

物 质

分 子

【分子】物质中独立存在，并保持其物理、化学特性的最小单元，是物质由宏观结构进入微观结构的第一个层次，由一个或若干个原子组成。由一个原子组成的分子称单原子分子，如氦 He、氖 Ne 等惰性气体；由两个原子组成的分子称双原子分子，如氢 H₂、氯化氢 HCl；由三个或更多个原子组成的分子称为多原子分子，如水 H₂O、苯 C₆H₆。许多生命不可缺少的分子包含的原子数目极多，有的可达几兆。多原子分子中的诸原子有一定的排列方式和次序。原子的种类和数目均相同，而排列次序和方式不同，可能形成不同分子。成分相同而结构不同的分子称为同分异构体。原子在分子中排列次序和空间分布的特性称为分子的构型。对于确定的构型，关于原子相对位置的特征称为分子的构像。每个分子都有确定的质量，一般为 10^{-27} — 10^{-24} Kg 量级。分子的质量与¹²C 原子质量的 1/12 之比，叫做该分子的分子量。通常把分子量大于 10^4 的分子

称为高分子。分子量可以通过实验测定，方法有多种，尤以质谱法为佳。分子永远处于运动之中，包括整体运动和内部运动。通常视分子为球型，其大小用直径或体积描述。两个同种分子接近到排斥力的作用使它们不可能再靠近时，两个分子中心之间的距离就是这种分子的直径。一般为 10^{-10} — 10^{-9} m 量级。

【分子量】 分子的质量与 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 之比。参见“分子”。

【气体动理〔学理〕论】 旧称分子运动论。从物质的微观结构出发阐明热现象规律的理论。它的基本思想：宏观物质由巨大数量的不连续的微小粒子（即分子或原子）组成，分子之间存在一定间隙，它们总是处于热运动之中。分子之间还存在相互作用（吸引和排斥），称为分子力。分子力使分子聚集在一起，在空间形成某种规则分布（通常叫做有序排列）；热运动的无规性破坏这种有序排列，使分子四散。正是这两方面的共同作用，决定了物质的各种热学性质，例如物质呈现出固、液、气三态及相互转化。气体动理论阐明了气体的物理性质和变化规律。它把系统的宏观性质归结为分子的热运动及它们间的相互作用，因此能深刻地洞察宏观现象的本质。它不研究单个分子的运动，只关心大量分子集体运动所决定的微观状态的平均结果。实验测量值就是平均值。例如，容器中作用于器壁的宏观压强，是大量气体分子与器壁频繁碰撞的平均结果。理论上，气体动理论以经典力学和统计方法为基础，对热运动及相互作用做适当的简化假设，给出分子模型和碰撞机制，借助概率理论处理大量分子的集体行为，求出表征集体运动的统计平均值。计算结果与实验测量值的偏差，作为修改模型的依据，从而形成自身的理论体系。这就是气体动理论的研究。

究方法。它不仅可以研究气体的平衡态，而且可以研究气体由非平衡态向平衡态的转变，解释输运现象的本质，导出输运过程遵守的宏观规律。气体动理论是吉布斯统计力学出现之前的关于物质热运动的微观理论，后来成为统计力学的一部分，并促进了它的发展。1658年，伽桑迪提出物质是由分子构成的假说。假想分子是硬粒子，能向各个方向运动，并进一步解释物质的固、液、气三态的转变。1678年，胡克提出同样主张，并认识到，气体的压力是气体分子与器壁碰撞的结果。1738年，伯努利发展上述思想，从气体分子与器壁碰撞的观念出发，导出了玻意耳定律。1744—1748年间，罗蒙诺索夫（俄）提出，分子与原子不同，一个分子可以含有数个原子；明确指出热是分子运动的表现，气体分子运动是无规则的；还肯定了运动守恒原理在分子运动中的正确性。此后一个世纪，气体动理论才又获得飞跃发展。1857年，克劳修斯（德）第一次清楚地说明统计概念，导出了气体压力、体积和温度间的正确关系，还于1858年引入分子运动自由程概念。1859年，麦克斯韦导出了速度分布律，建立了输运过程的数学理论。1868年，玻耳兹曼在速度分布律中引入重力场。后来的分子束实验证明，这两个分布律都是正确的。1872年，他又给出气体动理论的基本方程——玻耳兹曼积分微分方程。至此，气体动理论就发展成一门系统的理论。对于布朗运动的研究在气体动理论建立的过程中起过重要作用。1827年，布朗观察到悬浮在水中的花粉等物质微粒的无规则运动。1877年，德耳索指出，微粒的不规则运动是液体分子对它的不平衡碰撞引起的。1905年及稍后，爱因斯坦、斯莫卢霍夫斯基和朗之万分别发表了他们关于布朗运动的理论。1908年，佩兰的系统实验观察，证实了上述理论的正确性。布朗运动的研究表明，分子永远处于无规则的运动中，而且存在涨落。

这对气体动理论是个有力的支持。

【标准状态】 又称标准状况、标准条件。即温度为 273.15K (即 0℃), 压强为 1 个标准大气压 ($1\text{atm}=101325\text{Pa}$) 的状态。

【物质的量】 描写物质系统包含结构粒子多少的物理量。国际单位制中 7 个基本物理量之一。单位为摩尔 (mol)。结构粒子可以是原子、分子、离子、电子中的任何一种或其他种粒子, 也可以是这些粒子的特定组合。物质的量与质量是两个不同的物理量。在分子物理的许多问题中, 半导体材料掺杂中, 核素成分的分析中, 以及大量的物理过程和化学过程中, 用以摩尔为单位的物质的量来表示, 比用以千克为单位的质量来表示, 更能反映问题的内在本质。因为在这些过程中, 实质上起决定性作用的, 是不同种类的粒子数目的比例, 而不是它们力学质量的比例。

【摩尔】 旧称克分子、克原子。物质的量的单位, 符号为 mol。一摩尔任何物质所包含的结构粒子的数目都等于 0.012kg 碳-12 所包含的碳原子的个数, 即 6.0221367×10^{23} 个。结构粒子可以是分子、原子、离子、电子或其他粒子, 以及这些粒子的特定组合。有时, 把一摩尔物质的质量称为该物质的摩尔质量, 用符号 μ 表示。如氢 H_2 的 $\mu=2.02 \times 10^{-3}\text{kg}$ 。质量为 M 的物质, M 与 μ 之比称为该物质的物质的量 (又称摩尔数) ν , $\nu=M/\mu$ 。例如 $M=4.04 \times 10^{-3}\text{kg}$ 氢 H_2 的 $\nu=2$ 。一摩尔物质所占的体积 V_m , 称为摩尔体积。气体的摩尔体积依赖于温度和压强。标准状态下, 理想气体的 $V_m=22.41410 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。固态和液态物质的摩尔体积与温度、压强的关系较小。

【热运动】自然界中独立存在的基本运动形式之一。有巨大数量微观粒子（分子、原子、电子或点阵粒子等）参与的永不停息的无规则运动，并伴有频繁碰撞。宏观物质由巨大数量的微观粒子构成。例如一摩尔物质，所含的结构粒子数目就有 10^{23} 量级。永恒运动是微观粒子的固本性。每个粒子都在运动着的复杂多变的其他粒子作用下运动，呈现出宏观不可控制的瞬息万变的杂乱状态。这势必导致限定范围内（即该物体中）大量粒子频繁碰撞。标准状态下，每立方厘米气体，在一秒钟内，分子碰撞的次数为 10^{29} 量级。每次碰撞，粒子都改变运动状态，从而加剧了运动的无规性。分子碰撞的剧烈程度随温度升高而加剧，故称热运动。固体中的点阵粒子之间，虽然并不发生直接的物理接触，但是粒子热振动间存在相互作用，其中某些效果犹如流体分子之间发生的碰撞。可见，热运动是宏观物体客观存在的一种自然形态。“无规性”并不是没有规律可循。每个粒子都是一个力学体系，都遵循力学规律，只是宏观条件无法简单地有规律地对其进行控制。宏观条件只能决定大量粒子的整体运动行为。单个粒子的机械运动与粒子总体的热运动是两种性质不同的独立运动，分别遵守力学规律和统计规律，它们是本质上不同的两种规律。从实验上总结出的热运动宏观理论是热力学。揭示热运动微观本质的理论是统计物理学，而气体动理论则是它的一个组成部分。

【分子力】又称分子间力。两个分子之间的电相互作用。分子由若干个原子组成，每个原子由一个带正电的原子核和若干个带负电的电子组成，电子绕核快速转动。分子是带等量异号电荷的电中性的多粒子束缚体系。正负电荷系中心不重合的分子，具有永久

性电偶极矩，称为有极分子（见“共价键”）；正负电荷系中心重合的，不具有永久性电偶极矩，称为无极分子。实验表明，分子力为吸引力和排斥力的矢量和。按照产生机理之不同，分子力可分为：（1）两个有极分子相距很近时，按它们的相对取向，可能相互吸引或排斥。这种偶极相互作用是静电力。（2）有极分子的电场可以使邻近的无极分子极化，产生的偶极矩称为诱导偶极矩。这两个分子间的永久电偶极矩和诱导电偶极矩的相互作用，称为诱导力。这种作用也发生在有极分子之间。（3）无极分子中电子快速运动引起电荷分布不停地瞬间起伏，产生瞬时电偶极矩。两个无极分子靠近到一定程度，它们的瞬时偶极矩相互影响，使每个分子的电子云偏向一侧，核偏向另一侧，即两个分子互相极化，产生瞬时诱导电偶极矩。一个分子的正电荷中心靠近另一个分子的负电荷中心，两个分子互相吸引（也可能有相反的情况，但是不稳定）。这种瞬时偶极矩和瞬时诱导偶极矩产生的相互作用称为色散力（或伦敦力）。（4）两个分子靠得更近时，电子云互相重叠，使两个分子互相排斥。这种排斥力称为交换力（或泡利力）。分子间相互作用的规律较复杂，理论处理只能采用些简化方法。一种常用的模型，假定分子力具有球对称性，中心相距 r 的两个分子之间的相互作用力 $f(r)$ ，用半经验公式

$$f(r) = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t}$$

近似描述。式中 λ 、 μ 、 s 、 t 都是与 r 无关的正数，由实验确定。第一项为正值，表示斥力；第二项为负值，表示引力。一般 $s=9-15$ ， $t=4-7$ 。这种随分子间距 r 的增大而急剧减小的力称为短程力。由于 $s>t$ ，斥力比引力的力程更短。分子力开始起作用的距离称为有效作用距离。一般为 10^{-9}m 。 r 大于此值时分子力完全可

忽略不计；当 $10^{-10}\text{m} < r < 10^{-9}\text{m}$ 时，引力（绝对值）大于斥力，分子间的相互作用表现为吸引；当 $r \leq 10^{-10}\text{m}$ 时，斥力大于引力，分子相互排斥。在

$r = (\lambda/\mu)^{\frac{1}{s-1}}$ 处，引力与斥力相等，分子力为零。用 r_0 表示这个距离，称 r_0 为平衡距离或平衡位置。在分子力作用下，分子间存在相互作用势能，选 $r = \infty$ 为势能零点，在 r_0 处， $f(r_0) = 0$ ，势能取极小值。若该处分子动能小于势能，分子只能在 r_0 附近作微小振动，物质呈凝聚态。分子力是决定物质基本性质的重要因素。例如，物质处于何种聚集态，气体、液体的物态方程，粘滞系数，扩散系数，表面张力等都与分子力密切相关。20 世纪 70 年代前，关于分子力的大部分资料，都是从研究大块物质推断出来的。此后，从个别分子的研究中得到了更直接的资料。例如通过分子束实验，对两三个原子或分子形成的所谓范德瓦尔斯分子的研究，揭示了许多有关分子力的性质。

【物态参量】描写平衡态属性的物理量。由大量分子或原子构成的物体（或物体系）称为热力学系统，简称系统。在不受外界影响的条件下，热力学系统的宏观性质不随时间变化的状态，称为平衡态。实际情况中，并不存在完全不受外界影响且宏观性质绝对不变的系统。所以，平衡态只是个理想概念，是在一定条件下实际情况的良好近似。即使宏观性质不随时间变化的系统，其中的所有分子仍处于热运动之中，只是平均效果是恒定的，所以这种平衡称为热动平衡。描写平衡态属性的物理量称为〔物〕态参量。一般情况下，态参量可分为：热学参量（如温度）、力学参量（如压强）、几何参量（如体积）、化学参量（如混合物各组分的比例）以及电磁参量（如电场强度）等。一个具体系统，究竟需要

哪几类（或几个）参量来描述，由系统本身的性质决定。不同参量之间往往存在一定关系。

【理想气体】一种气体模型。主要特点：气体分子本身的线度与分子之间的平均距离相比，可以忽略不计；分子之间及分子与容器壁之间的碰撞是完全弹性碰撞；除碰撞的一瞬间，分子之间以及分子与器壁之间均无相互作用。这是一种假想气体。真实气体只有在密度足够低，或压强趋于零的条件下才接近理想气体。定量上，把任何情况下态参量都严格遵守物态方程 $pV = \nu RT$ 的气体，称为理想气体。式中： p 、 V 、 T 分别为平衡态气体的压强、体积和温度， R 为气体常量， ν 为该气体物质的量（又称摩尔数）。流体力学中，称理想气体为完全气体。

【普适气体常量】又称摩尔气体常量。表征理想气体性质的一个常量，用符号 R 表示。处于平衡态的一摩尔气体，在压强 p 趋于零的极限情况下，其体积 V_m 、温度 T 和 p 之间遵守 $pV_m = RT$ 。式中 R 是个与气体种类无关的常量，称为〔普适〕气体常量。其值由实验测定，1986 年的推荐值为 $R = 8.314510(70) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。括号中的数字 70 表示最后两位数 10 的误差，即 (10 ± 70) 。由 R 可以求得玻耳兹曼常量等几个热学常量。迄今为止，这几个常量的直接测量值，都不如从 R 推算的值精确。因此，改进 R 的测量方法，对热学具有重要意义。1988 年采用充气球形共振器测定声速的方法，给出 $R = 8.314471(14) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，其确定度仅为 1986 年推荐值的 $1/5$ 。

【阿伏伽德罗定律】描写理想气体性质的定律之一。有几种表述形

式。其一，在温度和压强分别相等的条件下，相同体积内的任何气体都含有相同数目的分子。在标准状态下， 1m^3 的任何气体所含的分子数均为 $n_0 = 2.686773 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ ， n_0 称为洛施密特常量。其二，在相同的温度和压强下，一摩尔的任何气体所占的体积都相同。标准状态下，一摩尔理想气体的体积 $V_m = 22.41410 \text{l} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。与此等价的表述：标准状态下，一摩尔任何气体所含的分子数均为 $N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ ， N_A 称为阿伏伽德罗常量。 N_A 体现了物质的量的规定性（见“摩尔”）。一摩尔任何物质所包含的结构粒子数都等于阿伏伽德罗常量。 N_A 还是联系某些宏观量（如法拉第常量 F ，气体常量 R 等）与微观量（如基本电荷 e ，玻耳兹曼常量 k 等）之间关系的一个基本常量： $F = N_A e$ ， $R = N_A k$ 等。任何实验都需在宏观世界进行。对各种微观物理量的实验研究，都须通过宏观量的测量导出。 N_A 就在其中起桥梁作用。 N_A 值之大，正说明微观世界之小。阿伏伽德罗定律对原子分子学说的确立，对化学的发展，都起了重要作用。这个定律可以从气体动理论的一般规律推导出来。上面 n_0 、 V_m 、 N_A 三个数据均为 1986 年的推荐值。

【气体〔物〕态方程】 又称气体的“状态方程”，即描写平衡态气体态参量之间关系及变化规律的数学方程。处于平衡态的质量一定的气体，其压强 p 、体积 V 和温度 T 等参量都有确定值，它们之间存在一定的函数关系 $F(p, V, T) = 0$ ，这个关系称为态方程。它表明，系统的状态可由 T 、 p 、 V 中任意两个独立参量描写，另外一个则由这两个参量按态方程唯一确定。态方程的具体形式通过实验建立，并且都可以从气体动理论推导出来。例如玻意耳定律、查理定律、盖—吕萨克定律等，都是从实验总结出来的态

方程。在温度充分高，压强充分低的情况下，所有气体都基本遵守理想气体的态方程。在温度较低、压强较高的情况下，真实气体与理想气体偏离较大。描写真实气体的态方程有多种，例如范德瓦尔斯方程，卡末林—昂内斯方程等。它们也是在某一有限温度和压强范围内，与实验符合较好。

【玻意耳定律】又称玻意耳—马略特定律。理想气体的实验定律之一。基本内容：质量一定的气体，在温度不变的情况下，体积 V 与压强 p 成反比，它们的乘积为一常量 C ， $pV=C$ ， C 的值由气体的质量和温度决定。大量实验表明，不论何种气体，只要压强不太高，温度不太低，都近似遵守此定律。压强愈低，准确程度愈高。对理想气体，该定律严格成立。此定律可以从气体动理论导出。

【查理定律】理想气体的实验定律之一。基本内容：质量一定的气体，在体积不变的情况下，压强 p 与摄氏温度 t 之间的关系满足 $p=p_0(1+\alpha t)$ ，式中 p_0 为 $t=0^\circ\text{C}$ 时的压强，常量 α 由实验测定，对一切气体都有 $\alpha\approx(273.15\text{K})^{-1}$ 。此定律亦可写成 $p=p_0\alpha T$ ，式中 T 为热力学温度。实验证明，实际气体与此定律有一定偏差，压强愈低，偏差愈小。对理想气体，它严格成立。此定律可以从气体动理论导出。

【盖—吕萨克定律】理想气体的实验定律之一。基本内容：质量一定的气体，在压强不变的条件下，体积 V 与温度成线性关系， $V=V_0(1+\alpha t)$ ，式中 V_0 为摄氏温度 $t=0^\circ\text{C}$ 时的体积，常量 α 由实验测定，对一切气体都有 $\alpha\approx(273.15\text{K})^{-1}$ 。该定律亦可写成 $V=$

$V_0 \propto T$ ，式中 T 为热力学温度。实验证明，压强不太高，温度不太低的实际气体，近似遵守此定律。压强愈低，符合得愈好。理想气体严格遵守此定律。这个定律可以从气体动理论导出。

【道尔顿〔分压〕定律】关于混合气体压强的实验定律。混合气体的压强 p 等于各组份分压强 p_i 之和， $p = \sum_i p_i$ 。式中 \sum_i 表示对混合气体中所有的组份求和。 p_i 表示第 i 种气体以化学纯的形式单独存在，并具有混合气体的温度和体积时所具有的压强。这个定律只有在混合气体的压强较低时才成立，即只适用于理想气体。它可以由气体动理论推导出来。

【理想气体〔物〕态方程】关于理想气体〔物〕态参量间的关系及其变化规律的数学方程。一切气体的压强 p 、体积 V 和温度 T 之间的关系及变化规律都具有共性。物质的量（又称摩尔数）为 ν 的气体，处于压强较低的平衡态时，遵守

$$pV = \nu RT, \quad (1)$$

式中 R 为气体常量。对于质量为 M ，摩尔质量为 μ 的化学纯气体 $\nu = M/\mu$ 若为混合气体 $\nu = \sum_i M_i/\mu_i$ 。式中 M_i 和 μ_i 分别为第 i 种气

体的质量和摩尔质量， \sum_i 表示对混合气体中所有组份求和。若令

$M = \sum_i M_i$ ，那么 $\bar{\mu} = M/\nu$ 称为混合气体的平均摩尔质量。空气的 $\bar{\mu} = 28.9 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$ 。

方程 (1) 是从玻意耳定律、阿伏伽德罗定律和理想气体温标的定义导出的，是实验事实的总结。它忽略了分子力和分子自身的体积，只是常压（一个大气压量级）下实际气体的近似表述。压强

越低，近似程度越高。在压强趋于零的极限情况下，一切气体都严格遵守它。这个方程可以从气体动理论导出。严格遵守方程(1)的气体称为理想气体。

【范德瓦尔斯气体】实际气体的一种模型。它把分子看成有一定大小（直径为 d ）的刚性球。两个分子中心的距离 $r > d$ 时，它们之间有相互吸引力。这个引力及其产生的相互作用势能的大小，因 r 值之不同而异。 r 很大时（大于 10^{-9}m ），引力可忽略不计，相互作用势能为零。考虑分子力，是范德瓦尔斯气体与理想气体的基本差别。

【范德瓦尔斯方程】范德瓦尔斯气体遵守的物态方程。处于平衡态的 1mol 范德瓦尔斯气体的物态参量，满足方程

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (1)$$

式中： p 为压强， V_m 为摩尔体积， T 为温度， R 为气体常量； a 与 b 称为范德瓦尔斯常量，对不同气体，其值不同，由实验测定。当忽略 a 、 b 时，方程(1)变为

$$pV_m = RT, \quad (2)$$

这是理想气体的物态方程，它忽略了分子力。考虑分子力，是范德瓦尔斯气体与理想气体的基本差别。气体中的每个分子都处于周围分子的作用下，作用是球对称的，各方向的效果互相抵消。但是，靠近容器壁分子，只受其他气体分子向内的吸引力（可以证明，器壁分子与气体分子间的相互作用，对压强无影响），失去

球对称性。方程 (1) 中的 a/V_m^2 就是由此引起的压强修正 (相对理想气体而言), 称为气体的内压强。常量 a 由气体的性质决定, 表示 1 mol 气体占据单位体积时, 由于分子相互间的引力引起的压强减小量。理想气体不考虑分子力, 分子间也就没有斥力, 分子是没有大小的质点, 所以 V_m 就是每个分子自由活动的空间体积。范德瓦尔斯气体存在分子力, 排斥力导致分子有一定大小 (其有效直径用 d 表示), 而不能视为质点。因此每个分子活动的空间势必小于 V_m 。方程 (1) 中的 b 就是由此引起的体积修正量。一个分子的体积为 $\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3$ 。理论上可以证明, b 为 1 mol 气体的所有分子总体积的 4 倍,

$$b = 4N_A \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (3)$$

式中 N_A 为阿伏伽德罗常量。按 $d=10^{-10}\text{m}$ 计算, $b\approx 10^{-5}\text{m}^3$, 仅为标准状态下 V_m 的万分之四。在一定温度下, 当压强很低 ($p\rightarrow 0$) 时, V_m 很大, 与 V_m 相比, a 、 b 都可忽略不计, 范德瓦尔斯方程 (1) 趋于理想气体方程 (2)。当压强高时, 改正量 a 、 b 就重要了, (2) 式不再成立, (1) 式才是足够好的近似。对于质量为 M 、体积为 V 的范德瓦尔斯气体, 物态方程应写为

$$\left[p + \frac{M^2 a}{\mu^2 V^2}\right] \left[V - \frac{M}{\mu} b\right] = \frac{M}{\mu} RT \quad (4)$$

式中 μ 为气体的摩尔质量, $\frac{M^2 a}{\mu^2 V^2}$ 为内压强。

1873 年范德瓦尔斯 (1837—1923, 荷) 提出了这个经验方程。它能给出较高压强下实际气体物态参量间的关系及其变化规律, 与实验符合较好。推广之后还可近似用于液体。它是许多模型中最简单、使用最方便的一个。但是, 对于实际气体, 它仍然是一

种近似，即方程（1）或（4）对实际气体只是近似成立。

【卡末林—昂内斯方程】写成级数形式的实际气体的〔物〕态方程。压强为 p 、体积为 V_m 的一摩尔实际气体，处于平衡态时，

$$pV_m = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots, \quad (1)$$

或者写成

$$pV_m = A + \frac{B'}{V_m} + \frac{C'}{V_m^2} + \frac{D'}{V_m^3} + \dots, \quad (2)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 、 \dots （或者 A 、 B' 、 C' 、 D' 、 \dots ）依次称为第一、二、三、四、 \dots 位力系数（旧称维里系数）。它们都有各自的表达式，是温度 T 的函数，并与气体的性质有关，表征实际气体与理想气体的偏离程度。 $A=RT$ ， R 为气体常量。当 $p \rightarrow 0$ 时，方程（1）右边只保留 A ，变为理想气体方程，是分子间不存在相互作用，分子本身的大小可以忽略不计的情况。第二项 Bp 代表分子成对相互作用的贡献。其他高次项分别代表 3 个、4 个分子相互作用的贡献。位力系数可由实验确定。实验表明，第 4 项以后的值很小。实际应用中，取前二、三项就足够了。这个方程是实际气体〔物〕态方程最完全的表述形式，应用范围广，适应性强，并且有重要的理论意义。从物质微观结构的理论导出的态方程，一般都可以写成（1）式的级数形式。例如范德瓦尔斯方程，若写成（1）式的形式，则有 $A=RT$ ， $B=RTb-a$ ， $C=RTb^2$ ， \dots ，式中 a 、 b 为范德瓦尔斯常量。

【位力系数】 见“卡末林—昂内斯方程”。

【统计规律】 在一定条件下，某个事件以一定的概率发生。宏观物

质都由巨大数量的微观粒子组成，例如一摩尔物质所包含的分子或其他结构粒子的数目为 10^{23} 数量级。每个粒子都处在其他粒子作用的环境中，按照牛顿运动定律做机械运动。对于数量如此之多的粒子，想求出每一个粒子的运动状态是不可能的。即使可能，也没有实际意义。因为单个粒子的微观状态与整个系统的宏观性质，并没有简单的直接对应关系。特别是，宏观过程和微观过程的尺度相差极其悬殊。例如标准状态下， 1 cm^3 气体约含 2.7×10^{19} 个分子，一秒钟内约发生 10^{29} 次碰撞。如果考察十亿分之一立方厘米 (10^{-9} cm^3) 内的情况，宏观上可谓足够小，但其中的分子数目仍需以百亿 (2.7×10^{10}) 计，微观上仍足够大；进而，把考察时间缩短为一微秒 (10^{-6} s)，宏观上已足够短，然而 10^{-9} cm^3 内的碰撞次数仍需以百万亿 (10^{14}) 计，可见微观上时间仍相当长。因此，宏观尺度上不随时间变化的稳定状态，微观上已经历瞬息万变的无数运动状态。因此，对宏观状态的任何一次测量，实际上都是巨大数量微观状态的平均效果，而测量本身就是一种统计平均。表征系统特征的一切宏观物理量，客观上都只能是各种微观状态的统计平均值。因此，求热运动宏观量的问题，是个统计问题。系统中每个微观粒子的机械运动都遵守力学规律，初始条件一经给定，此后任一时刻的运动状态就完全确定。力学规律是决定性的规律。但是，由巨大数量微观粒子组成的宏观系统，总是处于热运动之中。热运动虽然以简单的机械运动为基础，但本质上它是与机械运动不同的更复杂的运动形式。它既不属于单个微观粒子的力学行为，也不是它们的简单叠加，而是性质不同的另一类运动。系统的宏观热学性质并不遵守机械运动规律。对应一个宏观状态的诸微观状态，并不由宏观条件决定。所以，把宏观条件不能控制的微观状态，称为偶然事件。宏观量是大量偶然事件的统

计平均结果。统计平均有自己遵循的规律，它不能指出系统一定处在或一定不处在某个状态（或它的小邻域内）；也不能肯定某个事件一定发生或一定不发生。它只能给出这些情况的概率，这就是统计规律。它是与确定性的力学规律本质上不同的全新规律。统计规律有两个特点。一是稳定性，即在一定条件下，系统处于某种状态范围内的概率是完全确定的。例如平衡态气体系统，在考察时刻，某个分子朝哪个方向运动，速率多大，纯属偶然。但是系统作为一个整体，处于某一速度区间的分子数占分子总数的比例，则是完全确定的。它们遵守麦克斯韦速度分布。二是永远伴随着涨落。由于热运动，达到平衡态的系统仍可能不断地偏离平衡态。一切宏观量的某一次具体实验测量值，都具有偶然性，一般都与系统平均值有偏差。例如，任一时刻，实际分布在某一速度区间的分子数，与麦克斯韦分布计算的数值，总有某些偏离。这种某一次具体实验测量值相对统计平均值偏离的现象，称为涨落。因为统计平均值正是以大量偶然事件为基础，是对它们进行平均的结果，所以统计规律与涨落现象不可分割，是客观世界的偶然性同必然性在因果关系上的统一。理论和实验都证明，系统中的粒子数越多，涨落越不明显；若粒子数极少，涨落就很严重，热运动退居次要地位，力学规律将占主导地位，统计规律对它就没有意义了。统计规律是相当广泛的一种普遍规律，它对包括热现象在内的一切涉及统计问题的自然和社会现象都适用。

【速率分布函数】处于平衡态的气体，速率 v 附近单位速率间隔内的分子数与分子总数的比率。宏观气体系统包含巨大数量的分子，它们总是处于热运动状态。若在某一时刻考察任意一个分子的速率，其大小完全是偶然的，即每个分子的速率具有各种可能值，而

且还将不断地变化。但是，实验和理论都表明，平衡态系统中，处于某一速率范围内的分子数占分子总数的比率，即分子按速率的分布，是完全确定的。它遵守统计规律，称为分布律。含有 N 个分子的宏观气体系统，若有 dN 个分子的速率在 $v-v+dv$ 之间，比率 dN/N 显然与速率 v 及速率间隔 dv 之值有关，可以写成 $dN/N=f(v)dv$ ，那么

$$f(v) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv}$$

表示在 v 附近，单位速率间隔内分子数的比率，称为速率分布函数。 $f(v)$ 与 v 的关系曲线称为速率分布曲线。热运动，即气体分子无规运动和频繁碰撞，是处于平衡态的气体分子具有确定速率分布的基本原因。对于给定的 $f(v)$ ，可以通过积分求出速率在 v_1-v_2 范围内的分子数 ΔN 占总分子数的比率 $\Delta N/N$ 。全部分子必然百分之百地在 0 到 ∞ 的整个速率范围内，所以

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

此式称为速率分布函数的归一化条件，是 $f(v)$ 的物理意义决定它所必须满足的条件。

【麦克斯韦速率分布】 平衡态理想气体分子按速率分布的统计规律。处于平衡态的定量化学纯气体，在忽略分子间相互作用时，以盛气体的容器为参考系，任意速率 $v-v+dv$ 区间内的分子数 dN ，占分子总数 N 的比率

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right] v^2 dv \quad (1)$$

称为麦克斯韦速率分布，表达式

$$f(v) = 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right] v^2 \quad (2)$$

称为这个分布的速率分布函数。式中： v 是热力学温度， m 是每个分子的质量， k 是玻耳兹曼常量。以上两式表明，处于平衡态的气体，并不因为分子无规则运动和频繁碰撞，所有分子就都具有完全相同的均一速率，而是各种速率的分子都有，并以一定的概率出现。(2) 式指出， v 值从 0 开始， $f(v)$ 随 v 增加而增大，达到极大值后，又随 v 之增加而减小，速率分布曲线渐近横坐标轴。气体分子的速率 v 可能取 0— ∞ 之间的一切数值。速率很小和很大的分子都很少，中等速率的分子所占的比率最大。使 $f(v)$ 取极大值的速率用 v_P 表示，

$$v_P = \sqrt{2kT/m} \quad (3)$$

称为最概然速率（旧称“最可几速率”）。若把整个速率范围分成许多等间隔的小区间， v_P 所在的那个小区间比任何其他区间的分子数都多。麦克斯韦速率分布已经被一系列实验证明是正确的。应用它，可以求出某些与分子无规律运动有关的物理量的统计平均值。处于平衡态的大量气体分子，速率的算术平均值称为平均速率，用符号 \bar{v} 表示，

$$\bar{v} = \sqrt{8kT/\pi m} \quad (4)$$

速率 v 的平方 v^2 平均值 \bar{v}^2 的平方根 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 称为均方根速率，

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{3kT/m} \quad (5)$$

气体分子的三种速率 v_P 、 \bar{v} 和 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 都与 \sqrt{T} 成正比，与 \sqrt{m} 成反比；三者中 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 最大， v_P 最小，

$$v_P : \bar{v} : \sqrt{\bar{v}^2} \approx 1.41 : 1.60 : 1.73 \quad (6)$$

室温下，它们的数量级一般为每秒几百米。在不同问题中，三者各有其用途。讨论速率分布时，往往用到最概然速率 v_P ；计算分子运动的平均距离时，要用到平均速率 \bar{v} ；计算分子平均动能时，要用到方均根速率 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 等等。麦克斯韦速率分布只适用于大量分子 (N 很大) 的平衡态系统。因此，速率间隔 dv 必须取得宏观小、微观大，涨落现象引起的偏差才可以忽略。否则，若问具有确定速率 v 的分子有多少，是没有意义的。对于混合气体，没有统一的速率分布函数。因为不同组份中单个分子的质量 m 不同。但是对其中的各组份，麦克斯韦速率分布仍适用。它也适用于非理想气体、液体或固体系统。上述讨论只适用于 v 比光速小得多的情形。

【最概然速率】见“麦克斯韦速率分布”。

【麦克斯韦—玻耳兹曼分布】微粒按速度及势能分布的统计规律。处于保守力场中的平衡态气体，位于空间坐标 $x \rightarrow x+dx$, $y \rightarrow y+dy$, $z \rightarrow z+dz$ 区域内，同时速度 \vec{v} 的三个分量在 $v_x \rightarrow v_x+dv_x$, $v_y \rightarrow v_y+dv_y$, $v_z \rightarrow v_z+dv_z$ 区间内的平均分子数为

$$dN = n_0 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\epsilon/kT}$$

$$dx dy dz dv_x dv_y dv_z,$$

称为麦克斯韦—玻耳兹曼分布。式中： k 为玻耳兹曼常量， v 为气体的热力学温度， m 和 Σ 分别为每个分子的质量和总能量， $\epsilon = \frac{1}{2}mv^2 + \epsilon_P$ ， ϵ_P 为处在 (x, y, z) 邻域内的每个分子的势能， n_0 为 $\epsilon_P = 0$ 处单位体积内的分子数。这个分布适用于任何保守力场（重力场、电场等）中的任何物质微粒（气体、液体或固体中的原子、分

子，布朗微粒等)，是个普遍规律。

【分子的自由度】决定分子位形所需的独立坐标数目。每个分子都由若干个原子构成。若把原子视为质点，每个原子的位置就由空间坐标 x 、 y 、 z 三个独立参量确定， N 原子分子的自由度为 $3N$ 。若分子运动受到限制，自由度会减少。作为一个整体，分子有平动和转动。分子内部有振动。确定质心平动的位置，需 3 个自由度；确定转轴方向，需两个角度（空间三个方位角中只有两个是独立的），确定分子绕轴的转动，需一个角度，故转动有 3 个自由度，线型分子（所有原子都处在一条直线上）只有 2 个转动自由度；余者为振动自由度。所以， N 原子分子有 $3N-6$ 个振动自由度，若为线型分子，则为 $3N-5$ 。例如：单原子分子共有 3 个自由度。双原子分子共有 6 个自由度，其中包括决定质心位置的 3 个平动自由度，决定两原子连线（分子轴）方位的 2 个转动自由度，和决定两原子相对位置的 1 个振动自由度。3 原子分子共有 9 个自由度，其中平动、转动、振动各 3 个；若为线型分子，如 CO_2 ，则分别为 3、2、4。

【能量均分定理】关于分子热运动动能的经典统计规律。是个近似定理。每个分子都是一个力学体系。在经典力学中，分子的能量是广义坐标和广义动量的函数，数学表达式为含有它们的各平方项之和。能量均分定理指出，温度为 T 的平衡态系统，分子能量表达式中，每一平方项的统计平均值都等于 $kT/2$ 。 k 为玻耳兹曼常量。这个定理也叫做能量按自由度均分定理，表述为：温度为 T 的平衡态系统中，分子每个自由度的平均动能为 $kT/2$ 。把分子内原子的微振动看成谐振动，谐振动在一周期内的平均势能等于

平均动能。这样，一个振动自由度对平均能量的贡献就为 $kT/2$ 的两倍（所以，“能量按自由度均分”的表述不够准确）。若分子的平动、转动、振动自由度依次为 t 、 r 、 s ，那么每个分子的平均总能量 $\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} (t+r+2s) kT$ 。对单原子分子， $t=3$ ， $r=s=0$ ， $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT$ 。对双原子分子， $t=3$ ， $r=2$ ， $s=1$ ， $\bar{\epsilon} = \frac{7}{2} kT$ 。

能量均分定理是经典统计力学的一个理论结果，适用于大量分子的统计问题。至于个别分子，任一瞬间某种形式的动能或总动能，完全可能与该定理确定的平均值相差很大，而且各种形式的动能也不一定按自由度均分。能量均分定理成功地解释了理想气体的内能，得到了与实验符合的单原子分子的定容热容。但是在许多方面也遇到了困难。例如实验表明，双原子分子或多原子分子的定容热容随温度而变，能量均分定理给出的结果却与温度无关。量子理论指出，双原子分子的振动能 ϵ_v 和转动能 ϵ_r 不随温度连续变化，只能取一系列离散值：

$$\epsilon_v = (v + 1/2)h\nu, (v = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\epsilon_r = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J+1), (J = 0, 1, 2, \dots)$$

实验证明，它们是正确的。式中： h 为普朗克常量， ν 为振动频率， I 为两原子绕质心的转动惯量， v 与 J 分别称为振动量子数和转动量子数。通常 $h\nu$ 为 k 的数千倍，只有当 $T \geq 10^3 K$ 量级时，能量均分定理给出的振动能才与量子理论大体一致；温度低时，偏差是显著的。同理， $h^2 / (8\pi^2 I)$ 约为 k 的数十倍， $T < 10^2 K$ 量级时偏差也很显著。与量子理论不同，能量均分定理把振动能和转动能看成温度的连续函数，因此，原则上是不正确的，只是高温下近似成立。温度高低的界限，由所考察的气体分子的振动频率和转

动惯量决定，并无统一的数量界限。

【输运现象】又称输运过程、迁移现象或迁移过程。系统从非平衡态趋向平衡态过程中产生的动量、能量或质量的传输现象。处于非平衡态的孤立系统，总是趋向平衡态，并且经过足够长的时间终将达到平衡态。如果流体（气体或液体）中各部分的流速不同，将通过动量传输，消除各部分之间的宏观相对运动。这种现象称为粘滞性或内摩擦。如果系统中温度不均匀，将通过内能传输，消除各部分之间的温度差异。这种现象称为热传导。如果系统中密度不均匀，将通过质量转移，消除各部分之间的密度差异。这种现象称为扩散。这三种过程统称为输运过程。物质内部速度、温度和密度不均匀性的定量描述，是相应物理量的梯度。实验表明，动量、能量和质量的输运，分别与相应的梯度成正比。以此为基础，建立起来的输运过程的宏观理论，分别为牛顿粘滞定律，傅里叶定律和斐克定律。每个定律中的比例系数均由实验测定。气体动理论揭示了气体中输运过程的微观本质，导出了上述三个定律，并给出相应比例系数与微观量之间的关系，确立了输运过程的初级理论。简言之，这种理论把气体分子当作刚性球，把分子间的碰撞简化为刚球的弹性碰撞。导致三种输运过程的共同因素，是分子的无规运动和碰撞。因而与平均自由程密切相关。虽然方法不够严格，结果也不够准确，但是却清楚地阐明了输运过程的物理实质，而且还得到一些与实验近似符合的重要结论。

【分子碰撞】相对运动的分子，受分子力的作用，显著改变运动状态的过程。宏观系统均由巨大数量的分子构成。气体分子总是处于热运动状态，频繁碰撞。一个分子同时与多个分子碰撞的概率

极小。通常“碰撞”均指两体间的相互作用。分子的碰撞机构很复杂，需选用适当的模型简化处理。常用的一种模型，把分子看成形状、大小都不变的表面光滑的刚性球，称为刚球模型。它不涉及分子内部结构，只考虑分子的平动。实验证明，两个分子的中心相距很远（见“分子力”， $r > 10^{-9}\text{m}$ ）时，分子力可以忽略不计，相互作用势能为零，总能量即为它们的初始动能。两个分子接近到 $r = d' \approx 10^{-9}\text{m}$ 时，分子间的引力开始起作用。随着 r 的减小，势能不断减小，动能不断增大。当 $r = r_0 \approx 10^{-10}\text{m}$ 时，势能最小，动能最大。 $r < r_0$ 时，斥力占主导地位，分子运动减慢，动能减小，势能增大。当减小到某个值 $r = d$ 时，动能全部转化为势能，此时分子速度为零。在强大斥力的作用下，两分子不但不能继续靠近，反而沿相反方向开始远离。 r 仍经历 d 、 r_0 、 d' ，直到 $r > d'$ ，相互作用又可以忽略不计。这个全过程称为分子碰撞。尽管过程经历的时间短暂，但毕竟不为零。因此，必须把碰撞视为一个过程，而不是立即完成。 $r = d$ 是两个分子中心所能接近的最小距离。若为同种分子，就把 d 作为分子大小的量度。它由排斥力决定，并与分子的初始动能有关。分子的平均动能与温度有关（参见“能量均分定理”）。所以温度不同的同种分子，大小不同，但是相差甚微。所以就把 d 的平均值称为分子的（有效）直径。把分子间吸引力开始起作用的 d' 的平均值，称为分子的有效作用距离。以 d' 为半径的球（球心位于分子中心）称为分子作用球。分子碰撞是使气体达到并保持平衡态的决定性因素，对讨论输运过程有重要意义。气体输运过程的初级理论主要从分子碰撞建立。刚球模型虽然与实际气体分子的性质相差较大，计算结果欠佳，但是计算简单，为许多实际问题提供了初步理论。碰撞过程中如果没有能量交换，或者同种分子碰撞虽有能量交换，但总能量不变，

称为弹性碰撞；否则称为非弹性碰撞。分子碰撞的概念对其他微观粒子（原子、离子、“基本”粒子）也有可借鉴之处。非弹性碰撞涉及到粒子内部状态的变化及反应等，内容丰富得多，复杂得多，刚球模型不适用。分子碰撞，以及分子与其他微观粒子的碰撞（参见“原子碰撞”），既是分子物理学的基本研究内容，又是研究分子结构、性质等的重要途径。

【碰撞频率】平衡态气体中任一分子单位时间与其他分子的平均碰撞次数。用符号 $\bar{\Theta}$ 表示。假定分子是刚性球，分子间完全是弹性碰撞，除了碰撞瞬间外，分子力可以忽略，那么在化学纯的气体中， $\bar{\Theta} = 4nd^2 \sqrt{\frac{\pi kT}{m}} = 4d^2 p \sqrt{\frac{\pi}{mkT}}$ ，式中： k 为玻耳兹曼常量， m 为分子质量， d 为分子直径， n 为分子数密度， p 为气体压强， T 为热力学温度。作为数量级估计，在标准状态下， $\bar{\Theta} = 10^9 - 10^{10} \text{s}^{-1}$ 量级。

【平均自由程】平衡态气体中，任一分子与其他分子两次相继碰撞之间通过的路程之平均值。常用符号 \bar{l} 表示。把气体分子看成形状、大小都不变的光滑刚性球，除碰撞的瞬间，它们作直线运动。宏观系统的分子数目极大，并且总是处于热运动之中，由于运动的无规性和频繁碰撞，单个分子的运动变化剧烈，某个分子任意两次相继碰撞，所通过路程之长短具有偶然性。但是，处于平衡态的气体，大量分子在一段时间内的平均结果，则是确定的。这就是平均自由程。

不同模型得到的平均自由程表达式不同。用 n 表示单位体积中的分子数， d 表示分子的直径，以导出者的名字命名，克劳修斯

平均自由程 $l_c = 3 / (4\pi d^2 n)$ ，麦克斯韦平均自由程 $\bar{l} = 1 / (\sqrt{2} \pi d^2 n)$ ，范德瓦尔斯平均自由程 $l' = \bar{l} - d/2$ ，泰特平均自由程 $l_T = 1 / (1.477\pi d^2 n)$ 。它们都由气体的种类和状态决定，只是数量略有差异。 l_c 较粗糙； l_T 较精确，但推导复杂；最常用的是 \bar{l} ， \bar{l} 与 l_T 之值相差约 4%。作为数量级估计，普通气体分子在标准状态下的平均自由程为 $10^{-8}—10^{-7}m$ 。用不同平均自由程公式导出的物理量也有所不同。如用 l_c 、 \bar{l} 和 l_T 导出的声速理论公式，均与压强无关。而实验表明，声速随压力的增加而增加。用 l' 导出的声速公式则体现了这一点，并且在 10—100atm 范围内，理论与实验符合很好。对于粘滞系数、导热系数、扩散系数等物理量，也有类似情况。在常压和低压下，用 l' 与 \bar{l} 得出的结果基本没有区别。单位时间内一个分子与其他分子的平均碰撞次数，称为碰撞频率。常用符号 $\bar{\Theta}$ 表示。 $\bar{\Theta}$ 与 \bar{l} 都表示分子碰撞的频繁程度。碰撞越频繁 ($\bar{\Theta}$ 大)，平均自由程越短 (\bar{l} 小)。对平均速率为 \bar{v} 的平衡态气体， $\bar{l} = \bar{v} / \bar{\Theta}$ 。气体运输的初级理论，真空技术和气体放电等领域，平均自由程是常用的物理量。

【粘滞性】 又称内摩擦。流体内部宏观相对运动展现的抵消这种运动的特性。假定流体沿空间坐标 y 方向流动，速率 u 沿垂直于 y 的 z 方向连续变化，梯度为 du/dz ，即 z 每增加一个小量 dz ， u 就增加 du 。设想流体沿 z 方向分为许多薄层，每层内流速基本一致，层与层间速率连续变化，即层与层之间存在相对宏观运动。流体中任意 $z = z_0$ 平面分开的两层，流速快的上层对流速慢的下层施以拉力，下层对上层施以阻力。这种宏观相对运动导致的作用与反作用现象，称为粘滞性或内摩擦。相互作用力称为粘滞力或内摩擦力。实验表明，施于 z_0 平面单位面积上的力 F 与速度梯度成正

比，

$$F = \eta \left[\frac{du}{dz} \right]_{z_0} \quad (1)$$

(1) 式称为牛顿粘滞定律，是宏观粘滞性流体力学的基础。式中比例系数 η 称为粘滞系数或内摩擦系数，其值与流体的性质和状态有关，由实验测定，单位为帕〔斯卡〕·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

气体动理论从微观上揭示了气体粘滞性的本质，并推导出 (1) 式。宏观物质由巨大数量的分子组成，气体分子总处于无规运动和碰撞中。这导致 z_0 平面上下两层中的分子彼此频繁进入对方。由于上层比下层的宏观定向流速大，上层中的一个分子沿 y 方向的动量也比下层的大。通过热运动，两层每交换一对分子的净效果是，上层动量减少，下层动量增加。大量分子热运动的宏观效果，使相邻两层气体互相摩擦，呈现粘滞现象。直到气体内各部分的宏观定向速率处处相等（即由非平衡态过渡到平衡态）为止。可见，粘滞性乃是分子热运动引起的定向动量输运过程。气体动理论还给出了粘滞系数 η 用分子平均自由程 \bar{l} 和平均速率 \bar{v} 表示的公式， $\eta = 0.499 \rho \bar{v} \bar{l}$ ， ρ 为气体密度。若用宏观量表示， η 与气体热力学温度 T 的平方根 \sqrt{T} 成正比，与压强 p 无关。实验证明，这些结论是正确的。因此，粘滞性成为气体动理论的有力实验验证，并对该理论的建立起了重要作用。

应该注意，气体分子的平均自由程 \bar{l} 相对盛气体的容器的线度 L 之大小，对过程的具体性质有直接影响。在 T 确定的情况下， \bar{l} 与 p 成反比。上述讨论只适用于压强较高，使得 $\bar{l} \leq L$ 的情况。这时，上述流体分层的分析中，每层的厚度为 \bar{l} ， z_0 平面上下两层中的分子进入对方，平均在 \bar{l} 距离就发生碰撞。若压强较低，使得 $\bar{l} > L$ ，分子之间很少发生碰撞，内摩擦可以忽略不计，气体分子与

容器壁的碰撞占主导地位。器壁和与其接触的气体层间宏观相对运动产生的摩擦，称为外摩擦。对于 $\bar{l} \approx L$ 的中等压强，内摩擦和外摩擦在动量输运过程中的作用处于同等地位。

液体粘滞性的宏观规律与气体同，但是微观机制有别。后者主要由分子无规运动和碰撞引起；前者主要是分子力的作用。微观结构决定了液体粘滞系数比气体的大得多，并且随温度升高显著下降。温度升高，分子热运动加剧，液体的流动性增大，粘滞性减少。反之亦然。

【热传导】 介质中的热运动把热量从高温区传到低温区的宏观过程。固、液、气态物质中都能发生热传导，并且具有相同的宏观规律。微观机制上，流体中的热传导由分子的非弹性碰撞引起；不导电固体中的热传导是点阵粒子的热振动所致；导电固体中的热传导由自由电子的运动产生。传热方式除热传导外，还有对流和辐射。在气体中，若温度 T 沿空间坐标 z 方向不均匀，间隔每增加一个小量 dz ， T 就升高 dT ，那么称 dT/dz 为温度梯度。这种系统中，将有热量从高温区传到低温区。实验表明，单位时间内，通过垂直 z 轴的任意 $z=z_0$ 平面内单位面积的热量 Q ，与温度梯度成正比，

$$Q = -\kappa \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_0}$$

此式称为傅里叶定律，是宏观热传导理论的基础。式中：比例系数 κ 称为导热率或导热系数，单位为瓦·米⁻¹·开⁻¹ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)；负号表示热量沿温度降低的方向输运。

气体动理论揭示了气体中热传导的本质，并推导出傅里叶定律，给出 κ 与微观量之间关系的表达式。设想气体沿 z 方向分成温

度连续递增的许多薄层，每一层内的温度基本相同。平面 z_0 分开的两个相邻薄层，高温层中的分子比低温层中的热运动激烈，平均动能大。由于热运动，两层中的分子频繁进入对方。高温层进入低温层的分子，通过碰撞把较高的平均能量传给原来低温层中的分子；低温层进入高温层的分子，通过碰撞从原来高温层分子得到能量。这样，交换一对分子的净效果为，高温层的内能减少，低温层的内能增加。大量分子热运动就导致宏观上热量的传递。可见，气体中的热传导就是气体分子热运动引起的能量输运过程。

导热率是物质热传导性能的特征，由介质的性质和状态决定。从更严格的理论方法得到 $\kappa = \epsilon \eta c_v$ ，式中 ϵ 有固定的表达式，通过计算可以求出 ϵ 的值。对单原子分子气体， $\epsilon = 2.5$ ；双原子分子气体， $\epsilon = 1.9$ ；多原子分子气体， $\epsilon = 1.75$ 或更小。 c_v 为气体的定容比热，与压强无关，与温度关系较小。 η 为气体的粘滞系数。所以， κ 与宏观量的关系基本上同 η 与宏观量的关系一致，即 κ 与压强无关，与温度的平方根成正比。这些结论与实验结果一致。由于热传导的机制很复杂，有些尚未完全弄清楚，通常 κ 的值由实验测定。广而言之，金属、非金属、液体、气体的导热率依次减小。鉴于 η 的值与气体分子平均自由程相对容器线度之大小关系密切，上述讨论只适用于压强较高的情形。对于压强较低的稀薄气体，热传导主要由气体分子与容器壁的碰撞决定，传热量与压强成正比。中等压强介于以上两种情况之间，传热量仍与压强有关。热传导现象是气体动理论的重要实验验证。

【扩散】密度不均匀的物质中热运动引起的质量迁移。同种物质的扩散称为自扩散；混合物中不同组份间的扩散称为互扩散。滴入水中的墨水，将由开始的一滴逐渐弥散在全部水中；两种表面光

滑紧密接触的金属，经过足够长的时间，每种金属的表面都有另一种金属成分。这些都是互扩散的例子。密度 ρ 沿 z 方向连续变化的气体，将产生从 ρ 大到 ρ 小的区域的宏观气体迁移。气体中沿 z 方向距离每增加一个小量 dz ，若密度增加 $d\rho$ ，就称 $d\rho/dz$ 为密度梯度。实验表明，单位时间通过垂直于 z 轴的任意平面 z_0 中单位面积的气体质量 M ，与密度梯度成正比。

$$M = -D \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_{z_0} \quad (1)$$

上式称为斐克定律，是宏观扩散理论的基础。它对自扩散或两种气体互扩散中的任一组份都适用。式中比例系数 D 称为扩散系数，其值由气体的性质和状态决定，单位为 $\text{米}^2 \cdot \text{秒}^{-1}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。对于一种气体， D 称为自扩散系数；对混合气体， D 称为互扩散系数。式中负号表示质量向密度小的方向迁移。气体中的扩散过程比较复杂，若温度也不均匀，还将伴随热传导；若温度均匀，密度不均匀同时造成压强差，产生宏观气体流动，还伴随粘滞现象。扩散只是其中的主要过程而不是唯一过程。斐克定律仅适用于温度和压强处处均匀的气体中发生的单纯扩散过程。气体动理论揭示了扩散过程的微观本质，推导出斐克定律，给出了 D 与微观量之间的关系。气体中，低密度区单位体积内的分子数比高密度区的少，由于无规运动和碰撞，相邻两层气体不断交换分子。相同时间内，高密度层进入低密度层的分子比反方向的多，净效果是低密度层内的分子数增加，高密度层内的分子数减少。大量分子热运动的宏观效果，导致质量从高密度区向低密度区迁移。所以，扩散是分子热运动引起的质量输运过程。扩散系数与微观量之间的关系为 $D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{l}$ ，式中： \bar{v} 为气体分子平均速率， \bar{l} 为平均自由程。 D 与宏观量的关系，对确定的温度 T ， D 与压强 P 成反比；对确

定的压强, D 与 $T^{3/2}$ 成正比。这些结论都被实验证实。但是有偏差, 实验结果为 D 与 $T^{1.75}$ 到 T^2 成正比。原因在于初级理论采用的刚球弹性碰撞模型过于简单。气体扩散现象是气体动理论的主要实验验证之一。固体和液体扩散的宏观规律在形式上与气体相同。对于固体, (1) 式中的 M 通常表示扩散的粒子数, ρ 为单位体积中的粒子数。固体的扩散系数远比液体和气体的小。室温下, 固体中的扩散进行得很缓慢。高温下显著加快。

【涨落】 又称起伏。分两种类型, 一是平衡态系统中, 宏观参量的某次或局部的测量值偏离统计平均值的现象, 一是布朗运动。处于平衡态的系统, 压强、温度、能量等宏观参量都具有不随时间变化的稳定数值。但是, 宏观平衡态对应瞬息万变的无数微观运动方式 (见“热运动”和“统计规律”), 是微观运动的平均表现。宏观参量的稳定值正是大量微观偶然事件的统计平均值。因此, 任何宏观参量都不会一成不变地等于统计平均值。某一瞬间, 或系统某一局部的测量值, 一般都与统计平均值有偏差, 并且偏差大小不一。这种现象称为涨落。例如, 平衡态系统具有稳定均匀的温度。但是, 由于热运动, 各部分之间不断交换能量, 某一瞬间可能出现一些部分的温度略高于平衡温度, 而另一些部分的温度略低于平衡温度。这种现象称为温度涨落。实验测量值与统计平均值的相对偏差, 是涨落大小的定量描述。统计平均涉及的分子数 ΔN 越多, 偏差就越小, 涨落越不明显, 甚至观测不到。反之, ΔN 若很小, 涨落幅度将很大, 统计规律就不适用了。例如气体分子的速率分布, 概率论证明其相对偏差为 $1/\sqrt{\Delta N}$, 其值越大, 涨落越严重。反之亦然。若 $\Delta N=10^6$, 相对偏差仅为千分之一; 若 $\Delta N=1$, 涨落为百分之百。涨落的实例很多。空气中的光散射、临

界乳光，电子仪器中测量参量的起伏，布朗运动等都是。涨落现象的存在，限定了物理仪器的测量精度。

【布朗运动】悬浮于流体中的固体微粒，在流体媒质分子热运动作用下产生的随机运动。1827年，布朗（R. Brown, 1773—1858, 英）通过显微镜观察悬浮在水中的花粉和其他微粒，发现它们不停地无规则地沿着折线运动。后来人们发现，在温度均匀的流体中，都能观察到直径为 10^{-7} — 10^{-5} m 的悬浮微粒的这种运动。微粒愈小、温度愈高，运动愈剧烈，与流体是否受外力无关。这种微粒称为布朗微粒。这种运动称为布朗运动。1877年，德耳索指出了布朗运动的微观机制。1905年，爱因斯坦发表了关于布朗运动的理论。1908年，佩兰完成了有关布朗运动的系统性实验，证实了爱因斯坦等人的理论。至此，人们对布朗运动才有了清晰的认识。

流体中，任何时刻沿任意方向运动的分子都有。它们与悬浮微粒频繁碰撞。微粒足够小时，某瞬间受到周围不同方向的撞击次数和大小都不同，这种不平衡撞击作用在布朗粒子上的合力，足可以使它克服流体媒质阻力朝着撞击弱的方向运动。下一个瞬间又受到类似的撞击，运动折向另一个撞击弱的方向。由于分子热运动变化剧烈而无规，产生的作用力显然是一种涨落不定的力，这使布朗微粒的运动方向和速率也变化极快而无规。可见，布朗运动就是分子无规运动的间接证明。温度愈高，分子热运动愈剧烈，布朗运动也就愈剧烈。若悬浮微粒较大，因来自各方向的碰撞几乎相等而抵消，微粒所受净合力几乎为零。所以大微粒很难产生布朗运动。悬浮在流体中的稀疏布朗微粒之间，相互碰撞的概率非常小，可以看成是理想气体巨分子系统，达到平衡时遵守重力

场中的玻耳兹曼分布。这已被佩兰的实验所证实。关于布朗运动的讨论，特别是爱因斯坦作出的理论贡献，令人信服地展示了原子和分子的真实性和真实性，结束了长达半个世纪的关于原子存在与否的争论。布朗运动还是气体动理论的重要实验基础，对统计力学，特别是涨落理论的建立起了重要作用。布朗运动实质上是一种随机涨落现象，并不局限于微粒运动，相当普遍地存在于各领域。因此，它的理论在这些领域（包括固体中的某些现象）也有重要应用。如对测量仪表精度极限的研究，对高倍放大电讯电路中背景噪声的研究等。

【表面张力】分子力在液体表面层产生的拉力。分子力等于分子间引力和斥力的矢量和，其大小与分子间的距离有关，但都是短程力。它们开始起作用的最大距离称为有效作用距离，一般引力的有效作用距离为 $s = 10^{-9} \text{m}$ 量级；斥力的力程比 s 小几倍乃至一个数量级。液体表面与气体相接触的厚度等于 s 的液体薄层，称为表面层。液体内部任一分子与另一分子相比，周围环境基本相同，分子力的分布是球对称的，分子受各方向的作用互相抵消。表面层中的分子则不然，它受其他液体分子向下的吸引力，比受其上的气体分子向上的吸引力大得多，分子愈靠近表面，所受合力愈大。其效果是，吸引表面层中的分子，有把它们拉向液体内部的趋势；还使液面不同部分之间产生拉力，致使整个表面层有收缩趋势。这种引力或拉力就是表面张力。表面层中由于存在引力场，分子按玻耳兹曼分布，密度连续变化。愈靠近液面，密度愈小，分子间距离愈大，斥力已不起作用。只有离极表面稍远的分子，受到的斥力才与液体内部相仿。表面张力的定量表述是，液面的任一假想垂面分割开的两部分表面层之间的拉力 f ，垂直于分割面，切于

液面，其大小 f 正比于分割面与液面交线的长度 L ，即

$$f = \alpha L,$$

比例系数 α 称为表面张力系数，表示单位长度分割面两侧表面层的相互拉力，是表面张力大小的量度。表面张力使液面收缩，欲扩大液面面积，就得克服表面张力做功。 α 还表示增加单位液面面积，外力所需作的功或增加的表面自由能。实验表明，对给定的液面，其上的每一点之 α 值皆同，与液面大小无关，仅由下列诸因素决定：液体的种类、成分、密度；液体温度， α 随温度的升高而减小，在一定范围内成线性关系；与液面邻接的物质的化学性质；杂质可以改变 α 的大小。能使表面张力系数减小的物质称为表面活性物质。肥皂就是最常见的水的表面活性物质。糖能使水的 α 值增大。 α 的单位为牛〔顿〕/米 (N/m)。表面张力是液体的重要特性之一。与液体有联系的许多现象都与它直接相关。如弯曲液面下的压强，气体中的液滴及液体中的气泡之形成和破裂，毛细现象，液体润湿（或不润湿）固体等。

【润湿】分子力使液体沿固体表面扩展的现象。滴在固体平面上的液滴，若展成一薄层，称液体润湿固体（简称润湿），如玻璃板上水滴的扩展；若液滴缩成近似球形，称液体不润湿固体（简称不润湿），如玻璃板上的水银滴。某种液体是否润湿某种固体，完全取决于相接触的液体和固体的性质。一种液体可能润湿某些固体，却不能润湿另一些固体。水银润湿锌、铜、铁等，却不润湿玻璃。分子力等于分子间吸引力与排斥力的矢量和。它们都是短程力，斥力的力程更短。这些力开始起作用的最大距离称为有效作用距离。液体分子之间引力的有效作用距离用 d 表示，固体分子与液体分子之间引力的相互作用距离用 l 表示。液、固体接触处的液体薄层

称为附着层,其厚度为 d 与 l 中大者。该层内的液体分子与固体分子间的引力称为附着力;液体分子之间的引力称为内聚力。附着层内的分子同时受这两种力的作用,若内聚力大于附着力,分子有脱离附着层进入液体内部的趋势,液体不润湿固体;若内聚力小于附着力,液体分子有尽量挤入附着层、使其扩展的趋势,液体润湿固体。

定量上用接触角描述润湿的程度。对滴在固体平板上的液滴,过液、固、气三相交界点,做液面的切线,它与固体表面间的夹角 θ 称为接触角。 θ 是表征液、固、气三相交界处性质的重要物理量。若 $\theta < 90^\circ$,液体在固体表面扩展,液体润湿固体;若 $\theta > 90^\circ$,液体在接触面上收缩,液体不润湿固体。若 $\theta = 0^\circ$,液体展延在全部固体表面,称液体完全润湿固体。若 $\theta = 180^\circ$,称液体完全不润湿固体。润湿和不润湿现象在自然界、工程技术和日常生活中的许多方面,都有重要应用。

【不润湿】 见“润湿”。

【毛细现象】 又称毛细作用。润湿(或不润湿)及表面张力联合作用下,液体沿内径非常小的细管上升(或下降)的现象。例如部分长度插入水(或水银)槽中的细玻璃管,管中液面高(或低)于管外槽中液面,这就是毛细现象。能产生毛细现象的管子称为毛细管。若液体润湿管壁,接触角 $\theta < 90^\circ$,管内液面为凹面。表面张力使管中液面上下压强产生跃变。管中弯曲液面下的附加压强称为毛细压强。对于凹面,毛细压强为负,即液面下流体压强低于液面上气体压强,这使管内液体升高,直到与气压平衡。相反,若液体不润湿管壁,接触角 $\theta > 90^\circ$,管内液面为凸面,毛细压强为正,

管内液面下降一段距离。管内外液面的高度差为 $h = 2\alpha\cos\theta/(\rho gr)$ 。式中 g 为重力加速度， ρ 为液体密度， α 为表面张力系数， r 为毛细管内半径。管越细 (r 小)， h 越大，毛细现象越明显。 $\theta < 90^\circ$ ， $h > 0$ ，管内液面升高； $\theta > 90^\circ$ ， $h < 0$ ，管内液面低于管外。毛细现象在自然界，工农业生产，科学技术乃至日常生活中都起着重要作用。多孔性固体物质与液体接触时，都能产生毛细现象。有些有利，有些有害。植物吸收水分是利用毛细现象的例子；建筑工程防潮是破坏毛细现象的例子。

【吸附】 固体表面吸住气体分子并与气体薄层形成一个整体的现象。固体内部的每个点阵粒子，周围环境基本相同，来自各方向粒子的作用相互抵消。固体表面的极薄层则不然，它外面不存在点阵粒子，表面层中粒子的相互作用不能抵消，对外形成引力场。运动到该场作用范围内（大约离固体表面为一个原子直径的距离）的气体分子，可能被吸在固体表面。被吸住的大量气体分子形成气体薄层，称为吸附层，与固体表面层构成一个整体。若气体分子被固体表面层力场极化而产生吸附，称为物理吸附；若气体分子与点阵粒子相互作用改变了内部结构，如分解为原子，电子重新分配等，形成化学键，称为化学吸附。前者无选择性，任何固体与任何气体都可能形成物理吸附。相反，后者有选择性，某种固体只能与一定种类的气体形成化学吸附。吸附机制决定，前者不稳定，后者稳定。一般情况下，往往两者兼而有之，很难判断究竟是哪种吸附。吸附与温度有密切关系。吸附过程伴有放热反应。被吸附的气体分子参与点阵粒子的热振动。随着温度的升高，振动幅度加大，到一定程度，将产生逆过程，即气体分子从固体表面释放出来。这种现象称为退吸。物理吸附比化学吸附易

退吸。吸附量与固体表面积成正比，故多孔或粉状固体吸附能力强。为提高吸附量，还应降低温度。反之，为了去除固体表面吸附的气体，需升温。例如把固体元件放在高真空中加热。吸附和退吸现象在真空技术、催化反应等多种科学技术领域有重要应用。

【化学键】把原子束缚在一起构成分子或晶体的电相互作用。原子是带等量异号电荷的电中性体系。价电子数少的原子，如元素周期表中第Ⅰ族碱金属、第Ⅱ族碱土金属等，有失去电子变成正离子的趋势，称为正电性元素；价电子数多的原子，如第Ⅶ族卤素，第Ⅵ族氧族等，有获得电子变成负离子的趋势，称为负电性元素。这两类元素（或一类元素）中的原子接触时，电子可能重新配置，产生结合力，把它们束缚在一起，同时放出一部分能量，使相互作用势能最低，形成稳定结构，即分子或晶体。这种结合力称为化学键。它主要由原子的最外层电子决定，与内层电子的关系不大。虽然原子间还有万有引力、磁力等相互作用，但是它们对成键的贡献可以忽略不计。成键时放出的能量称为键能，一般为几个电子伏。按照成键机理，化学键通常分为离子键、共价键、范德瓦尔斯键和金属键。此外还有一种氢键。分类是相对的，例如离子键与共价键，金属键与共价键之间并没有严格界限。大量原子或分子键合在一起，就构成晶体。具有相应键合方式的晶体依次称为离子晶体、原子晶体、分子晶体和金属晶体。冰是氢键的例子。这只是些典型情况。实际上，一种物质中往往有几种键混合并存。例如石墨，就包括共价键、金属键和范德瓦尔斯键三种。各种结合力的共同特点，都包括吸引力和排斥力两部分。两个结构粒子之间的距离 r 较大时，结合力表现为引力； r 小时，表现为斥力。在适当距离 $r=r_0$ ，引力与斥力相等，相互作用势能最低。 r_0

称为平衡距离或平衡位置。对给定的分子， r_0 为常数。对于晶体， r_0 是相邻结构粒子间的距离。此时结构粒子的位置，称为点阵的结点， r_0 称为点阵常数。化学键是决定晶体的力学、热学、电学、光学性质的基本因素。

【离子键】 又称电价键。把正负离子束缚在一起构成分子或晶体点阵结构的库仑力。在一定条件下，正电性和负电性元素的原子相遇时，将分别变成正、负离子。它们因相互吸引而不断靠近；接近到一定程度，两者的电子云互相排斥，两个原子核也互相排斥。在适当距离 r_0 ，引力与斥力相等，相互作用能最低。这时体系可能放出一部分能量，正负离子束缚在一起，在 r_0 邻域内振动，形成稳定结构，即分子。这种结合力称为离子键。它是库仑力。由离子键的作用形成的体系，倾向于构成晶体。这种晶体称为离子晶体。因同性电荷相斥，异性电荷相吸，晶体中每个离子都被异性离子包围着。库仑力是长程力，没有方向性和饱和性，每个离子都受到晶体中所有其他离子的作用。只要空间条件允许，每个离子都能从不同方向同时吸引几个异性离子。岩盐是典型的离子晶体。每个钠离子 Na^+ （或氯离子 Cl^- ）周围都有 6 个 Cl^- （或 Na^+ ）。可见，离子晶体中并不存在单个分子，即不能把相邻的一对 Na^+ 和 Cl^- 看成一个 NaCl 分子，而是正、负离子按照同一方式规则排列，形成点阵。在这里，分子已失去意义。整个单晶犹如一个巨大分子。离子键的作用较强，所以离子晶体具有熔点高、沸点高、挥发性低、压缩性小等特性。低温下，离子被束缚在点阵的结点上，导电性能差。随着温度升高，热运动加剧，一些离子克服键力的束缚，晶体具有良好的导电性。

【共价键】又称原子键。原子间通过共有电子束缚在一起形成分子或晶体的电相互作用。以双原子分子为例，负电性元素的两个原子很靠近时，内壳层电子仍为各原子独有；外壳层，电子云相互重叠，两个原子核中间出现电子云密度较大的区域，吸引两个带正电的核；或者说，两原子的价电子互相配对，成为两核的共有电子，把两原子束缚在一起，形成稳定结构，即分子。这种结合力称为共价键。由每个原子贡献一个价电子而配成对的两个电子，自旋方向相反，体系能量最低。一对共有电子形成一个共价键。氢分子 H_2 为单键，氮分子 N_2 为三键。若电子对为两个原子均衡共有，即成键电子相对两核对称分布，分子的正负电荷系中心重合，分子本身不具有电偶极矩，称为非极性键。这种分子称为无极分子或非极性分子。同核双原子分子 H_2 、 O_2 、 N_2 等都是。异核双原子分子，例如氯化氢分子 HCl ，两个核对成键电子的吸引力不等，电子对分布不对称，偏向引力大的核，导致正负电荷系中心分离，分子本身具有电偶极矩。这种键称为极性键。这种分子称为有极分子或极性分子。若偏向很大，电子对脱离一个原子为另一个原子所独有，共价键就变成了离子键。一般，形成共价键的电子都成对。大量负电性元素中，只要有未成对的价电子，它们的原子都有可能构成共价键分子。一个电子只能与另一个电子配对。所以，一个原子所能形成的共价键数目，最多为其价电子的数目。这种特点称为共价键的饱和性。共价键只能沿着一定方向成键。这个特点称为共价键的方向性。成键的一对电子也可能由一个原子提供，这种键称为共价配键。也存在两个原子共享一个电子的情形，称为单电子键，例如一次电离的氢分子 H_2^+ 即是。多原子共有的一些电子，形成多原子的共价键。由于共价键的作用构成的晶体称为共价晶体或原子晶体。它的点阵粒子都是原子。由碳原子 C

构成的金刚石是典型的共价晶体。C 有 4 个价电子，与邻近的 4 个 C 形成 4 个共价键。每相邻两键的夹角为 109° ，体现了共价键的方向性。周围 4 个 C 的地位相同，以四面体方式排列起来。这种结构称为金刚石结构。锗和硅也是这种结构。共价键合的晶体一般都是绝缘体或半导体。共价键均由负电性元素形成，作用很强。原子晶体一般都具有硬度大，熔点高，挥发性低，导电性差等特点。

【范德瓦尔斯键】又称分子键。把外层电子已饱和的中性原子或分子束缚在一起，构成晶体或液体的结合力。如氯化氢 HCl、溴化氢 HBr、水 H_2O 等，它们的分子具有永久性电偶极矩，属于有极分子，两个取向适当的这类分子，通过库仑力相互吸引。再如氧 O_2 、碘 I_2 等无极分子或惰性气体元素原子，虽然没有永久性电偶极矩，但是，或者因其电子快速运动，负电荷分布随时间迅速起伏；或者由于量子效应的零点振动，都能引起它们的正负电荷系中心不停顿地瞬时分离，表现出具有瞬时电偶极矩的性质。这类原子或分子相互接触时，还会加剧这种现象，产生微弱相互作用，净效果是相互吸引。中性原子或分子之间的这种相互作用力称为范德瓦尔斯力。它比离子键、原子键弱得多，结合能往往低 1—2 个数量级。通常由分子键的作用构成的晶体称为分子晶体。它的点阵粒子都是分子，并且保持分子原来的形状、结构和性质。碘单晶，许多有机化合物晶体，以及低温下的惰性元素晶体等均属此类。由于分子中原子之间的结合力很强，而分子之间的结合力很弱，分子晶体一般都具有硬度低、熔点低、易挥发等特点。分子晶体都是绝缘体。

【金属键】正离子与电子气之间的电相互作用把原子、正离子束缚

在一起构成晶体的结合力。正电性元素的大量原子失去部分价电子变成正离子。脱离原子的电子不再属于单个原子或某些相邻原子，而为全体正离子所共有，弥散于其间“自由”运动，称为自由电子。它们的总体称为电子气。电子气与正离子之间的库仑相互作用把正离子或原子束缚在一起，这种结合力称为金属键。由金属键的作用构成的晶体称为金属晶体，简称金属。点阵粒子为正离子或原子。这种键合使金属具有延展性和金属光泽，熔点高，机械强度大，良好的导热性及导电性。

【氢键】 氢原子与两个电负性高的原子形成聚集体时的相互作用。一个电负性高的原子（如氟 F、氧 O 和氮 N 等）与氢原子共价结合，使氢带有部分正电荷并再与另一个电负性高的原子结合，氢原子受两个原子的吸引，形成聚集体。在极端情况下，氢失去它的电子变成裸露的质子，这时氢键具有离子键的性质。氢键的结合能较小，一般为 0.1eV 。晶体冰是氢键起作用的典型例子。此外，氟化氢、酚、乙醇等，通常也显示出氢键。氢键的形成对物质的性质有显著影响，如某些铁电晶体，氢键对其物理性质起重要作用。

【 C_{60} 】 由 60 个碳原子 C 构成的分子。属于有机化学的烯类。60 个 C 位于 20 个正六角形环和 12 个正五角形环围成的卅二面体的 60 个顶点上，60 个 C 形成网状连接的封闭笼式结构。 C_{60} 的对称性很高，其中的每个 C 原子都处于等价地位，相邻的 C 之间以共轭双键结合。由于上述结构与一个著名建筑物的外型十分相似，故以该建筑物设计师的姓为 C_{60} 命名，称为 fullerene（有傅氏烯、傅氏分子、布基球等多种译名）；又因 C_{60} 的外型酷似足球，还称为足

球烯 (footballene 或 soccerene)。1984—1985 年, 人们用短脉冲高功率激光蒸发石墨, 获得了一系列 C_n 结构, 其中 $n=60$ 的 C_{60} 丰度最大。1990 年, 得到了具有宏观数量 (日产数克) 的 C_{60} 。 C_{60} 是一个单纯由碳元素结合成的稳定分子, 属于芳香族。比它丰度小的还有 C_{70} 、 C_{84} , 丰度更小的 C_n 可能有 $n=3、11、15、19、72、74、78、80、180、\dots 240\dots$ 。 C_{70} 的结构为 12 个五角形环和 25 个六角形环围成的卅七面体 (C 占据其 70 个顶点), 外型类似橄榄球。 n 不同的 C_n 呈不同的颜色。

C_{60} 形成的固体为面心立方结构, 晶格常数 $a=1.4198\text{nm}$ 。 C_{60} 分子之间的结合力为范德瓦尔斯力, 形成的晶体为范德瓦尔斯晶体。固体薄膜 C_{60} 的电容率为 4.4, 折射率为 2.2 (对 630nm 波长), 密度为 1.7g/cm^3 , 400°C 升华, 沉积在冷表面上仍为 C_{60} 结构, 在空气中 450°C 开始燃烧。每种稳定的 C_n 分子构成的晶体, 都是碳的一种同素异构体。固体 C_{60} 是继金刚石、石墨之后, 碳的第三种同素异构体。固体 C_{70} 为密堆积晶体, 是碳的第四种同素异构体。纯 C_{60} 晶体为针形, C_{60}/C_{70} 有三种结晶形体——片、棒、星。 C_{60} 可溶于苯、甲苯、 CS_2 等溶剂中。 C_{60} 的发现, 对碳化学, 固体物理及材料科学的研究和应用都具有重要意义。 C_{60} 的直径为 0.71nm, 有如一个小钢球, 可能成为超级润滑剂。在 C_{60} 的笼内几乎可以容纳下任何一种元素的原子。固体 C_{60} 中掺入钾、铷、铯等元素, 可以制成超导材料。 C_{60} 是继 Si、Ge 和 GaAs 之后的又一种新型半导体, 而且还可与其他有机分子形成有机半导体。 C_{60} 的大规模应用领域, 很可能是超导、电池和微电子学。

【光谱】 电磁波谱的一部分。电磁辐射按照频率 (或波长) 的有序排列称为电磁波谱。它的频率覆盖范围, 从 0Hz 的直流一直到 10^{24}

Hz 量级的 γ 射线。在这样宽的频域内，按照产生辐射的机制和探测手段等之不同，将其分为：射频（无线电波）、微波、红外、可见光、紫外、X 射线和 γ 射线等若干频段。它们虽然都有共同的电磁本性，但是由于频率相差很多，在性质、特点、用途等方面又存在明显差异。通常把红外到紫外的电磁波谱称为光谱。属于这个频段的电磁辐射，往往笼统地称为光频辐射。1666 年，牛顿发现，太阳的一束白光通过玻璃三棱镜后，按照空间方位展成红、橙、黄、绿、青、兰、紫顺序排列的彩带，这是人类第一次观察到的光谱。这个顺序是频率递增的顺序。能把混在一束光中的不同频率的光波展开在空间不同方位的仪器称为光谱仪。间隔单位频率的两条谱线分得越开，光谱仪的分辨本领越高。研究光谱形成的机制和规律，及其在各个领域中应用的学科，称为光谱学。早期光谱观察和资料的积累，为原子、分子物理学的建立，提供了可靠的实验依据；原子、分子物理学的发展，揭示了光谱的微观机制。光谱研究还是建立量子理论的重要实验基础；当然，量子理论的成功，又透彻地阐明了光谱的本质和规律。本质上，光谱是微观粒子（原子、分子、离子、固体点阵粒子等）内部运动状态变化在外观上的总体表现。微观粒子内部只存在一系列离散的运动状态。每个状态有确定的能量，称为能级。能级有一定的能量宽度。比较而言，能量大的状态称为高（或上）能级；能量小的状态称为低（或下）能级。例如，原子或分子中的电子处于不同的能量状态，就表示它们处于不同的能级。能量最低的状态称为基态。其他能级均称激发态或受激态。通常，平衡系统遵守玻耳兹曼分布，绝大部分粒子都处于基态，能级愈高，粒子数愈少。微观粒子内部运动状态发生变化时，只能从一个能级跃变到另一个能级，称为能级跃迁或量子跃迁；而决不会在两个能级之间连续

变化，即不存在能量取两个能级之间的任何能量值的状态。跃迁过程必然伴随能量的变化。从高能级跃迁到低能级，微观粒子向外界发射能量；从低能级跃迁到高能级，微观粒子从外界吸收能量。如果这种变化是以电磁辐射的形式进行，那么由巨大数量微观粒子构成的宏观物质，其诸多状态之间跃迁发射（或吸收）的电磁辐射，通过光谱仪就展成光谱。

光谱可以分成许多类，分类的着眼点也有多种。从辐射与物质相互作用，光谱可分为三类。物质中大量粒子从高能级跃迁到低能级发射的电磁谱，称为发射光谱。频率范围宽阔的光频辐射通过物质时，某些频率成分因被物质吸收而减弱，在透过物质的辐射背景上，对应被吸收的频率，程度不同地变暗。这种光谱称为吸收光谱。光束通过物质，除了透射和吸收外，还能从四面八方观察到从物质中传出的光。这种现象称为光散射。散射光展成的光谱称为散射光谱。入射光被散射后，若频率不变，称为瑞利散射；若改变，称为拉曼散射或拉曼效应，其光谱称为拉曼光谱。它是最普遍的散射光谱学技术。从谱图的直观外貌，光谱也可分为三类。普通分辨本领的光谱仪展示的光谱，若为一条条清晰可辨的谱线，称为线状光谱。若为相当密集的许多谱线紧密地排在一起，形成一个谱线组，组与组之间清晰可辨，称为带状光谱。每组谱线称为一个（光）谱带；若干谱带组成的系列称为谱带系。若在相当宽的频率范围内光频辐射能不间断地连成一片，称为连续光谱。应该注意，这种分类方法并不以光谱仪的分辨本领为转移，而由微观发光机制决定。从微观机制，光谱可分为原子光谱、离子光谱、分子光谱等，皆因产生光谱的微观粒子而得名。原子能级之间能量间隔大，产生辐射的频率高，不同能级对跃迁的频率间隔大。所以原子光谱为离散的线状光谱。已观察到的原子光谱

线达百万条之多，大部分在可见和紫外区。离子和某些低压下呈气态的分子也产生线状光谱。分子的结构和内部运动状态相当复杂，除有电子运动外，还有各原子核在自己中心位置附近不停地振动，分子作为一个整体有转动，三种运动互相影响。相邻电子态的能量间隔为 $1\text{--}20\text{eV}$ ；相邻振动态的能量间隔为 $0.05\text{--}1\text{eV}$ ；相邻转动态的能量间隔还要小 $1\text{--}2$ 个数量级。所以，一个电子态对应许多振动态，一个振动态对应许多转动态。一对转动能级之间的跃迁形成一条谱线。对应确定振动态的一组转动能级之间跃迁产生的谱线，紧密地排在一起，位于远红外或微波区。对应确定的电子态，一对振动能级之间的跃迁，实际上是两组转动能级之间的跃迁，形成一组紧密排在一起的谱线，即一个谱带，位于红外区。一对电子态之间的跃迁，实际是两组振动能级之间的跃迁，不同振动能级对之间跃迁的谱带形成一个谱带系，即电子光谱，位于可见和紫外区。不同电子能级对之间的跃迁，形成不同的谱带系。上述整体构成了分子光谱，十分复杂。“带状”是分子光谱的主要特征。处于高温状态的物质产生连续光谱，辐射能的分布随温度和频率而变，遵守普朗克定律。从覆盖的频率范围，光谱可分为红外光谱、可见光谱和紫外光谱。按照频率由低到高的顺序，每种还可依次细分为：远红外、中红外、近红外；红至紫；近紫外，紫外，真空紫外。谱线的特征用波数（或波长、频率）、强度、宽度等参量描写。观察和分析光谱，既是原子、分子物理学的重要组成部分，又是研究原子、分子结构的重要途径。通过它，可以得到微观粒子的结构、内部运动状态等多方面的知识，是基础科学研究的有力工具。每种元素都有自己的特征光谱，这使光谱成为物质分析的有效方法，在生产实践中有广泛应用。激光用于光谱研究之后，光谱学进入了一个新阶段。以激光为光源的

光谱学分支称为激光光谱学。它使传统光谱技术发生突变，不仅使过去难以解决的许多问题容易处理，灵敏度极大地提高，而且还开拓了许多新领域，对多种科学技术的发展起了促进作用。

【红外光谱】见“分子光谱”。

【分子光谱】见“物质微观结构探索”。

【转动光谱】见“化学键的理论”。

【振动—转动光谱】分子的确电子态之不同振动能级之间跃迁产生的光谱。分子中各原子间存在相互作用，每个原子核总是在其中心位置附近往复运动，称为分子振动。理论和实验都表明，振动只能处于一系列离散状态，每个状态有确定的能量，称为振动能级。以双原子分子为例，并假定它处于最低电子态。原子间相互作用势能与两核间距 r 有关。 r 很大时，分子处于离解态，两原子间的作用可以忽略不计，势能是与 r 无关的常量；随着 r 减小，两原子间的引力增大，势能减小，动能增加；当减小到某一距离 $r=r_0$ 时，引力与斥力相等，势能最小，把这点定为势能零点，总能量等于系统的动能；随着 r 继续减小，斥力占优势并急剧增大，势能随之陡峭上升，动能迅速转化为势能。 r_0 称为平衡距离或平衡位置，分子中的两原子，就在 r_0 的邻域内作微小振动。量子理论指出，各振动能级的能量为

$$E_v = \left(v + \frac{1}{2}\right)a - \left(v + \frac{1}{2}\right)^2 b + \dots \quad (1)$$

式中 a 、 b 是由分子性质决定的两个常量， a 比 b 大得多， a 项是简谐振动能， b 项是非简谐振动引起的修正，以后各项是更小的修正，常可忽略； ν 称为振动量子数，可能的取值为零和正整数，每个 ν 值对应一个振动能级。最低振动能级 ($\nu=0$) 的能量 $a/2$ 不等于零 (称为零点能)，表示分子永远不会停止振动。 ν 小时，(1) 式中的平方项可忽略，振动能级近似等间隔； ν 大时，平方项使相邻能级间隔随 ν 之增大而减小。振动能级之间的跃迁必然伴随能量的变化，如果这种变化是以电磁辐射的形式进行，就产生振动光谱。 $\nu' \rightarrow \nu$ 能级跃迁的谱线波数 $\tilde{\nu}_0$ (波长 λ 的倒数) 为

$$\tilde{\nu}_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc} [(\nu' - \nu) a - (\nu' - \nu)(\nu' + \nu + 1)b] \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常量， c 为真空中光速。 $\nu' > \nu$ 为发射谱； $\nu' < \nu$ 为吸收谱。例如 CO 分子的 $4.67\mu\text{m}$ 谱线对应振动量子数的改变量 $\Delta\nu=1$ ； $2.35\mu\text{m}$ 谱线对应 $\Delta\nu=2$ ； $1.58\mu\text{m}$ 谱线对应 $\Delta\nu=3$ 。随着 $\Delta\nu$ 值的增大，跃迁概率迅速减小。每个振动态对应许多转动态。每对振动能级之间的跃迁，实际上是两组转动能级之间的跃迁，结果为数目很多的紧密排列在一起的一组谱线，称为 (光) 谱带。只有转动态不变时才可能产生纯振动光谱。把振动能和转动能同时变化产生的光谱称为振 (动) — 转 (动) 光谱。对简单转子，选择定则为 $\Delta J = \pm 1$ ，即对应 ν' 的诸转动能级 J' 与对应 ν 的诸转动能级 J ，只有转动量子数改变 1 的能级对之间才能发生跃迁。跃迁谱线分为两支，波数分别为

$$\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_0 \pm 2BJ \quad (3)$$

式中 $\tilde{\nu}_0$ 由 (2) 式给定，为纯振动谱的波数，称为谱带的基线。 B 为分子的转动常量，不同振动能级，其值不同，但相差不大，所

以 (3) 式忽略了这点。J 为转动量子数，取正整数。对于发射光谱， $\Delta J = +1$ ，(3) 式取 + 号， $\tilde{\nu} > \tilde{\nu}_0$ ，为短波支，记为 R 支； $\Delta J = -1$ ，(3) 式取 - 号， $\tilde{\nu} < \tilde{\nu}_0$ ，为长波支，记为 P 支。每支中相邻谱线间隔均为 $2B$ 。由于 $\Delta J = 0$ 的跃迁被禁戒，谱带中并无 $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_0$ 谱线，该处为一空位，称为零缺。一般观察到的光谱是电偶极辐射，振动中只有电偶极矩发生变化的分子，才产生振动光谱。像 H_2 、 N_2 、 O_2 等对称结构，电偶极矩为零，振动和转动也不产生电偶极矩变化，均无振动光谱。

通过分析振动光谱，可以获得分子形状、结构、化学键强弱等各方面知识。液体或溶液的振-转吸收谱带在化学分析中有广泛的应用。

【纯振动光谱】 见“振动—转动光谱”。

【光谱带】 见“振动—转动光谱”。

【分子态】 分子中所有价电子的耦合状态。每个状态有确定的能量。一般，分子中每个原子的各内壳层电子仍属于各原子；外层价电子在所有原子核的联合电场及所有电子的平均场中运动，存在复杂的电、磁相互作用。价电子与电场的电作用决定了能量的主要部分；电子轨道运动的磁场和自旋运动磁场之间的磁相互作用，则决定能量的次要部分。原子中的电子状态用一组量子数 (n 、 l 、 m_l 、 m_s) 来描写，它们依次称为主量子数、轨道角动量量子数、轨道磁量子数和自旋磁量子数（见“电子态”）。对确定的 l 值， m_l 的可能取值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。 m_s 的可能取值为 $\pm 1/2$ 。角动量均以 h ($=h/2\pi$) 为单位， h 为普朗克常量。

对双原子分子，通过两个原子核的直线称为分子轴，外层电子为两个原子核共有，在几乎轴对称的联合电场中运动（对称轴就是分子轴），它们的轨道角动量绕分子轴进动，轴向分量为运动常数，称为电子的轴向轨道角动量。在分子中， m_l 的等量异号的两个状态具有相同的能量，用符号 λ 替换 $|m_l|$ 。对应 $\lambda=0, 1, 2, 3, \dots$ 的态或电子，依次称为 $\sigma, \pi, \delta, \phi, \dots$ 态或电子。分子中所有外层电子的 λh 之和，称为分子的轴向轨道角动量，用 Λh 表示， Λ 为相应的量子数。分子中若有 i 个外层电子， $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i$ ，各 λ 对应的角动量有两种取向，故 Λ 的表达式为代数和。分子物理中，用正体大写希腊字母 $\Sigma, \Pi, \Delta, \Phi, \dots$ 依次表示 $\Lambda=0, 1, 2, \dots$ 的分子态。例如，若外层有两个 σ 电子，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ ，那么 $\Lambda=0$ ，分子处在 Σ 态。若外层有两个 π 电子，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ ，那么 $\Lambda=0$ 或 2 ，分子处在 Σ 态或 Δ 态。

每个电子都有自旋运动和相应的磁矩（见“电子自旋和自旋磁矩”），自旋角动量为 $\sqrt{s(s+1)}h$ ，其中 $s=1/2$ ，为自旋量子数。分子的诸外层电子自旋角动量的矢量和称为分子的总自旋角动量，其值为 $\sqrt{S(S+1)}h$ ， s 为相应的量子数，可由每个电子的 s 求出（见“LS 耦合”）。总自旋角动量的轴向分量表为 Σh ，称为分子轴向自旋角动量， Σ 为相应量子数。 Σ 的可能取值为 $s, s-1, \dots, -s+1, -s$ ，表征总自旋角动量相对分子轴的 $2s+1$ 个不同的取向。分子中的电子分布遵守泡利不相容原理。

分子轴向轨道角动量 Λh 与轴向自旋角动量 Σh 相加，合成分子轴向总角动量，用 Ωh 表示， Ω 为相应的量子数， $\Omega = |\Lambda + \Sigma|$ 。电子的自旋和轨道运动都产生磁场（ $\Lambda=0$ 除外），它们相互作用，其能量叠加在电子与电场的作用能上，使对应 Λ 的一个能级，分裂成能量不同的 $2s+1$ 个子能级，称为电子态的多重性。简言之，

一组量子数 (Λ 、 s 、 Σ) 描写一个确定的分子态或谱项, 通常用符号 $^{2s+1}\Lambda_{\Lambda+\Sigma}$ 表示。例如, $\Lambda=1$ 为 Π 态, 若 $s=3/2$, 为四重态, $\Sigma = \pm 3/2, \pm 1/2$, $\Lambda + \Sigma = 5/2, 3/2, 1/2, -1/2$, 形成的分子态: ${}^4\Pi_{5/2}, {}^4\Pi_{3/2}, {}^4\Pi_{1/2}, {}^4\Pi_{-1/2}$ 。虽然后两个态都是 $\Omega = 1/2$, 但它们是两个能级, 必须分别标出。对于 $\Lambda=0$ 的 Σ 态, 分子没有轴向内磁场, 也就不存在自旋轨道相互作用, 能级是单层的。但是, 习惯上, 仍把 $2s+1$ 标在左上角。例如氢分子离子 H_2^+ , 只有一个电子, $s=1/2$, 基电子态为 σ 态, 分子态为 ${}^2\Sigma$ 。实际上, 它的能级是单层, 不是双层。

【电子—振动—转动光谱】 分子中电子能级跃迁产生的光谱。分子的内部结构和运动状态很复杂。主要的量子态有电子态、振动态、转动态, 能量依次小 50—100 倍。一个电子态对应许多振动态, 一个振动态对应许多转动态。分子的电子态跃迁必然伴随能量的改变。如果是电磁辐射的形式进行, 就产生分子的电子光谱。一对电子态之间的跃迁, 实际上是两组振动能级之间的跃迁, 产生的光谱称为电子-振动光谱。一对振动能级之间的跃迁, 实际上是两组转动能级之间的跃迁, 一对转动能级之间的跃迁形成一条谱线, 不同转动能级对跃迁的一组谱线紧密地排在一起, 形成一个(光)谱带。不同振动能级对之间跃迁形成的一系列谱带, 称为谱带系。这就是电子—振(动)—转(动)光谱。只有在转动能级可以忽略时, 才有电子—振动光谱。不同电子能级对之间的跃迁形成不同的谱带系。它们处于可见和紫外区。双原子分子的电子—振(动)—转(动)光谱中, 每条谱线的波数 $\tilde{\nu}$ 可表为

$$\begin{aligned} \bar{\nu} = & \frac{Ee' - Ee}{hc} + \frac{1}{hc} \{ [(\nu' + \frac{1}{2})a' \\ & - (\nu' + \frac{1}{2})^2b'] - [(\nu + \frac{1}{2})a \\ & - (\nu + \frac{1}{2})^2b] \} + [B'J' \\ & (J' + 1) - BJ(J + 1)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中带撇“,”与不带撇号的量分别对应跃迁前、后的量; h 为普朗克常量, c 为真空中光速; a 、 b 是表征结合力大小的两个常量, B 为分子的转动常量, 它们的值皆因能级之不同而异; ν 为振动量子数, J 为转动量子数, 可能的取值为零和正整数; Ee 为电子态能量, 它所在的项表示振动和转动能都不变时, 两个电子态 Ee' 与 Ee 之间跃迁对波数的贡献。(1) 式中大括号项表示转动态不变时, 两个振动态 ν' 和 ν 之间跃迁对波数的贡献。(1) 式中最后一个中括号项, 表示转动态 J' 与 J 之间跃迁对波数的贡献。各类跃迁均受相应的选择定则约束。双原子分子电子态电偶极跃迁的选择定则为

$$\begin{aligned} \Delta\Lambda &= 0, \pm 1 \\ \Delta S &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\Delta\Lambda$ 与 ΔS 分别表示电子跃迁中, 分子轴向轨道角动量量子数 Λ 和分子总自旋量子数 S 的改变量, 只有满足 (2) 式的两个态之间才能发生跃迁。转动跃迁的选择定则是

$$\Delta J = \pm 1, 0 (J' = 0 \text{ 到 } J = 0 \text{ 除外}) \quad (3)$$

它决定一个谱带分为三支, $J' = J - 1$ 记为 P 支, 各谱线的波数为

$$\begin{aligned} \bar{\nu} = & \bar{\nu}_{00} - (B' + B)J \\ & + (B' - B)J^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\tilde{\nu}_{00}$ 为 (1) 式中前两项之和, 对应 $J' = 0 \rightarrow J = 0$, 这是禁戒跃迁, 所以实际光谱中并无 $\tilde{\nu}_{00}$ 谱线; $J' = J$ 记为 Q 支, 各条谱线的波数为

$$\begin{aligned} \tilde{\nu} &= \tilde{\nu}_{00} + (B' - B)J \\ &\quad + (B' - B)J^2 \end{aligned} \quad (5)$$

有些情况下, Q 支不出现; $J' = J + 1$ 记为 R 支, 各条谱线的波数为

$$\begin{aligned} \tilde{\nu} &= \tilde{\nu}_{00} + (B' + B)J' \\ &\quad + (B' - B)J'^2 \end{aligned} \quad (6)$$

(4) — (6) 式中的 J 、 J' 的可能取值, 均为正整数。无极分子 (如 H_2 、 N_2 等) 虽然没有纯转动光谱和振动光谱, 但是有电子光谱。研究它可以得到与分子振动、转动有关的常数, 电子态能级结构等知识, 是研究分子结构的重要途径。

【谱带系】 见“电子—振(动)—转(动)光谱”。

【拉曼散射】 又称拉曼效应。光被物质散射, 频率发生变化的现象。一束光通过物质, 从四面八方都可以观察到从物质中传出的光。这种现象称为光散射。散射光中与入射光频率相同的成分, 称为瑞利散射; 不同的, 称为拉曼散射。通常, 它们总是同时出现, 只是强度相差悬殊, 后者仅为前者的千分之一量级或更小。拉曼散射的规律: (1) 频率为 ν_0 的入射光被散射后, 变为频率 $\nu = \nu_0 \pm \nu_R$ 的散射光, 在光谱图上对称地分布在 ν_0 两侧, 称为拉曼谱线。它们形成的光谱称为拉曼光谱。作为光源的入射光称为激发光, 散射后的低频成分 $\nu_0 - \nu_R$ 称为斯托克斯线或红伴线, 高频成分 $\nu_0 + \nu_R$ 称为反斯托克斯线或紫伴线。(2) 频率改变量 ν_R 称为拉曼频率, ν_R 与激发

频率 ν_0 无关, 由散射物决定。其值或者为分子振动频率, 或者为转动频率; 相应的光谱分别称为振动拉曼光谱和转动拉曼光谱。 ν_R 对应的波数一般为 $0—3800\text{cm}^{-1}$ 。(3) 振动拉曼光谱的反斯托克斯线比斯托克斯线弱得多, 并且随散射体温度的升高而增强。对于转动拉曼光谱, 两者的强度相似。量子理论指出, 拉曼散射的微观机制是, 激发光的单个光子与散射物的单个分子的相互作用。光子的能量与频率成正比, 频率越高, 能量越大。光子与分子弹性碰撞, 产生瑞利散射; 非弹性碰撞, 分子吸收激发光子跃迁到虚能级, 再反向跃迁时放出光子。散射光就包含这类光子。若作用后分子振动能级高于作用前, 振动能级被激发, 能量来自激发光子, 所以散射光子频率低于激发光子频率, 产生斯托克斯线; 若作用后分子振动能级低于作用前, 分子把振动能转移给激发光子, 故散射光子的频率高于激发光子的频率, 产生反斯托克斯线。谱线强弱依赖于产生跃迁的分子数。平衡态系统中, 各能级的分子数遵守玻耳兹曼分布, 大部分分子都处于最低振动态, 能级越高, 分子数越少。所以, 分子与激发光子作用, 由低振动能级变到高振动能级的分子数多, 故斯托克斯线强, 反斯托克斯线弱, 甚至观察不到。温度升高, 高能级的分子数增多, 分子与激发光子作用, 由高能级变到低能级的分子数也增多, 故反斯托克斯线随散射体温度的升高而增强。但是高能级的分子数仍比基态的分子数少得多, 所以斯托克斯线几乎不受温度变化的影响。转动拉曼光谱的机理同上, 差别只是转动能级的间隔非常小, 最低振动能级的各转动能级上的分子数相差无几, 所以其斯托克斯线和反斯托克斯线的强度相近, 都能观察到。光散射是高频交变电场与分子中带电粒子相互作用的结果。在光电场的作用下, 只有极化率发生变化的分子才产生拉曼光谱, 并且遵守一定的选择定则。例如汞 Hg 的 2536.5Å 谱线,

被氯化氢 HCl 气体分子散射，产生 2737 \AA 斯托克斯线，两谱线的波数差为 2886 cm^{-1} ，与 HCl 红外振动谱带的 2885.9 cm^{-1} 符合得很好。在激发光两侧还观察到一些小间隔的弱谱线，相邻谱线的波数差相等，这就是转动拉曼光谱。在 2737 \AA 两侧也有类似结构，这是振动-转动拉曼光谱。与红外光谱相比，拉曼光谱有两个优点。一是利用可见光研究分子的振动、转动结构，这比红外光谱方便得多；一是非极性分子，如 H_2 、 N_2 、 O_2 等，没有红外光谱，它们的振动、转动等信息只能通过拉曼光谱进行探索。拉曼光谱主要用于研究分子和晶体，应用范围之广已遍及化学、物理学、生物学、医学等许多学科及工业生产中。它既可做物质成分的定性分析，又可做高度精确的定量分析。但是拉曼光谱与红外光谱的选择定则不同，拉曼光谱中不出现的谱线却出现在红外光谱中，两者互补，彼此配合，是非常有用的研究手段。早期，观察拉曼光谱只能采用汞弧灯等普通光源作为激发光源，由于拉曼散射很弱，拍一幅完善的拉曼光谱需很长时间，其应用受到很大局限。激光问世后，拉曼光谱技术发生很大变革。强度高、单色性好、有确定偏振态、频率连续可调的激光束，是拉曼散射的理想光源。它使实验简单方便，容易获得满意的拉曼光谱，并使之成为研究气体、液体、固体中分子振动能级结构的重要手段。除增加了所研究物质的品种而外，还扩展到燃烧过程，环境污染、材料分析等许多应用领域，并且发现一些新现象，如超拉曼效应，受激拉曼效应等，形成了相干拉曼光谱学的新分支学科。成为研究物质结构的有效方法。

【弗兰克—康登原理】关于分子中电子态变化与振动态变化关系的原理。分子由若干个原子组成，内部存在多种运动形态，并且互相影响。电子在不同能态之间跃迁，原子核在平衡位置附近做微小振

动,就是其中的两种。后者使核与核的间距及核的运动速度随时间迅速变化。弗兰克—康登原理指出:电子跃迁过程极快,在跃迁刚结束的瞬间,原子核间的距离及核振动速度都来不及变化,仍保持电子跃迁前的状态。这个原理不仅解释了分子光谱的谱带强度和结构,而且可以解释碰撞过程中的能级跃迁,对描写液体和固体的光学特性也很有价值。

【多原子分子】由三个或更多个原子构成的分子。多原子分子的结构、内部运动都比双原子分子复杂得多,难以进行精确的理论处理。分子作为一个整体,有平移运动和转动。分子内部,各原子相互作用,每个原子核都在平衡位置附近做微小振动。分子中还有电子运动。各种运动形态之间存在复杂的相互影响。分子的转动、振动、电子运动都只能处在一系列离散状态,每个状态都有确定的能量,分别称为转动能级、振动能级、电子能级。三者能量相差悬殊,依次增大1—2个数量级;每种运动状态中,相邻两个能级之间的能量差依次为:小于 0.05eV , $0.05\text{—}1\text{eV}$, $1\text{—}20\text{eV}$ 。故一个电子能级对应许多振动能级,一个振动能级对应许多转动能级。分子从一个能级跃变到另一个能级称为(能级)跃迁。各类跃迁都有自己的选择定则。跃迁过程必然伴随能量的变化,如果这种变化以电磁辐射的形式发生,就产生多原子分子光谱。除了非常简单或对称性较高者外,多原子分子光谱一般都很难完全分析清楚。过去很长时期内,主要是研究其红外拉曼光谱。近代,电子光谱才有了迅速发展的可能。多原子分子的转动可以近似看成刚体转动,用沿着三个互相垂直轴的主转动惯量描写。据此,多原子分子可分成四类:三个主转动惯量互不相等者,称为陀螺分子,如 H_2O 分子;其中有两个相等者,称为对称陀螺分子,如 NH_3 分子;三个全相等

者，称为球型陀螺分子，如 CCl_4 分子；若对称陀螺转轴方向的转动惯量非常小，则惯量椭球接近圆柱形，如 CO_2 等线型分子均属此类。对于确定的振动态，转动能级之间的跃迁形成（纯）转动光谱。只有极性分子才有电偶极跃迁转动光谱；无极分子，如球形陀螺分子，没有转动光谱，只有转动拉曼光谱。转动惯量很小的分子的转动跃迁，辐射频率落在远红外区；转动惯量大者，处于微波区。一般，转动谱线密集，难以分辨。关于多原子分子的转动光谱，只对线型分子和对称性较高的分子研究出一些成果。例如 CO_2 、 N_2O 、 C_2H_2 等，转动光谱的结构与双原子分子的相似，容易求出它们的转动惯量。非线型分子 H_2O 、 NH_3 、 CH_4 等的转动结构也被研究过。

分子中所有原子以同一频率和位相在平衡位置附近做简谐振动，称为一种基本振动方式。不同原子的振幅可能不同。这种基本振动通常称为简正振动。振动频率称为简正频率。一般，分子的基本振动方式等于振动自由度，对称性高的分子，振动方式少于振动自由度。不同振动方式之间存在复杂的相互作用。分子的实际振动是这些简正振动的各种叠加。对于确定的电子能级，振动能级之间跃迁产生振动光谱。因波长位于红外区，又称振动红外光谱。散射光中产生振动拉曼光谱。如果以 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 ，…表示简正频率，可观测到的振动频率为

$$\nu = \nu_1\nu_1 + \nu_2\nu_2 + \nu_3\nu_3 + \dots,$$

式中 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 ，…为相应振动方式的振动量子数。它们的可能取值为零和正整数。已经研究过振动光谱的多原子分子有许许多多。例如 CO_2 ，有4种简正振动，沿分子轴的对称振动和反对称振动，频率分别表为 ν_1 和 ν_2 ；垂直分子轴的线外振动，分为在水平平面内和竖直平面内的两个振动，因它们的频率相同（用 ν_3 表示），称为简

并的简正振动。 CO_2 分子振动能级用3个量子数 $(\nu_1\nu_2\nu_3)$ 表示。振动能为各简正振动能之和。振动量子数全为0的能级(000)称为基能级；有一个量子数等于1，另两个均为0的能级，如(100)、(010)，称为基频能级；有一个量子数大于等于2，另两个均为0的能级，如(200)、(030)，称为泛频能级；两个以上量子数不为0的能级，如(110)、(102)，称为组合频能级。对应 ν_1 ，振动是中心对称的，分子的电偶极矩无变化， ν_1 不出现在振动光谱；但分子的极化率在平衡位置附近单调变化，故 ν_1 出现在拉曼光谱中。对应 ν_2 和 ν_3 ，相对分子中心，振动是反对称的，电偶极矩发生变化，但极化率不变，所以 ν_2 和 ν_3 出现在振动光谱中，不出现在拉曼光谱中。

分子中原子的种类及排列可能有某种程度的对称性，从而决定了光谱的某些特征。有时单从分子的几何形状和对称性，就能预言基频的数目以及它们在振动光谱和拉曼光谱中出现的情况。一对振动能级之间的跃迁，实际上是两组转动能级之间的跃迁，产生的光谱是振(动)—转(动)谱带。对于复杂多原子分子，难以全面考察它们的振动光谱。

分子中电子按最低能量状态填充的组态形成分子的基态。比基态能量高的状态均称激发态。基态分子吸收外界能量可以跃迁到一系列激发态。分子中价电子的能级跃迁形成电子光谱。多原子分子中的电子可分为几类。一类称为键联电子，原子通过它们结合成分子，它们被激发，原子间的结合减弱，甚至使分子离解。激发这类电子产生的吸收谱是连续谱，一般处于近紫外区。另一类称为非键联电子，激发它们不影响原子间的结合，电离态以下的各激发态都是离散能级，这样一对电子态之间的跃迁，还伴随振动和转动能的变化，产生一个光谱带系。不同电子能级对的跃迁产生一系列谱带系，通常出现在紫外区。还有一类，一个电子为若干个化

学键所公有,属于分子的局部结构,与分子整体关系不大。它们产生的光谱反映分子的局部情况。这类电子跃迁的吸收谱往往处于可见区,显示分子的颜色特性。这种局部结构称为分子的生色基。有机分子,特别是有机染料的颜色都与此有关。研究过的多原子分子光谱,绝大部分是溶液中的吸收谱。其转动结构几乎完全变模糊,只有振动结构清晰可辨。有时,因高能态涉及到离解态等诸多因素,甚至振动结构也不能明显显示。几个不同谱带系常常严重重叠,难以把一个从其中区分出来。例如苯 C_6H_6 分子光谱,在 $1cm^{-1}$ 范围内包含数百条谱线,分辨本领最高的传统光谱仪也难以把它们区分开。分子的不同运动形态反映在分子光谱的不同波段。因此,观察和分析分子光谱是研究分子结构的重要途径。由此可以得到各类能级情况,化学键的性质,电子分布,处于电子激发态的分子的几何结构,电离势,离解能等多方面的知识。不同分子有不同的特征光谱,研究分子光谱可以鉴定化合物,分析混合物的成分。工业上普遍用它做定性、定量分析。石油工业用得更多。

【多原子分子光谱】 见“多原子分子”。

【分子束】 真空中单向飞行的原子流或分子流。由于历史的原因,“分子束”概念包括“原子束”。分子束只能在专门的装置中产生。该装置包括分子源、准直系统、实验区和探测器。它们都置于高真空中。分子源是个有小孔或狭缝的密封器,内盛欲研究的分子或原子。对固态物质,有加热装置使其气化。不同的研究内容,对密封器的结构和控制条件有不同的要求。准直系统是一对间隔开的平行狭缝或同轴小孔。从密封器射出的分子或原子通过它之后,成为沿水平方向飞行的精确准直分子束或原子束。

固体、液体和稠密气体的分子之间，距离很小，存在复杂的相互作用。气体总是处于热运动状态，分子运动方向无规则，频繁碰撞。很难用这些系统研究孤立的分子。然而，用上述装置产生的分子束，分子密度很低，分子间的作用可以忽略不计；分子定向运动，不会互相碰撞。因此，分子束完全可以用来研究真正自由的分子或原子的性质。证实麦克斯韦速度分布；进行施特恩-格拉赫实验，证实空间量子化，测原子磁矩等，是早期分子束实验的成功例子。1955年前后，分子束技术已相当成熟，形成了一套独特的方法，取得了广泛的应用，在近代物理学的发展中起了重要作用。近代的研究主要有如下三方面。碰撞实验。指电子束、原子束、离子束或分子束中任意两束或同类粒子束之间，以及它们与固定靶之间的碰撞。通过碰撞实验，研究原子、分子结构及相互作用性质等多方面知识。若粒子运动速度低，碰撞过程中粒子内部状态不发生变化，称为弹性碰撞。例如，研究分子与分子相互作用势即属此类。若粒子速度很高，碰撞改变粒子内部状态，称为非弹性碰撞。其过程复杂，种类繁多。由此可测量各种类型的碰撞截面，研究碰撞后原子、分子中粒子的重新排列，分子的各种化学键之间的能量交换性质，探索电子束在离子束散射中产生的新的分子态等。通过电子与分子碰撞，研究分子转动能级的激发，已成为分子碰撞研究的主攻方向。光谱实验。指束中原子或分子与全频段电磁辐射的相互作用。利用分子束可以避免分子间相互碰撞，从而避免了光谱线的碰撞增宽。采取某些措施，还可以消除光学多普勒效应，从而避免了多普勒增宽。这就能以极高的精度研究原子、分子光谱，能级结构及与此有关的广泛问题。这对基础物理研究极其重要。例如，测量精细结构常数；兰姆移位；同位素的核磁偶极矩；验证电子和质子所带的单位电荷，已获得在优于 10^{-18} 量级精度内两者

仍然相等；作为长度标准，以氦原子 6057 \AA 谱线为基准，复现性精确到 10^{-9} 量级；作为时间标准，铯原子钟在几小时内复现性精确到 10^{-12} 量级等。激光光谱实验。单色性好、强度高的激光束作用于分子束，开拓了分子束实验的新领域。特别是输出频率连续可调的激光器用于原子、分子的研究，这种激光束几乎可以把分子激发到任何一个预先指定的转动、振动或电子态，产生种类繁多、可供各方面研究和应用的激发态分子。可以研究某一激发态的各种碰撞截面、相互作用势和化学反应，以及高激发态和自电离态的性质等。分子束已经用于高分辨率激光光谱学，诸如高激发态激光光谱学，激光感生荧光光谱学和相干拉曼光谱学等。分子束是研究原子、分子结构，以及它们与物质相互作用的重要手段。这些研究对原子物理、分子物理、气体激光动力学、等离子体物理、微观化学反应动力学、空间物理、天体物理、表面物理、固体物理、生物学等，都有重要意义。

原 子

【原子】 化学元素的基本单元，化学变化的最小微粒。用元素符号表示。例如氢、钠原子，分别用 H、Na 表示。原子由一个带正电的原子核（简称核）及围绕它运动的数目一定的电子组成。这些电子共带有与核等量的负电荷，通过电磁相互作用与核结合成稳定的实体。整个原子呈电中性。电子具有波粒二象性，它们在原子中的分布没有严格确定的边界。通常把同种原子组成的分子（或晶体）

之相距最小的两个原子的中心距离，定为这种原子的直径。一般，原子的半径为 10^{-10}m 量级。各种稳定元素的原子，质量为 $1.67367 \times 10^{-27}\text{kg}$ 的1—200多倍。原子核在原子中所占的比例，半径为万分之一，体积为十万亿分之一，质量为99.95%。原子和原子核是物质结构的两个不同层次。原子物理学主要研究原子中核外电子的分布及运动规律。原子核则是原子核物理学的基本研究对象。原子和分子是物质结构从宏观到微观的第一个层次。物质的物理、化学、光谱特性基本上由核外电子决定。有关原子的知识，是掌握物质微观结构和深入了解物质性质的基础。

【原子结构】原子的构成、状态和内部运动规律。是原子物理学的基本内容之一。历史上先后提出的具有代表性的原子结构模型有：汤姆孙模型，行星式模型，卢瑟福模型，玻尔模型等。这些模型的陆续出现，标志着人类探索原子的历程。每个模型都揭示了原子的某些特征，也都掩盖了较深层次的问题。最精确、最严谨的理论是原子的现代量子力学描述。原子结构的主要实验基础是辐射与原子相互作用和原子碰撞。20世纪60年代，特别是70年代中期以来，原子结构的主要研究方面有：原子激发态结构，原子能级的超精细结构，原子团簇，特殊原子以及特殊环境（例如强电、磁场）中的原子。

【原子与辐射相互作用】原子（或分子）与全频段电磁辐射的相互作用。这使原子、分子和辐射场两方面都发生变化。描述这种相互作用的理论是量子电动力学。通常，辐射场的变化属于光物理的研究领域；原子、分子的变化属于原子、分子物理学。实验上，直到20世纪30年代以前，原子物理学主要以光谱实验资料为基础。后来

通过波谱学对能级的精细结构和超精细结构进行了深入研究。激光技术用于原子物理的探索之后，研究主要集中在强激光的场效应，激光操纵等。波谱学研究也有新进展。原子处在场强可以与其内部场强（氢原子基态的电场约为 $5 \times 10^9 \text{V/cm}$ ）相比拟甚至更强的激光辐射场时，其结构、形状、性质、状态等都发生明显变化，呈现一系列奇异特性，成为一类全新的物理、化学客体。例如形成衣着原子，自电离态，里德伯态，高离化态，多光子过程等。激光除了能引起原子内部状态的变化外，还能通过光压使整个原子的运动速度（或动量、动能）发生变化。这称为激光的力学效应。它可使原子加热、冷却、准直、偏转、聚焦、散焦…，这些统称为激光操纵。其中激光冷却的研究发展最快，温度已可降至 $5 \mu\text{K}$ 。可将少数乃至单个原子“静止”于基本没有外界干扰的空间，供长时间观察。上述诸项激光操纵若发展成熟，原子束将像电子束一样任人控制，将形成原子光学及原子相干术的新领域。波谱学是研究原子、分子物理的重要方法和技术。通过磁共振，可直接观测原子的精细、超精细和塞曼子能级间的微波或射频共振。观察的对象多是原子、分子的集合体，为原子、分子物理与凝聚态物理之间的联系架起桥梁。磁共振大量应用于化学，又是联系原子、分子物理学与化学的纽带。

【原子碰撞】原子（或分子）与各种微观粒子的碰撞。相对运动的两个微观粒子，距离接近到因相互作用而改变内部状态或显著改变外部整体运动状态，称为碰撞。碰撞中如果没有能量交换（对于同种粒子，虽有能量交换，但碰撞系统总能量不变），称为弹性碰撞。反之，称为非弹性碰撞。前者只改变粒子的动量和运动径迹；后者内容十分丰富，可能引起：激发、跃迁、电离、吸收、附着、俘

获、反应、湮没等。它们发生的概率用相应的截面描写。研究碰撞过程中的动力学，是当今原子、分子物理学的热门课题。碰撞对包括：电子（或正电子）与原子或分子，离子与原子或离子，原子与原子或分子，原子或离子与固体点阵粒子等。光子与原子作用也可当成碰撞问题处理。电子（或正电子）与原子、分子碰撞的研究，始于20世纪20年代。早期以测定各种截面为主。60年代以来，主要研究内容为：电子被原子散射引起的电子自旋极化，原子内壳层电子被打出后产生 X 射线激光，双电子复合 X 射线激光，重原子中电子运动的相对论效应对碰撞的影响，各种交换势和极化势的探讨及电子与固体表面的碰撞。离子与原子、分子，原子与原子碰撞的研究，20世纪70年代以来发展很快，主要内容有：各种截面，碰撞过程动力学，原子、分子和离子团簇，激发态原子、分子的碰撞。微观粒子与固体中原子碰撞的研究，20世纪60年代中期以来发展迅速。主要内容有：沟道效应和沟道辐射，能量损失，电荷交换，固体原子的二次电子和光子发射，离子束混合，离子与物质表面、界面相互作用，离子引起的溅射和辐射损伤，解吸附，离子束成膜等。当前研究的主要手段及设备有：原子束、分子束、离子束、电子束、激光束，同步辐射，加速器、计算机及高灵敏电子技术。碰撞在原子、分子物理研究中占有十分重要地位。20世纪50年代末再度蓬勃发展，它不仅使原子、分子物理学科自身不断丰富、深入，而且促进了天体物理、大气物理、等离子体物理、化学反应动力学、凝聚态物理及材料科学的发展。

【原子序数】表征原子在元素周期表中排列顺序（或位置）的纯数字。用符号 Z 表示。 Z 遍取1—109的全部整数，依次表示迄今为止自然界已发现的或人工生产的109种化学元素。 Z 的值即原子所具

有的质子数，这是原子序数的物理实质。具有相同 Z 值的原子，属于同一种元素。对中性原子， Z 值还代表原子中的电子数。例如， $Z=24$ ，在元素周期表的相应位置可以查到，它代表元素铬 Cr，表明 Cr 原子的核中有 24 个质子，中性 Cr 原子的核外有 24 个电子。

【原子质量单位】 计量微观粒子（分子、原子、原子核等）所含物质多少的单位。1959 年有人提出，把碳在自然界中丰度最大的同位素 ^{12}C ，处于基态时静止质量的 $1/12$ ，定为一个原子质量单位，以符号 u 标记。1961 年获得物理学界和化学界一致通过而被采用。其他原子的质量都接近于这个单位的整数倍。例如氢原子 ^1H 的质量为 $1.007825u$ ，氧原子 ^{16}O 的质量为 $15.995u$ 等。国际（SI）单位制中，以千克（kg）为质量单位。 ^{12}C 的质量为 $1.9927 \times 10^{-26}\text{kg}$ 。那么， $1u = 1.6605402 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，末两位数字 02 的误差为 10，即 02 ± 10 。 $1u$ 所对应的能量为 931.5016MeV 。在同位素、核反应等领域，常需采用原子质量单位。

【原子质量数】 表征以原子质量单位 u 为单位的原子质量之整数部分的纯数字。实质上，它就是原子的核子数。用符号 A 表示。 A 的值为一系列正整数。原子由原子核和电子组成。电子的质量非常小，若忽略它们，原子核的质量就是原子的质量。原子核由质子和中子构成，当以原子质量单位 u 计量时，平均而言，核中每个质子或中子的质量，与 $1u$ 相差甚微。那么，原子核的质量，从而原子的质量，几乎就等于各个核子平均质量之和，若核子数为 A ，原子质量就非常近似 Au ，其整数部分的数字就是 A 。例如 ^1H 、 ^{16}O 、 ^{238}U 原子的质量数分别为 1、16、238。质量数 A 是原子质量的粗略估计，通常把 A 标在元素符号的左上角，像上面三个例子那样。

【原子量】元素的一个原子的平均相对质量。自然界中大多数元素都有两种或更多的同位素，同种元素的各种同位素质量不同，但其种类和比例是恒定的（放射性元素除外）。1961年，把碳在自然界含量最丰富的一种同位素，碳-12的一个原子的质量定为12个质量单位，把它作为“基准”，某种元素的所有同位素按丰度的平均值与基准之比，就是这种元素的原子量，即元素周期表列出的原子量。例如氢 H 的原子量为1.00794，碳 C 的原子量为12.011，氧 O 的原子量为15.9994，铜 Cu 为63.546等。

历史上，还曾用过另外两种“基准”，并且有过两种标度并行使用。1803年，J. 道尔顿发表的第一张原子量表，把氢原子的质量作为“基准”，规定 H 的原子量为1。1826年，J. J. 贝采利乌斯提出，以氧原子 O 质量的1/16作为“基准”（定 O 的原子量为16），这就是一直沿用到1961年的“氧单位”。1929年发现，自然界中的氧，除丰度最大的¹⁶O 以外，还有少量稍重的¹⁷O 和¹⁸O 两种同位素，并且不同来源的氧，其组成也稍有不同。于是，物理学界改用¹⁶O 质量的1/16为“基准”，这就是原子量的物理标度；化学界则仍坚持原来的“基准”，即把氧的三种同位素混合物按丰度的平均值取为16个质量单位，称此为化学标度。1940年，国际原子量委员会确定两种标度的换算关系为

物理原子量

$$= 1.000275 \times \text{化学原子量}。$$

但是，对大气中的氧，换算因子实际上应为1.000278，对水中产生的氧则应为1.000268。这在科学上显然是不方便的。1959年马陶赫建议用¹²C 的原子质量的1/12作为“基准”，以便统一两种标度。物理学界于1960年，化学界于1961年分别同意采用这个“基准”，

这就是现行的国际原子量。原子量是重要的基本参数,准确测量它的数值具有特殊意义。测量方法有多种。化学方法中常采用化学含量法。物理方法中以 X 射线衍射法和质谱法较为常用。对由两、三种同位素组成的元素,质谱法优于化学方法和其他物理方法。国际原子量委员会根据最准确的测量数据,每两年修订并公布一次最新的国际原子量推荐值。

【原子质量】元素的一个原子所含物质的量。迄今已发现的元素之各原子,质量为 10^{-27} — 10^{-25} kg 量级。千克(kg)是国际单位制(SI)中的质量单位。微观领域中常使用的,是原子质量单位(u)。两种单位的换算关系为

$$1\text{u}=1.6605402\times 10^{-27}\text{kg}。$$

原子虽然由质子、中子、电子组成,但是在精确计算原子质量时,不能把构成原子的所有单个自由粒子的质量简单相加,因为它们形成束缚态原子时,有一部分质量转化成结合能,致使原子质量略小于构成该原子的全部质子、中子、电子的质量的总和。这一差值称为质量亏损。根据 u 与 kg 的关系,用原子量乘以原子质量单位(u)求原子质量的方法,精确地说,也只适用于仅有一种同位素的原子。因为包括两种以上同位素的元素,原子量是各同位素按丰度的平均值,而非一种同位素的值。电子的质量非常小,粗略地说,原子核的质量基本上就是原子的质量。不同原子的质量随着原子质量数 A 的增加而增大。用质谱仪可以精确地测定各种原子的质量。

【荷质比】带电微观粒子的电荷与其质量之比。常以 e/m 表示。实验上有多种测量方法。1986年的推荐值:电子的荷质比 $-e/m_e =$

$-1.75881962 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，质子的荷质比 $e/m_p = 9.5788309 \times 10^7 \text{ C/kg}$ 。由此可得质子与电子的质量之比 $m_p/m_e = 1836.152701$ 。它是原子物理学中两个最重要的无量纲常数之一，决定了原子物理学的最主要特征。为什么 $m_p/m_e \approx 1836$ ？物理学还不能从第一性原理出发把它推导出来。历史上，就是通过测量荷质比发现了电子。

【基本电荷】电子所带电量的绝对值。用 e 表示。1986年的推荐值为 $e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。1897年发现电子的实验，只测得电子的荷质比。最早精确测定电子电量的实验，是密立根于1909年做的油滴实验。1929年发现，由于空气粘滞性测量的偏离，他的结果仅有约1%的误差。作为物理学一个基本常量，对电子电量的测量，其地位不亚于测量光速。密立根对电子电量和质量进行了长期观测。实验中发现，任何电荷都只能是 e 的整数倍（为什么？这是物理学至今尚未解决的一个难题），故称 e 为基本电荷。微观粒子携带的电荷都以 e 为单位，写成某一整数，称为电荷的量子性。其实，1834年提出的法拉第电解定律，已经暗示了电荷的量子化。只是到了20世纪60年代中期，随着夸克理论的提出，才出现了带有 e 的分数倍电荷的粒子，并被普遍接受。但是实验上，至今仍未发现公认的带 e 的分数倍电荷的粒子。

【原子实】基态原子的所有闭合壳层电子和原子核构成的体系。它的电子以核为中心对称地分布在各壳层，整个体系的负电荷中心位于原子核中心，形成球对称的库仑场。若忽略核的贡献，它的总自旋角动量，总轨道角动量，总角动量及相应的磁矩均为零。闭合壳层以外的电子称为价电子。例如碱金属原子，最外层的一个电子

是价电子，其余部分就是原子实，它对价电子的作用与净电荷为基本电荷 e 的库仑场极为接近。

【离子】失去或得到若干个电子的原子或原子群。失去电子的原子，质子多于电子，体系带正电，称为正离子；得到电子的原子，质子少于电子，体系带负电，称为负离子。失去或得到电子的数目，即离子携带的电荷数，称为离子的价。例如，质子可以看成失去电子的氢离子 H^+ ，硫酸根 SO_4^{2-} 为两价负离子。通常，离子用元素符号右上角标以带正负号的数字组成的符号系统标记。例如 Na^+ 为钠的一价正离子， O^{2-} 为氧的两价负离子。光谱学上，常用元素符号后加罗马数字标记正离子。例如 $He\ II$ 、 $Li\ III$ 、 $Be\ IV$ 、 \dots 分别与 He^+ 、 Li^{2+} 、 Be^{3+} 、 \dots 的意思完全相同。这些离子都只有一个电子，与氢原子类似，故称类氢离子。中性原子只用元素符号标记，必要时，后面加上罗马数字 I 。例如 $H\ I$ 即氢原子 H 。能产生离子的装置称为离子源。加速器或强激光束可以把原子中的大量电子剥离，已经实现剥离70个电子，正朝着剥离重核和超重核原子的方向发展，目标是把铀原子的92个电子全剥光，获得裸核。多电子原子的大量电子被剥离后的状态称为高离化态。带大量正电荷的高价重离子称为高离化态原子。它们存在于高温等离子体中。它们的能级结构和光谱特性，对等离子体诊断和 X 射线激光器的研制具有重要意义。高离化态的许多数据尚属空白，极待研究测定。负离子是一种弱束缚态系统，是20世纪80年代以来原子结构研究的活跃领域之一。

【 α 粒子】正两价氦离子 He^{2+} ，即氦原子核。两个质子和两个中子构成的束缚体系。 α 粒子的质量为 $6.644 \times 10^{-27} \text{kg}$ ，电荷为 $2e$ (e 为

基本电荷), 自旋和磁矩均为零。 α 粒子可以由许多放射性物质直接发射, 或由某些核反应产生。它的能量为4.0—8.8MeV。加速器中可以产生能量更大的 α 粒子。

【奇特原子】带正、负电荷的“基本”粒子通过电磁相互作用形成的电中性复合体(普通原子, 即由质子、中子、电子构成的原子, 除外)。在中高能加速器中产生的带负电粒子, 射入被研究的物质, 碰撞中粒子把能量转移给原子, 使其激发或电离。失去能量的粒子速率减慢, 被俘获在原子轨道上, 若为高激发态, 还将发射一系列特征 X 射线跃迁到基态。这种由带负电的粒子取代普通原子中的一个电子而形成的体系, 就是一类奇特原子。例如 π^- 、 K^- 、 \bar{p} 、 Σ^- 等强子取代电子后的体系, 称为强子原子。或分别称为 π 介子原子、 K 介子原子、反质子原子和 Σ 超子原子等。带负电荷的轻子 μ^- 取代电子后的体系称为 μ^- 子原子。带正电的粒子射入物质, 俘获电子所形成的体系, 也是一类奇特原子。例如 μ^+ 子通过库仑作用与一个电子的结合, 称为 μ 子素。带正、负电荷的粒子形成的中性束缚态, 也是奇特原子中的一类。例如正电子 e^+ 与电子 e 形成的体系, 称为电子偶素。奇特原子的性质与构成它的粒子密切相关。例如强子原子, 强子比电子的质量大2—3个数量级, 原子的经典轨道半径与电子质量成反比, 各能级的能量与电子质量成正比, 所以强子原子与普通原子相比: 折合质量及结合能大, 玻尔轨道半径小, 对应能级能量高, 均为2—3个数量级。此外, 强子原子有多种不同的自旋角动量, 跃迁辐射多为 X 射线, 基态不稳定(寿命为 10^{-12} s 量级)。复合体中的粒子可能衰变, 正负粒子可能碰撞, 都能使强子原子解体。 μ 子素和电子偶素, 从化学观点, 可视它们为氢的同位素。但是, 正电子的质量与电子一样, 比质子质量小得

多，因此电子偶素与氢原子有重要差别：它没有核，不稳定，有的经 10^{-9}s 衰变为两个光子，有的经 10^{-7}s 衰变为三个光子。奇特原子在高能相互作用中产生，并且很快就衰变。它的产生、衰变涉及到原子、原子核和粒子的相互作用及转化，对研究原子物理、原子核物理、高能物理及量子电动力学等学科中的许多问题，都有重要意义，并使奇特原子的激光光谱学应运而生。

【衣着原子】被光子包围并与其形成统一体的原子。原子（或分子）在强交变电磁场（例如激光）作用下，能级结构发生变化，可以把原子和量子化的光场视为统一的整体，原子被光子包围着。这种观点可以用来解释原子（或分子）受强光共振作用产生的荧光谱线，和射频磁共振产生的共振谱线的主要特征，在研究共振荧光和量子光学方面有重要作用。

【里德伯原子】一个价电子被激发到高激发态（主量子数 n 很大的态）的原子。高激发态常称为里德伯态。许多原子、分子都可以激发到里德伯态。实验室中已制备出激发到 $n \approx 105$ 的氢原子；在星际介质中曾观察到 $n \approx 630$ 的激发态原子。粗略地说，原子中处于能级 n 的电子，结合能 E_n 与 n^2 成反比；相邻能级间的能量差 ΔE_n 与 n^3 成反比；平均轨道半径 r_n 与 n^2 成正比。因此，对于 n 很大的里德伯原子，有很多异于低能态原子的奇特性质：（1）最外层电子的 E_n 很小，可能比室温（300K）下粒子的热平动能（约 0.025eV ）还小得多。 ΔE_n 更小。室温黑体辐射即可诱导其能级跃迁，只有高分辨率光谱技术才能检测。例如 $n=80$ 附近，相邻能级间的电子跃迁，产生微波辐射，已在实验室和宇宙空间中观察到。（2）最外层电子的 r_n 可达微米量级，与细菌的大小相仿，比基态

原子半径大几个数量级。普通原子或分子在其中穿越几乎不受干扰。所以里德伯原子俗称巨原子或胖原子。下表中的数据说明了这两个特点（为了便于比较，还给出了氢原子 $n=1$ 的参数）。

n	E_n (eV)	ΔE_n (eV)	r_n (m)
1	13.6	10.2	5.3×10^{-11}
30	1.5×10^{-2}	1×10^{-3}	4.8×10^{-8}
250	2.2×10^{-4}	1.7×10^{-6}	3.3×10^{-6}

(3) 可以把里德伯原子看成单电子远离原子芯（即核和其他所有电子构成的体系）的类氢原子，是单电子与芯通过库仑作用十分微弱的弱束缚体系，它对外界干扰的反应很敏感，易受外电磁场或原子、分子碰撞的影响，如易变形，易破坏，产生超发光等，具有一些与低能态原子不同的有趣特性及用途。(4) 里德伯原子的平均寿命 τ_n 与 $n^{4.5}$ 成正比，可达毫秒甚至秒量级，比低激发态寿命（一般为 10^{-8} s 量级）长5个数量级以上。通常条件下，原子几乎都处于基态，只有采用专门手段才能产生里德伯原子。制备方法很多，以往常采用气体放电或普通光源激发（如紫外单光子吸收），这很难将原子激发到指定的能级。激光问世后，用调频激光器（输出激光频率在一定范围内连续可调）激发，是制备里德伯原子的最有效方法。亦可采用两束或多束激光分步激发。这些新方法的激发选择性很强，完全可以按需要把原子激发到预先指定的能级。还可以把两个价电子同时激发到高受激态。这种状态称为双里德伯态。已经用短波长可调谐激光器实现这种激发。两个或多个价电子在 n 相差很大的不同经典轨道上运动，对这类行星原子的研究，尚属新的研究领域。以往，里德伯原子的检测采用传统的光谱学方法，分辨率低，难于开展系统性的全面研究。发明激光器之后，特

别是调频激光器进入光谱分析之后，里德伯原子的检测多采用荧光法或电离法。电离法简单、灵敏，可以检测单个特定的里德伯态。利用脉冲电场使原子电离，并用电子倍增方法测量电子或离子，是近年来广泛采用的一种检测技术。虽然对高激发态原子的研究已有近百年的历史，但只是在有效地解决了里德伯原子的制备和检测技术之后，才得以进行系统、深入、全面的研究，并已形成一门独立的学科分支，涉及面较广，在许多理论和实验领域都有重要意义：射电天文学、激光分离同位素，等离子体诊断，探索新型激光器等。复杂里德伯态的许多问题尚属未知，是十分活跃的研究领域，并且正向更高的激发态 ($n \approx 300$)，高角动量态（轨道角动量量子数 l 很大，接近 $n-1$ ），重原子（特别是稀土元素）里德伯态等方面发展。里德伯原子的特性已经获得许多应用。

【激发态】 比基态能量高的状态。原子内部存在一系列能量取离散值的定态。在热平衡系统中，按照玻耳兹曼分布，绝大多数原子都处于能量最低的状态，称为基态。基态的自由原子是稳定的，在不受外界作用时，原子永远保持在这个状态。基态原子吸收能量跃迁到较高能量状态，称为激发。比基态能量高的状态称为激发态或受激态。不同激发态之间比较而言，能量高的称为高激发态，能量低的称为低激发态。20世纪70年代中期以来，原子激发态的研究已由：低激发态转入高激发态，外层电子激发转入内层电子激发，单电子激发转入双电子或多电子激发，中性原子转入离化态原子，简单原子转入复杂原子。原子激发态的结构、在外电磁场中的性质、及其与辐射的相互作用，不仅有重要的理论价值，而且是航天技术、激光武器、受控核聚变及同位素分离等现代新技术不可缺少的基础。原子的高激发态，一般由无数个里德伯态，无数个自电离

态及相应的连续态组成。高激发态原子广泛存在于星球内部、宇宙空间、地球大气、高温等离子体及某些气体激光器中，已成为原子物理学的前沿课题。

【光（致）电离】受光的照射，原子或分子吸收光子，发射出电子，变成正离子的过程。所发射的电子称为光电子。一个原子吸收一个光子就产生电离，称为单光子电离。这要求入射光子的能量 $h\nu$ (h 为普朗克常量， ν 为光子的频率) 必须等于或大于原子的电离能 E_i 。若 $h\nu = E_i$ ， ν 称为阈频率，记为 ν_i ；相应的波长 λ_i 称为阈波长。铯是所有元素中电离能最低的， $E_i \approx 3.9\text{eV}$ ， $\lambda_i = 3184\text{\AA}$ 。因此，能产生单光子电离的辐射，其波长必须是 $\lambda \leq 3184\text{\AA}$ 的紫外、X 射线和 γ 射线。 $h\nu - E_i$ 的多余能量变为光电子的动能。光场极强（如强激光脉冲）时，原子也可能吸收 $\lambda > \lambda_i$ 的多个光子而电离，称为多光子电离。原子可能先吸收一个频率低于 ν_i 的光子从基态跃迁到某个激发态或“虚态”（理论上假设的态，寿命约为 10^{-15}s 量级），在尚未返回基态时，立即吸收第二、三或更多个光子，能量接踵升高，直至电离。这个过程若通过中间激发态，就称为共振增强多光子电离。光（致）电离有不少实际应用。例如探测里德伯态和自电离态，研究离子的能级结构，超微量分析（灵敏度已接近所谓“单原子”极限），激光分离同位素等。对大气物理、太阳物理、气体放电及激光技术等领域有重要意义。

【自电离态】总激发能超过最低电离能的状态。供给原子（或分子）能量，使其电子脱离原子核的束缚变成自由电子，原子变成正离子，称为电离。使基态自由原子的一个电子电离并具有零动能，所需的最少能量称为电离能。不同壳层电子的电离能不同，价

电子的电离能最小。碰撞或吸收辐射可能使多电子原子的两个价电子同时跃迁到激发态,成为双重激发原子。若总激发能大于最低电离能,这个不稳定状态将以很大的概率发生:一个激发态电子回到基态,放出的能量使另一个激发态电子电离。这种靠原子自身激发能产生的电离,称为自电离。此外,原子吸收外界能量,也可能使一个内壳层电子激发,它返回低能态放出的能量也有可能使原子自电离。这种状态也是自电离态。电子束、X射线、火花放电或闪光灯的紫外光、激光及同步辐射源等都能把原子激发到自电离态。其中尤以可调谐激光(激光辐射波长在一定范围内连续可调)和同步辐射为佳。实验上,大量深入细致的自电离态的研究,就是在这两种辐射源出现之后才开始的。较高的自电离态可能衰变到各种较低的离子激发态,形成某些能级间的粒子数反转,导致放大的受激发射。辐射波长有可能处于真空紫外区。在钡原子蒸气中已经获得这种辐射。自电离态和天体物理、受控核聚变等研究密切相关,可为激光分离同位素提供有效途径,并为真空紫外激光器的运转提供了新的希望。作为一种新颖的原子结构,研究它具有重要的理论意义和应用价值。

【电子伏〔特〕】微观物理中广泛使用的一种能量单位。记为 eV。一个电子或电量等于一个基本电荷 e 的带电粒子,通过电势差为一伏〔特〕的电场,所获得(或失去)的能量为一电子伏〔特〕。 $1\text{eV} = 1.60217733 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

【原子簇】少数原子或分子的聚合物。在某些条件下,几个至几百个原子(或分子)结合成一个整体,形成物质结构的新形态。例如金属原子簇,惰性元素原子簇,化合物分子簇等。它们的性质介于

单个原子（或分子）与凝聚态物质之间。即使含几百个原子的簇，各种参量也不随原子数目单调变化，也不是宏观物质。原子之间的作用力不同，产生的簇也不同，有软球模型和硬球模型两种。丰度大的簇可以认为是稳定的簇，所含原子的数目称为幻数。实验表明，软球模型可以描述气体原子簇，例如稀有气体原子簇，幻数为1, 13, 55, 147, 309, 501, …；硬球模型更适于金属原子簇，幻数为2, 8, 20, 40, 58, 90, …，关于原子簇的理论和实验研究，大体上从两个方向进行：一是从原子向固体，研究簇中原子（或分子）数增加到多少，原子的单个特性消失，过渡到宏观物质；一是从固体（超细微粒）向原子，研究微粒小到何种尺度，固体的整体性质发生突变。研究原子簇的形成、结构、性质及运动规律，可以在原子、分子物理学与凝聚态物理学之间架起一座桥梁，对于发展原子力、分子力、离子与原子或分子间力的理论，对于材料科学、表面科学、催化反应动力学、环境科学，甚至对宇宙尘埃的生成和发展规律等，都具有重要意义。原子簇的研究始于20世纪60年代，80年代理论和实验研究都扩展成较大规模，但仍处于初期阶段。可以预期，随着研究的深入，从原子分子水平上设计和发展的具有特殊性能的材料，将成为可能，“原子与分子工程”将得以实现。

【汤姆孙模型】原子结构模型之一。它把原子看成正电荷均匀分布的球体，带等量负电荷的若干个电子沿着一些同心环一个个嵌在球体内。第1、2个环最多分别能容纳5、10个电子。若原子有70个电子，必须分布在6个同心环上。电子在平衡位置附近做简谐振动，电子的振动频率就是原子光谱频率。这个模型是汤姆孙1898年提出的，后来又不断充实，概括了当时这方面已有的实验结果和理论

分析。虽然它被后来的 α 粒子散射实验否定，但是其中的“同心环”及“环上只能安置有限个电子”的思想是可贵的。特别是它结束了2000多年来一直认为原子是不可分割的错误观念，第一个引导人们认识原子是有结构的。

【行星式模型】 原子结构模型之一。它认为原子的正电荷集中于原子的核心，带负电的电子绕核心转动，就象行星绕太阳转动。1903年勒纳研究阴极射线被物质吸收时，发现“原子是十分空虚的”，原子的有效部分集中在原子中心的很小体积内。长冈半太郎（1865—1950）根据这一实验事实于1904年提出这个模型。它对后来提出核式模型有一定启示。

【卢瑟福模型】 又称核式（结构）模型。原子结构模型之一。它认为，原子由等量正负电荷两部分组成，正电荷及绝大部分质量都集中在原子线度万分之一的核心（称为原子核），带负电的电子绕原子核在轨道上运动，如同行星绕太阳运动。这个模型是卢瑟福根据 α 粒子散射的实验事实，经严谨的经典理论分析（见“卢瑟福公式”），于1911年提出的，并被1913年的 α 粒子散射实验再次证实，很快得到公认。卢瑟福模型发现原子分为核及核外电子，核由高密度物质构成，使原子结构理论向前跨进一大步，对后来的发展有重大影响。但是，这个模型存在严重困难：按照经典电磁理论，做加速运动的电荷不断向外发出电磁辐射。那么，做圆周运动的电子，将因逐渐失去能量而使轨道半径越来越小，电子将沿螺旋线迅速逼近原子核，并且在 10^{-9}s 时间内即与核相撞，正负电荷中和，原子不复存在。这与客观事实——原子的稳定性——完全不符。加速运动的电子逐渐失去能量，发出电磁辐射的频率应连续变

化,即发射连续光谱。这与实验观测到的原子光谱都是离散的线状光谱,又完全不符。这表明,研究宏观现象确立的经典理论,对微观领域是不适用的。

【 α 粒子散射实验】即卢瑟福散射。高速 α 粒子轰击金属箔被散射的实验。主要实验装置为:铅块包围的 α 粒子源,发射出高速 α 粒子,成一细射线束,轰击在铂薄膜上并被散射,沿与入射方向成 θ 角的方向散射的粒子,打在涂硫化锌的接收屏上,发出微弱荧光,通过放大镜 M 观察闪光,可记下观察时间内 θ 方向的散射粒子数。M 可以转到 θ 取任意值的方向。除 M 外,整个装置都置于真空中。实验发现,小角 ($\theta=2-3^\circ$) 散射占绝对优势; $\theta>90^\circ$ 的约占 $1/8000$ (若按正电荷均匀分布在原子球体中计算,此概率仅占 10^{-3500}), 其中有的接近 180° 。1909年,盖革 (1882—1945, 德) 和马斯顿 (1889—1970, 英) 做出上述实验后,卢瑟福 (1871—1937, 英籍新西兰人) 根据大角度散射的实验事实,放弃了他原来相信的原子结构的汤姆孙模型,提出核式模型,并推导出 α 粒子散射公式 (见“卢瑟福公式”)。1913年,盖革和马斯顿再次做此实验,证明该公式的结论都是正确的。这个实验否定了原子结构的汤姆孙模型,促使提出并证明了核式结构模型。它还对近代物理产生了巨大影响,只要实验中观察到类似的散射现象,就可推断,所研究的对象可能具有点状的亚结构。

【库仑散射公式】两个带电粒子 (如 α 粒子与原子核) 在其库仑场的作用下发生散射,瞄准距离 (或碰撞参数) b 与散射角 θ 的关系

$$b = \frac{1}{2} a \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

称为库仑散射公式。其中

$$a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z_1 z_2 e^2}{E}, \quad (2)$$

称为库仑散射因子。它是碰撞中两个粒子的质心能靠近的最小距离。 $z_1 e$ 与 $z_2 e$ 分别为入射粒子和靶粒子的电荷, E 为入射粒子的动能, $E = \frac{1}{2} m v^2$, m 、 v 分别为入射粒子的质量和速率。 ϵ_0 为真空介电常量。散射粒子的轨道是双曲线的一支。瞄准距离 b 是尚未发生相互作用时, 靶粒子质心与入射粒子轨道间的垂直距离。实验上, b 既不可测量, 也无法控制。公式 (1) 是在靶粒子不动的条件下推导出来的。若计入靶粒子的反冲, θ 、 E 均应理解为质心坐标系中的值。那么, $E = \frac{1}{2} \mu v^2$, μ 为折合质量, $\mu = \frac{mM}{m+M}$, M 为靶粒子的质量。

【截面】 微观粒子碰撞 (或散射) 概率的量度。因具有面积量纲而得名。半径各为 r_1 和 r_2 的两个刚性球, 相对运动中, 球心距离为 $R = r_1 + r_2$ 时, 因相互作用而显著改变原来的运动状态, 称为碰撞。在微观领域, 通常用半径为 R 的静止靶粒子和以两球相对速度入射的点粒子 (数学点) 系统取代刚性球系统, 描写它们的碰撞过程。点粒子与靶心相距 R 时, 即发生碰撞。点粒子只有垂直入射在以靶心为中心, 面积为 $\sigma = \pi R^2$ 的区域内, 碰撞才能发生。所以称 σ 为碰撞的几何截面。微观粒子间的碰撞又称散射, 遵守量子力学规律。作用范围与相互作用势有关, 一般不等于几何截面, 并因粒子种类, 作用类型, 入射粒子动能等之不同而异。由诸因素共同决定的作用范围称为等效截面或散射截面。以 σ_e 表示。若靶物质薄层单位面积内有 N 个互不遮挡的粒子, 那么, 单位面积中将有 $N\sigma_e$ 。

面积与垂直入射的点粒子束发生碰撞。可见, σ_c 的大小决定了发生碰撞的比例, 表征碰撞的概率。一般, 碰撞后不同方向散射的点粒子数不同。以球坐标系方位角 (θ, φ) 表示的某方向单位立体角的散射截面, 称为微分(散射)截面或角分布。常用 $\sigma(\theta, \varphi)$ 或 $d\sigma/d\Omega$ 表示。 $d\Omega$ 为 (θ, φ) 方向的元立体角。微分截面既可由实验测定, 亦可由理论推导, 因此便于对两者进行比较。如果散射粒子可按某种性质分类, 就把各类散射截面称为部分截面, 简称分截面。微分截面的积分, 或部分截面的总和, 称为总截面。

相互碰撞的粒子除弹性散射外, 还可能发生: 吸收、俘获、激发、跃迁、电离、附着、反应、湮没等过程, 表征这些过程的概率分别称为相应的截面。如吸收截面等。实验上通过测量这些截面, 研究粒子的大小、结构及相应物理过程等各种问题。截面的单位为靶(恩), 符号为 b 。 $1b = 10^{-28}m^2$ 。微分截面的常用单位是靶/球面度, 符号为 $b \cdot sr^{-1}$ 。

【卢瑟福公式】 两个带电粒子发生库仑散射, 微分截面的表达式

$$\sigma_c(\theta) \left[\equiv \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \right] = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \left[\frac{z_1 z_2 e^2}{4E} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

$\sigma_c(\theta)$ 表示一个动能为 E 、电荷为 $z_1 e$ 的入射粒子, 被一个电荷为 $z_2 e$ 的靶粒子散射到与入射方向成 θ 角方向的单位立体角内的概率。单位为靶恩/球面度, 符号为 $b \cdot sr^{-1}$, $1b = 10^{-28}m^2$ 。 e 为基本电荷, z_1 与 z_2 分别为入射粒子和靶粒子的原子序数或电荷数, ϵ_0 为真空介电常量。这个公式是为了解释 α 粒子被铂、金、银、铜等金属箔散射, 根据经典力学原理, 在下述条件下推导出来的: 假定靶

核不动，忽略核外电子的作用，仅考虑 α 粒子与核的库仑相互作用，只计单次散射。实验证明，这个公式是完全正确的。实际计算时应转换到实验室坐标系。

【玻尔氢原子理论】原子结构的半经典理论。玻尔（1885—1962，丹麦）依据氢原子光谱的实验资料和经验规律，发展普朗克（1858—1947）的能量子和爱因斯坦（1879—1955）的光量子理论，把量子论引进卢瑟福（1871—1937）的核式模型，于1913年提出定态假设和频率条件（习惯上合称玻尔假设），并根据对应原理得出角动量量子化条件。这些思想与卢瑟福模型结合，形成了原子结构的卢瑟福—玻尔模型。它虽然是针对氢原子提出的，但是对其他原子也适用。玻尔假设和角动量量子化条件统称为玻尔理论。用它处理原子问题，可以给出定态轨道半径 r_n 、能级（或能量） E_n 、角动量 p_φ 等。这些量都只能取一系列离散值，而不能连续变化。这种状况称为量子化。它还能导出氢原子光谱的巴尔末公式，预言了许多新谱线并被后来的实验观察所证实。玻尔理论获得了巨大成功。它指出经典理论对原子内部的微观过程不适用，提出量子化观念，这是物理思想上的突破。它把大量光谱观测纳入统一的理论体系，揭示了光谱规律与原子结构及运动状态变化的内在联系，解开了长达30年之久的氢原子光谱之谜，使光谱分析成为研究原子结构的有力工具，推动了新的实验和理论工作。它与泡利不相容原理结合，从物理观念上阐明了化学元素的周期性等。玻尔理论承前启后，把原子物理学向前推进了一大步，为量子力学的建立打下了基础。但是，玻尔理论也存在很大局限性。例如，除了氢原子和类氢离子之外，对简单程度仅次于氢的氦原子，它就不能计算其能级和光谱；它也不能给出光谱线强度等方面的知识；把它用到一

般原子现象时,还有很多不可克服的困难。玻尔理论承认电子与原子核间的静电库仑相互作用的经典理论有效,却认为作加速运动的电子产生电磁辐射的经典理论无效,显然自身就存在难以解释的内在矛盾。众所周知,原子等微观世界,遵守量子规律。受科学发展的制约,玻尔理论未能彻底冲出经典理论的旧范畴,而是仍从经典观念出发,把微观粒子视为经典力学中的质点,保留经典“轨道”概念,只是在此基础上,人为地加上量子化条件,把复杂的原子问题作了过于简单的处理。因此,这个理论还只是初步的,许多基本问题还有待研究。原子问题的严谨而精确的理论是量子力学。

【定态假设】关于原子内部能量状态的假设。1913年玻尔提出:原子只能处于一系列不连续的稳定状态,称为定态。这些定态具有确定的能量 E_1 、 E_2 、 E_3 ,在原子核库仑场的作用下,电子绕核沿圆周轨道运动。每个轨道对应上述一个能量状态。这些定态(或相应的轨道)称为能级。在定态轨道上作加速运动的电子不辐射能量。这就是定态假设。它与玻尔频率条件合称玻尔假设。

【玻尔频率条件】关于原子内部状态变化规律的假设。1913年玻尔提出:原子只能从一个定态 E_m 过渡到另一个定态 E_n ,这个过程称为跃迁。跃迁中发出频率为 ν_{mn} 的电磁辐射,相应辐射光子的能量为 $h\nu_{mn} = E_m - E_n$,式中 h 为普朗克常量,脚标 m 、 n 取正整数,并且 $m > n$ 。它与定态假设合称玻尔假设。

【玻尔角动量量子化条件】对原子中电子角动量取值的限制条件。定态假设指出,原子中的电子绕核沿圆周轨道运动。玻尔依照对应

原理得出，在无数经典轨道中，电子只可能处在轨道角动量 p_φ 为普朗克常量 h 的整数倍那些轨道上，即

$$p_\varphi = nh, (n=1, 2, 3, \dots)$$

此式称为玻尔角动量量子化条件，整数 n 称为（主）量子数。该条件允许的那些轨道称为玻尔轨道，其半径 r_n 称为玻尔轨道半径。玻尔角动量量子化条件与玻尔假设统称为玻尔理论。

【玻尔轨道】满足玻尔角动量量子化条件的轨道。玻尔理论认为，原子中的电子绕核沿一系列平面圆周轨道运动。这些圆周的半径称为玻尔轨道半径，通常用 r_n 表示， r_n 只可能取一系列离散值，

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} \frac{n^2}{z}, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中： m_e 为电子质量， e 为基本电荷， z 为原子序数， ϵ_0 为真空介电常量， n 为（主）量子数， h 为普朗克常量。氢原子（ $z=1$ ）基态（ $n=1$ ）的轨道半径 r_1 常用 a_1 表示，称为玻尔第一（轨道）半径， $r_1 \equiv a_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} \approx 0.529177 \times 10^{-10} \text{m}$ 。玻尔圆形轨道理论只适用于单电子原子。在解决较复杂原子的问题中，发现它只是一系列索末菲椭圆轨道的特例。量子理论否认经典轨道概念，揭示出原子中的电子并不按轨道运动，而是按一定的概率分布在原子核周围。对氢原子基态，核外电子按球对称分布，而不是按玻尔平面轨道分布。尽管如此，鉴于轨道的直观性，在许多不十分严格的情况下，仍使用“轨道”这一术语。

【玻尔第一速度】氢原子基态电子沿圆周轨道运动的线速度。可用 v_1 表示，其值为精细结构常数 α 和真空中光速 c 之积，即 $v_1 = \alpha c \approx$

$c/137$ 。 v_1 比光速小两个多数量级，所以在许多情况下，常忽略原子中电子运动的相对论效应。

【能级】每个定态的能量值。量子理论指出，原子、分子、离子、原子核等束缚态微观粒子内部，都只能处于一系列离散的稳定状态，每个状态有确定的能量值，称为能级。玻尔理论给出的原子能级公式为

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{m_e e^4 z^2}{2h^2 n^2},$$

式中 m_e 为电子质量， e 为基本电荷， z 为原子序数， h 为普朗克常量， n 为（主）量子数，可能的取值为正整数， ϵ_0 为真空介电常量。式中的负号表示：电子脱离原子核，它们之间没有任何相互作用时，定为能量的零点。电子被原子核束缚时，外界必须向原子供给能量，才能将它们分开。所以原子内部的能量取为负值。原子最低的能量状态 E_1 称为基态，比基态能量高的定态 E_2, E_3, \dots 均称激发态或受激态。

氢原子 ($z=1$) 基态 ($n=1$) 能级

$$E_1 = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{m_e e^4}{2h^2} \approx -13.6 \text{ eV}.$$

若把氢原子基态电子移至无限远 ($n \rightarrow \infty$)，即把氢原子电离，所需的能量为 $E_\infty = |E_1| \approx 13.6 \text{ eV}$ ，称为氢原子的电离能。为使其在电场中电离所需加的电压 13.6 V ，称为氢原子的第一电离电位。其他原子的电离能和电离电位，可仿效氢原子的情况理解。

【能级图】按照能量高低次序用一系列水平线表示能级，用带箭号的竖直线表示能级跃迁的图。

以氢原子为例。由主量子数 n 标记的一条条水平线，表示一系

列能级（或光谱项）。通常，图左边还标有以 eV 为单位的能量标尺，把 $n=1$ 的基态定为能量的零点。这样，其他能级的能量均为正值。由此可以直接得出以 V 为单位的各能级的激发电位和电离电位。随着 n 的增大，能量增大，相邻能级间隔变窄。当 $n \rightarrow \infty$ 时，处于电离态，原子已变成离子加自由电子，可以具有任何连续变化的动能。图中网线表示连续态总体形成的能量连续区。图右边还常标有以 cm^{-1} 为单位的项标尺，把 $n = \infty$ 定为零点，随着 n 的减小，项增加。图中带箭号的竖线表示它所连接的两个能级之间的跃迁，通常都以数字标明相应跃迁谱线的波长。如果以波数计，只要把对应的两个项相减即可。这是只考虑主量子数的能级图。实际上能级还与其他量子数有关，图要复杂些。其他原子的能级结构复杂，能级图也复杂得多。但表示方式都与此类似，并且往往针对所讨论的问题，只画其中某些有关的部分。能级图广泛用于描述分子、原子、离子、原子核等的内部能量状态，是表示能级跃迁和光谱结构的有效工具。

【弗兰克—赫兹实验】 验证原子内部能量量子化的实验。因实验者而得名。

实验装置包括：抽空的玻璃容器中充有低压汞蒸气，其中封有发射电子的热阴极 K ，阳极 A ，及电子可自由穿越的栅极 G_1 和 G_2 。 KG_1 间加有正向可调直流电压，间距小于电子的平均自由程，是电子在电场作用下的加速区。 G_1 与 G_2 等电压，其间是电子与汞原子的碰撞区。 G_2 靠近 A ，两者间加有 -0.5V 的反向电压。

实验中观察到：随 KG_1 间电压 V 从 0 逐渐增加，回路中电流强度 I 呈周期性变化。每当 V 达到 4.9V 的整数倍时， I 都达到极大值并突然下降。同时还可探测到汞发射的 2537\AA 谱线。分析上述现

象,当 $V < 4.9\text{V}$ 时,从加速电场获得能量的电子与汞原子的碰撞,不足以改变汞原子的内部状态,属于弹性碰撞,电子无能量损失,只要其动能 $U_e > 0.5\text{eV}$,就能克服反向电压,到达 A 形成电流。 V 增加引起一连串变化: KG_1 间的场强,作用在电子上的力,电子获得的加速度及电子穿过 G_1 时的速度等都相应地增大,单位时间到达 A 的电子数就增多,致使 I 随 V 的增加而上升。当 $V = 4.9\text{V}$ 时,大量电子具有 4.9eV 能量,恰与汞的第一激发态对应,碰撞时电子把能量转移给基态汞原子,使它从基态跃迁到第一激发态;当它通过自发跃迁返回基态时,发出波长为 2537\AA 的辐射,恰好对应 4.9eV 的能量。失去能量的大量电子被反向电压阻遏,达不到 A,致使 I 从极大值突然下降。 V 继续增加时,虽然 $U_e > 4.9\text{eV}$,但是汞原子的能级间隔决定了它不能吸收全部的 U_e ,只能吸收其中的 4.9eV ,所以碰撞后电子仍保留 $(U_e - 4.9)\text{eV}$ 的动能,只要 $(U_e - 4.9)\text{eV} > 0.5\text{eV}$,电子就能克服反向电压到达 A。随 V 的增加,电子剩余动能增大,单位时间到达 A 的电子数增多,使 I 回升。当 $V = 4.9\text{V} \times 2$ 时,一个电子可能相继与两个汞原子发生非弹性碰撞,失掉全部 9.8eV 能量,被反向电压阻遏,达不到 A, I 再次从极大值突然下降。此后, V 继续增加的情况,依此类推。由此得出结论,原子只能一份份地吸收外界能量,从一个状态变到另一个状态(对于汞的基态与第一激发态,这份能量为 4.9eV),而不可能吸收连续变化的任意数量的能量。从而证明,原子体系内部只存在离散的能态,即原子内部的能量状态是量子化的。

这个实验不仅于光谱实验之外,独立地证明了玻尔定态假设和频率条件的正确性,而且实现了对原子的可控激发。它在原子物理学中占有重要地位,对量子理论的建立有重要意义。

【玻尔—索末菲模型】又称索末菲椭圆轨道理论。

把玻尔（圆形）轨道推广为椭圆轨道，并引入相对论修正的原子模型。1916年索末菲提出，氢原子中的电子绕原子核沿一系列椭圆轨道运动，原子核位于椭圆的一个焦点上，这些轨道必须满足

$$\begin{aligned} \oint p_\varphi d\varphi &= n_\varphi h, \quad n_\varphi = 1, 2, \dots, n \\ \oint p_r dr &= n_r h, \quad n_r = \\ & n - 1, n - 2, \dots, 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 φ 、 r 分别为平面极坐标系的角度和矢径变量， p_φ 与 p_r 为相应的广义动量， h 为普朗克常量， \oint 表示按变量变化一周积分； n_φ 和 n_r 分别称为角量子数和径量子数，只能取（1）式中给定的值， n 的可能取值为自然数，并且 $n \equiv n_\varphi + n_r$ ，称为主量子数或总量子数，对给定的 n ， n_φ 或 n_r 的可能取值均有 n 个。只有满足条件（1）的一系列轨道才是原子可能存在的定态。这些轨道称为索末菲轨道。条件（1）称为索末菲量子化条件。索末菲椭圆轨道的半长轴 a 、半短轴 b 、相应的能量 E_n 及角动量 p_φ 的表达式分别为：

$$a = (n_\varphi + n_r)^2 \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{m_e e^2 z} = n^2 \frac{a_1}{z},$$

$$b = a \frac{n_\varphi}{n} = n n_\varphi \frac{a_1}{z},$$

$$E_n = - \frac{m_e e^4 z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 2n^2 h^2},$$

$$p_\varphi = n_\varphi h, \quad (2)$$

式中 m_e 、 e 、 a_1 和 ϵ_0 依次为电子质量、基本电荷、玻尔第一半径和

真空介电常量, $h = h/2\pi$, 它们都是常量。这个理论对其他原子也适用, z 为原子序数, 对给定的原子, z 的值是确定的, 氢原子的 $z=1$ 。对给定的 n , 体系的能量 E_n 、轨道的半长轴 a 的值完全确定; 而半短轴 b 则可能为 a/n 、 $2a/n$ 、 \dots 、 a , 这 n 个椭圆轨道的形状依 $b/a = n_\varphi/n$ 而定, 取决于角量子数 n_φ 。 $n_\varphi = n$ 对应玻尔的圆形轨道。这 n 个状态的能量都是 E_n , 因此称为能级简并。 n 称为简并度。实际上, 氢原子的能级对 n_φ 并不简并。玻尔 (N. Bohr, 1885—1962, 丹麦) 曾提出, 计算氢原子的能量应考虑相对论效应, 据此, 索末菲推导出

$$E_{n,n_\varphi} = - \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{2} m_0 (c\alpha)^2 \frac{z^2}{n^2} \left[1 + \left(\frac{z\alpha}{n} \right)^2 \left(\frac{n}{n_\varphi} - \frac{3}{4} \right) + \dots \right], \quad (3)$$

式中 m_0 为电子的静质量, c 为真空中光速,

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx 7.29735308 \times 10^{-3} \quad (4)$$

(3) 式中的第一项就是玻尔理论的结果。第二项是相对论效应引起的修正, 它的值比第一项小得多, 随着 z 的增大以 z^4 的比例迅速增大, 并且因 n_φ 之不同而异。这样, 未考虑相对论效应时能量为 E_n 的一个能级, 考虑相对论效应之后, 分裂成能量有细微差别的 n 个能级 E_{n,n_φ} , 称此为能级分裂。分裂后的能级组称为能级的精细结构。于是, n 相同而 n_φ 不同的轨道, 能量不再相同, 简并消除。与此相联系的无量纲常数 α , 称为精细结构常数。(3) 式中其他各项分别对应 α 的更高次幂, 数值更小, 可以忽略。应该注意, (3) 式是在 $(z\alpha)/n < 1$ 的条件下导出的, 倘若出现相反的情况 (重离子加速器有可能制造出 $z=184$ 的原子核), 结果会怎么样, 正是研究领域中的一个活跃的课题。

【空间量子化】原子中电子的轨道平面在空间只能处在一系列离散的方位。这种特性被施特恩—格拉赫实验所证实。玻尔理论认为，原子中的电子绕核做圆周运动，轨道大小量子化，由主量子数 n 描写， n 取正整数。玻尔-索末菲理论认为，电子绕核沿平面椭圆轨道运动，轨道的形状也量子化，由角量子数 n_φ 描写；对给定的 n ， $n_\varphi = 1, 2, \dots, n$ 。在量子理论中，用 l 取代 n_φ ，称为轨道角动量量子数， $l = 0, 1, \dots, n-1$ ，其中 $l = n-1$ 对应玻尔圆形轨道；相应的轨道角动量 $p_\varphi = n_\varphi h$ 由 $p_l = \sqrt{l(l+1)}h$ 取代（ h 为角动量单位）。两者的差别涉及到量子力学的本质。轨道角动量垂直于轨道平面，表示轨道平面的方向。由于它是量子化的，它在空间某任选方向（定为坐标轴 z ）的分量 p_{lz} 也只能取一系列离散值，

$$p_{lz} = m_l h, \quad (m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l)$$

称 m_l 为轨道磁量子数，对给定的 l ，可能有 $2l+1$ 个取值。 m_l 就是空间量子化的表征。若原子处在外磁场中，就取磁场方向为 z 。电子有轨道磁矩，它相对磁场方向是量子化的，它与外磁场相互作用，使轨道平面绕磁场作拉莫尔进动。轨道实际是一空间曲线。

【原子实极化】受价电子静电场的作用，原子实的正负电荷中心发生微小分离，原子实变成电偶极子的现象。价电子离原子实愈近，极化愈显著。因此，主量子数 n 一定的价电子，离心率愈大（角量子数 n_φ 愈小）的轨道，产生的极化愈强。极化后形成的偶极子场又反作用于价电子，使体系的能量比只受原子实库仑场作用时低。 n_φ 愈小差值愈大。结果未考虑原子实极化时，库仑场中能量为 E_n 的一个能级，在计入原子实极化之后，就分裂成能量有细微差别的 n 条能级 E_{nn_φ} （ n_φ 可取 $1, 2, \dots, n$ ），从而导致光谱线分裂。例如

碱金属原子的价电子，排斥满壳层的电子，吸引原子核，使原子实极化。碱金属原子的光谱充分证明了这点。偶极子场的附加作用，还使价电子的轨道由单纯库仑场作用下的静椭圆，变成在平面内进动的椭圆。进动的角速度与 n_φ 有关。原子实极化和轨道贯穿理论，很好地说明了碱金属原子与氢原子之间的能级差别。

【轨道贯穿】原子中价电子椭圆轨道的一部分穿过某些满壳层电子与原子核之间的现象。它只发生在离心率大（角量子数 n_φ 小）的轨道。例如，碱金属原子的价电子之 $n_\varphi=1、2$ 等轨道，虽然大部分处在原子实外，但当价电子运动到离核很近的近日点区域，就进入原子实内部，导致：（1）价电子轨道由两个椭圆回线构成。一个在原子室内，一个在外。外椭圆以一定的角速度作平面进动。（2）价电子在原子实外运动时，受整个原子实（净电荷数 $z^*=1$ ）的库仑场作用；进入原子实后，受内回线包围的净电荷（ $z^*>1$ ）作用。一周期的平均结果 $z^*>1$ 。 z^* 称为有效电荷数。（3）贯穿轨道比同一主量子数 n 的非贯穿轨道的能量低。 n_φ 愈小，轨道愈扁，贯穿愈明显，能量差值愈大。这使未考虑轨道贯穿时能量为 E_n 的一个能级，而 n_φ 不同的 n 个轨道，在计入轨道贯穿之后，能量产生细微差别，变成一组能级 E_{n,n_φ} ，并导致能级跃迁的谱线分裂。把碱金属的能级与氢原子（只有一个电子，不存在轨道贯穿）的相应能级比较，偏离较大者，就可能对应贯穿轨道。轨道贯穿和原子实极化理论，很好地说明了碱金属原子与氢原子的能级差别。

【电子轨道磁矩】电子绕原子核沿轨道旋转产生的磁偶极矩，用 $\vec{\mu}_l$ 表示。经典理论把它看成载电流小线圈的偶极矩。量子理论中 $\vec{\mu}_l$ 与轨道角动量 \vec{p}_l 对应，

$$\vec{\mu}_l = -g_l \frac{e}{2m_e} \vec{p}_l,$$

式中： m_e 为电子质量， e 为基本电荷； $g_l=1$ ，称为轨道运动的 g 因子；负号表示 $\vec{\mu}_l$ 与 \vec{p}_l 的方向相反。用轨道角动量量子数 l 表示其大小，

$$\mu_l = -\sqrt{l(l+1)}\mu_B,$$

式中 μ_B 为玻尔磁子。 $\vec{\mu}_l$ 在空间任选方向 z （例如外加磁场方向）的分量

$$\mu_{lz} = -m_l \mu_B,$$

式中 m_l 为轨道磁量子数。

【拉莫尔进动】 磁矩受恒定磁场作用，绕磁场方向的进动。以原子中电子的轨道运动为例，电子的轨道磁矩 $\vec{\mu}_l$ 与轨道角动量 \vec{p}_l 的关系为 $\vec{\mu}_l = -\gamma \vec{p}_l$ ，负号表示 $\vec{\mu}_l$ 与 \vec{p}_l 的方向相反； $\gamma = e/(2m_e)$ ，称为旋磁比。式中： e 为基本电荷， m_e 为电子质量。在磁感应强度 \vec{B} 为定值的磁场中， $\vec{\mu}_l$ 与 \vec{B} 相互作用产生一力矩，使 $\vec{\mu}_l$ （及 \vec{p}_l ，或者说电子绕核运动的轨道平面）绕 \vec{B} 旋进，这就是拉莫尔进动。进动的角速度 $\omega_L = \gamma B$ 。 $\nu_L = \omega_L/(2\pi)$ 称为拉莫尔频率。由于 \vec{p}_l 的空间取向量子化（见“空间量子化”）， $\vec{\mu}_l$ 与 \vec{B} 的相互作用能将因磁量子数 m_l 之不同而异，致使能级和光谱线分裂（见“塞曼效应”）。分裂后的谱线间隔以 ν_L 为单位，又称 ν_L 为洛仑兹单位。电子自旋磁矩和原子磁矩的拉莫尔进动，与上述情况类似。

【普朗克公式】 普朗克提出的关于黑体辐射能量密度 $\rho(\nu, T)$ 与辐射频率 ν 及系统热力学温度 T 之间关系的公式，

$$\rho(\nu, T)$$

$$= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1)$$

式中 k 为玻耳兹曼常量, c 为真空中光速。到19世纪末, 关于黑体辐射的研究已经积累了丰富资料, 出现了各种经验公式和理论公式。其中, 由热力学的讨论提出的维恩公式, 只在高频部分与实验符合, 低频部分偏差显著; 通过电磁理论及能量均分定理推导出来的瑞利—金斯公式, 只有低频部分与实验符合, 高频部分随 ν 的提高偏差越来越大, 当 $\nu \rightarrow \infty$ 时, $\rho(\nu, T) \rightarrow \infty$, 这就是当时有名的“紫外灾难”。这些情况表明, 经典理论用于黑体辐射, 虽然有一部分, 理论与实验一致, 但是在整体上却遇到了不可克服的困难。1900年, 普朗克提出解释黑体辐射的崭新思想: 黑体由极多的带电线性谐振子组成, 振子的能量不能连续变化, 只能取某一最小能量 ϵ_0 的整数倍 $n\epsilon_0$ ($n=1, 2, 3, \dots$), 称为谐振子的能级(振子从某个能级过渡到另一个能级将发射或吸收辐射)。能量的这种不连续变化称为能量量子化。最小能量 ϵ_0 称为能量量子, 简称能量子或量子。 ϵ_0 的值与谐振子的频率 ν 成正比,

$$\epsilon_0 = h\nu \quad (2)$$

式中 h 是为解释黑体辐射引进的比例常数, 称为普朗克常量。上述思想称为普朗克量子论。按照量子化假设, 普朗克终于从理论上推导出在此之前两个月猜出来的公式(1)。当时发表的 h 值, 仅与现代值差1%。普朗克公式与黑体辐射实验完全符合。在高频区, 即 $h\nu \geq kT$ 时, 它趋于维恩公式; 在低频区, 即 $h\nu \leq kT$ 时, 它过渡到瑞利—金斯公式。而且, 经受了所有有关实验的检验, 证明它是完全正确的。普朗克量子论是科学史上的重大突破, 开创了物理学发展的新纪元, 标志量子观念的诞生。应该指出, 当时的量子论思

想远不如今天表述得这么清晰,普朗克的推导也含有内在矛盾。所以,在科学界普遍接受了量子观念之后,又陆续出现大量重新推导普朗克公式的论文。1981年有人仅用经典电磁理论导出了该公式,这意味着什么?值得深思。

【普朗克量子论】见“普朗克公式”。

【普朗克常量】又称作用量子。基本物理常量之一,用 h 标记。1986年的推荐值为 $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{S}$ 。1900年普朗克 (M. Planck, 1858—1947, 德) 深入研究黑体辐射,为使自己提出的公式与实验符合而引进的一个常量。他假设构成黑体的谐振子只能一份一份地发射或吸收能量,以频率 ν 振动的谐振子,能量的变化只能是 $h\nu$ 的整数倍,比例系数 h 的量纲为能量 \times 时间。力学中具有此量纲的量称为“作用”。此处的“作用”不能连续变化,所以称 h 为作用量子。 h 既是能量量子化的量度,又是联系光的波动性与粒子性,和实物粒子的波-粒二象性的桥梁,同时还是玻尔频率条件和不确定关系中的关键量。定量关系依次为 $\epsilon = h\nu$, $\lambda = h/p$, $\nu = (E_2 - E_1) / h$, $\Delta E \Delta t \geq h$ (详见相应各词条)。由此可以看出 h 在微观领域中的重要地位。量子化和波-粒二象性是量子力学中两个最基本的概念, h 在其中都起着关键性的作用。所以,凡是 h 不可忽略的过程,必然属于微观过程,遵守量子力学规律,凡是 h 可忽略的过程,量子物理就过渡到经典物理 (参见“对应原理”)。 h 的发现标志着物理学的发展从宏观世界进入了微观世界。

$\hbar \equiv h/2\pi = 1.05457266 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, 是分子、原子、原子核和“基本”粒子等微观粒子角动量的单位。 \hbar 也常被称为普朗克常量,但应注意 \hbar 与 h 的区别。

【量子数】描写微客体量子化特征的纯数字。除夸克层次外，量子数的取值一般均为整数或半整数（即 $1/2$ 的奇数倍）。微客体指分子、原子、离子、原子核、“基本”粒子（如电子、质子、中子…）及夸克等。这些微客体的性质、状态、特点、运动变化及相互作用规律等，都与日常生活中经常接触的宏观物体迥然不同，定量描写这些内容的许多物理量，无论是有宏观对应量，还是没有宏观对应量，它们的共性都是不能连续变化，只能从某些份突变到另一些份，即只能取一系列离散值，这就是量子化。每个量子化的物理量之可能取值，都对应一个纯数字。这个反映物理量量子化特征的纯数字，就称为量子数。由于某些物理量之间有一定关系，所以表征它们特征的量子数之间也有一定的内在联系。每个量子数都有深刻的物理内涵及明确的物理意义。以氢原子为例。它是由一个电子和一个质子组成的最简单的原子。为了描写原子的状态，必须知道其中电子的情况，例如电子在原子中的运动区域或经典轨道半径 r ，玻尔理论给出的结果是， $r_n = n^2 a_1$ ， a_1 是个常量， n 取自然数。就是说，原子中的电子，与宏观质点不同，它的位置不能连续变化，只能处在半径为 a_1 、 $4a_1$ 、 $9a_1$ … 的一些轨道上，轨道半径对应的纯数字 n ，称为主量子数。 n 的深刻意义还在于，它是氢原子能量状态的表征，决定了能量的主要部分（见“玻尔-索末菲模型”），与半径为 r_n 的轨道对应的能量为 $E_n \approx -13.6\text{eV}/n^2$ ，即氢原子内部只能有 $-13.6\text{eV}/1$ 、 $-13.6\text{eV}/4$ 、 $-13.6\text{eV}/9$ … 这样一些能量状态，而不可能有这些数字之间的任何能量状态，这就是能量量子化，能量也与一个取离散值的纯数字 n 对应。描写电子轨道运动的物理量还有轨道角动量 \vec{p}_l ， $p_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ ， \hbar 是个常量，作为角动量的单位， l 也是个纯数字，可能的取值只能是：0，

$1, 2, \dots, (n-1)$ 。l 不仅决定了角动量 \vec{p}_l 的大小，而且还决定了能量的次要部分（见“能级的精细结构”和“自旋轨道相互作用”）。轨道角动量 \vec{p}_l 对应的纯数字 l，称为轨道角动量量子数。角动量是矢量，但原子中的 \vec{p}_l ，其方向在空间也不能任意连续变化，只能取一些离散的方位。譬如 \vec{p}_l 在空间某方向（取为坐标轴 z）的投影 p_{lz} ，只能取一系列离散值， $p_{lz} = m_l \hbar$ ，式中 m_l 也是个纯数字，可能的取值仅为： $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。 m_l 决定了角动量 \vec{p}_l 的空间取向及其 z 分量的大小。 p_{lz} 所对应的纯数字 m_l ，称为轨道磁量子数。以上是量子数取整数的例子。电子还有内禀角动量（即自旋），它在空间只可能有两种取向，其 z 分量为 $p_{sz} = m_s \hbar$ ，式中 m_s 只有两个可能的取值， $m_s = \pm 1/2$ ，它决定了自旋的空间取向及其 z 分量 p_{sz} 的大小， p_{sz} 对应的纯数字 m_s 称为自旋磁量子数。不仅如此，在原子物理学中，就是用 (n, l, m_l, m_s) 这组量子数描写电子的状态，这组量子数的值一经确定，电子的状态就完全确定了。氢原子只有一个电子，给定 $(nlm_l m_s)$ ，原子态也就确定了。对于其他原子，须考虑各电子间的耦合，由电子的量子数求出原子的量子数，进而确定原子态。在粒子物理学中，描写强子（重子和介子）、轻子、规范粒子及夸克等的性质及相互作用时，往往就直接使用一系列量子数，诸如：电荷数、自旋、宇称、同位旋、重子数、轻子数、奇异数、超荷数、…在这里，量子数的内涵表现得尤为明显，一个量子数反映一种对称变换中一个物理量的性质，变换中对称性是否破坏，即相应物理量及表征它的量子数是否守恒，直接反映相互作用的性质。

【对应原理】 量子理论与经典理论关系的原理。经典理论是宏观世界普遍遵守的正确理论，量子理论是微观世界普遍遵守的正确理

论。本质上，两种理论不同，但是存在一定关系。后者是包括前者在内的更普遍的理论，前者是后者在宏观条件下的极限。对应原理指出，在大量子数（ n 很大）极限情况下，量子体系的行为渐近地趋于经典体系的行为；并且假定，在 n 很大的条件下导出的某些公式，对所有 n 值都成立。譬如在玻尔氢原子理论中，原子的能量量子化，能级跃迁的辐射频率不等于电子周期运动的频率。但是当主量子数 n 极大时，相邻能级非常靠近，能量趋于连续变化，量子论与经典电动力学得到的辐射谱一致。由玻尔理论导出的里德伯常量 R ，电子轨道半径 r_n ，体系能量 E_n 等，虽然都以 n 很大为条件，但是假定它们对所有的 n 值都成立（实验表明这是正确的）。对应原理是旧量子论的核心。现代物理学更丰富了对应原理的内涵。经典理论与非经典理论的对应关系是普遍的。普朗克常量 h 是作用量的最小单元，微观体系的作用量总是 h 的倍数。如果体系的总作用量可与 h 相比拟，体系就明显表现出量子特征；若总作用量比 h 大得多，可视 $h \rightarrow 0$ ，物理量呈连续变化，量子特性消失，体系遵循经典规律。若客体速度可与光速 c 相比拟，相对论效应显著，必须用相对论力学处理；若客体的速度比 c 小得多，可视 $c \rightarrow \infty$ ，相对论效应消失，相对论力学的公式就简化为牛顿力学公式。二者一一对应，在极限条件下趋于一致。康普顿公式 $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$ ，既包含 h ，又包含 c ，若 $h \rightarrow 0$ 或 $c \rightarrow \infty$ 都有 $(\lambda' - \lambda) \rightarrow 0$ ，散射波长 λ' 等于入射波长 λ ，即康普顿散射趋于经典散射。对应原理在这里得到清晰体现。

对应原理不仅精确地确定了氢原子能级，轨道半径量子化及角动量量子化条件，在一定程度上解决了光谱线相对强度间的关系等，而且逻辑上促成矩阵力学的提出，推动了量子论的发展和

量子力学的产生。

【电子自旋和自旋磁矩】 电子的内禀角动量和磁矩。1925年乌仑贝克和古兹密特假设：电子具有自旋角动量 $\hbar/2$ ，并具有与之相联系的一个玻尔磁子的自旋磁矩 μ_B 。其中 $\hbar = h/2\pi$ ， h 为普朗克常量。

按照量子理论，电子自旋角动量 \vec{p}_s 的大小为 $\sqrt{S(S+1)}\hbar$ ，自旋磁矩 $\vec{\mu}_s = -g_s\mu_B\vec{p}_s/\hbar$ 。式中： s 称为自旋量子数，其值恒为 $1/2$ ； $g_s = 2$ ，称为电子自旋的朗德因子；负号表示 $\vec{\mu}_s$ 与 \vec{p}_s 的方向相反。它们在空间任选方向 z （譬如外加磁场方向）的分量各为 $p_{sz} = m_s\hbar$ 和 $\mu_{sz} = \mp\mu_B$ 。式中 $m_s = \pm 1/2$ ，称为自旋磁量子数。 m_s 的取值表明，电子只有方向相反的两种自旋状态。由于电磁辐射的修正，实际磁矩 μ_e 与 μ_{sz} 稍有差异。实验测量和量子电动力学的理论计算值分别为

$$\mu_e = 1.001159652209\mu_B,$$

$$\mu_e = 1.001159652460\mu_B.$$

实验和理论都如此精确，并且符合程度如此之好，是物理学领域中所罕见的。自旋假设是根据一系列实验事实提出，并被大量实验证明是正确的。例如碱金属原子光谱的双线结构，塞曼效应，施特恩—格拉赫实验等等。电子自旋与外界条件无关，纯属电子内在的固有属性。而且并无“自旋”之意，决不可按照与空间坐标对应的轨道角动量的方式理解，即不能把“自旋”简单地理解为“绕自身轴的旋转”。电子的自旋和自旋磁矩可以从相对论量子力学方程解出来，可见，自旋运动是纯相对论性量子力学概念，找不到任何经典理论的对应物。电子是否有结构？自旋和自旋磁矩是否与其结构有联系？尚在探索之中。

【电子磁矩】原子中电子的轨道运动和自旋运动共同产生的磁矩。用 $\vec{\mu}_j$ 表示，它等于轨道磁矩 $\vec{\mu}_l$ 与自旋磁矩 $\vec{\mu}_s$ 的矢量和， $\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_l + \vec{\mu}_s$ ， $\vec{\mu}_j$ 不在电子总角动量的延线上。电子运动中，只有总角动量 \vec{p}_j 守恒，轨道角动量 \vec{p}_l 与自旋角动量 \vec{p}_s 都绕着 \vec{p}_j 旋进； $\vec{\mu}_l$ 、 $\vec{\mu}_s$ 和 $\vec{\mu}_j$ 也都绕着 \vec{p}_j 旋进。因此， $\vec{\mu}_j$ 不是有确定方向的量，可分解为垂直于 \vec{p}_j 及沿 \vec{p}_j 延线的两个分量，前者绕 \vec{p}_j 转动，平均效果为零。只有后者对外产生影响，记为 μ_j ，称为电子的总磁矩，其值为

$$\mu_j = -\frac{1}{h} g_j p_j \mu_B,$$

式中： $p_j = \sqrt{j(j+1)}h$ ， j 为总角动量量子数， $h = h/2\pi$ ， h 为普朗克常量； μ_B 为玻尔磁子； g_j 为朗德因子，

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) - l(l+1) + s(s+1)}{2j(j+1)},$$

式中： l 为轨道角动量量子数， s 为自旋量子数。如果电子所处环境的磁场足够强，以致 $\vec{\mu}_l$ 和 $\vec{\mu}_s$ 不能耦合成 $\vec{\mu}_j$ ，磁作用的影响须分别考虑磁场与 $\vec{\mu}_l$ 、 $\vec{\mu}_s$ 的相互作用。

【原子磁矩】通常指原子的磁偶极矩。原子中带电的核与电子运动共同形成的磁矩。核磁矩来源于质子和中子的磁矩，量度单位为核磁子 μ_N 。 μ_N 约为玻尔磁子 μ_B 的 $1/1836$ 。核磁矩比电子磁矩小得多，只影响能级的超精细结构。满壳层中诸电子的和磁矩为零。所以，在忽略核磁矩时，原子磁矩仅由满壳层外的诸电子贡献。单电子原子的磁矩就是该电子的磁矩。多电子原子的磁矩 $\vec{\mu}_J$ 与其总角动量 \vec{P}_J 的关系为 $\vec{\mu}_J = -g\mu_B\vec{P}_J/h$ ，负号表示 $\vec{\mu}_J$ 与 \vec{P}_J 的方向相反， $h = h/2\pi$ ， h 为普朗克常量， g 为朗德因子。对 LS 耦合，

$$g = 1 + [J(J + 1) - L(L + 1) + S(S + 1)]/[2J(J + 1)], \quad (1)$$

式中：S 为原子的总自旋量子数，L 为原子的总轨道角动量量子数，J 为原子的总角动量量子数。对 jj 耦合，

$$g = g_i [J(J + 1) + j_i(j_i + 1) - J_P(J_P + 1)]/[2J(J + 1)] + g_P [J(J + 1) + J_P(J_P + 1) - j_i(j_i + 1)]/[2J(J + 1)], \quad (2)$$

若电子数 $N_e = 2$ ，上式中的 J_P 和 j_i 就是每个电子的总角动量量子数； g_i 和 g_P 就是它们的 g 因子。对于 $N_e > 2$ ，按电子在壳层中的填充顺序，若先填充的 $(N_e - 1)$ 个电子构成的集体与最后填充的电子为 jj 耦合， J_P 和 g_P 分别为“集体”的总角动量量子数和 g 因子， j_i 和 g_i 为最后一个电子的相应值；“集体”的 g_P 值仍按形成该“集体”的方式是 jj 耦合还是 LS 耦合而分别用(2)式或(1)式计算。“集体”的 J_P 值也按相应耦合方式的角动量合成法则计算。原子磁矩是物质磁性的微观基础，可通过施特恩—格拉赫实验测定。如果实验用银或氢原子的基态，还可测得电子的固有磁矩。

【玻尔磁子】原子磁矩的基本单位。用 μ_B 标记。 $\mu_B = \frac{eh}{2m_e} = 9.274078 \times 10^{-24} \text{J/T}$ ，式中： m_e 为电子质量， e 为基本电荷， $h = h/(2\pi)$ ， h 为普朗克常量。式中数据为1986年推荐值。 μ_B 也作为电子轨道磁矩和自旋磁矩的单位，是原子物理学中重要常量之一。 μ_B 首先由玻尔 (N. Bohr, 1885—1962, 丹麦) 从理论上算出，后被施特恩—格拉赫实验所证实。 μ_B 亦可表为 $\mu_B = \frac{1}{2}\alpha(ea_1)$ ，式中 $\alpha \approx 1/137$ ，为精细结构常数； a_1 为玻尔第一（轨道）半径。 ea_1 为原子电偶极矩

的量度, μ_B 为原子磁矩的量度。上式表明, 原子中磁相互作用比电相互作用至少小两个数量级。

【施特恩—格拉赫实验】 证明空间量子化的实验。原子物理学中最重要的实验之一。为施特恩和格拉赫于1921年用银原子所做。后来及他人用若干种原子重复做过此实验。实验装置包括: 蒸发银的电炉, 其上有一小孔, 不断由小孔逸出的银原子经过一对准直狭缝形成沿水平方向飞行的细原子束, 通过非均匀磁场后, 被照相板拦截。整个装置封在真空中。实验结果: 相片上有两条黑斑, 对称地分布在原子束直进时垂直坐标 $z=0$ 的两侧。原子具有磁矩 $\vec{\mu}$ 。在非均匀磁场 \vec{B} 中, 沿水平方向飞行的原子沿 z 方向受力的作用, 偏离几何位置 $z=0$ 的距离与 $\mu \cos\beta$ 成正比, β 为 $\vec{\mu}$ 与 \vec{B} 之间的夹角。若原子没有磁矩 ($\mu=0$), 只能在 $z=0$ 处出现一条黑斑; 若原子磁矩 $\vec{\mu}$ 的方向任意, 大量原子的 β 就遍取 $0—360^\circ$ 的各种值, 照相板上将出现连续分布的一片黑斑。结果都不是。实验表明, 银原子的 $\vec{\mu}$ 相对磁场只有两种取向, 即其轨道平面在空间只有两种方位。这个实验, (1) 直接证明了空间量子化; (2) 证明原子具有磁矩, 并能测量磁矩的大小, 银和氢原子的磁矩都是一个玻尔磁子 μ_B ; (3) 促使提出电子自旋假设; 还进一步证明电子的自旋量子数 $s=1/2$, 自旋磁矩 $\mu_{s,z}=\pm\mu_B$, 朗德因子 $g_s=2$; (4) 证明轨道角动量子数 l 的取值应从 0 开始, 由量子理论的 $\sqrt{l(l+1)}$ 代替玻尔—索末菲模型中的角量子数 n_φ 是正确的; (5) 开辟了原子和分子束实验的新领域等。

【朗德因子】 全称朗德劈裂因子, 用 g 表示, 故又称“ g 因子”。电子或原子等微观粒子的磁矩与相应角动量之比的比例系数。原子

或电子的磁矩 $\vec{\mu}_K$ 与相应角动量 \vec{P}_K 之间的关系为 $\vec{\mu}_K = -g_K \mu_B \vec{P}_K / \hbar$, 负号表示 $\vec{\mu}_K$ 与 \vec{P}_K 的方向相反, 脚标 K 为相应角动量的量子数, μ_B 为玻尔磁子, $\hbar = h / (2\pi)$, h 为普朗克常量。 g_K 就是朗德因子, 数值上等于以 μ_B 为单位的磁矩 μ_K 与以 \hbar 为单位的角动量 P_K 之比的绝对值, 是无量纲因子。对电子自旋, 按照狄拉克理论, $g_s = 2$, 按照量子电动力学的计算和近代精确实验测量, $g_s = 2.002319304386$, 精确到 10^{-12} 量级, 是迄今测量精度最高的基本物理常数。对电子轨道运动, $g_l = 1$ 。对应电子总角动量的 g 因子, 参见“电子磁矩”。原子的 g 因子, 参见“原子磁矩”。

【自旋轨道相互作用】 又称自旋轨道耦合。原子中电子绕核沿轨道运动形成的磁场与电子自旋磁矩之间的相互作用。其能量的量子力学表达式为

$$\Delta E_{nl} = \frac{(\alpha Z^*)^4 E_0}{4n^3} [j(j+1) - l(l+1) - 3/4] / [l(l+1/2)(l+1)], l \neq 0,$$

式中: n 为主量子数, l 为轨道角动量量子数, j 为总角动量量子数; Z^* 为原子实的有效电荷数; $E_0 = m_e c^2$, 是电子的静止能量, m_e 为电子质量, c 为真空中光速; α 为精细结构常数。

原子实与价电子间的静电相互作用, 决定了原子能量的主要部分 E_n ; 对单电子原子, E_n 的数量级为 $\alpha^2 E_0$ (见“玻尔-索末菲模型”)。自旋轨道间的磁相互作用能 ΔE_{nl} 与 $\alpha^4 E_0$ 成正比, 数量级仅为 E_n 的 10^{-4} , 并且因 l 之不同而异。它们叠加在 E_n 上, 使未考虑电子自旋时能量为 E_n 的一个能级 n , 分裂成能量有细微差别的由两个量子数 nl 标记的 n 个能级 (l 取 $0, 1, 2, \dots, n-1$)。这种现象称为能级分裂。分裂后的能级组称为能级的精细结构。电子自旋相对

轨道磁场有两种取向,即对 n_l 能级, j 可取 $l \pm 1/2$, 所以附加能量 ΔE_{nl} 有两个值, 进一步导致能级双重分裂。这就是碱金属能级双重结构的由来。

【能级的精细结构】 能级的多重性。玻尔理论中, 原子内部不同状态的能量由主量子数 n 决定, 一个 n 值对应一个能级。实际上原子内部的运动状态很复杂, 存在相对论效应 (见“玻尔-索末菲模型”), 自旋轨道相互作用、轨道贯穿和原子实极化。这些因素导致, 电子轨道角动量量子数 l 或总角动量量子数 j (或者原子的总轨道角动量量子数 L 和总角动量量子数 J) 不同而 n 相同的能级, 分裂成能量有细微差别的一组能级。这类现象称为能级分裂。分裂后的能级组称为能级的精细结构。相对论量子力学给出的能级公式

$$E_{nj} = -\frac{Rhc}{n^2}(Z - \sigma_1)^2 - \frac{Rhc\alpha^2}{n^3}(Z - \sigma_2)^4 \left[\frac{1}{j + 1/2} - \frac{3}{4n} \right], (1)$$

与光谱实验完全符合。其中第一项即玻尔理论中的能量 E_n ; 第二项给出精细结构。式中: R 为里德伯常量, h 为普朗克常量, c 为真空中光速, Z 为原子序数; $(Z - \sigma_1)$ 和 $(Z - \sigma_2)$ 为不同条件下原子实的有效电荷数 Z^* , σ_1 与 σ_2 为轨道贯穿引起的修正, 其值随 l 而变, 对氢原子 $Z - \sigma_1 = Z - \sigma_2 = 1$ 。精细结构的相邻能级之能量间隔与一无量纲常数 α 的 2 次幂成正比,

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{hc} = 1/137.0359895, (2)$$

称为精细结构常数, 是索末菲 (1868—1951, 德) 研究原子中相对论效应时引进的。式中: e 为基本电荷, $h = h / (2\pi)$, ϵ_0 为真空

介电常量。 $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$ 是单位换算系数。 α 只由三个普适量 e 、 c 、 h 决定，是原子物理学中起基本作用的最重要的两个常数之一。

(2) 式中的数据是1986年推荐值。(1) 式中第二项近似与 Z 的4次幂成正比，元素愈重，精细结构愈明显。一般，裂距（以波数计）从轻原子的 $0.1\text{—}1\text{cm}^{-1}$ 到重原子的 1000cm^{-1} 。

【精细结构常数】 见“能级的精细结构”。

【电子态】 原子中任一电子的运动状态。在原子物理学中，通常用这个电子的主量子数 n ，轨道角动量量子数 l ，轨道磁量子数 m_l 和自旋磁量子数 m_s 描写。 n 标志电子的运动区域或经典轨道半径的大小，能量的主要部分，可能的取值为正整数。 l 标志轨道的形状、轨道角动量的大小及能量的次要部分；对确定的 n 值， l 有 n 个可能的取值： $0, 1, 2, \dots, n-1$ 。 m_l 标志轨道相对空间任选方向 z （例如磁场方向）的取向及轨道角动量之 z 分量的大小；对确定的 l 值， m_l 有 $2l+1$ 个可能值： $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。 m_s 标志自旋相对 z 方向的取向及自旋角动量之 z 分量的大小， $m_s = \pm 1/2$ ，表示自旋的两种状态。一组量子数 (n, l, m_l, m_s) 之值确定一个电子态。也可以用电子的总角动量量子数 j 及相应的磁量子数 m_j 取代 m_l 和 m_s 。那么，电子态就由 (n, l, j, m_j) 描写。 j 标志电子总角动量的大小；对确定的 l 值：若 $l=0$ ， $j=1/2$ ； $l \neq 0$ ， $j=l \pm 1/2$ 。 m_j 标志总角动量在空间的取向及其 z 分量的大小；对确定的 j 值， m_j 有 $2j+1$ 个可能值： $j, j-1, j-2, \dots, -j+1, -j$ 。

【电子组态】 由主量子数 n 和轨道角动量量子数 l 标记的原子中全部电子的状态。通常要列出原子中所有电子的 nl 值，有时可以只

列非满壳层或价电子的 nl 值。等效电子的数目标在其右上角。 $l=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 的电子, 依次称为 s, p, d, f, g, \dots 电子。例如氦原子, 基态的电子组态为 $1s^2$, 表示有 2 个 $n=1, l=0$ 的电子。原子序数 $z=24$ 的铬原子, 基电子组态为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s$, 简记为 $3d^5 4s$, 表示 $3d$ 支壳层以内的所有支壳层均已填满, 该层, 即 $n=3, l=2$ 支壳层有 5 个电子, 第 24 个电子分布在 $n=4, l=0$ 支壳层。若不强调 n , 电子组态还有更简单记法。例如两个 $l=1$ 电子, 记为 pp ; 若一个 $l=1$, 一个 $l=0$, 记为 ps 。

【原子态】 原子中全部电子的耦合状态。每个原子态有确定的能量和角动量。原子内部的能量 (或能级) 主要由核或原子实与价电子间的静电相互作用决定, 简言之, 即玻尔理论中的能量 E_n ; 其次由磁作用决定, 即电子的自旋轨道耦合能, 它叠加在 E_n 上, 形成各原子态。原子核也有磁矩, 也参与磁相互作用, 与电子共同决定原子态。但是, 磁矩与质量成反比, 核磁矩至少比电子磁矩小 3 个数量级, 只影响能级的超精细结构。若忽略它的贡献, 原子实的角动量和磁矩均为零。所以耦合能, 从而原子态仅由价电子决定。对于原子序数为奇数的大多数多电子原子 (基态), 偶数部分的电子之耦合角动量和磁矩均等于零, 原子态只由最后一个单电子决定。以两个价电子的耦合为例, 若它们的轨道角动量量子数分别为 l_1 和 l_2 , 自旋量子数分别为 s_1 和 s_2 , 那么, 4 种运动两两耦合, 共有 6 种相互作用: $G_1 (s_1 s_2)$, $G_2 (l_1 l_2)$, $G_3 (l_1 s_1)$, $G_4 (l_2 s_2)$, $G_5 (l_1 s_2)$ 和 $G_6 (l_2 s_1)$ 。其中第一个表示两个电子的自旋之间的相互作用, 其余依此类推。6 种耦合的强弱不同, 亦因原子之不同而异。通常, G_5 和 G_6 可略而不计。若 G_1 和 G_2 比 G_3 和 G_4 强, 称为 LS 耦合; 反之, 称为 jj 耦合。 LS 耦合的原子态, 用原子的总自旋、总轨道

角动量和总角动量的量子数 S 、 L 和 J 表征, 记为 $^{2S+1}L_J$, 亦称光谱项符号, 有时简称谱项。必要时, 须把价电子的组态写在它的左面。 $L=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 的各态依次表为 S, P, D, F, G, \dots 。例如镁原子的第一激发态, 电子组态为 $3s3p$, 可能形成的原子态共有: $^1P_1; ^3P_2, ^3P_1, ^3P_0$ 。以 3P_2 为例, P 表示 $L=1$, 左上角的 3 表示 $S=1$, 右下角的 2 表示 $J=2$; 必要时, 这个原子态应记为 $3s3p^3P_2$ 。 jj 耦合的原子态符号为 $(j_1, j_2)_J$, 其中量子数 j_1, j_2 和 J 各为两个价电子的总角动量和原子总角动量的量子数。例如 ps 电子组态, 可能形成的原子态共有: $(\frac{3}{2}, \frac{1}{2})_2, (\frac{3}{2}, \frac{1}{2})_1, (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})_1, (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})_0$ 。以第一个为例, 三个量子数的值依次为 $j_1=3/2, j_2=1/2, J=2$ 。关于 3 个或更多个电子耦合的原子态, 具体计算步骤请参阅“复杂原子的光谱”。由同一个电子组态形成的 LS 耦合和 jj 耦合, 原子态数目相同, J 的取值也相同。如上例中的 ps 电子组态, 两种耦合都形成 4 个原子态; J 的取值都是 $1, 2, 1, 0$ 。两种耦合的能级间隔不同。原子能级的类型, 实质上, 是各种相互作用相对强弱不同的表现。符合 LS 耦合的原子中, 每个电子自身的自旋轨道相互作用弱, 耦合主要发生在不同电子之间。符合 jj 耦合的原子中, 每个电子自身的自旋轨道相互作用强, 不同电子之间的耦合弱。实际上, LS 耦合和 jj 耦合只是两个极端情况, 严格遵守 LS 耦合或 jj 耦合的原子很少。许多能级类型介于两者之间, 只存在数量差别, 很难截然划分。例如碳族元素, 碳是典型的 LS 耦合, 铅是典型的 jj 耦合, 硅接近碳, 锡接近铅, 锗则介于两种类型之间。或者说, 除 LS 耦合和 jj 耦合之外, 还有其他耦合方式。

【等效电子】 旧称同科电子。原子中主量子数 n 和轨道角动量量子

数 l 分别相同的一类电子。受泡利不相容原理的限制,这类电子的轨道磁量子数 m_l 和自旋磁量子数 m_s 之值必须至少有一个不同。因此,等效电子比相应同数量的非等效电子所形成的原子态少。例如,按照 LS 耦合法则, n 不同的两个 p 电子,可形成 1S_0 、 1P_1 、 1D_2 、 3S_1 、 ${}^3P_{2,1,0}$ 和 ${}^3D_{3,2,1}$ 等10个原子态;而两个等效 p 电子,只能形成 1S_0 、 1D_2 和 ${}^3P_{2,1,0}$ 等5个原子态。

【泡利不相容原理】简称不相容原理或泡利原理。费密子(自旋量子数为半整数的微观粒子)遵循的基本规律之一。对于原子中的电子,表述为:不可能有两个或更多个电子处于同一状态。原子中电子的状态由主量子数 n 、轨道角动量量子数 l 、轨道磁量子数 m_l 和自旋磁量子数 m_s 描写。它们的可能取值为: $n=1, 2, 3, \dots$; 对给定的 n , $l=0, 1, 2, \dots, n-1$; 对给定的 l , $m_l=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$; $m_s=\pm 1/2$ 。一组量子数 (n, l, m_l, m_s) 的值确定一个量子态。因此,这个原理也可表述为:原子中每个量子态最多只能容纳一个电子;不可能有两个或更多个电子的4个量子数分别具有完全相同的值。泡利为了解释化学元素的周期性,在分析大量原子光谱和塞曼效应实验数据的基础上,于1925年总结出这个原理。后来发现,它对包括电子在内的所有费密子普遍适用。1940年,泡利证明,不相容原理是相对论性波动方程的必然结果。这个原理很好地解释了原子的壳层结构,元素周期表,光谱的精细结构和超精细结构,是费密-狄拉克统计法的基础。

泡利不相容原理反映的严格排斥性之物理本质,仍是个未完全揭开的谜。

【LS 耦合】又称罗素—桑德斯耦合。由电子组态求原子态的一种近

似方法。原子中每个电子都在原子核及其他电子的场中做轨道运动和自旋运动。多电子原子中存在复杂的电磁相互作用。其中诸电子间的电相互作用，理论处理上可分为平均场近似和剩余相互作用两部分，前者占主导地位，后者仅占一小部分。原子态能量的主要部分，由外层电子与核的库仑场、其他电子的平均场之间的电相互作用决定；次要部分由自旋轨道的磁相互作用决定。若剩余电相互作用比磁相互作用强，耦合主要发生在不同电子之间，属于 LS 耦合。具体求法：若第 i 个电子的自旋为 \vec{p}_{s_i} ，量子数为 s_i ；轨道角动量为 \vec{p}_{l_i} ，量子数为 l_i ，那么，就按矢量加法合成原子的总自旋角动量 $\vec{P}_s = \sum_i \vec{p}_{s_i}$ ，和总轨道角动量 $\vec{P}_L = \sum_i \vec{p}_{l_i}$ ，求和 \sum_i 对参与耦合的所有电子进行。然后把 \vec{P}_s 与 \vec{P}_L 合成原子的总角动量 $\vec{P}_J = \vec{P}_L + \vec{P}_s$ 。在求这三个角动量的过程中，同时会求出原子相应的量子数 S 、 L 、 J ，并可写出原子态 $^{2S+1}L_J$ 。进一步可求出相应的磁矩及耦合能。多个电子的 LS 耦合，可示意地记为 $\{(l_1, l_2, l_3, \dots)(s_1, s_2, s_3, \dots)\} = \{L, S\} = J$ 。

对两个电子的耦合， $P_s = \sqrt{S(S+1)}\hbar$ ， $S=0$ 或 1 ， $\hbar = \hbar/2\pi$ ， \hbar 为普朗克常量。 $P_L = \sqrt{L(L+1)}\hbar$ ， $L=l_1+l_2, l_1+l_2-1, \dots, |l_1-l_2|$ ，若 $l_1 > l_2$ ， L 的可能取值共 $(2l_2+1)$ 个。 $P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$ ，若 $S=0$ ， $J=L$ ；若 $S=1$ ， $J=L+1, L, L-1$ 。上述角动量都围绕 \vec{P}_J 进动。求 3 个以上电子耦合的原子态之具体步骤，请参阅“复杂原子的光谱”。LS 耦合适用于较轻元素原子的低能态。

【多重态】 原子总自旋与总轨道运动相互作用导致的能级精细结构。遵循 LS 耦合法则的多电子原子，一定电子组态耦合成的原子态，若总轨道角动量量子数为 L ，总自旋量子数为 S ，由于自旋轨

道相互作用，将形成总角动量量子数 J 取不同值的若干个态。当 $L \geq S$ 时，可能耦合成 $J=L+S, L+S-1, \dots, L-S$ 的 $2S+1$ 个态，即 LS 能级分裂成能量有细微差别的 $2S+1$ 重子能级；当 $L < S$ 时，可能耦合成 $2L+1$ 个态。 $2S+1$ 或 $2L+1$ 称为多重态的最大重数。 $S=0$ 的态称为单态， $S=1/2$ 的态称为双重态， $S=1$ 的态称为三重态，…两个电子的原子态总有单态和三重态两类，分别对应两个电子的自旋反平行和平行的两种状态。例如 pp 电子组态，可以耦合成 3 个单态： $^1S_0, ^1P_1, ^1D_2$ 和 7 个三重态： $^3S_1, ^3P_{2,1,0}, ^3D_{3,2,1}$ 。其中 3S_1 ($L < S$) 虽然只有一个态，但属于 $S=1$ 系列，习惯上仍称为三重态。锰的 8P 态 ($L=1, S=7/2$)，最大多重数是 3，只有 $^8P_{9/2}, ^8P_{7/2}$ 和 $^8P_{5/2}$ 三个态，但是仍称为八重态。能级的多重性是通过光谱分析判定的。迄今观察到的最大多重态为 11 重态，非满壳层的电子组态为 $4f^7 5d^1 6s^2$ 的钷原子即是。

【洪德定则】 关于能级高低次序的经验规则。具体表述为：等效电子经 LS 耦合形成的诸原子态，总自旋量子数 S 大的能级（或能量）低； S 相同的诸态，总轨道角动量量子数 L 大的能级低（以上对某些非等效电子也适用）；若电子数小于或等于幻数之半，总角动量量子数 J 小的能级低，称为正常次序；若电子数大于幻数之半， J 大的能级低，称为倒转次序。例如碳原子，电子组态为 $2p^2$ ，耦合成的原子态： $^1S_0, ^1D_2$ 和 $^3P_{2,1,0}$ 。按洪德定则，能级从低到高的顺序为 $^3P, ^1D, ^1S$ 。该组态的电子数 2 小于 p 支壳层幻数之半 3，属于正常次序，所以 3P 的 3 个态从低到高的顺序为 $^3P_0, ^3P_1, ^3P_2$ 。氧原子的电子组态为 $2p^4$ ，电子数多于幻数之半，为倒转次序，三重态中从低到高的顺序为 $^3P_2, ^3P_1, ^3P_0$ ；此外，氧与碳的原子态及其顺序均相同。这个定则是洪德于 1925 年提出，并于 1927 年补充了有关正序和

倒序的内容。它只适用于 LS 耦合。量子理论和泡利不相容原理可以导出这个定则。它对确定自由原子或离子的基态十分有用。

【朗德间隔定则】判断多重态能级间隔的规则。遵守 LS 耦合的多重态，即总轨道角动量量子数 L 和总自旋量子数 S 分别相同，而总角动量量子数 J 不同的各态，相邻能级对之间的能量间隔，与能级对中较大的 J 值成正比。例如三重态 3P 的两个相邻能级对 $^3P_2 - ^3P_1$ 与 $^3P_1 - ^3P_0$ 的能量间隔之比为2:1。这个定则是朗德（1888—1975，德）于1923年提出的，理论推算表明，它是正确的。它只适用于 LS 耦合。因此，可以作为原子态是否属于 LS 耦合的判据。例如碳族元素两个 p 态价电子中的一个激发到 s 态，即 ps 电子组态形成的原子态，光谱观察表明，只有碳属于 LS 耦合，铅明显为 jj 耦合，中间的硅、锗、锡为逐渐变化的状态。

【 jj 耦合】从电子组态求原子态的一种近似方法。原子中，每个电子都在原子核及其他电子的电磁场作用下，做轨道运动和自旋运动。所以，多电子原子中存在着复杂的电磁相互作用。其中诸电子间的电相互作用，理论处理上，可分为平均场近似和剩余相互作用两部分，前者占主导地位，后者仅占一小部分。原子态能量的主要部分，由外层电子与核的库仑场、其他电子的平均场之间的电相互作用决定；次要部分由自旋轨道的磁相互作用决定。若剩余电相互作用比磁相互作用弱，耦合主要发生在每个电子自身的自旋与轨道之间。这种耦合属于 jj 耦合。对给定的电子组态，已知每个电子的自旋量子数 s_i 和轨道角动量量子数 l_i ，用 jj 耦合求原子态的做法是：若第 i 个电子的自旋角动量为 \vec{p}_{s_i} ，轨道角动量为 \vec{p}_{l_i} ，按矢量加法合成它的总角动量 $\vec{p}_i = \vec{p}_{s_i} + \vec{p}_{l_i}$ 。然后再把所有电子的 \vec{p}_i 加

起来, 求出原子的总角动量 $\vec{P}_J = \sum_i \vec{p}_{j_i}$ 。在这个运算过程中, 也求出了每个电子和原子的总角动量量子数 j_1 、 j_2 、 j_3 、 \dots 和 J 。多电子原子的 jj 耦合, 示意地记为 $\{ (l_1, s_1) (l_2, s_2) (l_3, s_3) \dots \} = \{ j_1, j_2, j_3, \dots \} = J$ 。

以两个电子的耦合为例, 对每个电子, $p_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar$, 式中 $\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常量; 若电子的轨道角动量量子数 $l=0$, 则 $j=1/2$, 若 $l \neq 0$, $j=l \pm 1/2$ 。 $P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$, $J=j_1+j_2, j_1+j_2-1, \dots, |j_1-j_2|$, 若 $j_1 > j_2$, J 的可能取值共有 $(2j_2+1)$ 个。上述角动量都围绕 \vec{P}_J 旋转。原子态记为 $(j_1, j_2)_J$ 。电子自旋轨道相互作用能与原子序数的4次幂成正比, 所以重元素的自旋轨道耦合特别强。 jj 耦合适用于较重元素原子的受激态, 也适用于较轻元素的高激发态, 及个别重元素 (如铅) 的基态。

【原子的矢量模型】用矢量表示原子体系的角动量, 按矢量合成法则计算角动量之间的耦合, 以此描写原子态及跃迁规律的半经典模型。微观粒子的角动量服从量子规律, 大小和方向都是量子化的, 由相应的量子数表征。矢量模型就是用一个矢量代表一个角动量 \vec{P}_K , 其方向表示角动量的方向, 长短表示角动量的大小, 单位为 \hbar , $\hbar = h/(2\pi)$, h 为普朗克常量, 数值为 $\sqrt{K(K+1)}$, 即 $P_K = \sqrt{K(K+1)}\hbar$, K 为与 \vec{P}_K 对应的量子数。 \vec{P}_K 在空间任选方向 z (譬如磁场方向) 的分量 P_{Kz} 由磁量子数 M 表征, $P_{Kz} = M\hbar$, M 的可能取值为 $K, K-1, K-2, \dots, -K+1, -K$ 。两个角动量 \vec{P}_{K_1} 与 \vec{P}_{K_2} 耦合成的总角动量 \vec{P}_K 遵守矢量加法, $\vec{P}_K = \vec{P}_{K_1} + \vec{P}_{K_2}$, 大小仍表示成前述 P_K 的形式, 而 K 的可能取值为 $K_1+K_2, K_1+K_2-1, K_1+K_2-2, \dots, |K_1-K_2|$; 其 z 分量仍表为 P_{Kz} 的形式。

对原子中的每个电子, 自旋角动量 $p_s = \sqrt{s(s+1)}h$, 轨道角动量 $p_l = \sqrt{l(l+1)}h$, 总角动量 $p_j = \sqrt{j(j+1)}h$; 它们的 z 分量依次为 $p_{sz} = m_s h$, $p_{lz} = m_l h$, $p_{jz} = m_j h$; 相应量子数的取值为: $s = 1/2$, $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$; n 为主量子数, 可能的取值为正整数。对 $l=0$, $j=1/2$; 对 $l \neq 0$, $j = l \pm 1/2$ 。 $m_s = \pm 1/2$, $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, $m_j = j, j-1, j-2, \dots, -j$, 或者 $m_j = m_s + m_l$ 。原子的角动量由核及各电子的角动量合成。由于核磁矩至少比电子磁矩小3个数量级, 对原子能级的贡献很小, 若忽略这个因素, 原子实的合角动量为零, 原子的角动量仅由价电子决定。对单价电子原子, 价电子的角动量就是原子的角动量。对多价电子原子, 常用的方法有 LS 耦合和 jj 耦合。此外, 也有别的方式, 都遵守矢量合成法则。矢量模型可以用来求原子态, 在利用光谱研究原子结构方面十分有用。

【原子的壳层填充】 原子中电子按能量层次的分布。原子中每个电子的能量 (或能级) 的主要部分由主量子数 n 表征, 次要部分由轨道角动量量子数 l 表征。各 n 值表征的状态形象地称为壳层; 各 l 值表征的状态称为支壳层。电子在原子中按不同 n, l 值的分布称为壳层结构。 n 从1至7, 按英语字母顺序依次称为 K 至 Q 壳层。 $l = 0, 1, 2, \dots$ 依次称为 s、p、d、f、g、h 支壳层。原子中电子的分布遵守泡利不相容原理和能量最低原理。泡利不相容原理决定了每个壳层或支壳层所能容纳的最多电子数。第 l 支壳层最多容纳 $2(2l+1)$ 个电子; 第 n 壳层最多能容纳 $2n^2$ 个。所以 s、p、d、f、g、h 支壳层能容纳的最多电子数依次为2、6、10、14、18、22; K、L、M、N、O、P、Q 壳层能容纳的最多电子数依次为2、8、18、32、50、72、98。这些数字称为幻数。电子数达到幻数的支壳层

(或壳层)称为闭合壳层或满壳层。

能量最低的状态才是最稳定的状态。能量最低原理决定了电子在壳层中的填充顺序。玻尔理论给出了原子能级的计算公式,但是,严格的计算需用量子理论,作为定性了解,马德隆经验规律指出: $n+l$ 值愈大,能级愈高;对确定的 $n+l$ 值, n 愈大能级愈高。所以,对基态原子,电子在壳层中的填充顺序为: $n+l$ 相同时,先填充 n 小的壳层。 $n+l$ 不同时,若 n 相同,先填充 l 小的支壳层;若 n 不同,先填 n 大的壳层。填充按下表中箭头的顺序进行。箭头连接的数字为 $n+l$ 之值。

原子的壳层结构圆满地回答了元素的化学、物理及光谱特征的周期性,对元素周期表给出了满意的解释。按照上述原理给出的填充顺序,诸原子中的电子循序填充在 n 从1至7的7个壳层,把元素分为7个周期。第1周期的幻数为2,所以,只有氢H、氦He两个元素,分为两族。从锂Li起的第2—6周期,每个周期都是继上个周期之后,电子按上表中的顺序依次填充,原子外层每增加一个电子(当然,核的质子、中子也增加),即为一个新元素,直到这一周期最外层的 s 、 p 支壳层填满,结束该周期。由于一个周期中这些元素的原子之外壳层分别有1—8个电子,所以每个周期中的元素形成了8个主族。第3周期之M壳层的 p 支壳层到氩Ar填满。原子序数 $z=19$ 的钾K,3d支壳层全空着,第19个电子却填在4s支壳层,开始了第4周期。这是因为,3d态是圆形轨道,离核远;而4s态是离心率很大的椭圆轨道,由于轨道贯穿及原子实极化,使它的能量低于3d态,所以先填充它。光谱实验已经证实了这点。钙Ca把4s填满。受能量最低原理的限制,从钪Sc($z=21$)起,不是接着填充4p,而是开始填充3d支壳层,直到镍Ni($z=28$),形成了该周期的Ⅲ至Ⅶ副族及Ⅷ族,称为过渡族。铜Cu的3d已填满,

第29个电子填在 $4s$ ，为1价元素；下一个元素锌 Zn 把 $4s$ 支壳层填满。这两个元素分别为第4周期的 I、II 副族。从镓 Ga 至氪 Kr 填充 $4p$ 支壳层，结束第4周期。同样道理，铷 Rb 空着 $4d$ 、 $4f$ ；铯 Cs 空着 $4f$ 、 $5d$ 、 $5f$ 、 $5g$ ；钫 Fr 空着 $5f$ 、 $5g$ 、 $6d$ 、…它们的最后一个电子（分别为第37、55、87个电子）都填入 n 值比前一周期的 n 值大1的新周期的 s 支壳层，依次开始了第5、6、7周期。并且分别从钇 Y、镧 La、锕 Ac 开始，填充各自的 $4d$ 、 $5d$ 、 $6d$ 支壳层，形成相应周期的过渡族及各副族。 d 支壳层填满后，又分别填充相应的 p 支壳层（第7周期除外，迄今已发现的元素尚未填满 $6d$ 支壳层），结束该周期。第6周期从铈 Ce 起，第58个电子填在 $4f$ 支壳层，至镧 Lu，该支壳层填满。这14个元素的化学性质相似，统称为稀土元素，都是3价，在元素周期表中与镧同占一格。第7周期的锕系与此相仿，从镤 Pa 至铪 Lr 填充 $5f$ 支壳层。上述填充形成了各原子的最低能量状态，即基态。可见，元素的周期性，恰是电子组态周期性的反映。

【原子光谱】原子能级跃迁发射（或吸收）的电磁辐射按波长的有序排列。实验和理论都表明，原子光谱是线状的离散谱。按照玻尔理论，原子内部存在能量取一系列离散值的定态，称为能级。两个不同能级 E_n 和 E_m 之间的跃迁，发射（或吸收）频率为 $\nu = (E_m - E_n) / h$ 的辐射（ h 为普朗克常量），形成一条谱线。原子光谱可以用统一的公式 $\tilde{\nu} = T(n) - T(m)$ (1) 描述，式中： $\tilde{\nu}$ 为谱线波长 λ 的倒数，称为波数； $T(n)$ 与能量 E_n 的关系为 $T(n) = -E_n/hc$ ，称为光谱项，简称谱项或项， c 为真空中光速； n 为主量子数，可能的取值为自然数。亦可写成 $T(n) = R/n^2$ ， R 为里德伯常量。在许多场合，把光谱项符号 $^{2S+1}L_J$ 简称为（光）谱项（见

“原子态”和“LS 耦合”)。(1) 式表示每条谱线的波数等于两个光谱项之差。这个规律称为里兹组合原则或里德伯—里兹组合原则。按照这个原则,原子光谱分为若干个谱线系。对于给定的 n , m 取一系列比 n 大的整数,这些能级与 n 能级之间跃迁发射的所有谱线,形成一个谱线系。当 $m = \infty$ 时, $\tilde{\nu} = T(n)$, 称为该谱线系的系限 $\tilde{\nu}_{\infty}$ 。不同的 n , 形成不同的谱线系。原子光谱覆盖的范围从射频一直到 X 射线。一般而言,外层电子跃迁产生可见、紫外和红外光谱;内层电子跃迁产生 X 射线谱;精细和超精细结构能级之间的跃迁,产生微波和射频频谱。“原子光谱”往往指可见、紫外和红外光谱。元素周期表中同族元素的光谱有相似的规律和谱线结构。氢原子的光谱最简单;碱金属原子只有一个价电子,能级和光谱结构比较简单;氦原子有两个电子,碱土金属原子有两个价电子,较复杂;三个或更多个价电子的原子,能级和光谱更复杂。复杂原子的光谱线可多达几千条,很难全部理清。原子光谱是原子结构、内部状态及运动规律的反映。研究原子光谱可以得到原子的能级结构、寿命、电子组态等知识,是原子物理学和量子力学的重要实验基础,对原子理论的形成和量子力学的建立起了重大作用。对单电子原子,量子理论的结果与实验精确符合。对多电子原子,理论计算困难,必须依靠实验数据。激光的发明并用于原子物理学,对原子光谱学的研究起了极大的推动作用,使光谱分辨率提高了几个数量级,并形成了激光光谱学。近代原子光谱学的研究领域,已扩大到原子的内壳层、高激发态和高电离态,原子内部的能量转移和原子间的能量转移,以及测量寿命、能级分裂、多极矩、斯塔克位移和耦合系数等原子态的许多参数。原子光谱不仅对科学发展有重要意义,而且有广泛的实用价值。每种原子都有自己的特征光谱,通过光谱分析可以识别原子。这使它成为物质成分定性和

定量分析的有效方法。原子光谱在天文物理、等离子体物理、激光物理以及计量学、化学、生物学、医学、刑事学、地质学、冶金学、矿物学、考古学及许多技术领域都有重要应用。

【里德伯常量】 表征电子与原子核间结合能大小的原子常量。用 R 表示，单位为 m^{-1} 。出现在原子光谱（波长或波数）公式中，是个与量子数无关的常量。原子 A 的里德伯常量为

$$R_A = R_\infty (1 + m_e/M_A)^{-1},$$

式中： M_A 为原子核质量， m_e 为电子质量，

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 c h^3},$$

是把 M_A 视为无限大 ($m_e/M_A \rightarrow 0$) 时的 R_A ， e 为基本电荷， h 为普朗克常量， c 为真空中光速， ϵ_0 为真空介电常量。1986年的推荐值： $R_\infty = 10973731.534 \text{m}^{-1}$ ，氢的 $R_H = 1.096775854 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ ，氦的 $R_{He} = 1.0972227 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ 。里德伯常量反映了光谱与原子结构的密切关系，实验上既可精确测量，理论上又可精确计算，而且两者符合得很好。它与许多物理常量有联系， R_∞ 的值仅由普适物理常量 m_e 、 e 、 c 和 h 等决定，因此成为理论上计算其他基本常量的基础。里德伯常量随原子核质量变化，曾被用来证实氦的存在。

【氢原子光谱】 氢原子之电子能级跃迁产生的光谱。氢原子是最简单的原子，由一个质子和一个电子组成。它的能级结构和光谱也最简单。谱线的波数（即波长 λ 的倒数）为

$$\tilde{\nu} = T(n) - T(m) \quad (1)$$

光谱项

$$T(n) =$$

$$\frac{R_H}{n^2} + \frac{R_H \alpha^2}{n^3} \left(\frac{1}{j+1/2} - \frac{3}{4n} \right) \quad (2)$$

式中： R_H 为氢原子的里德伯常量， $\alpha \approx 1/137$ ，为精细结构常数， n 为主量子数， j 为电子的总角动量量子数。(2) 式与实验符合得很好。对氢原子光谱的研究有一个相当长的发展过程。到1885年，已经观察到氢的14条谱线，其中4条为可见光，分别记为 $H\alpha$ (6562.793 Å)、 $H\beta$ (4861.327 Å)、 $H\gamma$ (4340.466 Å) 和 $H\delta$ (4101.738 Å)。巴尔末分析这些数据后，提出氢光谱中各波长 λ 可表为

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}, (n = 3, 4, 5, \dots) \quad (3)$$

称为巴尔末公式。式中 $B = 3645.981 \text{ \AA}$ ，是个经验常量。(3) 式是最早的关于光谱规律的经验公式。1890年里德伯 (Johannes Robert Rydberg, 1854—1919, 瑞典) 独立地提出氢光谱的普遍经验公式 (包括了巴尔末公式)，

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (4)$$

称为广义巴尔末公式。式中： n 的可能取值为自然数，对每个 n 值， m 取比 n 大的一系列整数，形成一个谱线系。当 $m \rightarrow \infty$ 时， $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_\infty = R_H/n^2$ ，为该谱线系的极限，称为系限。不同的 n 值，形成不同的谱线系。已经观察到的谱线系 (以发现者的名字命名) 有：

$n=1$	莱曼系	紫外
$n=2$	巴尔末系	可见光
$n=3$	帕邢系	近红外
$n=4$	布拉开系	红外
$n=5$	普丰德系	远红外
$n=6$	汉弗莱系	远红外

(4)式为什么与实验观测符合得那么好?直到1913年玻尔氢原子理论提出,推导出里德伯常量 R 的表达式后,貌似纷乱的诸多谱线才有了理论上的统一解释。1896年发现, $H\alpha$ 线是相距很近(波数差为 0.36cm^{-1}) 的两条谱线;尔后高分辨率谱仪又测出, $H\alpha$ 由靠得很近的两条线组成。1916年在玻尔理论基础上提出的椭圆轨道理论和相对论修正,计算结果虽然与观测一致,只不过是一种巧合。1926年通过量子力学导出光谱项的严格表达式。1928年狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac, 1902—1984, 法)提出相对论波动方程,自然计入电子自旋,并导出自旋轨道相互作用,才得到光谱项公式(2)。 α 很小,若忽略 α 的二次方项,(2)式与玻尔理论一致。对给定的 n , 电子的轨道角动量量子数 l 可能取 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 。对每个不等于零的 l 值, $j=l\pm 1/2$ 。这样,能级 n 将因 j 值之不同,而分裂成能量稍微不同的与(2)式第二项对应的若干子能级,称为能级的精细结构。能级 n 与 m 之间的跃迁,实际上是两组精细能级间的跃迁,致使谱线分裂成若干条,称为光谱的精细结构。从而正确地解释了 $H\alpha$ 等谱线的多重性。按照狄拉克相对论量子力学,氢原子的 $2^2S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ (见“原子态”和“LS耦合”)两能级是简并的。即 n 值相同的 $2^2P_{1/2}$ 和 $2^2S_{1/2}$ 态,能量应该相同。其实不然。1947年发现兰姆移位,氢光谱进一步分裂。如 $H\alpha$ 谱线实际包含7条谱线。兰姆移位比上述精细结构的分裂还小,对于 $j\neq 1/2$ 的能级,几乎完全可以忽略。按照电偶极跃迁选择定则, $2^2S_{1/2}$ 与 $1^2S_{1/2}$ 之间为禁戒跃迁,这只是对单光子跃迁而言。1931年有人提出,一对能级之间的跃迁可能发射两个光子。1975年,实验上确实观察到了这种现象。这是继精细结构、兰姆移位之后,氢原子研究中的又一进展。氢原子光谱理论的发展过程,也是量子力学理论发展的一个侧面和缩影。

【巴尔末系】见“氢原子光谱”。

【莱曼系】见“氢原子光谱”。

【帕邢系】见“氢原子光谱”。

【布拉开系】见“氢原子光谱”。

【普丰德系】见“氢原子光谱”。

【汉弗莱系】见“氢原子光谱”。

【类氢离子光谱】原子核外只有一个电子的离子称为类氢离子。它们的电子跃迁产生的光谱称为类氢离子光谱。如 He II、Li III、Be IV、B V、C VI、…，都是类氢离子。它们的结构、能级，光谱等都与氢原子的相似。但是核不同，所以里德伯常量 R_A 、对应能级的能量、跃迁频率等均有差异。与氢原子比较，相应谱线都向短波移动。主量子数为 n 与 n' 的两个能级之间跃迁的波数为

$$\tilde{\nu} = R_A \left[\frac{1}{(n/z)^2} - \frac{1}{(n'/z)^2} \right]$$

式中 z 为原子序数。 n 取正整数。对每个 n 值， n' 取比 n 大的一系列整数，形成一个（发射）谱线系。

例如 He II 的 $n=4$ 谱线系，

$$\tilde{\nu} = R_{\text{He}} \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{(n'/2)^2} \right],$$

$$n' = 5, 6, 7, \dots$$

是1897年皮克林在天文观察中发现的,称为皮克林系。它与氢的巴尔末系相似,曾被误认为氢光谱。两者的区别:皮克林系比巴尔末系的谱线数多一倍,其半数谱线($n' = 6, 8, 10, \dots$)虽然几乎与巴尔末系重合,但并不完全重合,反映两者的R值不同;另半数谱线($n' = 5, 7, 9, \dots$)中的每一条,基本位于巴尔末系两相邻谱线的正中间。He II的 $n=3$ 谱线系于1914年发现, $n=2$ 和1两线系于1916年发现。同年还发现了He II的精细结构。

Li III与Be IV的光谱公式分别为

$$\tilde{\nu} = R_{\text{Li}} \left[\frac{1}{(n/3)^2} - \frac{1}{(n'/3)^2} \right]$$

$$\text{和 } \tilde{\nu} = R_{\text{Be}} \left[\frac{1}{(n/4)^2} - \frac{1}{(n'/4)^2} \right],$$

它们的 $n=1$ 线系都处于真空紫外区,于1930年被观察到。

【皮克林系】见“类氢离子光谱”。

【碱金属原子光谱】元素周期表中I族除氢外的所有元素均称碱金属。它们的电子能级跃迁产生的光谱,即为碱金属原子光谱。碱金属原子都有一个价电子,其余电子形成闭合壳层,角动量和磁矩均为零。价电子在净电荷为基本电荷 e 的原子实的库仑场中运动,原子状态基本上由价电子决定,与氢原子相仿,光谱也有相似之处,分成若干谱线系,一般可观察到4个。但是也存在重要差别,原子实极化使碱金属原子的能级比氢原子的相应能级低;轨道贯穿使价电子受到原子实库仑场作用的有效电荷数 $z^* > 1$ 。这使碱金属原子的光谱项为

$$T(n) = \frac{z^{*2}R}{n^2} = \frac{R}{n^{*2}},$$

式中： R 为里德伯常量， n 为主量子数， n^* 为有效量子数， $n^* = n/z^* < n$ ， n^* 比 n 小的部分用 Δ 表示， $n^* = n - \Delta$ ， Δ 称为量子数亏损，是价电子轨道角动量量子数 l 的函数。例如锂， $\Delta_s = 0.41$ ， $\Delta_p = 0.04$ ， $\Delta_d < 0.01$ ， $\Delta_f \rightarrow 0$ ，脚标 s 、 p 、 d 、 f 分别对应 $l = 0$ 、 1 、 2 、 3 。四个谱线系分别称为主线系、第一辅线系或漫线系、第二辅线系或锐线系、柏格曼线系或基线系。相应的光谱线波数依次为

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(n_f - \Delta_s)^2} - \frac{R}{(n_i - \Delta_p)^2},$$

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(n_f - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(n_i - \Delta_d)^2},$$

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(n_f - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(n_i - \Delta_s)^2},$$

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(n_f - \Delta_d)^2} - \frac{R}{(n_i - \Delta_f)^2},$$

式中 n_i 与 n_f 分别为跃迁始、末态的主量子数，对每个线系， n_f 取固定值， n_i 取比 n_f 大的一系列整数（主线系包括 n_f ）。

以锂的光谱线系为例，主线系的波长范围最广，其中最长的谱线是红色，其余诸线位于紫外，系限为 2299.7 \AA ；第一、二辅线系有共同的系限，除第二辅线系有一条谱线落在红外区，其余均在可见区；柏格曼系在红外。其他碱金属原子的光谱与此相仿，只是波长各异。用高分辨率光谱仪观察，发现上述每条谱线都由波数差很小的2或3条谱线构成。例如钠主线系最长的谱线，就是通常说的钠黄光，实际是由波长为 5895.92 \AA 和 5889.95 \AA 的两条谱线构成。这种现象称为碱金属的双线结构。它是电子自旋与轨道运动相互作用的结果。这导致每个 $l \neq 0$ 的能级分裂成有一定能量间隔

的两条能级。按照选择定则： l 的改变量 $\Delta l = \pm 1$ ，总角动量量子数的改变量 $\Delta j = 0, \pm 1$ ，自然得出双线及三线结构。由于主线系由 ${}^2P_{1/2}$ 和 ${}^2P_{3/2}$ 向 ${}^2S_{1/2}$ （见“原子态”和“LS耦合”）跃迁形成，第二辅线系由 ${}^2S_{1/2}$ 向 ${}^2P_{1/2}$ 和 ${}^2P_{3/2}$ 跃迁形成，故这两个线系的谱线都是双线结构；第一辅线系由 ${}^2D_{3/2}$ 向 ${}^2P_{1/2}$ 和 ${}^2P_{3/2}$ ，及 ${}^2D_{5/2}$ 向 ${}^2P_{3/2}$ 跃迁形成，柏格曼系由 ${}^2F_{5/2}$ 向 ${}^2D_{3/2}$ 和 ${}^2D_{5/2}$ ，及 ${}^2F_{7/2}$ 向 ${}^2D_{5/2}$ 跃迁形成，所以这两个线系的谱线都是三线结构。这就是碱金属原子光谱的精细结构。实验上从光谱测量可以推知能级结构及能量数据；在此基础上建立起的能级结构理论又圆满地解释了光谱。碱金属光谱的双线结构是提出电子自旋假设的重要根据之一。元素周期表 I 副族的铜、银、金与碱金属有类似光谱。也容易观察到铜的 $3d$ 和金的 $5d$ 内壳层电子激发态产生的光谱。

【主线系】 见“碱金属原子光谱”。

【漫线系（第一辅线系）】 见“碱金属原子光谱”。

【锐线系（第二辅线系）】 见“碱金属原子光谱”。

【基线系（柏格曼系）】 见“碱金属原子光谱”。

【氦原子光谱】 氦原子电子跃迁产生的光谱。氦原子有2个电子，它们之间的静电相互作用，远大于自旋轨道等各种磁相互作用，是决定光谱特征的主要因素。两个电子自旋的相对取向有平行和反平行两种状态，它们通过泡利不相容原理影响两电子的空间分布，从而影响电相互作用。所以，决定氦原子光谱的主要因素是泡利不

相容原理。氦原子的基态为 $1s1s^1S_0$ （见“原子态”和“LS耦合”），受激后，通常一个电子留在 $1s$ 态，另一个电子被激发到主量子数 $n=2、3、4、\dots$ 的高能态。激发过程中，若电子自旋方向不变，总自旋量子数仍为 $s=0$ ，形成单态： $^1S_0, ^1P_1, ^1D_2, ^1F_3$ 等；若电子自旋方向反转，则总自旋量子数 $S=1$ ，形成三重态： $^3S_1, ^3P_{2,1,0}, ^3D_{3,2,1}, ^3F_{4,3,2}$ 等。按洪德定则，同一电子组态的三重态比单态的能级低；氦的三重态是倒序排列。氦的第一、二激发态分别为 2^3S_1 和 2^1S_0 ，都是亚稳态，与基态的能量间隔分别为19.77和20.55eV，可以成为激励其他原子的能源，在He—Ne激光器中获得了重要应用。氦原子光谱分为主线系、漫线系、锐线系和基线系等一系列谱线系，这与碱金属原子光谱相似。但是受选择定则 $\Delta s=0$ 的限制，单态与三重态之间不能发生电偶极辐射跃迁，所以氦有两套光谱。每个谱线系，单态间的跃迁产生单线，光谱结构简单；三重态间的跃迁产生多重线，光谱结构复杂。多重谱线的条数可按选择定则推算。若仪器分辨本领不高，实验上难以观察到全部跃迁谱线。历史上，人们曾误认为两套光谱属于两种氦，把光谱结构复杂的称正氦；简单的称仲氦。直到玻尔理论和泡利不相容原理提出后，人们才弄清了上述道理，知道并不存在两种氦。氦元素就是通过观察太阳光谱于1868年发现的。

【碱土金属原子光谱】元素周期表中Ⅱ族的元素称为碱土金属。它们的电子跃迁所产生的光谱，即为碱土金属原子光谱。碱土金属原子都有两个价电子，其余电子形成闭合壳层，原子的状态由价电子决定。因此它们的能级和光谱都与氦原子的相似。例如镁原子，能级分为单态和三重态。光谱包括主线系、漫线系、锐线系和基线系等。每个谱线系都分为单态和三重态两套。与氦不同之处，不是

所有的谱线都可归入这四个系，有的谱线是两个价电子同时激发时产生的。此外，三重态的最低能级不是 3S ，而是 3P ；并且 $^3P_{0,1,2}$ 的三个能级之间的间隔也比氦的大。元素周期表Ⅱ副族的锌、镉、汞的光谱与碱土金属的相似。汞有80个电子，基电子组态为 $5d^{10}6s^2$ ，原子基态为 1S_0 （见“原子态”和“LS耦合”）。最低激发态的电子组态为 $5d^{10}6s6p$ ，谱项为 1P_1 和 $^3P_{0,1,2}$ 。汞的 2536.52 \AA 谱线为 $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ 跃迁（镁的 4571.15 \AA 谱线也是这种情况），违背选择定则 $\Delta S = 0$ ，这种禁戒跃迁谱线称为互组合线。 $\Delta S = 0$ 严格成立的条件是自旋轨道不耦合。汞的那条互组合线强度相当大，说明总自旋与总轨道运动间的耦合很强。

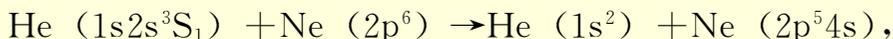
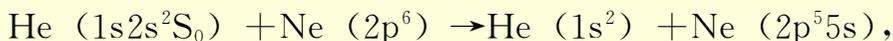
【复杂原子的光谱】这里把元素周期表中Ⅲ—Ⅶ族及0族的原子笼统地叫做复杂原子，并把它们的电子跃迁所产生的光谱，笼统地叫做复杂原子光谱。这些原子的价电子都在3个以上，能级结构和光谱都比碱土金属的复杂。可循的规律有：位移律。原子序数为 z 的中性原子和原子序数为 $z+1$ 的原子之一价正离子，有相同的电子数和电子组态，能级和光谱结构也很相似。例如，实验已经证明，氢原子H与氦离子 He^+ 等确是如此。多重性交替律。元素周期表中同一周期的各元素，按排列顺序，能级结构具有偶数和奇数多重态。这表明，它们的总自旋量子数 S 交替地取半整数（ $1/2$ 的奇数倍）和整数。以第4周期的前几个元素钾K、钙Ca、钪Sc、钛Ti为例，它们的多重态依次为：双；单、三；双、四；单、三、五。应注意，只有当原子的总轨道角动量量子数 $L \geq S$ 时，最大多重数才为 $2S+1$ ；反之，为 $2L+1$ 。例如锰Mn的 8P 态，并没有8个态，只包含3个态，它与 8S 态之间的跃迁实际上是三条谱线。分支律。多电子原子的原子态，可按下述方法推导。任何原子（的基态或激发

态),都可视为它的一价正离子和一个外加电子组成。按照位移律,该离子的状态与它前面一个元素的原子态相似。这样就可以运用两个电子耦合的法则(见“LS耦合”、“jj耦合”、“原子态”),由原子序数为 z 的原子求出 $z+1$ 的原子之原子态。具体方法分为LS耦合和 J_j 耦合两种。前者,把离子的轨道角动量量子数 L_P 视为一个电子的相应量子数,把 L_P 与外加电子的轨道角动量量子数 l 合成,就得到原子序数为 $z+1$ 的原子的 L 值;自旋量子数也这样处理,就得到 S 的值;再把 L 与 S 合成,就得到原子序数为 $z+1$ 的原子的总角动量量子数 J ,于是可写出它的原子态 $^{2S+1}L_J$ 。后者,把离子的总角动量量子数 J_P 视为一个电子的总角动量量子数,把 J_P 与外加电子的总角动量量子数 j 合成,求出 J 。关于 J_P 的求法,仍按LS耦合或 J_j 耦合,重复上述步骤。这种方法有时称为分支律。推导中必须遵守泡利不相容原理。在已知的元素周期表中I、II族元素的情况的基础上,运用上述知识,原则上,就可以推导出任何复杂原子的原子态和光谱跃迁了。对多电子原子,仍可用“朗德间隔定则”判断一种耦合是否属于LS耦合。如果是,关于能级的高低次序,仍遵守洪德定则。

【等电子序】电子数相同而原子核不同的一系列原子和离子的总称。例如氢原子和类氢离子: H I、He II、Li III、Be IV、B V、C VI、…都只有一个电子,核电荷数(即原子序数) z 依次为1、2、3、…;又如 K I、Ca II、Sc III、Ti IV、V V、Cr VI、Mn VII、…都有19个电子,其中18个与核构成原子实,另一个电子在原子实的库仑场中运动,它们的 z 值依次为19、20、21、…这是两个等电子序的例子。等电子序中,不同元素的光谱性质上相似,它们的光谱项 T 与原子序数 z 有一定关系,可以写成 $\sqrt{T/R} = (z - \sigma) / n$,式中 R 为

里德伯常量, n 为主量子数, σ 为轨道贯穿和原子实极化导致的对 z 值的修正。 \sqrt{T} 与 z 成线性关系。序中相继元素的光谱, 逐渐向短波方向位移, 很快达到真空紫外区。对给定的 n , 以 $\sqrt{T/R}$ 为纵坐标, 以 z 为横坐标, 画出的直线称为莫塞莱图。可以用它来判断光谱项的 n 值, 电子壳层的填充顺序 (见“原子的壳层填充”), 及从序中某些元素的已知光谱推测别的元素的光谱。

【稀有气体原子光谱】元素周期表中0族元素氦 He、氖 Ne、氩 Ar、氪 Kr、氙 Xe、氡 Rn, 称为稀有气体或惰性气体。除氦外, 其他原子的基电子组态都是 s^2p^6 , 形成闭合壳层, 原子基态都是 1S_0 。通常, 吸收一定外界能量, 可能有一个 p 电子被激发到同一主量子数 n 的 d, f 等态, 或 n 大的态。这个电子的跃迁产生稀有气体原子的光谱。例如氖 Ne, 共有10个电子, 基电子组态为 $1s^22s^22p^6$, 其中一个 $2p$ 电子被激发到 $3s, 3p, 3d, 4s, \dots$, 形成一系列激发态。这些态之间的跃迁, 就形成氖原子光谱。在充以一定比例的氦、氖混合气体的 He-Ne 激光管中放电, He 原子与电子碰撞, 从基态 $1s^2^1S_0$ (见“原子态”和“LS 耦合”) 被激发到 $1s2s^1S_0$ 和 $1s2s^3S_1$ 两个亚稳态。它们与基态 Ne ($2p^6$) 原子碰撞, 把激发能转移给氖, 使 Ne 的一个 $2p$ 电子激发到 $5s$ 或 $4s$ 态, He 回到基态。即



Ne 的 $2p^55s \rightarrow 2p^53p$ 跃迁, 发射波长为 6328 \AA 的辐射; $2p^55s \rightarrow 2p^54p$ 跃迁发射 $3.3913 \mu\text{m}$ 的辐射; $2p^54s \rightarrow 2p^53p$ 跃迁发射 $1.15 \mu\text{m}$ 的辐射。这是 Ne 的数条激光谱线中强度最大的3条。又如氩 Ar 的基电子组态为 $3s^23p^6$, 失去一个电子变成氩离子 Ar^+ , Ar^+ 的基电

子组态为 $3s^23p^5$ ，其中一个 $3p$ 电子在不同能级之间跃迁形成 Ar^+ 的光谱。氩离子激光器的 4879.86 \AA 谱线为 $3p^44p^2D_{5/2}^0 \rightarrow 3p^44s^2P_{3/2}$ 跃迁； 5145.32 \AA 谱线为 $3p^44p^4D_{5/2}^0 \rightarrow 3p^44s^2P_{3/2}$ 跃迁。

【塞曼效应】光源受外磁场作用，能级简并消除，致使一条光谱线分裂成有一定偏振规律的数条谱线的现象。原子具有磁矩，主要由电子的轨道运动和自旋运动贡献。当原子处在磁感应强度为 \vec{B} 的外磁场时，磁矩与磁场的相互作用能

$$\Delta E = M_J g_J \mu_B B$$

$$(M_J = J, J - 1, \dots, -J)$$

就叠加在原来的 J 能级上。上式中： μ_B 为玻尔磁子， g_J 为朗德因子， J 为原子的总角动量量子数， M_J 为相应的磁量子数，对给定的 J ， M_J 可能取 $(2J+1)$ 个值。在无外场 ($B=0$) 时，无论 M_J 取何值， ΔE 均为 0，这 $(2J+1)$ 个状态简并成由 J 表征的一个能级；外场 ($B \neq 0$) 中的原子， ΔE 因 M_J 之不同而异，原来由 J 表征的一个能级，现在分裂成 $(2J+1)$ 个能级。这样，对应无外场时 J_2 与 J_1 能级间跃迁的频率为 ν_0 的一条谱线，在 $B \neq 0$ 时，将变成由 $(2J_2+1)$ 个能级向 $(2J_1+1)$ 个能级中符合选择定则的数个跃迁， ν_0 将分裂成频率 ν 不同的若干条谱线。

塞曼效应的选择定则是 $\Delta M_J = 0, \pm 1$ (当 $\Delta J = 0$ 时， $0 \rightarrow 0$ 跃迁除外)。

分裂后的谱线都有一定的偏振态。以磁场方向为参考，垂直磁场方向观察，都是线偏振光，分裂后的数条谱线中，频率居中者，电矢量的振动方向平行于磁场；频率较高和较低者，电矢量振动方向垂直于磁场。沿磁场方向观察，分裂的谱线对称地分成左、右旋圆偏振光。这些都是辐射过程中角动量守恒的必然结果。光谱学

上,把电矢量平行于磁场的偏振记为 π ,垂直的记为 σ 。按照发现此效应的历史过程,习惯上,把塞曼效应分为:正常塞曼效应、反常塞曼效应和帕邢-巴克效应三种。它们之间的区别有两点,一是原子的总自旋角动量是否为零,一是外磁场是强场还是弱场。若 B 与原子磁矩的相互作用能 ΔE ,小于原子的自旋轨道相互作用能,磁场 B 就称为弱场;反之,称为强场。可见,对同一个磁场 B ,将因所作用的原子之不同,它可能是强场,也可能是弱场。此外,处于磁场中的光源,还有与场强平方有关的二次塞曼效应,吸收光谱的倒塞曼效应。轻分子,稀土元素的盐和其他晶体,及原子核等也有塞曼效应。反常塞曼效应是电子自旋假设的实验依据之一。利用塞曼效应的实验数据可以推断能级的分裂情况,求 g 和 J 的值,从而得到原子态的重要资料。塞曼效应还有助于理解复杂光谱,计算电子的荷质比和磁矩的精确值等。

【正常塞曼效应】 弱磁场中总自旋为零的原子产生的塞曼效应。在磁感应强度为 \vec{B} 的弱磁场(见“塞曼效应”)中,总自旋量子数 $S=0$ 的原子,在无磁场($B=0$)时发射的频率为 ν_0 的一条谱线,将分裂成频率为 ν_0 、 $\nu_0 \pm \nu_L$ 的三条谱线。相邻谱线间隔 $\nu_L = \frac{eB}{4\pi m_e}$,称为洛仑兹单位(式中: e 为基本电荷, m_e 为电子质量)。垂直磁场方向观察,频率为 ν_0 的谱线,为 π 型偏振,频率为 $\nu_0 \pm \nu_L$ 的两条谱线,为 σ 型偏振;迎着磁场方向观察,频率为 $\nu_0 + \nu_L$ 的谱线,是电矢量逆时针方向旋转的圆偏振光,频率为 $\nu_0 - \nu_L$ 的谱线,是电矢量顺时针方向旋转的圆偏振光,频率为 ν_0 的谱线不出现。这种现象是塞曼于1896年发现的,所以称为正常塞曼效应。它是原子的纯轨道运动与磁场相互作用的结果。只有电子数为偶数并形成单态

的原子，才有这种效应。例如镉的 6438.47 \AA 谱线，对应 $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ 跃迁。磁场中的镉， 1D_2 分裂为5个能级， 1P_1 分裂为3个，这两组子能级之间，满足选择定则的跃迁共有9个，对应3个不同的跃迁频率，分裂成具有上述特性的3条谱线。

【反常塞曼效应】弱磁场中总自旋不为零的原子产生的塞曼效应。总自旋量子数 $S \neq 0$ 的原子，总角动量量子数为 J_2 和 J_1 的两个能级之间的跃迁，辐射光谱线的频率若为 ν_0 ，当该原子处在磁感应强度为 \vec{B} 的弱磁场时， ν_0 谱线将分裂成频率为 $\nu = \nu_0 + (M_2 g_2 - M_1 g_1) \nu_L$ 的数条谱线。式中： $\nu_L = \frac{eB}{4\pi m_e}$ ，称为洛仑兹单位（ e 为基本电荷， m_e 为电子质量）； M_2 和 g_2 分别为能级 J_2 的磁量子数和朗德因子； M_1 与 g_1 为能级 J_1 的相应值。这种情况下， ν_0 谱线不止分裂为3条，分裂后谱线的具体条数，应按选择定则和跃迁能级之间的能量间隔计算。符合磁量子数改变量 $\Delta M_J = 0$ 的跃迁，所发射的谱线为 π 型偏振光；对应选择定则 $\Delta M_J = \pm 1$ 的跃迁，所发射的谱线为 σ 型偏振光。分裂后，相邻谱线的频率间隔不尽相同，频率 ν_0 也不一定出现。其原理与正常塞曼效应完全相同，只是因为 $S \neq 0$ ，分裂的谱线多于3条。自发现此现象之日起约30年内，人们无法对其做出解释，故称反常塞曼效应，并沿用至今。电子自旋假设提出后，这一难题迎刃而解。它并没有任何“反常”，正常塞曼效应只是它的一个特例（ $S=0$ ）。钠的 5896 \AA （ $3^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$ ）和 5890 \AA （ $3^2P_{3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$ ）谱线就存在反常塞曼效应。前者分裂为4条谱线，中间两个 π 成分间隔为 $\frac{4}{3}\nu_L$ ，两侧的 σ 成分与相邻 π 成分的间隔为 $\frac{2}{3}\nu_L$ 。后者分裂为6条谱线，相邻谱线的间隔均为 $\frac{2}{3}\nu_L$ 。原 ν_0 谱线都不出现。

【帕邢—巴克效应】强磁场中的塞曼效应。原子总角动量量子数为 J_2 和 J_1 的两个能级之间跃迁，辐射光谱线的频率若为 ν_0 ，那么，当原子处在磁感应强度为 \vec{B} 的强磁场中时，强磁场破坏了自旋轨道耦合，自旋轨道相互作用的残留能量很小，自旋磁矩和轨道磁矩分别与磁场 \vec{B} 相互作用，叠加在能级 J 上的相互作用能为

$$\Delta E = (2M_S + M_L) M_B B + \text{自旋轨道耦合能}$$

式中： μ_B 为玻尔磁子， M_S 为原子总自旋磁量子数， M_L 为总轨道磁量子数。 ΔE 使能级 J 分裂成若干个子能级，使能级 J_2 与 J_1 之间的跃迁变成两组子能级之间的跃迁，使频率为 ν_0 的一条谱线分裂成频率稍有差别的若干条谱线。分裂后谱线的数目由选择定则及跃迁能级间隔决定。选择定则是： $\Delta M_L = 0$ (π 偏振)， ± 1 (σ 偏振)， $\Delta M_S = 0$ 。若忽略自旋轨道耦合能，谱线分裂与正常塞曼效应相像；计及该值，能级与谱线进一步分裂。1921年帕邢和巴克解释了此现象，所以称为帕邢-巴克效应。钠的 $^2P_{3/2}$ 态在强磁场中分裂为5个态， $^2S_{1/2}$ 为2个态，它们之间符合选择定则的跃迁有6个，分属3个频率，即3条谱线，其中一条与无外场时相同。实验观察确是如此，强场中它不呈反常塞曼效应，而是类似于正常塞曼效应的帕邢-巴克效应。考虑自旋轨道耦合时，其中两条谱线又各分裂为两条。用高分辨率光谱仪将观察到5条谱线。

【斯塔克效应】受电场作用的光源，其光谱线发生分裂或移位的现象。均匀或非均匀静电场、交变电场、脉冲电场、电磁辐射的电场及发光物质本身的内电场，作用于光源，都可产生斯塔克效应。原子由微小带电粒子组成，可以看成若干电多极子的叠加。在电场 $\vec{\epsilon}$ 中，它们与 $\vec{\epsilon}$ 相互作用，产生的相互作用能 ΔE ，叠加在无电场 ($\epsilon = 0$) 时原子的能级上，导致能级分裂，能级之间跃迁产生的光

谱线也分裂。若裂距比精细结构间隔小，称 $\vec{\epsilon}$ 为弱场；反之，称 $\vec{\epsilon}$ 为强场。一般 ΔE 可表为

$$\Delta E = A\epsilon + B\epsilon^2 + C\epsilon^3 + \dots$$

式中 A、B、C 等是与场强 ϵ 无关的系数，由原子性质决定。A 项是原子的电偶极矩与电场的相互作用，它所产生的效应称为一级（或线性）斯塔克效应。B 项是原子在电场中感生的电偶极矩与电场的相互作用，它所产生的效应称为二级斯塔克效应。此外，还有电四极矩等与电场的相互作用。二级及以上的效应统称为非线性斯塔克效应。例如，外电场中氢的 H_α 线（见“氢原子光谱”）分裂成若干条谱线。垂直电场方向观察，它们都是线偏振光，一些谱线的电矢量平行于外电场（称为 π 成分）；另一些谱线的电矢量垂直于外电场（称为 σ 成分）。平行于电场方向观察，只存在后者，且不是偏振光。只有氢原子及类氢离子才有线性斯塔克效应。其他原子，由于价电子的轨道贯穿原子实，在库仑场中快速进动，电偶极矩同时也在轨道平面内快速进动，任何方向的时间平均值均为零，所以不存在线性效应。它们仅有极小的非线性斯塔克效应。电场中钠的 5890 \AA 谱线，分裂为两条谱线； 5896 \AA 谱线只有位移。它们都移向长波。电场中的分子、晶体也有斯塔克效应。吸收光谱也有类似现象，称为反斯塔克效应。

【X 射线】 又称伦琴射线。介于紫外和 γ 射线之间并与它们有一定重叠的波长极短的电磁波。1895 年被伦琴（Wilhelm Konrad Röntgen, 1845—1923, 德）发现。当时不清楚其本性，作为一种未知的射线，取名为 X 射线。后来的研究表明，它既有电磁波的一切共性，又因波长极短而有其特性。如穿透能力强，能使气体电离、荧光物质发光、照相底片感光等。波长愈短，穿透能力愈强。通常

把波长大于 1\AA 的称为软 X 射线；小于 1\AA 的称为硬 X 射线。X 射线可以在封有正、负电极的高真空 (10^{-6} — 10^{-8} ×133.332Pa) 管中产生。这种装置称为 X 射线管。热阴极发射的电子在直流高压 (10^4 — 10^5V) 电场作用下，轰击阳极，即可发射 X 射线。它由波长连续分布的连续谱和叠加在其上的非常强的离散谱两部分构成。连续谱由入射电子的轫致辐射产生；离散谱由靶原子发射，称为标识谱。此外，如同步辐射等多种机制，都是20世纪70年代中期以来极受重视的产生 X 射线的新手段。X 射线是揭开近代物理学序幕的三大发现之一。它不仅在探索物质结构等科研领域，而且在医学、工业等方面都获得了广泛应用。X 射线对人体有损伤，其工作环境必须有防护措施。

【X 射线的标识谱】原子中电子跃迁到内壳层产生的电磁辐射谱。由于跃迁的始末态能量差值大，这种辐射的波长都处在 X 射线频段，一般为 0.7 — 2.2\AA 。不同原子的内壳层结构，一般都很相似，所以辐射谱也有相似的结构。但是，不同元素相应壳层的能量不同，所以相应谱线的波长亦别。这使内壳层跃迁的辐射，成为识别不同元素的标志，故称其为标识谱或特征谱。这种辐射称为标识辐射。受泡利不相容原理的限制，原子的内壳层一般都是满壳层，电子数不能再增加。因此，产生标识辐射的必要条件是，原子的个别内壳层电子必须事先电离或激发到外壳层，使这些能级产生空位，然后才有可能使电子跃迁到这些能级。电离的方式，可用电子束、质子束、离子束等轰击原子，或用 X 射线照射原子。所以，标识辐射实质上是电子到离子内壳层的跃迁，与相应原子能级对照，离子能级高，能级间隔大。例如失去一个内壳层电子的镉离子，比中性镉原子的相应能级及其与基态的能量间隔，几乎都高一个数量

级。所以辐射波长极短。标识谱分为若干系列。主量子数 $n=1, 2, 3, \dots$ 的壳层依次称为 K, L, M, \dots 壳层。电子跃迁到这些内壳层所发射的标识谱, 依次称为 K, L, M, \dots 线系, 其波长依次增长。经常遇到的是强度最大的 K 系和 L 系。M 及其后的线系, 波长较长, 在 X 射线分析中很少使用。每个线系中, 由于初态不同, 都包含取名为 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 的许多谱线。例如 $n=2, 3, 4$ 到 $n=1$ 的跃迁所产生的线系, 各谱线依次称为 $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$ 线。 $n=3, 4, \dots$ 到 $n=2$ 的跃迁所产生的各谱线, 依次称为 L_α, L_β, \dots 线。对应同一个 n 值, 还有不同角动量量子数, 所以 α, β 等谱线一般都不是单线。例如 K_α 就由波长差为 $0.004 \pm 0.001 \text{ \AA}$ 的双线构成, 原子序数 z 愈大, 差值愈小; 两谱线的强度比约为 $2:1$ 。标识谱的电偶极跃迁, 遵守如下选择定则:

$$\Delta n \neq 0,$$

$$\Delta L = \pm 1,$$

$$\Delta J = 0, \pm 1 \quad (J=0 \rightarrow 0 \text{ 除外}),$$

式中 L, J 分别为原子的总轨道角动量量子数和总角动量量子数。X 射线的标记方法, 有专门的表可查。

【莫塞莱定律】X 射线标识谱的频率 ν 与原子序数 z 的关系之实验定律。 ν 的平方根与发射该频率 X 射线的元素之 z 值成正比, $\nu = a(z-b)^2$, 式中 a, b 是与 z 无关的常量, 由所涉及的线系决定。这个经验公式推广到光谱区, 可描述光谱项的平方根与 z 的线性关系。由此画出的图称为莫塞莱图。量子理论证明, 该定律是个近似定律。它在历史上第一次提供了精确测量 z 值的方法, 纠正了那时元素周期表中, 由于按原子量大小排列, 而造成的几对元素顺序颠倒的错误, 预言了当时尚未发现的几个元素。它是理解元素周期

表的一个里程碑，对研究等电子序、原子结构等都有重要的促进作用，并可作为 X 射线光谱学的开端。

【布喇格方程】X 射线在晶体中衍射，强度最大所满足的方程。X 射线在晶体中的衍射称为布喇格衍射。波长为 λ 的 X 射线与晶体的某晶面族成 θ 角入射，晶体犹如三维衍射光栅，衍射强度的最大值出现在镜面反射方向，满足方程 $2d\sin\theta = \lambda$ ，式中 d 为相邻晶面间的距离。满足此式的角度 θ 称为布喇格角。产生布喇格衍射的必要条件是 $d \geq \lambda/2$ 。利用布喇格方程，通过实验可以测定 λ 或 d ，进而求得阿伏伽德罗常量，解释劳厄斑。

【俄歇电子】原子内壳层能级跃迁，释放的能量使原子电离所放出的电子。这个现象是一种自电离现象，称为俄歇效应。例如用电子束轰击原子，使其 K 壳层产生空位，L 壳层的电子跃迁到这个空位，释放出的能量不是发射 X 射线，而是立即被 M 壳层的一个电子吸收并脱离原子。从 M 壳层放出的电子就是俄歇电子。若 K、L、M 壳层电子的结合能依次为 W_K 、 W_L 、 W_M ，那么该俄歇电子的动能 $E_e = W_K - W_L - W_M$ 。它完全取决于元素的本性，对它的测量，可以作为元素分析的方法，对表面科学的研究很有用。

【康普顿效应】又称康普顿散射。波长为 λ 的 X（或 γ ）射线被物质散射，散射波中含有波长 $\lambda' > \lambda$ 的成分。实验表明：波长的改变量 $\Delta\lambda (= \lambda' - \lambda)$ 随散射角 θ 的增加而增大，与入射波长 λ 及散射物的性质无关；随 θ 的增加， λ' 成分的强度增大， λ 成分减弱；随散射物原子序数 z 的增加， λ' 成分减弱， λ 成分增强。理论上，把 X 射线被物质散射看成光子与（几乎）静止的自由电子碰撞，过程

遵守能量、动量守恒定律，再应用相对论公式，可以导出

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta), \quad (1)$$

式中： θ 为散射光子方向与入射光子方向间的夹角，常量 m_0 、 c 、 h 分别为电子的静止质量、真空中光速和普朗克常量。上式称为康普顿公式。系数 $\frac{h}{m_0c} = 0.0242621 \text{ \AA}$ ，称为电子的康普顿波长。它是 $\theta = 90^\circ$ 的波长改变量 $\Delta\lambda$ 。理论与实验一致。如果把其中的 m_0 换成其他粒子的静质量 m ， $\frac{h}{mc}$ 就是那种粒子的康普顿波长。粒子质量越大，康普顿波长越短，波动性越不明显。在任何散射方向，都含有波长不变的成分，称为相干散射；相应地，称 λ' 成分为非相干散射。前者是入射光子被原子内壳层电子散射，这些电子被核牢牢地束缚着， m_0 应理解为核的质量，其康普顿波长极短，使得 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ，所以散射波长几乎不变。实验上测量的 λ' 有一分布范围，只是强度的峰值等于 (1) 式的理论值。这是因为，碰撞前电子并不是静止的，而是以各种速度运动，存在多普勒效应。 z 增大时，内层束缚电子的比例增大，所以 λ 成分增强。按照经典电磁理论，散射波长只能等于入射波长。康普顿效应明确地揭示了 X 射线的粒子性，进一步肯定了光量子说。第一次从实验上证明了光子具有动量，微观粒子同样遵守能量守恒定律和动量守恒定律。利用这个效应可以测量如 h 等物理常量及光子的能量。

【激光】 受激跃迁产生的宏观光频辐射。能发射激光的装置称为激光器。作为原理性结构，激光器分为工作物质、抽运系统和光学谐振腔三部分。普通光源都没有谐振腔，这是两类光源在结构上的基本区别。简言之，面对面放置的两个共轴球面镜（及其中的工作物

质)就构成一个谐振腔。其中一个,对激光波长全反射,另一个部分反射部分透射。激光工作物质在抽运系统的作用下,实现粒子数反转并达到临界值时,自发辐射中沿谐振腔轴方向传播的光子,引发另一个原子受激发射,在媒质中仍沿该方向传播并且不断被放大,传播到反射镜时,被两个反射镜来回反射,多次通过媒质,光强雪崩式地增长。当放大抵消损耗时,突然迸发激光振荡。部分反射镜就输出激光辐射。就本性而言,激光与普通光没有任何差别,都是电磁波,在真空中的传播速度都是常量 c ,它们的光子都具有波-粒二象性,都是电磁场的量子等等。但是,就发光机制而言,激光是以受激发射占优势的辐射;普通光则是以自发发射占优势的辐射。两者迥然不同。由于光源结构和发光机制上的本质差别,激光具有一系列特点,也是普通光波所无法比拟的优点,即激光的光能流在空间、时间、频率的分布上高度集中:(1)普通光源向全空间发光。激光只沿一个方向在极小的立体角内传播。激光束发散角之小可达 10^{-8} 球面度,已十分接近理论极限。采用最优质的光学系统把普通光能流集中在一个方向上,其发散角仍比激光的大几个数量级。这是激光的高度方向性。(2)谱线都有一定的频率宽度,即一对能级之间跃迁辐射的光能量按频率有一定的分布。激光能量只分布在十分窄的频率范围内,比普通光源中线宽最窄的谱线还窄 10^7 — 10^8 数量级。这是激光的高度单色性。(3)普通扩展光源上通常意义的两个不同发光点是不相干的。激光辐射已接近理想的单色平面波或球面波,同一波面上的各点都是相干的。并且已经实现两个独立激光束之间的相干;激光的波列长度比普通光波的长 10^{11} 量级。这是激光的高度相干性。(4)激光比普通光源的亮度高 10^{14} 量级,这是激光的高亮度。这些特性彼此有着深刻的内在联系,本质上归结为高度的光子简并度。光子的量子状态可用能

量、动量和偏振态标志。处于相同量子态中的光子数目称为光子的简并度。激光比普通光的光子简并度高 10^{17} 量级。此外，激光脉冲持续时间之短已达到 6×10^{-15} 秒，即激光能量辐射可集中在这么短的时间内发射出来。采用各种技术，激光辐射的波长可以连续变化的范围已经覆盖整个光谱区，而且其中的每一波长都很窄。等等。上面是以两者的最佳指标相比。虽然并不是每束激光都具有上述的全部性能，更不是都能达到最佳指标，但是就激光总体所具备的性能和达到的水平，则是普通光波望尘莫及的。所以激光获得了极其广泛的应用。它不仅促进了原子、分子物理学等若干基础学科的重大发展，而且使许多交叉学科相继诞生。它在许多应用研究、技术开发中发挥着重要作用。在通讯、军工、医学、电子等技术科学、以及工农业生产乃至社会生活诸领域都引起日新月异的变化。激光的发明是20世纪最重大的科学技术成就之一，是科学史上的一个里程碑。

【量子跃迁】又称能级跃迁，简称跃迁。原子（或分子、离子等）从一个状态到另一个状态的突变。量子跃迁必然伴随微观粒子内部能量的变化。从高能级跃迁到低能级，原子释放能量；反之，原子从外界吸收能量。放出或吸收的能量若为电磁辐射能，称为辐射跃迁；否则称为非辐射跃迁。通常说“跃迁”而无限定，往往指辐射跃迁。辐射跃迁分为两类、三种过程。在没有任何外界影响的情况下，处于高能级的原子自发地跃迁到低能级，称为自发跃迁；发射的电磁辐射称为自发辐射。在适当外辐射场感应下，原子状态发生突变，称为受激（或感生）跃迁；原子从高能级跃迁到低能级，发出电磁辐射，称为受激辐射；从低能级跃迁到高能级，吸收电磁辐射，称为受激吸收。若没有外界提供能量，原子不可能自发地

从低能级跃迁到高能级，所以受激吸收永远是感生过程，故简称吸收。吸收是受激辐射的逆过程；受激辐射亦称负吸收。辐射与物质相互作用同时存在这三种过程，但是宏观上只能呈现其中占优势的过程。辐射跃迁是实物粒子（即原子、分子、离子等）与辐射场相互作用所致，严格的理论处理须用量子电动力学。理论推导过程中，往往可以把原子等带电粒子体系看成一系列多极子的叠加，把跃迁产生的辐射看成各多极子的辐射。其中产生类似经典偶极子电磁辐射的跃迁，称为偶极跃迁，并分为电偶极跃迁和磁偶极跃迁。与此相仿，还有电四极跃迁等。跃迁过程遵守选择定则和能量、动量守恒定律。

【跃迁速率】单位时间产生跃迁的原子（或分子、离子等）的比例。是跃迁可能性大小及快慢的定量描述，单位为秒⁻¹。辐射与物质相互作用同时存在自发跃迁，受激辐射跃迁和吸收跃迁三个独立过程，量子理论可以推导和计算出相应的跃迁速率。若初始时刻单位体积媒质中处于某能级的原子数为 N ，在无任何外界影响的情况下，经过时间 dt 自发地跃迁到所有可能的低能级的粒子数为 dN ，那么单位时间自发跃迁原子所占的比例 $A = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$ ，称为该能级的自发跃迁速率。 A 也表示单个原子单位时间的自发跃迁概率。很多情况下，只考察某能级 E_2 与基态或指定低激发态 E_1 之间，辐射频率为 ν 的自发跃迁，量子理论给出的自发跃迁速率为

$$A_{21}(\nu) = \frac{16\pi^3\nu^3}{3\epsilon_0hc^3} |\mu_{21}|^2 g(\nu, \nu_0)$$

式中： μ_{21} 为电偶极跃迁矩阵元，由能级性质决定，按量子理论计算； $g(\nu, \nu_0)$ 为跃迁的线型函数，不同的谱线增宽机理有不同的表达式； $\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$ ，为跃迁的中心频率， h 为普朗克常量，

c 为真空中光速, ϵ_0 为真空介电常量。 A 与能级寿命 τ 互为倒数, 因此是个可测量量。 A 是原子能级性质的表征, 只由所涉及到的能级性质决定。对于不同原子, 或同一原子的不同能级, A 的值不同。作为数量级估计, 对多数原子的一般激发态, A 为 10^8s^{-1} ; 亚稳态的 A 小得多, 对于严格禁戒跃迁 $A=0$ 。受激辐射 (跃迁) 速率 $W_i(\nu) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$, 这里的 dN 表示完全由于外辐射场的作用, 使某能级的原子在时间间隔 dt 内受激跃迁到所有可能低能级的原子数。 $W_i(\nu)$ 也表示单个原子单位时间的受激辐射 (跃迁) 概率。 $W_i(\nu)$ 与 A 是本质上不同的两个概念。 $W_i(\nu)$ 由原子能级及外辐射场的性质共同决定。对指定的能级对 E_2 与 E_1 ,

$$W_i(\nu) = B_{21}(\nu)\rho_\nu,$$

式中: ρ_ν 为外辐射场单位体积中频率 ν 附近单位频率间隔内的能量, 由普朗克公式给定; $B_{21}(\nu)$ 与外辐射场无关, 仅由原子能级性质决定, 称为受激辐射系数。吸收 (跃迁) 速率 $W_i'(\nu) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$, 这里的 dN 为某能级的原子在 dt 时间内吸收外辐射场的能量, 受激跃迁到所有可能的高能级的原子数。对于一对能级 E_1 和 E_2 之间的跃迁,

$$W_i'(\nu) = B_{12}(\nu)\rho_\nu,$$

式中 $B_{21}(\nu)$ 称为 (受激) 吸收系数。单个粒子一对能级之间的一次跃迁, 只能发生上述三个独立过程中的一个, 大量粒子组成的系统处于平衡态时, 存在如下的数量关系

$$A_{21}(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}(\nu),$$

$$g_1 B_{12}(\nu) = g_2 B_{21}(\nu),$$

以上两式称为爱因斯坦关系， A_{21} 、 B_{21} 、 B_{12} 又称为爱因斯坦系数。式中 g_1 、 g_2 为能级 E_1 和 E_2 的简并度，若 $g_1 = g_2$ ，则 $W_i'(\nu) = W_i(\nu)$ ；一般情况下， $W_i'(\nu) = W_i(\nu) g_2/g_1$ 。通常，跃迁速率的理论计算需采用各种近似，必然产生某些误差，其值应由实验验证。对较复杂的原子体系，理论计算困难，更需通过实验测量。以上是电偶极跃迁速率，是原子中最主要的跃迁。电四极跃迁和磁偶极跃迁比容许的电偶极跃迁，跃迁速率小6—8个数量级，只有在电偶极跃迁被禁戒时才显得重要。四极以上的跃迁就更弱了，一般很少考虑。跃迁速率是描写原子（或分子、离子等）跃迁的一个基本物理量，在研究原子光谱、分子光谱及天体光谱中起着重要的作用。

【选择定则】用量子数表示的能级跃迁所遵循的规则。辐射与物质相互作用过程中，原子光频段电偶极跃迁遵循：（1）跃迁只能发生在宇称不同的态之间，即只能从原子中所有电子的轨道角动量子数 l 之和为偶数的态，跃迁到奇数的态；或者由奇数的态跃迁到偶数的态；（2） $\Delta J = 0, \pm 1$ ($J = 0 \rightarrow J = 0$ 除外)；此外，对 LS 耦合，还必须遵守：（3） $\Delta S = 0$ ；（4） $\Delta L = 0, \pm 1$ ；

对 Jj 耦合必须遵守：

$$\left. \begin{array}{l} (5) \Delta J_p = 0 \\ (6) \Delta j = 0, \pm 1 \end{array} \right\} \text{或对换。}$$

式中， J 、 L 、 S 分别为原子的下述量子数：总角动量，总轨道角动量，总自旋； j 为跃迁电子的总角动量子数， J_p 为除跃迁电子之外原子其余部分的总角动量子数；符号 Δ 作用在量子数上，表示跃迁中量子数的改变量。关于 $\Delta L = 0$ ，只适用于由两个或更多个非 s 态电子形成的原子态；除此而外， $\Delta L = 0$ 的跃迁都是禁戒的。对只有一个价电子的原子，单电子电偶极辐射跃迁的选择定则

简化为 $\Delta l = \pm 1$, $\Delta j = 0, \pm 1$, l 为价电子的轨道角动量量子数。上述规则只适用于原子中单光子电偶极跃迁。除此而外, 还有其他形式的跃迁。凡符合上述规定的跃迁, 称为容许跃迁; 不符合的, 称为禁戒跃迁。磁偶极跃迁不改变态的宇称, 其他与电偶极跃迁的规则同。电四极等跃迁也都各有自身的选择定则。同时发射两个或多个光子的多光子跃迁也不受上述选择定则的限制。塞曼效应和 X 射线等各有自己的选择定则。

【能级寿命】原子(或分子、离子等)在一个激发态停留的平均时间。常用符号 τ 表示, 单位为秒。激发态能量较高, 远不如基态稳定, 许多内、外因素均可使其放出能量, 跃迁到基态(或低激发态)。从原子被激发到某一能级始, 通过自发跃迁, 至它离开这个能级止, 所经历的时间称为该能级的寿命。一般, 不同能级的寿命不同。同类原子中各原子的同一能级, 寿命也不尽相同, 但是它们的平均值是确定的, 称为平均寿命, 简称寿命。定量上, 初始时刻若有 N_0 个原子处于某能级, 由于自发跃迁, 经历时间 t 还剩 N 个, 衰减的规律为 $N = N_0 e^{-t/\tau}$ 。那么, $t = \tau$ 时, $N = N_0/e$ 。所以能级寿命就是处于该能级的原子数衰减到初始值的 $1/e$ 所经历的时间。可以证明, τ 与自发跃迁速率 A 互为倒数。能级寿命是能级的固有性质, 其值可由量子力学计算, 更多的还是由荧光实验等方法测量。作为数量级估计, 对大多数原子的一般能级, $\tau = 10^{-7} - 10^{-9}$ s; 基态是稳定的, 不可能产生自发跃迁, $\tau = \infty$ 。所以, 一般说“寿命”, 均指受激态的平均寿命。除基态外, $\tau \gg 10^{-8}$ s 的能级称为亚稳态。

【亚稳态】寿命 $\tau \gg 10^{-8}$ s 的激发态。这种能级与基态或低激发态之间属于禁戒跃迁, 致使寿命较长, 可达毫秒量级甚至更长, 具有

相对稳定性，有储能作用，在气体放电或激光等许多物理过程中起重大作用。例如氦原子的两个最低激发态 2^3S_1 和 2^1S_0 ，与基态 1^1S_0 之间均系禁戒跃迁，寿命分别为 $10^{-4}s$ 和 $5 \times 10^{-6}s$ 。在 He-Ne 激光器中，通过放电，把基态 He 激励到这两个亚稳能级，它们就成为抽运 Ne 的能量。通过碰撞，He 的激发能传给 Ne，使 Ne 实现粒子数反转，从而产生受激发射。

【不确定〔性〕关系】旧称测不准关系。微观粒子波粒两象性的数学表述。描写微观粒子的互补力学量对，例如坐标与动量，不可能同时具有完全确定的值。它们不确定性的范围与普朗克常量 h 紧密联系在一起，有多种数学表达形式，

$$\Delta x \Delta p_x \geq h/2 \quad (1)$$

就是其中之一。(1)式的意思是，若微观粒子沿 x 方向的位置有一个不确定的范围 Δx ，那么与此同时，它在该方向的动量分量 p_x 也必然有一个不确定的范围 Δp_x ，它们的乘积满足 (1) 式，其中 $h = h/2\pi$ 。如果粒子的位置 x 完全确定 ($\Delta x = 0$)，那么该时刻的动量分量 p_x 就完全不确定 ($\Delta p_x \rightarrow \infty$)，即粒子可能处于 p_x 从 $0 - \infty$ 的任何一个状态中；反之，若 p_x 完全确定 ($\Delta p_x = 0$)，那么该时刻粒子沿 x 方向就可能出现在任何位置。宏观物体的位置和动量都是同时严格确定的。与此不同，在微观领域，它们都有一个由 (1) 式给出的不确定范围。这是微观粒子的固有属性，是波-粒二象性的必然结果，与任何实验测量精度都无关。

不确定关系的能量表达式为

$$\Delta E \Delta t \geq h/2 \quad (2)$$

意思是，若微观粒子处于能量 E 的状态的持续时间为 Δt ，那么它的能量并不严格为 E ，而是在 E 附近有一个不确定范围 ΔE ， ΔE

与 Δt 的乘积满足 (2) 式。在时间完全确定 ($\Delta t=0$) 的准确时刻 t , 粒子的能量就完全不确定 ($\Delta E \rightarrow \infty$), 它可能处于 E 为 $0 \sim \infty$ 的任何能态; 反之, 若粒子的能量完全确定 ($\Delta E=0$), 那么粒子在任何时刻都处于此能态, 即粒子无限期 ($\Delta t \rightarrow \infty$) 地停留在这个状态。例如, 只要没有外界干扰, 原子就处于基态。基态是最稳定的状态, 能量有确定值。

不确定关系是原子、原子核、粒子等整个微观世界普遍都遵守的一个重要规律。它无论是对定性分析, 还是对粗略地定量估算, 都很有用。对于不确定关系的理解, 学术界一直存在争论。

【谱线增宽】 一对能级之间跃迁的辐射强度随频率连续分布的现象。具体地说, 能级 E_2 和 E_1 之间跃迁发射或吸收的电磁辐射, 不是单一频率 $\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$ 的一条谱线 (h 为普朗克常量), 而是在 ν_0 两侧的小频域内, 随频率 ν 偏离 ν_0 , 有一强度 $I(\nu)$ 迅速递降的连续分布, 只是 ν_0 的强度最大。这就是谱线增宽。这种强度按频率的分布称为光谱线的轮廓或形状。在以 $I(\nu)$ 、 ν 为纵、横轴的笛卡尔直角坐标系内, 一般它是个钟形曲线。描写这个分布的函数称为线型函数。 ν_0 称为这个跃迁或线型的中心频率。强度降到最大值之半, $I(\nu_1) = I(\nu_2) = I(\nu_0) / 2$ 的两个频率 ν_1 和 ν_2 之间的频率间隔 $\Delta\nu = |\nu_2 - \nu_1|$, 称为光谱线的半最大值的全宽度, 简称谱线宽度或线宽。导致谱线增宽的机理很多。能级寿命导致的增宽, 称为寿命增宽或自然增宽。这是一切谱线都具有的增宽。气体中, 气压引起的增宽称为压致增宽, 碰撞增宽就是其中的一种; 热运动中多普勒效应引起的增宽称为多普勒增宽。固体中, 增宽的机制很复杂, 譬如电偶极矩相互作用引起的偶极子增宽, 晶格缺陷引起的增宽, 晶格热振动引起的热增宽或声子增宽等。此外, 在高分辨率

光谱分析和应用中,还要考虑到其他一些增宽。在大量原子(或分子、离子等)构成的发光系统中,若引起增宽的机制对系统中每个原子的影响都相同,每个原子的辐射都对整个线型做出贡献,各原子之间没有任何差别。这种增宽称为均匀增宽;谱线称为均匀增宽谱线。如寿命增宽、碰撞增宽、热增宽等均属此类。若增宽机制对系统中各原子的影响不同,导致每个原子的辐射只对整个线型中某一小频域有贡献,各原子之间是可区分的。这种增宽称为非均匀增宽;谱线称为非均匀增宽谱线。如多普勒增宽、晶格缺陷引起的增宽等均属此类。研究谱线增宽是掌握激光运转及工作特性所必不可少的,也是获得原子结构和原子碰撞等资料的重要途径,并且在天体物理、气体放电和等离子体物理等领域有广泛的应用。

【寿命增宽】又称自然增宽。能级寿命导致的光谱线增宽。每个激发态都有有限的寿命 τ ,平均而言,原子(或分子、离子等)处于这个状态的时间 $\Delta t \approx \tau$ 。按照不确定关系,激发态的能量 E 必然有一个不确定范围 $\Delta E \propto \hbar/\tau$ ($\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常量),称为能级宽度。由于能级 E_2 和 E_1 分别有一定宽度 ΔE_2 和 ΔE_1 ,致使它们之间的跃迁频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 不可能是单一值,而是有一个相应的分布范围 $\Delta\nu$,即谱线展宽了。除基态($\tau \rightarrow \infty$, $\Delta E = 0$)外,每个能级都有有限的寿命,所以寿命增宽是一切原子都具有的增宽,是能级的一种自然属性,量子力学不确定关系的直接结果,与原子所处的环境、条件等外界因素无关,所以又称为自然增宽。描写它的线型函数是洛仑兹线型函数。通常,系统中多种增宽机制同时存在,与其他增宽相比,寿命增宽的谱线宽度很窄(在可见光区为 $10^{-4}—10^{-3} \text{ \AA}$ 量级)。只有外界影响和运动速度均可忽略的孤立静止原子,才仅有这一种增宽,它才有意义。否则,在有其他增宽

机理同时存在的情况下，它常可忽略不计。

【多普勒增宽】多普勒效应引起的光谱线增宽。当光源相对接收器运动时，接收器测得的光波频率，将因光源与接收器的相对速度之不同而异。这种现象称为光学多普勒效应。本质上，它属于相对论性问题，但是对于许多实际情况，光源与接收器的相对速度比光速小得多，可以近似用经典理论处理。与光传播方向平行的相对速度分量产生的效应，称为纵向多普勒效应。它比较明显，这里只介绍这种情况。并假定，系统中只有这一种谱线增宽机制。每个原子（或分子、离子等微观粒子）都是一个微型光源。静止原子，能级 E_2 和 E_1 之间跃迁的辐射频率 $\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$ ， h 为普朗克常量。气体系统总处于热运动状态，其中每个原子都有自己的速度，而且不断变化。实验和理论都表明，接收器测得的原子辐射频率 $\nu = (1 + v/c) \nu_0$ 。式中： c 为真空中光速； v 为原子沿光传播方向的分速度，若两者同向， v 为正，反向为负。式中第二项 $\nu_0 v/c$ ，是多普勒效应引起的辐射频率测量值 ν 相对 ν_0 的移动，称为多普勒频移。

宏观系统由巨大数量原子组成，平衡态气体中，原子遵守麦克斯韦速度分布，不同原子的速度可能不同，多普勒频移亦别。结果，大量静止的同类原子的同一对能级 E_2 和 E_1 之间跃迁的一条谱线 ν_0 ，由于热运动而变成以 ν_0 为中心、在 ν_0 邻域内光强按频率有一连续分布。这就是光谱线的多普勒增宽。只有当 $v=0$ 时才有 $\nu=\nu_0$ ，即只有垂直于光传播方向运动的原子，其辐射频率的测量值 ν ，才等于静止原子的辐射频率 ν_0 。描写多普勒增宽的线型函数为高斯线型函数。

【线型函数】光谱线形状的数学表达式。实验和理论都表明，原子（或分子、离子等）的一对能级 E_2 和 E_1 之间跃迁发射或吸收的辐射能，并不完全集中在玻尔频率 $\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$ 的一条谱线上（ h 是普朗克常量），而是在 ν_0 附近，强度按频率 ν 有一小范围的连续分布，对应频率 ν_0 的强度 $I(\nu_0)$ 最大，称 ν_0 为中心频率。在 ν_0 两侧，随着 ν 偏离 ν_0 ，强度很快减弱。这种强度随频率的分布称为光谱线的形状或轮廓。若 E_2 与 E_1 之间跃迁辐射或吸收的总强度为 I ，其中频率 ν 的强度为 $I(\nu)$ ，定义

$$g(\nu, \nu_0) = I(\nu) / I \quad (1)$$

为线型函数。它的一个重要性质是

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu, \nu_0) d\nu = 1 \quad (2)$$

(2) 式称为线型函数的归一化条件。把 $g(\nu, \nu_0)$ 的最大值之半所对应的两个频率之差，称为谱线半最大值的全宽度，简称谱线宽度或线宽。

自然加宽的线型函数为

$$g_L(\nu, \nu_0) = \frac{\Delta\nu_L / 2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L / 2)^2}$$

(3) 称为洛仑兹线型函数。其中线宽

$$\Delta\nu_L = \frac{1}{2\pi\tau}$$

(4) 称为洛仑兹线宽。 τ 为激发态的寿命。线型函数的最大值

$$\begin{aligned} g_{Lm} &= g_L(\nu_0, \nu_0) \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{1}{\Delta\nu_L} \end{aligned}$$

线宽 $\Delta\nu_L$ 要改成相应的碰撞线宽 $\Delta\nu_C$ 。多普勒增宽的线型函数为

$$g_D(\nu, \nu_0) = 2 \left[\frac{\ln 2}{\pi} \right]^{1/2} \frac{1}{\Delta\nu_D} \quad (5)$$

$$\exp\left[(-4\ln 2)\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2\right] \quad (6)$$

称为高斯线型函数。其中线宽

$$\Delta\nu_D = 2 \frac{\nu_0}{c} \left[(2\ln 2) \frac{kT}{M} \right]^{1/2} \quad (7)$$

称为多普勒线宽。(7)式中的 M 是原子质量, T 是系统的热力学温度, k 是玻尔兹曼常量, c 是真空中光速。线型函数的最大值

$$\begin{aligned} g_{Dm} &= g_D(\nu_0, \nu_0) \\ &= 2 \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\Delta\nu_D} \approx \frac{0.939}{\Delta\nu_D} \end{aligned} \quad (8)$$

有时近似取为 $1/g_{Dm} \approx \Delta\nu_D$ 。

通常, 系统中多种增宽机理同时存在, 不同条件下, 起主导作用的因素不同。例如 CO_2 的 $10.6\mu\text{m}$ 谱线: $\Delta\nu_L \approx 10^3 - 10^4 \text{Hz}$; 气压为 $5 - 120 \times 133.332 \text{Pa}$ 时, $\Delta\nu_C \approx 3.3 \times 10^7 - 1.3 \times 10^8 \text{Hz}$; 在室温 (300K), $\Delta\nu_D \approx 5.3 \times 10^7 \text{Hz}$ 。可见, 寿命增宽可以忽略不计, 气压小于 $5 \times 133.332 \text{Pa}$ 时, 多普勒增宽占主导地位, 大于该值时, 碰撞增宽起主导作用。一般而言, 凡是均匀增宽, 都具有或接近洛仑兹线型; 非均匀增宽则可能具有任何线型, 不过多数情况下常可用高斯线型函数近似描述。若两类增宽同时存在, 并且可以相比拟, 这时的线型称为综合线型, 线型函数为两者的卷积。若多种增宽机制中有一种明显占优势, 总效果就近似这种增宽。

【自发辐射】 自发跃迁产生的电磁辐射。自发跃迁是在不受任何外界影响的情况下, 大量原子(或分子、离子等)彼此独立发生的随机跃迁过程。即使对同类原子, 各个原子自发跃迁所发射光子之位相、频率、偏振态、传播方向等特征, 也都是随机的, 因此是

非相干的。大量原子产生的自发辐射称为荧光。天然光源和普通人工光源（除激光器）的辐射都是自发辐射占绝对优势的辐射。自发辐射的理论处理需用量子电动力学。自发辐射是辐射与物质相互作用的三个基本过程之一。在大量原子中，一个原子自发辐射的光子，对另一个原子就是外辐射场，即一个激励光子，可能引起后者受激发射。

【受激辐射】受激跃迁产生的电磁辐射。处在激发态 E_2 的原子（或分子、离子等），在适当的入射光子的激励下，发射一个与入射光子相同的光子，跃迁到低能态 E_1 。这种跃迁称为受激跃迁。产生的辐射称为受激辐射。发生这个过程的条件是，激励光子的频率 ν 必须与原子两个跃迁能级之间的能量差对应，即必须 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ ， h 为普朗克常量。特点是，发射光子与激励光子的位相、频率、偏振态、传播方向等完全相同，即受激辐射光子与入射光子属于同一光子态，两者相干地叠加在一起。这个过程有一个光子入射，有两个光子出射，所以是相干放大过程。受激发射是辐射与物质相互作用的三个基本过程之一，是激光振荡的基础。

【粒子数反转】又称集居数反转，简称反转。高能级粒子数多于低能级粒子数的状态。这里把原子、分子、离子等统称为粒子。一个系统中的大量粒子可能处在各个能级。处于某个能级的粒子数称为该能级的集居数。热平衡条件下，各能级的粒子数目遵守玻耳兹曼分布，绝大多数粒子都处于基态，能级越高粒子越少。如果粒子吸收适当的外界能量，从基态或较低能级跃迁到高能级，有可能出现某高能级的粒子数比某低能级的多。此时，这两个能级之间就实现了粒子数反转。它是激光振荡的必要条件。处于热平衡状态的

媒质是不可能出现反转的。“反转”是相对平衡态的正常分布而言，是一种非平衡状态。处于反转状态的媒质称为激活媒质。

若单位体积媒质中能级 E_2 和 E_1 的集居数分别为 N_2 和 N_1 ，能级简并度分别为 g_2 和 g_1 ，并且 $E_2 > E_1$ ，实现粒子数反转的数学表达式为 $N_2/g_2 > N_1/g_1$ 。称 $(N_2/g_2 - N_1/g_1)$ 为能级 E_2 与 E_1 之间的反转粒子数。

应该指出，“粒子数反转是激光振荡的必要条件”，是一种传统理论观念。其实，无粒子数反转，也有可能获得增益大于损耗而迸发激光振荡，这个课题尚在研究之中。

【抽运】 又称泵浦、激励。实现并维持粒子数反转的方式。为了使激光工作物质实现粒子数反转，必须由外界供给能量。按所供能量的形式之不同，可分为：光抽运、电抽运，热抽运，化学抽运，核能抽运和电子空穴复合抽运等等。按供能方式之不同，可分为连续抽运和脉冲抽运等。提供抽运的装置称为抽运系统。例如常见的氦氖、氩离子等气体激光器，多为连续放电抽运；红宝石等几种固体激光器，常采用脉冲光抽运；半导体激光器适合复合抽运；化学激光器往往利用化学反应中放出的能量进行抽运，等等。

【三能级系统】 产生激光跃迁的能级模型之一。实际原子（或分子、离子等）有很多能级，但是参与激光过程的只是其中一部分。习惯上，按照能量从低到高，把这些能级依次称为能级1、2、3。通常情况下，绝大部分粒子都处于基态。在抽运系统的作用下，大量原子从基能级1被激励到激发能级3，能级3的寿命很短，抽运到该能级的粒子很快就弛豫到较低的激发能级2，能级2是亚稳态，寿命较长，可形成粒子堆积。随着抽运的进行，能级1的粒子不断减少，

能级2的粒子不断增加,当能级2比能级1的粒子数多,并满足激光振荡条件时,能级2到1的受激跃迁就进发成激光振荡。这就是三能级系统。能级2和1称为激光能级;能级3和1称为抽运能级。能级1兼有抽运下能级和激光下能级两种功能。模型中的能级3,实际上可能是几个能级的组合或者是个能带。红宝石中产生激光跃迁的铬离子 Cr^{3+} ,就是典型的三能级系统。为使其实现粒子数反转,必须把半数以上的粒子抽运到能级2。因此,三能级系统的效率较低。

【四能级系统】产生激光跃迁的能级模型之一。每个原子(或分子、离子等)都有很多能级。在平衡系统中,各能级的原子数遵守玻耳兹曼分布,绝大多数原子都处于基态能级0,能级愈高,原子数愈少。在抽运系统的作用下,处于能级0的粒子被激励到寿命极短的高能级3,并很快弛豫到能量较低的亚稳能级2,在这里形成粒子堆积。由于能量更低的激发能级1基本是空的,能级2与1之间容易实现粒子数反转。抽运到能级2的每个粒子几乎都是反转粒子。在满足激光振荡条件时,能级2 \rightarrow 1的受激跃迁立刻进发激光振荡。跃迁到能级1的粒子很快地弛豫到基态0。这就是四能级系统。它的效率高,容易实现连续激光运转。能级0和3称为抽运能级,能级1和2称为激光能级。模型中的能级3往往包含几个实际能级或者是个能带。掺钕钇铝石榴石(Nd^{3+} :YAG)或钕玻璃中产生激光跃迁的钕离子 Nd^{3+} ,就是典型的四能级系统。许多气体或染料也可以用此模型处理。实际原子的能级结构很复杂,涉及到的跃迁数目可能很多。三、四能级系统只是一种简化模型。

元 素

【元素】“应该是一些具有确定性质的、实在的、可觉察到的实物，用一般化学方法不能再分解为更简单的某些实物。”这一定义为英国化学家玻意耳在他的书中第一次为化学元素下的科学的定义(1661)，为化学家研究物质的组成指明了方向。自然界共发现元素107种，除其中一部分人工制成的放射性元素外，全部赋存于地球和宇宙空间的各个天体上，其中有90%以上是稳定性元素。地壳里的天然放射性元素包括元素周期表的第84号钋到第92号铀为止的9种。其中钍和铀具有很长的半衰期，从有地球开始就有这两种元素。同时它们还呈现一种浓缩状态。其他天然放射性元素（钋、氡、镭、锕和镤）比较少。原子序数在铀（ $Z=92$ ）以后的铀后元素或超铀元素都是通过人工核反应发现和制备的，后来仅在自然界找到其中个别核素，如在铀矿中发现微量钷²³⁹和镆²³⁷。自1940年制得第一个超铀元素（ $Z=93$ ）以来，到1984年已合成出钷、镎、镅、锔、锿、镗、镆、钆、铈、镨、104—109号等合成元素。合成超铀元素的方法有三类：反应堆辐照、带电粒子核反应和热核爆炸。不同元素原子的相对值被称为元素的丰度。获得元素丰度的主要信息来源于观察星系中恒星和气体云的化合物组成，包括太阳系以及相邻星系；地球、月亮、陨星和宇宙射线。只有少数的化学元素以游离状态存在于地壳中，大多数化学元素都以化合物状态（氧化物、硫化物、含氧酸盐）存在。碳（C）、硅（Si）、铝（Al）、铁

(Fe)、钙 (Ca)、钠 (Na)、钾 (K)、镁 (Mg)、氢 (H)、钛 (Ti)、氯 (Cl)、磷 (P) 等12种元素占地壳总重量的99.47%，其余80种元素共占0.53%。地壳中原子量小的元素丰度大，表明非金属、轻金属比重金属多。偶数质子数元素的丰度大于邻近奇数质子数元素的丰度。地球上地幔的主要组分为镁、铁、硅质，下地幔主要为橄榄石。地幔中的微量和痕量元素的晶格构造表明，它们的化合物并不稳定，集中在地幔的液态层中，可以溶解物的形式上移，并最终成为地壳的一部分。因此地幔中微量元素的含量越来越少，而地壳中却越来越多。地核的平均原子量为22，与铁的原子量22接近。因此地核很可能由铁、部分镍、少量钴以及一定数量的轻元素碳和硫构成。对太阳和行星的光谱分析和对陨石的组分分析结果表明，宇宙中含量最多的元素是氢，占99%左右，其次是氦，还有碳、氧、镁、硅、硫、氩、钒、铬、锰、铁、钴、镍、锂、铍、硼等。原子序数为偶数的化学元素比原子序数为奇数的相邻元素的含量更高些。大约99%以上的生物体是由10种含量较多的化学元素构成的，它们是氧、碳、氢、氮、钙、磷、氯、硫、钾、钠；其次镁、铁、锰、铜、锌、硼、钼的含量较少；而硅、铝、镍、镓、氟、钽、铈、硒的含量非常少。称为微量元素。

【元素的起源和形成】现在大多数科学家认为质子聚变和中子俘获是宇宙中形成化学元素的两个主要过程。宇宙中所有化学元素都起源于氢。太阳和其他恒星辐射出巨大的能量，使氢燃烧。它在很高的温度下发生聚变反应，形成较重的原子核，首先是氦，其次是轻元素（锂、硼、铍等），这一过程称为质子聚变。氦原子轰击轻元素的原子，产生出中子。这些中子被元素的原子核捕获，形成较重的元素，从碳、氮、铁一直到原子序数为82和83的铅和铋，这

一过程称为中子俘获。直到今天,这两种产生元素的过程仍在恒星内部继续进行。因此可以认为化学元素是星体演化的产物,最初只有氢或者还有少量氦。比太阳重的星体上可以产生某些现在可以见到的重元素,比太阳轻得多的星体不能产生重元素。星体演化开始时温度上升,产生一系列核聚变,发生原子核的形成。一个星体内,中心部分可能含有铁、镍等重元素,外围各层的元素逐渐变轻,最外层仅含氢或氢和氦。

【元素周期律】原子是由原子核和核的电子云组成的,核由质子和中子组成,质子带+1电荷,质子的个数就是原子序数,质子数相同而中子数不同的元素叫同类元素的不同同位素。原子是中性的。而一个电子带-1的电荷数,因而电子云中的电子数必须等于核中质子数,也等于原子序数。人类在对大量元素的综合研究中发现,元素的物理和化学性质出现周期性的变化,通过对电子云电子排列发现,这种周期性变化与电子云中电子的排列规律惊人的一致,电子的排列规律取决于下列量子数、①主量子数——核外电子层数用 n 表示;②次量子数——每层电子允许的亚层数;用 s 、 p 、 d 、 f 表示,亚层数等于层数,并且 $s < p < d < f$;③轨道量子数——每个亚层允许的轨道数 $(2n-1)$;④自旋量子数——电子的自旋为 $\frac{1}{2}$ 。根据费米子的不相容原理,每个电子所处的状态必须是独立的, $\frac{1}{2}$ 的自旋可以取两个方向, $+\frac{1}{2}$ 是自旋方向向上, $-\frac{1}{2}$ 为自旋方向向下,电子只能从低态能级向高态填。化学稳定性由核外电子填充壳层情况决定,满壳层的最稳定,接近满壳层的容易俘获电子,显负电性;远离满壳层的易丢失电子,显正电性,所

以电子排列的周期律就对应化学性质的周期律，用这规律填写的元素排列表就是元素周期表。

【元素周期表】根据元素周期律，把已知的109种元素中电子层数目相同的各种元素按原子序数递增的顺序从左到右排成横行，再把不同横行中最外电子层中电子数相同的元素按电子层数递增的顺序由上而下排成纵行，即可得到元素周期表。1862年法国化学家德尚库托瓦提出“螺旋图”，把已知元素按原子量由小到大循序排在绕着圆柱体的螺线上，某些性质相似的元素排在同一条母线上，如锂、钠、钾、氯、溴、碘，……等。1865年英国化学家纽兰兹把已知元素按原子量由小到大循序排列成表时发现，从任一种元素算起，第八种元素的性质与第一种相同。他把这个规律称为“八音律”。1869年俄国化学家门捷列夫在仔细研究大量资料和前人工作的基础上提出周期律的基本观点：元素性质是原子量的周期函数。1869年德国化学家迈尔也提出一张元素周期表，明确指出元素性质是原子量的周期函数。门捷列夫在1869年列出的周期表有十七族包括两个完整周期的元素，从K→Br，从Rb→I，前面是两个七元素周期（Li→F和Na→Cl），后面跟着三个不完全周期。1871年又提出修改过的十七族元素周期表，其中理论上的改进在于校正了十七族元素。他也提出了八族元素表，将长周期分离为七个族，第八族包含三个元素（如Fe、Co、Ni）用a、b将两个周期的元素区分开来。随着稀有气体的发现，门捷列夫和其他科学家设置了零族元素，并把它加到周期表中，形成短周期表，包括0、I、II……VIII族，成为通用的周期表并一直沿用到1930年。

汤姆森于1895年绘制了以原子的电子结构为依据的新的周期表，被称为长周期表。上面有一个二元素周期（H、He），两个八

元素周期 (Li→Ne; Na→Ar), 两个十八元素周期 (K→Kr; Rb→Xe), 一个三十二元素周期 (Cs→Rn) 以及一个不完全周期 (Fr→Ha)。每个周期的元素都与下一周期的一个或多个元素相关联。这个表的弱点在于占据了较大的空间, 并难于连接性质相近的元素。一个折衷的方案是将三十二个元素的周期压缩成十八个元素。被压缩掉的十四个镧系元素和十四个锕系元素排列在表的下面。经过修正的元素周期表被一次又一次地提出, 其中最早的一张, 是在1905年由威奈提出的。它的显著特点是将每一个短周期分为两部分, 这两部分元素的性质都与相对的长周期上的元素性质相类似, 从而避免了 J. 汤姆森周期表上的多重联系。该表也将镧系和锕系元素单独排列在下方, 从而使周期表大大简化。到20世纪中这种形式的周期表已被广泛采用。

元素周期表反应出化学元素间的内在联系, 除第一周期以外, 每一周期的元素都是从活泼的金属元素——碱金属开始, 逐渐过渡到活泼的非金属元素——卤素, 最后以惰性气体结束。同一周期中, 从左到右, 核电荷数依次增多, 原子半径逐渐减小, 失电子能力逐渐减弱, 获电子能力逐渐增强——金属性逐渐减弱, 非金属性逐渐增强。元素的化合价、氧化物和水化物的酸碱性……等性质的递变都很有规律。元素周期表中, 元素按原子顺序的递增排列。同一周期, 从左到右, 核外电子层数相同, 最外层电子数依次递增, 原子半径逐渐缩小 (零族元素除外); 同一族, 由上而下, 最外层电子数相同, 核外电子层数逐渐增多, 原子半径增大。依据原子量的递增, 元素的物理性质像熔点、粘度、硬度都呈现周期性的变化。零族元素为难于凝固的气体; 第 I A 族碱金属是柔软的, 具有低熔点的固体金属; 第 II A 族的碱土金属就比碱金属硬, 并具有更高的熔点; 从第 III A、第 IV A 族到第 V A、VI A、VII A 族,

元素的硬度和熔点在继续增加。长周期元素的硬度和熔点从碱金属开始，缓慢增加，接近到周期的中心，然后从第ⅥB族起不规则地下降，直到卤素和稀有气体。周期表中元素的化学性质，像金属性和非金属性可用一个简单的方式来表达。金属性最强的元素在周期表的左边和底部，非金属性最强的元素在周期表的右边和顶部。非金属从硼到钋邻近对角线。相邻元素具有相近的电负性即获得额外电子的能力。元素在周期表中的位置决定了它们的金属性和非金属性，氟是电负性最强的元素，而铯则是电负性最弱的元素。元素的化合价相应于它们在周期表中的位置，主族元素的最高正价或氧化数等同于它的族数，而最高的负价等于八与族数之差。

周期表中元素的原子半径有规律地增减。第一短周期中元素在晶体中或分子中的有效离子半径从锂 1.52 \AA 到氟 0.73 \AA 有规律地递减；第二周期开始时，钠离子半径为 1.86 \AA 逐渐减少到氯 0.99 \AA 。长周期表中的情况就比较复杂了，有效离子半径从钋 2.31 \AA 逐渐减小到钴和镍的 1.25 \AA ，然后缓慢地上升，最终降至溴 1.14 \AA 。

【第一主族元素】由氢和六种碱金属组成，属元素周期表中第一主族（IA族）。它们的核的最外层只有一个电子，外围电子结构为 ns^1 ，反应中容易丢失这个电子，显+1氧化数，化学性质都非常活泼。这六种元素为氢、锂、钠、钾、铷、铯和钫。其中氢的同位素氘和钫是放射性的，其余都是稳定元素。它们的化合物都是容易溶于水的离子化合物。碱金属中除锂以外半径都较大，使外围这个电子很容易丢失掉，并且随着 Z 的增加，金属性和化合能力不断增强。碱金属都有银白色的金属光泽，非常软，可用刀切割，它们的比重小、熔沸点低而导电导热性强，它们都能与氧、卤素、硫起化学反应，又能与水和稀酸剧烈反应，从中置换出氢而成强碱或盐，除

锂盐外，其他的盐都易溶于水，离子都是无色的。

【氢】化学符号 H，原子序数 $Z=1$ ，原子量 1.00794，属周期表第 I A 族。1766年由英国化学家 H. 卡文迪什发现。氢在通常条件下为无色、无臭、无味气体；气体分子由双原子组成；熔点 -259.14°C ，沸点 -252.8°C ，临界温度 33.19K ，临界压力 12.98 大气压，气体密度 0.0899g/l ；水中溶解度 $21.4\text{cm}^3/1000\text{g}$ 水 (10°C)。常温下氢不活泼，高温下氢是高度活泼的。氢的氧化价为 $+1$ 、 -1 价。氢在氧气中燃烧能生成水。它的主要反应类型如下： $\text{H}_2 + \text{非金属} \xrightarrow{\text{加热}} \text{非金属氢化物}$ ； $\text{H}_2 + \text{活泼金属 M (如 Li、Na、Ca)} \longrightarrow \text{盐型氢化物 (MH、MH}_2\text{)}$ ； $\text{H}_2 + \text{金属氧化物} \longrightarrow \text{低价氧化物} \longrightarrow \text{金属}$ ； $\text{H}_2 + \text{烯、炔等不饱和烃} \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{饱和烃}$ 。氢气的实验室制法包括：(1) 活泼金属如钠汞齐或钙与水的反应；(2) 锌与盐酸或稀硫酸的反应；(3) 铅或硅（硅铁）与氢氧化钠溶液的反应；(4) 金属氢化物如 LiH 、 CaH_2 、 LiAlH_4 与水的反应。氢气的工业制法主要有：(1) 水的电解，用镀镍铁电极电解 15% 的氢氧化钾水溶液；(2) 从天然气或裂解石油气制氢气；(3) 水煤气法，即从焦煤或白煤制氢气。氢是人体主要组成元素，是人体和生物体细胞、脂肪、维生素、酶等的主要成分，又是人体中水的重要成分。人体有 $2/3$ 是水，其中约 70% 在细胞内， 20% 在组织液体， 10% 在血浆内。我们把组织看成各种成分的溶液或胶体溶液，一切化学变化和化学变化的原料及产品的输送都在水内进行。组织液是细胞和血浆交换物质（养分和废物）的媒介。细胞液和血浆的水分保持恒定依靠组织液，所以组织液的水分并非固定不变。水在胃中不被吸收，而主要由小肠吸收，所以小肠内容物运到大肠时，水分已有所减少，

而大肠也能吸收相当量的水分。体内水分缺少是脱水症,如水分减少10%,就有严重症状;减少20%即可死亡。缺少任何食物都没有缺水危险,如果不吃东西只喝水,体重减少40%还能生存,可见水是除氧以外人体最重要的物质。

【氕】元素氢三种同位素中的一种最主要的稳定同位素,简写为 ${}^1\text{H}$ (或 H^1),它的核中只有一个核子即带+1电荷量的质子,所以核外也只有一个电子被填在第一层的S轨道上,则外层电子结构为 1S^1 。因它的含量占自然界氢的绝大部分(99.985%)所以在同位素化学中往往把氕就看成氢,以致很多人不知道还有同位素氕存在。实际上往往描述氢的物理化学性质,就是氕的物理化学性质,所以这方面内容请参见元素氢。

【氘】元素氢的另一种稳定同位素,它的核中除含有一个质子外,还有一个中子,所以它的核电荷数还是+1,核外也只有一个电子在第一层的S轨道上,它的质量约为氢(氕)的二倍,所以又称做重氢,用符号 ${}^2_1\text{H}$ (${}^2\text{H}$ 或D)表示,它在自然界中含量远低于氕,只占氢中的0.015%,它的外层电子结构也为 1S^1 ,所以它的化学性质基本上与氢(氕)相同,所有氢的化合物都对应有氕的化合物,最主要是重水 ${}^2\text{H}_2\text{O}$ 。这也使氢气分子式除了有 H_2 (轻氢气)外,还少量的半重氢气DH和重氢气 D_2 。两个在一定能量下可聚合成一个He而放出更多的能量,所以D可以用来做氢源的核燃料。现在人类正在大力研究可控热核反应即控制氢源的能量来和平利用,一旦这一尖端问题被解决了,人类就再也不必为能源而担忧了。氕离子还被用在重粒子加速器中作离子源来研究人工核反应,氕在工业上主要用液氢精馏法获得。氕是尤旦、布里克韦德和默菲在

1931年发现的。

【氚】元素氢的一种放射性同位素，它的核中含有一个质子，两个中子，质量数约为氢的三倍，所以又叫超重氢，用 ${}^3_1\text{H}$ 或J表示。自然界的氚来源有两种，一种来于大气中的氮与宇宙中的中子核反应生成碳和超重氢： ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^3_1\text{H}$ ；另一种来源于大气中下列核反应： ${}^2_1\text{H} (\text{n}, \text{r}) {}^3_1\text{H}$ 和 ${}^3_2\text{He} (\text{n}, \text{p}) {}^3_1\text{H}$ 。氚的核外电子结构也是 1S^1 ，因而它的化学性质也与氢类似。氚是纯 β^- 放射源半衰期为 $T_{1/2} = 12.323$ 年，所以氚可以用作示踪原子，也被用来做核燃料。美国的卢瑟福在1934年首先在中子打 ${}^2_1\text{H}$ 的核反应中发现 ${}^3_1\text{H}$ ，很快美国的洛齐尔又在重水中发现了氚，现在氚的人工制取主要从用中子打锂的核反应过程中获得，反应式为： ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$

【碱金属】除了氢以外的第一主族（IA族）其余6种元素：锂、钠、钾、铷、铯、和钫，它们与水反应后都生成很强的碱性物质，因而被称做碱金属。它们的最外层只有1个电子在s轨道上，可表示为 ns^1 ，化学反应时极易丢失，显+1氧化数，化学性质极为活泼，使得它们在自然界只能以化合物形式存在，钠、钾在地壳中含量较高，分别为2.83%和2.59%，其余都很稀少。除铷57和钫是放射性元素外，都是稳定元素。纯碱金属有银白色的金属光泽，非常软、比重小，熔沸点低，导电导热性强，容易切割，化学反应时随Z的增加化学作用能力增加。

【锂】周期表第二周期中IA族银白色的固体碱金属，原子序数 $Z = 3$ ，是最轻的碱金属，原子量为6.941，化学符号Li，有两种天然同位素 ${}^6_3\text{Li}$ 和 ${}^7_3\text{Li}$ ，原子半径 1.336 \AA ，负电性1.0，熔点 $180.54 \text{ }^\circ\text{C}$ ，

沸点 1342°C ，密度 0.534克/厘米^3 ，硬度 0.6 ，外围电子结构 $2s^1$ ，化学性质很活泼，反应中极易给出一个电子，氧化数 $+1$ ，是强的还原剂，易溶于水、液氨，不易溶于烃。瑞典的阿弗末聪在 1817 年从透锂长石矿物中发现锂，地壳中含量不高，但动物机体、土壤、矿泉水、可可粉、烟草和海藻中都含有不同比例的锂。

【钠】周期表第三周期中 $2A$ 族有银白色金属光泽的固体碱金属，原子序数 $Z=11$ ，原子量 22.989768 ，化学符号 Na ，原子半径 1.529 \AA ，电负性 0.9 ，熔点 97.81°C ，沸点 892°C ，密度 0.97克/厘米^3 ，外围电子结构 $3s^1$ ，化学反应时这个电子极易丢失，所以氧化数 $+1$ ，能和水强烈作用生成氢氧化钠，主要化合物有氧化钠、碳酸钠、各种钠盐等。美国化学家戴维首先用电解氢氧化钠溶液获得纯钠。钠在地壳中含量 2.83% ，在元素中占第六位，海水和盐湖中均有含量很高的钠盐，钠是生物必须的重要元素，细胞间的物质及血液内都必须有相当比例的钠，如含量不足将会影响消化系统和新陈代谢。钠的化合物苏打粉、苏打灰和苛性钠等在工业上均被广泛利用。

【钾】周期表第四周期中 $1A$ 族有银白色金属光泽的固体碱金属，原子序数 $Z=19$ ，原子量 39.03983 ，原子半径 1.962 \AA ，电负性 0.8 ，熔点 63.56°C ，沸点 774°C ，密度 0.86克/厘米^3 ，化学符号 K ，外围电子结构 $4s^1$ ，因原子半径增加，这个电子更容易丢失，氧化数 $+1$ ，化学活性更强，在空气中就能燃烧生成桔红色的氧化钾，和水能更强烈地反应生成氢氧化钾，有更多化合物。英国化学家戴维用电解氢氧化钾溶液的方法，在 1807 年首先提取纯钾。地壳中含量为 2.59% ，在元素中占第七位，它经常与钠共存，特别在海水中含

有丰富的钾，钾也是生物必需元素，是细胞膜、肌肉、血液的主要成份，它对细胞内的渗透压和 pH 值起关键作用。钠、钾盐是植物的三大营养肥料之一。

【铷】 周期表第五周期中 I A 族有银白色金属光泽的固体碱金属，原子序数 $Z=37$ ，原子量 85.4578。原子半径 2.16 \AA ，电负性 0.8，熔点 38.89°C ，沸点 688°C ，密度 1.532 克/厘米^3 ，化学符号 Rb，有两种天然同位素 $^{85}_{37}\text{Rb}$ 和 $^{87}_{37}\text{Rb}$ ，外围电子结构 $5s^1$ ，因原子半径比钾更大，化学反应时这个电子也更易丢失，所以化学活性比 Z 小的碱金属更活泼，在空气中会强烈燃烧。更激烈地溶于水生成氢氧化铷，有各种化合物。同位素 $^{87}_{37}\text{Rb}$ 是放射性的。化学家本生和基尔霍夫在 1861 年用光谱法从锂云母中发现铷。

【铯】 周期表第六周期中 I A 族有银白金属光泽的固体碱金属，原子序数 $Z=55$ ，原子量 132.90453，原子半径 2.35 \AA ，电负性 0.7，熔点 28.5°C ，沸点 690°C ，密度 1.8785 克/厘米^3 ，化学符号 Cs，外围电子结构 $6s^1$ ，化学反应时比铷还易丢失这个外围电子，氧化数 +1，与空气在常温下剧烈反应，也更激烈与水反应生成氢氧化铯，有各种化合物，因这个最外层电子离核更远，它和核的结合能更低，在光子照射下都能把这个电子打出，所以是光电管阴极的主要材料。本生和基尔霍夫在 1860 年用火焰法从矿泉水的残渣中发现铯。它在地壳中含量稀少，它的合金在火箭工业、磁流体发电机工业以及热电换能器中均得到了广泛的重要应用。

【钫】 周期表第七周期中 I A 族有银白色金属光泽的固体碱金属，原子序数 $Z=87$ ，原子量 223.019731，熔点 27°C ，沸点 677°C ，密

度 2.48克/厘米^3 ，化学符号 Fr，已发现 $^{201-236}_{87}\text{Fr}$ 全部钫同位素，其中 $^{223}_{87}\text{Fr}$ 和 $^{224}_{87}\text{Fr}$ 是天然放射性同位素，其余全部是人工放射性同位素，它们可以放出 β^- 射线，半衰期最长的是 $^{223}_{87}\text{Fr}$ ， $T_{1/2}=21$ 分钟，外围电子结构 $7s^1$ ，因它的同位素寿命都比较短，它们的化学性质不十分清楚。

【碱土金属】元素周期表中的第二主族（ⅡA族）元素，包括铍、镁、钙、锶、钡、镭共六种元素，外围电子结构为 ns^2 ，这两个电子都容易在化学反应中丢失，氧化数为+2，因外围电子比碱金属多一个，所以化学反应能力不及碱金属，但比其他金属元素强，碱土金属的氧化物都很难溶于水，经常用火焰颜色来识别它们，除了铍以外都是有银白色金属光泽的固体，在常温下能从水中置换出氢， Z 越大置换能力越强。碱土金属都有很强的导电和导热能力。原子半径随 Z 增加而增加，化学活性也随 Z 增加而增加。

【铍】周期表中ⅡA族中有钢灰色金属光泽的固体碱土金属元素，原子序数 $Z=7$ ，原子量 9.012182 ，原子半径 0.90Å ，电负性 1.5 ，熔点 1278°C ，沸点 2970°C ，相对密度 1.85 ，化学符号 Be，外围电子结构 $2s^2$ ，化学反应时容易丢失这两个电子，氧化数为+2。因铍的原子半径比较小，核电荷对外层电子的引力比较强，所以很多铍的化合物是共价化合物，铍呈现金属和非金属两种特性，是一种两性元素。法国化学家沃克兰在1798年从绿柱石和祖母绿矿物中发现铍。在地壳中含量为 2.5% ，主要在绿柱石、硅铍石、金绿宝石等矿物中。铍可形成聚合物，在军事工业上极有用途，铍还可以加速反应堆中的中子反应，可作为中子反射体和反应堆底座的

材料，因它的质量小，在强流对撞加速器中常被用来制做真空管以便减小粒子在真空管上的反应，以达减小探测本底目的。

【镁】周期表中ⅡA族有银白色金属光泽的固体碱土金属元素，原子序数 $Z=12$ ，原子量24.305，化学符号Mg，原子半径 1.36Å ，电负性1.2，熔点 651℃ ，沸点 1107℃ ，相对密度1.74，容易被切割加工，外围电子结构 $3s^2$ ，反应时容易丢失这两个电子，氧化数为+2，化学性质活泼，但不如碱金属，可化合成氧化物、氢氧化物、卤化物、碳酸盐、硫酸盐等化合物。戴维用电解氧化镁和氧化汞混合物方法在1808年首先提取镁，镁在生命科学、工业、农业中都被广泛应用，工业上用电解海水和分解白云石等方法提取纯镁。

【钙】周期表中ⅡA族有银白色金属光泽的固体碱土金属元素，原子序数 $Z=20$ ，原子量40.078，原子半径 1.74Å ，电负性1.0，熔点 842.8℃ ，沸点 1487℃ ，相对密度1.54，化学符号Ca，地壳中含量3.64%，外围电子结构 $4s^2$ ，化学反应时很易丢失这两个电子，所以氧化数是+2，化学性质比镁活泼，可生成氧化物、氢氧化物、卤化物、硫酸盐、碳酸盐等化合物。戴维用电解石灰石和氧化汞混合物在1808年获得钙汞齐。镁是生命科学、工业、农业中不可缺少的元素，人体缺钙会得软骨病。钙遇水可释放出氢气，是廉价的氢气发生剂。

【锶】周期表中ⅡA族有银白色金光泽的固体碱土金属元素，原子序数 $Z=38$ ，原子量87.62，原子半径 1.91Å ，电负性1.0，熔点 769℃ ，沸点 1384℃ ，相对密度2.6，化学符号Sr，有四种稳定同

位素和19种放射性同位素,地壳中含量0.02%。戴维用电解氢氧化锶和氧化锶与氧化汞的混合物在1808年首先提取锶。外围电子结构 $5s^2$,化学反应时这两个电子很容易丢失,所以氧化数为+2,化学性质非常活泼,平时必需放在煤油中才能保存,锶与水、碳、卤素、硫、氮、氢、酸等都能反应生成化合物,在空气中加热就会燃烧,不加热表面也会生成一层氧化物保护层使其失去光泽,锶的盐类不溶于水,火焰是鲜红色的可制烟火、照明源、铁路照明灯等, ^{90}Sr 被广泛用在高能物理和核物理实验中,还可在医学上用来治疗骨癌。

【钡】周期表中ⅠA族有银白色金属光泽的固体碱土金属元素,原子序数 $Z=56$,原子量137.327,原子半径1.98,电负性0.9,熔点 725°C ,沸点 1638°C ,相对密度3.51,化学符号Ba,地壳中含量0.05%。瑞典化学家舍勒在1774年从软锰矿石中分析出钡。外围电子结构 $6s^2$,化学反应时容易丢失这两个电子,氧化数+2,它能与水强烈作用,加热时可与氢、碳、硫、氮作用生成化合物,也能与氧和卤素反应生成氧化物和卤化物,钡常被用在电子管和显像管中消除残存气体使其保持高真空,钡的合金可用来制造轴承。工业上用电解熔融氯化钡或用铝还原氧化钡方法制取钡。

【镭】周期表中ⅡA族有银白色金属光泽的固体放射性碱土金属元素,原子序数 $Z=88$,原子量226.025402,电负性0.9,熔点 960°C ,沸点 1140°C ,原子半径 2.23Å ,离子半径 1.50Å ,密度5克/厘米³,化学符号Ra,除了 $^{223}_{88}\text{Ra}$ 、 $^{224}_{88}\text{Ra}$ 、 $^{225}_{88}\text{Ra}$ 、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 和 $^{228}_{88}\text{Ra}$ 是天然放射性同位素外其余的从镭206—镭230都是人工核反应产生的。居里夫妇在1898年通过两年对大量的铀矿石分析在发现钋后

又发现了镭，主要分布在所有铀矿石中，在其中的含量与铀的含量成正比，即一克铀 238 对应 3.8×10^{-7} 克镭 226 ，所以把 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 作为 $^{238}_{92}\text{U}$ 系成员。外围电子结构 $7s^2$ ，在化学反应中极易丢失这两个电子，化合价为+2，镭由于半径大，化学活性更强，能分解水并成 $\text{Ra}(\text{OH})_2$ ，比 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 更难溶的碱，在空气中很容易氧化成 RaO ，与氮化合时生成 Ra_3N_2 ，大多数镭盐与钡盐同晶， RaCl_2 、 RaBr_2 、 RaI_2 、 $\text{Ra}(\text{NO}_3)_2$ 和 RaS 都是可溶于水的镭盐，镭离子是无色的。镭是重要的放射性同位素，它放出的 γ 射线可用于医学上的 γ 刀、 γ 相机也可用于金属器件的无损探伤和直接用来治疗癌，在工业上镭主要在综合处理铀矿石中提取，也可从长期放置的钍盐和钍矿石中制取。

【铝土金属】又叫硼族元素，是元素周期表中的第三主族（ⅢA族）元素，包括硼、铝、镓、铟和铊五种。因硼是非金属，故也叫铝土金属。它们的外围电子结构为 ns^2np^1 ，都能给出3个电子而显氧化数为+3的特征，从硼到铊的金属性增加，硼的氧化物是酸性的，铝的氧化物是两性，以后几种元素的氧化物是碱性，而且碱性随 Z 增加而渐增。在一定条件下可表现为+1的氧化数。

【硼】周期表ⅢA族中呈现黑色或银灰色光泽的铝土金属中非金属元素，原子序数 $Z=5$ ，化学符号B，原子量10.811，外围电子结构 $2s^22p^1$ ，原子半径 0.795 \AA ，地壳中含量0.001%，有11种同位素，其中10种是稳定的，除金刚石外，硼是最硬的固体。由盖—吕萨克和泰纳尔分别在1808年用金属钾还原硼酸获得的。硼在常温下不活泼，但在高温下能直接与氧、卤素、碳、硫化合，也能同很多金属直接化合成硼化物。也可间接与氢化合成硼烷，如有剧毒

的 B_2H_6 和 B_4H_{10} 等。硼在植物上有很重要的意义。它是植物生长和发育的必需微量元素之一，特别有助于根、茎的发育。碳化硼和氮化硼是原子反应堆的控制器，又是耐高温、高压的超硬材料，被用于喷气工业中，硼的氢化物还是火箭、导弹的高能喷射燃料，硼在工业上可用卤化物的氢还原法和金属热还原法制取。

【铝】有银白色金属光泽的典型的两性元素，是元素周期表中ⅢA族铝土金属元素，原子序数 $Z=13$ ，化学符号 Al，原子量 26.9815，外围电子结构 $3s^23p^1$ ，原子半径 1.18 \AA ，电负性 1.5，熔点 660°C ，沸点 2467°C ，相对密度 2.702，地壳中含量 8%，是地壳和土壤中含最高的金属元素。丹麦的奥斯特在 1825 年用三氯化铝与钾汞作用提取了铝。铝有很好的延展性，韧性和导电导热性，在空气中表面很快被氧化形成一层保护层。它既能与酸作用生成铝盐也能与碱作用生成铝酸盐。铝与氧化合时放出大量的热量而生成氧化铝 (Al_2O_3) 的白色粉末，也能生成两性的氢氧化铝，铝也能同卤素、硫、氮、磷、碳等作用生成化合物，铝及铝合金在工业上被广泛应用，特别是运输、建筑和电气工业。结晶氧化铝又叫刚玉，硬度仅次于金刚石。如果其中含微量的钛呈蓝色就是珍贵的蓝宝石，铝也被用在铝热法提炼金属中。铝在动植物中也广有分布，但人全中铝含量太高也不好，易得老年痴呆。工业上常用电解氧化铝方法提炼铝。

【镓】周期表中ⅢA族有蓝灰色金属光泽的固体铝土金属元素，原子序数 $Z=31$ ，化学符号 Ga，原子量 69.723，外围电子结构 $4s^24p^1$ ，原子半径 1.26 \AA ，电负性 1.6，熔点 29.78°C ，沸点 2403°C ，密度 5.907 克/厘米^3 ，地壳中含量很低。法国的布瓦博德朗在 1875 年从

闪锌矿中分析出镓。镓只有在高温下才被氧化及与硫、硒、碲、磷、砷、锑反应生成有半导体特性的化合物，镓的化合物能溶于水、盐酸和高氯酸混合液及强碱中，它和钒、钽、锆的合金具有超导性能，所以镓主要用在电子工业和超导体器件中。

【铟】周期表中ⅢA族略带淡蓝色银白色的固体铝土金属元素，原子序数 $Z=49$ ，化学符In，原子量114.82，外围电子结构 $5s^25p^1$ ，原子半径 1.44Å ，电负性1.7，密度 7.3克/厘米^3 ，熔点 156.6°C ，沸点 $(2000\pm 10)^\circ\text{C}$ 。赖希和希特在1863年研究闪锌矿石光谱时发现铟。铟为地壳中的稀有元素，氧化数为+1和+3，加热时能与氧、卤素、硫、硒、碲、磷等元素作用生成对应化合物，也能与多种金属生成合金。铟比铝软，延展性好，铟常被用来包在其他金属表面增强耐腐蚀能力，铟丝可作电阻器、热电阻器、电流计，也可制做反射镜。工业上常从闪锌矿石渣中提取铟。

【铊】周期表中ⅢA族有银白色金属光泽重而软的固体铝土金属元素，原子序数 $Z=81$ ，化学符号Tl，原子量204.3833，外围电子结构 $6s^26p^1$ ，原子半径 1.48Å ，电负性1.8，密度 11.85克/厘米^3 ，熔点 303°C ，沸点 $(1455\pm 10)^\circ\text{C}$ 。克鲁克斯在1861年用光谱法从硫酸废渣中发现铊。在地壳中含量很低，氧化数+1和+3，在室温下能与氧和卤素作用，在高温下能与硫、硒、磷作用，能和一些金属作用生成低熔点的合金，常被用来粘接电子管管座。工业上可从硫化物烟灰中提取铊。

【碳族元素】周期表中第四主族(ⅣA族)元素，包括碳、硅、锗、锡、铅五种元素，其中碳和硅是非金属，是本族典型元素，外围

电子结构为 ns^2np^2 ，最高氧化数是 +4，还能在反应中捕获四个电子呈现 -4 的最低氧化数。在形成正氧化态的化合物中，氧化数呈现 +2 和 +4 两种型式。本族元素由轻到重从非金属过渡到金属更为明显，它们都能生成 RH_4 的真正四面体化合结构，氢化物都不具有极性，不能缔合。碳硅氧化物呈酸性；锗、锡、铅的在 +4 价氧化数时呈两性，而且随 Z 增加酸性渐弱，氧化数呈 +2 时碱性显著加强。

【碳】 周期表中 IV A 族有黑色光泽的固体非金属碳族元素，在自然界中单质碳有金刚石、石墨和无定形碳三种异形同质结构，同位素有 12 种之多。原子序数 $Z=6$ ，化学符号 C，原子量 12.011，外围电子结构 $2s^22p^2$ ，原子半径 0.772 \AA ，电负性 2.5，熔点 3550°C ，沸点 4827°C ，密度随单质晶体结构不同而异。碳的化合物种类在元素中居第一位，有百万种以上；而不含碳的所有元素化合物只有几万种。有机物是碳氢化合物，在工业上被广泛应用，加上种类繁多，因而开辟了一门有机化学，碳也能同别的元素化合成无机化合物，如一氧化碳、二氧化碳、碳酸盐等都是无机化合物。碳在常温下不很活泼，与稀酸和强碱共煮也不发生作用，只有外加强烈的氧化剂才能发生反应。加热时碳能与氢、氧、硫、硅、硼及若干金属化合。以无定形碳化学活泼性最大，碳的氧化态为 +2、+4 和 -4，植物的叶、茎、根，空气中的 CO_2 、CO，动物体内的蛋白质、脂肪、淀粉、糖、血红蛋白、激素、氨基酸等都有碳的化合成份，一氧化碳是剧毒的，它能使血红蛋白失去带氧能力，但在冶金工业中却用它来做还原剂。碳是植物光合作用的重要元素。

【硅】 周期表中 IV A 族有灰黑色光泽的非金属固体碳族元素，有晶

态和无定形态两种同素异形体，晶态有金刚石晶格，固具有金属光泽和某些金属性质而被称为准金属。原子序数 $Z=14$ ，化学符号 Si，原子量 28.055，外围电子结构 $3s^23p^2$ ，原子半径 1.126Å ，电负性 1.8，熔点 1410°C ，沸点 2355°C ，密度 2.32克/厘米^3 ，氧化数 +2 和 +4，在常温下不活泼，在高温下可与卤素、氧、硫以及许多金属直接化合。除氢氟酸外与其他酸都不起作用，但强碱和弱碱都能与其起作用。在自然界常见的硅的氧化物有硅石 (SiO_2) 形成的石英、水晶、玛瑙和燧石等，地球上大量分布的土壤、砂子和砂岩等也基本上由二氧化硅或硅酸盐形成，因而地壳中约有 27.7% 是硅。纯净的单晶硅和单晶锗是两种半导体晶体材料，它的发现、发展推动了电子工业革命。硅也是植物的必需元素，可用硅的含量来测量植物寿命。硅橡胶广泛应用于医药卫生，工业上单质硅用碳在电炉中还原二氧化硅方法制取。

【锗】 周期表中 IV A 族具有银白色金属光泽的固体金属碳族元素，原子序数 $Z=32$ ，化学符号 Gt，原子量 72.61，外围电子结构 $4s^24p^2$ ，原子半径 1.22Å ，电负性 1.8，熔点 937.4°C ，沸点 2330°C ，密度 5.35克/厘米^3 ，氧化数 +2 和 +4，在室温下与空气和水不起作用，在 700°C 以上能与氧生成 GtO_2 ，加热后也能与卤素和硫反应。德国温克勒尔在 1886 年从硫酸锗矿石中分离出锗。它在地壳中含量很低。单晶锗也是一种半导体材料，更适合制做开关管，工业中锗主要从硫化物废渣中提取。

【锡】 周期表中 IV A 族浅灰色的固体金属碳族元素，原子序数 $Z=50$ ，化学符号 Sn，有 24 种同位素，三种同系异形体：白锡、灰锡和脆锡。原子量 118.71，外围电子结构 $5s^25p^2$ ，原子半径 1.41Å ，电

负性1.8, 熔点 231.9°C (白锡), 沸点 2260°C (白锡)。公元前2000年人类就开始使用锡, 地壳中的锡几乎都以 SnO_2 化合物存在, 用它提取锡的方法很简单, 只需把 SnO_2 和碳一起锻烧去硫和砷后再被炭还原成锡。锡的氧化态有+2和+4两种, 只有在加热时才能被氧化成 SnO_2 , 可直接与卤素和硫化合。工业上经常在铁表面镀一层锡防止生锈。锡柔软而有延展性, 又无毒, 以前常用它制日用品。氯化亚锡是很强的还原剂, 氢氧化锡是两性化合物。锡是人体和生物体的必需元素之一, 但不能吸入太多, 因太多会影响蛋白质的吸收。

【铅】 周期表中ⅣA族淡灰蓝色金属光泽的固体重金属碳族元素, 原子序数 $Z=82$, 化学符号Pb有四种天然稳定同位素和24种放射性同位素, 原子量207.2, 外围电子结构 $6s^26p^2$, 原子半径 1.47Å , 电负性1.9, 熔点 327.3°C , 沸点 1744°C , 因铅可用铅矿石在空气中用碳锻烧生成一氧化铅再被碳还原成铅, 所以在公元前3000年人类就用这种简单方法炼出了铅, 它的氧化数为+2和+4, 在空气中就能被氧化在表面生成一层氧化铅保护层。铅可与卤素和硫直接化合成化合物, 有空气时能与水生成两性的氢氧化铅, 铅的化合物对人体有毒性, 在体内溶解度越大毒性也越大, 所以应特别注意铅对环境的污染。铅常被用来制电缆套、枪弹、放射性防护层、蓄电池中的多孔板合金和用它与锡的合金做焊锡。

【氮族元素】 周期表中第五主族(ⅤA族)的元素, 包括氮、磷、砷、锑、铋五种。氮和磷是本族中的典型元素, 外围电子结构为 ns^2np^3 , 它们有获得3个电子形成8个电子稳定结构和趋势, 但与电子的结合能力比ⅥA族和Ⅶ族中的对应元素要差些, 而失去电子

的趋势要大些,因此氮族元素的氧化物的分子极性和稳定性较小,氧化物较稳定。它们的物理和化学性质也随原子序数的增加呈现有规律的递变,而且从轻到重非金属性减弱,金属性增强,它们的负电性也比ⅥA和ⅦA族的元素低,因此它们氧化数为-3的阴离子难以存在,当它们和氢或金属元素化合时只能形成共价键化合物,表现为正氧化态时也以共价键为特征。其氧化数主要是+3和+5,化合物为正3时,外层上还保留一对s电子,这时电子的稳定性将随核电荷的增加而增加,所以+5的氧化特征随之而减弱,所以氮族元素更容易显示+3的氧化态特征。

【氮】周期表中ⅤA族无色、无臭、无味的双原子气体氮族元素,有两种天然同位素,原子序数 $Z=7$,化学符号N,原子量14.006747,外围电子结构 $2s^2 2p^3$,原子半径 0.549 \AA ,电负性3.0,熔点 -209.86°C ,沸点 -195.8°C ,瑞典的药剂师舍勒和美国化学家卢瑟福在1772年同时发现氮,在地壳中含量0.0046%,大气中有78%的体积是氮气,主要矿物是硝酸盐,氧化数 ± 3 和+5,游离氮在一般条件下不活泼,但在高温下能直接与氢和氧化合,也可与许多金属元素化合。氮极易溶于水生成氨水,氮和酸作用生成铵盐。 NO_2 溶于水生成强酸硝酸 HNO_3 ,它有一系列氧化态不同的稳定的盐,都溶于水。一体积硝酸和三体积盐酸(HCl)混合变成溶解性最强的强酸王水。氮与氧化合可生成一氧化氮、二氧化氮、三氧化氮、四氧化氮和五氧化氮。氮是一切生命现象离不开的蛋白质的重要成份,氮的氧化物对身体却有害。工业上用分馏空气方法制取氮。

【磷】周期表中ⅤA族有三种同素异形体的固体非金属氮族元素,

白磷为白色粉末，红磷为紫红色粉末，黑磷为黑色粉末。原子序数 $Z=15$ ，化学符号 P，原子量 30.973762，外围电子结构 $3s^23p^3$ ，原子半径 0.947 \AA ，电负性 2.1，熔点 44.1°C （白磷），沸点 280°C （白磷），密度 1.82 克/厘米^3 （白磷）。德国化学家布兰德在 1669 年从尿中提取出磷。地壳中磷的含量为 0.118% 。白磷有剧毒，不溶于水而溶于二硫化碳，在空气中微微磨擦就能燃烧，平时必须保存在水中。白磷遇皮肤会烧伤皮肤。红磷无毒，不溶于水和 CS_2 ，在空气中几乎不被氧化。磷的化学活性远高于氮，氧化数 ± 3 和 $+5$ ，易与氧、硫、卤素和许多金属直接化合。磷在空气中充分燃烧会生成 P_2O_5 ，极易与水结合生成偏磷酸 HPO_3 、焦磷酸 $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 和磷酸 H_3PO_4 。动植物的许多蛋白质中都含有磷，生物体内的磷化合物腺三磷 (ATP) 是能量的主要来源。人体中 3% 的重量是磷酸钙。磷酸盐在农业上也极为重要，碱土中更应使用磷肥，磷是骨骼牙齿和生物细胞的主要成份，与骨骼和牙齿的 $70\%—75\%$ ，人体如缺磷便会得佝偻病和软骨病。磷常被用于烟火、燃烧源、火柴以及磷酸、杀虫剂、洗衣粉的制造。

【砷】 周期表中 V A 族有三种同素异形体的非金属固体氮族元素，黄砷为黄色、黑砷黑色、灰砷为灰色。原子序数 $Z=33$ ，化学符号 As，原子量 74.92159，外围电子结构 $4s^24p^3$ ，原子半径 1.20 \AA ，电负性 2.0，熔点 817°C （灰砷），沸点 613°C （灰砷），可直接升华成四原子砷 As_4 ，但温度高于 800°C 时变成双原子砷 As_2 ，更高温度下变成单原子砷，氧化数为 ± 3 和 $+5$ ，不与水、碱和非氧化性酸起作用，而能被硝酸、浓硫酸和王水氧化成 $+5$ 氧化态化合物。在自然界主要以硫化物的形式存在，地壳中含量稀少。砷也能与铜、铅等金属形成合金。特别要注意是砷化物对人体是剧毒的，它对机

体有特殊的亲和力，使酶失去活性，使细胞失去正常代谢能力而死亡，尤其是亚砷酸的毒性更大，约为砷酸的60倍，它可以诱发皮肤癌、肺癌等，但砷和硒是互为解毒剂。高纯砷可用于半导体和激光技术，所以一定要注意砷对环境的污染。砷的工业制取是将砷的硫化物氧化后再用碳还原成单质砷，砷在工业上首先被作于有色金属的合金生产中，在合金中加入万分之几的砷就能提高很多耐磨抗腐蚀能力。

【锑】 周期表中ⅤA族具银白色金属光泽的脆的固体金属氮族元素，有两种同素异形体，一种呈黄色、一种呈金色。原子序数 $Z=51$ ，原子量121.75，化学符号Sb，外围电子结构 $5s^25p^3$ ，原子半径 1.40Å ，电负性1.9，熔点 630.5°C ，沸点 1380°C ，密度 6.68克/厘米^3 ，氧化数 ± 3 和 $+5$ ，在炽热时能与水作用放出氢，在室温下不与氧作用，在高温下能生成三氧化锑的两性氧化物，锑直接与卤素化合时具有大量的热效应，锑能溶于王水和浓硝酸，并能很慢地溶于浓盐酸而放出氢气。锑几乎都以合金形式被利用，与铅的合金用来做铅字，有些合金用来制做轴承。锑在古代就广为利用了。

【铋】 周期表中ⅤA族具有银白色金属光泽的脆的固体金属氮族元素，原子序数 $Z=83$ ，化学符号Bi，原子量208.98037，外围电子结构 $6s^26p_3$ ，原子半径 1.46Å ，电负性1.9，熔点 271.3°C ，沸点 $(1560\pm 10)^\circ\text{C}$ ，密度 9.8克/厘米^3 。德国化学家瓦伦丁在1450年发现。氧化数 ± 3 和 $+5$ 。铋有多种晶形变体存在，但在普通压力下只有一种结构。在地壳中含量很稀少，主要在铜和铅的废料中，铋和水一样，固态的比液态的体积膨胀。铋可直接与卤素和硫化合，只有在炽热时才与氧气作用生成 Bi_2O_3 ，还可以与大多数正电性金属

化合成铋化物，铋可溶于硝酸和热浓硫酸，不溶于非氧化酸。铅字中加1.5%的铋可提高其质量和使用寿命，还被用于抗热材料中，很多合金被用来制造轴承和齿轮。它们的丝还用来做钢琴弦。

【氧族元素】周期表中第六主族（ⅥA族）元素，包括氧、硫、硒、碲、钋五种元素，其中钋是放射性金属元素。氧族元素的外层都有六个电子，电子结构为 ns^2np^4 ，除钋外都是非金属，不及卤素活泼。这些元素一方面能形成氧化数为-2的阴离子，另一方面也能形成+2、+4和+6的阳离子化合物。但氧原子的最外层六个电子与核结合得非学紧密，似乎除氟外没有任何其它原子能把这六个电子拉出来，所以氧的氧化数一般只有-2。氧的负电性很高，能与许多金属形成离子化合物，与其他元素生成共价化合物。氧和硫非常活泼，能与氢、卤素及几乎所有金属生成卤化物和氧化物或硫化物。但硫的氧化数可高达+6，而氧只是-2。

【氧】周期表中ⅥA族无色、无味、无臭的双原子非金属气体的氧族元素，原子序数 $Z=8$ ，原子量15.994，化学符号O，有三种稳定同位素 $^{16}_8\text{O}$ 、 $^{17}_8\text{O}$ 和 $^{18}_8\text{O}$ ，其中 $^{16}_8\text{O}$ 占99.759%，外围电子结构 $3s^23p^4$ ，原子半径0.604Å，电负性3.5，熔点-218.8℃，沸点-183℃，气体密度1.429克/升。美国普里斯在1774年发现能特别助燃的氧气。氧化数-1和±2，氧化能力特强，几乎除惰性气体外的所有元素都有氧化物。氧化物分中性、酸性、碱性三种。还有超氧化物 H_2O_2 、 NaO_3 和复杂氧化物 Fe_3O_4 等。氧在地壳中含量为48.6%在元素占第一位，水中占88.8%，空气中占23%，氧在生物界起着极重要作用，吸呼主要靠氧来实现，人体吸进氧以后由血液输送到各器官实现新陈代谢。虽然氧因各式各样氧化作用在减少，但植物的光

合作用却在不停地向空气中输送氧，它们送出去的氧为它们在光合作用中用去的氧的20倍，所以生物界能实现生态平衡，氧起了关键作用。工业上氧的用处也很广，冶金工业用氧来获得高温去熔炼、精炼、焊接、切割及表面处理各种金属，也被用于化学工业和医疗。工业上主要用分馏空气的方法来制取氧。

【硫】周期表中ⅥA族黄色晶状固体的非金属氧族元素，有多种同素异形体，如八元环硫、七元环硫、六元环硫和多聚链状硫。常温下的硫叫正交硫 S_{α} ，95.5℃下变成斜交硫 S_{β} 。原子序数 $Z=16$ ，化学符号S，原子量32.066，外围电子结构 $4s^24p^4$ ，原子半径0.944Å，电负性2.5，熔点112.8℃，沸点444.6℃，密度2.07克/厘米³。在公元前就被制取和使用。地壳中含量0.048%，主要矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿。硫的化学性质非常活泼，在加热时容易被氧化，但是也容易被还原。在室温下能同氢反应，加热到100℃能同氟、氯化合，同大多数金属共热时能起反应生成硫化物而放出大量热量，同非金属也能化合，只是不如同金属化合的剧烈。盐酸对硫不起作用，硝酸和浓硫酸在300℃时，同硫反应生成二氧化硫。硫能同氧生成许多化合物： SO 、 S_2O_2 、 SO_2 、 SO_3 、和 S_2O ，其中亚硫酸酐 SO_2 和硫酸酐 SO_3 有极大用处。除了惰性气体和氮、金、铂、铀、铍和镁以外硫几乎能同所有元素直接化合。从硫的化合物可以分析出硫的氧化数为-2、+1、+2、+4和+6。硫的主要用处是用它的 SO_2 和 SO_3 配制亚硫酸和硫酸，必须注意的是浓硫酸是一种极强氧化剂，溶于水生成各种水合物而放出大量热，故稀释硫酸时切不可把水向浓硫酸中倾倒，而应把浓硫酸慢慢倒入水中。亚硫酸 H_2SO_3 和它的盐类是一种还原剂，它们分子中的+4价硫容易变成+6价。硫是构成动物蛋白质的重要元素之一，约占蛋

白质的2%左右,大部分在毛发和软骨中。硫也是一种重要农药,硫酸是化学工业的重要原料之一,硫的氧化物对身体有害,一定要防止它们对环境污染。工业上常用热水蒸汽加热矿石使硫熔化成纯硫或催化、氧化硫化氢来制取硫。

【硒】周期表中ⅥA族有若干种变体的固体非金属氧族元素。无定形硒呈细粉状,密度为4.3克/厘米³,加热到50℃开始变黑生成与玻璃相似的物质。当无定形硒同二硫化碳、三氯甲烷、乙醇、苯接触时,便转变成红硒。当无定形硒加热到217℃时变成黑色透明的至玻璃状脆性物质,密度为4.8克/厘米³,红硒呈两种单斜型变体比重为4.46—4.50。硒的原子序数 $Z=34$,化学符号Se,原子量78.96,外围电子结构 $5s^25p^4$,原子半径1.076 Å,电负性0.4,熔点220℃,沸点685℃。贝米利乌斯在1817年发现硒。地壳中含量稀少,氧化数为-2、+1、+2、+4和+6。能与氢、卤素和金属直接化合,但它和它们的化合物都是强抗氧化材料,在生物体内起调节氧化还原和维生素A、E、K在体内吸收的功能,但在人体内如超过5ppm时变成有害甚至致癌物质。硒在光电管中应用范围很广,如电视、光度计、信号装置和自动装置中。在不锈钢、铜和铜的合金中加0.3—0.35%硒便使加工性能得到改进。还可用作光导材料。可从重金属残渣中提取硒。

【碲】周期表中ⅥA族带有银白色金属光泽的固体非金属氧族元素,有无定形和晶体两种同素异形体,原子序数 $Z=52$,化学符号Te,原子量127.6,外围电子结构 $6s^26p^4$,密度6.25克/厘米³。原子半径1.295 Å,电负性2.1,熔点449.5℃,沸点 989.8 ± 3.8 。赖兴施泰因在1782年从含金矿石中提取碲。氧化数-2、+1、+2、+

4和+6，能直接与氢和卤素作用，但不与无氧化作用的酸和水作用。能溶于浓硫酸、浓硝酸和热碱溶液中，常温下对氧极稳定，而在强热时燃烧成 TeO 、 TeO_2 和 TeO_3 。碲和硫在 106°C 时能生成共晶体。常见的碲矿有针碲金矿和碲金矿、碲金银矿、碲铅矿和碲汞矿，但在地壳中含量只有 $1 \times 10^{-6}\%$ ，是典型的稀散元素。工业上常从铜和铅的废矿渣中提取碲。碲常被用在含金中增加延展性和耐磨能力，加进铝中可提高其制品硬度。

【钋】周期表中ⅥA族具银白色金属光泽的固体放射性金属氧族元素，有两种同素异形体，低温时为立方 α 型晶格，约 36°C 时变为菱形 β 型晶格。原子序数 $Z=84$ ，原子量208.987215，化学符号Po，从钋192到钋218，除 ${}_{84}^{210}\text{Po}$ 、 ${}_{84}^{211}\text{Po}$ 、 ${}_{84}^{212}\text{Po}$ 、 ${}_{84}^{213}\text{Po}$ 、 ${}_{84}^{214}\text{Po}$ 、 ${}_{84}^{215}\text{Po}$ 和 ${}_{84}^{218}\text{Po}$ 是天然放射性同位素，其余均是人工核反应生成的放射性同位素。外层电子结构 $7s^27p^4$ ，熔点 254°C ，沸点 962°C ，密度 9.4克/厘米^3 （ β 型钋）。居里夫妇在1898年从沥青铀矿中发现并提取了钋。地壳中含量极低，只有 $3 \times 10^{-14}\%$ ，氧化数 ± 2 、 $+4$ 和 $+6$ ，能直接与氢和碱金属作用生成化合物。在高温下可与氧生成二氧化钋、与碳生成碳化钋。钋可放出 α 射线，经常用作 α 源，钋的放射性比镭还强，也被用来消除静电及航天设备的热源。钋主要从铀矿渣中提取。

【卤族元素】周期系第七主族（ⅦA族）元素统称为卤族元素，简称卤素，包括氟、氯、溴、碘和砹三种元素，砹放射性元素。物理性质随原子序数增大而增大。除氟能与水发生化学作用外，其它卤素都难溶于水，但易溶于许多有机物而呈现特殊的颜色，如碘在酒精中是暗褐色，在苯和氯仿中为紫色，在分析化学中可用有机

溶剂把卤素从水溶液中萃取出来,用来鉴别或测定。卤素的最外层电子都是七个,因此很容易获得一个电子而成一价负离子,是非常活泼的典型非金属元素。它们外层电子结构为 ns^2np^5 ,几乎能与所有的金属和非金属作用,是很强的氧化剂。由于外层电子层结构相同,性质也彼此类似,但由于电子层增加,原子半径也增加,原子对电子的结合能随原子序数增加而减小,则氧化性也减小,而失电子的能力则增强,因而前面的卤素可以置换排列在它后面的化合物中的卤族元素,反之则不行。

【氟】 周期表中ⅦA族非常活泼的在自然界中无游离态存在的淡黄色又有刺激性臭味的气体卤族元素,原子序数 $Z=9$,原子量 18.9984,化学符号 F,外层电子结构 $2s^22p^5$,原子半径 0.709 \AA ,电负性 4.0,熔点 -219.62°C ,沸点 -118.14°C ,密度 1.69克/升。法国的安培在1812年就预言了氟的存在,但直到1886年法国化学家 H·穆瓦桑才电解无水氢氟酸中的氟化钾溶液发现氟。地壳中含量为 0.072%,含氟矿物有冰晶石、氟磷酸钙和萤石 (CaF_2),氟只有 -1 化学态,能与除氦、氖、氩以外的一切元素化合,即使在低温下也能与溴、碘、硫、磷、砷、碳、硅强烈作用,但与金属作用时必须加热,因在常温下会在金属表面形成一层保护层。氟能把氯、溴、碘从它们对应的化合物中置换出来,还能与水、氨、含氢无机物和有机为作用,为了防止氟和烃类强烈作用,常用惰性气体或氮气与其混合来缓冲它们之间反应以便于控制。氟可作为火箭燃料和制取氟化物,也是人体必需的微量元素,如缺氟会得龋齿,老人会骨质变脆;太高又使年幼者得软骨病,老人得硬骨病,氟还对内分泌和生殖腺、胰腺起抑制作用。可用电解含氟离子溶液制取氟。

【氯】周期表中ⅦA族淡黄绿色并有窒息性臭味的气体卤族元素，有两种稳定同位系，原子序数 $Z=17$ ，化学符号Cl，原子量35.4527，外层电子结构 $3s^23p^5$ ，原子半径 0.994Å ，电负性3.0，熔点 -100.98℃ ，地壳中含量0.031%，主要来源于海水。舍勒在1774年通过盐酸和二氧化锰作用获得氯。气体密度3.21克/升。氧化态-1、+1、+3、+4、+5、+6、和+7，氯是强氧化剂能从除氟、氧、氮、碳和惰性气体外的其他元素中夺取一个电子生成氯化物，也能与含氢的无机和有机物化合反应，与某些金属氧化物反应生成无水氯化物，能把溴和碘从溴化物和碘化物中置换出来。氯被大量用在化工业中，是生产塑料、橡胶、染料、溶剂等化学制品的中间体，还用作漂白剂，还用来消毒水和制造药物。动物也离不开氯，氯化钾存在于肌肉的原生质、血液的血球和分泌腺中，差不多只要有液体就有氯，它和钠、钾共同维持体液的渗透压、调节酸碱平衡，参与胃酸生成等。但也不能过量，过量会因中毒引起肺水肿。工业上可以用电解食盐方法制取氯。

【溴】周期表中ⅦA族红绿色有恶臭的液态非金属卤族元素，有两种天然同位素，原子序数 $Z=35$ ，原子量79.904，化学符号Br，外围电子结构 $4s^24p^5$ ，原子半径 1.142Å ，电负性2.8，熔点 -7.2℃ ，沸点 58.8℃ ，熔化潜热16.15卡/克，蒸发热44.25卡/克，固态密度 3.12克/厘米^3 ，三相点为 -7.3℃ 。溴的化学活性次于氟及氯，但超过碘，溴比较容易与金属作用生成化合物而放出大量热。溴在较高温下与氢化合生成溴化氢，易溶于水。只有一种氧化物 Br_3O_8 ，是臭氧与溴作用生成的。氧化数为 ± 1 、+3、+4、+5和+7。与负电性较小的非金属作用生成溴化物，与负电性较大的非金属化合

时显+氧化态。能还原某些含碘的负离子化合物。溴常被用来作消毒和漂白剂,二溴乙烯还是防爆汽油的主要成份。工业上主要用氯气通入海水来生产溴。溴是法国巴拉尔在1824年从盐湖的苦卤母液中提取出来的。

【碘】 周期表中ⅦA族深灰色略带金属光泽的结晶状的固态大非金属卤族元素,原子序数 $Z=53$,原子量126.90447,化学符号I,外层电子结构 $5s^25p^5$,原子半径 1.333 \AA ,熔点 113.5°C ,沸点 184.35°C ,但在常压下显著升华成紫色蒸汽,只有加高压时才会熔解。电负性2.5,密度 4.93克/厘米^3 (固体),比热 $0.0523\text{卡/克}\cdot^\circ\text{C}$,电阻 $163\times 10^6\text{欧姆}\cdot\text{厘米}$,氧化数 -1 、 $+1$ 、 $+3$ 、 $+5$ 和 $+7$,化学活性不如卤素中比它轻的元素,但还是很容易与金属作用生成化合物而放出大量热量,碘溶于水显弱酸性,溶于酸则生成次碘酸盐。碘也能与电负性比它小的非金属化合成共价碘化物,右与其他卤素作用生成互化物,人体内的甲状腺离不开碘,缺碘会对人的智力、心理、生长和新陈代谢产生很大影响,特别会引起甲状腺肥大症。碘也是一种氧化剂,起消毒杂菌作用,常溶于酒精配制成碘酊,用于皮肤消毒。碘的同位素 I_{131} 常用来做示踪原子和放射性治疗。要适当吃海盐和海藻类,碘过量对身体也有害,口服致死量为大于2克。碘的制取是用亚硫酸氢钠还原碘酸盐矿石中的碘。

【砹】 周期表中ⅦA族带放射性并有一系列金属特性的非金属固体卤族元素,化学符号At,原子序数 $Z=85$,同位素从 $^{202}_{85}\text{At}$ 到 $^{219}_{85}\text{At}$,除了 $^{215}_{85}\text{At}$ 、 $^{216}_{85}\text{At}$ 、 $^{218}_{85}\text{At}$ 和 $^{219}_{85}\text{At}$ 是从钷和铀演变来的,在自然界存在以外,其余都是人工生成的,因为它们寿命都很短,研

究他们的性质几乎不可能，只有人工同素 ${}_{85}^{211}\text{At}$ 较稳定，用其研究出砷的一些性质。熔点 302°C ，沸点 337°C ，外层电子结构 $6s^26p^5$ ，氧化态 -1 、 0 、 $+1$ 、 $+3$ 、 $+5$ 和 $+7$ 。它的很多性质和碘相似如室温下显著因升华而挥发，与其他卤素一样显著溶于四氯化碳和苯，注入动物体内也主要集中在甲状腺中，砷溶于水也成弱酸。地壳中砷含量极低，只有 $4 \times 10^{-23}\%$ 。

【零族元素】无色、无味、无臭非常稳定的单原子气体元素，除了氦的电子只有一层两个电子外，其余最外层电子结构可以表达为 ns^2np^6 ，它们的化学性能都不活泼，又称惰性气体，它们有氦、氖、氩、氪、氙、氡，其中氡是放射性气体，氦和氡只有氟化物，氖有些化合物，氦、氖、氩还没有任何化合物。它们在地壳和大气中含量又非常稀少又被叫做稀有气体。它们的分子半径、溶解度、熔点都随原子序数增加而增加，氡只能25个大气压下在接近 0°K 时才凝固，其余的也只有在极低温度下才能凝固。

【氦】周期表中第一周期的无色、无味、无臭的单原子气体零族元素，原子序数 $Z=2$ ，化学符号 He ，有两种天然同位素 ${}^3_2\text{He}$ 和 ${}^4_2\text{He}$ 。美国的拉姆齐在1890年证实太阳光谱中有氦。原子量4.0026，外围电子结构 $1s^2$ ，因它填满了第一层的两个电子所以半径只有 1.22 \AA ，在零族元素中最小，化学性质也最稳定，目前还没有发现氦与任何其他元素发生作用。它在空气中含量为 0.0005% ，25个大气压下物理指标为：熔点 -272.3°C 。沸点 -268.9°C 、气体密度 0.1785 克/升 、水中溶解度 $8.61 \text{ 厘米}^3/1000 \text{ 克水}$ 。氦可代替氢制作防爆气球，也可用来保护贵重金属的熔炼，工业上氦可以从空气合成氨的尾气中再经冷却来分馏回收。

【氖】周期表中第二周期无色、无味、无臭的单原子气体零族元素，原子序数 $Z=10$ ，化学符号 Ne，有三种同位素： ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ 、 ${}^{21}_{10}\text{Ne}$ 和 ${}^{22}_{10}\text{Ne}$ ，自然界中主要是 ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ ，在氖的含量中占91%，气体密度0.9002克/升，原子半径1.6 Å，外围电子结构 $2s^2 2p^6$ ，只能与极少量的元素生成化合物，在氖气中放电时会发出橘虹色的辉光，常被充在霓虹灯中，高能 and 核物理的不少气体探测器也用一定比例氖气。

【氩】周期表中第三周期无色、无味、无臭的单原子零族元素，原子序数 $Z=18$ ，化学符号 Ar，有三种同位素 ${}^{36}_{18}\text{Ar}$ 、 ${}^{38}_{18}\text{Ar}$ 和 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ，自然界中主要是 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ，占氩气总量的99.6%，外围电子结构 $3s^2 3p^6$ ，在大气中含量0.94%。英国的瑞利和拉姆在1894年发现氩。气体密度1.784克/升，原子半径1.928 Å，是高能物理和核物理的气体探测器中用得最多的气体，它在空气中含量在惰性气体中最高，所以工业上也最喜欢用它作保护气体。

【氙】周期表中第四周期无色、无味、无臭的单原子气体零族元素，原子序数 $Z=36$ ，原子半径1.98 Å，原子量83.80，化学符号 Kr，有六种稳定同位素，含量为 $1.14 \times 10^{-4}\%$ 。美国的拉姆齐和特拉弗斯在1898年发现氙，熔点 -156.6°C ，沸点 -152.3°C ，气体密度3.736克/升，外围电子结构 $4s^2 4p^6$ ，化学性质很稳定，在室温下至今还没发现有化学反应和化合物，氧化数为+2和+4，氙和其它惰性气体一样可充进灯泡提高灯的效率和寿命，工业上氙只能从液化空气中提取。

【氙】周期表中第五周期无色、无味、无臭的零族元素，原子序数

$Z=54$ ，原子半径 2.18Å ，原子量 131.29 ，化学符号 Xe，有9种稳定同位素 ${}_{54}^{124}\text{Xe}$ 、 ${}_{54}^{126}\text{Xe}$ 、 ${}_{54}^{128-134}\text{Xe}$ 和 ${}_{54}^{136}\text{Xe}$ ，主要在地球周围的空气中，含量为 $0.086\times 10^{-4}\%$ ，美国的拉姆齐和特拉弗斯在1898年发现氙。熔点 -111.9℃ ，沸点 -107.1℃ ，气体密度与核的结合能变弱，所以出现高价化合物，氧化数为+2、+4、+6和+8，是零族元素中唯一能在室温下起化学反应的元素，氙大量被用来制做霓虹灯。工业上也只能从液化空气中提取。

【氡】周期表中第六周期无色、无味、无臭的单原子气体零族元素，原子序数 $Z=86$ ，原子量 222.1899 ，化学符号 Rn，有八种同位素 ${}_{86}^{199-226}\text{Rn}$ ，其中 ${}_{86}^{219}\text{Rn}$ 、 ${}_{86}^{220}\text{Rn}$ 、 ${}_{81}^{221}\text{Rn}$ 和 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 是天然放射性同位素，其余的都是人工核反应生成放射性同位素，熔点 -71℃ ，沸点 -61.8℃ ，气体密度 9.73克/升 ，原子半径 1.82Å ，外围电子结构 $6s^26p_6$ ，氧化数+2和+4，氡比氙以外的其他惰性气体稳定性差些，表现在较易溶于水、煤油、甲苯、二硫化碳等，又容易被一些吸附剂吸附，还可形成某些络合物和氟化氡。氡主要是铀、钍、镭衰变来的，所以地球大气、土壤、海水和矿泉水中都含有氡，化学性质比氙稳定的原因是镧系压缩使氡的原子半径比氙略小。玛·居里在1899年发现镭化物周围空气是电流的导体，卢瑟福和顾恩斯在1900年发现钍能放出放射性气体氡。氡可用来制备人工氡浴治疗风湿病、脊神经根炎等病，也可用来检验管道泄漏。一定要小心氡气中毒。

【过渡元素】又称副族元素或 B 元素，严格定义是指原子电子的次外层结构中的 d 轨道或 f 轨道仅被电子部分填充的元素，它们在周期表中为从第ⅢB族起至第ⅧB为止的65个元素；而主族元素

只44个,但通常也把 I B 和 II B 的元素也包括进过渡元素,因为它们的化学性质与过渡元素十分相似,过渡元素的外层和次外层的最高电子轨道上的电子层结构可统一表达为 $(n-2)f^{0-14}(n-1)d^{1-10}ns^{1-2}$, 由此构成了过渡元素的共同特性。1. 过渡元素都是金属,最外层电子数只是1—2, 较容易失去,而次外层的 d 轨道电子数从1增加到10,但它们的影响没有最外层的大,所以对元素性质影响不大,使这些元素的金属性变化不大明显,所以它们都是密度大、硬度大、熔点和沸点高、导电和导热性能良好,化学性质也很接近。2. 具有可变的氧化数,这是因为除了外层 s 轨道电子能参加反应外,次外层 d 轨道电子也可参加反应。3. 多数过渡元素的水合离子具有颜色,这和 d 轨道具有未成对电子有关。4. 过渡元素容易形成络合物,这是因为它们的离子一般具有电荷高、半径小、有较大的极化能力,更重要析是其离子具有未充满的 d 轨道,由此产生配体场效应。

【铜】周期表中 I B 族具有淡红色金属光泽的固体金属过渡元素,原子序数 $Z=29$,化学符号 Cu,有两种同位素 $^{63}_{29}\text{Cu}$ 和 $^{65}_{29}\text{Cu}$,原子量 63.546,熔点 1083.4°C ,沸点 2567°C ,密度 8.92克/厘米^3 ,外围电子结构 $3d^{10}4s^1$,常见氧化数+1、+2和+3,这是因为铜除能失去最外层 s 轨道上一个电子外次层上 d 轨道上电子刚满10个也容易丢失掉1—2个。但 Cu^+ 在水溶液中不稳定,会发生歧化反应变成 Cu 和 Cu^{2+} ,铜不与干燥氧气和水反应,但因 CO_2 的存在。铜会在湿空气中表面生成一层铜锈,在空气中加热也会生成黑色的氧化铜。在常温下铜能与卤素作用生成卤化铜,也能同多种金属形成合金,如黄铜为铜锌合金、青铜为铜锡或铜铝合金、白铜为铜、钴、镍合金。铜的质地坚硬,延展性好,导电导热性强,电阻率为1.673

$\times 10^{-6}$ 欧·厘米，常被用来做导线和印刷线路板底板，铜的合金还被用来做颜料、杀虫剂和化工中的催化剂。土壤中也离不开铜，否则植物叶尖变白大量减产。铜对生物系起一种特殊的催化作用，缺铜会影响新陈代谢和血液的生长，甚至引起食欲不振和心脏病。铜在地壳中分布极广，含量在元素中占第22位。在5000年前埃及就会使用自然铜，3500年前会制造青铜，所以铜一直是人类生活用品和武器中不可缺少的金属。工业上制铜可用碳还原法、电解还原法和冰铜熔炼法等。

【银】周期表中 I B 族有白色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=47$ ，化学符号 Ag，有两种同位素 $^{107}_{47}\text{Ag}$ 和 $^{109}_{47}\text{Ag}$ ，原子量 107.87，熔点 961.9°C ，沸点 2212°C ，外围电子结构 $4d^{10}5s^1$ ，氧化数 +1、+2 和 +3，银比铜软而比金硬，导电和导热性能都在金属中占第一位。银能与铜、金、锌、铅、镉等金属形成合金。银不如铜活泼，在空气中不与氧作用，但常温下能与硫化氢、硫、卤素化合、加热时能与臭氧、氯化氢等气体反应，银不能与稀盐酸、稀硫酸和强碱反应，但能溶于有空气的氰化钾溶液。自然银直接存在于自然界，所以5000—6000年前埃及人就会使用银。银及其化合物在地壳中含量占有所有元素中的第63位，也属贵金属，常用其制作货币、首饰。银离子是很好的消毒剂，常被用在医药上，卤化银有感光性，被用于照相技术。

【金】周期表中 I B 族有深黄色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=79$ ，化学符呈 Au，原子量 196.9665，外围电子结构 $5d^{10}6s^1$ ，熔点 1064.6°C ，沸点 3080°C ，密度 18.88克/厘米^3 。金在地球上分布很广，而且有零散的金粒，所以古代就被人类发现利用，但

地壳中含量很低，是一种贵金属，氧化数+1和+3，化学稳定性非常高，在任何温度下不与氧、硫、酸、碱发生反应，只有王水能溶解金，也能溶于汞，生成的汞齐，氯水与金也有反应生成化合物。金的延展性特别好，能与大多数金属生成合金，导电和导热性能好。又经久耐摩，重要电路板特别是接口常被镀上一层金以增加抗摩耐腐蚀能力。金也是一种贵重材料，常被用于各种装饰材料。黄金简单制取是沙里淘金。

【锌】周期表中ⅡB族有蓝白色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=30$ ，原子量65.39，化学符号Zn，已发现15种同位素，其中 ${}_{30}^{64}\text{Zn}$ 、 ${}_{30}^{66}\text{Zn}$ 、 ${}_{30}^{67}\text{Zn}$ 、 ${}_{30}^{68}\text{Zn}$ 和 ${}_{30}^{70}\text{Zn}$ 是稳定同位素，地壳中含量0.01%，熔点419.58℃，沸点907℃，密度7.14克/厘米³，印度在13世纪冶炼出纯锌，中国在15世纪制出锌币。纯锌有延展性，混进杂质就变脆，外围电子结构 $3d^{10}4s^2$ ，它的 d^{10} 电子已趋向稳定，只能失去最外层一对电子，所以氧化数为+2。锌能在空气中燃烧生成白色的ZnO。几乎不溶于水但容易溶于酸生成锌盐。锌盐加入NaOH溶液能生成两性的 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 。锌的化合物对动物心理过程起着重要作用，也能促进蛋白质氧化并影响生长素形成，通常一个成年人每天需要10—15毫克锌，眼睛的视觉部分含锌可高于4%，精液中含锌高于0.2%，动物缺锌会生长不良、脱毛消瘦等症。工业上锌主要用于生产合金和做其他金属保护层，也用来做许多化学过程的催化剂和还原剂，放射性的 ${}_{30}^{65}\text{Zn}$ 在医学上用来了解锌的代谢过程。工业上用电解法和与碳一起焙烧法制取锌。

【镉】周期表中ⅡB族有银白色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=48$ ，原子量112.411，化学符号Cd，自然界有八种同位

素 $^{106}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{108}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{110}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{111}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{112}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{113}_{48}\text{Cd}$ 、 $^{114}_{48}\text{Cd}$ 和 $^{116}_{48}\text{Cd}$ ，熔点 820.9°C ，沸点 765°C ，相对密度8.624，外围电子结构 $4d^{10}5s^2$ ，因d轨道上10个电子很稳定，反应时只会丢失5s上1到两个电子，所以氧化数为+1和+2。在空气中燃烧生成棕色 CdO_2 不溶于水，但易溶于酸生成镉盐。镉盐加入 NaOH 溶液生成白色的氢氧化镉沉淀，呈弱碱性，不溶于过量碱液。 Cd^{2+} 容易生成络合物。与卤素在高温下才能反应生成卤化镉，可与硫直接反应生成 CdS 。镉在干燥空气中不起任何反应，但在湿空气中表面会生一层氧化膜保护层，因而镉大部分被用来作电镀材料，保护金属表面不生锈。施特罗迈尔和赫尔曼在1817年几乎同时分别从硫酸锌矿和含砷的氧化锌矿中发现镉。它在地壳中含量很稀少。工业上也常用镉的硫化物做颜料，用金属镉做电池，也被做成镉棒在反应堆中吸收中子。镉对人类是剧毒元素，中毒后会引起极痛苦的“骨痛病”使全身痛，脊椎骨畸形并易碎。在肾脏中多了是高血压的重要原因，还会干扰体内的含锌量影响代谢过程。

【汞】周期表中ⅡB族有银白色金属光泽的液体金属过渡元素，原子序数 $Z=80$ ，原子量200.59，化学符号 Hg ，有七种同位素 $^{196}_{80}\text{Hg}$ 、 $^{198}_{80}\text{Hg}$ 、 $^{199}_{80}\text{Hg}$ 、 $^{200}_{80}\text{Hg}$ 、 $^{201}_{80}\text{Hg}$ 、 $^{202}_{80}\text{Hg}$ 和 $^{204}_{80}\text{Hg}$ ，相对密度13.59，熔点 -38.87°C ，沸点 356.58°C ，外围电子结构 $5d^{10}6s^2$ ，氧化数+1、+2。因为6s上两个电子可丢失一个成汞化合物，也可丢失两个成高价汞化合物。汞是常温下唯一液态金属，能够与其他金属形成合金汞齐。 HgS 是金属硫化物中溶解度最小的，仅溶于王水，可溶性汞盐有 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ，很容易水解。氯化汞是剧毒的，因为 Hg^{2+} 对蛋白质有很强的亲合力，对肾脏组织损害特别厉害，它使血液失去排除废物的能力，汞中毒还会引起古怪的神经症状甚至死亡。所以

如汞落到地面一定要小心收集起来。汞和汞的化合物可用来制红色颜料，强紫外线灯泡、反射镜等。还可用来做流动汞电极。汞在地壳中含量很低，但在火山或温泉附近会有汞的液滴，所以中国和古埃及公元前就认识汞。

【钛】周期表中ⅣB族有银灰色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=22$ ，化学符号 Ti，有两种同素异形晶体及5种同位素， ${}^{46}_{22}\text{Ti}$ 、 ${}^{47}_{22}\text{Ti}$ 、 ${}^{48}_{22}\text{Ti}$ 、 ${}^{49}_{22}\text{Ti}$ 和 ${}^{50}_{22}\text{Ti}$ ，在地壳中含量0.6%，占元素在地球中丰度的第六位。美国化学家格雷哥尔在1791年在钛铁矿中发现氧化钛。熔点 1660°C ，沸点 3287°C ，密度 4.5克/厘米^3 ，外围电子结构 $3d^24s^2$ ，在化学反应中外围4个电子都容易丢失，则氧化数为+2、+3、+4，常温下，暴露在空气中的表面层会氧化成一层氧化物保护膜，钛不与王水、硝酸及其他稀酸稀碱作用，在高温下能与大多数非金属化合和让水蒸汽分解，+4价钛化合物最稳定，+2和+3价钛的化合物容易被氧化成+4价。钛能与大多数金属形成合金。钛是软而轻的有延展性的金属，又抗腐蚀，大量用在机器零件，制水泵、阀门、过滤装置的合金中，特别是空运和军事装备更离不开钛。工业制取钛是用硫的氯气把钛矿先生成四氯化钛再放到氩气中用钠或镁高温下还原成纯钛。

【锆】周期表中ⅣB族有银灰色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=40$ ，原子量91.224，化学符号 Zr，有五种稳定同位素 ${}^{90}_{48}\text{Zr}$ 、 ${}^{91}_{48}\text{Zr}$ 、 ${}^{92}_{48}\text{Zr}$ 、 ${}^{94}_{48}\text{Zr}$ 和 ${}^{95}_{48}\text{Zr}$ 和两种同素异形体。熔点 1852°C ，沸点 4377°C ，密度 6.49克/厘米^3 ，外围电子结构 $4d^25s^2$ ，因在化合时这四个电子都会分别丢失，则氧化数为+2、+3和+4，常温下锆在空气中比较稳定，只有在高温下才能与氧、氯、氢化合。锆与氧有较

强的亲合力,能夺取氧化镁和氧化铍中的氧。工业上常用锆制造防弹合金钢。德国化学家克拉普罗特在1789年从锆矿石中发现锆的氧化物,在地壳中含量为0.025%。

【铪】周期表中ⅣB族有银白色金属光泽的固体金属过渡元素,原子序数 $Z=72$,原子量178.49,化学符号Hf,有六种天然同位素 $^{174}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{176}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{177}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{178}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{179}_{72}\text{Hf}$ 和 $^{180}_{72}\text{Hf}$ 和两种同素异形晶体,在地壳中含量很少,熔点 222°C ,沸点 4602°C ,密度 13.31克/厘米^3 ,外围电子结构 $5d^26s^2$,在化合时容易丢失2—4个电子,所以氧化数为+2、+3和+4,化学性质不活泼,只有在高温下才能与氧、氯等气体化合。铪的抗腐蚀能力强,除氢氟酸外不与酸、碱和水作用,主要化合物是+4价如 HfO_2 ,因铪有中子吸收能力生成同位素,又有抗腐蚀能力,是核电站、核反应堆等原子能工业中的必不可少材料。瑞典化学家赫维西和荷兰物理学家斯特在1923年从锆石中发现铪,工业上常用镁还原四氯化铪制取纯铪。

【镎】周期表中ⅣB族中固体过渡元素。是人工合成的放射性同位素,原子量261.1069,原子序数 $Z=91$,化学符号Np,外围电子结构 $5f^46s^2$,弗廖罗夫在1940年核反应中得。又称镎,代号Unq。其余知道还少。

【钒】周期表中ⅤB族有淡灰色金属光泽的固体金属过渡元素,原子序数 $Z=23$,原子量50.9415,化学符号V,有两种自然稳定同位素 $^{50}_{23}\text{V}$ 和 $^{51}_{23}\text{V}$ 。在地壳中含量0.03%,在元素中占第22位。西班牙矿物学家里奥在1801年从钒铅矿中发现。熔点 1890°C ,沸点 3380°C ,密度 5.96克/厘米^3 ,外围电子结构 $3d^34s^2$,5个电子都有成

键作用，所以主要氧化数为+5，但也存在+2、+3和+4，特殊情况下还出现±1氧化数，不同氧化态的钒化合物酸碱性不同，如VO呈碱性， V_2O_3 呈碱性（带弱酸性）， VO_2 两性、 V_2O_5 酸性（带弱碱性），不同氧化态的化合物颜色不同： V^{2+} 深绿色， $KV(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 绿色， VO^{2+} 蓝色， V_2O_5 橙红色。钒能降低胆固醇，工业上常用作催化剂。合金钢制作铁轨、弹簧钢、装甲钢、结构钢都被广泛应用。但钒中毒会引起中枢神经失常，工业上可用酸、碱、氧化三种方法从其矿石中制取钒。

【铌】周期表中V B族灰白色具金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=41$ ，原子量92.906，化学符号Nb，地壳中含量0.002%。美国化学家洽切特在1801年从铌矿石中发现铌的氧化物。铌的熔点为 2468°C ，沸点为 4742°C ，密度为8.57克/厘米³。外围电子结构 $4d^{15}s^1$ ，化合时容易丢失这些外围电子，则氧化数为+2、+3、+4、+5有时还能得到一个电子，存在-1氧化数，铌的化学活性稳定，在空气中加热，表面才被氧化失去光泽，但高温下容易与硫、氮、碳化合形成对应化合物。常温下也不与水氢氟酸外一切稀酸碱反应，只缓慢溶于氢氟酸，高温下能溶于浓硫酸和浓碱。工业上铌的合金用处很多，如提高钢在高温中的抗氧化性和焊接性能，还被用于耐高温金属陶瓷。通常用酸、碱两种方法在工业上制取铌。

【钽】周期表中V B族有黑色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=73$ ，原子量180.9479，化学符号Ta，有两种天然同位素 $^{180}_{73}\text{Ta}$ 、 $^{181}_{73}\text{Ta}$ 。地壳中含量稀少。瑞典化学家厄克贝在1802年从钽铁矿石中发现钽。熔点 2996°C ，沸点 5416°C ，密度16.6克/厘米³，外围电子结构 $5d^36s^2$ ，与其他元素化合时容易丢失这些电子，氧化数为

+2、+3、+4、+5，少数情况下还能得到一个电子，所以存在-1氧化数。常温下不与氧和水作用，但能溶于氢氟酸，浓硫酸、浓磷酸和浓碱中，高温下能与硫、氯、碳等元素直接化合生成相应化合物。钽因不被人体排斥而有一特殊用处，即制造假肢和修复断骨的金属配件被埋在人体内。也常被用在化工的耐酸碱设备中。

【】弗廖罗夫在1968年用人工核反产生的周期表中ⅤB族固体放射性金属过渡元素，原子序数 $Z=105$ ，原子量262.14，化学符号Ns，外围电子结构 $6d^37s^2$ 。亦名 ，化学符号Ha。通用符号Unp。其物理化学性知道还比较少。

【铬】周期表中ⅤB族有钢灰色金属光泽的固体金属过渡元素，有多晶和单晶两种同素异形晶体。原子序数 $Z=24$ ，原子量51.996，化学符号Cr，天然同位素有四种 $^{50}_{24}\text{Cr}$ 、 $^{53}_{24}\text{Cr}$ 、 $^{54}_{24}\text{Cr}$ 和 $^{55}_{24}\text{Cr}$ 。地壳中含量0.01%。法国化学家沃克兰在1797年从铬铅矿石中提炼出铬。外围电子结构 $3d^54s^1$ ，反应中既能丢失1到6个电子，又能获得1到3个电子，所以氧化数为0、±1、±2、±3、+4、+5和+6，熔点 1875°C ，沸点 2672°C ，密度单晶为7.22克/厘米³。铬的还原能力强，能溶于硫酸、盐酸和高氯酸而放出氢气，但纯铬连王水也不起作用，当有卤素离子存在时，在酸中不能长期稳定，高温时能与强碱、硫化氢、硫蒸汽、磷、氨、一氧化碳和水蒸汽等反应生成对应的化合物，在高温下还能与硅反应成硅化铬，铬能与许多金属生成合金广泛在工业上应用，如铬锰不锈钢大量用于化工设备。铬酸钠和铬酸钾是有机合成和石油化工工业中的强氧化剂。铬对人和动物的糖和脂肪代谢有重要作用，特别是正常胆固醇代谢起保证作用，缺铬会得动脉粥样硬化等症，主要靠红糖、谷类、小米、萝卜、大

豆给人体提供铬。但六价铬对身体有害。工业上用化学还原法，电解法和热分解法生产铬。

【钼】周期表中ⅥB族有银白色金属光泽的固体金属过渡元素，如是粉末状结构则为黑色。原子序数 $Z=42$ ，原子量95.94，化学符号Mo，有七种稳定的自然同位素 $^{92}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{94}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{95}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{96}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{97}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{98}_{42}\text{Mo}$ 和 $^{100}_{42}\text{Mo}$ 。瑞士化学家耶尔姆在1782年从辉钼矿石中分离出Mo。在地壳中含量占元素中第52位，密度10.2克/厘米³，熔点2610℃，沸点5560℃，外围电子结构 $4d^5s^1$ ，反应时1—6个外围电子容易丢失，也能捕获1—3个电子，所以氧化数为0、±1、±2、±3、+4、+5和+6，最主要最稳定的是+6价化合物。在室温下不与水和空气起作用，但高温下能与氧、氮和氯反应，表面生成一层薄的保护层。与氟能在室温下反应，在几百度时与氯、溴、碘化合，800℃以上能与硫、磷、碳、硒、碲和硅等元素反应， MoO_3 不溶于水，仅能溶解在碱性溶液中生成钼酸盐。它的氧化性也极弱，这表明+6价化合物趋向稳定。钼酸盐以 Na_2MoO_4 及 $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 最重要。酸化钼酸盐时随溶液pH值不同可形成多种组成复杂的多酸和多酸根，如实验室常用的试剂就是七钼酸铵 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 。钼是参与嘌呤类到尿酸代谢中的一种酶的成份，固氮酶由铁蛋白、钼铁蛋白组成，它们是自然界固氮催化过程中起决定作用的成份，如果没有它们来转变空气中的氮和水中的氢及其衍生物使植物获得氮肥，一切生物的生长就要停止，所以钼对生物的生长是关键元素之一。工业上把钼加入合金钢可提高钢材强度、韧性和抗腐蚀能力。钼也常被用于电器和电子工业。工业上经常用辉钼矿石焙烧除硫后的三氧化钼再在高温下用氢还原成纯钼。

【钨】周期表中ⅥB族银白色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=74$ ，原子量183.85，化学符号W，有五种自然稳定同位素， ${}_{74}^{181}\text{W}$ 、 ${}_{74}^{182}\text{W}$ 、 ${}_{74}^{183}\text{W}$ 、 ${}_{74}^{184}\text{W}$ 、 ${}_{74}^{185}\text{W}$ 和八种放射性同位素。瑞典化学家舍勒在1781年从白钨矿石中分析出钨。地壳中含量很稀少，在元素中占第54位，中国是主要产区，占世界储量一半以上。熔点 3410°C ，沸点 5600°C ，相对密度19.35，外围电子结构为 $5d^46s^2$ ，在化学反应时很容易丢掉1—6个电子，也能得到1—2个电子，所以氧化数为0、 ± 1 、 ± 2 、+3、+4、+5和+6，以+6价化合物最稳定，如 WO_3 不溶于水，空气中的钨会形成薄层三氧化钨保护层，钨能与氟在室温下化合，红热并无潮气时能与溴、碘化合，红热时还能和水反应生成 WO_3 ，室温下钨可与王水反应，但热的浓盐酸和硫酸只能与其起微弱反应，但对熔融的硝酸盐、亚硝酸盐、过氧化氢、硫蒸汽、磷蒸汽等能起激烈反应，高温下不能与碳、硼和硅反应生成二元化合物，工业上广泛使用钨钢和碳化钨，纯钨用来制灯丝、电子管和X射线管的发热元件，硅化钨可制半导体元件，钨工业生产是将白钨矿石或黑钨矿石精炼。

【Unh】弗廖罗夫在1974年用人工核反应合成的周期表中ⅥB族金属过渡元素中的新元素，还没有中文名字。它的原子序数 $Z=106$ ，原子量263.1166，外围电子结构 $6d^47s^2$ ，其它知道很少。

【锰】元素周期表中ⅥB族钢灰色有金属光泽的固体金属过渡元素。原子序数 $Z=25$ ，原子量54.938，化学符号为Mn，只有一种稳定同位素，放射性的寿命很短，有三种同素异形体 α 、 β 、 γ 。瑞典化学家舍勒在1774年发现锰，在地壳中含量为0.085%，熔点为 1244°C ，沸点 1963°C ，密度7.2克/厘米³，外围电子结构 $3d^54s^2$ ，化

学反应时1—7个电子都可丢失，有时还能捕获1—3个电子，所以氧化数为0、 ± 1 、 ± 2 、 ± 3 、+4、+5、+6和+7，其中以+2价和+7价较稳定，如+2价锰盐不溶于水，+4价锰盐则能迅速水解，锰在空气中易被氧化，在空气中燃烧生成 Mn_3O_4 ，加热的锰能与氟、氯、溴、硫作用，熔融锰能溶解碳生成 Mn_3C ，锰盐大都呈红色晶体，易溶于水，在酸性液中稳定，但与碱作用生成不稳定的氢氧化亚锰白色沉淀，高锰酸钾只在碱性介质中稳定，在中性和酸性溶液中生成紫色高锰酸根和二氧化锰沉淀，医药上常用高锰酸钾来消毒。锰参加植物的光合作用，对生物氧化还原影响很大，是生物体必需元素之一。锰和铁的合金用处很广，还可以和其他金属生成非铁合金提供工业使用，人体如缺锰，癌病发病率和死亡率都升高，但锰中毒会引起肺硬化或心血管异常。

【钨】元素周期表ⅥB族银灰色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=43$ ，原子量98.1939，化学符号 Tc，有21种放射性同位素 ${}_{43}^{90-110}\text{Tc}$ ，很有趣的是首先发现钨的意大利佩列尔和美国的塞格雷在1937年用氘轰击钼时生成了钨，成为第一个人造元素。其中 ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ 的密度为11.487克/厘米³，熔点2200℃，沸点4973℃，外围电子结构 $4d^5s^2$ ，化学反应时1—7个电子会丢失，所以氧化数为0、+1、+2、+3、+4、+5、+6和+7，较稳定的氧化态为+4价和+7价，低氧化态主要存在于络合物或电还原过程中，钨在低氧化态时与锰很相似，而高氧化态时与铼很相似。钨在氧气中能燃烧。加热时能与氟、氯反应，在潮湿空气中慢慢失去光泽，但在干燥空气中不发生变化，不与盐酸作用，能与硝酸、浓硫酸、王水、溴水、中性或碱性过氧化氢溶液作用。钨都是放射性同位素，寿命最长的是 ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ 和 ${}_{43}^{98}\text{Tc}$ 。半衰期分别为 2.12×10^5 年和 1.5×10^6 年，自然

界中的锝只能来自铀的自发裂变过程，所以地壳中含量极低，只能在铀矿中才能找到微量锝。一公斤铀含 5×10^{-10} 克 $^{99}_{43}\text{Tc}$ ，核医学上最常用的 $^{99}_{43}\text{Tc}^m$ 的 $T_{1/2}=6.0$ 小时，它来自中子轰击钼。锝可以从照射过的钼化合物或铀裂变产物中提取。由于锝抗腐蚀并中子俘获截面小，所以是反应堆防腐层及核反应控制的理想材料。

【铼】元素周期表中ⅦB族银白色的块状或灰黑色粉末状固体金属过渡元素，原子序数 $Z=35$ ，原子量186.207，化学符号Re，天然同位素有两种，稳定的 $^{185}_{75}\text{Re}$ 和放射性的 $^{187}_{75}\text{Re}$ 。地壳中含量很低，熔点 3180°C ，沸点 5627°C ，相对密度20.53，外围电子结构 $5d^56s^2$ ，反应时会丢失1—7个电子，也可捕获一个电子，所以氧化数为0、±1、+2、+3、+4、+5、+6和+7，铼能与卤素中的氟、氯、溴反应生成溶于水的卤化物，能溶于硝酸和含氨过氧化氢等溶液，但不溶于盐酸。铼的氧化物有多种，其中七价的溶于水，六价的稳定不溶于水、铼可制高温热电偶。

【Uns】元素周期表中ⅦB族固体金属过渡元素。是1975年弗廖罗夫用人工核反应生成的。原子序数 $Z=107$ ，原子量262.1231，外围电子结构 $6d^57s^2$ ，经 α 衰变转化为 $Z=105$ 的锡，其它知道很，还没有中文名。

【铁】周期表中Ⅷ族有银白色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=26$ ，原子量55.847，化学符号Fe，有一种稳定同位素 $^{56}_{26}\text{Fe}$ 和一种放射性同位素 $^{55}_{26}\text{Fe}$ ，地壳中含量5%，占元素中第四位、金属中第二位熔点 1535°C ，沸点 2750°C ，相对密度7.86，外围电子结构 $3d^64s^2$ ，化学反应时易丢失2—6个电子，氧化数为0、+2、+

3、+4、+5和+6、化学性质很活泼的金属元素，在潮湿空气中能与氧化合，也能直接与硫、磷、硅、碳化合。溶于热硝酸，加热时能与氯剧烈反应、铁是强还原剂，能从溶液中还原金、银、锡、铂、铜、汞、铋、镍等离子。氧化物有氧化亚铁、氧化铁，四氧化三铁，在亚铁盐中加水可得到白色氢氧化铁，亚铁强酸盐和铁强酸盐一般都溶于水，由于 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的水解作用使溶液呈碱性， Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 都能生成络合物。生物体中有很多铁的化合物，血红蛋白中的铁具有固定氧和输送氧的作用，所以铁是动物呼吸和体内氧化还原过程催化剂，铁也是植物生成叶绿素的必要元素，所以生物都离不开铁。工业上铁可用氧化法和电解法从铁矿中制取。铁主要用来制铸铁和炼钢，被用在各种机械工业中、纯铁常用作电磁铁心。

【钌】周期表中Ⅷ族银白色具金属光泽的固体金属过渡元素，又是铂系元素之一，原子序数 $Z=44$ ，原子量101.07，化学符号 Ru。有7种稳定同位素： ${}_{44}^{96}\text{Ru}$ 、 ${}_{44}^{98}\text{Ru}$ 、 ${}_{44}^{99}\text{Ru}$ 、 ${}_{44}^{100}\text{Ru}$ 、 ${}_{44}^{101}\text{Ru}$ 、 ${}_{44}^{103}\text{Ru}$ 和 ${}_{44}^{104}\text{Ru}$ 。地壳中含量很稀少，俄国化学家奥赞在1827年从铂矿石中发现了钌。熔点2310℃，沸点3900℃，相对密度12.3，外围电子结构 $4d_75s^1$ ，化学反应时有1—8个电子会丢失，所以氧化数为+1至+8，化学性质稳定。与干湿空气都不起作用，不溶于酸，甚至王水都不溶，仅溶于熔融的强碱、地氧化钠和碳酸盐等。高温下能与氧、氟、氯、溴产生化学反应，钌能与多种金属形成耐腐蚀、耐磨的材料。钌钼合金还是一种超导材料，钌主要是在提取铂时得到的副产品。

【钨】元素周期表中Ⅷ族灰蓝色的块状固体金属过渡元素，又是铂

系元素之一，原子序数 $Z=76$ ，原子量 190.2，化学符号 Os，有七种稳定同位素 ${}_{76}^{184}\text{Os}$ 、 ${}_{76}^{186}\text{Os}$ 、 ${}_{76}^{187}\text{Os}$ 、 ${}_{76}^{188}\text{Os}$ 、 ${}_{76}^{189}\text{Os}$ 、 ${}_{76}^{190}\text{Os}$ 和 ${}_{76}^{192}\text{Os}$ 。地壳中含量很稀少。英国化学家坦南特在 1803 年从铂溶于王水的残渣中发现锇。锇熔点 2700°C ，沸点 5300°C ，相对密度 22.48，外围电子结构 $5d^66s^2$ ，化学反应时易丢失 2—6 个电子，有时丢掉 8 个电子，所以氧化数为 +2、+3、+4、+5、+6 和 +8，化学性质稳定，在干空气、湿空气、酸和王水中都不起作用，只有在加热或高温下才能与氟、氯、强碱、空气等起作用，也可在碱性氧化溶液中氧化，也可与多种金属形成合金来制造耐腐蚀、耐磨的元器件。

【Hs】元素周期表中 VIII 族固体金属过渡元素。是人工核反应生成的新元素，原子序数 $Z=108$ ，原子量 265.1306，外围电子结构 $6d^67s^2$ ，化学符号 Un₀。其它性质还不清楚，也没有中文译名。

【钴】周期表中 VIII 族银灰色金属光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=27$ ，原子量 58.9332，化学符号 Co，有一种稳定同位素 ${}_{27}^{59}\text{Co}$ 和一种放射同位素 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 。地壳中含量 0.0023%，在元素中占第 34 位，瑞典的 G·布兰特在 1735 年分离出钴。钴的熔点 1495°C ，沸点 2870°C ，相对密度 8.9，外围电子结构 $3d^74s^2$ ，反应时易丢失 1—4 个电子，氧化数为 0、+1、+2、3+ 和 +4，钴化学性质稳定，通常不与空气和水作用，加热后可在空气中燃烧成氧化钴，也能在加热时与硫、氯、溴反应。钴能溶于稀盐酸、硫酸和硝酸。钴的重要化合物有粉红色的水合钴离子 $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ 和红色晶体 $\text{CoHL}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，加热时失水后呈深蓝色无水盐。二氧化钴常用作干燥剂， Co^{3+} 不稳定。具有强氧化性，钴是血液中的血红素和血纤维蛋白的组成部分。钴能促进红血球生长和肌肉蛋白质的合成，维生素

B^{12} 中含钴4.5%，人体缺钴会引起贫血、口味不好、妇女还会引起乳汁停止分泌。但钴中毒也会引起多种疾病。工业上把80%钴用来制造合金， C_0^{60} 是核物理、原子物理、高能物理、核医学常用的放射源，也用来作机械、轴承等关键部件的内部裂缝探伤。

【铑】周期表中Ⅷ族具银白色金属光泽的固体金属过渡元素，也是铂系元素之一，原子序数 $Z=45$ ，原子量102.9055，化学符号 Rh 。地壳中含量很稀少。英国化学家渥拉斯顿在1803年从铂溶于王水的残渣中分离出铑。熔点1966℃，沸点3727℃，相对密度12.4，外围电子结构 $4d^75s^1$ ，化学反应时易丢失1—4个电子，所以氧化数为0、±1、+2、+3和+4。铑化学性质很稳定，常温下不与干、湿空气作用。加热时表面才能形成一层二氧化铑保护层，与钠、钾、金银，汞熔融时都不反应，只能溶于熔融的铅和铋中。铑不与常温下的各种酸甚至王水起作用，只有加热后才会溶于浓硫酸、氢溴酸和次氯酸钠，但能与熔融的碱金属硝酸盐、碱金属过氧化物和焦硫酸钠起作用，所有的铑化合物都容易被还原或加热后分解成铑粉或海绵铑，工业上铑是电解铂的副产品。铑常用作印刷电路、开关触头、高强度弹簧、高温发热材料和坩锅，也用作氧化还原中的催化剂。

【铱】周期表中Ⅷ族银白色的固体金属过渡元素，稀有金属，也是铂系元素之一。原子序数 $Z=77$ ，原子量106.42，化学符号 Ir ，有两种稳定同位素 $^{191}_{77}Ir$ 和 $^{193}_{77}Ir$ 。英国化学家坦南特从不纯铂溶于王水的残渣中分析出铱。熔点2410℃，沸点4130℃，密度22.421克/厘米³，外围电子结构 $5d^76s^1$ ，化学反应时易丢失2—4或6个电子，所以氧化数为0、+2、+3、+4和+6。铱是最耐腐蚀的金属。酸和王

水都对它无效。除能被熔融的铜、铝、锌、镁腐蚀外，其它金属盐只能使它缓慢腐蚀或根本不起作用，在常温下与干、湿空气不起作用，只有加热到 600°C 时才能在表面形成一层二氧化铀保护层，也只有加热时才和氟、氯起反应，铀与熔融的氢氧化钾和硝酸钾混合液发生作用生成二氧化铀，铀有配位化合能力，可用作催化剂，铂铀合金常被用作耐高温、抗腐蚀、耐磨的元器件用在电器仪表上，钛铀和钍铀互化物可作超导材料。铀多从溶于王水中的铂的残渣中制取。

【Mt】元素周期表中Ⅷ族固体金属过渡元素。最新的人工核反应合成的金属，原子序数 $Z=109$ ，原子量 266.137 ，外围电子结构和铀相似 $6d^77s^1$ ，代号 Une，其它性能还不清楚。还没有中文译名。

【镍】周期表中Ⅷ族有银白色光泽的固体金属过渡元素，原子序数 $Z=28$ ，原子量 58.6943 ，化学符号 Ni，有五种天然同位素 $^{58}_{28}\text{Ni}$ 、 $^{60}_{28}\text{Ni}$ 、 $^{61}_{28}\text{Ni}$ 、 $^{62}_{28}\text{Ni}$ 和 $^{64}_{28}\text{Ni}$ 。地壳中含量 0.018% ，超过铜而少于锌。瑞典化学家克龙斯泰德在1751年分离出镍。镍熔点 1453°C ，沸点 2340°C ，密度 8.901克/厘米^3 ，外围电子结构 $3d^84s^2$ ，化学反应时易丢失1—4个电子或俘获1—2个电子，所以氧化数为 ± 1 、 ± 2 、 $+3$ 和 $+4$ ，化学性质不大活泼。即使在高温下也不易受空气和水作用，对有机酸如醋酸、草酸、酒石酸及柠檬酸只有长期接触才起作用，在硫酸和盐酸中溶解很慢，易溶解于硝酸，对碱金属盐类不管是熔融状还是水溶液都不起任何反应，在 500°C 左右，镍在空气中才微弱氧化，镍有氢化物、氧化物、硫化物、氮化物、磷化物、碳化物。也能和不少金属形成合金，制作很困难，但它们形成固熔体，改进了合金的性能，如铜、镍、锌合金可作为银的代用

品，可制发条，镍铝合金可作内燃机活塞等耐高温耐摩元件，镍铅合金也改善了坚固性和铸造性。工业上最常用的是镍铁合金既增强坚固性和韧性，又提高了耐酸耐磨能力而被大量使用，也经常用来镀在某些金属表面作保护层，镍在动物体内也有激活肽酸酶作用，但也可能引起中毒，如果全身中毒会引起肺、肝的损伤，并可能引起多种癌变。镍的工业提炼主要是电解法和化学还原法。

【钯】周期表中Ⅷ族银白色金属光泽的固体金属过渡元素，又是铂系元素之一，原子序数 $Z=46$ 原子量 106.42，化学符号 Pd，有六种稳定同位素， $^{102}_{46}\text{Pd}$ 、 $^{104}_{46}\text{Pd}$ 、 $^{105}_{46}\text{Pd}$ 、 $^{106}_{46}\text{Pd}$ 、 $^{108}_{46}\text{Pd}$ 和 $^{110}_{46}\text{Pd}$ 。地壳中含量很低，约 $5 \times 10^{-6}\%$ 。英国化学家渥拉斯顿在 1803 年从粗铂溶于王水的残渣中发现钯。熔点为 1553.1°C ，沸点 2540°C ，密度 $11.9\text{克}/\text{厘米}^3$ ，外围电子结构 $4d^{10}5s^0$ ，化学反应时易丢失 2—4 个电子，氧化数为 0、+2、+3 和 +4，钯比其它的ⅧB 族金属有较强的金属活性，不仅溶于王水，还能溶于浓硝酸和热的浓硫酸，钯和氢的作用比与其它气体的强，主要化合物有氧化钯、硫化钯、氮化钯、磷化钯、碳化钯和某钯盐、钯还有催化作用，钯主要用于电器工业、化学工业及首饰工业。

【铂】周期表中Ⅷ族银白色金属光泽的固体金属过渡元素，也是铂系元素之一，原子序数 $Z=78$ ，原子量 195.08，化学符号 Pt，有六种稳定同位素 $^{190}_{78}\text{Pt}$ 、 $^{193}_{78}\text{Pt}$ 、 $^{194}_{78}\text{Pt}$ 、 $^{195}_{78}\text{Pt}$ 、 $^{196}_{78}\text{Pt}$ 和 $^{198}_{78}\text{Pt}$ ，英国化学家沃森在 1748 年发现铂，地壳中含量 $2 \times 10^{-5}\%$ ，熔点 1772°C ，沸点 3827°C ，密度 $21.43\text{克}/\text{厘米}^3$ ，外围电子结构 $5d^96s^1$ ，化学反应时易丢失 2—6 个电子，所以氧化数为 0、+2、+3、+4、+5 和 +6，铂对各种化学作用极为稳定，在各种酸中均不溶解，对王水作用

比金还难，但在各种特殊条件下能生成铂的氧化物、硫化物、磷化物、碳化物和一些铂盐，因铂的可塑性和可锻性极大、常被做成铂丝和铂箔，它与玻璃有相同膨胀系数，常被用在白炽灯泡中，铂的器皿用来生产高纯度的酸和盐，也作来制造电阻温度计的灵敏电池、坩锅、滤器、铂钢和催化剂等，铂的合金适用于冶金，玻璃和陶瓷等工业。铂是制取镍、铜的副产品。

【稀土元素】周期表ⅢB族中固体金属元素，包括钪、钇和镧系共十七种元素合称为稀土元素，这十七种元素的化学性质极相似，外围电子结构为 $(n-2)f^{0-14}(n-1)d^1ns^2$ ，三个电子在化学反应时都易丢失，具有氧化数为+3的化学特性，都易溶于酸，盐类一般皆难溶于水，仅氯化物和硝酸盐是常见的可溶性化合物，氢氧化物都是碱性，都有银白色金属光泽的质软的特点，它们的合金都能改善金属性能，被广泛应用在冶金、电子、核能、化工等方面，特别在医药和农业上，含微量稀土金属的肥料可使农作物大量增产，因为稀土元素是农作物光合作用的催化剂，可以促进灌浆的生理过程。又可以促进无机磷转化为有机磷的生化过程。以前有种错误概念，认为稀土金属在自然界很稀少，其实不然，其中很多元素如镧、铈、镨、钕和钐按其在自然界的分布不次于人们在工业上熟知的某些元素，常见的矿石有独居石、钷钇石、硅钷石、褐帘石和氟碳钙钷矿等。

【钪】周期表中ⅢB族有银白色金属光泽的固体金属过渡元素，又属稀土元素，原子序数 $Z=21$ ，原子量4.9559，化学符号Sc，有两种同位素异形体，结构正方晶系和六角晶系，是周期表预言十年后才发现的第一个证实周期表正确性的元素，因而很有名气。地

壳中的含量为 $5 \times 10^{-5}\%$ ，但很分散。瑞典的尼尔松在1879年发现钪。熔点 1541°C ，沸点 2831°C ，相对密度2.989，外围电子结构 $3d^14s^2$ ，化学反应时三个电子都易丢失，则氧化数为+3，易溶于稀酸中，它的氧化物 Sc_2O_3 很容易溶解在酸中生成相应的盐，碳还原氧化钪得到碳化钪、其它化合物有 ScCl_3 ， Sc_2S_3 ，硫酸钪盐，硝酸钪盐及磷酸钪盐等，钪的盐类加热就分解，钪可用来制造高光效的钪卤素灯，工业提取钪也可用萃取分离法。

【钇】周期表中ⅢB族灰色的固体金属过渡元素，又属稀土金属元素，原子序数 $z=39$ ，原子量88.90585，原子符号Yr。地壳中含量0.0028%，这个含量已超出好多工业中常用的金属元素。芬兰化学家加多林在1794年发现钇，熔点 1522°C ，沸点 3338°C ，密度6.07克/厘米³，外围电子结构 $4d^15s^2$ ，反应时三个电子都易丢失，所以氧化数为+3，在空气中保存时可被迅速氧化，它的硫酸盐、硝酸盐或草酸盐加热都能得到白色灰末氧化钇， Y_2O_3 能吸收空气中的氨，氧化钇溶解在酸中能得到不同的相应的盐，化合物有碳化物、氯化物，钇的合金广泛用于激光材料、微波技术和核工业技术，工业上钇可用银还原钇的氟化物制取。

【镧系元素】镧系元素属于周期表第六周期中ⅢB族，全部是固体金属，它们是镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铟、铊、镱和镱共十五种金属元素，它们的外围两层的电子均是 $5d^16s^2$ ，而外围第三层的f轨道电子却从零增加到14个，所以外围电子结构为 $4f^{0-14}5d^16s^2$ ，而使这些元素氧化数均为+3，化学性质极为接近，提炼时很难分开，它们的矿石又大多是多种元素混在一起的，更增加提纯难度，它们的原子序数为57—71，核内质子

数逐个增加，因而对核外电子引力也不断增强，使原子半径随原子序数 Z 增加而减小，这就使镧系元素收缩、离子半径也缩小，这也使得 Zr 和 Hf, Nb 和 Ta、Mo 和 W 等原子和离子半径都很接近、也决定了它们彼此性质类似，以致难以分离、也使第 VIII 族中第五周期的钨、铼、铈和第六周期的铱、铂、金在性质上极为相似，因而称这六个元素为铂系元素。镧系元素也因 $4f$ 上电子全空、半满、全满的变化使有些元素出现 +4 价，有些出现 +2 价氧化态，我们用下列氧化态图及黑点大小来表示氧化态稳定性大小。

+3 的氢氧化物都显碱性， $\text{La}(\text{OH})_3$ 是中强碱，随 Z 增加碱性减弱，它们的盐类一般均难溶于水。仅氯化物和硝酸盐是可溶性的。下表为镧系元素的原子和离子半径即 R_m 和 R_m^{3+} (\AA)

元素	镧 La	铈 Ce	镨 Pr	钕 Nd	钷 Pm	钐 Sm	铕 Eu	钆 Gd
R_m	1.877	1.824	1.828	1.822	—	1.802	1.983	1.801
R_m^{3+}	1.016	1.034	1.013	0.995	0.979	0.964	0.950	0.938
外围电子结构	$5d^1 6S^2$	$4f^1 5d^1 6S^2$	$4f^3 6S^2$	$4f^4 6S^2$	$4f^5 6S^2$	$4f^6 6S^2$	$4f^7 6S^2$	$4f^7 5d^1 6S^2$

元素	铽 Tb	镝 Dy	钬 Ho	铒 Er	铥 Tm	镱 Yb	镱 Lu
R_m	1.783	1.775	1.767	1.758	1.747	1.939	1.735
R_m^{3+}	0.923	0.908	0.894	0.88	0.87	0.858	0.85
外围电子结构	$4f^9 6S^2$	$4f^{10} 6S^2$	$4f^{11} 6S^2$	$4f^{12} 6S^2$	$4f^{13} 6S^2$	$4f^{14} 6S^2$	$4f^{14} 5d^1 6S^2$

镧系 15 种元素中，只有钷是人工放射性元素，其他都是天然元素，由于他们性质接近，在自然界中经常在同一种矿石中分析出多种镧系元素。

【锕系元素】元素周期表第七周期中 III B 族固体金属过渡元素，它们的原子序数从 $Z=89$ 到 $Z=103$ 共 15 种放射性元素，它们主要参数由下表给出：

符号	外围电子结构	首次发现的同位素		寿命最长同位素		氧化数(+)	离子半径(Å)
		质量数	T _{1/2}	质量数	T _{1/2}		
锕 Ac	6d ¹ 7s ²	227	1.7年			3	3 ⁺ 1.071
钍 Th	6d ² 7s ²	232	1.4×10 ¹⁰ 年			3,4	3 ⁺ 1.051
镤 Pa	5f ² 6d ¹ 7s ²	231	3.43×10 ⁴ 年			4,5	3 ⁺ 1.034
铀 U	5f ³ 6d ¹ 7s ²	233	4.5×10 ⁸ 年			3,4,5,6	3 ⁺ 1.022
镎 Np	5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	239	23天	237	2.2×10 ⁶ 年	3,4,5,6,7	3 ⁺ 1.011
钷 Pu	5f ⁶ 7s ²	238	92年	244	7.6×10 ⁷ 年	3,4,5,6,7	3 ⁺ 1.001
镅 Am	5f ⁷ 7s ²	241	435年	243	7370年	2,3,5,6,7	3 ⁺ 0.993
锔 Cm	5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	242	162天	248	3.52×10 ⁵ 年	3,4	3 ⁺ 0.985
锫 Bk	5f ⁸ 6d ¹ 7s ²	243	4.5小	247	7×10 ³ 年	3,4	3 ⁺ 0.975
镅 Cf	5f ¹⁰ 7s ²	244	45分	251	900年	2,3,4	3 ⁺ 0.962
锿 Es	5f ¹¹ 7s ²	246	7.3分	254	270天	2,3	3 ⁺ 0.953
镱 Fm	5f ¹² 7s ²	250	30分	257	79天	2,3	3 ⁺ 0.943
钷 Md	5f ¹³ 7s ²	256	77分	258	53天	1,2,3	3 ⁺ 0.934
锘 No	5f ¹⁴ 7s ²	254	65秒	259	1.5小时	2,3	3 ⁺ 0.928
铹 Lr	5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	257	8秒	256	45秒	3	3 ⁺ 0.921

这15种元素中铀和钍是天然的,锕和镤是铀和钍的衰变产物,在自然界也存在,超铀元素都是用人工核反应产生的。由于锕系元素的5f电子结合能比镧系4f电子结合能小,所以有些锕系元素存在+3以外的氧化数。它们都是活泼金属,可同所以的化学元素反应生成相应的化合物,而且化学活性随原子序数增加而提高。它们具有多晶形结构,可溶于稀矿物酸,在浓HNO₃和H₂SO₄中钝化。由于锕系元素离子半径不大,电荷又多,所以他们在水溶液中可水解,某些离子在其他酸中可形成络合物。分离锕系元素可用沉淀法、萃取法、色谱法和电化学法,锕系元素用于做核燃料、做同位素能量发生器、做γ、β、α中子放射源。锕系和镧系元素电子结构很接近,所以两个系列之间存在着对应物如镤和镧、铀和钍、镎和钷、镅和铈、镆和铈虽是化学同系物中差别较大但其他的同系性更强。差别是5f电子比4f电子更不稳定造成的,但在各自系中化学相似性更强,因而分成两个系列排在周期表对应位置的两个方格中,而把这两系列元素列在表外。虽然这样做对少数元素不完全理想,但总体结构是可接受的。

【超铀元素】周期表中原子序数大于92铀的所有放射性人工合成元素（或人工放射性元素），其中原子序数在93—103的元素已在镧系中介绍，从104—109的元素也在过渡元素中简单介绍了，这里只介绍一下这些元素的共性：①这些元素都是人工核反应生成元素；②都具有不同寿命的放射性而衰变成别的比它稳定元素，直到最后变成稳定元素；③都可用来做不同类型的放射源如 γ 、 β 、 α 和中子在核医学、高能、低能物理实验中被使用；④使们的化学性质极像铂系受镧系f层电子变化那样，化学性质很接近，原子和离子半径很接近，分离它们比较困难；⑤氧化数主要是+3，但因5f上的电子比4f上电子更不稳定，即5f上电子更容易在反应中丢失，所以也会存在更高价化合物。随着核物理的发展，还会有更重质量的新元素被人工制造出来。

【金属】由金属元素组成的单质，具有下列性质：（1）在常温下除汞是液体外，都是固体。（2）具有金属型晶格。（3）具有金属光泽而不透明，多数呈银白色。（4）多半具有延展性，可经滚压、锤击等处理而制成各种模型或器材。（5）有优良的导热性和导电性。（6）密度一般较大。金属的晶体结构中，有中性原子、阳离子和自由活动的电子，金属的延展性、导热性和导电性等都与自由电子的存在有关。金属的化学性质主要表现在其原子容易失去电子而形成阳离子，因而易与非金属化合。活泼的金属能与酸发生置换作用。最活泼的金属，如钠、钾等，还能在常温下与水作用，置换出氢。金属与非金属之间，有时很难划分界限。有些非金属如砷、碲等，按照其化学性质可以化为金属。按其颜色，金属可分为黑色金属、有色金属两大类。按其密度可分为轻金属和重金属。轻金属的

比重小于5，如钠、钙、镁、铝等；重金属的比重大于5，包括金、银、铜、铁等。金属在化学反应中容易生成正离子的元素。金属的一般物理性质是：导电，传热性能好，有光泽而不透明，有延性和展性。金属的一般化学性质是：形成碱性氧化物；与非金属形成盐类化合物。金属在不同程度上具有这些性质。除了汞是液体（常温下）外，所有金属都是固体。金属原子之间是以金属键结合的，一般都具有金属型晶格。在金属原子间有可以移动的电子。金属原子最外层电子数较小，电负性较小，在反应中容易失去而成阳离子。这是所有金属的化学性质的一个共同特性。金属容易与非金属化合。活泼的金属能与酸发生置换反应。很活泼的金属（如碱金属还能在常温下与水作用，置换出氢气。金属的氧化物和氢氧化物一般呈碱性。只有少数金属的氧化物和氢氧化物具有两性。金属与非金属之间没有严格的界限。

【同位素】 见第五卷核技术中的“同位素”。

【稀有元素】 自然界中含量很少或分布稀疏以及研究得较少的元素，根据性质的不同可分为以下6类：（1）稀有轻金属：锂、铷、铯、钫、铍。（2）难熔稀有金属：钛、锆、钨、钽、钨、钼、钒、钽、钨。（3）稀有分散元素：即在自然界中不形成独立矿物而以杂质状态分散存在于其他元素的矿物中的元素，包括铷、铯、钽、铊、锶、钨、钨。（4）稀土元素（前已述及）。（5）稀有贵金属：铂、铱、钨、钨、钨。（6）放射性稀有金属：钍、钍、钍系元素。稀有元素常用于黑色和有色冶金工业以制造特种钢、超硬合金和耐火合金等，在原子能工业、化学工业、电气工业、电子管、半导体、超音速飞机、火箭技术方面都占重要地位。稀有元素的名

称具有一定的相对性，与普通元素的界限正逐渐消失。

【生命元素】生命元素从广义而言，是指生物体内各种化学元素，或指与生命活动有关（起生理作用）的元素；从狭义上说，它是指生命必需或对生命有益的化学元素。在周期表上所列的107种元素中，在生命体中发现有60—70种，其中绝大部分为金属。通常认为对生命必需的有机化学元素（C、H、O、N、P、S）和与生命有关的无机化学元素（K、Na、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn、Mn、V、Cr、F、I、Mo、Co、Se、Sn等），原属两个学科范畴，由于科学研究的深入与发展，发现它们之间是紧密联系、互相渗透的。就有机化学元素而言，与生物和人体的生命活动有关的元素包括两大类：一是绝对有机发生化学元素，即原始生物或人类出现时就必需的化学元素，为一切生物所必需；二是专门有机发生化学元素，即是在生物进化或生命活动到一定阶段之后才为某些种类的生物所必需。

【主要生命元素】占人体或生命体总重1%以上的元素，即H、C、N、O、P、S、Ca、Mg、K、Na、Cl，这11种元素占人体总重的99%，是人体软硬组织的主要成份，其中六种元素（H、C、N、O、P、S）是蛋白质、脂肪、糖类和核酸的组成成分，也是一切生命的基础。K、Ca为细胞内液的必要成分，Na、Cl为细胞外液的必要成分，在液体中多以离子形式存在。Ca和P是骨骼和牙齿的主要成分。

【必需的微量生命元素】除主要组成生命外，人体中其他所有组成均为微量生命元素，包括铁、钼、锌、铜、钴、锰、碘、钒、铬、

硒、镍、氟、硅、锡、溴、钷、钛、硼、铝和锆等。微量生命元素在体内分布有选择性特点，并具有重要的特殊生物功能。(1) 一些必需微量生命元素不仅是维生素、酶、蛋白质、胰岛素及核酸的成分，而且能引起人体结构元素发生化学反应，并帮助将它们运到全身。(2) 在酶系统内起着特异的活化中心作用。(3) 微量生命元素还参与激素作用，帮助机体的激素发挥作用。(4) 微量生命元素不仅与蛋白质结合并形成一种酶，而且对胰岛素分子与细胞的结合有特定的作用。(5) 遗传信息携带者核酸，含有相当高的微量生命元素。微量生命元素在生长、细胞代谢、组织呼吸、蛋白质和碳水化合物的合成和分解、体内平衡机制的调节和控制、与周围环境发生物质交换所产生的同化或异化，以及对健康的危害和促进等生活活动过程都起着重要的作用。

【锌】一般正常人体内含锌量为1.4—2.3g，锌是生命体内许多组织和重要酶中的必要成分；是保证血球、肝、肾、男性生殖器和骨骼的正常生长发育，维持皮肤正常发育机能所必不可少的最为重要的元素。锌能激活肠磷酶及肝、肾过氧化氢酶，同时也能抑制一些激素和酶的活动，从而显著地影响新陈代谢过程、氧化—还原过程、肝脏合成能力和有机体的其他许多生理机能。锌能改善人体和生物体对维生素的利用，在组织呼吸、蛋白质合成和DNA的复制和转录中起重要作用。它还能影响铁蛋白中铁的加入和释放，并为胰岛素合成所必需。缺锌会引起代谢紊乱、心肌梗塞、肾功能不全和淋巴白血病等症。缺锌还会使人食欲减退、性机能减退、生长停止、迅速消瘦、易于兴奋、毛发脱落等，因此锌剂对治疗上述疾病有一定效果。常见缺锌病主要是由于从食物中摄入过少或从尿中排出过多的锌引起，多见于老年人，可通过检查血浆中锌

的浓度来确诊，但摄入过多的锌可引起恶心、呕吐、痉挛、腹泻，偶尔可引起嗜睡。硫酸锌和氧化锌有腐蚀性，服后能引起溃疡等。

【铜】铜在正常人体内含量为0.1g左右，铜能影响组织的呼吸和造血功能，影响体内糖类代谢和其他新陈代谢过程，对繁殖和生长过程起重要的促进作用。铜是许多氧化酶不可代替的组成部分，是形成细胞色素及细胞色素氧化酶等呼吸酶所不可缺少的成分。铜还是红血球基质的组成部分，在体内以铜蛋白的形式存在，它在血红蛋白的生成和红细胞的成熟过程中起促进作用，并且是维持心血管结构完整的必要成分。成人每天需铜5mg，缺铜会引起血红蛋白减少，引起色素沉着症、贫血症、低蛋白症，使白发增多，引起癩风，促进胆固醇升高等，同时在生物合成机制中不能使铁渗入血红蛋白分子。在低蛋白质血症和一般营养不良症中，常发现血浆、血清中铜的浓度低。摄入铜过多，引起严重中毒，发生低血压、吐血，还可出现黄疸、肝小叶中心坏死、溶血性贫血，重者昏迷死亡。铜的一些盐类因有酸根的毒性作用比金属铜的毒性大，对胃肠道有强烈的刺激作用。铜与锌、铁有协同作用，也具有拮抗作用。锌和铜都是二价离子，进入体内，锌能排挤铜。

【溴】人体和动物各器官几乎都含有溴，其中脑下垂体含溴量最丰富，溴化物对中枢神经系统发生强烈影响，能产生长期良好的镇静作用，这是由于溴具有减弱刺激的能力。当刺激过程和抑制过程之间的平衡破坏时，溴能加强抑制，恢复中枢神经系统的活动，并导向正常状态，但大量溴化物却对粘膜有强烈的刺激性和腐蚀性，长期吸入或积累会引起溴的慢性中毒，并伴有神经衰弱症候群。人处在含溴量30—60mg/m³时极危险，如超过则会致命。

【钒、钛、硼、铝和锗】钒、钛、硼、铝、锗在人体中的作用尚未查明，我们根据其化学和地球化学特性将它们列为必需的微量生命元素，同时它们又具程度不同的有害作用。(1) 钛在地壳中含量很丰富，但由于难溶，不易被生命体吸收，所以在体内含量甚低。钛能刺激吞噬细胞，使免疫作用增强。金属钛、氧化钛和碳化钛属低毒，四氯化钛及水解物具有高毒。它们进入人体内产生毒害作用，甚至可以发生支气管炎和肺水肿，严重时呼吸困难，并可引起虚脱和死亡。(2) 硼为植物所必需的元素，对人体和动物的物质交换，特别是碳水化合物的影响较大。硼主要分布在脾中，少量于肾、脑、肌肉和肝中。硼可降低血糖量，改善胃下腺的健康状况。摄入大量硼，在肝和甲状腺中引起营养不良变化，因为硼阻碍碘进入甲状腺，减低抗坏血酸含量。硼、硼酸和硼砂的毒性基本相同，硼酸能与几苯酚以及肾上腺素络合而阻止氧化过程。(3) 铝在动物体中含量极微，主要集中在脑、肝、肺部，在组织中分布不均匀。铝在体内主要与蛋白质发生关系，还参与上皮组织和结缔组织。铝盐刺激胃壁，促进中枢神经兴奋，铝的毒性极微，在体内对磷的代谢有明显影响，可阻碍其吸收，影响体内磷酸酸化过程。吸入金属铝可引起肺部轻度纤维化作用，形成特殊的铝肺。(4) 近年来，有人证明锗对癌症具有抑制作用，锗的毒性很低，锗中毒主要引起体内水平衡失调，如果存在脾中，可以缩短寿命。

【非必需微量生命元素】非必需微量生命元素基本上是生命所不需要的，甚至是对生命产生不同程度危害作用的毒性元素，但其中有些元素在极微量时具有益功能，这些元素大部分是因环境污染而进入人体的。

【镉】具有高度毒性，对人体健康威胁最大，影响最多的元素之一。镉在人体中是累积性的，从食物中摄入的镉，多积留在肾脏中，可出现动脉硬化、萎缩肾或慢性肾炎。镉与锌性质类似，在环境中和体内常伴生在一起，但镉对某些肾组织比锌的亲合力大，能不可逆地置换锌，引起尿蛋白症、糖尿病、水肿病和癌症。镉进入骨骼，破坏和取代部分钙，引起骨质软化、骨骼变形，严重者形成自然骨折甚至死亡。镉的气溶胶或粉尘通过呼吸道和消化道进入人体，吸入则引起化学肺炎，吃入可引起胃肠炎、心、肝、肾变性。镉对衰老也有一定的促进作用。人体中增加一些碘（镉和碘都是软酸）使体内两者结合，变为无毒，排出体外，减少镉的积累。

【汞】无机汞对人体毒性不大，甚至还可作为药物治疗，但汞蒸气和有机汞毒性较大，是长期危害人体健康的元素之一。汞在体内外与硫化物具有高度亲和性，因此 Hg—S 反应是汞产生中毒作用的基础，它可使细胞膜的酶功能与结构改变，以致细胞膜受损。汞又可进入细胞内干扰呼吸酶的活性，导致组织细胞出现功能和结构上的损害，汞蒸气对人体有剧毒。金属汞及其他无机汞以气溶胶形态经呼吸道进入人体，通过肺泡膜侵入血液，并迅速侵入各内脏组织，影响正常细胞的代谢。误服汞盐，引起急性胃肠炎、坏死性肾炎和汞中毒肾炎，甚至坏死。环境中的汞慢性中毒，还可引起精神障碍和口腔炎；汞蒸气可引起接触性过敏性皮炎。汞作用于内分泌系统可引起性机能减退。汞的毒性决定于它的状态和溶解度，金属汞由于其不溶性，几乎不被吸收，而以原形排出，所以不会出现中毒。

【铅】见“碳族元素”中的“铅”。

【铀】人体非必需微量生命元素，在一些正常组织中含有极微量的铀，如骨髓含 $3.11 \times 10^{-3}\%$ ；甲状腺含 $4.52 \times 10^{-5}\%$ ；血液含 $4.10 \times 10^{-10}\%$ ；在胚胎中也发现有铀的存在。铀及其化合物都有毒，其毒性与它的理化性质，进入人体途径及机体状态、结构等因素有关。铀在血液中可能形成三种络合物，即与血浆无机盐结合成重碳酸盐络合物，与血浆蛋白结合成铀酰蛋白络合物，以及与细胞膜结成铀酯脂蛋白络合物，通常三者处于平衡态，在一定条件下，后两者转化为前者。铀重碳酸盐络合物可渗入细胞间液中，与肾小管细胞表面上的活性基团相结合而引起肾脏的损害。当血液中六价铀超过允许浓度时，上皮细胞会出现水肿，肾功能发生障碍，出现无尿症，最后危及生命。当人体吸入铀化物粉尘时，最初出现肺功能障碍，引起支气管炎水肿，继而发生糖尿、蛋白尿、尿毒、全身水肿，甚至可导致白血病和肺癌。

【钚】化学毒性不大，但放射性钚危害性甚大。钚在体内能长期贮留，特别在肺组织、骨组织和富有网状内皮组织的实质器官内，这成为钚蜕变产物具有远期辐射作用的重要原因。硝酸钚在体内遇水分解时放出大量酸根，有较强的刺激性。当大量钚盐进入腹腔、血液、呼吸道或消化道时可能致死，其原因不是钚的化学毒性，而是相应酸根毒性和刺激。钚相对集中在肝脏和骨髓中，在柠檬酸存在的情况下，由于其对钚等金属的螯合作用，使钚以非常细微的胶态粒子状态存在，进入骨髓中产生危害。钚对骨骼的影响，因 α —射线而使骨组织坏死，发生骨的恶性肿瘤，钚使肝细胞、输胆管发生恶性肿瘤。钚进入血液后，会使肝癌发病率增高。

【铊】属于高毒类生命元素。环境中铊进入人体，可延期蓄积，主要损害中枢神经系统，周围神经以及胃肠道和肾脏，引起中毒性脑病、精神失常、心动过速或高血压等病症。铊从环境进入人体后，主要蓄积在红细胞、肾、骨和软组织中。一价和三价铊均能引起脱发，甚至一夜间可使部分头发突然脱落，称为“斑秃”或“鬼剃头”。急性铊中毒使肺充血、心肌脂肪变性、甲状腺萎缩等，引起突然头晕、耳鸣、心慌、视力模糊，继而卧床，亦可引起肝炎、皮疹、指甲和趾甲有横纹等。

【锂、铷和铯】锂、铷、铯为人体非必需元素，但具有有益功能。有人认为锂和铷可能是人体所必需的微量元素，锂、铷、铯对人体心肌活动、动脉硬化以及血液循环方面的作用极为相似。它们对心肌有保护作用，其中锂为治疗周期性躁郁性精神病在躁狂期的特效药，对多种情感紊乱症有良好的控制作用，同时发现锂在饮食中的含量与动脉硬化性心脏病的发病率成反比，但锂盐本身有较强毒性，应注意用药剂量。当锂中毒时，出现肌肉无力、反射亢进、震颤、昏睡等。大剂量锂化合物对神经系统也有损害、会引起肾、肝、肺、心和胃肠损害，肾小球和肾小管脂质变性、肝细胞变性，导致肺硬化、胃肠膜充血等。实验证明，糖尿病人的血清及肾脏皮层、乳腺癌的恶性组织中铷含量增高，而尿毒症病人血清中的铷含量则比正常人低。对胃癌病人和冠心病病人研究表明，胃组织中恶性部分的铷要比相应正常部分的铷高。

【铍】铍为人体毒性元素，很轻，但毒性很大，它能抑制烷基磷酸酶、胸腺嘧啶核苷酶、合成酶等，并扰乱多种酶系统。在体内与镁

争夺酶的催化位置，加重缺镁症状，抑制镁激活酶的作用，使细胞正常生理功能受到干扰，从而导致有关器官和组织发生病变。目前铍被确认为致癌性元素，其化合物在肺和骨骼中，可能成为致癌物质。难溶性的氧化铍主要贮存于肺，引起“铍肺”、化学性支气管炎、慢性铍中毒，使呼吸系统受影响，并伴有肺心病及肝脾的病变。可溶性的铍化物主要贮存于骨、肝、肾和淋巴等处，铍化物接触皮肤可引起接触性皮炎、皮肤溃疡。铍化物在组织和血浆中，与血浆蛋白作用，致使组织发生增生变化，从而引起脏器或组织的肉芽肿病变。

【锶和钡】锶为人体非必需元素，但锶对人体具有显著的有益功能，如能使骨质和牙变硬，有抗龋齿作用，对老年性骨质疏松症有抵抗作用。锶的一些生理作用类似于钙，人体中绝大部分锶集聚在骨中。实验表明，当小剂量长期投入锶，同时食物钙充足时，引起骨硬化改变；当锶量过大或伴有缺钙时，则形成佝偻病样改变。也有人认为锶过多、钙缺乏可引起大骨节病。钡是对生物体有害的微量生命元素，钡盐的毒性与溶解度有关，溶解度愈高，毒性愈大。钡化物中毒可使心肌出现心律紊乱，甚至引起心室颤动；气管平滑肌收缩导致痉挛或呕吐，严重者出现全身瘫痪。钡化合物还可引起上呼吸道及眼结膜的刺激症状，部分会出现钙—磷代谢和副交感神经功能紊乱。钡可引起低血钾，用钾去置换钡则可使钡中毒现象减轻或消除。钡、铍和镭一样会妨碍钙的吸收，用钡和锶等制的胰岛素，能使胰岛素减低血糖含量的作用延长到24小时。

【致癌性的稀土元素】稀土元素包括钪、钇和镧系元素共17个。稀土元素在体内不能以离子状态存在，由于体液的pH值近乎中性，

稀土元素进入肌体内会进行水解，生成氢氧化物相互聚合，以聚合体的胶状物存在。体内的各脏器组织多属网状肉皮系统，稀土元素广泛分布于肝、脾等组织中，骨骼内的骨髓组织也能蓄积它们，依据体内因条件不同，这些元素以不同状态存在。它们还能同蛋白结合，以及同核酸或染色体相结合形成不溶性络合物，从而引起细胞的机能障碍。稀土元素还可阻止血液凝固，促进脂肪肝的生成，并对包括性功能在内的许多生物功能产生强烈的影响。稀土元素的氧化物和氟化物的粉尘在肺部积蓄后，不仅会出现尘肺性纤维增殖症，还可引起多血症和嗜血伊红细胞增多症，最后导致动物死亡。长期吸入稀土硝酸盐粉尘，引起器质性病变。稀土元素接触皮肤伤口，能同蛋白结合，有抗凝血作用。

【砷】 见“碳族元素”中的“砷”。

【金、银及铂族元素】 金、银和铂族元素在环境中的存在和分布极不均匀，因其元素化合物具毒性，故列为有害元素。金一般无毒，但由于金化物极难吸收，故吸入后全部留在血浆中，与血浆蛋白结合，水溶性金化物主要分布于肾近曲小管细胞的线粒体中。金化物有时会损害胃肠道，在人体内，可溶性金化物在脾中集聚较多。吸入铂粉尘并无不良反应，但铂化合物有毒，氧化铂对皮肤粘膜有腐蚀作用，引起“铂病”，其表现为较强的变态反应，能通过过敏反应机理而发病。某些铂化物（如氯氨铂及烃基氯氨铂类）是强力抗癌剂，可防止细胞分裂，对睾丸癌和子宫颈癌病人有较好疗效。钷酸有明显的刺激性和毒性，其他高价的可溶性钷化合物亦可能有毒，接触钷蒸汽后常引起严重的结膜炎、前额部头痛和呼吸道系统的炎症。吸入钷酸后可引起肾炎和血尿。

【砷、铋、锑、镓和铟】砷、铋、锑、镓、铟为人体毒性元素。环境中这些元素与人体接触比较广泛,是一种潜在的危害。砷是一种非金属,体内95%以上的砷与各组织中的蛋白质呈结合状态,被认为是机体解毒功能的一种表现。砷可能包含在酶系统中,与蛋白质络合后引起功能性退化等。砷对毛细血管的损害,与硒和砷相似,但毒性较硒和砷低。铋属微毒类,治疗用的铋化合物一般无毒,过多也会中毒。摄入可溶性铋化合物,溶于胃液中,少量经血循环到全身,能栓塞毛细血管,发生局部溃疡。硝酸铋在肠道内细菌的作用下,可还原为亚硝酸铋而引起高铁血红蛋白血症。铋和铅在体内代谢有些相似,在酸中毒时,可将组织内积存的铋释放;铋和铅可相互影响,对潜在性铅中毒病人,应用大量铋剂,往往可将组织内的铅替换出来而使铅中毒缓解,但摄入过量会引起铋中毒。锑在人体中含量甚微,分布在红细胞、血液及头发中。三价锑毒性比五价锑大,后者刺激性较少。锑还可与体内巯基结合,浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{nmol/L}$ 时,可抑制琥珀酸氧化酶活性的50%,通过干扰酶的活性或破坏细胞内离子平衡损害神经系统。锑还可干扰蛋白质和碳水化合物的代谢,损害肝脏。镓为人体有毒元素,沉积在软组织中导致神经、肌肉中毒,抑制生长,损伤肾和骨髓,甚至形成肿瘤。镓能被许多肿瘤和恶性淋巴瘤所浓集,故 ^{67}Ga 应用于肿瘤临床诊断。一些同位素(^{72}Ga 和 ^{68}Ga)还具有抗癌作用,用于治疗骨肉瘤和脑瘤。铟为人体有害元素,属致癌性元素。铟离子比含结晶水的氧化铟毒性大40倍,可能是一种类似汞的肾脏毒物,可溶性化合物对皮肤和粘膜有刺激作用,可引起皮炎、角膜损害。三氯化铟能引起局部钙化,蓄积在软组织中,主要影响肾,破坏酶的正常功能,并与肿瘤的形成有关。

【饮食中生命元素的平衡性】 饮食的质量及其平衡与人的生长发育、健康疾病关系很大，在某种程度上与生命元素的摄入密不可分。威廉斯等人曾规定食物中生命元素的必需含量为：氯，3246mg/d；钠，1548mg/d；钾，2105mg/d；钙，800mg/d；磷酸盐，500mg/d；镁，350mg/d；锌，12.5mg/d；硫酸盐，11.5mg/d；铁，10.0mg/d；锰，2.81mg/d；铜，1.94mg/d；碘，0.144mg/d；钴0.28mg/d。要避免偏食，提倡混合食品，以取长补短，如牛奶含锌量较高，但几乎无铁、铜、碘，而果干（如杏干、葡萄干）是铜和铁的很好的来源，动物性和海产品含铁、锌、碘、铬等元素高，含锰低；植物性产品中含锰较高；混合性食物有助于吸收微量元素。如吃大米，可配合牛肉和蔬菜一起食入。不能依赖精制食品，糙米被加工成精米，失去83%的镁、75%的铬、27%的锌、25%的铜和38%的钴、55%的铁和86%的锰。施劳德提供各种植物中必需微量生命元素的平均含量，从中可了解食物中元素的来源，供平衡饮食时参考。

各种食物中必需微量生命元素含量（单位：ppm）

食物种类	铬	锰	钴	铁	锌	硒	铜
海味	0.17	0.05	1.56	1.49	17.5	0.57	0.10
肉类	0.13	0.21	0.22	3.92	80.6	1.07	2.06
奶制品	0.10	0.70	0.12	1.76	8.6	0.02	0.14
豆	0.05	0.44	0.15	1.31	10.7	0.02	1.73
根	0.08	0.78	0.13	0.69	3.4	<0.02	0.23

食物种类	铬	锰	钴	铁	锌	硒	铜
叶和菜	0.03	3.47	0.14	0.42	1.7	<0.02	0.06
水果	0.02	1.0	0.14	0.82	0.5	<0.02	0.06
谷类	0.31	7.0	0.43	2.02	17.7	0.31	0.33
油和脂肪	0.15	1.83	0.37	4.63	8.4	—	0.00
坚果	0.35	17.7	0.26	14.82	34.2	0.7	?
调味品 和香料	3.3	91.8	0.52	6.76	22.9	0.24	0.45
酒精饮料	—	—	0.03	0.38	0.9	—	0.08
非酒精 饮料	—	3.8	0.01	0.44	0.2	0.35	0.03

对生命体而言,微量生命元素有其必需性和毒性两个方面,摄取适宜的量,不仅与元素含量水平,而且与生命元素本身的化学形态、共存的其他食物的成分及生命体本身的年龄、性别等有关,因此它们的变动很大。森田研究大量实验数据后总结的“每天摄取微量生命元素的适宜量”可供参考。

每天摄取微量生命元素的适宜量

(单位: mg/d)

元素	出现缺乏 症状的量	适宜量	显示毒 性的量
铁 Fe	1—2	10(男),18(女)	200

元素	出现缺乏症状的量	适宜量	显示毒性的量
铜 Cu	不明	2.0—3.0	(20?)
锰 Mn		0.15—0.5	
钴 Co		呈维生素 B ₁₂ 态	
镍 Ni	?	0.0001—0.00015	20—30
锰 Mn	0.02 (0.4?)	不明 2.5—5.0	710 (80)?
锌 Zn		15	7240
镉 Cd		<0.005—0.07	
铬 Cr	(0.005)?	0.05—0.02	(740)?
碘 I	(0.05)?	0.15	2
硒 Se	(0.02)	0.05—0.2	6—8
氟 F	不明	1.5—4.0	(16)?
汞 Hg	—	<0.043	18
钒 V	(0.04)?	<4.5	18
铅 Pb	—	<4.3	
砷 As	(0.012)?	?	

注：(?) 为根据动物实验及平衡研究后推断数

【生命元素与延缓衰老】一切生命都有其发生、发育、成长、衰老和死亡的过程，人类也不例外，关于衰老的原因，众说纷纭，至今没有一个定论。目前，环境中生命元素和污染物质致衰的学说也正在形成和发展，关于衰老的微量生命元素假说正引起各学科的广泛重视。自然界没有什么能阻止老年人缓进的衰老，但衰老的时间有早有晚，其中环境因素是衰老的重要原因。人体中生命元素含量随着年龄的增加不断变化，有的减少，有的不断积累，而积累的元素大都是非必需的生命元素或有害或毒性的微量生命元素

(如铅、镉、汞、铀、钷、放射性锶、钷、铯等)。这些有害元素在体内积累并同蛋白质结合在一起,导致蛋白质的变性和老化,对DNA、RNA 等的作用也是如此。即使一些必需微量生命元素,由于过多已成为有害作用的因子,引起中毒、致病和致衰。老年病常表现为糖尿病、高血压、高血脂、动脉硬化、老年中风、心肌缺血或心肌梗塞、痛风、肥胖症以及癌症等。在一定程度均与体内生命元素的不平衡有关。如果有意识地控制环境不受污染,在人的一生中,始终注意饮食平衡,应用适当的手段作定期体外监测,控制最佳功能所必需的微量生命元素含量,那么我们就有可能活到最大的生物学年齡。

化 合 物

【化合物】由两种或两种以上元素的原子所组成的物质。每种化合物具有一定的特性,并一般具有一定的组成。化合物可分为有机化合物和无机化合物两大类。化合物具有下列特点:(1)均匀;(2)组成恒定;(3)组成元素不再保持单质状态时的性质;(4)组成元素必须用化学方法才可分离。

【无机化合物】简称无机物。一般指除碳以外的各种元素的化合物。例如水,食盐,烧碱,硫酸和石灰等。但也包括少数的含碳化合物,如一氧化碳,二氧化碳,酸式碳酸盐和碳酸盐等。绝大多数的无机化合物可以归入氧化物、酸、碱和盐四大类。

【氧化物】 氧同其他元素的二元化合物。除了稀有气体外，实际上所有元素的氧化物都已经制备出来。一种特定的元素常常能够制备几种不同的氧化物。大多数元素在适当的温度和氧气压力下会同氧发生反应，因此许多氧化物可以直接制得。磷在氧中会立刻自燃而形成五氧化二磷 $(P_2O_5)_2$ 。硫需点火可燃烧成二氧化硫 (SO_2) 气体。氧和起作用元素的相对量常常可以决定在几种氧化物中形成的是哪一种氧化物。氧化物的间接制备可用加热氧化物，硝酸盐，草酸盐或碳酸盐来实现。如从碳酸盐生成生石灰 (CaO) 的反应： $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$ 。除汞和贵金属等很少数的金属固态氧化物容易受热分解外，大部分的金属氧化物是很稳定的，许多金属氧化物可构成重要的耐火材料。绝大多数的非金属氧化物一般是气态的，如 SO_2 和 CO_2 。它们形成固态和液态时仍保持气体的分子单位。根据氧化物同水反应生成的溶液的特性，可以把氧化物分成酸性的和碱性的。非金属氧化物通常形成酸性溶液，金属氧化物通常形成碱性溶液。而周期表第 IV 族和更高族的给定金属常形成碱性，中性和酸性氧化物，它的酸性随氧对金属比值的增加而增强。

【臭氧】 分子式 O_3 ，分子量 48.00，氧气的同素异形体，存在于大气层的最上层。由于太阳对大气中氧气的强辐射作用而形成一层臭氧层。它保护着地球上的生命不受太阳强辐射的危害。在大雷雨天气，空气中的氧在电火花作用下也部分转化为臭氧。实验室可借无声放电的方法制备。臭氧是浅蓝色反磁性气体。在 $-112^\circ C$ 时凝聚成深蓝色液体，在 $-250^\circ C$ 时冻成黑染色固体。比氧气易溶于水。液态臭氧与液态氧不能互溶。与氧相反，臭氧是非常不稳定的，在

常温下缓慢分解,在 200°C 以上分解较快。臭氧分解时放热。纯的臭氧易爆炸。臭氧 O_3 的氧化性比 O_2 更强。臭氧不仅能将碘化钾氧化而析出单质碘,同时还能将硫,过氧化氢分别氧化成硫酸和氧。臭氧作为漂白剂,同时用来漂白纸张和蜡。此外臭氧可作消毒剂和空气净化剂。臭氧是一种高能燃料的氧化剂。

【一氧化碳】分子式 CO ,分子量28.00,无色,无臭,无味的气体,有剧毒。比重0.9672(对空气)。在标准状况下1升一氧化碳重1.2504克。凝结为液体的 CO 沸点为 -1.92°C ,熔点 -205°C (100mmHg压力下)。难溶于水,在甲醇、乙醇、乙酸、氯仿及乙酸乙酯中比在水中的溶解度大。一氧化碳不助燃,在空气中燃烧时呈蓝色火焰,并形成二氧化碳。能被 CuCl 的盐酸或 NH_4OH 溶液所吸收。在 CO 分子中,碳与氧之间形成三键,其中一个为配位键。由于孤对电子的存在, CO 表现出强烈的加合性,常与过渡金属的原子或离子生成金属羰合物,如羰基铁 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 、羰基镍 $\text{Ni}(\text{CO})_4$ 和羰基钴 $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ 等。一氧化碳可由甲酸与浓 H_2SO_4 一起加热制得(浓硫酸起脱水作用)。

【二氧化碳】分子式 CO_2 ,分子量44.01,无色,无臭,微具酸味的气体,比重1.5292(对空气)。在标准状况下1升 CO_2 重1.9769克。临界温度 31.3°C 。熔点 -56.6°C (在5.2巴压力下),液体 CO_2 的沸点为 -78.48°C (在1.01324巴压力下)。固体 CO_2 的密度为1.56克/厘米³。二氧化碳易溶于水,并生成极弱的碳酸 H_2CO_3 ,溶于乙醇。 CO_2 既不能燃烧,也不助燃。二氧化碳分子是直线型的,其结构式为 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$,其中 $\text{C}=\text{O}$ 键能很大,因此二氧化碳的热稳定性很高,在 2000°C 时仅有1.8%的分子解离成一氧化碳和氧。制 CO_2 常

用的方法是由酸和碳酸钙作用。

【干冰】 固态二氧化碳。为白色分子晶体；熔点 -56.6°C （5.2大气压）， -78.477°C 升华（1大气压），密度 1.56克/厘米^3 （ -79°C ）；具有面心立方晶格。固态二氧化碳的气化热很大，在 -60°C 时为365焦耳/克，在常压下气化时可使周围温度降到 -78°C 左右，并且不会产生液体，所以叫“干冰”。常见的干冰呈块状或丸状。干冰主要用作制冷剂。在低温实验，人工降雨，模制橡胶部件去毛刺等场合，都用干冰作制冷剂。干冰还可做食品的速冻保鲜剂。在实验室里，干冰与一种挥发性液体（如乙醚、丙酮或三氯甲烷等）组成的混合物，可形成 -77°C 左右的低温浴。

【石英】 分子式 SiO_2 ，分子量68.08天然的二氧化硅晶体。纯净的石英又叫水晶。它是一种坚硬、脆性、难溶的无色透明的固体。石英是原子晶体。熔点 $1500-1710^{\circ}\text{C}$ ，沸点 $2230-2600^{\circ}\text{C}$ 。石英在 1600°C 熔化成粘稠液体（不易结晶），结构单元处于无规则状态。当急速冷却时，形成石英玻璃。它是无定形二氧化硅。石英玻璃有许多特殊性质，如能高度透过可见光和紫外光，膨胀系数小，能经受温度的剧变。因此石英玻璃可用来制造紫外灯和光学仪器。它不溶于水，并且除 HF 外，有高的耐腐蚀性。

【二氧化硫】 分子式 SO_2 ，分子量64.06，无色容易液化的气体（熔点为 -75.5°C ，沸点为 -10.02°C ），有强烈的刺激性气味。 SO_2 是V型共价分子。 SO_2 易溶于水而生成亚硫酸 H_2SO_3 ，饱和溶液在 0°C 时含 SO_2 18.60%； 20°C 时为10.14%。亚硫酸溶液为无色液体，带有强烈的 SO_2 气味，为中强酸，在空气中逐渐氧化而变成硫酸。

二氧化硫易溶于有机液体（乙醇、乙醚、二硫化碳）中；以体积比300:1溶于樟脑时，将形成液体溶液。 SO_2 不可燃也不助燃，有强烈的漂白作用。气体 SO_2 可由浓硫酸和铜在加热下互相作用而制得，也可由酸与亚硫酸盐（例如，亚硫酸钠）作用而更方便地制得。

【三氧化二铝】分子式 Al_2O_3 ，分子量101.96，白色粉末。密度3.5—4.1克/厘米³（取决于晶形），熔点2050℃，沸点2980℃，极易吸水。 Al_2O_3 既能溶于酸而生成相应的铝盐，又能溶于碱而生成铝酸盐。铝矾土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ）是铝在自然界中存在的主要矿石。以 Al_2O_3 为原料，可制取单质铝（电解法）和铝的其他化合物。三氧化二铝在自然界中以结晶状态存在的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 称为刚玉。刚玉在硬度上仅次于金刚石。一般氧化铝晶体不透明，常因含杂质而使它呈鲜明的颜色。将矾土在电炉中熔化，可以得到人造宝石，用做机器的轴承，手表中的钻石等。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 化学性质极不活泼，除溶于熔融的碱外，与所有试剂都不反应。 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 可溶于稀酸，又称为活性氧化铝。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是两种晶体结构不同的氧化物。实验室制备氧化铝可在高温下分解铝铵矾制得；将试剂 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在850—900℃下灼烧3小时，同样可制得 Al_2O_3 。

【酸】能电离出氢离子 H^+ 的化合物，具有酸味，能与多种活泼金属反应生成氢气和盐，和碱发生中和反应生成盐和水，和某些金属氧化物反应生成盐和水，能使某些有机化合物变色（如使紫色的石蕊变红）。人类对酸的认识经历了由感性到理性的漫长过程。早年把具酸味的物质称为酸，随着研究的深入，逐渐从酸内在结构特征及与其性质的关系上认识它。根据历史形成的酸碱理论，酸

定义为：1. 溶于水放出氢离子 H^+ 的物质 (S、Arrjenius, 水离子论)；2. 离解出溶剂正离子 H^+ 的物质 (E、C、Framklin 溶剂论)；3. 能给出质子 (H^+) 的物质 (J. N. Bronsted 和 T. M. Lowry, 质子论)；4. 形成共价键对能接受电子对的物质 (G. N. Lewis, 电子论)。根据酸中含氧的情况, 可分为无氧酸含氧酸, 此外还有同多酸、杂多酸和取代酸等。常见的无氧酸为水溶液呈酸性的氢化物 (严格应称为某化氢, 如氯化氢即盐酸), 含氧酸是元素与氢、氧构成的三元或三元以上的化合物, 一般称为某酸, 此外还按其组成情况冠以“过”、“高”、“正”、“亚”、“次”、“原”、“偏”、和“焦”或“重”等限定词, 以硫酸为例, “正宗”的是(正)硫酸 (H_2SO_4), 还有过(一)硫酸 (H_2SO_5)、过二硫酸 (H_2SO_8)、亚硫酸 (H_2SO_3)、次硫酸 (H_2SO_2) 和硫代硫酸 ($H_2S_2O_3$) 等, 按照酸中可电离氢离子数目, 可分为一元酸 (如硝酸 HNO_3)、二元酸 (如硫酸 H_2SO_4) 和三元酸 (如磷酸 H_3PO_4), 如此等等。根据酸溶解在水中的电离度大小, 可相对地分为强酸、中强酸和弱酸, 通常用氢离子指数, 即 pH 值 [$pH = -\log (H^+)$] 来表征其强度。酸的 pH 值小于 7, 其值越小, 则酸越强。常见的强酸有硫酸、盐酸和硝酸等, 一份体积的浓硝酸和三份体积的浓盐酸的混合物具有极强的腐蚀性, 能溶解金和铂, 称为王水。常见的弱酸有碳酸 (H_2CO_3)、醋酸 ($C_2H_4O_2$) 和剧毒的氢氰酸 (HCN) 等。强度介于两者之间的中强酸有磷酸 (H_3PO_4)、亚硫酸 (H_2SO_3) 和亚硝酸 (HNO_2) 等。酸在人类生活中有广泛的用途, 也是其它生产过程中主要原料, 酸的制造是相应的重要工业部门。

【硫酸】分子式 H_2SO_4 , 分子量 98.08。无色油状液体, 在 $0^\circ C$ 时密度为 1.859克/厘米^3 , $20^\circ C$ 时密度为 1.834克/厘米^3 。冷却时可凝结为

结晶，它于 10.37°C 时熔融。但液体酸易过冷，在 0°C 以下可能仍不凝固。在 $30\text{—}40^{\circ}\text{C}$ 时硫酸开始发烟，进一步加热时则释放出 SO_3 气体，于 290°C 时开始沸腾，并且温度迅速上升，直到不再释出 SO_3 为止，剩下含有98.3%的 H_2SO_4 的水合物，于 330°C 时沸腾。浓 H_2SO_4 能强烈地吸水，因而为优良干燥剂，在 H_2SO_4 上方的水蒸气压力仅为 0.003mmHg 。硫酸与水混合时放出大量的热，稀释硫酸时，应将浓硫酸慢慢倒入水中，并加搅拌，不宜将水倒入浓硫酸中。浓硫酸是强氧化剂，在加热情况下，能氧化许多金属。一些非金属如碳和硫等，也能被浓硫酸氧化成二氧化碳、二氧化硫，硫酸本身被还原成二氧化硫。近代工业中制造硫酸主要采用接触法。以 V_2O_5 为催化剂，在 450°C 左右把 SO_2 和空气的混合物通过催化剂， SO_2 即被氧化成 SO_3 。生成的 SO_3 用浓硫酸吸收。将 SO_3 溶解在100%的 H_2SO_4 中，得到发烟硫酸。硫酸是基本化学工业中最重要的产品之一，化肥工业用硫酸制造硫酸钙和硫酸铵。有机化学工业中用硫酸进行磺化反应。此外，硫酸还大量用于炸药的生产，石油和炼焦油产品的精炼上，以及制造各种矾和颜料等。硫酸沸点高，挥发性很小，可用来生产其他较易挥发的酸，如盐酸和硝酸。

【盐酸】分子式 HCl ，分子量36.46。盐酸系氯化氢的水溶液。氯化氢是具有强烈刺激气味的无色气体。 17°C 时比重为1.264（对空气）。在标准状态下，1升气体重1.639克。熔点 -114.2°C ，沸点 -85.1°C ，临界温度 -51.25°C ，临界压力86bar。在 -113°C 时液态 HCl 密度为 1.267克/厘米^3 ，在湿空气中由于形成了极细小的盐酸液滴而形成雾状。氯化氢极易溶于水（ 0°C 时为45%， 18°C 时为42.3%）并释放出大量热。在通常情况下，一体积水能吸收约450 C 体积的氯化氢，而且溶解时放出的热可达到72.8千焦/摩。纯盐酸

为无色溶液，有氯化氢的刺激性气味。一般浓盐酸的浓度约为37%，密度为1.19克/厘米³。工业用的盐酸浓度约30%左右，由于含有杂质（主要是FeCl₃）而带黄色。工业上使氢气在氯气中燃烧，生成的氯化氢用水吸收，便得到合成盐酸。盐酸是最重要的强酸之一，能与许多金属反应放出氢气并生成相应的氯化物。盐酸也能与许多金属氧化物反应生成盐和水。盐酸常用来制备金属氯化物，同时在皮革工业、食品工业以及轧钢、焊接、电镀、搪瓷、医药等部分也有广泛的应用。

【硝酸】分子式HNO₃，分子量是63.01，无色液体，密度1.526克/厘米³（15℃）。纯硝酸是无色液体，密度为1.53克/厘米³，沸点为86℃，凝固点为-41℃。浓硝酸很不稳定，受热或光照时，易分解放出NO₂，因此，硝酸中由于含有NO₂而常常带黄色或红棕色。实验室中用的浓硝酸约含HNO₃为69%，密度为1.4克/厘米³。浓度在86%以上的硝酸，由于硝酸的挥发而产生白烟，通常称为发烟硝酸。溶有过量二氧化氮的浓硝酸发生红烟，可作火箭燃料的氧化剂。硝酸是一种强酸，在水溶液中，完全电离。但是由于它有强烈的氧化性，很难利用硝酸来制取氢气。酯化反应是利用硝酸的酸性。硝酸具有强的氧化性。它可以把许多非金属单质氧化成相应的酸。例如碳、磷、硫、碘等和硝酸共煮时依次氧化成二氧化碳、磷酸、硫酸和碘酸，而硝酸则被还原为NO。除了金，铂和某些稀有金属外，硝酸几乎对所有金属都能起作用，把它们变成硝酸盐。浓硝酸易与金属表面作用，而产生一层薄而致密的氧化物（钝化膜），使金属不能与酸继续作用。硝酸还有硝化性，即把-NO₂基团（硝基）引入有机化合物分子中。硝酸是工业上重要的无机酸之一。目前普遍采用氨氧化法制取硝酸，即将氨和空气的混合气体通过

灼热 (800℃) 的铂丝网 (催化剂), 氮被氧化成 NO, NO 被氧化为 NO₂, 后者再与水发生歧化反应而生成 HNO₃。用硫酸与硝石 NaNO₃ 共热也可制得硝酸。

【王水】 浓硝酸和浓盐酸的混合物 (体积比1:3), 无色, 但会迅速变黄。腐蚀性极强, 有氯气味。由于它有很强的氧化能力, 故常用作不活泼金属 (Au, Pt) 及一些难溶物质的溶剂。王水中实际上存在着几种强氧化剂: 硝酸、氯和氯化亚硝酰。

【高氯酸】 分子式 HClO₄, 分子量100.46, 是所有已知酸中最强的酸。它是无色强烈发烟的流动性液体, 极易吸潮。即使很稀的 HClO₄ 也具有强烈酸味。密度1.768克/厘米³ (22℃), 熔点-112℃, 沸点16℃ (18mmHg 时)。用高氯酸钾和硫酸在减压下蒸馏可以制得高氯酸。无水的高氯酸是无色液体、不稳定。贮存时必须远离有机物质, 否则接触后易引起爆炸。HClO₄ 的水溶液较稳定, 它的氧化性不及 HClO₃。高氯酸可用作制备醋酸纤维的催化剂。高氯酸钾常用于制造炸药。工业上用电解 KClO₃ 的溶液来制取 KClO₄。高氯酸若溅在皮肤上, 能招致疼痛的灼伤。与可燃性物 (碳、纸等) 接触时则猛烈爆炸。加热甚至贮存 (即使在暗处) 时也往往会分解而发生爆炸。但使用其水溶液并无危险。

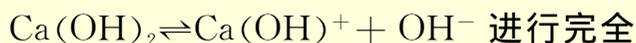
【次氯酸】 分子式 HClO, 分子量52.46。仅存在于溶液中。其浓溶液呈黄色, 稀溶液则无色, 具有强烈的刺激性气味。氯和水作用, 发生水解反应可生成次氯酸。次氯酸是很弱的酸 ($K=3.2 \times 10^{-8}$), 比碳酸还弱, 只能存在于稀溶液中而不能制得浓酸。即使在稀溶液中它也很容易分解, 它在光的作用下分解得更快。当加热时, 次氯

酸按另一方式分解（歧化），成为氯酸和盐酸。因此只有通氯气于冷水中才能获得次氯酸。次氯酸是很强的氧化剂。氯气的漂白性就是由于它与水作用而生成次氯酸的缘故，完全干燥的氯气没有漂白能力。次氯酸作氧化剂时，本身被还原为 Cl^- 。

【碱】能电离出氢氧根离子 OH^- 的化合物，具有涩味，能与酸发生中和反应生成盐和水，能和多数非金属氧化物反应生成盐和水，能使某些有机化合物变色（如使紫色的石蕊变蓝）。人类对碱的认识经历了由感性到理性的漫长过程。早年把植物灰分中提取的、具有涩味和滑腻感的物质称为碱。随着研究的深入，逐渐从碱的内在结构特征及与其性质的关系认识它。根据历史形成酸碱理论，碱的定义为：1. 溶于水放出氢氧根离子 OH^- 的物质（溶剂论）；2. 离解出溶剂负离子 OH^- 的物质（溶剂论）；3. 能结合质子的物质（质子论）；4. 形成共价键时能给出电子对的物质（电子论）。根据碱中含氧的情况，可分为无氧碱和含氧碱。无氧碱的通式是 RH_n ，常见的有叠氢化氮（ NH_3 ），通常称为氨。绝大多数碱含氢氧根，是含氧碱，一般称为“氢氧化某（元素名）”，其通式为 $\text{R}(\text{OH})_n$ 。按碱中氢氧根的数目，可分为一元碱（如氢氧化钠 NaOH ），二元碱（如氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）等。根据碱在水中的电离度大小，可分为强碱、中强碱和弱碱。碱的强度可用氢氧根离子的指数，即 pOH 值 [$\text{pOH} = -\log(\text{OH}^-) = 14 - \text{pH}$] 表征，而更常与酸一样统一用 pH 值表征。 pOH 值越小（或 pH 值越大），则碱性越强，常见的强碱有氢氧化钠（ NaOH ）和氢氧化钾（ KOH ），氨则是典型的弱碱，而氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）和氢氧化钡（ $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ）可认为是中强碱。碱是一类重要的化合物，其中氢氧化钠（俗称烧碱）、氢氧化钙（俗称石灰或消石灰）和氨等用途尤广。

【氢氧化钠】分子式 NaOH ，分子量40.00，无色晶体物质，密度2.130克/厘米³。在空气中很快吸收 CO_2 和水分，随即潮解并转变为 Na_2CO_3 。熔点326.7—328.5℃，沸点1390℃。易溶于水（18℃时为51.7%）；易溶于乙醇；不溶于乙醚。在-8℃下自其高浓度的水溶液中可析出大粒的单斜晶系水合结晶 $\text{NaOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 。 NaOH 是优良的干燥剂。 NaOH 浓溶液可由碳酸钠和氢氧化钙相互作用而制得，或者将金属钠溶于乙醇中，然后再用水稀释即可制得。

【氢氧化钙】分子式 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，分子量74.09，白色粉末，密度2.24克/厘米³。在空气中能吸收 CO_2 转变为 CaCO_3 ，颇难溶于水（25℃时为0.148%， $K_{\text{SP}}=3.1\times 10^{-5}$ ）。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在水中的悬浊液称为“石灰乳”。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为强碱，在水溶液中分两步离解：



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液（石灰水）是无色、无嗅的透明液体，呈强碱性反应，极易吸收空气中的 CO_2 而生成白色 CaCO_3 沉淀。用强碱同钙盐相互作用可制得相当纯的氢氧化钙；纯的制剂也可由水与氧化钙作用制得。

【盐】酸的一个或几个氢离子被碱的一个或几个阳离子置换生成的化合物叫做盐。最普通的例子是氯化钠，它是盐酸的氢离子被氢氧化钠的钠离子置换生成的。盐按几种方法分类。其中一种方法将盐分为正盐、酸式盐和碱式盐，它是按照酸的所有氢离子或碱的所有氢氧离子是否被置换来区分的。另一种方法，是将盐分为简单盐、复盐（包括矾）和络盐，它是按照电离完全的程度来区分的。

通常，所有的盐类在溶液中每一种金属离子都能产生离子，但也有例外，如 $K_3Fe(CN)_6$ 和 $K_2Cr_2O_7$ 这种盐，因为 Fe^{3+} 或 Cr^{3+} 在络离子中有强的键合。有些正盐的溶液呈中性，但另一些则呈酸性或碱性。这是由于盐的离子与水发生了反应，这一反应称为水解。所得溶液是酸性还是碱性，要根据水解产生了过量的氢离子还是过量的氢氧根离子而定。

【酸式盐】可电离出氢离子的盐，通常是酸中的氢离子部分被中和的产物，如碳酸氢钠 ($NaHCO_3$)、硫酸氢钾 ($KHSO_4$) 等。酸式盐的命名是在相应酸的名称后面加“氢”字，也可在其相应的正盐前面冠以“酸式”二字，如 $NaHCO_3$ 又称为酸式碳酸钠，而电离出的阴离子则称为某酸氢根离子，如 HCO_3^- 称为碳酸氢根离子。若在酸式盐中含有两个以上可电离的氢，命名时用相应的数字表明，如 NaH_2PO_4 称为磷酸二氢钠。多数酸式盐在水中的溶解度大于相应的正盐。酸式盐溶液可呈酸性，也可呈碱性，其酸碱性取决于该酸式根给出或接受质子的倾向强弱，“给出”强于“接受”，水溶液呈酸性，如磷酸二氢钠；反之则呈碱性，如碳酸氢钠。酸式盐有广泛的用途，碳酸氢钠（又称小苏打）在工业上和日常生活中用作发泡剂等，碳酸氢铵可做肥料，磷酸氢盐是肥料的主要成份。

【碱式盐】含有羟基或氧基的盐，如自然界的羟基磷灰石 $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ 和孔雀绿 $CuCOH)_2 \cdot CuCO_3$ 等。命名时，羟基用“羟”、氧基用“氧化”表示，其数目用一、二、三表示，“一”可省略，如碘酸羟铜 $Cu(OH)IO_3$ 。许多碱式盐的溶解度都不大。某些碱式盐的组成因制备条件不同而异。例如，在封闭管中将硫酸铜溶液和碳酸钙混合物加热到 423—443K 得 $Ca(OH)_2 \cdot CuCO_3$ ，而

在较低温度下生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3$ 。

【氯化钠】食盐的主要成份，分子式为 NaCl ，分子量58.443，立方型或粉末状白色离子型晶体，密度为2.17克/厘米³，熔点为801℃，沸点1413℃，熔融时具强导电性。易溶于水，溶解度随温度升高略增大，在20℃时为每100克水36克，水溶液为中性强电解质，在温度低于0.15℃时可结晶出二水合氯化钠 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。纯净的氯化钙在空气中不易潮解，粗盐因含有氯化镁和氯化钙等杂质而易潮解。氯化钠大量存在于海水、盐湖、盐池、盐井和盐矿中，可从中提取，是最有价值的化合物之一，对生命活动极其重要，在工业上也必不可少，被用来生产氢、氯、氢氧化钠、金属钠、碳酸钠以及各种氯酸盐、次氯酸盐、漂白粉和生理盐水等，在工业、农业、医学和日常生活都有广泛的用途。

【卤化银】包括氯化银（分子式 AgCl ，分子量143.32）、溴化银（分子式 AgBr ，分子量187.78）、碘化银（分子式 AgI ，分子量234.77）。氯化银为白色无定型粉末，密度5.56克/厘米³，熔点455℃，熔融盐冷却时即凝结为角状物质，沸点1559℃，不溶于水和稀酸，颇易溶于沸腾下的浓盐酸，稍溶于 NaCl 和 NH_4Cl 的浓溶液，易溶于 NH_4OH 中。氯化银有光敏性。溴化银为黄白色粉末，密度为6.453克/厘米³，430℃时熔融而成微红色液体。几乎不溶于水和稀酸；微溶于 NH_4OH 和哌啶中。对光很敏感。碘化银为浅黄色无定型粉末，密度5.67克/厘米³，在556.8℃时熔融成黄色液体，在更高的温度下则转变为红棕色。沸点1506℃。几乎不溶于水、 NH_4OH 和稀酸；能溶于 KI 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的浓溶液和甲胺中，也具有光敏性。在卤化银中，离子间的相互极化作用依次增强，在 AgI 中

出现了明显的共价性。 AgCl 、 AgBr 、 AgI 均难溶于水，溶解度依次降低；氟离子因为难变形， Ag^+ 与 F^- 之间极化作用不显著， AgF 易溶于水。

【碳酸钠】 俗名纯碱或苏打，分子式为 Na_2CO_3 ，分子量105.99，白色粉末，密度2.532克/厘米³，熔点851℃，热稳定性高，高温下能对许多稳定物质产生碱解作用。除无水碳酸钠外，还有几种水合盐，如一水、七水和十水碳酸钠等。常见的碳酸钠晶体是十水碳酸钠 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)，它在空气里容易失去结晶水，使表面失去光泽并碎裂成粉末，碳酸钠可从自然界开采，但绝大多数是采用氨碱法（亦称苏尔维法），以石灰石、氯化钠、氨和水为原料制造的。碳酸钠是化学工业的重要产品，广泛用于冶金、纺织、造纸、玻璃、食品和肥皂等工业部门，在医疗卫生和日常生活中也经常使用。

【硅酸盐】 各种硅酸所对应的盐，即硅、氧与金属（主要是铝，铁，钙，镁，钾，钠等）结合而成的化合物的总称。是构成地壳岩石的最主要成分。种类多，结构复杂，大都是晶体，熔点高，不溶于水，具有良好的化学稳定性、机械强度和耐火度。不仅是硅酸盐工业的主要原料，也是建筑工业的重要材料。另外，碱金属硅酸盐能溶于水，硅酸钠是一种重要化工原料。

【陶瓷】 见第五卷硅酸盐工业中的“陶瓷”。

【玻璃】 见第五卷硅酸盐工业中的“玻璃”。

【酞】可分为酸酞、碱酞和有机酞。酸酞可由无机含氧酸脱水后生成，如 SO_3 、 N_2O_3 、 P_4O_{10} 分别为 H_2SO_4 、 HNO_3 及 H_3PO_4 的酸酞。碱酞可由碱脱水后生成，如 CaO 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱酞。有机酞为酸酞，它是由羧酸加热脱水后生成。用有机羧酸进行缩水可得到有机酸酞。含两个相同的 R 基的酸酞叫简单有机酸酞；含两个不同的 R 基的酸酞叫混合有机酸酞；仅由有机羧酸分子内缩水而成的叫内酞。

【三氧化硫】分子式 SO_3 ，分子量 80.06。常温下是无色液体或白色固体，凝固点是 16.8°C 。在实验室中可以用发烟硫酸或焦硫酸加热而得 SO_3 。当有催化剂 (V_2O_5) 存在时， SO_2 能被氧化为 SO_3 。 SO_3 极易与水化合成 H_2SO_4 ，同时放出大量的热。因此， SO_3 在潮湿的空气中挥发呈雾状。气相 SO_3 为单分子。固相 SO_3 有几种聚合晶型，其中最重要的是 α 型和 β 型。 α 型晶体与冰的结构相似，其中 SO_3 为三聚分子。 β 型晶体与石棉的结构相似， SO_3 原子团互相连成长链。这两种类型的晶体只是其中的 SO_3 分子排列方式不同。

【氧化钙】分子式 CaO ，分子量 56.08，也叫生石灰，白色粉末或细小透明的立方体晶体。密度 3.37克/厘米^3 ，熔点 $2560\text{—}2600^\circ\text{C}$ ，沸点 2850°C 。在空气中可以吸收水分和二氧化碳，变为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，同时体积大为膨胀，继而变为 CaCO_3 。结晶 CaO 则较难和水与二氧化碳作用。由于氧化钙有强烈的吸水性，可以用作气体干燥剂。若湿空气中，在氧化钙上方保持一段时间后，每升空气中只含水 0.2 毫克。 CaO 与水作用时放出大量的热并转变为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。制备时，可取纯的大理石块或碳酸钙（分析纯）于 $970\text{—}1050^\circ\text{C}$ 煅烧 2—3 小时即得。

【配位化合物】即配合物，由中心原子与周围的配位体分子或离子组成。中心原子也可能是离子。中心原子与周围配位体分子或离子间由配位键结合起来。中心原子为离子时，常为有空轨道的金属过渡元素的离子，有时也可能为分子或原子。配位原子的数目叫中心离子的配位数。一个配位体内可以有多个配位原子。中心原子常带正电，配位体带负电。配合物可能是中性分子。如中心原子的正电量不等于配位体的负电量，则形成配位的正离子或负离子，此时又可与酸根，金属离子或氢离子再组成配合物。最常见的配合物空间结构为八面体或四面体。

【络合物】含义有二：一种为分子中含有配位键的化合物，称为配合物；另一种是由特有的反应生成物，称为复合物（即复杂化合物），如碘与淀粉生成的蓝色物质，复合物中不含配位键。

【螯合物】具有环状结构的配合物，由具有两个或多个配位体与同一金属离子形成螯合环的化学反应——螯合作用而得到。配体和金属离子间的配位键通常有两种类型：（1）配体上酸的基团离解去 H^+ ，然后与金属离子配位；（2）配体上含有孤电子对的中性基团与金属离子配位。螯合物最显著的一种特性是其热力学稳定性和热稳定性。螯合环的稳定性与芳香环相似。螯合物可为不带电荷的中性分子，也可为带电的络离子，前者易溶于有机溶液中，后者可溶于水中，此性质可用于分离和分析金属离子。金属离子与配体形成螯合物的一般原则是软硬酸碱理论，就是：硬酸亲硬碱，软酸亲软碱。金属离子与多多齿配体生成的螯合物，比它与单齿配体生成的类似配合物有较高的稳定性。这是由于要同时断开螯合剂

配位于金属上的两个键是困难的。由螯合作用得到的某些金属螯合剂用途很广，例如 EDTA 为六齿螯合剂，可用于水软化，食物保存等方面；环状配体冠醚类对碱金属和碱土金属的分离和分析特别适用。

【水合物】又称结晶水合物。含有结晶水的物质。常见的结晶水合物有蓝矾 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、绿矾 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、明矾 $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ 、石膏 $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等。结晶水合物中的水，常以水分子形式存在，并以不同的方式结合。水在有些结晶水合物中没有一定的比例，如泡沸石、硅酸盐矿石等。有些无水盐在空气中吸收水分形成结晶水合物，如硫酸铜、氯化钙等。结晶水合物在受热时，易失去结晶水，有显著的吸热效应。有些结晶水合物常发生风化现象。

【氨配合物】氨与金属离子的配合化合物。可由氨与金属盐相互作用而生成，如 $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ 、 $[\text{Cr}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ 、 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$ 、 $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{Cl}$ 等。在元素分离中用作为沉淀剂，或用于鉴定金属元素。

【银氨络合物】又称土伦试剂，用硝酸银和氢氧化氨配制而成。是稳定的二配位配位化合物。在碱性溶液中能使醛或还原糖氧化，而本身变成金属银沉淀于试管的壁上（称作银镜反应）。用于区别醛和酮的还原糖和非还原糖，也用于玻璃涂银。

【无机聚合物】即聚合状态的无机化合物，可分为两类：均键聚合物，主键中仅有一种元素的聚合物，如多硫化氢；杂链聚合物，主

链中有一种以上元素的聚合物,如云母、硅酸盐等。无机聚合物呈固态时可稳定存在,在溶液中常解聚成低分子物质。

【两性化合物】化学性质兼有酸性和碱性。铝、三价铬、锌、二价锡、铅、铋、砷、金和铂的氢氧化物或氧化物是大家熟悉的两性物质。许多有机分子既含有羧基(酸性)又含有氨基(碱性),也是两性的。如甘氨酸($\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CO}_2\text{H}$)。在水溶液中羧基解离产生一个氢离子,这时在分子的一端留下一个负电荷,在同一分子的另一端氨基接受一个质子,因而获得一个正电荷结果得到两性离子($^+\text{NH}_4-\text{CH}_2-\text{CO}_2^-$)。含有这种离子的溶液阻止 $[\text{H}_3\text{O}^+]$ 的增大或减小,因为离子是两性的。

【混合物】由两种或两种以上不同化学组分组成的一个集合体。每一种组分不管它们混合的程度如何,都保持其原有的性质。组成物可以以任何比例存在,并且能形成均相体系或非均相体系。混合物的组分之间不起化学反应,用物理方法,至少在理论上,可以把它们分开。可是,由于不同组成物之间相互吸引或排斥,可影响集合体的整体特性。例如,由几种液体形成的一种混合物,它的总体积就不等于各个液体的分体积之和。

【有机化合物】简称为有机物。含碳化合物的总称,但习惯上将简单含碳化合物(如一氧化碳、二氧化碳、碳酸盐等)除外。可由石油、天然气、动物、植物等分离而得到。按分子结构不同可分为开链化合物、碳环化合物、杂环化合物三种。按官能团的不同可分为醇、醚、醛、酮、酸等。有机化合物种类繁多,大都可燃,有较大的挥发性,燃点、沸点都较低。

【炷】分子中只含有碳和氢两种元素的有机化合物叫做碳氢化合物，简称炷。根据炷分子中碳原子间连接方式，炷可分为两大类：开链炷和闭链炷。开链炷分子中碳原子连结成链状，简称链炷，又叫脂肪炷。脂肪炷又可分为烷炷、烯炷、二烯炷、炔炷等。闭链炷分子中碳原子连结成闭合的碳环，又称为环炷，环炷又可分为脂环炷和芳香炷两大类。炷是最简单的有机化合物，可以看作是其它有机化合物的母体，其他有机化合物可以看作是炷的衍生物。

【脂肪炷】又称链炷或脂链炷。炷分子中不含有闭合的碳环。因脂肪是链炷的衍生物，故名。脂肪炷包括烷炷、烯炷、炔炷等脂链炷及其分子中的一个或多个氢原子被其它原子或原子团取代而生成的衍生物。

【烷炷】碳原子间以单键相连接的链状碳氢化合物的统称。“烷”表示碳原子间没有不饱和键。通式为 C_nH_{2n+2} 。存在于天然气和石油内。不溶于水，室温下 $C_1—C_4$ 的烷炷为气体， $C_5—C_{15}$ 的为液体， C_{16} 以上的则是固体。一般情形下性质稳定，但在适当的温度、压力及催化剂的作用下，可发生取代、氧化、硝化、裂解和异构化等反应。烷炷内的氢原子可以逐级被甲基取代，因而同数碳原子的烷炷有众多的异构体。例如戊烷的异构体有3个，壬烷有35个，而含30个碳原子的烷炷的异构体数目高达 4.11×10^9 个。从理论上讲，烷炷的碳原子数目可以无限地大，但目前已知最大的是 $C_{92}H_{180}$ 。石油和天然气中含有大量饱和炷，但很难分离出纯的某一烷炷。要得到纯烷炷。可由卤代烷与金属钠反应或以氢碘酸还原卤代烷制得。格氏试剂与水反应后可以得到纯的烷炷。烷炷主要用作燃料、溶剂

和有机合成的原料。

【甲烷】最简单的烃。物理方法测得甲烷分子为一正四面体结构，碳原子居于正四面体中心，和碳原子相连的四个氢原子，居于四面体的四个角，四个碳氢键键长都为 1.10 \AA ，所有H—C—H的键角都是 109.5° 。分子式为 CH_4 ，分子量16.04。甲烷为无色无臭的易燃气体；熔点 -182°C ，沸点 -164°C ，相对密度0.5547 (0°C)；在水中的溶解度很小，易溶于乙醇和乙醚。甲烷在空气中燃烧，能生成二氧化碳和水，并放出大量的热。空气中含有甲烷5—15.4%（体积）时，遇火或电火花能猛烈爆炸。甲烷部分燃烧，或在高温和催化剂存在下与水蒸汽作用，生成一氧化碳和氢的混合物，即所谓“合成气”，可以作为合成甲醇的原料。合成气继续与水蒸汽作用，则生成二氧化碳和较多的氢。用氢氧化钠吸收二氧化碳后得到的氢气可以作为合成氨的原料。甲烷在高温下热解生成乙炔。实验室内用乙酸钠与氢氧化钠作用或以氢氧化锂、铝或氢化锂还原碘甲烷可获得甲烷。工业上甲烷的来源主要是天然气、油田气、石油裂解气、焦炉气等。

【乙烷】简单的含碳-碳单键的烃，分子式 CH_3CH_3 。乙烷在某些天然气中含量为5—10%，次于甲烷，并以溶解状态存于石油中。乙烷为无色无臭易燃气体，熔点 -183.3°C ，沸点 -88.6°C ，相对密度0.572 ($-100/4^\circ\text{C}$)。在高温下分解为乙烯和氢。在不同条件下加热氯化，可得到氯乙烷、1、1-二氯乙烷或1-1-1三氯乙烷。乙烷与硝酸在气相反应，生成硝基乙烷和硝基甲烷。后一产物说明在这个反应中发生了碳-碳键的断裂。乙烷在实验室中可由乙酸钠电解制备。工业上由天然气或炼油厂的裂化气中分离制取。主要用作生产

乙烯的原料。

【丙烷】化学式 C_3H_8 ，一种无色无臭的易燃气体烷烃。熔点 -189.7°C ，沸点 -42.1°C ，相对密度 0.5853 ($-45/4^\circ\text{C}$)；不溶于水，可溶于有机溶剂，在低温下易与水生成固态水合物，引起天然气管道的堵塞。在通常情况下，比较稳定，不能被氧化剂（如 $KMnO_4$ ）氧化，也不能跟强酸（如 H_2SO_4 ， HNO_3 ）或强碱（如 $NaOH$ ）起反应。在较高温度下，与过量氯气作用，生成四氯化碳和四氯乙烯。在气相与硝酸作用，生成1-硝基丙烷、2-硝基丙烷、硝基乙烷和硝基甲烷的混合物。工业上丙烷可从油田气和裂化气中分离得到。可作生产乙烯和丙烯的原料或炼油工业中的溶剂；丙烷、丁烷和少量乙烷的混合物液化后可用作民用燃料，即液化石油气。

【丁烷】分子式 C_4H_{10} 。有两种异构体：(1)正丁烷 $CH_3CH_2CH_2CH_3$ ，存在于石油气、天然气和催化裂化气中。无色气体，比重 0.5730 ($25/4^\circ\text{C}$)，熔点 -135°C ，沸点 -0.5°C 。与空气形成爆炸性混合物，爆炸极限 $1.6\%—8.5\%$ （体积）。主要用途可以脱氢制丁二烯，也可与硫起反应生成噻吩等。(2)异丁烷 $CH_3 \begin{array}{c} CH \\ | \\ CH_3 \end{array} CH_3$ 存在于石油气、天然气和裂化气中，也可由正丁烷异构化而制得。无色气体，比重 0.5510 ($25/4^\circ\text{C}$)，熔点 -145°C ，沸点 -11.73° 。微溶于水，性质稳定，与空气形成爆炸性混合物，爆炸极限 $1.9\%—8.4\%$ （体积）。主要用于与异丁烯经烃化而制异辛烷。作为汽油辛烷值的改进剂。也可用作冷冻剂。

【十六烷】分子式为 $C_{16}H_{34}$ ，系灰色液体，熔点为 $18.2^{\circ}C$ ，沸点为 $287.15^{\circ}C$ ，密度为 0.7733克/厘米^3 。常用于测定柴油发动机中柴油燃烧充分与否。

【环己烷】分子式为 C_6H_{12} ，又称为六氢化苯。为无色液体，沸点为 $80.7^{\circ}C$ ，密度 0.7785克/厘米^3 ($20/4^{\circ}C$)，易燃。可从裂化石油中提取，用于尼龙工业。涂料工业中。

【环氧乙烷】又称氧化乙烯。分子式 C_2H_4O 。一种最简单的环氧化合物或环醚。由乙烯间接或直接氧化制得。无色易燃气体，有毒，沸点 $10.7^{\circ}C$ ，相对密度 0.8824 ($10/10^{\circ}C$)，溶于水和乙醇、乙醚等有机溶剂。化学性质活泼，能与许多化合物起加成反应。是重要的有机合成原料。用于制乙二醇、合成洗涤剂、乳化剂、抗冻剂。还可用作仓库的重蒸剂。

【烯烃】又叫饱和烃。一类含有碳碳双键的碳氢化合物的总称，其分子式通式为 C_nH_{2n} 。含2至4个碳原子的烯烃为气体，含5至15个碳原子的烯烃为液体，含16个以上碳原子的烯烃为固体。烯烃可燃，燃烧时火焰明亮。不溶于水，但可溶于乙醇、乙醚等有机溶剂。化学性质较活泼，可发生聚合，缩合、氧化等反应，与卤素、无机酸、强有机酸、氢、乙硼烷等发生加成反应。工业上可由热能天然气和石油而得到各种烯烃。烯烃是重要的化工原料。

【乙烯】见第二卷植物激素中的“乙烯”。

【丙烯】分子式为 $CH_3CH=CH_2$ ，为无色易燃气体，熔点为一

185.2℃，沸点为-47.64℃，液态时密度为0.5193克/厘米³（20/4℃）。为重要有机工业原料。丙烯与异丁烷反应后生成高辛烷值燃料；丙烯与氨、氧反应后可生成丙烯腈，是合成橡胶、塑料和化纤等的原料。

【丁二烯】即1,3-丁二烯。具有共轭双键的最简单烯烃。为无色气体，熔点为-108.9℃，沸点为-4.4℃。略溶于水，溶于甲醇、乙醇，易溶于乙醚、丙酮、苯、氯仿等有机溶剂。容易与卤素和卤化氢等发生加成反应。工业上可用丁烷或丁烯加催化剂去氢、或从乙烯生产的副产物C₄馏分中提取而获得。常用于生产ABS树脂，是塑料工业的重要原料。其化学式为CH₂=CH-CH=CH₂。

【异戊二烯】即2-甲基-1,3-丁二烯。为无色液体，熔点为-146℃，沸点为34℃，密度为0.681克/厘米³（20/4℃）。不溶于水，可溶于苯，乙醇、乙醚等。工业上高温热裂石油气、或将异戊烷脱氢、或使异戊烯通过热的Cr₂O₃-Al₂O₃、或将乙炔与丙酮缩合、或蒸馏天然橡胶均可得到，主要用于橡胶合成。贮存时需加入微量对苯二酚使之稳定，否则易发生聚合反应。其化学式为CH₂=C-CH=CH₂。

【炔烃】为分子中含有碳碳三键的碳氢化合物的总称，其分子通式为C_nH_{2n-2}，是一种不饱和的碳氢化合物。简单的炔烃的熔点、沸点，密度均比具有相同碳原子数的烷烃或烯烃高一些。不易溶于水，易溶于乙醚、苯、四氯化碳等有机溶剂中。炔烃可以和卤素、氢、卤化氢、水发生加成反应，也可发生聚合反应。

【乙炔】即电石气。分子式为 C_2H_2 ，为无色气体，易燃，纯乙炔有芳香味，工业生产的乙炔由于有磷化氢等杂质而有恶臭。稍溶于水，可溶于乙酸、乙醇、乙醚和苯等有机溶剂中。乙炔在氧气中燃烧形成乙炔焰，温度可高达 $3200^{\circ}C$ 左右，可用来切割或焊接金属构件。乙炔的化学性质十分活泼，可与许多物质化合，生成重要的化工产品。工业上可用甲烷制备乙炔，也可由碳化钙（俗称电石）水解得到乙炔。乙炔极易爆炸，故不运输或贮藏乙炔，但乙炔可溶于丙酮，溶解度为237克/升，且溶液较稳定。

【氯乙烯】一种高分子工业的重要的基本的原材料，其化学式为 $CH_2=CHCl$ 。为无色气体，易液化，熔点为 $-153.8^{\circ}C$ ，沸点为 $-13.4^{\circ}C$ ，相对密度为0.9106（ $20/4^{\circ}C$ ），难溶于水，可溶于乙醇、乙醚、丙酮等有机溶剂中，与空气混合时极易爆炸。工业上制法主要有二：一是从1,2二氯乙烷经高温处理脱去一个分子卤化氢而获得；二是由乙炔与氯化氢在高温下且有催化剂时生成。能与多种物质产生加成反应，也能和丁二烯、丙烯晴、醋酸乙烯和甲基丙烯甲脂等发生聚合。氯乙烯对人有麻醉作用，且可致癌，故在生产与使用时要有良好的通风。

【芳烃】分子中含苯环的化合物，可分为三类，即单环芳烃（如苯、甲苯、对甲苯等）、稠环芳烃（如萘、蒽、菲等）与多环芳烃（如联苯，三苯甲烷等）。芳烃可从煤焦油内取得，也可从石油加工中制取，芳烃不溶于水，但溶于非极性有机溶剂（如乙醚、四氯化碳、石油醚等）。一般芳烃均比同体积水轻、沸点随分子量升高而升高，熔点不只与分子量有关，而且与结构有关，一般说来在对位异构体中由于分子对称，熔点较高，溶解度较小。芳烃自然条件

下均为液态或固态物质。液态芳烃可作为有机溶剂。有的芳烃可诱发皮肤癌。

【苯】为无色液体，易燃，有特殊气味，熔点为 5.5°C ，沸点为 80°C ，相对密度为 0.8765 ($20/4^{\circ}\text{C}$)，分子式为 C_6H_6 。1865年德国化学家凯库勒首先提出苯的结构式为六角形环状结构，且单双键相间。苯的化学性质很稳定，能在高温下不被高锰酸钾所氧化。在低温下如无催化剂与溴，硫酸等也不发生作用，但是分子中的氢易为溴或磺基所取代，而产生卤代作用、硝化作用、磺化作用和付瑞达尔—克拉夫慈反应。苯的蒸汽与空气混合后易发生爆炸。长期接触苯可产生慢性中毒。工业上可从煤焦油中提取，或由石油催化重整分馏而得。可作为橡胶、化纤、染料、塑料、杀虫剂等工业的原料。

【甲苯】分子式为 $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ，为无色液体，易燃，熔点为 -95°C ，沸点为 110.6°C ，相对密度为 0.8669 ($20/4^{\circ}\text{C}$)，不溶于水，可溶于有机溶剂中。工业上从煤焦油中可提炼甲苯，或在石油催化重整分馏中提取甲苯。甲苯可作为有机溶剂；加到汽油中可提高其抗爆性能；由于甲苯的膨胀系数大，故可用来制造低温温度计；甲苯硝化后可生成2、4、6三硝基甲苯，又名TNT（梯恩梯）是一种最常见的炸药。

【二甲苯】分子式为 C_8H_{10} ，为无色液体，不溶于水，但可溶于多种有机溶液中。二甲苯存在于煤焦油与石油中，它有三种异构体，分别称为邻二甲苯，间二甲苯和对二甲苯。可用红外线光谱将三种异构体进行识别。它们是化纤，染料和指示剂等工业的重要原料。

【乙苯】分子式为 $C_6H_5C_2H_5$ ，为无色液体，熔点为 $-95^{\circ}C$ ，沸点为 $135.12^{\circ}C$ ，相对密度为 0.8670 ($20/4^{\circ}C$)，不溶于水，可溶于有机溶剂。工业上可从煤焦油中或石油中提取。乙苯可作为有机溶剂，加在汽油中可提高其抗爆性能，是橡胶工业与塑料工业的重要原材料。

【苯乙烯】化学式为 $C_6H_5CH=CH_2$ ，为无色气体，易燃，有香味，熔点为 $-30.6^{\circ}C$ ，沸点为 $145.2^{\circ}C$ ，相对密度为 0.9060 ($20/4^{\circ}C$)，不溶于水，可溶于有机溶剂中，在空气中能慢慢发生氧化，在室温下能缓慢聚合，能发生氢化反应与卤化反应。自然界中苯乙烯存在于苏合香脂中。工业上是从乙苯中催化去氢而得苯乙烯。可用于制造丁苯橡胶、聚苯乙烯、不饱和聚树脂等，是橡胶工业、塑料工业的重要材料。

【萘】分子式 $C_{10}H_8$ ，稠环芳烃的一种。存在于煤焦油和石油中。萘分子中的两个苯环共用两个相邻的碳原子。萘为无色有光泽的片状晶体；熔点 $80.5^{\circ}C$ ，沸点 $218^{\circ}C$ ，相对密度 0.9625 ($100/4^{\circ}C$)；易升华，能与水蒸气蒸馏；几乎不溶于水，易溶于有机溶剂。萘挥发性大，有特殊气味。萘比苯易起取代反应，一般生成 α -和 β -取代产物的混合物。萘的许多取代产物是合成各种染料的中间体。萘可在较低温度 ($60^{\circ}C$) 和较高温度 ($160^{\circ}C$) 下磺化，产物分别为 α -萘磺酸和 β -萘磺酸。萘在不同条件下催化加氢，生成四氢化萘或十氢化萘，在不同条件下氧化，生成 1,4-萘醌或邻苯二甲酸酐。萘在工业上由蒸馏煤焦油所得的中油馏分或石油产品裂化所得的高沸点馏分用结晶法分离获得。萘主要用于生产邻苯二甲酸酐。

【蒽】分子式为 $C_{14}H_{10}$ ，为有三个环的稠环芳烃，为无色片状晶体，有蓝紫色荧光，因此可用为闪烁计数器的闪烁剂。蒽的熔点为 $216^{\circ}C$ ，沸点 $340^{\circ}C$ ，相对密度为 1.283 ($25/4^{\circ}C$)。易升华。不溶于水，难溶于乙醇或乙醚之中，易溶于高温苯中。蒽中碳原子的1、4、5、8位（即 α 位）是相同的，2、3、6、7位（即 β 位）是匀等的，9与10两位化学活性较大，因此蒽的一元取代物有3种异构体，二元替代物有15种异构体。用硝酸去氧化蒽，可生成9、10—蒽醌，是重要的染料。工业上从煤焦油中用结晶法提取粗蒽，再用升华法，得到粗蒽。蒽与菲是同分异构物。蒽的芳香性弱于菲。

【菲】分子式为 $C_{14}H_{10}$ ，为含有三个环的稠环芳烃。菲与蒽为同分异构物，蒽中的三个环的中心在一条直线上，菲中三个环的中心不在一条直线上。菲为无色片状晶体，熔点为 $101^{\circ}C$ ，沸点为 $340^{\circ}C$ ，相对密度为 0.980 ，易升华，不溶于水，难溶于乙醇，溶于乙醚、氯仿、水醋酸等，菲的苯溶液有蓝色荧光。在菲中碳原子的1、2、3、4、10位与5、6、7、8、9位对应，但这五个位置均不同，所以一元替代物有5种，二元替代物有25种。菲的衍生物很多，如维生素、胆固醇、皂角素等。工业中从粗蒽中提取菲。

【醇】烃分子中一个或几个氢被羟基取代而生成的一类有机化合物（芳烃环上的氢原子被羟基取代的衍生物是酚类）。一个氢原子被取代的称作一元醇，例如乙醇等；两个氢原子被取代的称作二元醇，例如乙二醇等；三个氢原子被取代的称作多元醇，例如丙三醇等。根据烃基的不同还可分为：（1）脂肪醇，羟基与脂肪烃基相连。例如乙醇。（2）芳香醇，羟基与芳香烃支链相连接。例如苯甲醇。（3）环醇，羟基与环烃基相连接，例如环己醇。根据与羟基相

连的碳原子的性质，醇还可分为：伯醇，仲醇，叔醇。低级一元饱和醇为无色中性液体，具有特殊气味。所有一元醇均溶于有机溶剂，三个碳以下的醇可溶于水。随着分子量增加，醇在水中溶解度减小，熔点，沸点升高，密度和粘度增大。醇分子中有氢键存在，发生缔合作用。醇是一类活泼的化合物，其化学性质主要表现为以下几方面：（1）可以与活泼金属作用，例如与碱金属作用生成醇盐和氢气。（2）与氢卤酸反应，生成卤代烃和水。（3）脱水反应，在不同条件下醇可以分子内脱水生成烯，分子间脱水生成醚。（4）酯化反应。醇可以与无机酸分子间脱水生成无机酸酯；与有机酸分子间脱水生成有机酸酯。（5）氧化脱氢。醇可以氧化脱氢生成各种产物。例如伯醇氧化脱氢得到醛，仲醇氧化脱氢生成酮等。醇可通过微生物发酵法制取。工业上常采用还原法、水合法、脂肪和油的还原等方法来制取醇。低分子醇常用作溶剂、抗冻剂、萃取剂等。醇可氧化成醛、酮、酸。醇经过分子间失水生成醚，与羧酸作用生成酯。醇是一类极其重要的化工原料。

【甲醇】即木醇。分子式为 CH_3OH ，为无色液体，可燃，熔点为 -97°C ，沸点为 64.7°C ，相对比重为0.792（ $20/4^\circ\text{C}$ ）。可溶于水、乙醇、丙酮、苯、氯仿等等溶剂，但不能与水形成共沸物。早期用木材干馏法生产甲醇，现在则用一氧化碳和氢气为原料，用活化的氧化铜为催化剂，在50个大气压下，在 270°C 的温度下合成甲醇。甲醇可用于制甲醛、甲酸及有机酸脂。可以混入汽油或单独使用作为汽车或飞机的燃料。甲醇有毒，可通过食道，呼吸道及皮肤进入人体，轻者可使人失明，重者可使人致命。亦称木精。

【甘油】又称丙三醇。化学式 $\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ 。无色粘性

液体。有甜味，熔点 20°C ，沸点 290°C ，相对密度 $1.2613(20/4^{\circ}\text{C})$ 。可与水以任何比例混溶，能降低水的冰点。吸湿性极强，能吸收空气中的水分。具有醇的一般性质。失水时生成双甘油，聚甘油等。与氧化剂作用时可被氧化成甘油醛，甘油酸等。与还原剂作用时，可被还原成丙二醇等。与硫酸等共热，生成甘烯醛。在低温下与浓硫酸和浓硝酸的混合液作用，生成三硝酸甘油酯，俗称硝酸甘油。甘油也广泛应用于合成树脂、食品、纺织、皮革等工业部门，也可用来润滑皮肤和作抗冻剂。甘油的大量生产方法是用丙烯为原料，合成环氧氯丙烷，再经碱性水解而得。由淀粉或糖在亚硫酸钠存在时发酵，也都可得到甘油。

【乙醇】 俗称酒精。化学式 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ，无色透明液体，易挥发和燃烧。熔点 -117.3°C ，沸点 78.5°C ，相对密度 $0.7893(20/4^{\circ}\text{C})$ ，具有特殊香气和辣味。能与水及大多数有机溶剂混溶。有吸湿性。与水能形成共沸混合物。各类酒中都含有一定的乙醇。普通酒精，含乙醇 95.57% （重量）。能溶解许多有机化合物和部分无机化合物。乙醇蒸气与空气以适当比例混合形成爆炸性混合物。乙醇能与氯化钙形成络合物（ $\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ），故不能用氯化钙来干燥。乙醇用途极广，是一种重要的试剂，也是一种重要的有机合成原料，可用来制备乙醛、三氯乙醛、各种乙酯、乙醚等。乙醇可用淀粉或糖为原料用发酵法制备，也可由乙烯直接或间接水合而得。

【乙二醇】 分子式 $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ 。是典型的邻二醇。无色粘稠液体，熔点 -11.5°C ，沸点 198°C ，相对密度 $1.108(20/4^{\circ}\text{C})$ 。与乙醇相似，主要与无机或有机酸反应生成酯。酰氯或酸酐容易使两个羧基形成酯。在催化剂（二氧化锰、氧化铝、氧化锌或硫酸）作用

下加热,可发生分子内或分子间失水。能与碱金属或碱土金属作用形成醇盐。容易被氧化,随所用氧化剂或反应条件的不同,可生成各种产物,如乙醇醛、乙二醛、草酸及二氧化碳和水。 α 二醇与其它二醇不同,经高碘酸氧化可发生碳链断裂。工业上由环氧乙烷用稀盐酸水解制得。实验室中可用水解二卤代烷或卤代乙醇的方法制备。乙二醇常可代替甘油使用。乙二醇是一抗冻剂。

【环己醇】分子式为 $C_6H_{11}OH$, 熔点为 $25.1^{\circ}C$, 在实验室中可呈固态或液态。沸点为 $161.1^{\circ}C$, 相对密度为 $0.9624^{\circ}C (20/4^{\circ}C)$ 。有樟脑气味。有较强的吸湿性。能溶于多种有机溶剂。工业上用环己烷或环己酮制环己醇。主要用途是作为有机溶剂。

【甲醛】化学式 $HCHO$ 。最简单的醛。工业上由甲醇或甲烷制备。无色有刺激性的气体,有毒,相对密度 1.067 (空气 = 1), 液体相对密度 $0.815(-20^{\circ}C)$ 。易溶于水,其 40% 的水溶液通称“福尔马林”。溶于乙醇和乙醚。能燃烧。与空气能形成爆炸性混合物,爆炸极限为 $7-33\%$ (体积)。在碱液中有强还原作用。较浓的甲醛水溶液长时间放置时则聚合成多聚甲醛。甲醛化学性质活泼,与含亲核基团的试剂进行加成缩合反应,生成季戊四醇、乌洛托品和酚醛树脂等。是重要的化工原料,用以制造树脂、药物、染料和炸药等。还可用于房间、家具和种子等的消毒,以及生物标本的防腐。

【酚】为羟基与芳核直接相连化合物的总称,按照所含羟基数目的不同可分为一元酚(即苯酚)、二元酚、三元酚等等,有时将二元以上的酚统称为多元酚。酚易被氧化成环状的不饱和二酮,则称之为醌。酚多溶于有机溶剂。酚呈酸性,故可跟碱生成酚盐水。酚的制

备法常见者有七，即（1）芳香磺酸的碱融法；（2）芳基铊盐的置换水解法；（3）氧化芳烃法；（4）卤代苯水解法；（5）重氮盐法；（6）异丙苯法；（7）格氏试剂—硼酸酯法。酚的用途很多，是有机化工的重要原料。常见的一元酚即苯酚。二元酚有邻甲苯酚、间甲苯酚、对甲苯酚、邻氯苯酚、间氯苯酚、对氯苯酚，邻硝基苯酚、间硝基苯酚、对硝基苯酚。三元酚有2、4二硝基苯酚。四元酚有2、4、6三硝基苯酚等。

【苯酚】化学式 C_6H_5OH ，俗名石炭酸。无色晶体。有特殊气味，有毒，且有腐蚀性。在空气中因被氧化而变成粉红色。在室温时稍溶于水。在 $65^\circ C$ 以上时能与水混溶。易溶于乙醇，乙醚，氯仿，苯甘有机溶剂。有弱酸性；与碱作用生成盐。能与醛缩合生成酚醛树脂。与酸酐或酰氯等化合物作用可制备得有机酸酯或无机酸酯。在一定条件下也可生成醚。由于羟基的影响，苯环上的氢原子特别是邻，对位的氢原子活性增大，更易于取代。因此，苯酚易于发生卤化、硝化、磺化等亲电取代反应。其中硝化产物2，4，6-三硝基苯酚是一种烈性炸药。苯酚用二氧化碳进行羧基化生成水杨酸。可用于制造合成树脂，染料，合成纤维等。苯酚可由苯磺酸经碱溶或由氯苯经水解等制得。

【醚】水中的两个氢原子被羟基取代后所得到化合物的总称，也可以说成两个醇分子中间失一个分子水后而生成的化合物总称，其通式为 $R-O-R'$ ，其中 R 与 R' 为烃基， O 为氧原子， OR 与 OR' 夹角为 110° 。 R 与 R' 相同时的醚叫对称醚，也叫简单醚，不相同时的醚叫混合醚。多数醚为液态，易燃、易挥发。常见的醚有甲醚、乙醚、甲乙醚、正丙醚、异丙醚、正丁醚、甲丁醚、乙丁醚、乙二

醇二甲醚、乙烯醚、四氢呋喃、1,4-二氧六环、环氧乙烷、环氧丙烷等等。醚的制备方法主要有三,即:(1)威廉森氏法(即醇钠和卤代烷发生反应生成醚);(2)醇分子脱水法,常用酸为催化剂;(3)烷氧汞化—去汞法,但此法不能制备三级丁醚。醚常用为溶剂,也可用为麻醉剂。

【乙醚】化学式 $C_2H_5OC_2H_5$ 。易流动的无色透明液体,有爽快的气味,蒸气能使人失去知觉甚至死亡。它是一种重要的醚。稍溶于水,能溶解许多有机物。极易挥发和着火。蒸气与空气的混合物极易爆炸。易被空气氧化成爆炸性极强的过氧化物。存放于阴凉处,并在其中加入铁以避免过氧化物的生成。常用作溶剂和麻醉剂等。乙醚可由乙醇在浓硫酸存在和加热下分子间脱水而得到。工业上可在氧化铝催化下,于 $300^{\circ}C$ 由乙醇脱水制得。

【冠醚】即大环醚。冠醚的命名法为: X—冠醚—Y,其中 X 为这种冠醚所含的碳与氧的原子数, Y 为氧的原子数,碳、氧原子构成一个环。冠醚易与正离子发生络合,因此在有机溶液中有冠醚与其他试剂时,冠醚与试剂中的正离子络合,将试剂的负离子留在溶剂中,此时的负离子反应活性十分高,极易发生相移催化反应,反应速率快,条件简单,操作方便,产出率高,尤其是大小不同的冠醚可以和不同金属离子络合,更为有用。通常用威廉森法制备,即用醇钠与卤代烷发生反应可生成冠醚。

【卤代烃】在烃分子中的氢原子被卤素 (F、Cl、Br、I) 取代后产物的总称,通式为 $R-Z$, R 表示烃基, Z 表示卤素。按卤素所连接的烃基不同,可分为饱和卤代烃、不饱和卤代烃与芳环卤代烃三

类。按所含卤素的个数分类可分为：一卤代烃、二卤代烃、多卤代烃。按卤素所连接的碳原子不同，又可分为一级卤代烃 RCH_2ZX ，二级卤代烃 R_2CHX ，三级卤代烃 R_3CX 。许多卤代烃有特殊名称，如 $CHCl_3$ 称为氯仿， CHI_3 称为碘仿。一般卤代烃为液态物质，高级卤代烃为固态物质。卤代烃不溶于水，而溶于有机溶剂。一氟代烃、一氯代烃比重比水小，其他卤化烃比重比水大，且卤原子数加多，比重加大。卤代烃的沸点随卤素元素的原子序数升高而升高；随碳链的增加而升高；同分异构体中，直链分子的沸点高于叉链分子的沸点，叉链越多沸点越低。卤代烃的级别越高，反应速度越慢。一元卤代烃的制备方法常用者有三，即（1）酯化作用法，即用醇与无机酸作用，脱水而形成；（2）用卤代烷与卤素置换，一卤代烷可由烯烃与卤化氢加成制备；（3）用烯丙型或苯甲型化合物直接卤化而得。多卤代烷可由炔烃和卤化氢发生加成作用而生成。卤化烃用途十分广泛，如一氯甲烷可作冷冻剂，二氯甲烷是良好的有机溶剂，四氯化碳作干洗剂或灭火剂，二氟二氯甲烷（即氟里昂）可作为溶剂或冷冻剂用。聚四氟乙烯为良好的工程与医用塑料。

【三氯甲烷】 又称氯仿。卤化烃的一种。分子式为 $CHCl_3$ ，为无色透明液体，易挥发，不易燃，难溶于水，可溶于有机溶剂（如乙醇、丙酮、苯等）。实验室内可用具有乙酰基的醛或酮与次氯酸盐合成。纯氯仿作麻醉剂用，因对肝有损害，今已不用。氯仿在日光下与空气中的氧发生反应，生成有毒的光气。氯仿可存于棕色瓶中，加入 1% 的乙醇，可以破坏光气。氯仿可溶解树脂、橡胶，有机玻璃等，是一种良好的溶剂。

【六氯化苯】 又称1、2、3、4、5、6—六氯环乙烷，俗名六六六。分子式为 $C_6H_6Cl_6$ 。为白色晶体，难溶于水，可溶于有机溶剂（如乙醇、丙酮、苯等）。对酸稳定，在碱性溶液中易分解。易与铁、锡、铁发生作用。称期受潮可失郊，长期日晒下可与空气发生作用而分解。六六六有八种同分异构体，作用类似，对昆虫可触杀，熏杀和胃毒作用，故可用为杀虫剂；由于进入人、畜体内不易排出，可导致损害肝脏与神经系统，今已不用。

【双对氯苯基三氯乙烷】 又称二氯二苯基三氯乙烷。商品名滴滴涕或 DDT。见第五卷农药化工中的“滴滴涕”。

【醛】 含有醛基的化合物，通式为 $RCHO$ 。R 可以是各种饱和的或不饱和的，脂肪族的，脂环的，芳香族的或杂环的各种基团。根据与醛基相连的烃基的不同，通常可分为：（1）脂肪醛，醛基与脂肪烃基（或氢原子）相连接。（2）芳香醛，醛基与芳香基连接。根据烃基中是否含有重键，又可分为饱和醛和不饱和醛。最简单的是甲醛（ $HCHO$ ），分子中醛基与氢原子相连。除甲醛是气体外，其余都是液体或固体。化学性质非常活泼，羰基碳原子容易与亲核试剂 Na 发生加成反应。易被弱氧化剂氧化成相应的羧酸。醛可由相应的醇脱氢或缓慢氧化而得。

【乙醛】 化学式为 $CH_3CH=O$ ，为无色液体，沸点 $21^\circ C$ ，易氧化，易挥发，与空气混和后可形成爆炸性混合物。混入少量硫酸后可形成三聚乙醛，其沸点为 $124^\circ C$ ，仍呈液态，在 $-10^\circ C$ 下，可形成四聚乙醛，由于乙醛沸点低，可在适当的温度下不断蒸发而全部解聚。工业上采用乙炔与水合成乙醛，此时用高汞盐为催化剂；也可用

乙烯氧化而合成乙醛,此时用氯化铜与氯化钾为催化剂。由于石油工业的发展,后一方法发展很快。也可用乙醇,以银为催化剂,经过脱氢,氧化而得到。乙醛是生产乙酸、乙酸乙酯,乙酸酐的原料。

【酮】两个烃基分别与羰基 $\text{>C}=\text{O}$ 的两个单键连接的化合物。根据烃基是否含有重键,可分为饱和酮和不饱和酮;根据分子中羰基数目,可分为一元酮,二元酮和多元酮;根据烃基的类别可分为脂肪酮和芳香酮。两个烃基不同的称作混合酮,两个烃基相同的称作简单酮。此外,还有环状结构的酮,如环己酮。酮大多是液体。分子中含有羰基,化学性质与醛相象,能起加成反应。但不及醛活泼。对氧化剂较安定。链状酮一般可用仲醇脱氢或氧化而制得。

【丙酮】分子式为 CH_3COCH_3 ,无色液体,熔点为 -95.35°C ,沸点为 56.2°C ,相对密度为 $0.7899(20/4^\circ\text{C})$,易挥发,有特殊的水果香味,其蒸气与空气混合可形成爆炸物。能溶于水、甲醇、乙醇、乙醚等溶剂中,而丙酮本身也是重要的溶剂。早期用淀粉或蔗糖蜜发酵制备。现改用石油裂解生成丙烯,再由丙烯转变成丙酮,其方法有二,一为将丙烯与水合成异丙醇,再脱氢而得。二为将丙烯与苯发生反应生成丙酮与苯酚,催化剂采用三氯化铝。丙酮是制造有机玻璃,人造纤维,环氧树脂,油漆等的原料。

【有机酸】有机酸包括羧酸 ($\text{R}-\text{COOH}$)、磺酸 ($\text{R}-\text{SO}_3\text{H}$)、亚硫酸 ($\text{R}-\text{SO}_3\text{H}$)、亚磺酸 ($\text{R}-\text{SO}_2\text{H}$)、硫羧酸 ($\text{R}-\text{COSH}$) 等。通常指羧酸。根据分子中烃基的不同,可分为:(1) 脂肪酸,如醋酸。(2) 芳香酸,如苯甲酸。(3) 环酸,如环己烷羧酸。根据烃基上是否有重键又可分为:(1) 饱和酸,如醋酸。(2) 不饱和酸,如

丙烯酸。根据羧基的数目，又可分为一元酸，二元酸，多元酸。羧酸中的羧基是亲水基团，与水可以形成氢键。低级羧酸能与水混溶，高级酸不溶于水，可溶于有机溶剂。羧酸分子中由于同时含有羧基和羟基，所以化学性质活泼：（1）有弱酸性，能与碱中和生成盐和水。（2）羧基上的—OH可被一系列的原子或原子团取代生成羧酸的衍生物。（3）可以发生脱羧反应，放出二氧化碳。（4）与羧基直接相连的碳原子上的 α -H，由于受羧基的影响，具有一定的活性，在一定条件下可被某些原子取代。芳香酸的芳环也可发生卤代，磺化和硝化等取代反应。低级脂肪酸是重要的化工原料，高级脂肪酸是油脂工业的基础。某些芳香酸如苯甲酸、水杨酸等都具有多种重要工业用途。

【羧酸】羧酸是广泛存在于自然界的一大类有机化合物，以含一个或多个羧基（—COOH）为其特征。在通式 $R(CXY)_nCOOH$ 中，符号 R、X 和 Y 可能是氢、饱和的或不饱和的基团、羧基、脂环基或芳基、卤素或其它取代基，n 可从零（即甲酸，HCOOH）到大于100间变化，但以保持正常的四价碳为条件。羧酸的物理和化学性质是分子中存在的各种化学基团的总表现。羧基占优势的短链脂酸是刺鼻的、有腐蚀性的、溶于水的、沸点极高的（由分子缔合作用）液体。其比重近于1，随着分子量的增加，当烃基超过羧基时，刺鼻味减弱、沸点和熔点升高、比重降至与母体烃接近，在水中的溶解度也降低。因此，典型的高分子量饱和酸是无臭的蜡样固体。参见“酸和碱”。

【甲酸】俗名蚁酸。化学式 HCOOH。最简单的脂肪酸。无色液体。存在于某些蚁类和植物体中。有刺激性气味，有强腐蚀性。熔点

8.4℃，沸点100.7℃，相对密度1.220 (20/4℃)；能与水，醇、醚混溶。同时具有羧酸和醛的某些性质，既能生成盐和酯，又能发生银镜反应。甲酸不稳定，易脱羧，加热可分解成二氧化碳和氢气。与浓硫酸共热时，分子中失水而生成一氧化碳。这是实验室制备高纯一氧化碳的常用方法。甲酸常用于制造甲酸盐，甲酸酯等，也可用作消毒和防腐剂。甲酸可由甲烷氧化制得。

【乙酸】化学式 CH_3COOH 。俗名醋酸，因是醋的主要成分而得名。无色有刺激性气味的液体，熔点16.6℃，沸点117.9℃，相对密度1.0492 (20/4℃)。纯乙酸在16℃以下时，能凝结成冰状固体，所以常称之为冰醋酸。乙酸易溶于水、醇、醚和四氯化碳，不溶于二硫化碳。乙酸是一典型的弱电离酸。乙酸是重要的有机酸，用途极广，可用来制造聚乙酸乙烯酯和纤维素乙酸酯（又称醋酸纤维）。乙酸还可用来合成酯，乙酸酐制造药物如阿斯匹林等。因乙酸不易被氧化，可作氧化反应的溶剂。现代工业上合成乙酸的方法有乙醚氧化法和低级烷烃氧化法。

【苯甲酸】分子式为 $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ ，最初从安息胶中提取而得，故俗名安息香酸。为无色、无味片状晶体，熔点为122.13℃，沸点为249℃，但在100℃时可迅速升华，其蒸气有刺激性。溶解度为0.34克/100克水，但易溶于有机溶剂。苯甲酸为弱酸，但比其他羧酸（如乙酸、丙酸、丁酸等）酸性强。可形成多种衍生物，且均不易氧化，如苯甲酰氯（沸点为197℃，熔点为-1℃）、苯甲酸酐（沸点360℃，熔点为42℃）、邻苯二甲酸酐（沸点284.5℃，熔点132℃）、苯甲酸乙酯（沸点为213℃，熔点为-34℃）等。制备方法主要有三：（1）用水蒸气将苯二甲酸酐脱羧而得；（2）用二氧化锰氧化

甲苯而得；(3) 用乙酸钴（或乙酸锰）为催化剂，用空气中的氧去氧化甲苯而得。可用于染料工业，医药工业和塑料工业中。

【草酸】 又称乙二酸。分子式为 HOCCOOH 。广泛存在于植物之中。易溶于水，溶解度 73.5 克/100 克水。能溶于乙醚，但不能形成酸酐。熔点为 189.5°C ，故无水草酸呈固态，可结晶成斜方晶体。工业上用一氧化碳通过浓氢氧化钠溶液或用甲酸钠与氢氧化钠加热而得到。可用作漂白剂，分析试剂。

【柠檬酸】 又称 2-羟基-1、2、3-丙烷三羧酸。分子式为 $\text{HO}(\text{CH}_2\text{COOH})_2(\text{COOH})$ 。在多种水果中以游离状态存在，如在柠檬、菠萝、葡萄等中，以其味似柠檬而命名。在动物体中也存在，是生物体物质代谢过程中的产物之一。易溶于水，不溶于醚、苯、氯仿等有机溶剂之中。无毒，可做为食品添加剂。为无色结晶，结晶中常含一分子结晶水，此时熔点为 100°C ，无结晶水的柠檬酸结晶熔点为 153°C 。相对密度为 $1.665(20/4^\circ\text{C})$ 。工业上用葡萄糖或蔗糖发酵制造柠檬酸。可用于医药，如柠檬酸钙可用于人体钙质增补剂，柠檬酸钠可用为血液抗凝剂等。

【乳酸】 即 2-羟基丙酸。分子式为 $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ 。它有羟基与羧基，故可与醇形成乳酸脂，也可与醋酐形成羧酸酯。乳酸有三种同分异构体，即左旋体、右旋体与外消旋体，其中前二者熔点为 53°C ，最后一个熔点为 18°C 。乳酸不挥发，无气味，可氧化，氧化后生成丙酮酸。人体运动时即可产生乳酸，从而血液中乳酸含量增高。酸奶中含乳酸。乳酸可用为食品防腐剂，乳酸钙可作为人体钙的补充剂。

【乙酸酐】即醋酐。分子式为 $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ 。为羧酸衍生物的一种。熔点为 -73.1°C ，沸点为 139.55°C ，相对密度为 1.0820 ($20/4^\circ\text{C}$)，为无色液体，有酸味，有强烈催泪作用。溶于水后可生成乙酸，溶于乙醇后可生成乙酸乙酯，可溶于有机溶剂（如苯，氯仿，乙醚等）。醋酐可分为线型醋酐与环状醋酐两种。在红外光谱中在 $1800-1860\text{cm}^{-1}$ 和 $1750-1800\text{cm}^{-1}$ 区域内有两个 $\text{C}=\text{O}$ 拉伸振动吸收峰。对线型醋酐而言，高频峰强于低频峰。对环状醋酐而言，低频峰强于高频峰。工业上生产乙酸酐的方法是用乙酸铜、乙酸钴为催化剂，将乙醛氧化成乙酸酐。主要用于化纤工业、医药工业，是合成染料与香精的重要原料。

【酯】羧酸分子中能电离的氢原子被烃基取代而生成的衍生物的总称，广泛的存在于自然界中。酯的制备法有如下几种：（1）羧酸与醇直接酯化；（2）羧酸盐与卤代烷反应合成；（3）外腈在酸性条件下用醇处理；（4）用一种酯与醇作用生成另一种酯；（5）用酰卤或酸酐与醇反应生成酯；（6）羧酸与重氮甲烷反应生成甲酯等等多种方法，也可从自然界直接提取。通常称为油的物质是高级脂肪酸的甘油酯，在室温下为液体的则称为油，为固体或半固体的则称为酯。酯可水解成羧酸与醇，可醇解产生另一种酯，可氨解成酰胺，可氢解成醇，可缩合成 β -酮基酯等等。酯的用途十分广，低分子量的酯可作为溶剂，高分子量的酯可作为增塑剂。油脂可作为食品。酯还是香精，化妆品，肥皂等工业原料。

【乙酸乙酯】分子式为 $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ ，可由乙酸与乙醇合成，以摩尔数计算时乙酸比乙醇为 $1:8$ 时产量最高；在酸或碱作用下乙酸乙

酯也可分解成乙酸与乙醇。乙酸乙酯为无色液体，易挥发，熔点为 -83.6°C ，沸点为 77.1°C ，相对密度为 0.9003 ($20/4^{\circ}\text{C}$)。微溶于水，与水与乙醇均可形成共沸混合物，易溶于有机溶剂中，乙酸乙酯挥发后有水果香味。工业上可由乙酸或乙酸酐或乙酮与乙醇反应而得。在工业上应用甚广，如可作纺织工业的清洗剂，制药工业原料等。

【胺】分子中的氢被烃基取代而生成的化合物。根据氢被取代的数目，依次分为一级胺（又称伯胺） RNH_2 ，二级胺（仲胺） R_2NH ，三级胺（叔胺） R_3N ，四级铵盐（季铵盐） $\text{R}_4\text{N}^+\text{X}^-$ 。R 为脂肪烃基时是脂肪胺，R 为芳基时是芳香胺。胺的性质与氨相似，具有碱性，但强弱不同，多数能与酸形成盐。低级胺为气体或液体，高级胺为固体。芳香胺有较大毒性，碱性比脂肪胺弱，其重氮化反应是重要的有机反应之一。伯胺与仲胺能形成分子间氢键，能发生烷基化和酰基化反应，伯胺与亚硝酸（盐）能生成极重要的重氮化合物。季铵盐有很多重要实际用途，如用作相转移催化剂和作为表面活性剂，含有一个长链烃基的季铵盐是良好洗净剂。胺还是合成染料、药物等多种有机化学工业的重要中间体。胺在自然界分布很广，其中大多数是由氨基酸脱羧生成的。工业制备胺类的方法多是由氨和醇或卤代烷反应制得。由醛、酮在氨存在下催化还原也可得到相应的胺。

【四级铵盐】即季铵盐。其通式为 $\text{R}_4\text{N}^+\text{X}^-$ ，其中R 为烃基，四个R 可以相同也可以不相同， X^- 为卤素负离子（ F^- ， Cl^- ， Br^- ， I^- ）或酸根（如 HSO_4^- ， RCOOH^- 等），它是铵中的四个氢原子被烃基取代而得的生成物的总称。它有光活性异构体。易溶于水，水

溶液可导电。工业上可用氨或胺与卤化烷反应而成,可用为相转移催化剂、表面活性剂、清洗剂、农药等。自然界中存在四级铵盐,有的还有一定的生物活性。参见“胺”。

【硝基化合物】烃分子中一个或几个氢原子被硝基($-\text{NO}_2$)取代后所形成的化合物。根据烃基不同可分为脂肪族硝基化合物和芳香族硝基化合物,根据分子中硝基的数目,又可分为一硝基化合物和多硝基化合物。根据和硝基相连的碳原子不同而分为伯,仲,叔硝基化合物。硝基是一强极性基,故硝基化合物具有较高的极性,分子间吸引力大,沸点比相应卤代烃高。芳香族硝基化合物中,除了一硝基化合物为高沸点液体外,一般为无色或黄色结晶固体。多硝基化合物具有爆炸性,如三硝基甲苯用作炸药。低级脂肪族硝基化合物微溶于水,芳香族硝基化合物均不溶于水,但都溶于有机溶剂,硝基化合物有毒,硝基化合物还原后生成胺。可通过烷烃和芳烃的硝化来制备硝基化合物。

【偶氮化合物】偶氮基 $-\text{N}=\text{N}-$ 与两个烃基相连接而生成的化合物,通式 $\text{R}-\text{N}=\text{N}-\text{R}'$ 。具有顺、反几何异构体,反式比顺式稳定,两种异构体在光照或加热条件下可相互转换。主要通过重氮盐的偶联反应制得。氢化偶氮化合物和芳香胺在氧化剂〔如 NaOBr , CuCl_2 , MnO_2 等〕存在下,可被氧化成相应的偶氮化合物。氧化偶氮化合物和硝基化合物在还原剂〔如 LiAlH_4 〕存在下,也可被还原为偶氮化合物。偶氮基能吸收一定波长的可见光,是一发色团。偶氮染料是品种最多,应用最广的一类合成染料,可用于纤维纸张等的着色,还可用作聚合反应的引发剂。很多偶氮化合物有致癌作用。

【重氮化合物】烷基与重氮基 $=N_2$ 相连接而生成的化合物，其通式为 R_2CN_2 。R为氢或烷基。重氮化合物分子中同时含有正负电荷，可与多种烯烃的衍生物发生加成反应；易质子化，变成容易失去 N_2 的重氮离子。利用这一性质，可与许多带有酸性氢的化合物，如醇、酚、胺、羧酸、酰胺等作用，进行烷基化反应。重氮化合物有一定的亲核性，可与醛、酮、酰卤等反应；在光照或加热条件下可产生卡宾，并发生沃尔夫重排。重氮化合物由N—亚硝基—N—烷基—酰胺类化合物与碱作用制取。由一级胺与亚硝酸反应，也可制得。主要用途为作有机合成试剂和中间体。大都有毒，对皮肤有刺激性。

【亚胺】为一类化合物的总称，通式为 $R_2C=NR^1$ ，分子含碳—氮双键，R和 R^1 为烃基或氢。由氨或胺与醛或酮发生缩合反应后可生成亚胺。亚胺很不稳定，故难于分离。如存在氢及催化剂或存在氢化剂，则可立即还原为相应的一级胺、二级胺或三级胺，此法称之为还原氨化法。亚胺可以和硫酸、硝酸、盐酸、草酸、醋酸等合成酸盐，这些酸盐在碱的作用下可还原生成胺。亚胺微溶于水。但可溶于非极性的有机溶剂中。可做为生产氮芥的原料。

【酰卤】羧基中的羟基被卤素取代后生成的化合物。它也可看作是一种混合酸酐，其结构可用 $RCOX$ （R代表烃基，X代表卤素）表示。碳原子数目少的酰卤为有刺激性液体，碳原子数目多的则为固体。具有同样烃基的酰卤，其化学活性从高到低依次为氟、氯、溴、碘的酰卤化物。可与水，醇和氨（或胺）反应，分别生成酸、酯和酰胺，反应速度比相应的酯和酸酐快。酰卤中的羰基还可以与格式

试剂反应，先生成酮，继而生成叔醇。各种酰氯中，甲酰氯不能以游离态存在，且酰卤因非常活泼，不存在于自然界，只能通过化学合成制得。酰氯可由羧酸与无机酸的酰氯，如三氯化磷，五氯化磷，亚硫酸酰氯（ SOCl_2 ）作用制得。

【酰胺】羧酸中的羟基被氨基取代后，生成的化合物，也可看作是氨（或胺）的氢被酰基取代的衍生物。通常都是中性化合物。除甲酰胺外，都是固体。含五个碳原子以下的酰胺都溶于水。可形成金属盐，但多数不稳定，遇水即被分解。酰胺是一种弱碱，可与强酸形成加合物，但不稳定，遇水即完全水解。酰胺在脱水剂存在下小心加热，可转变为腈。还可与次卤酸盐发生霍夫曼反应。可通过羧酸铵盐的部分失水或从酰卤，酸酐，酯的氨解来制取。分子内的氨基与羧基失去一分子水后，形成的环状化合物称为内酰胺，酰胺经还原可得胺。低分子液态酰胺是优良溶剂，长链脂肪酸酰胺可用作表面活性剂。

【糖精】又称邻磺酰苯酰亚胺。单斜形晶体或粉末。分子式 $\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$ ，分子量183.18。熔点 229°C ，相对密度0.828，在真空下升华为针状晶体，难溶于水，溶于乙醇，丙酮，易溶于碳酸钠的水溶液。参见第五卷食品工业中的“糖精”。

【杂环化合物】由碳和氧、硫、氮等元素中的至少一个元素化合成的具有环状结构的化合物的总称，而氧、硫、氮等就叫做杂原子。最常见的杂环化合物有呋喃、吡喃酮、哒嗪、嘧啶、吡嗪、三嗪环系化合物、苯并呋喃、苯并噻吩、吲哚环系化合物等等，种类繁多，通常不太用化学命名，而用俗名命名。杂环化合物在自然界

存在极广，如维生素 B₁是嘧啶环与噻唑环结合的产物。甲基硫氧嘧啶或丙基硫氧嘧啶可用于治疗甲状腺病，作为安眠药的鲁米那和佛罗那都是嘧啶环的药物，氟尿嘧啶用于治疗结肠癌、直肠癌、卵巢癌及胃癌等，磺胺药含有嘧啶系化合物可治疗肺炎、脑炎等，降压药利血平含吲哚环。作中枢神经兴奋剂的番木鳖碱、治疗头痛的麦角等等都是杂环化合物。

【糠醛】 又称呋喃甲醛。分子式 C₅H₄O₂，分子量96.08。无色油状液体，有与甲醛类似的气味，熔点-38.7℃，沸点161.7℃，相对密度1.1594 (20/4℃)。在空气中受氧的作用，溶液易变黑，同时受光和热的影响，也容易发生聚合而呈树脂状。蒸气和空气混合易爆炸，爆炸极限为2.1% (体积)，自燃温度为392℃，可溶于水，可进行水蒸气蒸馏。工业上由农副产品中所含聚戊糖裂解后脱水而得。糠醛是制备许多药物和工业产品的原料。许多糠醛的衍生物具有很强的杀菌能力，抑菌谱相当宽广。糠醛主要用作溶剂，它可选择性地从石油，植物油中萃取其中的不饱和组分。还可代替甲醛，制造酚醛树脂。

【叶绿素】 见第二卷光合作用中的“叶绿素”。

【碳水化合物】 糖类的总称。在自然界分布极广，也是含量最丰富的一类有机物质。最初化学家们认为这类化合物中的分子除碳外，氢和氧的比例与水相同，故把它看成碳与水形成的各种化合物，称为碳水化合物，以通式 C_x(H₂O)_y 表示。后来发现有些化合物结构上与糖相似，但组成不能用上式表示，如鼠李糖 (C₆H₁₂O₅)，脱氧核糖 (C₅H₁₀O₄) 等。因此，严格地讲，这个名词是不正确的。因沿

用已久，未改。这类物质广泛分布于动物，植物，微生物体内，其中以植物界最多，约占干重的50%—80%，是绿色植物由二氧化碳和水经光合作用形成的。生物细胞内和血液里含有葡萄糖或多糖，都是细胞功能所必须的。葡萄糖代谢的正常调节对生命运动非常重要。动物，微生物体内的糖通过生物氧化，放出大量能量，以满足生命活动的需要。人类从食物中摄取的总热量，50—60%来自碳水化合物。碳水化合物也能通过各种代谢途径转化为生命所必须的其它物质，如蛋白质和脂类物质。因此，碳水化合物是生物机体的重要碳源和能源。一般可以分为三类：单糖，低聚糖和多糖。单糖，低聚糖大都是结晶体，能溶于水，具有甜味，多糖大多是不溶于水，无定形，无甜味的白色固体。

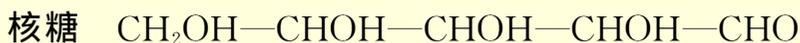
【单糖】多羟基醛或多羟基酮。分子中除羟基（OH）外，还有羰基

($\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C} \\ \diagdown \end{array} = \text{O} \text{O}$ 或 $\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \diagup \\ \text{C} \\ \diagdown \end{array} = \text{O}$)。单糖分为两类：分子中有醛基的称为醛糖，有酮基的称为酮糖。单糖最多含有10个碳原子，单糖含有多个手性碳原子，都是光学活性物质，使平面偏振光向左旋转的称左旋糖，以（-）号表示，向右旋转的称右旋糖，以（+）表示。最简单的单糖是丙糖，即甘油醛和二羟基丙酮。单糖皆有变旋光现象，其原因是糖从一种结构（ α 型）通过醛型结构变为另一种结构（ β 型）；或从 β 型变成 α 型结构。单糖具有醇羟基和羰基的性质，能发生成酯，成醚，成缩醛等反应和羰基的加成反应，以及在分子内羰基和羟基相互影响而产生的一些特殊反应。单糖的醛或酮基可与多种醛酮试剂反应，与苯肼反应可生成糖脎，是鉴别糖的重要反应，并可用来确定糖的构型。

【葡萄糖】分子式 $C_5H_{11}O_5CHO$ ，又称右旋糖或血糖，为一种单糖。参见第二卷生命的物质基础中的“葡萄糖”。

【果糖】分子式 $C_5H_{12}O_5CO$ ，又称左旋糖，单糖的一种，全称 D-阿拉伯型己酮糖。参见第二卷生命的物质基础中的“果糖”。

【核糖】分子式 $C_4H_9O_4CHO$ ，单糖的一种，是重要的戊醛糖，有核糖和脱氧核糖两种。它们的结构式为



核糖是核糖核酸分子的一个重要组成部分，也是维生素 B_{12} 的组成部分，是人类生命活动中不可缺少的物质。它不能为通常的酵母发酵，可由酵母核酸水解制备，也可用化学合成方法即增长碳链的方法或氧化降解法由其它种类的糖制得。

【低聚糖】又称寡糖。参见第二卷生命的物质基础中的“低聚糖”。

【蔗糖】分子式 $C_{12}H_{22}O_{11}$ ，为最普通的食用糖。参见第二卷生命的物质基础中的“蔗糖”。

【麦芽糖】分子式 $C_{12}H_{22}O_{11}$ ，为淀粉或肝糖被淀粉酶水解的主要产物。参见第二卷生命的物质基础中的“麦芽糖”。

【多糖】由多个单糖分子缩合去水而形成的化合物。参见第二卷生命的物质基础中的“多糖”。

【纤维素】 参见第二卷生命的物质基础中的“纤维素”。

【淀粉】 参见第二卷生命的物质基础中的“淀粉”。

【甲壳素】 一种直链多糖。聚合度约一万。广泛存在于甲壳纲动物（如虾和蟹）、昆虫和低等植物中，是自然界中最丰富的一种氨基糖的多糖。为白色粉末，不溶于水、稀酸、碱、醇和其他有机溶剂，溶于浓无机酸和无水甲酸，在浓酸，浓碱中发生水解。用浓碱处理时，脱去乙酰基生成壳聚糖，它的氨基与酸反应，生成易溶于水的壳聚糖盐。通过壳聚糖乙酸盐的氨基反应，可制得性能优异的衍生物，它们可用于：（1）制备离子交换树脂；（2）制备分子筛和凝胶色谱性的填充物；（3）制备体内手术线；（4）制备保水剂。将虾或蟹的甲壳用稀盐酸处理除去碳酸钙，然后用浓碱溶液处理，除去蛋白质和其他有机杂质，经水洗和干燥而得。

【生物碱】 旧称植物碱。参见第二卷植物体内有机物的转化中的“生物碱”。

【萜】 参见第二卷植物体内有机物的转化中的“类萜”。

【甾族化合物】 又称类固醇。参见第二卷脂类中的“类固醇”。

【蛋白质】 旧称“朊”。参见第二卷脂类中的“蛋白质”。

【合成高分子化合物】 由单体经聚合反应或缩聚反应而成的高分子化合物。例如合成树脂，合成橡胶等。一般具有天然高分子化合物

所无或较为优越的性能。合成后,通常不可用提纯有机化合物的普通方法(如蒸馏,升华,结晶等)加以净化,只可用重沉淀,萃取和溶析等方法。品种很多,用途很广。经加工后可制塑料,涂料和合成纤维等,是农业,工业,交通运输业,建筑业等的重要材料。

【塑料】一类高分子化合物的总称,广泛地用于工业及日常生活中,按受热后的行为的不同可分为热塑性塑料和热固性塑料两种。热塑性塑料具有线性高分子链结构,其力学性能常为各向共性的。经过加热、压制后,可制成管材、板材、薄膜等,是良好的包装材料。常见的热塑性塑料有聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯等,其中有的有微毒(如聚氯乙烯),不宜包装食品。热固性塑料加工后为交连型的高分子化合物,常见都如酚醛树脂等,具有不溶、不熔的特点,是良好的工业原料。塑料与合成纤维、合成橡胶并列为三大合成材料。

【橡胶】具弹性的高分子合成体的总称。包括天然橡胶及合成橡胶。前者为天然产物,从橡胶树的胶乳中制取;后者则为一类合成弹性体。合成橡胶为现代三大合成材料之一,广泛用于轮胎和橡胶制品工业,产量已超过天然橡胶。其中产量最大的是丁苯橡胶,其次是顺丁橡胶。这些都是通用橡胶。另外还有产量较小,具有特殊性能的合成橡胶,如耐老化的乙丙橡胶,耐油的丁腈橡胶,不燃的氯丁橡胶等,还有不用化学方法交联,而是利用高分子链间的作用力交联的热塑性弹性体,如 SDS 橡胶,它可用塑料加工方法模塑成各种形状的橡胶制品。详见第五卷橡胶工业。

【合成纤维】 参见第五卷化纤工业中的“合成纤维”。

【离子化合物】 由正负离子组成的化合物，大多数无机盐（如 NaCl）和金属氧化物（如 Al_2O_3 ）均为离子化合物。它由电负性较小的金属元素和电负性较大的非金属元素所组成。离子间的结合力主要是摩擦力，在结构上常常是正、负离子交替相间排列而成，多数离子化合物呈晶态，且为不良导体，熔点与沸点都较高，而熔融态的离子化合物与能溶于水的离子化合物均能导电。离子化合物是无机化学研究的主要课题。

【离子晶体】 以正负离子为结构基元，靠离子键结合形成的晶体。食盐是典型的离子晶体。由于离子键没有方向性和饱和性，且大多数离子呈球形或近似球型，所以离子晶体的结构形式取决于两个因素：离子的最密堆积（几何因素）和正、负离子的电荷数目。一般的离子型晶体的特点是：配位数较高，硬度大，熔点相当高。在 NaCl 晶体中每个离子均与周围的6个异名离子形成离子键，而将全部离子结合成晶体。所以在 NaCl 晶体中，划不出单个 NaCl 分子。据此可知，对于离子型晶体来说，不可将化学式与分子式和结构式混为一谈。某些多元化合物如 NaCN、 CaCO_3 、 NH_4Cl 、 NH_4NO_3 等，一般也归入离子晶体，因为它们的结构基元也是正、负离子，只是其中一种或两种离子是复合离子而已，如 CN^- 、 NH_4^+ 、 CO_3^{2-} 等。

【共价化合物】 通过共用电子对而形成的化合物。组成共价化合物的元素一般是电负性相差不大的元素，例如甲烷（ CH_4 ）、二氧化氮（ NO_2 ）等。有机物一般都是共价化合物。组成共价化合物的元素

由于电负性差别不大，分子间作用力较小，所以一般熔点和沸点较低，硬度、密度较小，在熔融状态下由于没有自由移动的离子，所以不导电。

【分子晶体】在这类晶体中，组成晶格的质点是分子，也包括极性或非极性分子，如 CO_2 、 HCl 、 I_2 等。分子晶体中，质点间的作用力是分子与分子之间的作用力（即分子间力）。但每个分子内部的原子间是由共价键结合的。由于分子间作用力比共价键、离子键弱得多，所以分子型晶体一般具有较低的熔点、沸点和较小的硬度。许多有机化合物形成分子晶体。一般非金属元素单质也大多形成分子晶体，例如氯、溴和碘，这些晶体的结构基元是 Cl_2 ， Br_2 与 I_2 分子。

【原子晶体】在这类晶体中，占据在晶格结点上的质点是原子，原子间通过共价键相互结合在一起。由于在各个方向上这种共价键是相同的，因此在这类晶体中，不存在独立的小分子，而只把晶体看作是一个大分子。晶体有多大，分子也就有多大，没有确定的分子量。这类晶体由于以原子间的共价键结合，所以键的强度高，要拆开这种共价键耗能较大，这样就使得原子晶体一般都有较高的熔点、沸点和硬度的特点。例如，金刚石就是原子晶体。它是无色立方晶体，熔点 4000°C （60大气压），硬度为 10000 千克/毫米²，是自然界硬度最大的物质。

【金属】在化学反应中容易生成正离子的元素。金属的一般物理性质是：导电，传热性能好，有光泽而不透明，有延性和展性。金属的一般化学性质是：形成碱性氧化物；与非金属形成盐类化合物。

金属在不同程度上具有这些性质。除了汞是液体（常温下）外，所有金属都是固体。金属原子之间是以金属键结合的，一般都具有金属型晶格。在金属原子间有可以移动的电子。金属原子最外层电子数较少，电负性较小，在反应中容易失去而成阳离子。这是所有金属的化学性质的一个共同特性。金属容易与非金属化合。活泼的金属能与酸发生置换反应。很活泼的金属（如碱金属还能在常温下与水作用，置换出氢气。）金属的氧化物和氢氧化物一般呈碱性。只有少数金属的氧化物和氢氧化物具有两性。金属非金属之间没有严格的界限。

【金属晶体】以晶态存在的金属元素单质都是金属晶体。金属元素的外层价电子易于电离而在整个晶体中自由运动，为整个晶格所共有，称作“自由电子”。失去价电子的金属原子便成为正离子，被自由电子吸引联系在一起形成金属晶体。金属原子间的这种结合力称为金属键。金属的许多特性如导电性、导热性和金属光泽等都可由自由电子予以解释。金属键的另一特征是没有方向性和饱和性，因此金属原子可以和最大数目的邻近原子作紧密堆积。已知绝大多数金属的晶体结构为立方面心密堆积，六方密堆积和立方体心密堆积三种（或称为 A_1 、 A_2 、 A_3 三种密堆积型）。约有50种金属元素的晶体结构不是属 A_1 型，就是属 A_3 型，或以两种形式存在；碱金属等约有20多种金属元素的晶体属 A_2 型结构。金属可以形成合金，是其主要性质之一。

【天然元素和化合物】以聚集态存在于自然界的一些元素和化合物。如，天然金，天然铂，天然铜，天然硫，松香，靛蓝等。

【溶液】习惯上专指液体溶液，事实上溶液可以是固态、液态或气态的，它指的是两种或两种以上化学性质不同的物质混合在一起，其混合均匀程度达到分子水平，即溶液中任何一部分均有相同的性质。含量比较多的化学物质叫溶剂，含量较少的物质叫溶质，溶液由溶剂与溶质两部分组成，一种溶液中作为溶剂只有一种物质，作为溶质则可能有多种物质。

【溶质】溶于溶剂中的物质。在一定温度和压力下，平衡时，某种物质在给定溶剂中的溶解量有一定值，称之为该物质在该种溶剂中的溶解度。对于双液系来说，常把含量较少的那种物质作为溶质，含量较多的作为溶剂。

【溶剂】旧称溶媒。能溶解其他物质的物质。物质溶解于溶剂中即为该物质的溶液。水、醇、苯等是常用的溶剂。若两种物质都是液体，互相溶解而成溶液，则常把数量较多的一种物质作为溶剂，数量较少的一种物质叫做溶质。

【溶解度】在一定温度和压力下，物质在一定量溶剂中溶解的最高量。固体或液体溶质的溶解度，通常以100克溶剂里所溶解的最多克数来表示。气体溶质的溶解度，则常用1体积（1毫升或1升）溶剂中所溶解的最多体积数来表示。物质的溶解度除与溶质、溶剂的性质有关外，还跟温度、压力有关。大多数固体或液体的溶解度随温度升高而增大，而气体溶解度却随温度升高而减小。压力一般对固体或液体的溶解度影响不显著，而气体溶解度却随压力增大而显著增大。在化工生产中，常利用不同物质溶解度的差异，来分离、提纯物质。

【浓度】溶质在单位溶液中量的多少。溶液的浓度有多种表示方法。常用的浓度表示方法有：百分浓度（包括重量—重量百分浓度、重量—体积百分浓度、体积—体积百分浓度）、摩尔浓度、克当量浓度、克式量浓度、体积比浓度、ppm 浓度和 ppb 浓度、滴定度等。是容量分析等中的重要参数。

【活度】为校正实际溶液与理想溶液的行为偏差而引入的概念。可以当作实际溶液对理想溶液的校正浓度。实际溶液的浓度乘上一个校正项（称为活度系数）就得到活度。即 $\alpha = x\gamma$ ，式中 α ， x ， γ 分别代表活度，浓度和相应的活度系数。从化学热力学角度看，在理想溶液中任一组分的化学式表示为： $u_i = u_i^\ominus(T, P) + R \cdot T \ln x_i$ ，而非理想溶液需加以修正， $u_i = u_i^\ominus(T, P) + RT \ln x_i \gamma_i$ 。如令 $x_i \gamma_i = \alpha_i$ 则溶液中任一组分的化学势都可以表示为 $u_i = u_i^\ominus(T, P) + RT \ln \alpha_i$ 的形式， α_i 就是 i 组分的活度， γ_i 就是 i 组分的活度系数。

【溶度积】难溶的强电解质固体和其饱和溶液在平衡时的平衡常数，在数值上等于以离子系数为六次的离子浓度的乘积，简称溶度积，用 K_{SP} 表示， K_{SP} 随温度升高而加大，在实际工作中常用 25°C 时的溶度积。根据溶度积常数值，可以比较同种类型（ AB 型或 AB_2 型等）的难溶电解质溶解度的大小，溶度积越小，溶解度（以摩尔浓度表示）也越小。溶度积常数可通过多种实验方法测定。

【蒸馏】一种分离液态溶液中各组分的方法。利用各组分的沸点不同，将溶液升温，沸点较低的组分先气化，这时将蒸汽冷凝，则可得这种组分比较富集的液体，这就是蒸馏。如将溶液加温，将各

个组分依次用蒸馏法分离,则为分馏。一次蒸馏或分馏往往不可能将各组分完全分离,常需要反复蒸馏,或以其他特殊蒸馏方法(如真空蒸馏、亚沸点蒸馏、萃取蒸馏等)。分馏法广泛用于化学工业及研究工作中。但采用时应注意被提纯的物质必须在其沸点附近化学稳定。

【结晶】从过饱和溶液中析出物质的过程。结晶技术是用于物质与杂质在某一溶剂中不同的溶解度进行的分离,纯化有机物和无机物常用的方法。一般结晶速度慢些,晶体就大些,晶形也较完整。溶解度随温度降低而显著减小的物质,可直接通过降温使溶液达到饱和进而结晶;溶解度随温度降低而减小不大的物质,应先将部分溶剂蒸发后再冷却结晶。

【沉淀】从液相中产生一个可分离的固相的过程,或指从过饱和溶液中析出的难溶物质。沉淀作用表示一个新的凝结相的形成过程,或由于加入沉淀剂使某些离子成为难溶化合物而沉积的过程。产生沉淀的化学反应称为沉淀反应。物质的沉淀和溶解是一个平衡过程。沉淀的结构类型可分为晶形沉淀和非晶形沉淀两大类。沉淀的形成过程复杂,其机理至今还不完全了解。沉淀反应可用于定性分析、定量分析中,它也是一种常用的分离方法。

【萃取】溶于水相的溶质与有机溶剂接触后,经过物理或化学作用,部分或几乎全部转移到有机相的过程。它主要用于物质的分离和提纯。这种分离方法具有装置简单,易操作的特点,既能用来分离、提纯大量的物质,也适合于微量或痕量物质的分离、富集,是分析化学经常使用的分离技术,也广泛用于原子能、冶金、电子、环

保、生物化学和医药等领域。能斯特分配定律是溶剂萃取化学的最基本定律，可用方程式 $K_d = [M]_{(o)} / [M]$ 表示。式中 K_d 为分配系数，在一定温度下， K_d 是常数，它与被萃取物的总量无关； $[M]_{(o)}$ 和 $[M]$ 分别表示物质在有机相和水相中的浓度。通常用分配比 D 代替分配系数。分配比定义为有机相中被萃取物的总浓度与水相中被萃取物的总浓度之比。分配比越大，萃取效率越高。

【离心分离】 借助于离心力，使比重不同的物质进行分离的方法。由于离心机等设备可产生相当高的角速度，使离心力远大于重力，于是溶液中的悬浮物便易于沉淀析出；又由于比重不同的物质所受到的离心力不同，从而沉降速度不同，能使比重不同的物质达到分离。在胶体化学，高分子化学，生物化学研究中，有重要应用，可用来测定物质的分子量。此外，在环境保护中也有广泛应用，可用作过滤，除尘。离心分离种类很多，有固-固分离，液-液分离，气-气分离，固液分离等。与其它方法相结合，产生新的更为有效的分离方法，是离心分离法的发展方向。

【离子交换】 以离子交换树脂上的可交换离子与液相中离子间发生交换为基础的分选方法。目前广为应用的离子交换树脂是合成离子交换树脂，可分为阳离子交换树脂，阴离子交换树脂，两性离子交换树脂，氧化还原离子交换树脂等。这些树脂都要求具有不溶性，一定的交联度，溶胀作用；交换容量和稳定性高。离子交换反应是可逆、等当量进行的。通常用平衡时浓度乘积的比值来表示反应进行的程度，即用 K_s （选择系数）表示。不同离子发生交换反应的趋势程度不同，人们把易发生交换反应的离子称为交换势大的离子。根据实验事实，一般有如下规律：（1）常温下稀溶液中阳离

子交换势随离子电荷的增高，半径的增大而增大。(2) 常温下稀溶液中阴离子在阴离子交换树脂上交换顺序为：柠檬酸根 $> \text{SO}_4^{2-} > \text{C}_2\text{O}_4^{2-} > \text{I}^- > \text{NO}_3^- > \text{CrO}_4^{2-} > \text{Br}^- > \text{SCN}^- > \text{Cl}^- > \text{HCOO}^- > \text{CH}_3\text{COO}^- > \text{F}^-$ 。(3) 弱酸性树脂与 H^+ 结合后，活性基团为弱酸型，不易电离，不易为别的离子置换；强酸树脂与 H^+ 结合后，活性基团属强电解质型，易电离，所以 H^+ 交换势很低。(4) OH^- 与弱碱性树脂交换时， OH^- 的交换势大于所有阴离子；与强碱性树脂交换时， OH^- 交换势很低。离子交换速率随树脂交联度的增大而降低，随颗粒的减小而增大；离子电荷越低，半径越大，反应速率越快；温度增高，浓度增大，其交换反应速率也增快。离子交换树脂可用酸、碱、盐等再生剂再生。离子交换分离广泛应用于高纯水的制备，溶液和物质的纯化，高纯试剂的制备，金属离子的分离，痕量离子的浓缩等很多方面。

【电化学分离方法】当液态溶液中有金属离子或带电有机分子时，利用电化学的方法，可将其分离，具体作法中常见者有四：(1) 适用于在酸性溶液中有金属离子的内电解分离法，由于金属—氧化—还原的电位差不同，因此可以不加外电压，即可将容易还原的金属离子分离出来，但速度甚慢，适当地外加电压，可以加速其过程；(2) 电渗析法，在电解池的两个电极上加以直流电压，使得在电解池中建立直流电场，悬浮在液体中的固体带电粒子将发生运动，从而达到分离的目的，如医学上将酶、蛋白质、病毒等的分离；工业上将橡胶或其他涂料在非导电材料上的沉积等，均取得良好效果；(3) 汞阴极法，当溶液有碱金属和重金属时（如铜、铅、锌等），可用汞为阴极，加上直流电压，重金属离子在汞阴极上形成汞齐，这样可将重金属与碱金属分离出来；(4) 电解

分离法，当溶液中有几种金属离子，利用其还原电位的不同，控制阴极电位，使其中某一种金属离子形成较强的电流，而其他的金属离子的电流强度极小，这样就可将这种金属与其他金属分离开。

【电解质】某些物质的水溶液中形成以离子键或极性共价键结合的物质。根据导电能力大小可分为强电解质与弱电解质两种。凡是由强酸、强碱及某些盐构成的水溶液为强电解质，如硫酸、盐酸、氢氧化钾、氢氧化钠、氯化钠的水溶液。凡是由弱酸、弱碱及某些盐构成的水溶液为弱电解质，如羧酸、酚、胺、氯化汞的水溶液。熔融状态能导电的物质，也叫电解质，这种电解质不是溶液。

【电离度】电解质溶解后，或多或少要解离，电离度是指电解质溶解后解离的百分数。通常以 α 表示。强电解质是完全电离的，而弱电解质是部分解离的，即 $\alpha < 1$ 。弱电解质的电离度可近似地由电导比求得，即：

$$\alpha = \frac{\Lambda_m}{\Lambda_{0,m}}$$

Λ_m 和 $\Lambda_{0,m}$ 分别为电解质的摩尔电导和极限摩尔电导（即完全电离后溶液的电导）。对于电解质来说，溶液浓度愈小，电离度就越大。

【水解】水与另一化合物反应，该化合物分解为两部分，水中氢原子加到其中一部分，而羟基加到另一部分，因而得到两种或两种以上新的化合物的反应过程。工业上应用较多的是有机物的水解，主要生产醇和酚。水解反应是中和或酯化反应的逆反应。典型的水解有四种类型：（1）卤化物的水解；（2）芳磺酸盐的水解；（3）胺

的水解；(4) 酯的水解。

【原电池】又称一次电池，一种只能使用一次不能充电再次使用的化学电源。见第五卷日用化学工业中的“原电池”。

【电解】在直流电的作用下所发生的氧化—还原反应。电解池的阴极和电源负极相连，电解池的阳极和电源正极相连，通电时，正（阳）离子向阴极迁移，在阴极放电，发生还原反应，负（阴）离子向阳极迁移，在阳极放电，发生氧化反应。电解池的电极可采用惰性材料（碳、铂等），也可采用非惰性材料（铜，锌等）。非惰性材料常发生阳极氧化作用。电解在国民经济中起着重要作用。许多基本化工产品的生产，稀有金属的冶炼，一些金属的精制、电镀等都要利用电解的方法。

【电镀】利用电解原理，在金属表面镀上一层不易氧化的金属或合金（铜，镍，铬，铜锌合金，铜锡合金等）。电镀时，镀件为阴极，所镀的金属或合金为阳极，含有镀层金属离子的溶液为电解液。例如，镀锌时，镀件为阴极，锌板为阳极，电解液中含有氯化锌，当接通电源后，阳极锌板上的锌原子失去电子成为锌离子，使阳极不断溶解，阴极上锌离子得到电子析出锌而附着在镀件上。在电解液中加入铬合剂控制金属离子的浓度，可使镀层细致，牢固。此外，电解液的 pH 值，温度以及电流密度等多种条件都影响电镀的质量。电镀制品有抗腐，美观的特点，在生产和生活中广泛应用。

【理想溶液】任一组分在全部浓度范围内符合拉乌尔定律的溶液称为理想溶液。除了光学异构体的混合物，同位素化合物的混合物，

立体异构体的混合物以及紧邻同系物的混合物等可以（或近似地）算作理想溶液外，一般溶液大都不具有理想溶液的性质。但是因为理想溶液所服从的规律比较简单，并且实际上，许多溶液在一定的浓度区间的某些性质表现得很象理想溶液，所以引入理想溶液的概念，不仅在理论上有价值，而且也有实际意义。只要对从理想溶液所得到的公式作一定的修正，就能用之于实际溶液。若用拉乌尔定律的热力学表示式表示

$$u_i = u_i^0(T, P) + RT \ln x_i,$$

式中 $u_i^0(T, P)$ 是当 $x_i=1$ ，即纯 i 组分在温度为 T ，压力为 P 时的化学式，它是 T 、 P 的函数。这个状态就是溶液 i 组分的标准态。 R 为气体常数。该式也可作为理想溶液的定义。显然这个公式包含了拉乌尔定律。

【理想溶液的依数性】非挥发溶质溶解在溶剂中后，其稀溶液的蒸气压下降，沸点升高，冰点降低，渗透压等值只与溶质的分子数有关而与溶质的种类无关。这四种性质称为稀溶液的依数性。

【理想溶液中的化学热】理想溶液中化学反应的热效应。物质在溶液中可以发生各种不同类型的化学反应，同时产生各种热效应，主要有：水解热，络合热，聚合热。它们都可用实验方法进行测量。

【拉乌尔定律】在溶剂中加入非挥发性溶质后，溶剂的蒸气压降低。拉乌尔在1887年总结出稀溶液中它们之间的定量关系，即：定温下，在稀溶液中，溶剂的蒸气压等于纯溶剂的蒸气压乘以溶液中溶剂的摩尔分数。这就叫做拉乌尔定律。用式表示： $P_A = P_A^0 x_A$ 式中 P_A^0 代表纯溶剂 A 的蒸气压， x_A 代表溶液中 A 的摩尔分数。拉

乌尔定律是溶液的最基本的经验定律之一，溶液的其它性质如凝固点降低，沸点升高等都可以用溶液蒸气压降低来解释。应用拉乌尔定律时须注意，在计算溶剂的摩尔数时，其分子量应该用气态时的分子量。

【亨利定律】亨利在1803年根据实验总结出稀溶液的一条重要经验规律：在一定温度和平衡状态下，气体在液体里的溶解度（摩尔分数）和该气体的平衡分压成正比。这就是亨利定律。用式表示为： $p = k_x x$ 式中 x 是挥发性溶质（即所溶解的气体）在溶液中的摩尔分数， p 是平衡时液面上该气体的分压， k 是一个常数，其数值决定于温度、压力及溶质和溶剂的性质。应用亨利定律须注意：（1）式中 p 是该气体在液面上的分压力。对于混合气体在总压力不大时，亨利定律能分别适用于每一种气体。（2）溶质在气相和在溶剂中的分子状态必须是相同的。（3）温度愈高或压力愈低，即溶液愈稀亨利定律愈准确。

【分配定律】实验证明，“在定温定压下，如果一个物质溶解在两个同时存在的互不相溶的液体里，达到平衡后，该物质在两相中浓度之比等于常数”，称为分配定律。用式表示：

$$c_i^\alpha / c_i^\beta = K$$

式中 c_i^α ， c_i^β 分别为溶质之在溶剂 α 、 β 中的浓度。 K 称为分配系数。影响 K 的因素有温度，压力，溶质及两种溶剂的性质。应用分配定律时注意，如果溶质在任一溶剂中有缔合现象或离解现象，则分配定律仅能适用于在溶剂中分子形态相同的部分。

【胶体溶液】又称溶胶，分散相颗粒直径在 10^{-9} — 10^{-7} 米间的多相

分散体系。分散介质为液体的称液溶胶，如黑汁；分散介质为气体的称气溶胶，如烟雾；分散介质为固体的称固溶胶，如泡沫玻璃。溶胶除颗粒大小的特征外，还具有多相，粘度大，不稳定，不可逆聚沉等特性。它不仅跟真溶液有所不同，跟高分子溶液也有一定的区别。

【胶体】一种多相体系。其中一相称为分散相，为大小在1—1000微米之间的粒子所组成，另一相是分散介质。此种分散体系可因所含各相的聚集态不同而形成不同的胶体体系。固体质点分散于液体介质中的胶体分散系称为溶胶；气体为分散介质的胶体分散体系称为气溶胶。乳状液，泡沫，泥浆也属于分散体系，但因质点较大，稳定性差，易被破坏，称为粗分散体系。

【丁达尔现象】1869年丁达尔发现，若令一束会聚的光通过溶胶，则从侧面（即与光束垂直的方向）可以看到一个发光的圆锥体，这就是丁达尔现象。其他分散体系也会产生这种现象，但是远不如溶胶显著，因此丁达尔现象实际上就成为判别溶胶与真溶液的最简单的方法。

【布朗运动】由于分子运动而引起的粒子在介质中的不规则运动。根据分子运动论观点，液体中的分子在作激烈的无规则运动时，分散在液体介质中的胶体质点要遭受运动着的液体分子的撞击。但在某一瞬间，有多少分子，从什么方向，以多大的动量撞击它都是无规的。因此，在这种撞击下，由于质点在各个方向受到的力不能互相平衡而产生的运动也是一种无规热运动，它是1827年英国植物学家布朗发现的。

【电泳】在外加电场下，胶体粒子在分散介质中的移动称为电泳。研究电泳的实现方法有很多种，如观察溶胶与其超滤液之间界面在外加电场中的移动来测定电泳速度，如主要用于生物胶体的纸上电泳，还有观察个别胶粒电泳的微电泳仪等。影响电泳的因素有：带电粒子的大小，形状，粒子表面的电荷数目，溶剂中电解质的种类，离子强度以及 PH，温度和所加的电压等。胶体的电泳证明了胶粒是带电的。

【渗析】一种净化胶体的方法。将胶体和所含溶解物放在渗析器内，由渗析膜和器外液体隔开，溶解物能透过渗析膜，而胶体粒子不能透过，从而达到净化的目的。器外液体要不断更换，使渗析膜两边有较大的浓度梯度，以利于溶解物向外扩散的进行。渗析是一种缓慢的过程，增加膜和液的接触面积，在膜两边建立高浓度差和温度差，都有助于加速渗析。从溶胶中移去离子性杂质，可在电场中进行以增加其速度，此即所谓电渗析。渗析方法在近代工业中应用甚广，制备照相器材用的无灰明胶是其中一例。

【半透膜】只允许某种混合物（溶液，混合气体）中的一些物质透过，而不允许另一些物质透过的薄膜。灼热的钯，膀胱及动植物细胞的细胞膜等都是半透膜。但不同半透膜的半透性不同，而且同一半透膜在不同条件下半透性也可以不同。膜的作用只能有限度地和筛分相比，电荷的存在及化学性质也常能起一定的作用。人工制成的半透膜也很多，如以铁氰化铜沉淀于无釉陶瓷中制成的膜，赛璐玢等，应用也很广泛，例如可以用来分离大小不同的分子等。

【分子结构】原子在分子中的成键情况和空间排列。分子结构对物质的物理和化学性质有着决定性的作用。分子结构研究其理论和实践意义都很大。

【离域键】共价键的一种。其键长、键力常数、键能等在不同分子中不同，又可分为缺电子中心键、富电子中心键、夹心键、 π 配键、共轭 π 键等几类。体系能量降低时，体系内的定域键可能变成离域键，所降低的能量叫共轭能或离域能。

【定域键】共价键的一种，定域键的键长、键力常数，键能、极矩、极化度等在不同的分子中近似等于常数，因此分子的广延性可以用定域键求出，如分子的原子化能就能用定域键的键求出。在一定条件下，定域键可能变成离域键。

【配位键】共价键中共用的两个电子通常由两个原子分别提供，但也可以由一个原子单独提供，由两个原子共用。凡共用的一对电子由一个原子单独提供的共价键叫做配位键。配位键是有极性的。配位键用短 \rightarrow 而不用短划表示，以示区别。 \rightarrow 从提供电子对的原子指向接受电子对的原子。形成配位键的条件有二：(1) 提供共用电子对的原子有孤对电子；(2) 接受共用电子对的原子有空轨道。很多无机化合物的分子或离子都有配位键，如CO分子等。一些常用的含氧酸分子，例如硫酸和硝酸分子也含有配位键。络合物是以配位键结合起来的物质。

【键参数】表征化学键特征的物理量。一般包括：键长、键角和键能。键长是分子中两原子核间的平均距离（核间距），键长越短，则

键越强。键角是分子中键和键之间的夹角,是决定分子几何构型的重要因素。键能是在标准状况下,由气态 A 原子和气态 B 原子生成 1 摩尔气态 AB 分子所释放出的能量。键能表示化学键的强度。键能越大,则化学键越牢固,分子越稳定。

【价键理论】一种获得分子薛定谔方程近似解的处理方法,又称电子配对法,简称 VB 理论。是历史上最早发展起来的化学键理论,它主要描述分子中的共价键和共价结合。此理论把着眼点局限于分子中两个相邻原子间的作用,假定原子组成分子时,原子在未化合前含有未成对的电子,如这些未成对的电子自旋相反,可两两偶合成电子对,从而生成一个共价键。到 1927 年海特勒与伦敦用量子力学的方法处理氢分子首获成功,从而奠定了 VB 理论的基础。美国理论化学家斯莱特和鲍林把它推广应用于较复杂的分子。这个理论的特点在于强调分子中电子的定域性质,共价键是由原子的价电子交换而形成。目前,价键理论这个词常用来概括一大类计算。它的出发点不仅和化学家所熟知的价键概念一致,并且它所应用的波函数形式使它很容易将分子的总能量和个别原子的能量联系起来。VB 理论因为没有从分子的整体考虑问题,计算比较复杂,随着计算技术的日益提高,价键理论将取得新发展。

【杂化轨道理论】以电子配对的价键理论为基础,应用量子力学处理由原子形成共价分子的理论。该理论认为:(1)无论在化合物中还是单质中,各种原子总是以某种激发态和杂化态参加化学结合;(2)所谓原子在化学结合中的某种激发态,是指在简单化合物中的一种原子,根据同它结合的其他原子的数目和本身的结构条件,提供必要数目的成单电子参加成键。价电子轨道中的成对电子可

以拆开成单参加化合；(3) 所谓原子在化学结合的某种杂化态，是指参加化学结合的原子，根据同它结合的其它原子数，提供出足够的成键原子轨道。成键原子轨道经杂化而成杂化轨道；(4) 杂化轨道理论把杂化轨道叫 δ -轨道， δ -轨道中的电子叫 δ -电子， δ -轨道形成的键叫 δ -键，把未参加杂化的价层轨道叫 π -轨道， π -轨道中的电子叫 π -电子， π -轨道形成的键叫 π -键。

【共振论】为了解决不能用共价键来讨论芳烃的结构问题，20世纪30年代美国化学家鲍令提出了共振论，这是一种分子结构理论，是一种经验理论，缺乏以量子力学为基础的理论，对有些化合物不适用，不能说明立体化学的问题。共振论是把一个共价键中两个电子的交换作为基础，将这种极端情况进行叠加，推广到整个分子的极限式叠加，即真实的分子是由经典的极限“杂化”而产生的。具体条件是当一个化合物中各个原子核的排列、分子间结合的方式、自旋相反的电子对数目都相同时，通过对电子对的排列，就可以从一个经典式转变成另一个经典式时，这时这个分子的结构就不可能用一个经典式表示，而可以用所有可能经典式彼此相“叠加”或“杂化”或“共振”而形成“杂化体”来表示，即这个分子可以看成这些经典式彼此共振而产生的。由于一个化合物的极限式有时有许多种，鲍令作如下定性规定：(1) 在一个化合物的许多极限式中，当有两个或两个以上能量最低，而且结构又相同或接近相同的式子时，则它们参与的共振最多，共振产生出来的杂化体也就越稳定；(2) 参加共振的极限式数目越多，杂化体越稳定；(3) 参加共振的多少视所选择的极限式而定，如在选择极限式时忽略了多激发态的结构，则将导致错误；(4) 选择的极限式越多，所应考虑共振也越多。

【分子轨道理论】量子化学中主要的化学键理论之一，也是量子化学中的一种近似计算方法。其基本观点是：物理上存在单个电子的自身行为，只受分子中的原子核和其他电子平均场的作用，以及泡利不相容原理的制约；数学上则企图将难解的多电子运动方程简化为单电子方程处理。因此，分子轨道理论是一种以单电子近似为基础的化学键理论。它可以看作是 H_2^+ 处理结果的推广。要点如下：（1）将分子中每一个电子的运动，看作是在核和其余电子的平均势场中运动，它的运动状态可以用单电子波函数 φ 来描述，这种分子中的单电子波函数称为分子轨道；（2）分子轨道 φ 可以近似地用原子轨道线性组合来表示，两个原子轨道 φ_a 和 φ_b 的线性组合产生两个分子轨道 φ_I 和 φ_{II} ：

$$\varphi_I = C (\varphi_a + \varphi_b)$$

$$\varphi_{II} = C (\varphi_a - \varphi_b)$$

其中 φ_I 的能量较原子轨道低，称为成键分子轨道， φ_{II} 的能量较原子轨道高，称为反键电子轨道，线性组合参数 C 可用变分法或其他方法确定。（3）每一个分子轨道 φ_i 有一相应的能量 E_i ，它是在该轨道上的电子，在原子核和其余电子构成的势场中运动的动能和势能之和。（4）分子中的电子根据泡利原理和最低能量原理排布在分子轨道上。（5）能够有效组成分子轨道的不同原子轨道，必须满足轨道能量相近，轨道最大重叠和轨道对称性匹配三个条件。分子轨道理论（MO 理论）比 VB 理论发展得晚，但 VB 理论在解释某些小分子如 O_2 、 O_3 特别是有机共轭分子结构时，显示了它的局限性，而分子轨道理论则得到了很大发展。

【原子轨道】分为两大类，即氢原子与类氢离子的原子轨道和多原

子的原子轨道，不论那一类，都是用一个假想的等价的有心力来描述电子所受的力，而后建立单个电子的薛定谔方程 $\hat{h}(l)\varphi(l) = E\varphi(l)$ ，此处 $\hat{h}(l) = -\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla^2 + V(rl)$ 为单个电子的哈密顿算符， μ 为约化质量， $\mu = Mm/(M+m)$ ， h 为普朗克常数， ∇^2 为拉普拉斯算符， $V(rl)$ 为作用在电子上的有心力的势函数， m 为电子质量， M 为原子核的质量。经过运算后，可以求出薛定谔方程的本征函数 $\varphi(l)$ ，即称之为原子轨道。

【配位场理论】 有关过渡金属配位化合物中化学键本质的理论。认为中心离子与配位体的结合，除靠静电作用外，还应一定程度上可能形成共价键。能解释配位化合物的许多性质。

【定性分析】 分析化学的一个分支。物质中的元素、离子、原子团或化合物，以及一样或几样物质的一个物相等等均称之为物质的组分，识别与鉴定物质组分的方法即分析法，如果仅要求分析出有无该组分，而不要求将该组分的多少分析出来时的分析方法叫定性分析。按分析时取样量的大小又可分为常量分析，半微量分析，微量分析，超微量分析等，为更进一步的定量分析打下基础。

【系统分析】 对组分不明的无机化合物的定性分析方法。首先将要进行分析的无机化合物制成溶液，再用若干种试剂将溶液分成若干组，每一组中离子的性质相近，以达到能判断此无机化合物属于哪一种类型，并可预测可能存在某种成份，这是预试验阶段。由于溶液中常含有正、负离子，因此接着要进正离子分析与负离子分析，从而确定无机化合物的组分为下步进行定量分析作准备。

【快速分析】在保证一定精确度的情况下，用简练的操作步骤，能在极短的时间内测出分析结果的分析方法。在生产过程中，常用此法来控制生产过程中的中间产物或成品，以便及时调整用料，保证产品质量。由于电子技术和数字仪表的广泛使用，此法正逐渐朝着自动化分析的方向发展。

【点滴试验】一种微量定性分析方法。用一滴或几滴被测物质的溶液与试剂进行反应，常生成斑点或有色物质，从而测定被测物质中含有哪些元素，离子或功能团。如果被测物质中含有两种离子，生成两种有色物质，则在滤纸上易被吸附的有色物在中间形成斑点，较难被吸附的有色物质在外边形成色环。该法特点是迅速，经济，可靠，不用复杂仪器，对无机物和有机物都适用。理想的点滴试验法能用一滴试液（0.001—0.05毫升）检出1微克以下的物质。

【试纸】浸过指示剂或试剂溶液的纸张，通常为卷状或小条状。通常用来检验溶液中的酸碱性和某种化合物，元素或离子的存在。例如石蕊试纸和pH万用试纸等，常用来检验溶液的酸性，碘化钾淀粉试纸和姜黄试纸等，常用来检验某些化合物或离子（前者可检验 Cl_2 ， HNO_2 ，后者可检验硼酸根离子等）。

【焰色分析】定性分析法中干法分析的一种。某些金属或它们的化合物，在无色火焰中灼烧时，而呈现特殊颜色的反应。如钠使火焰呈黄色，钾使火焰呈紫色，钙使火焰成砖红色，钡使火焰呈淡绿色，锶使火焰呈洋红色等。可用来鉴定化合物中某些元素的存在。是极灵敏的反应。试验时先将铂丝玻璃棒上的铂丝或铂丝圈用浓盐酸润湿，在火焰上灼烧，使铂丝清洁。然后用这清洁的铂丝沾取

试液，在火焰中灼烧，即可呈现特殊的颜色。

【定量分析】分析化学的一个分支，测定物质中各组分含量的实验方法，一般以百分率表示。根据分析方法性质的不同，通常可分为重量分析，容量分析和仪器分析等。根据取样多少的不同，通常可分为常量分析，半微量分析，微量分析和超微量分析等。定量分析可用以测定物质的组成和检验原料或成品的纯度，在研究生产和使用上都有很重要的意义。

【酸碱滴定法】又称中和法。容量分析中的一种重要方法。是利用酸和碱的作用，氢离子和氢氧根离子结合而生成水。一般的酸和碱，以及能与酸和碱起作用的物质，都可以用酸碱滴定法。这种方法最重要的是等当点的确定。用指示剂的变色作为当点的信号。为此，常选择适宜的指示剂，引起颜色的改变，以提高滴定的精确程度。用酸滴定可以测定碱，用碱滴定可以测定酸。在工农业生产和医药卫生等方面均有十分重要的意义。

【沉淀滴定法】又称容量沉淀法。容量分析法的一种，是以形成沉淀的反应为基础的容量测定法。常根据标准溶液在沉淀反应中所需要的用量，来计算被测物质的含量。滴定时必须用指示剂。分直接测定法和间接测定法两种：直接法是利用沉淀剂的标准溶液，直接滴定被测物质。例如，以铬酸钾作指示剂，用标准 AgNO_3 溶液直接测定 Cl^- ；间接法是加入一定过量的沉淀剂于被测物质中，再利用另一沉淀剂标准溶液滴定加入的沉淀剂的余量，例如，先加过量 AgNO_3 于被测定的 Cl^- 溶液中，再以 Fe^{3+} 作指示剂，用 KSCN 标准溶液来滴定过量的 AgNO_3 溶液。

【氧化还原滴定法】以氧化还原反应为基础的一种容量分析方法。它以氧化剂或还原剂为滴定剂，直接滴定一些具有还原性或氧化性的物质；或者间接滴定一些本身并没有氧化还原性，但能与某些氧化剂或还原剂起反应的物质。基本反应是电子转移，借助标准氧化剂（或还原剂），来测定被测物质成分的含量。根据所用氧化剂种类的不同，可分为高锰酸钾法，重铬酸钾法，碘量法，铈量法等。

【络合滴定法】又称螯合滴定法。是以络合反应为基础的容量分析方法。滴定中所用的络合剂，要求生成的络合物必须稳定，络合反应速度要快；在滴定过程中，若有多种络合物生成时，各络合物不稳定常数应有较大的差别。滴定时，常借络合指示剂颜色的改变，或电学，光学方法来测定滴定的终点，计算被测溶液的含量。它主要以氨羧络合剂为滴定剂。在络合滴定中，大约95%以上的滴定是用EDTA二钠盐进行的。

【螯合滴定法】见“络合滴定法”。

【光度滴定】在滴定过程中用光度计记录吸光度的变化（即颜色变化），从而求出滴定终点的容量分析方法，它适用于滴定有色的或混浊的溶液，或者滴定微量物质，也可提高灵敏度和准确度，它依据的是吸光度变化所遵循的朗伯—比尔定律，对要求高准确度的酸碱滴定，氧化还原滴定，络合滴定，用光度滴定可以获得更好的结果。

【仪器分析法】分析化学的一个分支，主要利用物理学原理进行分析的方法。仪器一般指大型仪器，如核磁共振仪，X射线荧光仪，X射线衍射仪，质谱仪等。包括光学分析，电化学分析，热学分析，放射性分析等。与物理化学分析无严格的区别。与一般化学分析相比，仪器复杂昂贵，技术要求较高，但操作迅速，灵敏度和准确度较高，适用于试样众多或微量物质的分析。

【电化学分析法】建立在溶液的电化学性质上的化学分析方法。溶液的电化学性质（如电极电位，电流，电导，电量）与化学性质（电解质溶液的化学组成，浓度，氧化态与还原态的比率等）之间存在一定的关系。电化学分析法利用这些关系，把被测定物质的浓度转化成一种电学参量加以测量。主要利用的是化学电池。电化学分析法分为三类：（1）既不涉及双电层，也不涉及电极反应，包括电导分析法，高频滴定法等；（2）涉及双电层，但不涉及电极反应，例如通过测量表面张力或非法拉第阻抗而测定浓度的分析方法；（3）涉及电极反应，包括电位分析法，电解分析法等。

【库伦分析法】建立在电解过程基础上的电化学分析法。它的依据是法拉第电解定律，即：在电解过程中，在电极上起反应的物质的量与通过电解池的电量成正比，每964867库仑电量通过电解池，一克当量的物质在电极上起反应，测定通过的电量、就可算出在电极上起反应的物质的量。库伦分析法可分为控制电位库伦分析法和恒电流库伦滴定法。该法要求工作电极上没有其它电极反应发生，电流效率必须达到100%。此法是目前最准确的常量分析法。

【电位分析法】利用电极电位测定物质的活度（浓度）的电化学分

析法，包括直接电位法和电位滴定法。前者包括离子选择性电极法。它利用专用电极把被测离子的活度转化为电极电位后加以测定。每种离子都有专用电极。电位滴定法则是利用电极电位的突跃来指示滴定终点的容量分析法，是电位分析法在容量分析中的应用，两者的区别在于：前者测定的是被测离子的总浓度，而后者只测定溶液中已经存在的自由离子，它不破坏溶液中的平衡关系。

【极谱法和伏安法】在电解池中放置一个极化电极和一个去极化电极，并有一定浓度的某种溶液，通过测定电解过程的电流—电位曲线，或测定出电位—时间曲线，分析这些曲线可以知道被测定浓度的成分，这是一种电化学分析方法。如果电极是固体的，或是表面静止的液体电极，则称之为伏安法。这一方法不如极谱法灵敏度高，已渐淘汰。如用表面可以周期更新的液体电极（如滴汞电极）则称之为极谱法。极谱分析的优点有（1）灵敏度高，检出限低。检出限可达 10^{-10} — 10^{-12} 摩耳/升，（2）精密度高，准确度高，分析的相对标准偏差一般为3—5%，相对误差一般为2—5%，（3）抗干扰能力强，脉冲极谱可以分辨半波电位相差 $25\mu\text{V}$ 的两个相邻的极谱波，前还原物质浓度可比被测物质浓度大五万倍，（4）样品可重复使用，（5）能同时测定多种元素，（6）应用范围广。在电化学、界面化学、络合物化学、有机化学、生物化学等方面都有广泛的应用。总之极谱法与伏安法是以电解过程为基础，或以电极电位为激发信号，以电流为响应信号或是以电流为激发信号，以电极电位为响应信号而进行测定的。

【气体扩散电极】在金属电极表面覆盖一层特制的多孔膜，孔中充满气体，气体可达到电极表面，多孔膜将金属电极与电解质溶液

隔开，多孔膜在接触溶液一面涂有催化剂，构成一种有固、气、液三相的薄膜电极。在催化剂作用下，气体与溶液发生反应，产生电流，气体又将电流传给金属电极形成通路，通过测出电流的大小，可以推测出气体含量的多少。常用的电极有双层电极、防水电极和微孔隔膜电极。这种电极通常用于制造小型仪器中，用以监测工作或生活的环境中有害气体的多少。

【离子选择性电极】这是一种电化学传感器，电极上有一层敏感膜，当敏感膜与待测离子溶液相接触时，即产生一定的电动势，此电动势与待测离子的浓度或活度有关，通过测量到的电流，可推测到电动势大小，从而推测到离子的情况。这是一种简单易行、迅速便捷、非破坏性的分析方法，可用于有色溶液、浑浊溶液情况，在少到仅有几微升样品时，也有可能分辨出离子的存在。用这种电极制成的仪器广泛地用于环境监测、水质分析、食品工业、农药分析、医药等方面。

【气敏电极】即气敏探头，适用于被测样品中含有容易气化的组分，且已知这种组分是什么物质，但不知此物质的含量的情况。选择对这种气体的离子组分十分敏感的物体作为电极（即所谓敏化的离子选择性电极），再配以参比电极，这样就构成了一个完整的电化学电池。在存在这种气体的离子组分时，就会有一定的电动势与电流，测得此时的电动势或电流值，就可推测到这种气体的离子组分的数量，从而可推测到溶液中这种组分的含量。这种方法的优点是有较高的选择性，不受试样中离子的直接干扰，缺点是响应速度较慢，对温度较为敏感。主要应用于环境监测、水质分析、生物化学检验等。

【色谱法】一种对混合物进行分离与分析的方法。利用不同物质在两相中有不同的分配系数（或吸附系数或渗透系数），当两相作相对运动时，两相中的物质进行多次反复的分配而达到分离的目的。其中流动相为气体者叫气相色谱。流动相为液体者为液相色谱。固定相呈柱状的叫柱色谱，固定相是均匀地涂在平板上的为薄层色谱，如流动相为溶液，用多孔材料作为分离介质时为凝胶色谱。用液相色谱技术，采用离子交换原理测定溶液正、负离子的方法为离子色谱法。后两种均为特殊的液相色谱。色谱法广泛的应用于石油工业、冶金工业、电镀、半导体工业、水文地质、生命科学领域中。

【气相色谱法】一种色谱分析法。用难挥发的高沸点液体（称为固定液）或固体吸附剂的固定相，用氮，氢，氦等气体（称为载气）作流动相，当易挥发的，热稳定性好的混合物注入气化室后，立即被气化，并被载气带入色谱系统，依靠各组分在色谱柱上吸附力或分配能力的不同，而得以分离，然后从色谱柱中先后流出，再进入检测器，将各组分的数量或浓度转换成电信号，并由记录仪自动记录下来，得到一组色谱图。用于测定气体或能转化为气体的物质或化合物。此法效率高，速度快，可进行定性定量分析。广泛应用于化工、石油、环保等方面。

【液相色谱法】用液体作流动相的色谱法。由于流动相和固定相都有充分的选择余地，对于复杂组分或结构相近的有机物质的分离和分析非常有用。按分类机理来分类，有液相色谱分析，液液分配色谱分析，离子交换色谱分析，和凝胶渗透色谱分析，除用于分

析外，也常用于制备纯化合物。

【凝胶色谱法】 又称尺寸排除法。一种用溶剂作流动相，多孔填料或多孔交联高分子凝胶作分离介质的液相色谱法。分离机理有平衡排除，有限扩散以及流动分离等。它主要利用混合物溶液中物质分子大小不同，因而通过多孔凝胶速率不同而加以分离。它可以作为未知物液相色谱检测的第一步。除用于未知物的分离和分析外，也能用于工业产品的质量控制和产品的常规检测。

【薄层层析】 即薄层色谱法（参见“色谱法”）。将活性物质均匀地涂在平板上，板可用玻璃、金属或塑料制成，薄层厚度约为0.25毫米左右，采用色谱分离与分析方法，可进行定量或定性分析。这种方法操作简单，效果好，适用面广，可用于各种有机或无机化合物的分析与分离，特别是进行吸附层分析时效果更好。但对沸点低的物质，由于蒸发较快，不适用。

【光谱分析法】 又称光谱化学分析。根据物质所发生的光谱来测定该物质的组成的分析方法。可分为发射光谱分析法和吸收光谱分析法。发射光谱是由火焰，电弧或电火花直接启发试样所产生。根据特征谱线的波长可以确定被测物质所含元素的种类，一般称作光谱定性分析。根据特征谱线的强度可以确定被测物质的数量，一般称做光谱定量分析，具有极高灵敏度。吸收光谱是由光源通过含有被测物质的介质被吸收以后所产生。根据光源波长的不同，可分为可见光吸收光谱，紫外光吸收光谱和红外光吸收光谱，常用于鉴定有机物，并可用于稀土的分离和鉴定。

【原子发射光谱法】一种光谱分析法。原子中的光学电子受激发后，处于原子内较高能级，当光学电子跃迁到正常状况的能级时就可放出光来，在光谱上呈现为线性光谱，这种线性光谱反映了原子及其离子的性质。通常可用电弧光源、电火花光源、电感耦合高频等离子体光源等使被测元素原子化，并使原子中的光学电子处于激发态。用光谱仪记录下发射光谱，而后与铁谱进行比较。这种分析方法速度快，试样消耗少，选择性好，灵敏度高。适用于微量与痕量无机组分分析。广泛用于冶金工业、稀土元素工业与超纯材料分析。

【火焰分光光度法】一种原子发射光谱法。利用高温火焰将试样烧成气体，而后将气体分子解离、原子化和处于激发状况，而后用光谱计记录下其发射光谱，根据样品中该元素的浓度和其特征谱线的发射强度间有一定关系，将所测得的结果与已知浓度标准样品的测量结果进行比较，可知该元素在试样中的浓度，此法简单易行，精确度高，样品消耗量小，适用于碱金属与碱土金属元素的定量分析。常用的火焰有氢—空气火焰、乙炔—空气火焰、乙炔—氧化亚氮火焰。最后一种火焰是目前唯一获得广泛应用的火焰，用它可测70多种元素。

【化学发光分析】当某些化学反应放出化学反应能时，化学反应能可使产物处于电子激发态，这种产物就可以发生辐射跃迁将能量传给能发光的分子使之发光，这种现象称之为化学发光。用光度计测量出化学发光，从而可测得痕量元素，可用于冶金、石油、地质、生物科学、材料科学、环境科学等领域内。

【红外光谱法】利用红外光谱进行物质分析的方法。红外光谱是以波长或波数为横坐标，以强度或其它随波长变化的性质为纵坐标所得到的反映红外射线与物质相互作用的谱图。可分发射光谱和吸收光谱两类。主要测量仪器有色散型光谱仪和傅立叶变换红外光谱仪。不但可以用来研究分子的结构和化学性质，而且还可以作为表征和鉴别化学物种的方法。红外光谱有高度的特征性，可简用与标准化合物红外光谱对比的方法来做分析鉴定。在高聚物构型，构象，力学性质的研究以及物理，天文等领域有广泛应用。

【紫外—可见分光光度法】根据被测量物质分子对紫外—可见波段范围（150—800纳米）单色辐射的吸收或反射强度来进行物质的定性、定量或结构分析的一种方法。分光光度测量是关于物质分子对不同波长和特定波长处的辐射吸收程度的测量。朗伯—比尔定律是分光光度法和比色法的基础。适用于能量不同的各种电磁辐射，也适用于稀溶液，气体和均质固体。可作定量、定性和结构分析，研究反应动力学、溶液平衡等。

【比色法】通过比较或测量有色物质溶液颜色深度来确定待测组分含量的方法。它以生成有色化合物的显色反应为基础，首先选择适当的显色剂与待测组分反应，形成有色化合物，然后再比较和测量有色化合物的颜色深度。常用的比色法有两种：目视比色法和光电比色法。两种方法都以朗伯—比尔定律为基础。由于光电比色法消除了主观误差，提高了测量精度。现在，紫外—可见分光光度计已逐渐代替了光电比色计，分光光度法也随之逐渐取代了比色法。

【旋光法】利用物质的旋光性质测定溶液浓度的方法。许多物质具

有旋光性，如含有手性碳原子的有机化合物，当平面偏振光通过这些物质（液体或溶液）时，偏振光的振动平面向左或向右旋转，这种现象称为旋光，有左旋和右旋之分。这些旋光性质为化合物的特性，可用于鉴别和定性测定。测定旋光的仪器称为旋光计。旋光法可用于各种光学活性物质的定量测定和纯度检验。

【X 射线衍射分析法】晶体受 X 射线照射时，其中的原子向四周散射 X 射线。由于晶体具有周期结构，这些散射 X 射线相互干涉的结果，只在某些特定的方向上发生衍射线，这种现象称为 X 射线衍射。各种不同的结晶物质具有不同的晶体结构，其衍射线的方向和相对强度也就各不相同。因此，各种结晶物质具有特定的衍射花样，就象指纹一样各不相同。故可根据多晶的衍射花样来鉴别其化学组成和物相。这是 X 射线衍射法进行物相定性分析的基础。由于衍射强度与该物相的含量有关，X 射线衍射法也可用于多晶物质的定量分析。根据单晶的衍射花样，可测定晶胞的形状和大小，并由衍射强度数据计算原子的空间位置。此外，该法还可用于测定晶体粒度和单晶取向，以及高聚物的结晶度，长周期，择优取向和点阵畸变等。

【重量分析】又称重量法。定量分析方法的一种。通常将被测组分通过化学处理，与其它组分分离，转化为固相组成的化合物或单质，然后称重的方法。测定被测组分的含量，根据分离方法的不同，一般分为沉淀法，气化法，电解法，与容量分析合称经典化学分析方法，但比容量分析精确度高。由于需经过取样、溶解、沉淀、过滤、洗涤、干燥、灼烧、称重等步骤，操作繁琐，耗时较长，适用于含量不太低的元素的精确分析，但不适用于微量和痕量组分

的测定。

【化学天平】一种化学上用的精密质量计量仪器。传统的化学天平由天平和砝码组成，天平是根据杠杆原理制作的计量器具，砝码是质量的标准。目前普遍使用的是半机械或全机械加砝码的电光天平。天平按精度不同分为10级。天平的精度是该天平最小分度值与最大荷载值之比。最小分度值越小，载荷越大的天平，精度愈高。一般精度为三至五级。天平的分类有等臂双盘天平，单盘天平两种。

【热分析】利用在不同温度及其变化的情况下，测量出描述物质性质的某些参数与温度的关系，从而可能分析此物质的某些性质的方法叫热分析法。通常用电炉来控制温度的变化，常见的温度程序控制有三种形式：（1）等速升温或降温；（2）恒温；（3）等速升温—恒温—等速升温。常见的热分析法有热重量法、差热分析、热机械分析、差热扫描量热法等等。热分析法在物理、化学、化工、冶金等领域内有广泛的应用。

【热重量法】热分析技术之一，英语缩写为TG。在温度变化时能及时测出试样的重量的仪表叫热天平。试样在加热过程中如有脱附（或吸附）、蒸发、升华、脱水、热分解以及气体发生化学反应时，试样的重量也随之而变化，这样就可以作出重量—温度曲线（即TG曲线），分析重量—温度曲线就可以得到样品的许多性质，如此种物质稳定存在的温度区间、热分解的起始温度、蒸发或升华速度与温度的关系等等，有时还可根据样品失去的重量推测出反应物是什么。

【差热分析】又称差示热分析。热分析法的一种。试样在加热过程中可发生物理变化和化学变化，同时伴有吸热或放热现象发生，若以惰性物质作为基准物（参比物），则试样与基准物之间就有一个温度差，这个温度差随试样的温度变化而变化，温度差—试样温度曲线叫温差曲线(DTA 曲线)，分析温差曲线就可以研究试样所发生的物理变化和化学变化。常用于测定物质的熔点、沸点、凝固点、熔化热、气化热、纯度、比热等，有时还可根据温差曲线作出相图来，进行固相反应、热分解反应、脱水反应、反应动力学等方面的研究。

【物相分析】即对物质中各组分的状态分析，如金属和合金的金相分析，金属中的非金属物存在形态的分析，矿石及其加工后的各种产物的状态分析，价态分析，晶态结构分析等。分析方法有：(1) 物理法，如磁选分矿，比重的测发、红外线光谱法、紫外线光谱法，可见光光谱法、旋光法、X 射线衍射分析法等；(2) 化学法，如选用溶剂将物质的各组分有选择的分离出来，但应注意到溶剂会不会改变原有组分的物理性质与化学性质。物相分析是一个范围非常广的分析方法，凡是能分析物质状态的方法都是物相分析法。

【分子光谱】分子从一种能态改变到另一种能态时的吸收或发射光谱（可包括从紫外到红外直至微波谱）。分子光谱与分子绕轴的转动，分子中原子在平衡位置的振动和分子内电子的跃迁相对应。分子内具有转动能量 E_r ，振动能量 E_v 和电子能量 E_e ，每一种能量都与一组量子数相联系。在某一瞬间，分子内的总能量可表示为： E

$=E_v + E_r + E_e$ 。式中的转动能 E_v 最小,百分之几电子伏;振动能 E_v 是十分之几电子伏,电子能量 E_e 最大,几个电子伏。与分子中电子能级间的跃迁相对应的是电子光谱,其谱带是粗结构,若还伴有转动态的变化,则得到谱带的精细结构,其中包括振动光谱,转动光谱和振转光谱。

【转动光谱】一个分子的同一电子态和同一振动能级的两个不同的转动能级间跃迁所产生的光谱。体系的转动能量 E_r 是量子化的。当转子从较低的能级跃迁到较高的能级时,吸收光量子,从而产生纯转动光谱。对于刚性双原子分子,跃迁时的选择要求为

$$\Delta J = \pm 1$$

式中 J 是与转动态对应的转动量子数,它可以取 $0, 1, 2, \dots$ 一系列整数。纯转动光谱是由一系列等间距的谱线组成。两条相邻谱线的波数差等于常数。非刚性双原子分子和多原子分子的纯转动光谱则要复杂得多。

【振动光谱】同一电子态的不同振动能级间跃迁所产生的光谱。分子的振动是量子化的。如果一个分子由 N 个原子组成,对非线性分子应有 $3N-6$ 个独立的振动方式,每一种振动方式的量子化都可以用一个有关的量子数来表示。若振动的频率分别为 ν_1, ν_2, \dots , 则相应的振动量子数分别为 ν_1, ν_2, \dots 分子的振动态一般是按量子数的次序 (ν_1, ν_2, \dots) 来表征的。辐射的发射是由于振子从较高态 (ν') 跃迁到较低态 (ν'') 而发生的。

【振转光谱】同一电子态的不同振动—转动能级间的跃迁所产生的光谱。因此,它是由若干个谱带所组成,一个给定谱带中的谱线都

属于同一振动跃迁。在任何实际分子中，转动和振动是同时存在的。如果忽略振动和转动的相互作用，则振子和转子的能量可以简单地相加。跃迁时的选择定则与振子和转子这两个系统各自的选择定则相同。即

$$\Delta v = \pm 1, \quad \Delta J = \pm 1$$

式中 v 为线性谐振子振动量子数， J 为与转动态相对应的转动量子数。在异核双原子分子中，有强的振转光谱，而在同核的双原子分子中，不存在纯转动光谱，也不存在振转光谱。

【电子光谱】 由分子中的电子能级之间的跃迁所产生的一种光谱。它包括吸收光谱，发射光谱和反射光谱等，但研究较多和应用较广的是吸收光谱。电子光谱出现在远紫外，可见及近红外光谱区，而多数在紫外可见区，所以也称紫外—可见光谱。分子吸收或发射的光频率 ν 与分子的能级间存在着以下关系：

$$\Delta E = h\nu$$

式中 h 为普朗克常数。分子在电子跃迁过程中会伴随有振动和转动能级的变化。分子的电子发射光谱还有荧光光谱和磷光光谱等。

【喇曼光谱】 当一束入射光通过样品时，在各个方向均发生散射，除有波长不改变的散射光瑞利散射外，还存在波长发生改变的散射光，这种散射在1928年由印度物理学家喇曼发现，被命名为喇曼散射。样品分子受激发能发射出两种谱线：斯托克斯线和反斯托克斯线，它们统称喇曼谱线。喇曼光谱与红外光谱比，有低波数方向的测定范围宽，谱图较简单，固态样品可直接测定等优点，在有机化学，生物学等领域得到广泛应用。

【穆斯堡尔谱】一种原子核无反冲 γ 射线共振散射或吸收现象。1957—1958年由德国物理学家穆斯堡尔在观察 ^{191}Ir 的 ^{129}KeV γ 射线共振散射本底时首先发现了这一现象。一个自由原子核发射或吸收 γ 光子时，原子核都要受到反冲。反冲能量 $E_R = E_0^2/2mc^2$ 。其中 E_0 是激发态能量和基态能量差， m 是原子核质量， c 是光速。这个能量损失使发射谱和吸收谱相差 $2E_R$ 的能量，此外核激发态的能量宽度 Γ 取决于激发态寿命 τ 。对大部分核辐射， $E_R \gg \Gamma$ ，故难以实现共振吸收。穆斯堡尔发现，若将原子核束缚在晶体点阵上，则发射或吸收 γ 光子时，整个晶体反冲，这时 m 应该代以晶体的质量。晶体质量远大于一个原子核的质量，于是反冲能量 E_R 显著减小，因此容易观察到共振吸收现象。这就是所谓的无反冲 γ 射线共振吸收，即穆斯堡尔效应。在穆斯堡尔谱中可以清楚地分辨起精细相互作用（同质异能移位，四极分裂和原子核的塞曼效应）引起的位移和分裂，根据已知核周围环境的电磁结构则可以研究核的特性，反之，若核的性质已知，由测量结果可以推得核周围环境的电磁结构，即用穆斯堡尔核为探针研究物质的微观结构。穆斯堡尔谱仪具有测量共振线宽非常窄的特点，能量分辨率极高，可达 $10^{-10} - 10^{-14} (\Gamma/E_\gamma)$ 。并且它能够以颇为直观的方式来分辨超精细结构间的相互作用，并能获得有关数值。如可精确地测定晶格结构、有序度、缺陷、离子价态、氧化和自旋态、化学键性质、动力学过程和化学中的磁现象等。目前它已广泛应用于核物理、固体物理、化学、生物、地质、冶金、材料科学、天体物理以及考古学等诸多领域，已成为独立的新兴边缘交叉学科——穆斯堡尔谱学。

【红外光谱】见“分子光谱”。

【光电子能谱】利用光电效应的原理测量单色辐射从样品中打出来的光电子的动能（并由此测定其结合能）、光电子强度和这些电子的角分布，并应用这些信息来研究原子，分子，凝聚相，尤其是固体表面的电子结构的技术。对固体而言，它是一项表面灵敏的技术。所用仪器为光电子能谱仪。与光电子能谱有密切关系并往往联合使用的是俄歇电子能谱，并统称为电子能谱。

【核磁共振谱】在恒定磁场中的具有自旋的原子核受射频辐射照射，射频频率等于原子核在恒定磁场中的进动频率时产生的共振吸收谱。目前核磁共振谱已成为测定有机化合物的有力工具。用此法分析有高分辨及宽谱线两大分支。高分辨核磁共振是分析分子结构的方法。有些原子核有磁性，在外磁场作用下可以吸收一定波长的无线电波而发生共振吸收。各种磁性核在不同的条件下共振。由于在分子中所处的化学环境不同，同一种磁性核的共振位置也稍有差异。所以在不同频率处就有不同强度的吸收，构成共振的吸收谱。此外，谱峰的精细裂分又说明邻近磁核的数目与性质，谱峰的面积与共振核的数量成比例，这是本法定量分析的基础。它广泛应用于鉴定分子结构。基团分析，异构体分析，测定高聚物的组成等等。宽谱线核磁共振的工作对象是固体。这种方法可测定固体中的游离水，结晶度等。

【质谱】气体或液体和固体的蒸气，在低压下经电子冲击而产生离子，穿过电场和磁场后，按照质量与电荷的比例分为若干离子柱而形成质谱。能使离子柱在感光片上留下条痕的仪器称作质谱仪。用于同位素的研究以及原子量和分子量的测定等。用电流计记录

离子柱的强度的仪器称作质谱计，用于测定烃，醛，醚，酯等的混合物。

化 学 反 应

【化学反应】 又称化学变化或化学作用。指在原子核组成不变的情况下生成新物质的变化，与物理变化相对而言，这是由于核外电子运动状态的改变而引起的物质组成的质变。不能笼统地认为，一切生成新物质的变化都是化学变化、放射性变化、人工核反应等，由于原子核组成的改变，也生成了新物质，这些不属于化学变化的范畴。总结起来，化学反应有以下几个特点：（1）一定要产生新物质。如 NaCl 和 KNO_3 的溶液混合，没有产生新物质，因而并无化学反应发生。但 NaCl 和 AgNO_3 的溶液混合后，产生了 AgCl 沉淀，得到了新物质，因而发生了化学反应。（2）遵循物质质量守恒定律。实验证明在化学反应中，反应物的总质量等于生成物的总质量。也就是说，化学反应前后，物质的性质变了，而质量不变。这是由于化学反应是原子间的分解和化合的过程，反应前后各元素的原子总数保持不变。这一规律称为质量守恒定律（或物质不灭定律）。（3）遵循能量守恒定律。在化学反应过程中，常吸收或放出热量。如化学反应放出热能（如碳的燃烧）、光能（镁条在氧中燃烧）、电能（电池放电）、以及机械能（如炸药爆炸）等。各种形式的能量可以相互转化，但不能无中生有，也不能消灭，这称为能量守恒定律。质量守恒定律和能量守恒定律是化学中重要的基

本定律,也是自然界一切变化所遵循的普遍规律。根据反应物是否是碳氢化合物及其衍生物,可把化学反应分为无机化学反应和有机化学反应两种,无机化学反应和有机化学反应又可分成更多的种类。在化学反应中除了质量守恒定律和能量守恒定律外,还有其他一些基本定律,这些定律大都是实验经验和结果的总结,如化合量定律、定比定律、阿佛伽德罗定律等。化学反应是旧的化学键破坏、新的化学键形成的过程,因而反应过程中有能量的变化。化学热力学就是研究化学反应中的热效应的,但化学反应进行的快慢即化学反应速率却是化学热力学不能解决的问题,这个问题的解决需要借助于化学动力学,需要依靠一些假设和理论,如碰撞理论、过渡状态理论。围绕酸碱反应和平衡,历史上提出过不少酸碱理论,这些理论都有其成功的一面,但同时又都有不完善的地方。氧化还原反应是很大的一类反应,应用范围很广,电化学反应便是典型的氧化还原反应,电化学反应的工业规模的应用相当广泛。光化学反应也是一类有着相当大的研究和开发应用的反应。高分子化学反应从有机化学反应中逐渐分离出来,这是因为其应用的范围日益广泛,与人们的日常生活息息相关,在高、精、尖科技领域的应用逐日增多,且高分子科学与生命科学的联系是很紧密、乃至不可分割的,对高分子的研究将会有助于对生命现象的认识。总而言之,化学反应对于人类来说是十分重要的,对化学反应的深入研究和广泛开发利用将会为全人类的生活造福。

【化学反应的类型】化学反应是电子、电子对以及质子或原子—分子微粒从一个试剂向另一试剂转移,同时伴有试剂化学性质变化的过程。化学反应合理地分为五种类型:(1)原子氧化数有改变的电子转移反应,即氧化—还原反应。根据电子理论,离子、原子或

分子失去电子称为氧化，如 $\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}$ ，结合电子称为还原 ($\text{Br}_2 + 2\text{e} \rightarrow 2\text{Br}^-$)。得到电子的原子—分子微粒是氧化剂，失去电子的原子—分子微粒是还原剂。氧化和还原是互相联系的过程。氧化还原反应分为三类：分子间的（原子间的），分子内的，歧化作用（自身氧化还原反应）等。（2）有给予—接受键形成的电子转移反应。这些反应另外称为络合物形成反应或配位体交换反应。它们是基于电子对从作为电子给予体的原子—分子微粒不完全地转移到电子接受体粒子的空轨道而产生的给予—接受键。与氧化还原反应不同，在络合物形成反应中所发生的是电子对的转移，而不是单电子的转移，在这种情况下，电子对的转移不伴有给出电子的原子上未配对电子数的改变。（3）物质酸（碱）性有变化的质子转移反应。这些反应称为酸碱作用反应。它们的进行取决于质子在分子间或分子内转移。酸-碱反应称为质子迁移反应，并且是可逆的，在逆反应中也发生质子传递，中和反应是酸与碱之间的化学反应，导致微粒的酸碱性的减弱。溶剂分解反应是溶质和溶剂的反应，如果溶剂是水，即为水解反应。溶剂分解反应导致增加溶液的酸性或碱性，并向离开介质呈中性的方向改变 pH 值。（4）无键数改变的原子—分子微粒转移反应（原子、分子交换反应）。原子—分子交换反应（同位素交换反应、有机化合物分子中的自由基取代、亲电和亲核取代、以及许多其它反应）属于这类反应。这类反应的进行在于一种原子—分子微粒被另一种所取代，反应的特点是所转移的原子—分子微粒的性质在很大程度上保持不变。（5）有键数改变的原子—分子微粒转换反应：a 离解反应；b 缔合反应；c 聚集反应。键数减少与离解作用有关，键数增加与缔合有关，而键数的进一步增加与聚集作用有关。除了一种粒子的转移反应之外，同时有几种粒子转移的反应也是可能的，这就是复杂的

化学反应。

【氧化还原反应】反应过程中，反应物的原子或离子发生氧化数改变的反应。氧化还原反应的实质是电子的得失，且得失电子数相等。有时是电子对的偏移。氧化还原反应是一类重要的化学反应，常用来制取新物质，如：接触法制硫酸、电解食盐水制烧碱等。氧化还原反应也是化学热能和电能的来源之一。

【歧化反应】又称自身氧化还原反应。在反应中某种元素的原子或离子有两个以上，同时这种元素又具有高低不同的氧化态，在一定条件下，此种元素的原子或离子中一部分被氧化，一部分被还原，即这种元素同时参加了氧化反应与还原反应。卤素就是例子，如氯有0价，-1价、+1价、+5价、+7价五种氧化态故氯就是可参与歧化反应元素之一。

【复分解反应】化学反应的基本类型之一。指两种化合物互相交换成分生成两种新的化合物的反应。以在溶液中进行的离子反应为主。复分解反应以产物有无气体、沉淀及弱电解质（如水）生成来判断是否发生。此类反应都是非氧化还原反应。

【离子反应】有离子参加的化学反应。例如：氢氧化钠和盐酸的反应，实际上是氢离子和氢氧根离子之间的反应。氯化钡和硫酸钠的反应，实际上是钡离子 Ba^{2+} 和硫酸根离子 SO_4^{2-} 的反应。离子反应除了可以用化学反应方程式表示外，还可以用离子方程式表示。置换反应也可以认为是离子反应。

【聚合反应】 又称加聚反应。在催化剂或过氧化物存在下，烯烃及其衍生物通过加成的方式相互结合，生成高分子化合物，称为聚合反应，高分子化合物亦称为聚合物。聚合反应又可分为加聚反应和缩聚反应：（1）加聚反应：由一种或多种简单分子，通过加成反应结合成高分子化合物的反应。生成的高分子化合物称为聚氯乙烯。（2）缩聚反应：具有两个或两个以上的官能团的单体，相互反应，生成高分子化合物，同时有简单分子（如水、氨、卤化氢、醇等）产生。加聚反应和缩聚反应是合成高分子化合物的两个最基本的反应。在有机合成工业中有着重要作用。

【自由基聚合】 又称游离基聚合。用自由基引发，使链增长（链生长），自由基不断增长的聚合反应。它的主要应用范围是烯类的游离基加成聚合。烯类单体的加聚反应绝大多数属于连锁聚合。连锁聚合反应一般由链引发、链增长、链终止等基元反应组成。聚合时常用的引发剂 I 先形成活性种 R^* ，活性种打开单体 M 的 π 键，与之加成，形成单体活性种，而后进一步不断增长，不断与单体加成。最后，增长着的活性链失去活性，使链终止。

【离子型聚合】 在离子型聚合中，增长链分子常是带反离子（又称抗衡离子）的离子对，例如异丁烯用少量的引发剂如 BF_3 （含有微量水）引发进行正离子聚合反应时， BF_3 先和 H_2O 形成离子对 $H^+(BF_3OH)^-$ ，然后再与单体分子反应生成离子对 $(CH_3)_3C^+(BF_3OH)^-$ ，这是引发过程；离子对继续与单体分子反应，使端基带正电荷，这是链增长过程；增长链正离子可以发生自发终止、转移终止和结合（与反离子）终止。在进行负离子聚合时，增长链末端带负电荷，它的反离子是正离子，在没有其他因素影响下，烯

烃单体的负离子聚合没有链终止反应。用配位聚合催化剂 $\text{TiCl}_3\text{—Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 进行丙烯聚合，得到全同立构（等规）聚丙烯。聚合时，丙烯首先在钛（Ti）的空位上配位，然后插入钛-碳键中，且增长链端带负电荷，为此常称为配位负离子聚合。

【化学反应的基本定律】 化学反应是微粒（分子、原子、粒子）之间的作用，是客观的，因而其作用的规律，产生的现象和结果也是客观的，具有再现性和重复性。在对化学反应的长期研究过程中，科学家们通过长期的实验观察和摸索，根据所得实验数据，总结出了一系列的规律性知识，这些规律性知识往往以定律的形式表示出来。在这些定律当中，有一些是基本定律，它们可以作为进一步研究化学反应的理论依据和基础。例如：1756年罗蒙诺索夫提出、拉瓦锡于1774年证明的质量守恒定律表明，在任何与周围环境隔绝的体系中，不论发生任何变化或过程，其总质量是不变的，或者说，化学变化只能改变物质的组成，但不能创造物质，也不能消灭物质，所以该定律又称物质不灭定律。宇宙间物质的质量是否守恒，自古以来就是哲学家们探讨和争论的重大问题。罗蒙诺索夫、拉瓦锡等人用天平精确研究了化学反应过程中的质量关系后才使质量守恒定律被公认为是精确的科学定律。20世纪以来，随着原子核科学的发展，人们又发现高速运动物体的质量随其速度而变，实物和场可以互相转化，物质的质量和能量是相互联系的。著名的爱因斯坦质能关系式揭示了质能关系：

$$E = MC^2 \text{ 或 } \Delta E = \Delta M \cdot C^2$$

式中 E 为能量， M 为质量， C 为光速。这个现象并不意味着物质的消灭，而是物质的静质量转化成另外一种运动形式，现在人们已把质量守恒和能量守恒两个定律联系起来，称为质能守恒定律。化

学反应的基本定律在历史上都起过重要的作用，比如阿佛伽德罗定律于1811年由意大利化学家阿佛伽德罗提出，其内容是，在同一温度、同一压力下，体积相同的气体所含的分子数都相同。例如在0℃，1大气压下，22.4升的氢气、氧气和氮气的分子数都是 6.0221367×10^{23} （即阿佛伽德罗常数）。结合道尔顿提出的原子论，阐明气体化合体积定律，19世纪末，分子运动论对该定律予以理论证明。阿佛伽德罗定律在原子、分子学说的形成和原子量的测定等方面都起过重要的历史作用。

【质量守恒定律】 又称物质不灭定律。在孤立系统中，参加化学反应的全部物质的质量等于反应后全部产物的质量。1756年俄国的罗蒙诺索夫通过实验首先提出。1774年法国的拉瓦锡又进行了多次实验加以证明，这一定律才获得公认。质量守恒定律是第一个关于化学反应的质量定律，它的提出为化学分析以及精确地研究物质提供了可能性。

【化合量定律】 在二元化合物中某元素的化合量可定义为：

$$\text{元素的化合量} = \frac{\text{元素的原子量}}{\text{元素的化合价}}$$

每一种元素在不同化合物中可能有不同的化合量，但不同元素的任何两个不同的化合量之比为正整数之比；这就是化合量定律。化合量定律在今日已不太起作用。但在19世纪中叶以前，人们对于原子的了解很模糊，元素的原子量问题远还未解决，那时人们已从大量的实验数据中总结出了化合量定律，这对于确定当时已知元素的原子量起了极其重要的作用。对以后认识元素的原子结构起了促进作用。

【定比定律】又称定组成定律。每一个纯净的化合物，其组成元素的质量比为一固定数值。例如氧化铜中，铜与氧的质量比为64:16。无论氧化铜的来源如何，无论用合成法或分解法测定，铜和氧的质量比都是这一确定的数值。定比定律对于一般化合物是完全适用的，但也有例外。例如金属互化物的组成在相当大的限度内可以变化；同一化合物中的元素若是不同的同位素，则组成略有不同。

【倍比定律】当甲乙二元素互相化合形成两种或两种以上的化合物时，则在这些化合物中，与一定质量甲元素相化合的乙元素的质量，必互成简单整数比。倍比定律于1803年由道尔顿提出。

【气体化合体积定律】在同一温度、同一压力下，参加同一反应的各种气体的体积互成简单整数比。例如：氢气和氯气化合生成氯化氢气体时，三者的体积比为1:1:2。像其他气体定律一样，气体化合定律只对理想气体才是完全正确的，但在室温和大气压下，大多数气体仍遵守此定律；只在高压条件下，它才不适用。该定律是19世纪初法国科学家盖吕萨克提出来的。

【阿伏伽德罗定律】在相同温度相同压力下，相同体积的气体含有相同数目的分子。1811年由阿佛伽德罗提出假说，后来被科学界承认。阿佛伽德罗定律说明了气体反应的体积关系，用以说明气体分子的组成，为气体密度法测定气态物质的分子量提供了依据。对于原子分子学说的建立起了一定的作用。

【阿伏伽德罗常数】1摩尔的任何物质所包含的基本单元数，即 12

克 ^{12}C 中所包含的原子个数。实验测得其数值约为 6.022×10^{23} 。阿佛伽德罗常数的测定方法很多,采用油滴实验、电解法、X射线衍射等不同方案,测得的数值不尽相同, 6.022×10^{23} 摩尔 $^{-1}$ 只是近似值。由于“物质的量”是以阿佛伽德罗常数的精确值,对于最准确地确定物质的质量有着十分重大的意义。

【杜隆-珀替定律】大部分固态单质的比热容与原子量的乘积几乎相等。1819年法国科学家杜隆和珀替测定了许多单质的比热容之后,发现了这一定律。比热容和原子量的乘积就是1摩尔的原子的温度升高1度所需的热量,可称为原子热容,所以这个定律也叫原子热容定律,即“大多数固态单质的原子热容几乎都相等。”在室温下,这个定律对大多数金属和一些非金属是正确的,对有些物质如硼、铍、金刚石等则在高温下才比较正确。在物理学的研究中,杜隆-珀替定律首次揭示了宏观物理量比热容与微观粒子数之间的直接联系。为统一原子量提供了独特的信息。正确的原子量是发现周期律的依据,所以杜隆-珀替定律起过重要的历史作用。

【反应速率】即化学反应进行的快慢。用单位时间内反应物浓度的减少或生成物浓度的增加量来表示。浓度单位一般用摩尔·升 $^{-1}$,时间单位用秒、分或小时。化学反应并非均匀速率进行:反应速率分为平均速率(一定时间间隔里平均反应速率)和瞬时速率(给定某时刻的反应速率),可通过实验测定。除了反应物的性质以外,浓度、温度和催化剂也是影响反应速率的重要因素。气体反应的快慢还与压力有关。增加反应物的浓度,即增加了单位体积内活化分子的数目,从而增加了单位时间内反应物分子有效碰撞的次数,导致反应速率加快。提高反应温度,即增加了活化分子的百分数,也

增加了单位时间内反应物分子有效碰撞的次数，导致反应速率加快。使用正催化剂，改变了反应历程，降低了反应所需的活化能，使反应速率加快。在化工生产中，常控制反应条件来加快反应速率，以增加产量。有时也要采取减慢反应速率的措施，以延长产品的使用时间。

【反应速率常数】反应速率方程式中的比例常数。如下列化学反应：



速率方程式为

$$v = K[A]^m \cdot [B]^n$$

对于有气体参加的反应，速率方程式也可用气体的分压来表示：

$$v = K' p_A^m \cdot p_B^n$$

式中 K （或 K' ）称为该反应的反应速率常数，在数值上等于单位浓度时的反应速率。在一个给定的反应式中， K 值是温度的函数，与反应物浓度无关。 K 值越大，则反应速度越大。 K 值一般是通过实验测定的。上述反应速率方程式，仅适用于一步完成的基元反应。对于分步进行的化学反应，则不能根据总反应式中反应物的分子系数加以确定。

【反应级数】反应速率方程式中浓度项的方次之和，称此反应的反应级数。例如下列基元反应为：



其反应速率方程为：

$$v = K[A]^m \cdot [B]^n$$

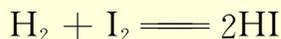
此反应即为 $m+n$ 级反应。若 $m+n=1$ ，则为一级反应，若 $m+n=2$ ，则为二级反应。

【反应机理】 又称反应历程。一般的化学反应往往要经过若干个基元反应才能最终转化为生成物，这些基元反应代表了反应所经过的途径，在化学动力学中就称为“反应历程”。了解反应历程可以深入、细致地掌握反应的内在规律，从而达到控制反应的目的。

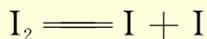
【基元反应】 在有效碰撞中，反应物分子一步转化为生成物分子的反应。例如：



许多化学反应并非基元反应，而是由几个中间步骤所组成的，其中每一个步骤就是一个基元反应。例如：



反应是由下面两个步骤完成的：



【质量作用定律】 当温度恒定时，在均相物系中，化学反应速度与反应物的活动质量即浓度或分压成正比。这一定律是由挪威化学家葛尔德堡和瓦格提出的。例如某一简单反应



$$v = K [\text{A}]^m \cdot [\text{B}]^n$$

K 为反应速度常数，不同的反应，速度常数不同，同一反应的 K 值大小跟反应温度和催化剂有关，而跟反应物的浓度、压强无关。

【反应分子数】作为反应物参加每一态-态反应的化学粒子（分子、原子、自由基或离子）的数目。其可能采取的值是不大于3的正整数。当其数值为1，2，3时，分别称为单分子反应、双分子反应和三分子反应，最常见的是双分子反应，单分子反应次之，三分子反应较罕见。反应分子数和反应级数是属于不同范畴的概念。反应分子数是对微观的态-态反应而言，而反应级数则是对宏观的总包反应而言。反应分子数是必然存在的，而且只能是不大于3的正整数，不可能是分数、零或负数，这是和反应级数明显不同的。对于基元反应或简单反应来说，反应级数和反应分子数这两个概念均被引用，而且其数值常相等，但含义还是不同的。反应级数指该反应的宏观速率对反应物浓度依赖的幂次；而反应分子数则指构成该基元反应或简单反应的各个态-态反应的分子数。

【平衡常数】在一定温度下，可逆反应达到平衡时，生成物以分子数为乘幂的平衡浓度的乘积与反应物以分子数为乘幂的平衡浓度的乘积的比值。

【对峙反应】又称可逆反应。即正向反应与逆向反应同时存在的化学反应。正向反应与逆向反应的活化能之差就是反应热。正向反应速率常数与逆向反应速率常数之比值即为这个反应的平衡常数。在对峙反应中反应物与产物是共存的。在以正向反应为主的过程中，反应物不断减少，产物不断增多，正向反应速率不断下降，逆向反应速率不断上升，最后可达到正、逆向反应速率相等而达到化学平衡。在研究化学热力学与化学反应动力学时，对峙反应是最重要的一种化学反应。

【连续反应】 又称连串反应或串行反应。若有一组元，一方面作为某些基元反应的产物，另一方面又作为另一些基元反应的反应物，它被消耗而不再生，这种体系的反应集合就构成连续反应。一般的化学反应中的连续反应也很多，在火焰氧化过程中就存在某些连续反应。反应初期和后期，连续反应的中间产物的浓度都很低，在反应过程中，其浓度随时间的变化会出现极大值，而产物必须通过中间产物而产生，因此它的生成速率也将由低变高，再变低，从而使其浓度随时间变化的曲线呈自加速的 S 型。那些最难进行的反应决定连续反应的速率。

【平行反应】 又称竞争反应。一种反应物可同时参加两个或两个以上的反应时，这种反应就是平行反应。在平行反应中，反应物原消耗速率大体上是由最容易进行的反应来确定。在有催化剂时，常发生平行反应，这时催化剂使某个反应具有优势，即使用催化剂时可在几个反应中将某一个反应选择出来。

【精细平衡原理】 在一个复杂的化学反应中，可能同时存在几个对峙反应，这个复杂的化学反应就称之为总包反应。当总包反应过到平衡时，此时每种组分不变，每一对对峙反应中正向反应速率等于逆向反应速率，此即精细平衡原理。利用精细平衡原理，可以从已知的对峙反应平衡常数求出未知的对峙反应平衡常数。

【稳态近似】 在链式化学反应中，如果中间产物的净生成反应速率远小于其总生成反应速率与总消耗反应速率时，此时可将中间产物的净生成反应速率当作零，即认为中间产物近似地处于稳定状

态，这种分析方法叫稳态近似法，多用于化学反应动力学的研究之中。

【平衡近似】在链式化学反应中，如果中间产物的对峙反应正向反应速率近似地等于逆向反应速率，则可近似地认为此对峙反应处于平衡状态，这就是平衡近似，也称为似平衡浓度法。由于在可用平衡近似处理的问题中无论是正向反应还是逆向反应速率均可能不近似等于零，故一般说来可用平衡近似处理的问题不能用稳态近似处理，而可用稳态近似处理的问题一般均可用平衡近似处理。

【笼效应】又称笼蔽效应。在溶液中发生化学反应时，反应物分子必须处于同一个溶液结构单元内，结构单元的尺寸通常为几个埃，结构单元形状不同，但是可以视为具有分子尺寸大小的微观反应器，称之为笼。因同一个溶剂笼中溶质分子有较多的彼此碰撞的机会，因而有较多产生反应的机会；溶剂笼内的溶质分子与溶剂笼外的溶质分子彼此发生碰撞机会甚少，因此几乎不能产生反应，反映出溶剂对反应过程影响，称之为笼效应。笼是描述在溶液中发生化学反应的模型，对于溶质分子间每发生一次碰撞都有可能发生反应的情况是非常重要的。

【分子偶遇】液相中分子不同于气相分子的一种特殊碰撞。描述气相中分子 A 和 B 进行化学反应的动力学特征时，首先考虑 A 和 B 之间的碰撞而形成碰撞分子对，用碰撞分子对的浓度表征其数量，反应速率与碰撞分子对所包含的能量有关。而在液相中，溶剂的存在妨碍分子直接碰撞，A 和 B 之间须经过扩散进行接触，达到偶遇，形成偶遇对，也称扩散对，其量用偶遇对浓度来表征。在标准

状况下，氮气分子的体积只为所占有空间的0.2%，在液相中虽达50%以上，但若有溶剂，则大大降低其反应速率。

【静电效应】溶液中的静电库仑作用对液相中离子间反应速率的影响。具有较为普遍意义的模型的基本假定为：(1) A 和 B 离子（或偶极子）生成的活化络合物（用下角标 \neq 标示）是球形的；(2) 离子间相互作用较弱；(3) 溶剂分子的偶极矩相对来说较小；(4) 非静电作用对理想状况的偏差忽略不计；(5) 体系为稀溶液，且离子强度为零；(6) 介质是连续的；(7) 活化络合物的形成可看作该球体的充电过程。静电作用对活化自由能有贡献，故对活化熵也有贡献，从而影响频率因子。

【取代基效应】同一族（或同一组）反应物中各种不同取代基对其热力学性质（如平衡常数等）和动力学参数（如反应速率常数等）的影响。反应物分子中的一个基团被另一基团所取代的反应，称为取代反应。其中与亲核试剂作用者称为亲核取代反应，与亲电试剂作用者称为亲电取代反应。如取代的苯甲酸乙酯的皂化反应。这类反应的平衡常数和反应速率常数与取代基的性质及其在苯环上的位置（间位或对位）有关。在取代的苯甲酸的电离常数和酯化速率常数以及其他许多有关的动力学参数之间，可观察到同样的关系，即取代基效应在一个反应和另一个反应之间有一定的关联性。如果取代的位置（如苯环上的间位或对位）固定，就可看出取代基效应。

【络合物效应】反应粒子和溶剂分子形成的络合物对化学反应速率的影响。从结构特点来看，这种络合物可以是电子接受型或氢键

型。电子接受型络合物的形成是由于一个电子或一个电子对从电子给体部分地转移到电子受体。它将影响反应粒子的反应活性,即它们的溶剂化将直接影响反应的进程。氢键型络合物为数众多,只要含氢的分子以共价键方式耦合到分子中一个电负性原子上去,即构成氢键,有分子内氢键和分子间氢键之分,络合物的形成将会影响反应的进行,如在溶液中加入二氧杂环己烷或四氢呋喃,都会降低烷基化反应速率。

【链反应】 又称链式反应或连锁反应。反应物分子依靠在反应过程中交替和重复产生的活性中间体(自由基或自由原子)而转变为产物分子的一类重要化学反应。

【爆炸】 物质发生变化的速度急剧增加并在极短时间内放出大量热量的现象。主要由化学反应或核反应引起。一个不断加速的反应体系,具有使绝大部分反应物能在瞬时内完成反应的反应速率,并伴随有光的发射(或体系瞬时达到极高浓度)和气体的急骤压力变化,以致形成冲击波等现象。显然这里所指的爆炸,不是一般的物理因素,而是特定的化学反应或核反应所引起的爆炸。爆炸类别有:热爆炸、链式爆炸。爆炸有巨大的破坏作用,可被广泛用于开矿、筑路、推动发动机和军事方面。

【碰撞理论】 又称有效碰撞理论。以活化能概念和气体分子运动论为基础,认为分子必须经过碰撞的过程才能发生反应。并不是每次碰撞都是有效的(即能引起反应),只有能量较大的活化分子碰撞才能发生化学反应。反应速度等于碰撞频率乘以活化分子在总分子数中的百分数。所得的动力学方程可以解释质量作用定律和温

度因素对反应速度的影响。对于分子的假设,由于该理论视分子为没有内部结构的硬球,使之与实验值有很大偏差。

【过渡状态理论】又称活化络合物理论。主要由美国化学家艾林将量子化学应用于反应速度的研究,于1935年提出。该理论认为,在反应物变为生成物的过程中,要经过一个中间过渡态即生成活化络合物的状态。若知道反应分子和活化络合物分子的结构,根据统计力学和量子力学,利用光谱数据可计算出反应速率常数,故又称绝对反应速度理论。

【同位素标记法】用易于检测的一种或两种放射性核素给某种化合物分子打上“记号”的方法叫“标记”。作“记号”的放射性核素,如果是该化合物分子中固有元素的同位素,一般称为同位素标记,否则称为非同位素标记。同位素标记法又称“同位素示踪法”。标记后的化合物,除了具有特定的放射性并具有足够的比活度和放化纯度外,其化学和生物学性质与无标记的相应化合物相同,或在实用意义上非常近似。在化学上,同位素标记法适用于天然化合物或结构复杂的药物的结构研究,用于探索反应机理,如研究酸醇酯化反应中是羧羟基还是醇羟基脱去形成水分子。在生物学上,可用含同位素的物质(如含重氢的脂肪酸、含重氮的氨基酸、含放射性碳及氚、磷的核苷酸或磷酸葡萄糖等)来研究代谢反应的全过程。同位素标记法操作简单、特征性强,是一种很好的研究方法和工具。

【化学松弛法】又称化学弛豫法。一种研究快速反应的方法。如果一个已处于平衡的化学体系,经外界突然增加扰动后,则该体系将

以一个时间滞后（称为松弛时间）为特征，再趋向新的平衡。恢复平衡的快慢（即松弛时间的长短）视正向和逆向反应的速度而定。对平衡的突然扰动可以是温度、压力、强电场等突然改变的结果。如果采用化学手段进行扰动，则此松弛法称为化学松弛法。

【酸碱反应和平衡】酸与碱的反应称为酸碱反应。在酸碱反应中，一个共轭酸碱对又可称为酸碱半反应，它表示了酸和碱之间的相互转化关系。实际上，反应体系中并不单独存在着这种半反应。为了使 HA 转化成 A^- ，给出的质子必须为另一种物质所接受，也就是说，体系中必须有另一种能接受质子的碱性物质同时存在，反应才能发生，共轭酸碱对（半反应）才有实际的意义。当两个共轭酸碱对之间发生质子转移（酸碱反应）时，平衡总是从较强的一方移向较弱的一方。酸碱反应首先涉及的是酸碱的强弱问题，根据质子论，强弱向其它的分子或离子转移质子的倾向大，强碱则必然对质子结合力强，反应向产物方向进行的程度不仅受酸失去质子倾向的支配，而且也受碱接受质子倾向的支配，质子转移的程度同时依赖于酸和碱两者的性质。衡量酸碱强弱的电离常数，就是与水（或溶剂）发生酸碱反应的平衡常数。平衡常数越大，则反应趋势越大，愈容易电离，酸或碱则愈强。在水溶液中，酸的强度取决于它将质子给予水分子的能力，碱的强度取决于它从水分子中夺取质子的能力，因此，通过测定各种酸向水分子转移一个质子的能力，可将酸的强度进行比较。

【水】分子式为 H_2O 。在1大气压下，熔点为 $0^\circ C$ ，沸点为 $100^\circ C$ 。在常温、常压下，水为无色液体。水有许多异常的性质，如在 $0^\circ C$ 时，冰的密度为 0.91671克/毫升，此值小于 $0^\circ C$ 时水的密度 0.999841

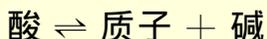
克/毫升；在1大气压下，在0—4℃之间，水的密度随温度升高而加大，在4℃时，水的密度为1.000000克/毫升，达到最大值，此后随温度升高，密度有所减小。水是良好的溶液，可溶解多种盐、碱、酸。因此通常水中因含有杂质而为电导体。纯水取得较难，通常要用铂或石英制成的器皿经过多次蒸馏才能得到。纯水不导电。水对人类及动、植物都是十分重要的。在中国古代时，水被认为是五行之一，是构成宇宙万物的基本物质。在古印度，古希膜也有类似的想法。

【酸碱理论】阐明酸碱本质的理论，目前尚不统一，常见的理论有五种。(1) 酸碱质子理论。酸为具有给出质子倾向物质，碱是具有接受质子倾向的物质。这是1923年丹麦化学家布朗斯特与英国化学家劳里同时提出来的。(参看“酸碱质子理论”条)。(2) 酸碱电子理论。碱为能给出电子对的物质，酸为能接收电子对的物质。这是1923年美国化学家路易斯提出来的(参看“路易斯酸碱理论”条)。(3) 溶剂体系理论。酸为能增加溶剂中特征阳离子浓度的物质。碱为能增加溶剂中特征阴离子浓度的物质。这是由卡迪和埃尔西提出的。(4) 正负理论。酸为能与碱反应、给出阳离子、接受阴离子或电子的物质。碱为能与酸反应、给出阴离子或电子，接受阳离子的物质。这是1939年苏联化学家乌沙诺维奇提出来的。(5) 勒克斯—弗德理论。碱为能给出氧离子的物质。酸为能接受氧离子的物质。

【路易斯酸碱理论】又称酸碱电子理论。1923年，由美国化学家路易斯提出，其基本观点是：凡是能够给出电子对的物质都是碱，凡是能够接受电子对的物质都是酸。酸与碱反应生成酸碱络合物(或

酸碱加合物)。如可接受电子对的 H^+ 、金属离子都是酸，可给出电子对（有未共用电子对）的 OH^- 、 Cl^- 、 NH_3 等都是碱，而 HCl 、 H_2O 、 MgO 、 $NaCl$ 、 $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ 等都可看作是酸碱络合物。由此可见，路易斯酸碱概念的含义非常广泛，但这一理论没有一个统一的酸碱强度标准，是其缺点。它认为，酸愈强（接受电子对能力强）、碱愈强（给出电子对能力强），则生成的酸碱络合物愈稳定。酸的强度因碱而异，碱的强度也因酸而异。例如：在水溶液中，对酸 H^+ ， OH^- 是强碱，而对酸 Ag^+ ， OH^- 就是弱碱。

【酸碱质子理论】简称质子理论或质子论。1923年由丹麦的布朗斯特和美国的劳莱提出。质子论认为，凡能给出质子的物质都是酸，凡能接受质子的物质都是碱。酸碱反应就是质子的转移过程。酸和碱不是彼此独立的，它们存在着如下关系：



这种以质子接受关系联系起来的酸和碱，称为共轭酸碱对。由此可见，质子论不是从组成上区分酸碱，而是看这种物质（分子或离子）在反应中对 H^+ 的接受关系。在质子论中不存在盐的概念，盐的水溶液的酸碱性是由离子酸和离子碱的相对强弱决定的。如 $NH_4^+Cl^-$ 水溶液显酸性，是由于 NH_4^+ 的酸性强于 Cl^- 的碱性，即 NH_4^+ 给出 H^+ 的能力比 Cl^- 接受 H^+ 能力强的缘故；而 Na^+Ac^- 水溶液呈碱性，是由于 Ac^- 的碱性强于 Na^+ 的酸性的缘故。对于非水溶液中的反应，质子论也可以用酸碱概念加以解释。对于不涉及质子接受的一些反应，如碱性物质 CaO 与酸性物质 SO_3 间的反应，仍无法解释。说明这一理论也有一定的局限性。

【酸碱电子理论】见“路易斯酸碱理论”。

【软硬酸碱理论】软硬酸碱的概念是在60年代初提出来的，它是对路易斯酸碱的进一步分类。电子对的接受体是路易斯酸，电子对的给予体是路易斯碱，而软硬酸碱是根据路易斯酸碱对外层电子吸引的松紧程度，即保持价电子能力的强弱将酸碱又划分为软硬酸碱的。软硬酸碱的分类为：硬酸和软酸。硬酸是指对外层电子抓得紧的一类路易斯酸。它的特点是接受电子对的离子（或原子）体积小、正电荷高、变形性小，即接受电子对的离子（原子）对外层电子的吸引力很强，例如 H^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等。软酸是指对外层电子抓得松的一类路易斯酸，它的特点是接受电子对的离子（原子）体积大、正电荷低或不带电荷，容易变形或容易失去外层电子，即接受电子对的离子（原子）对外层电子的吸引力较弱。如 Cu^+ 、 Ag^+ 、 Au^+ 等。某些酸，其接受电子的离子（原子）对外层电子的吸引力（或抓电子的松紧程度）介于硬酸和软酸之间，称之为交界酸。硬碱和软碱。硬碱是对外层电子抓得紧的一类路易斯碱。它的特点是给出电子对的原子（或离子）变形性小，电负性大、不易失去电子（或难被氧化），即是说授电子的原子（离子）对外层电子吸引力很强。如 F^- 、 OH^- 等。软碱是对外层电子抓得松的一类路易斯碱。其特点是给出电子对的原子（离子）变形性大、电负性小、容易失去电子（或易被氧化），即是说授电子的原子（离子）对外层电子吸引力较弱。如 I^- 、 CN^- 。对外层电子的吸引力介于硬碱和软碱之间的称交界碱。从大量的酸碱反应和酸碱化合物的稳定性中人们总结出一个经验的规则，称软硬酸碱原则（HSAB）。它的内容是“硬酸倾向于和硬碱结合，软酸倾向于和软碱结合。用更通俗的话来说即是：“硬亲硬，软亲软，软硬搭配不稳定”。

【共轭酸】见“酸碱质子理论”。

【共轭碱】见“酸碱质子理论”。

【酸碱平衡】见“酸碱反应和平衡”。

【中和】指酸与碱相互作用后能生成溶液这种化学反应。通常是水为溶剂，反应生成物盐为溶质。在完全的中和反应后，生成物呈中性，反应物所呈现的酸性与碱性均消失。

【离解】含义有二。(1) 分子在外界条件下，分成2个及2个以上部分，每一部分均荷电。常见的外界条件有三种，(A) 在一定物理条件下，分子离解成离子，如 Cl_2 在光子作用下变成2个氯原子。(B) 在高温下，分子被分成带电离子，即热分解，如氯化钠在高温下呈液态，氯化钠分子变成可自由运动的，带负电的氯离子与带正电的钠离子。(C) 离子型化合物在溶剂中形成带电离子，如氯化钠溶于水中后，由于水合，分成带正电的钠离子和带负电的氯离子。(2) 可逆分解反应，反应物的一个分子发生分解反应，生成物是两种不带电的分子，也称为离解，如五氯化磷离解为氯气和三氯化磷。

【氧化还原反应】在反应物之间有电子得失的一类反应。在这类反应中，某种原子失去电子，发生了氧化；另一种原子则得到电子，发生了还原。合起来是同时发生了氧化还原反应。通常把在反应中获得电子、发生还原反应的物质叫做氧化剂，而把失去电子、发

生氧化反应的物质叫做还原剂。在一个氧化还原反应中,氧化剂获得的电子总数必然等于还原剂失去的电子总数,整个反应体系前后处于电荷平衡状态。氧化数是表示物质中元素的表观电荷数。利用氧化数的概念,可以把氧化还原反应定义为:在化学反应中,反应物质中元素的氧化数升高,即发生了氧化;元素的氧化数降低,则发生了还原。氧化还原是很重要的一类化学反应,在工业生产过程中常发生的许多反应都是氧化还原反应。例如,氨经过铂网的催化被空气氧化为硝酸;硫磺燃烧,即被氧化为二氧化硫,再经催化氧化为三氧化硫,以制造硫酸;铬铁矿 FeCr_2O_4 与碳酸钠 Na_2CO_3 混合,经过氧化焙烧,可以制备 Na_2CrO_4 。几乎所有的金属单质都是利用化学还原反应或电解还原反应制得的。在自然界中,普遍存在和不断发生着氧化还原反应。生物体内,糖类和脂肪经过酶催化氧化反应,被分解为二氧化碳和水,同时释放大量的能量。

【氧化】 氧化还原反应中,反应物的原子或离子失去电子的过程(表现为氧化数升高)称作氧化,或称氧化反应。反之,得到电子的过程(表现为氧化数降低)称为还原,或称作还原反应。氧化反应和还原反应是同时发生的。早期概念是把物质与氧化合的反应叫氧化,能氧化其它物质,而本身被还原的物质叫氧化剂。而含氧物质中的氧被夺去的反应叫还原反应,能夺取含氧物质中的氧,本身被氧化的物质叫还原剂。对有机物的反应来说,分子中引入氧或除去氢,或引入氧的同时也失去氢的反应,称为氧化反应,此过程也称氧化。

【氧化剂】 在氧化还原反应中得到电子(或电子对偏近)的反应物。在反应中氧化剂中元素的化合价(或氧化数)降低。氧化剂能氧化

其他物质而自身被还原,氧化剂通常是指容易获得电子的物质,常见的有:(1)活泼的非金属单质,如氧、氯、溴等;(2)具有高化合价(氧化数)的金属离子,如 Fe^{3+} 、 Sn^{4+} 等;(3)含有高化合价(氧化数)元素的含氧化合物;(4)过氧化物。根据氧化剂获得电子的难易程度,可分为弱氧化剂和强氧化剂,定量地判断氧化剂氧化能力的大小,应根据氧化剂及其还原产物所构成的氧化还原电对的标准电极电位 E° 来确定, E° 值越正,表明氧化剂的氧化能力就越强。

【还原反应】简称还原。物质(分子、原子或离子)得到电子或电子对偏近的反应。在还原反应中物质所含的元素化合价(或氧化数)降低,这是判断还原反应的依据。还原反应和氧化反应相伴而生。参见“氧化反应”。

【还原剂】在氧化-还原反应中失去电子(或电子对偏离)的反应物。在反应中还原剂中元素的化合价(或氧化数)升高。还原剂能还原其他物质而自身在反应中被氧化。还原剂通常是指容易失去电子的物质,常见的有:(1)活泼金属,如钠、钾、镁、铝、铁等。(2)具有低化合价(氧化数)的金属离子,如 Fe^{2+} 、 Sn^{2+} 等。(3)非金属离子,如 I^{-} 、 S^{2-} 等。(4)含有低化合价(氧化数)元素的含氧化合物,如 CO 、 SO_2 、 Na-NO_2 、 Na_2SO_3 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 等。根据还原剂失去电子的难易程度,可分为弱还原剂和强还原剂,定量地判断还原剂还原能力的大小,应根据该还原剂及其氧化产物所组成的氧化还原电对的标准电极电位 E° 值来确定, E° 值越负,表明该还原剂的还原能力越强。

【电化学反应】电与化学反应相结合即构成电化学反应，研究电化学反应的科学称为电化学。电和化学反应相互作用可通过电池来完成，也可利用高压静电放电来实现（如氧通过无声放电管转变为臭氧），二者统称为电化学反应过程，其中后者为电化学的一个分支，称放电化学。由于放电化学有了专门名称，因此，电化学往往专门指“电池的科学”。电池由两个电极和电极之间的电解质构成。对电化学反应的研究内容包括：一是电解质的研究。即电解质学，其中包括电解质的导电性质、离子的传输性质、参与反应离子的平衡性质等。另一方面是电极的研究，即电极学，其中包括电极的平衡性质和通电后的极化性质，也就是电极和电解质界面上的电化学反应。在物理化学的众多分支中，电化学反应的研究是唯一一个以大工业为基础的学科。它的应用分为以下几个方面：（1）电解工业，其中氯碱工业是仅次于合成氨和硫酸的无机物基础工业；耐纶66的中间体己二腈是通过电解合成的；铝、钠等轻金属的冶炼，铜、锌等的精炼也用的是电解法。（2）机械工业要用电镀、电抛光、电镀涂漆等来完成部件的表面精整。（3）环境保护可用电渗析的方法除去氟离子、铬离子等污染物。（4）化学电源。（5）金属的防腐蚀问题，大部分金属腐蚀是电化学腐蚀问题。（6）许多生命现象如肌肉运动、神经的信息传递都涉及到电化机理。（7）应用电化学反应及其原理发展起来的各种电化分析法业已成为实验室和工业监控的不可缺少的手段。

【电池电动势】电池可分为电解池与原电池两种。电解池不能作电源用，故无电动势。原电池可作电源，故电池电动势是指的原电池的两个电极间在没有电流通过时的电位差，或单位正电荷从原电池负极到正极非静电力所作的功。原电池的电极叫半电池，常见的

半电池有五种。(1) 金属-金属半电池, 由一片金属放在含有该金属离子溶液中, 如丹尼尔电池的电极, 其电位决定于离子的浓度。(2) 汞齐半电池, 如韦斯顿电池的电极, 金属电极溶解在汞中, 其电位与溶液中金属离子浓度和汞中该金属的含量有关。(3) 气体-离子半电池, 在溶液中含有某种气体的离子, 在电极(由惰性金属制成)周围有一层气体, 如氢电极、氯电极。(4) 金属-难溶盐-负离子半电池, 极板为金属的, 极板与难溶盐相接触, 溶液中有该难溶盐的负离子, 如汞-甘汞-氯化物电极。(5) 氧化-还原半电池。原电池又可分为(1) 化学电池, 电池的电动势来源于化学变化释放的化学能。(2) 浓差电池, 电动势来源于电解质从较浓的溶液向较稀的溶液转移。

【能斯特公式】又称能斯特方程。在1大气压和25℃条件下的电极电位的理论计算公式:

$$E = E^{\circ} + \frac{0.059}{n} \lg \frac{[\text{氧化型}]}{[\text{还原型}]}$$

(精确计算时, [氧化型]、[还原型] 应为活度。) 式中 E 是指定浓度下的电极电位; E° 是标准电极电位; n 是电极反应中得失的电子数; [氧化型] / [还原型] 表示参与电极反应所有的氧化型物质浓度的乘积与还原型物质浓度乘积之比。浓度的方次应等于它们在电极反应中的系数。如电对中某一物质是固体或液体, 浓度均为常数, 按1计算。如电对中某一物质是气体, 浓度用气体分压表示。能斯特方程式指出了电池的电动势与标准电极电位和电解度浓度之间的定量关系。由能斯特公式可以看出, 随着还原型物质浓度的降低, 电极电位升高。该公式由能斯特于1889年从热力学导出。

【标准电池】一种化学电池，由于其电动势比较稳定、复现性好，长期以来在国际上用作电压标准。在测量和校准各种电池的电压时，用作标准的辅助电池。根据电池中硫酸镉溶液的情况，分饱和式和不饱和式两种。在20℃时，饱和式的电动势应在1.01855—1.1868伏特范围内；不饱和式的电动势应在1.01860—1.01960伏特范围内。前者特点是：电动势稳定、温度系数（温度对电动势变化）较大；后者温度系数较小，使用方便。一般供工业和实验室用。

【电极】又名半电池，早期的概念中电极为插在电解质溶液中的金属棒，现已扩充成为由导体-金属-电解质溶液三位一体而成，它已构成电池的一半。（参看“电池电动势”条）

【金属腐蚀】参第五卷金属材料中的“金属腐蚀”。

【缓蚀剂】又称阻蚀剂或腐蚀抑制剂。用于减缓金属腐蚀的化学物质的总称，适用于中性、酸性与气体介质中，常见的有在锅炉、冷却系统中用的加入水中的缓蚀剂，在电镀工业中，电镀前要用酸性溶液去掉电镀件表面的锈，但又要求酸性溶液对电镀件的腐蚀小时，就要在酸性溶剂中加入缓蚀剂。缓蚀剂一般用量不大，但效果显著，其效果用抑制效率（也叫缓蚀效率）I来表示，

$$I = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\%$$

其中 V_0 为没加缓蚀剂时的金属受到腐蚀的速率， V 为加入缓蚀剂时的金属受到腐蚀的速率。 $0 \leq I \leq 1$ ， I 值越大，缓蚀效果越好。

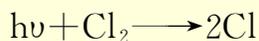
【金属钝化】金属物体表面发生化学变化后，使金属具有贵金属的

某些特性（如电极电势为正，抗腐蚀等），这种现象叫金属钝化。金属钝化可分为化学钝化、阳极钝化和机械钝化三种。化学钝化（自钝化）为金属表面与周围介质自然相互作用，发生化学变化而成。阳极钝化是将金属物体作成为有电化学变化中的阳极，通电后发生的钝化。机械钝化指金属表面受到腐蚀后，形成一个保护层，大大降低进一步腐蚀的速率，但电极电势并不变为正。金属钝化后的状态叫金属的钝态，金属处于钝态时所具有的性质叫金属的钝性或惰性。

【化学电源】见第五卷电化中的“化学电源”。

【电冶金】见第五卷冶金中的“电冶金”。

【光化学反应】物质经过光照射后处于激化状态，从而发生永久性的化学反应，此即光化学反应，一个光子的能量为 $h\nu$ ，此处 h 为普朗克常数， ν 为频率。以氯气与氢气化合成氯化氢为例，氯气与氢气分子在无光照射时，不发生反应，一旦受到光的照射，光子使氯分子离解成两个氯原子，从而完成反应，生成氯化氢，即



远红外光的光子能量较低，不足以引起化学反应。在近红外光波段，近年来由于大功率的红外激光器的出现，形成了新学科——红外激光化学。光化学中所用的光为近红外光、可见光、紫外光。至于波长更短的 X 光与 γ 射线所引起的化学反应则属于辐射化学范畴。目前光化学还不成熟，无论在理论上还是实验技术上都有

待发展。光化学反应是地球上最普遍的反应之一,如植物的光合作用、动物的视觉都是光化学反应起作用。近年来,在照相、光刻、高分子材料的光致变性、光催化在有机化学中的应用、光致分离在同位素研究中的应用等光化学都有蓬勃的发展。在光化学反应中,只要是光的波长适当,光子就可以激活分子,即使在很低的温度下也可能发生化学反应,这一点和热化学反应有明显的不同。

【光化学光源】用作光化学作业的光源。它必须具有以下特点:在需要的光谱波段具有高强度、长寿命、光强输出稳定、易点燃、便于安装的合理尺寸。目前应用的是一种封闭式的气体放电灯,在石英(或玻璃)管内充以适量的气体(或蒸气),利用两端电极的热电子发射维持放电,产生弧光。随所充气体的成分和压力、供电电流、灯管的直径不同,产生不同波长的辐射,并影响发光的强度和辐射能量的光谱分布。汞弧光灯是广泛应用的一种光源,该灯内充有适量的汞蒸气和氙气。氙弧灯、脉冲氙灯、无极放电灯、激光光源以至太阳光,均为有助于光化学开发的光源。

【光化学定律】有两条。光化学第一定律(光化学活化原则):只要光波波长适当,光子才能被物质吸收,从而才可能发生光化学反应。这是格罗斯特于1818年提出的。光化学第二定律:设光子的能量为 $h\nu$,在光化学的初级过程中,一个没活化的分子吸收一个光子而成一个活化的分子。这是20世纪初由斯塔克和爱因斯坦提出的。在一般光强条件下,光化学第二定律成立,在高光子密度条件下的光化学反应中有时要吸收二个光子。因此要应用光化学反应定律,就须了解反应物的吸收光谱和光源的光谱能量分布。常用光源有日光、汞弧灯、氙弧灯、脉冲氙灯、无极放电灯、激光光源

等等。

【荧光】由于某种形式的能量的激发，发射体所引起的电磁辐射的发射，当激发停止时，发射也即刻停止（即不再发光），其衰退规律与温度无关。物质的分子和原子，经入射光的照射以后，某些电子被激发到较高的能级，当它们从高能级迁至低能级时，如发射出比入射光波长更长的光，即荧光。通常提到的荧光，是指物质吸收紫外光或可见光后，发射比入射光波长更长的可见光。但也有的物质吸收 X 射线以后，发射出波长稍长的 X 射线荧光；有些物质吸收了红外光后，发射出波长稍长的红外荧光。物质发射的荧光的波长与它的化学组成及结构有关，在一定的条件下，荧光的强度与物质的浓度有关。可利用荧光进行荧光光度分析。

【磷光】分子两种状态间的禁戒跃迁中产生的一种长寿命发射。其寿命约在 10^{-4} 秒以上至几天不等。在发射磷光的过程中，电子曾作自旋反转。为了观察激发分子的磷光，物质必须溶于适当的溶剂中，冷至低温，使溶剂被冻成玻璃状物质。冻结成刚性的介质是为了防止分子在发射磷光之前，由于碰撞的结果耗散掉分子的激发能。一种用途很广的溶剂 EPA 是由乙醚、异戊烷和乙醇混合而成的。现在已发展了室温磷光技术。根据激发态分子所发射的磷光光谱、寿命和强度，可作化学分析。

【皮秒光化学】1皮秒= 1×10^{-12} 秒。1966年诞生皮秒脉冲激光器，它具有超高的激光功率和宽为几个皮秒的脉冲激光。用皮秒脉冲激光器产生的超短脉冲激光去研究过程极短的化学反应动力学，如研究单分子反应速率常数、分子内能量分配和极性的转移、溶

液中染料分子的激发态和驰豫过程、荧光现象等等。所以皮秒光化学是在非线性光学测量技术、超高速光电子学、超短脉冲激光技术基础上发展起来的一个光化学的分支。

【激光诱导化学反应】在红外线、可见光、紫外线及各种激光下诱发的化学反应。这些反应在常温、常压下是不能发生的。目前已发现这类反应有数百个之多。利用激光,已经可能在实验室内将从氢到铀等10几种同位素进行分离。激光诱导化学是光化学的最活跃的分支之一。

【气体光化学】为光化学的一个分支,研究处于气态物质分子和原子的光化学反应,其特点之一为精确度高。由于目前最短的脉冲激光宽度可达皮秒级(1皮秒= 1×10^{-12} 秒),故可在研究光解离型的化学反应的动态,其测量的时间分辨率可低于1纳秒(1×10^{-10} 秒),甚至达到皮秒级。如探测气体化学反应的初级产物的浓度可达每个立方厘米有几万个分子,对某些特殊的初级产物甚至可探测到每立方厘米有几个分子。利用气体光化学方法已发现电子处于激发态的气体原子的反应活性大于电子处于基态的同样气体原子的反应活性;对有些自由基也有类似现象。这些成果可用于大气中微量组分的监测、光化学合成等方面。

【无机金属化合物光化学】为光化学的一个分支,研究当光子被无机化合物吸收后发生的物理与化学变化。大多数无机化合物对光稳定,但有的络合物则不然,当络合物具有特定的配位数,离子配位基直接与金属化合物中心离子成键时,此时吸收光子后,配合物处于激发态,导致分子内的电子重新排列,而形成激发态的

络合物，其化学性质与基态不同。在研究贮存日光能时，用六配位配合物可使水分解成氢和氧。处于激发态的络合物的寿命一般不超过1毫秒，通过放射光子，可恢复到基态上来。

【环境光化学】为光化学的一个分支，研究在太阳光作用下，在空气中污染物可能产生的变化及对人类的影响，已发现在近百种物质、上百种反应与阳光有关。研究的主要方向有二：（1）超音速喷气飞机在同温层飞行时，将一氧化氮、二氧化氮、氯气、一氧化氯、盐酸、硝酸等等物质带入同温层，在紫外光照射下，这些物质活化、离解，其结果是使同温层中臭氧减少，导致更多的紫外线射到地上来，过多的紫外线可使人类皮肤癌发病率升高，浮游生物与植物发生遗传变异；（2）在地表大气中，由于汽车尾气及发电厂排放的废气中有烃类物质，其中以烯烃居多，在高温、乾燥的气候下，在阳光作用下，形光化学烟雾，使能见度降低，对人的眼睛有刺激作用，对植物生长有害。1944年美国洛杉矶盆地因形成光化学烟雾使大量谷物被毁，促进了环境光化学的研究。环境光化学正越来越为人们重视。

【有机光化学】光化学的一个分支，研究在光子活化情况下的有机化学反应，以及引入什么样光敏剂可促进有机化学反应。能被光子活化的反应物常为双自由基物质。常见的光化学反应有六种，即光分解反应，光加成反应，光取代反应，光链式反应，光致重排反应和光致原子位移反应。

【照相光化学】研究光在光敏表面上形成图象过程的光化学分支。卤化银是光敏介质，溴化银比氯化银敏感，碘化银比溴化银敏感，

再加上用多种花青染料作为增感剂，使感光材料的敏感范围覆盖了可见光区。将卤化银、增感剂均匀地分散在特种乳胶中，涂在玻璃或高分子薄膜上，厚度约20微米，制成通常叫做照相底片的物体。在极短时间曝光后，部分卤化银晶体内出现光分解作用，出现少量的银分子。经过显影，出现明暗与原景物相反的图象，称为负片，再经过定影处理，就可以长期保存。将负片上的图象印在涂有光敏材料的纸（相纸）上，经过曝光、冲洗，就可以得到正片。

【彩色照相】按三原色原理，即将红光、蓝光与绿光按不同的比例混合即可显示出自然界中各种颜色，三原色的补色为黄色，品红色与青色。现代彩色照相采用减色法原理，即用三原色的补色的减色来控制透明片上各部分的三原色比例，从而获得近似于自然界中各种颜色的图象。

【化学激光器】见第五卷电子技术中的“化学激光器”。

【无机化学反应】在碳氢化合物以外的全部元素和它们的化合物之间进行的化学反应。无机化学反应，可以分为化合反应、分解反应、复分解反应、置换反应四种主要类型，这是一种流行的传统分类方法。现在较为普遍推荐的一种无机化学反应分类方法是按反应过程中是否有电子的得失偏移以及产物是否分离的情况，而把所有反应分为两大类：一类是氧化还原反应，另一类是非氧化还原反应（包括中和反应、离子间不变价的置换反应、配位反应等）。电子转移发生在同一物质的分子内部的反应，叫分子内氧化还原反应。氧化还原反应是科学实验和化工生产中经常遇到的一类化学反应。无机化学反应中有许多非常重要的反应，这些反应在工业

上的应用可以生产各种重要的化工产品和原料，成为工业、农业的基础和支柱。例如：合成氨反应生成氨，氨是生产硝酸、铵盐的主要原料，用于染料、医药、塑料、化肥等工业中，也可做洗涤剂、循环制冷剂。如：金刚石应用广泛。透明的金刚石可作宝石（钻石），价格昂贵，以克拉为其计量的单位（1克拉=200毫克）。黑色和不透明的金刚石在工业上用作钻头和切割工具。金刚石粉是优良的磨料。目前，金刚石已在工业上批量生产，在催化剂的存在下，石墨在1600—1800℃高温和 5×10^4 — 6×10^4 大气压下可转变为金刚石。应用无机化学反应还可以制造各种民用产品，如工业上用银镜反应来制镜。同时无机化学反应还可用于分析检测，如医学上可用化学反应检验病人的尿样，用砷镜反应（马氏试砷法）定量地检出砷的含量。总而言之，无机化学反应有着广泛的应用，对无机化学反应的进一步研究将会有日益新颖的产品问世，为人类的生活服务。

【合成氨反应】19世纪末，由于化学平衡原理和化学动力学等基础理论有了很大发展，先进的科学理论为研究氨的合成方法指明了方向。由于合成氨是可逆反应，加压有利于合成氨，温度低有利于合成氨，但温度过低反应又太慢，要选择适宜温度。生产的关键是要加快反应的速度，寻找合适的催化剂是研究主攻方向。德国化工专家哈伯等人做了大量工作，经过2万多次试验，终于找到了较理想的催化剂组分。哈伯法合成氨反应是工业氨的主要来源，这种方法要在很高的压力和温度，并有催化剂存在下进行。通常压力大约是300—700大气压，温度为450—600℃，催化剂为钨催化剂。

【合成金刚石反应】1940年，诺贝尔奖获得者，美国的高压物理学

家布里季曼教授在高压技术和高压装备方面取得了重要突破，从而为人工合成金刚石创造了条件。经过十几年艰苦卓绝的试验，终于在1953年制造出了世界上第一批人造金刚石。当时，科学家们借助于水压机的强大威力，获得35—66万大气压，在1500℃的高温下，把石墨变成了金刚石，这叫做“静压法”制造金刚石。人们在密闭的容器内引爆炸药，里面的石墨就有一小部分随着一声巨响而转变为金刚石，这叫做“爆炸法”制金刚石。因这两种方法制造的金金刚石，还含有一些杂质，当今更科学的方法是在回旋加速器中利用慢中子流冲击人造金刚石的原子，使其中的杂质发生变化，成为质地较纯的人造金刚石，人造金刚石在其质量和性能方面都与天然金刚石不相上下。

【银镜反应】醛极易被氧化，生成相应的羧酸，即使是比较弱的氧化剂也可以把醛氧化，如多伦试剂（氢氧化银的氨溶液）。氢氧化银在氨溶液中生成 $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{OH}$ 络合物，它与醛作用时，醛被氧化成羧酸，而它本身被还原成银镀在容器内壁上形成银镜，故称银镜反应。多伦试剂可氧化醛而不能使酮氧化，该反应可用来鉴别醛和酮。

【砷镜反应】砷的 RH_3 型氢化物称为胂，分子结构与 NH_3 相似，键角接近 90° 。是无色恶臭的有毒气体。它极不稳定，是强还原剂，热稳定性、还原性和碱性变化规律与卤素和氧族氢化物相似。胂在室温下在空气中能自燃生成 As_2O_3 。在缺氧条件下受热， AsH_3 分解为单质，分解得到的 As ，若沉积在玻璃上有金属光泽，叫砷镜。利用砷镜反应能检测出 0.007mg 的 As ，这种方法叫马氏试砷法。

【含氧酸盐的分解反应】盐可分为含氧酸盐和不含氧酸盐。含氧酸盐热稳定性的一般规律性是：(1) 如含氧酸不稳定，其对应的含氧酸盐也不稳定；含氧酸较稳定，其盐也稳定。但总的来说盐比其相应的酸稳定。碳酸盐、硝酸盐、卤酸盐等对热都不稳定，易于分解。磷酸盐、硅酸盐等的热稳定性都较强。(2) 同一种酸的含氧酸盐，正盐的热稳定性大于酸式盐的，酸式盐的热稳定性大于含氧酸的。(3) 同一酸根，金属阳离子不同的，盐的热稳定性次序是：碱金属盐>碱土金属盐>过渡金属盐>铵盐。(4) 同一元素，高氧化态的含氧酸比低氧化态的含氧酸热稳定性好，其相应含氧酸盐也有同样的热稳定性次序，例如： $\text{KClO}_4 > \text{KClO}_3 > \text{KClO}_2 > \text{KClO}$ 。含氧酸盐分解反应的产物一般是金属氧化物和酸酐。含氧酸盐的分解反应的产物对反应时的条件（如温度）的依赖性很大，不同的反应条件下可能得到不同的产物。

【水煤气反应】将水蒸气吹过灼热的煤或焦炭，在约 1000°C 时反应所产生的混合气体称为水煤气，这一反应称为水煤气反应。



水煤气的组成为： CO ：44%， H_2 ：45%， CO_2 ：5%， N_2 和 CH_4 等6%，其热值为2800千卡/标准立方米。可用作燃料，或制造合成氨、合成油、合成甲醇等的原料，也用于碳基合成等。实际生产中可采用如下方法：由蒸汽和赤热的无烟煤或焦炭在煤气发生炉中作用而产生；也用蒸汽和空气轮流收入的间隙法，还可用蒸汽和氧气一起收入的连续法。

【有机化学反应】有机化学反应是以有机化合物作为反应体系主体的化学反应。所谓有机化合物，是指含碳元素的化合物，但一些简

单的含碳化合物，如一氧化碳、二氧化碳、碳酸盐、碳化物、氰化物等除外。除含碳元素外，绝大多数有机化合物分子中含有氢元素，有些还含有氧、氮、卤素、硫和磷等元素。目前，已知的有机化合物近600万种。正因为有机化合物种类繁多，比无机化合物多40多倍，因而有机化学反应也数目众多，种类纷繁。通常有两大分类方法。其一，从化学反应方程式出发，比较反应物和产物之间的关系，从而可将有机化学反应分为取代反应、加成反应、消除反应、氧化还原反应和分子重排反应等。其二，有机化学反应就其实质而言，是参与化学反应的物质分子的原子间键的断裂与生成。根据共价键断裂的方式的不同，可以将有机化学反应分为离子反应、自由基反应和周环反应。另有一种分类方法为，按反应过程中粒子数的改变分类，分为取代反应、加成反应、离解式分解反应等。按试剂的电性质分类，分为亲核的、亲电的、自由基的、质子给予的、形成络合物、氧化等。按基元阶段的机理分类，分为亲核取代反应、亲电取代反应、自由基取代反应、消去反应。按局部特征分类，有水合和脱水、氢化和脱氢、硝化、甲酰化、卤化、酰基化、烷基化、烯醇化、环的闭合与打开、异构化、氧化破坏、热解、聚合、缩合及其它反应。对有机化学反应的研究工作中有很大一部分是放在对有机化学反应机理的探讨上的。科学家们提出了一系列的规则和理论，来解释有机化学反应是如何进行的。其中重要的有过渡态理论、马尔科夫尼科夫规则、扎依采夫规则和霍夫曼规则等等。根据反应分子数，可以把有机化学反应分为：单分子反应、双分子反应、三分子反应，一般说来，三分子反应不常见，大部分反应都是单分子反应和双分子反应。根据在相互作用的两个体系之间，由于一个体系对另一个体系的电子或原子核的吸引所引起的化学反应的具体情况，把反应分为亲电反应和亲核反应，相

应地又可区分为双分子亲电反应、单分子亲电反应，以及亲电取代反应、亲电加成反应等诸如此类的反应类型。

【有机化学反应机理】见“有机化学反应”。

【亲核反应】两种物质混合在一起，其中至少有一种物质分解为正负离子，而正离子就是其原子核，此原子核吸引另一种物质而引起化学反应即为亲核反应。与此原子核相作用的物质或与原子核共享电子对者称为亲核试剂。

【亲电反应】两种化学试剂在一起，至少其中一种试剂离解出带正电的离子，带正电的离子吸引其他分子或离子中的电子或与其他离子共用电子形成共价键，这样引起的化学反应为亲电反应，而能和带正电离子共有电子对的物质即为亲电试剂，常见的亲电试剂有 H_2SO_4 、 HNO_3 、 Cl_2 、 Br_2 等。

【单分子反应】呈气态的单一物质，在热的作用下出现热解离，在激光的作用下出现多光子解离反应，以及异构化，这些反应仅涉及一种反应物分子的变化，这是研究化学反应机理的一种模型，已形成林德曼—新谢尔伍德理论，斯莱特理论与 RRKM 理论。

【双分子反应】基元反应类型之一。其特点是在该定反应速率的步骤中，涉及两个反应物分子间的变化。例如，在亲核取代反应过程中，中心碳原子与离去基团 L 相连的键断裂，而亲核试剂 Nu 与中心碳原子构成了新键，在这一步反应中，亲核试剂从离去基团的背面进攻中心碳原子，当亲核试剂逐渐与中心碳原子接近而形

成新键的同时，离去基团被逐渐推出中心碳原子而使原有的键断裂，二者是协同进行的。

【协同反应】 又称一步反应。在化学反应中，反应物分子通过反应生成生成物分子，不存在稳定的中间体。协同反应的另一个特点是遵守分子轨道对称守恒原理，即如反应物是分子轨道对称，则生成物也是分子轨道对称的。典型的协同反应是周环反应。

【马尔科夫尼科夫规则】 简称马氏规则，是有机反应中的一条重要规律，由俄国马尔科夫尼科夫发现。马氏规则规定：在烯烃的亲电加成反应中，加成试剂的正性基团将加到烯烃双键（或参键）带取代基较少（或含氢较多）的碳原子上。它阐明了在加成试剂与烯烃发生加成反应中，如可能产生两个异构体时，为何往往只产生其中的一个。在自由基加成反应中，加成试剂对烯烃的加成位置往往与马氏规则不一致，这一现象常被称为过氧化物效应。

【扎依采夫规则】 在醇脱水或卤代烷脱卤化氢中，如可能生成两种烯烃的异构体时，则在生成的产物中双键主要往于烷基取代较多的位置。扎依采夫规则与产物的稳定性有关。扎依采夫规则与霍夫曼规则定义相反，在双分子消除反应中，两规则仅适用于各自的应用范围。在多数情况下，若离去基团不带电荷，则消除方向服从扎依采夫规则；反之，若离去基团是带有电荷的非环化合物，其消除反应遵循霍夫曼规则。一般说来，扎依采夫规则可导致热力学上较稳定的产物。

【霍夫曼规则】 在四级铵盐与碱作用时所发生的脱去一分子胺的消

除反应中,所生成的烯烃主要来自带有较少取代基的烷基。上述霍夫曼规则正与扎依采夫规则相反,但二者的应用范围并不相同。霍夫曼规则适用于双分子消除反应,也可应用于硫鎓类化合物。

【有机反应】见“有机化学反应”。

【缩合反应】两个或两个以上的分子通过相互作用后,由于共价键的作用,形成一个较大的分子,同时也失去一个较小的分子(如水、氯化氢等)。缩合反应是有机化学中的重要反应,常见的有下列十二种:(1)克来森—施密特综合反应,两种不同的醛或酮在强碱作用下,失去水,形成不饱和醛或酮;(2)维蒂希缩合反应,用醛或酮加维蒂希试剂生成烯烃;(3)曼尼希反应,用醛、酮和胺发生缩合反应,生成原仅在自然界存在的含氮化合物;(4)罗宾森增环反应;(5)迪克曼缩合反应,链状二元羧酸酯在强碱作用下缩合成脂环化全物;(6)克莱森缩合反应,羧酸酯在强碱作用下,发生缩合,生成酮酯;(7)羟醛缩合反应;(8)斯托贝缩合反应,即丁二酸酯和醛或酮在强碱作用的反应;(9)珀金缩合反应,脂肪族羧酸酐和芳香醛在相应羧酸钠作用下可生成肉桂酸型化合物;(11)偶姻缩合反应,羧酸酯与钠发生的缩合反应;(12)苯偶姻缩合反应,芳香族醛在氰化钾作用下的缩合反应。

【取代反应】有机化合物分子里某些原子或原子团被其他原子或原子团所代替的反应叫取代反应。取代反应和无机化学里的置换反应是两种不同类型的反应。置换反应一般都涉及到电子得失问题,反应后的生成物里有单质出现,而取代反应因有机化合物分子里原子间都是以共价键结合的,所以反应发生时,仅是原子间的相

互代换作用，不涉及电子的得失，反应后的生成物中也没有单质出现。

【加成反应】有机化合物分子中的双键或参键发生断裂，加进其他原子或原子团的反应。

【消除反应】有机化合物在适当的条件下，从一个分子中相邻的两个碳原子上脱去一个小分子（如水、卤化氢等），而生成不饱和（双键、参键）化合物的反应。消除反应在实际应用上有重要意义，通过它可以制备许多有用的产品和化工原料。

【重排反应】分子中的共价键的结合次序重新排列的一种反应。大体上可分为两类。（1）反应物分子中的一个基团发生位置的变化。（2）反应物中共价键断裂生成新的共价键。常见的有富电子重排反应、缺电子重排反应、克莱森重排反应、科普重排反应等。

【卤代反应】通常指有机化合物的分子中的氢原子被卤素（F、Cl、Br、I）所取代的反应。

【狄-阿反应】又称双烯合成。是共轭双烯体系与烯或炔键发生环加成反应而得环己烯或1,4-环己二烯环系的反应。1928年德国化学家狄尔斯和阿尔德在研究丁二烯与顺丁烯二酸酐作用时发现。在这类反应中，与共轭双烯作用的烯和炔称为亲双烯体。亲双烯体上的吸电子取代基（如羰基、氰基、硝基、羧基等）和共轭双烯上的给电子取代基都有使反应加速的作用。这类反应具有很强的区位和立体选择性。当双烯和亲双烯体两者都有适当的取代基而使反应

可能发生不同区位而得到两种产物时,事实上只有一种是主要的。在立体化学方面,这类反应都是顺式加成的,而且当反应可能生成内型和外型两种产物时,一般只得内型化合物。这些立体选择性既符合实验的大量事实,又可用分子轨道对称性守恒原理来解释。该反应一般是可逆的,这种可逆性在合成上有时得到很好的应用。例如,在实验室要用少量丁二烯时,就可将环己烯进行热解制得。2-环己烯基甲酸甲酯的合成也是利用了狄尔斯-阿尔德反应及其逆反应的。

【霍夫曼反应】四级胺碱在 100°C 以上的温度下热分解成烯烃、三级胺和水的反应。用于烯烃的制备、胺类与生物碱的测定等。

【环氧化反应】乙烯在银催化下用空气氧化发生的氧杂三元环反应,其他常见的氧杂三元环反应有氯化醇与碱反应,脱去氯化氢的反应等,这类反应由于形成氧杂三元环而命名。

【羟基化反应】一种将羟基引入有机分子的反应。在工业上制备邻二醇是将环氧化合物水解而成,工业上制备酚是在芳核上引入羟基,以上二例的共性是在有机分子上引入羟基。羟基化反应广泛应用于有机合成中。

【重氮化反应】即生成重氮盐反应,为一级胺(如脂脑族,芳香族和杂环的一级胺)在低温下与亚硝酸的反应。而脂肪族重氮盐不稳定,易分解,芳香族重氮盐较稳定。亚硝酸的作用为在溶液中与三氧化二氮达成平衡,而三氧化二氮为重氮化反应中的有效的重氮化试剂。

【催化氢化反应】几乎所有含不饱和基团的有机化合物在有催化剂作用时，都可以与氢化合，而成为含饱和基团的有机化合物。发生反应的关键是催化剂，大体上可分为两类。(1) 低温、低压催化剂：可在常温下，1—4大气压下发生氢化反应，如铂、铑、钯等。(2) 高温、高压催化剂：在高温下，100—300个大气压下才能发生催化氢化反应，如兰尼镍、硼化镍等。催化氢化反应在工业上有十分广阔的应用前景，如在石油工业中，石油裂解后可生成乙炔与丙炔，在催化氢化后，可生成乙烯与丙烯。在食品工业中用于制造人造黄油，在肥皂工业中用于制造固化油。参看“高分子氢化”。

【高分子化学反应】使高分子化合物的结构发生化学变化的过程，包括范围十分广的一类化学反应。研究的目的是：(1) 寻找新材料，一个突出的例子是人工合成的各种化学纤维；(2) 改变物质的表现性能；(3) 防止高分子化合物的老化与裂解，延长使用寿命；(4) 研究高分子化学反应的机理，促进高分子化学的发展。高分子化学反应不同于低分子化学反应之处主要有：(1) 低分子化学反应中，没有一部分参与反应，而另一部不参与反应的现象，高分子化合物中，由于存在着许多有反应能力的基团，在反应中，常常是一部分基团参与反应，另一部分基团没参与反应，这就是所谓的高分子链反应的不均匀性，因此很难得到单一结构的产物；(2) 高分子化合物中分子链很长，所以在物理与化学作用下极易发生降解；(3) 高分子化学反应属非均相反应，因此与反应试剂的在分子相内扩散的能力大小有十分密切的关系，如果扩散能力大，则整个高分子均可参与反应，这时反应与低分子反应类似，如果扩散能力小，则反应在分子相表面进行，在分子相内部

难以发生化学反应。由于高分子化学反应的复杂性,影响高分子反应的因素也很多,除常见的温度、压力外,常见的还有结晶度、溶解度、溶胀度、分子链的结构等。高分子化学反应的分类也较复杂,除常见于有机化学中的取代反应、加成反应、水解反应、酯化反应、醚化反应、硝化反应、磺化反应、离子交换反应、络合反应、降解反应外,还有环化反应,氢化反应,聚合反应等等,因此研究高分子化学的手段也是各式各样的。参看“高分子降解”、“高分子老化”、“高分子氢化”、“高分子交联”、“高分子合成”。

【高分子降解】泛指高分子在物理因素(如热、紫外线、高能辐射、机械力)和化学因素(如氧、臭氧、腐蚀性介质和化学药物)作用下的变性,其中包括分子链的断裂。方式可分为无规断链和链式解聚两种。无规断链指断裂发生于沿高分子主链的任一弱点上,反应产物的平均聚合度低于原始样品。链式解聚可看作是链式聚合反应的逆过程,它指分子链的某一处或两端一经断裂,即按负增长反应方式不断析出单体。在物理因素影响下发生的降解,往往属于链式解聚,如聚甲基丙烯酸甲酯的热解聚;而在化学因素作用下的降解,则多属于无规断链,如各种不饱和橡胶的臭氧分解。显然,这两种降解究竟是单独发生或者是同时发生,主要取决于高分子链的结构、性质以及降解的条件。

【高分子氧化】高分子化合物老化的主要原因。在光、热、辐射等作用下,高分子化合物在加工过程中残存的微量铁、铜、锰等金属成了催化剂,促进了高分子化合物在空气中的氧化过程,而生成过氧化氢物,而后再分解成自由基,从而导致高分子链的边锁反应,致使高分子化合物降解和老化。通常是在高分子化合物中加

入抗氧剂，用以减缓在加工、运输、贮藏、使用过程中的氧化速度。参看“高分子老化”、“高分子降解”。

【高分子老化】简称老化。见第五卷高分子化工中的“老化”。

【高分子交联】在物理与化学作用下，高分子键发生了变化，形成新的连接键，新的分子链呈网状结构，从而使物性发生变化。如晶体状的高分子化合物有了少量交联后，物体变软而有弹性；又如非晶体高分子化合物，随着交联密度的增加，模量、硬度、玻璃化温度等物理量上升，而膨胀率，伸长率等物理量下降。按照发生高分子交联的原因，可分为三类：（1）化学交联，应用化学试剂而产生高分子交联；（2）光交联，在光照射下产生的高分子交联；（3）辐照交联，在 X 射线或 γ 射线照射下产生的高分子交联。按发生反应的基团也可分为三类：（1）离子型化学交联；（2）自由基型化学交联；（3）具有化学反应能力的官能团型化学交联。

【高分子氢化】在催化剂作用下，将高分子有机化合物中的不饱和基团氢化后成饱和的基团。（参看“催化氢化反应”。）但高分子氢化反应多在高温、高压下发生的。催化剂大体上可分为三类：即（1）镍系（如兰尼镍，铝化镍等）；（2）贵金属（如铂、铑、钯等）与有机金属盐复合物；（3）烷基金属与有机金属盐复合物。通常高分子化合物氢化后，其结晶程度、伸长率、拉伸强度、硬度、抗老性能等均有所提高，而在烃类溶剂中的溶解度有所下降。目前高分子氢化的研究方向是将有不饱和基团的高聚物、共聚物给以氢化以便改善其物性，使之成为更加稳定的物质。

【高分子合成】有机化学工业中常用的方法之一，目的在于将较低分子的单体连接成高分子化合物。大体上可分为两类：即（1）缩聚反应，将一种或两种以上较低分子化合物化合成高分子化合物，同时析出低分子化合物（如水、氟化氢、氯化氢、溴化氢、氨等）；（2）加聚反应，将较低分子的单体聚合成高分子化合物，而不析出低分子的副产物。高分子合成已成为一个重要的工业部门。

【缩聚反应】具有两个或两个以上官能团的低分子化合物（单体）经多次重复地进行缩合反应，生成聚合物，并同时分出简单的小分子（如水、醇、氨、卤化氢等）的化学反应，是两大聚合反应类型之一。当用双官能团的单体时，形成线型聚合物；如果单体的官能度大于2，则可以得到支化或交联的网状聚合物。与烯类聚合不同，缩合聚合由于是单体官能团间的相互作用，通常只需要热能就能开始进行聚合反应，而且除了热分解、交联等副反应以外，本质上没有终止反应。缩聚反应进行的方法主要有：熔融缩聚、溶液缩聚、界面缩聚和固相缩聚。缩聚反应在工业生产上应用广泛，用于多种产品的生产，如尼龙、涤纶等，目前缩聚反应被大量地应用于功能高分子的合成上。

【游离基加聚反应】又称自由基加聚反应。为用自由基引发，使链增长（链生长）、自由基不断增长的聚合反应。在烯类单体的自由基加成聚合反应中，每一个单体分子与链增长末端自由基发生加成反应，产生新的链自由基，并按照这种方式不断地增长。最常用的产生自由基的方法是引发剂的受热分解或二组分引发剂的氧化还原分解反应，也可以用加热、紫外线辐射、高能辐照、电解和等离子体引发等方法产生自由基。在工业上，自由基加聚反应广泛

地用于乙烯、氯乙烯、苯乙烯、丙烯酸酯、四氟乙烯等烯类单体的聚合。因为自由基聚合反应既可以用水作介质进行悬浮聚合和乳液聚合，也可以不用任何介质进行本体聚合，所以它至今仍然是高分子工业中用得最多的一种聚合反应。早在20世纪40年代，已经奠定了自由基加聚反应的动力学和反应机理的研究基础。

【离子聚合与配位】用离子型引发剂（也称催化剂）引发的、其增长链端基带有正或负电荷的加成聚合或开环聚合反应。与自由基聚合相比，离子型聚合对反应条件和杂质等更为敏感，并且较难控制，在很多情况下不易得到重复性的实验结果，因此它在工业上的应用，不如自由基聚合广泛。目前已工业化的正离子聚合的品种有聚异丁烯、丁基橡胶、聚甲醛等。用负离子聚合生产的有低顺丁橡胶、高顺聚异戊二烯橡胶、SBS热塑性橡胶和聚醚等。配位聚合又称络合催化聚合。是不饱和乙烯基单体首先在具有空位的活性催化剂上配位，形成某种形式的配位化合物，然后再聚合的反应。配位聚合反应的特点是可以选择不同的催化剂和聚合条件以制备特定立构规整的聚合物。高分子工业中的许多重要产品（如高密度聚乙烯、等规聚丙烯、顺丁橡胶和异戊橡胶等）都是配位负离子聚合反应制备的。配位聚合是一个离子型聚合过程，按照其增长链端基的性质可以分为配位负离子和配位正离子聚合。活性链按负离子机理增长的称为配位负离子聚合；反之，则称为配位正离子聚合。最常用的配位聚合催化剂是由过渡金属化合物和有机金属化合物组成的齐格勒—纳塔催化剂。

【聚合反应】单体聚合成为高分子的反应。只用一种单体进行聚合者称为均聚反应，也称聚合反应。当单体聚合生成分子量较小的低

聚物时则称低聚合反应,产物称低聚物。当两种或两种以上的单体一起聚合则称共聚合,产物称共聚物。从聚合反应动力学来看,聚合反应主要有两大类,一是链式聚合反应,如烯类单体的加成聚合,简称加聚。二是逐步聚合反应,如双官能团的二元酸与二元胺间的缩合聚合,简称缩聚。聚合反应进行的方法主要指自由基聚合的实施方法,有本体、溶液、悬浮和乳液聚合四种方法。本体及溶液聚合主要属均相反应,但有时因聚合物不溶于单体或溶剂而沉淀出来,就成为非均相反应。悬浮聚合和乳液聚合都是非均相反应。气态和固态单体也能进行聚合,分别称为气相或固态聚合,都可归入本体聚合的范畴。除自由基聚合之外,离子型聚合一般在溶剂中进行。

【共聚合反应】两种或两种以上单体共同聚合,生成的同一分子中含有两种或两种以上单体单元的聚合物的反应。其产物为共聚物。两种单体(M_1 和 M_2)单元呈无规分布的共聚物称无规共聚物,这种共聚反应称无规共聚。两种单体单元严格呈交替分布的共聚物称交替共聚物,相应的共聚反应称交替共聚。如果两种单体单元各自构成很长的序列(例如有几百个单体单元的序列),由两个或两个以上这种长序列构成的共聚物称嵌段共聚物。分子的主链由一种或一种以上的单体单元构成,而支链却由另一种或一种以上的单体单元构成的共聚物称接枝共聚物。这四种共聚物可表示为:



$M_2M_2M_2M_2M_2\sim$ 对共聚合的应用和研究已经有近50年的历史,共聚物的分子链是由两种(或多种)单体单元所组成,它的物理、力学性能取决于这些单体单元的性质、相对数量和排列情况。因此,利用共聚合可设计和制造出符合人们所要求的性能的聚合物,大大扩充了聚合物的品种和应用领域。例如丁苯橡胶和丁腈橡胶都是共聚物。共聚合的研究还可以测定各种单体、自由基、正碳离子和负碳离子在链式聚合中的活性,进一步了解单体活性和化学结构间的关系。

机 械 运 动

【位移】用来描述物体位置变化的物理量,为矢量,其量纲为L。设 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 为动点P的三个直角坐标,则P点的径矢 $\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$, 在 $t=t_1$ 时刻P点的径矢为 $\vec{r}(t_1) = x(t_1)\vec{i} + y(t_1)\vec{j} + z(t_1)\vec{k}$, 则动点P由时刻 t 到时刻 t_1 的位移矢量为 $\Delta\vec{r} = \vec{r}(t_1) - \vec{r}(t) = [x(t_1) - x(t)]\vec{i} + [y(t_1) - y(t)]\vec{j} + [z(t_1) - z(t)]\vec{k}$ 。

【速度】描述物体运动快慢和方向的物理量。物体位移和所历时间之比,称为这段时间的平均速度;如果这一时间极短(趋近于零),这一比值的极限则称为物体在该时刻的瞬时速度。速度是矢量(含有大小和方向),其方向在直线运动中沿直线方向,在曲线运动中沿运动轨迹的切线方向。

【瞬时速度】见“速度”。

【平均速度】见“速度”。

【速率】速度的大小，以路程对时间的导数表示。速率是一个标量，用来描述物体运动的快慢。它与速度的区别是仅表示速度的大小，不含方向。

【速度合成定理】动参照系 $o'x'y'z'$ 相对于静参照系 $oxyz$ 而运动，动点 P 相对于静参照系 $oxyz$ 的速度叫绝对速度，记为 \vec{v}_a ，动点 P 相对于动参照系 $o'x'y'z'$ 的速度叫相对速度，记为 \vec{v}_r ，与动点 P 相重合动参照系 $o'x'y'z'$ 上的点相对于静参照系 $oxyz$ 的速度叫牵连速度，记为 \vec{v}_e ，则有：
$$\vec{v}_a = \vec{v}_e + \vec{v}_r。$$

【绝对速度】见“速度合成定理”。

【相对速度】见“速度合成定理”。

【牵连速度】见“速度合成定理”。

【加速度】动点 P 在某一时刻的速度变化率，是矢量，记为 \vec{a} ，和速度 \vec{v} 与位置矢量 \vec{r} 的关系为：
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}，$$
其量纲为 LT^{-2} 。

【切向加速度】加速度在动点轨迹切线上的投影，记为 a_t ，描述动点速率对时间的变化率，它和速度的关系为 $\vec{a}_t = \frac{d\vec{v}}{dt}\vec{t}$ ，此处 \vec{t} 为动点轨迹的单位切线矢量，其量纲为 LT^{-2} 。

【法向加速度】加速度在动点轨迹主法线上的投影，记为 a_n ，与速度 \vec{v} 及轨迹的曲率半径 ρ 的关系为： $\vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho}\vec{n}$ ， \vec{n} 为主法线单位矢量，其量纲为 LT^{-2} 。

【平均加速度】设动点 P 在 t 与 t_1 时刻的速度分别依次为 $\vec{v}(t)$ 与 $\vec{v}(t_1)$ ，则动点的平均加速度

$$\vec{a}_{\text{平均}} = \frac{\vec{v}(t_1) - \vec{v}(t)}{t_1 - t}。$$

【加速度合成定理】动参照系 $o'x'y'z'$ 相对于静参照系 $oxyz$ 而运动，动参照系的角速度为 $\vec{\omega}_e$ ，动点 P 相对于动参照系的加速度叫相对加速度，记为 \vec{a}_r ；动点 P 相对于静参照系的加速度叫绝对加速度，记为 \vec{a}_a ；动参照系上与动点 P 相重合的点的加速度叫牵连加速度，记为 \vec{a}_e ；又有科里奥利加速度 \vec{a}_c ，则 $\vec{a}_a = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_c$ ，其中 $\vec{a}_c = 2\vec{\omega}_e \times \vec{v}_r$ 。科里奥利加速度是牵连运动改变了相对速度的方向、相对运动改变了牵连速度的大小和方向而产生的。

【绝对加速度】见“加速度合成定理”。

【相对加速度】见“加速度合成定理”。

【牵连加速度】见“加速度合成定理”。

【科里奥利加速度】见“加速度合成定理”。

【刚体平行移动】简称平移或平动。当刚体运动时，刚体上的任一线段的方向保持不变，这种运动叫平行移动。

【平移】见“刚体平行移动”。

【平动】见“刚体平行移动”。

【直线运动】运动轨迹为直线的运动。动点 P 作直线运动且速度为常量时为匀速直线运动。若动点 P 的加速度为常数，加速度方向与速度方向相同时为匀加速直线运动；加速度方向与速度方向相反时则为匀减速直线运动。匀减速直线运动必将变为匀加速直线运动。用 s 表示动点 P 的位置， v 示动点 P 的速度， a = 常量为动点 P 的加速度， t 为时间，下标 0 表示初始状态，则匀速直线运动公式为： $s = s_0 + v_0 (t - t_0)$ 。匀加速直线运动公式为： $s = s_0 + v_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} a (t - t_0)^2$ ， $v = v_0 + a (t - t_0)$ 和 $v^2 - v_0^2 = 2a (s - s_0)$ 。

【匀速直线运动】见“直线运动”。

【匀加速直线运动】见“直线运动”。

【匀减速直线运动】见“直线运动”。

【自由落体运动】物体在地球表面附近，在重力的作用下，从静止状态开始直线下落的运动。设下降的距离为 s ，所用的时间为 t ，所达到的速度为 v ，则有： $s = \frac{1}{2}gt^2$ ， $v = gt$ 和 $v^2 = 2gs$ ， g 为重力加速度，其标准值为 9.80665 米/秒²。

【抛体运动】在地球表面，在重力作用下，物体初速不为零的运动，其轨迹为抛物线。设于 $t=0$ 从 $(0, 0)$ 点出发作抛体运动，初速为 \vec{v}_0 ，与水平的 x 轴夹角为 α ，抛体的出发点与落地点在同一水平线上，则飞行时间 $\Delta t = \frac{2}{g}v_0 \sin\alpha$ ，着地距离为 $\frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha$ ，在 $\alpha = 45^\circ$ 时，着地距离最大，其值为 v_0^2/g 。

【角动量定理】又称动量矩定理。质点系对一点（或一轴）的角动量对时间的导数等于外力系对此点（或此轴）的主矩，广泛用于处理刚体定点（或轴）转动问题。角动量定理可表达成： $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_0^{\text{外}}$ 。角动量的量纲为 ML^2T^{-1} 。

【动量矩定理】见“角动量定理”。

【角动量守恒定律】又名动量矩守恒定律，为物理学基本定律之一。当作用于质点系的外力系的主矩为零时，则质点系的角动量守恒。

【动量矩守恒定律】见“角动量守恒定律”。

【刚体】一个物体上的任意两点间的距离永远保持不变，则此物体

为刚体。事实上在外力作用下,任何物体上任意两点间的距离都要发生变化,即在外力作用下,任何物体都要产生形变,但如忽略这种形变对所讨论的问题不会引起显著的误差,则可以将它抽象化为刚体。研究刚体运动的力学叫刚体动力学,常见的分支有:平动刚体动力学,定轴转动刚体动力学,定点转动刚体动力学,平面运动刚体动力学,多刚体运动动力学等。

【转动惯量】刚体定轴转动所获得的角加速度 α 与外加力的力矩 M 成正比,即 $M=I\alpha$ 。这里 I 是一个反映刚体转动状态改变(获得角加速度 α) 难易程度的物理量,也就是刚体转动时惯性的量度,称为刚体对轴的转动惯量。 I 不仅取决于刚体的总质量,而且取决于相对于转动的刚体的质量分布。同一刚体对于不同的转轴具有不同的转动惯量。

【惯性椭球】由对 x, y, z 轴的转动惯量 I_x, I_y, I_z 及对 xoy 面、 yoz 面、 zox 面的惯性积 I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} 组成如下的二次方程所代表的椭球面叫惯性椭球, $\psi(x, y, z) = I_x x^2 + I_y y^2 + I_z z^2 - 2I_{xy}xy - 2I_{yz}yz - 2I_{zx}xz = k^2 = \text{常量}$ 。若进行坐标变换,使得在新坐标系下惯性积为零,新的坐标轴即为惯性主轴。设新坐标系的轴为 $o\xi, o\eta, o\zeta$, 而对这三个轴的转动惯量为 I_ξ, I_η 及 I_ζ , 则惯性椭球方程为 $\Phi = I_\xi \xi^2 + I_\eta \eta^2 + I_\zeta \zeta^2 = k^2 = \text{常量}$ 。惯性主轴与椭性椭球面正交。若 $(0, 0, 0)$ 点为质心 c , 则此时的惯性主轴叫中心惯性主轴。

【中心惯性主轴】见“惯性椭球”。

【动平衡】对定轴转动刚体而言,若转轴不是刚体的中心惯性主轴,

则在高速转动时,在轴承处将产生巨大的动反力,其结果或是使轴承破坏,或是通过轴承,使地基产生强迫振动,造成严重的环境振动,甚至可能使地基损坏。若转动轴为中心惯性主轴,则不产生动反力,我们说刚体处于动平衡状态,此时的转动轴叫自由轴。目前大型的转动机械都要对转子进行质量的调整,以期在运行时转子处于动平衡态。由于转子结构日益复杂,用调整质量的方法使之达到动平衡态已成为一门专门的技术。

【平行轴定理】又名史泰乃尔定理。 z 与 z' 二轴彼此平行, z 轴过刚体的质心 c , 二轴间的距离为 d , 刚体的质量为 m , 刚体对 z 与 z' 轴的转动惯量分别依次为 I_z 与 $I_{z'}$, 则 $I_{z'} = I_z + md^2$ 。故在诸平行轴中以对过刚体质心 c 的轴的转动惯量为最小。

【史泰乃尔定理】见“平行轴定理”。

【回转半径】刚体对子轴的转动惯量为 I , 质量为 M , 则刚体对子轴的回转半径 $r = \sqrt{\frac{I}{m}}$ 。

【相对于质心的角动量定理】将系统的运动分解为随同质心的平动及相对质心的运动。设第 i 个质点的质量为 m_i , 在随同质心作平动的坐标系中的径矢为 \vec{r}'_i , 速度为 \vec{v}_{ri} , 则对质心 c 的角动量 $\vec{L}_c =$

$\sum_{i=1}^n \vec{r}'_i \times m_i \vec{v}_{ri}$ 。质点系对质心 c 的角动量 \vec{L}_c 对时间的导数等于作用质点系上的外力系对质心 c 的主矩 $\vec{M}_c^{\text{外}}$, 即 $\frac{d\vec{L}_c}{dt} = \vec{M}_c^{\text{外}}$, 此即相对于质心的角动量定理。

【刚体定轴转动】运动的刚体上静止点构成一条直线时的运动。此直线为转轴，若刚体的转轴为 oz 轴，过 oz 轴在固定空间中作平面 P_1 ，在刚体上作一个过 oz 轴的平面 P_2 ，则平面 P_1 与平面 P_2 所夹的二面角 θ 用来描述刚体的位置，二面角 θ 对时间的导数即为角速度 ω ，用来度量刚体转动的快慢。角速度 ω 的量纲为 T^{-1} ，其单位为弧度·秒⁻¹或转·分⁻¹。在转轴上任选一点 o ，沿转轴 oz 按右手螺旋法则按任选的比例画出角速度 ω 来，从而构成角速度矢量 $\vec{\omega}$ 。角速度 ω 对时间的导数为角加速度 α ，即 $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ ，用以度量角速度 ω 的变化快慢。角加速度 α 的量纲为 T^{-2} ，单位为弧度·秒⁻²。定义角加速度矢量 $\vec{\alpha}$ 为：当 $\alpha > 0$ 时，从 o 点沿 oz 轴正向引一有向线段示角加速度 $\vec{\alpha}$ ，当 $\alpha < 0$ 时，从 o 点沿 oz 轴负向引一有向线段示角加速度 $\vec{\alpha}$ 。设刚体对转轴 oz 的转动惯量为 I_z ，作用于刚体上外力系对转轴 oz 的主矩为 $M_z^{\text{外}}$ ，则定轴转动刚体运动微分方程为 $I_z \alpha = I_z \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_z^{\text{外}}$ 。定轴转动的刚体上任一点的运动轨迹为垂直于转轴 oz 的圆。其运动速度 $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ ， $v = \rho\omega$ ；切向加速度 $\vec{a}_t = \vec{\alpha} \times \vec{r}$ ， $a_t = \rho\alpha$ ，法向加速度 $\vec{a}_n = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$ ， $a_n = \rho\omega^2$ ，沿 \vec{po}_1 方向。

【角速度】 见“刚体定轴转动”。

【角加速度】 见“刚体定轴转动”。

【刚体定点转动】刚体上有一点永为静止的运动，如陀螺的运动。陀螺是均质的、旋转对称的物体，可绕对称轴 $o\zeta$ 高速自转， o 为

不动点。在重力作用下，对称轴 $o\zeta$ 绕铅垂 oz 轴转动，这一运动称之为进动，随着自转角速度的减小，对称轴 $o\zeta$ 与铅直轴 oz 的夹角 θ 渐渐加大，这一运动称之为章动， θ 即为章动角。陀螺的这些运动有很高的实用价值。

【自转】 见“刚体定点转动”、“欧拉角”。

【进动】 见“刚体定点转动”、“欧拉角”。

【章动】 见“刚体定点转动”、“欧拉角”。

【欧拉角】 确定一条直线在空间中的方向的三个独立的角 φ 、 θ 和 ψ ，其所确定的直线可以设想如下：从正交笛卡儿坐标系 $oxyz$ 出发，首先把坐标轴对 oz 轴转一个角度 ψ ，再把已经移动后的坐标轴绕 ox 轴的新位置转动一个角度 θ ，最后再把坐标轴绕 oz 轴的新位置转动一个角度 φ ， $oxyz$ 的最终位置就是用欧拉角 φ 、 θ 、 ψ 所确定的直线位置 b ；规定一个物体对于参考轴定向的三个角参数。

【欧拉运动学方程】 见“欧拉角”。

【欧拉动力学方程】 欧拉于1758年提出，为定点转动刚体动力学的基本方程。坐标轴 ox ， oy ， oz 为与刚体固连且为过定点 o 的刚体的惯性主轴，而主转动惯量分别为 I_x ， I_y ， I_z 。刚体转动的角速度在这三个坐标轴上的投影为 ω_x ， ω_y ， ω_z ，外力系对定点 o 的主矩在这三个坐标轴上的投影为 M_x ， M_y ， M_z ，则由角动量定理有： $I_x \dot{\omega}_x +$

$(I_z - I_y) \omega_z \dot{\omega}_y = M_x$, $I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = M_y$, $I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y = M_z$, 这就是欧拉动力学方程, 迄今只在三种特殊情况下得到解, 即 (1) 欧拉—布安索情况, 指 $M_x = M_y = M_z = 0$ 的情况, 于 1758 年欧拉给出精确解, 1851 年布安索给出几何解释。(2) 拉格郎日—泊松情况, 指 $I_z = I_y$, 即椭性椭球为旋转椭球, 且重心在 oz 轴上, 外力矩即为重力对 o 点之矩的情况, 1788 年拉格朗日给出了精确解, 1813 年泊松作了进一步研究。(3) 柯瓦列夫斯卡娅情况, 指 $I_x = I_y = 2I_z$, 外力矩仅为重力矩, 且重心在对 o 点的旋转椭球的赤道面内的情况。其精确解于 1888 年由俄国女数学家柯瓦列夫斯卡娅给出。

【刚体平面运动】刚体上任一点与某一固定平面的距离保持不变的运动。其特点为过刚体上任一点作一直线垂直于此固定平面, 则此直线的点有相同的速度与加速度。作另一平面平行于固定平面, 此平面与刚体相截而得一个平面图形, 则刚体的运动可简化成为这个平面图形的运动。

【速度投影定理】刚体上两点的速度在其连线上的投影彼此相等。这是刚体上任意两点的距离为常量这个事实在运动学上的反映。

【速度瞬时转动中心】简称速度瞬心。平面运动刚体在每一瞬时其速度分布有如定轴转动刚体的速度分布, 而转轴与平面图形的交点即为速度瞬心。

【加速度瞬时转动中心】平面运动刚体在每一瞬时其加速度分布有如定轴转动刚体的加速度分布, 而转轴与平面图形的交点即为加

速度瞬心。

【刚体一般运动】可将刚体的运动分解为随同质心的平移及绕质心的定点转动两部分。利用速度合成定理与加速度合成定理可得刚体上任意一点 P 的速度 $\vec{V}_P = \vec{V}_C + \vec{\omega} \times \vec{r}_P$ ，此 \vec{V}_C 为质心的速度， $\vec{\omega}$ 为刚体的角速度， \vec{r}_P 为 P 点相对于质心 C 的位置矢量。而 P 点的加速度 $\vec{a}_P = \vec{a}_C + \vec{\alpha} \times \vec{r}_P + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_P)$ ，此处 \vec{a}_C 为质心 C 的加速度， $\vec{\alpha}$ 为刚体的角加速度。利用质心运动定理、定点转动刚体的欧拉动力学方程可以写出刚体的一般运动的动力学方程。

【刚体合成运动】坐标系 $Oxyz$ 为静参照系，坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 为动参照系，它对静参照系 $Oxyz$ 的运动为有角速度 $\vec{\omega}_1$ ，角加速度 $\vec{\alpha}_1$ ， O_1 点的速度为 \vec{v}_{01} ，加速度为 \vec{a}_{01} 。刚体在动参照系 $O_1x_1y_1z_1$ 内运动，其运动为相对动参照系 $O_1x_1y_1z_1$ 有角速度 ω_2 ，角加速度 $\vec{\alpha}_2$ ，质心 C 的速度 \vec{V}_{rc} ，质心 C 的加速度 \vec{a}_{rc} 。则刚体对静参照系的角速度 $\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2$ ，角加速度 $\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_1 + \vec{\alpha}_2 + \vec{\omega}_1 \times \vec{\omega}_2$ 。刚体质心 C 相对于静参照系的速度 $\vec{V}_C = \vec{V}_{01} + \vec{\omega}_1 \times \vec{O_1C} + \vec{V}_{rc}$ ， $\vec{a}_C = \vec{a}_{01} + \vec{\alpha} \times \vec{O_1C} + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{O_1C}) + 2\vec{\omega}_1 \times \vec{V}_{rc} + \vec{a}_{rc}$ 。至于刚体上任意一点 P 的速度 $\vec{V}_P = \vec{V}_C + \vec{\omega} \times \vec{CP}$ 。加速度 $\vec{a}_P = \vec{a}_C + \vec{\alpha}_2 \times \vec{CP} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{CP})$ 。刚体对静参照系 $Oxyz$ 的运动还可按 $\vec{\omega} \cdot \vec{V}_C = 0$ 与 $\vec{\omega} \cdot \vec{V}_C \neq 0$ 两种情况。1) $\vec{\omega} \cdot \vec{V}_C = 0$ 情况，又分为 (1) $\vec{\omega} = 0, \vec{V}_C = 0$ 情况，此时刚体瞬时静止。(2) $\vec{\omega} \neq 0, \vec{V}_C = 0$ 情况，此时刚体作以 C 点为定点的瞬时定点转动。(3) $\vec{\omega} = 0, \vec{V}_C \neq 0$ ，此时刚体为瞬时平动。(4) $\vec{\omega} \neq 0, \vec{V}_C \neq 0$ ，但 $\vec{\omega} \perp \vec{V}_C$ ，此时刚体仍为瞬时定点转动，但瞬时的定点已不是 C 点，而瞬时定点 D 由 $\vec{V}_C + \vec{\omega} \times \vec{CD} = 0$ 来决定。2) $\vec{\omega} \cdot \vec{V}_C \neq 0$ 情况，此时刚体作螺

旋运动，转动角速度为 $\vec{\omega}$ ，而移动速度为 $\frac{(\vec{\omega} \cdot \vec{V}_C) \vec{\omega}}{\omega^2}$ 。

【摩擦】两个相接触的物体有相对运动或相对运动趋势时，在接触面上产生阻碍相对运动或相对运动趋势的机械作用，这种作用即为摩擦。摩擦分为：

摩 擦	干摩擦	静摩擦	滑动静摩擦
			滚动静摩擦
		动摩擦	滑动动摩擦
			滚动动摩擦
湿摩擦			

干摩擦指固体与固体间的摩擦，产生这种摩擦的原因主要是因为接触面不够光滑，发生机械啮合所致。其次为两物体上分子与分子间的吸引力，只有在接触面十分光滑时，机械啮合作用几乎消失时，这种吸引力才起主导作用。故此对干摩擦而言，接触面越光滑，摩擦力越小，但当接触面的光滑程度超过某一极限时，接触面越光滑，摩擦力反而越大。干摩擦又分静摩擦与动摩擦两种，而每种又分滚动摩擦与滑动摩擦两种情况。

【滑动静摩擦】当两个物体接触保持静止，但在外力作用有相对运动趋势时，在两物体接触面上产生阻碍相对运动发生的力，此力名为滑动静摩擦力。 $F_{\max} \leq \mu N$ ， N 为正压力、 μ 为滑动静摩擦系数。

【滑动动摩擦】当两个物体在接触点（面）处有相对运动时，所产生的摩擦力为滑动动摩擦力。 $F = \mu' N$ ， N 为正压力， μ' 为滑动摩擦系数。

【滚动摩擦】当两个物体发生滚动或有滚动趋势时，接触处发生弹性变形，接触处不再是一点，而是有限大小的曲面，通常由于变形区域不大，因此可按没有弹性变形处理，将接触处简化成一点（或线），将分布的力向接触点简化，形成一个力和一个力偶，这个力的沿接触处法线方向的分量就是正压力 N 的反作用力 N' ，这个力沿接触处切线方向的分量就是滑动摩擦力，这个力偶叫滚阻力偶，也叫滚动摩阻。当两个物体接触仅有滚动趋势，而无滚动，此时所产生的阻止滚动发生的力偶叫做静摩擦力偶。静摩擦力偶的力偶矩决定于外力矩，但它具有一个最大值。静摩擦力偶作用在与相对滚动转轴垂直的平面内，其转向与相对滚动趋势方向相反。最大静摩擦力偶矩记为 M_{\max} ， $M_{\max} = \delta N$ ，此处 N 为正压力。 δ 称为滚动静摩擦系数，它的量纲为 L ，单位为米（m）。滚动静摩擦系数 δ 近似地与滚动物体的半径无关，而与两物体的材料性质及接触处的物理状态有关。当两个物体接触并发生相对滚动，此时在接触面处产生一个阻碍相对滚动的力偶，称之为摩擦力偶，或滚阻力偶，它作用于相对滚动的转轴的垂直平面上，其转向与相对滚动转向相反，其力偶矩为 M ，且 $M = \delta' N$ ，此处 N 为正压力。 δ' 称为滚动摩擦系数，其量纲为 L ，其单位为米（m），它近似地与滚动物体的半径无关，而与两个物体的材料特性及接触处的物理状态有关。当物体在液体或气体中运动中，由于液体或气体有粘性，从而也产生一种阻力，这就是湿摩擦力。当物体的相对于液体或气体运动的速率很小时，湿摩擦力与速率成正比。但当相对运动速率加大时，湿摩擦力与速率的二次方或高次方成正比，比例系数与流体的粘性、物体的形状以及物体表面的物理状态有关。摩擦是一个不可逆过程。由于有摩擦力，使得机械能转变为热能，且可使物体磨损。但摩擦也对人类十分有利，如果没有摩擦，人将不能运

动，车辆不能行驶，人们将无法穿衣，吃饭，所以说没有摩擦，人类将无法生存。迄今人们对产生摩擦的机理还不太清楚，远不能精确地描述摩擦力。在如何利用摩擦为人类服务，如何减少摩擦给人类带来的危害等方面是大有可为的。

【多刚体系统】多个刚体彼此相连，能完成一定的预定的动作的系统，如四连杆机构。分析多刚体系统时，首先是进行运动学分析，确定每个刚体的运动形式及尺寸，力求刚体个数少，结构简单。

【质量】物质量的多少的度量，也是物体惯性的度量，它是恒正的标量，用 m 表示。万有引力是物体间的相互吸引力。牛顿在万有引力定律中引入引力质量来表示产生引力与接受引力大小的度量。牛顿又在第二运动定律中引入惯性质量，用以表示物体惯性的大小。引力惯量与惯性质量是同时存在的，且恒成正比。爱因斯坦就以惯性质量等于引力惯量为依据，提出了等效原理，建立了广义相对论。狭义相对论指出：物体运动时的质量 m 大于其在静止时的质量 m_0 ， m 与 m_0 间的关系为 $m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ 。此处 V 为物体的速率， c 为光速。在物体运动速率 v 远远小于光速 c 时，可以认为 $m = m_0$ 。当物质的能量 E 变化了 ΔE ，其质量也发生相应变化 Δm ，而 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。物体的质量 m ，能量 E 与动量 \vec{P} 之间有如下关系 $E^2 = P^2c^2 + m_0^2c^4$ 。质量的量纲为 M ，其单位为千克 (kg)，但在粒子物理中常用能量来度量质量，其单位为电子伏特 (eV)。

【惯性质量】见“质量”。

【引力质量】见“质量”。

【力】物体间的相互作用,其结果或是使物体变形,或是改变物体的运动状态,即产生加速度。在国际单位制中,力的量纲为 MLT^{-2} ,单位为牛顿。使1千克质量的物体产生1米/秒²的加速度所用的力为1牛顿。使一克质量的物体产生1厘米/秒²的加速度所用的力为1达因(非法定计量单位),1牛顿等于 1×10^5 达因。在工程单位制中,力为基本单位,其量纲为 F,单位为千克。1千克力等于9.80665牛顿。

【保守力】若力的做功与路径无关,而仅与首末位置有关,则这种力叫保守力,如万有引力、弹性力等。在保守力场中,机械能守恒定律成立。若力的作用不仅与首末位置有关,而且也与路径有关,则这种力叫非保守力,如摩擦力,阻力等。在非保守力作用下,机械能守恒定律不成立。若力 \vec{F} 的解析表达式可写出,且为力的作用点的连续函数,则如 $\Delta \times \vec{F} = 0$ 成立,则此力为保守力,否则为非保守力。

【非保守力】见“保守力”。

【惯性力】在非惯性参照系中物体所能受到的一种力,它不服从牛顿第三定律,即有受力物体,而无施力物体。有作用力,而无反作用力。由于 $m\vec{a}_r = \vec{F} - m\vec{a}_t - m\vec{a}_c = \vec{F} + \vec{F}_e + \vec{F}_c$ 。此处 \vec{a}_r 为质点的相对加速度, \vec{a}_c 为质点的相对加速度, \vec{a}_t 为质点的科里奥利加速度。 \vec{F}_e 为牵连惯性力, $\vec{F}_c = -m\vec{a}_c$, 即牵连惯性力的大小等于质量与牵连加速度大小之积,而牵连惯性力的方向与牵连加速度方向相反。在生活中,如离心力,车向前启动时人向后倒,垂直升降机中的超

重与失重现象等，这些都牵连惯性力的表现。 \vec{F}_C 为科里奥利惯性力， $\vec{F}_C = -m\vec{a}_c$ ，即科里奥利惯性力的大小等于质量与科里奥利加速度大小之积，而方向与科里奥利加速度方向相反。仅当非惯性参照系有角速度 $\vec{\omega}$ 时才有科里奥利惯性力。地球就是有角速度的非惯性参照系，由于科里奥利惯性力的作用，在北半球河流右岸冲刷较左岸厉害，自高空自由落体时，落体偏东降落。大气因科里奥利惯性力作用而形成大气环流。远程火箭向上飞行时要偏向西方，向下飞行时要偏向东方，向东水平飞行时要偏向上方，向西飞行时要偏向下方等等都是科里奥利惯性力的作用结果。

【万有引力】宇宙中任何两个物体之间都存在的一种相互吸引力。1687年牛顿发表了万有引力定律：设两个质点的质量分别为 m_1 与 m_2 ，两个质点之间的距离为 r ，则它们之间的吸引力 F 为 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 其中 $G = (6.6720 \pm 0.0041) \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ ， G 称为引力常数。近代物理表明：在任何物体附近都有引力场，引力场是一种特殊的物质。每一个物体都是同它周围的引力场相互作用。两个物体间的万有引力，是一个物体与其周围的引力场相互作用，形成引力波，引力波在引力场中传播后作用到另一个物体上。万有引力定律是研究天体运行的基本规律，也是研究人造地球卫星运动的基本规律。

【重力】地球对物体的吸引力。重力 $P = mg$ ，其中 m 为物体的质量， g 为重力加速度。由于地球内物质不均匀，由于地球不是严格的球形，又由于地球有自转，故各地的重力加速度值不相同。重力加速度 g 的值可用下式计算 $g = 9.7803 (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi -$

$0.0000059\cos^2\varphi) \text{ m/s}^2$ ，此处 φ 为物体所在处的纬度值。在同一地点，重力加速度 g 与物体距地面高度 h 有如下关系： $g = G \frac{m_e}{(R_e + h)^2}$ ，此处 m_e 为地球的质量， R_e 为地球的平均半径， G 为万有引力常数。人们可用倒摆仪或绝对重力仪直接测定地球表面上各点的重力加速度，利用测得的结果可以了解地下的密度，从而为寻找矿藏提供依据，还可以利用测得的结果来研究地球形状及其变化。

【重量】 物体所受重力的大小。见“重力”。

【比重】 有两种含义：(1) 以纯水在一个大气压，温度为 3.98°C 时的密度为 999.972kg/m^3 为标准，对于固态或液态物质而言，在某一压力、某一温度下的密度与纯水的密度的比值是为在该压力下、该温度下该物质的比重。对于气态物质而言，以空气的分子量 28.9644 为标准，某种气体的分子量与空气的分子量的比值是为该种气体的比重。比重是无量纲量，简记为 s, g 。(2) 某物质在某温度、某压力下单位体积内的重量是为该物质在该温度该压力下的比重，记为 W ，它的单位为牛顿/米³ (N/m^3) 或公斤/米³ (kg/m^3)。若该物质的密度为 ρ ，则 $W = \rho g$ ，此处 g 为重力加速度。由于重力加速度 g 因地区、距地面高度不同而不同，故比重也因地区、距地面高度不同而不同。

【力矩】 表示作用力对物体产生转动效应的矢量，分为力对一点的力矩和力对一轴的力矩。力对某点力矩的大小等于该点到力的作用线所引垂线之大小乘力的大小，方向垂直于垂线和力所构成的

平面。力对某一轴线力矩等于力对轴上任一点的力矩在轴线上的投影。

【力偶】大小相等，方向相反，但不共线的两个平行力所组成的力系，用 $(\vec{F}, -\vec{F})$ 表示。力偶是最简单力系之一，它已不能再简化。力偶 $(\vec{F}, -\vec{F})$ 所决定的平面叫力偶作用面，力偶中两个力之间的距离 d 称为力偶臂，而 $F \cdot d$ 称为力偶的力偶矩。全面描述力偶的物理量为力偶矩矢量 \vec{M} ，其大小为 $F \cdot d$ ，其方向垂直于力偶作用面，其指向用右手法则决定。力偶矩矢量 \vec{M} 也可用 $(\vec{F}, -\vec{F})$ 用两个力对固定点 O 之矩之和表示，即 $\vec{M} = \vec{M}_O(\vec{F}) + \vec{M}_O(-\vec{F})$ 。力偶作用于刚体上后，可使刚体产生转动，但不能使刚体的质心移动。力偶系是由两个以上力偶组成的力系，它可用一个力偶代替，此合力偶之矩等于力偶系中诸力偶矩之和，即 $\vec{M} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i$ 。力偶矩的量纲为 ML^2T^{-2} ，其单位为牛顿·米 ($N \cdot m$)。

【力的合成与分解】两个共点力 \vec{F}_1 与 \vec{F}_2 的合成法则是平行四边形法则。 \vec{F}_1 与 \vec{F}_2 是有共点 O 的两个力，过力 \vec{F}_1 的末端 B 作一线 BC 平行于力 \vec{F}_2 ，过力 \vec{F}_2 的末端 A 作一线 AC 平行于力 \vec{F}_1 ，于是 $OACB$ 构成一个平行四边形，连对角线 OC ，则 OC 代表力 \vec{F}_1 与 \vec{F}_2 的合力 \vec{R} ，记为 $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ 。而合力 \vec{R} 的大小为

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\theta},$$

此处 θ 为力 \vec{F}_1 与 \vec{F}_2 的夹角。另一个力的合成方法是解析法，设有共点力系 $\{\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n\}$ ，而力 \vec{F}_i 与坐标轴 ox, oy, oz 夹角分别为 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ，则我们可以将力 \vec{F}_i 分解成为三个分力 X_i, Y_i, Z_i ，这三个分力分别沿 ox, oy, oz 轴方向，且 $X_i = F_i \cos \alpha_i, Y_i =$

$F_i \cos \beta_i$, $Z_i = F_i \cos \gamma_i$, 即 $\vec{F}_i = X_i \vec{i} + Y_i \vec{j} + Z_i \vec{k}$ 。此处 \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 为沿 ox 轴、 oy 轴及 oz 轴的单位矢量。则合力 $\vec{R} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n X_i \vec{i} + \sum_{i=1}^n Y_i \vec{j} + \sum_{i=1}^n Z_i \vec{k} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} + R_z \vec{k}$, 此处 $R_x = \sum_{i=1}^n X_i$, $R_y = \sum_{i=1}^n Y_i$, $R_z = \sum_{i=1}^n Z_i$ 为合力 \vec{R} 沿 ox 轴, oy 轴, oz 轴分解后的分量, 而合力的大小为 $R = (R_x^2 + R_y^2 + R_z^2)^{\frac{1}{2}}$, 合力的方向决定于方向余弦 $\cos(\vec{R}, \vec{i}) = \frac{R_x}{R}$, $\cos(\vec{R}, \vec{j}) = \frac{R_y}{R}$, $\cos(\vec{R}, \vec{k}) = \frac{R_z}{R}$ 。

【力系的简化】两个力系作用于同一刚体时如效果相同, 则此两个力系彼此互为等效力系。用一个简单的力系等效于一个复杂的力系为力系的简化。

【受力分析】又称画隔离体图, 或画示力图, 是进行力学计算的基础。常见的约束类型有: (a) 搁置约束, 约束力沿接触面的法线。(b) (柱) 铰座, 约束力垂直于转轴, 但方向未定, 通常用两个彼此垂直的、且垂直于转轴的分力表示。(c) 球铰座, 约束力过球心, 但方向不定, 通常用三个彼此互垂的分力表示。(d) 辊座, 约束力垂直于辊座的接触面。(e) 颈轴承与止推轴承, 颈轴承处约束力垂直于转轴, 但其方向未知, 故用两个垂直于轴且彼此相互垂直的分力表示。止推轴承等于颈轴承再加上搁置约束力可画三个分量, 一个分量沿轴方向, 其他两个分量互垂直垂直于轴。对于复杂的结构进行力学计算时, 有时要将各个部件从连接处拆开, 分别画出每一个部件的受力图, 此时必须注意在受力图上表示出在连接处约束力服从作用力与反作用力定律。

【隔离体图】见“受力分析”。

【示力图】见“受力分析”。

【牛顿运动定律】牛顿于1687年7月出版专著“自然哲学的数学原理”。在这本书中，牛顿以形式逻辑的思想为主导，以数学分析的方法为依据，建立起力学的公理体系，此公理体系的基础是牛顿三大定律。

【牛顿第一定律】又称惯性定律，由伽利略发现。内容为“任何物体都应保持静止或匀速直线运动状态，直到其他物体的作用迫使它改变原有的运动状态为止”。在此定律中所说的物体应理解为质点或作平行移动的刚体。其次在此定律中只提到静止或运动，没提到参照系。牛顿认为存在绝对的时间与空间，在绝对的时间过程与绝对空间中有一种绝对的运动，牛顿第一定律中的静止或运动就是指的这种绝对运动。近代物理表明：绝对的时间，绝对的空间，绝对的运动是不存在的，一切都是相对的。我们称牛顿第一定律成立的参照系为惯性参照系。

【惯性定律】见“牛顿第一定律”。

【牛顿第二定律】物体的动量对时间的变化率正比于其所受的力。这里的物体应理解为质点。物体的动量记为 \vec{p} ，定义为质点的质量 m 与质点的速度 \vec{v} 之积，即 $\vec{p} = m\vec{v}$ 。设作用于质点上的力为 \vec{F} ，适当的选择单位可使比例系数为1，即 $\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}$ 。在经典力学中， m

$=$ 常量, 引 $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ 叫质点的加速度, 则牛顿第二定律可写成 $m\vec{a} = \vec{F}$ 。如果作用在质点上的力 \vec{F} 为零, 则由牛顿第二定律可得速度 $\vec{v} =$ 常量, 这就是牛顿第一定律, 所以可以说牛顿第一定律是牛顿第二定律的推论。近代物理研究表明, 当质点运动的速率 v 接近于光速 c 时, 牛顿第二定律不再成立, 此时应按狭义相对论处理。

【牛顿第三定律】 又称作用反作用定律。物体 A 作用给物体 B 以作用力的同时, 物体 B 也作用给物体 A 以反作用力, 作用力与反作用力大小相同, 方向相反, 作用在同一直线上, 作用在不同的物体上。牛顿第三定律不仅对于宏观物体的相互作用成立, 而且对于微观物体的相互作用也成立, 因此它是物理学的基本规律之一。

【作用力与反作用力定律】 见“牛顿第三定律”。

【参照系】 人们只能相对地确定一个物体在空间的位置。也就是说, 在研究物体的位置及其变化时, 人们必须先选定一个物体为参照体, 而后才能说所研究的物体的位置, 以及该物体的运动状态。一般地说, 任何一个物体都可以做为参照体, 但是不同的参照体上观测同一物体的运动是不同的, 如我们观测一辆运动的车中的灯, 如以地球为参照体, 则这个灯是运动的; 如以车为参照体, 这个灯可能是静止的。在日常生活中常选地球为参照体。与参照体固连的坐标系是为参照系。例如我们选参照系是直角坐标系, 则每一个质点的位置就用它的坐标 x, y, z 来描述。

参照系可分为惯性参照系与非惯性参照系两种。惯性参照系是指牛顿第一、第二两个定律成立的参照系。任何一个对惯性参照

系作匀速直线平动的参照系也都是惯性参照系。凡是对惯性参照系作加速运动的参照系都非惯性参照系。所有的惯性参照系都是等效的。人们无法用力学实验来确定他所在的惯性参照系是否在做匀速直线平动。

【惯性参照系】见“参照系”。

【非惯性参照系】见“参照系”。

【碰撞】两个物体（或粒子）彼此相互接近而发生相互作用，从而改变了运动的状态，或改变了形状，或产生了新的粒子，这种过程叫碰撞。微观粒子的碰撞又称为散射。

【宏观物体的碰撞】碰撞在极短时间内完成，碰撞时两物体的相互作用力较之一般作用力大的很多，因此在碰撞过程中一般作用力可以不考虑，故两碰撞物体动量之和不变。可用经典力学来描述宏观物体的碰撞过程。在碰撞时不能将物体视为刚体，物体要经过变形与恢复两个阶段，由开始接触到变形最大，此时二物体有共同速度，这一阶段为变形阶段。由变形最大到两个物体分开为恢复阶段，恢复阶段碰撞力冲量和变形阶段碰撞力的冲量的比值称为恢复系数 e ，恢复系数仅与相互碰撞两物体的材料有关。当 $e=1$ 时，称为完全弹性碰撞，此两物体的总动能守恒。 $e<1$ 时为非弹性碰撞。 $e=0$ 时为塑性碰撞，此时只有变形阶段，而无恢复阶段，如两物体是正碰撞，则两个物将一起共同运动。在非弹性碰撞与塑性碰撞中两物体的动能和不再守恒。

【碰撞中心】 又称打击中心。在一般情况下某定轴转动刚体与物体相碰撞时，轴承 O 处将产生脉冲式的约束反力，此约束反力可能破坏轴承 O 。但如碰撞处 K 满足 $h=I/Md$ 时，此时轴承 O 处将不产生脉冲的约束反力， K 就叫做碰撞中心， O 为转轴， C 为质心， $OC=d$ ， $OK=h$ ， M 为物体的质量， I 为物体对轴 O 的转动惯量。

【打击中心】 见“碰撞中心”。

【微观粒子碰撞】 必须用量子力学来描述。由于测不准关系成立，微观粒子的速度与位置不可能同时精确确定，故此在一定初条件下的粒子碰撞的运动状态也不是确定的，只能用量子力学的方法确定碰撞后粒子处于某种运动状态的几率。另外微观粒子在碰撞过程可以湮没或产生新的粒子，这也是经典力学中所不能解释的。微观粒子的碰撞也分为弹性碰撞与非弹性碰撞两种。弹性碰撞又称为弹性散射，在碰撞过程中粒子间只有动能的交换，而不发生粒子的数目、粒子的种类和内部运动状态的改变。非弹性碰撞又称为非弹性散射，在碰撞过程中，或者发生粒子的数目及种类的变化，或者发生粒子内部运动状态的变化，此时能量的交换也不限于动能的交换，还有粒子的产生与湮灭的能量，粒子跃迁的能量等。

【质点】 在经典力学中，将具有一定质量但几何尺寸可忽略不计的物体抽象成为一个具有质量的几何点，即为质点。客观世界中并无质点。当一个物体的运动范围远大于此物体本身大小，在讨论问题时，如将此物体的几何尺寸忽略不计并不引起显著的误差，则可将此物体视为质点。一个物体在某一个力学问题中可以视为质点，但在另一个力学问题中却可能视为物体，而不是质点。如在讨论地

球绕日的运动时,可将地球视为一个质点,但在讨论地球的自转时,就必须将地球看成一个物体。若一个系统是由两个以上质点组成则称之为质点系。将物体当作质点处理的力学叫质点力学。应用牛顿第二定律有 $m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$ 。此处 m 为质点的质量, \vec{r} 为质点的径矢, t 为时间, \vec{F} 为作用在质点上的力,是已知的。这就是质点的动力学方程,它是三个二阶常微分方程,再加上初条件 $\vec{r}(0) = \vec{r}_0$, $\vec{v}(0) = \vec{v}_0$, 解质点的动力学方程可得 $\vec{r} = \vec{r}(t)$, 即得 $x = f_1(t)$, $y = f_2(t)$, $z = f_3(t)$, 这就是质点运动方程式。所以动力学的基本任务就是在已知作用力及初条件时将运动方程求出来。

【质点运动方程】 见“质点”。

【质点系】 如一力学系统由一个以上质点组成则为质点系。由于质点系是一个十分广泛的力学体系,故质点系动力学的理论是力学的基本理论。讨论质点系的运动时,常将运动分解成随同质心平动的部分,再加上相对质心运动的部分。刚体是质点系的特例,即是质点间的距离为常量的质点系。

【超静定问题】 又称静不定问题。有的弹性体处于平衡状态,但仅用静力学的方法不足以解决问题,还必须考虑到弹性体的变形,参看弹性体的平衡。

【静不定问题】 见“超静定问题”。

【质心】 又称质量中心。是表征质点系质量分布的几何点。

【质心运动定理】质点系的质量 M 与质心的加速度 $\frac{d^2\vec{r}_c}{dt^2}$ 之积等于作用质点系上外力的矢量和, 即 $M \frac{d^2\vec{r}_c}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{外}}$ 。质心运动定理是经典力学中主要定理之一。如我们在讨论刚体的运动时, 常将刚体的运动分解为随同质心的平移, 再加上绕质心的转动。则质心运动定理就是研究随同质心的平移的理论依据。质心 C 的运动只与外力有关, 而与内力无关。若作用在质点系上外力的矢量和为零, 即 $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{外}} = 0$, 且在初始时刻质心不动, 则质心将永远不动, 这就是质心守恒定理。质点系动量定理是由质心运动定理积分一次而得到的。

【质心守恒定理】 见“质心运动定理”。

【动量】物质运动的一种度量, 对质点而言, 设其质量为 m_0 , 速度为 \vec{v} , 则其动量 $\vec{P} = m_0 \vec{v} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, 在此处 c 为光速。在经典力学中, 由 $v \ll c$, 故上式可简化成为 $\vec{P} = m_0 \vec{v}$ 。对于质量为零的粒子 (如光子), 其动量 P 决定于粒子的德布洛意波长 λ , 即 $P = h/\lambda$ 。此处 h 为普朗克常数。在微观世界中此式对质量不为零的粒子也成立。电磁场是一种特殊的物质, 其动量密度 $\vec{g} = \vec{D} \times \vec{B}$, 此处 \vec{D} 为电位移矢量, \vec{B} 为磁感应矢量。故在空间 V 中总的电磁动量为 $\vec{G}_{\text{em}} = \int_V \vec{g} dV$ 。设在空间 V 中有电子在运动, 电子的质量为 m_e , 速度为 \vec{v} , 此电子在空间 V 中产生有电磁场, 则总的电磁动量 \vec{G}_{em} 即为电子的质量 m_e 与其速度 \vec{v} 之积, 即 $\vec{G}_{\text{em}} = m_e \vec{v}$ 。在经典力学中, 质点系的动量 \vec{P} 等于质点系内每个质点动量之和, 也等质点系的质量 M 与质

心速度 \vec{V}_c 之积, 即 $\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = m \vec{v}_c$ 。动量的量纲为 MLT^{-1} , 它的单位为千克·米/秒 ($kg \cdot m/s$)。

【冲量】 力 \vec{F} 在时间间隔 (t_1, t_2) 内累积效应的度量为力 \vec{F} 在此时间间隔的冲量 \vec{S} , $\vec{S} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt$ 。在碰撞问题中, 由于时间间隔十分小, 且在碰撞过程中力 \vec{F} 的变化又十分复杂, 在这种情况下, 用冲量 \vec{S} 来进行计算, 就避免了考虑在碰撞过程中力 \vec{F} 的变化规律。冲量的量纲为 MLT^{-1} , 其单位为千克·米/秒 ($kg \cdot m/s$)。

【动量定理】 对质点而言, 动量定理的微分形式就是牛顿第二定律: 质点动量对时间的变化率等于作用于此质点上的力: $\frac{d}{dt} (m\vec{v}) = \vec{F}$ 。动量定理的积分形式也叫冲量定理, 其内容为: 在时间间隔 (t_1, t_2) 首尾时刻质点动量之差等于作用在质点上的力在同一时间间隔内的冲量, 即 $m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt$ 。此处 m 为质点的质量, \vec{v}_1 与 \vec{v}_2 分别为在时刻 t_1 与 t_2 时质点的速度, \vec{F} 为作用在质点上的力。

对质点系而言, 动量定理的微分形式就是质心运动定理, 即质点系动量对时间的变化律等于作用在质点系上外力的矢量和。

即 $\frac{d}{dt} (m\vec{v}_c) = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{外}}$ 。动量定理的积分形式也叫冲量定理, 其内容为: 在时间间隔 (t_1, t_2) 首尾时刻动量的差等于作用在质点系上

外力冲量之和, 即 $m\vec{v}_{c2} - m\vec{v}_{c1} = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_i^{\text{外}} dt$, 此处 m 为质点系的质量, \vec{v}_c 为质心的速度, \vec{v}_{c1} 与 \vec{v}_{c2} 分为质心在时刻 t_1 与 t_2 时的速度, $\vec{F}_i^{\text{外}}$ 为作用在质点系上第 i 个外力。

【动量守恒定律】当无外力作用时，系统的动量不变。从逻辑上看，它是动量定理的一个推论，但从近代物理学看动量守恒是由空间不变性决定的，故此它是物理学中的一个基本定律。它不只是适用于宏观领域，也适用于微观领域，就是波长为 λ 的光，也可视为具有动量 h/λ 的粒子—光子，在光子与电子相碰撞时，也符合动量守恒定律，这已由康普顿用实验证实。场是物质的一种特殊形式，它也具有动量、能量。在四维时空中，人们已经将动量守恒与能量守恒统一为动量—能量守恒。

【能量】物质运动的一种度量方式，简称能。由于物质有各式各样的运动，相应地能量也有各式各样的能量，但通过一定的方式可以将一种能量转化为另一种能量，如摩擦生热就是将机械能通过摩擦变为热能。常见的能有机械能、热能、电磁能、化学能、原子能等。机械能（如动能、势能）存在于物体的机械运动中。热能表现为系统的内能，它是系统内分子无规运动的动能，分子间相互作用的势能，原子内电子所具有的能量和原子核的核能的总和。电磁场是一种特殊的物质，它的能量密度 $w = \frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B})$ ，此式 \vec{E} 、 \vec{D} 、 \vec{H} 、 \vec{B} 分别依次为电场强度、电位移、磁场强度、磁感应强度。化学能是原子的外层电子的变动引起电子的结合能变化而放出的能量。根据狭义相对论的质能关系 $E = mc^2$ （此处 E 粒子所具有的能量， m 为粒子的质量、 c 为光速）可知物质的能量 E 与质量 m 是不可分的。质能关系的正确性已由实验证实。如原子核的质量小于组成此原子核的诸核子的质量之和，这是因为由自由核子组成原子核时放出了大量能量，这就是原子核的结合能。所谓

原子能就是原子核发生裂变或聚变反应时放出的结合能。能量的单位为焦耳 (J)。但在理论物理中有时用尔格 (erg) 为单位, $1\text{erg} = 1 \times 10^{-7}\text{J}$ 。在讨论原子、原子核、基本粒子时又常用电子伏 (eV) 为单位, $1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

【动能】物体做机械运动中所具有的能量, 动能 $T = \frac{1}{2}m_0v^2$, 即经典力学中动能的表达式。在经典力学中, 质点系的动能为质点系内各个质点动能之和, 即 $T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2}m_i v_i^2\right)$ 。质点系的动能 T 可分解成两个部分, 一部分相当于将质点系全部质量都集中在质心 C 处, 并以质心 C 的速度 \vec{v}_c 运动的动能, 即为 $\frac{1}{2}mv_c^2$ 。另一部分为所有质点在相对于随同质心 C 作平动的参照系中的动能和, 即总动能 $T = \frac{1}{2}mv_c^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2}m_i v_i^2\right)$, 此处 m_i 为第 i 个质点的质量, \vec{v}_i 为其相对于质心 C 的速度, $m = \sum_{i=1}^n m_i$ 为质点系的质量。若质点系是一个刚体, 当刚体做平动时, 动能 $T = \frac{1}{2}mv^2$; 当刚体做转动时, 动能 $T = \frac{1}{2}I\omega^2$, 此处 I 为刚体对瞬时转动轴的转动惯量, ω 为刚体的角速度; 当刚体作一般运动时 $T = \frac{1}{2}mv_c^2 + \frac{1}{2}I_c\omega^2$, 此处 I_c 为刚体对过质心 C 的瞬时转动轴的转动惯量。动能是一个恒正的标量, 它的量纲为 ML^2T^{-2} , 它的单位为焦耳 (J), 有时也写成牛顿·米 ($\text{N}\cdot\text{m}$) 或千克·米²/秒² ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)。

【势能】当质点在空间任一点都能受到一个力的作用, 这个力是质

点位置的单值、有限、可微的函数，则此空间区域叫力场。在力场中，如作用在质点上的力的功只与质点首末位置有关，而与质点所走过的路径无关时，那么这个力场叫保守力场。在保守力场中可任选一点为势能的零位置，那么从某一点到势能零位置保守力所做的功就叫做该点的势能。保守力又叫做有势力。势能 V 是质点位置的函数，势能 $V = \text{常数}$ 的曲面叫等势面。保守力 \vec{F} 与势能 V 的关系为 $\vec{F} = -\nabla V$ ，即保守力垂直于等势面，且指向势能减少的一面。质点系的势能为质点系内各质点势能之和。

【重力势能】取水平面为 xoy 面， z 轴铅直向上，沿 z 轴的单位矢量为 \vec{k} ，质点系的质量为 m ，则重力 $\vec{F} = -mg\vec{k}$ ，此处 g 为重力加速度。以 xoy 面为势能的零位置，则势能 $V = mgz$ ，此处 z_c 为质心 C 所在处的铅垂坐标。重力场的等势面为 $z = \text{常数}$ 的平面。

【万有引力势能】设在径矢 $\vec{r} = 0$ 处有一个质量为 m 的质点，则质量为 m 的质点如其径矢为 \vec{r} ，则它所受的万有引力为 $\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$ ，此处 G 为万有引力常数。以 $r = \infty$ 点为势能零点，则万有引力势能 $V = -G \frac{Mm}{r}$ 。万有引力势能的等势面为以 $\vec{r} = 0$ 点为中心的球面。

【静电力势能】设在 $\vec{r} = 0$ 处有电量为 Q 的点电荷，则电量为 q 的点电荷如位于径矢为 \vec{r} 处，则此点电荷所受的力为 $\vec{F} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}$ ，此处 $\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。应注意 Q 与 q 均为代数值。以 $r =$

∞ 点为势能的零位置,则静电力势能 $V = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r}$, 而等势面为以 $r=0$ 点为中心的球面。

【弹性力势能】 设原长为 r_0 , 倔强系数为 k 的弹簧, 其一端固定于 $\vec{r}=0$ 点, 另一端为自由端, 并系有质点, 则弹性力 $\vec{F} = -k(r - r_0) \frac{\vec{r}}{r}$, 此处 \vec{r} 为质点的径矢。以 $r=r_0$ 处为势能的零位置, 则弹性力势能 $V = \frac{1}{2}k(r - r_0)^2$, 等势面为球面, 而球心在 $r=r_0$ 的球面上。

【有势力的功】 设在 A 点与 B 点有势力的势能为 V_A 与 V_B , 则当质点由 A 点运动到 B 点时, 有势力的功 $W = V_A - V_B$ 。势能的量纲为 ML^2T^{-2} , 它的单位是焦耳 (J), 或牛顿·米 ($N \cdot m$), 或千克·米²/秒² ($kg \cdot m^2/s^2$)。

【动能定理】 质点系在位置 A 处有动能 T_A , 移动到位置 B 处有动能 T_B , 则动能的增加 $\Delta T = T_B - T_A$ 就等于质点系在移动过程中内力与外力所作的功 W , 即 $T_B - T_A = W$, 此即动能定理。若作用于质点系上作功的力为保守力, 则由于功 $W = V_A - V_B$, 而有 $T_A + V_A = T_B + V_B$, 这就是说, 如果作用在质点系上作功的力都是保守力, 则质点系的动能与势能之和为常量, 这就是机械能守恒定理。因此机械能守恒定理是动能定理的特殊情形。当作用在质点系上的力有非保守力时, 机械能守恒定理不成立。

【机械能守恒定理】 见“动能定理”。

【功能原理】作用于力学体系上的力，在此力学体系运动时，力所作的功必然全部转化为能量，虽然转化出的能量形式不同，如转化成为力学体系动能的变化，或势能的变化，或转化为热能、电能等等，但是所转化出的各种能量的总和必须与力所作的功相等。

【保守系统】若作用在力学系统上作功的力均为保守力，则此力学系统为保守系统。对保守系统而言，机械能守恒定理成立。若作用在力学体系上作功的力有非保守力，则此力学系统为非保守系统。对非保守系统而言，机械能守恒定理不成立。在力学体系运动时伴有其他形式的能量（如热能）产生。

【非保守系统】见“保守系统”。

【功】分机械功与广义功两种。功是能量变化的一种度量（见功能原理），但由于热传导等也可以改变系统的状态，故功并不是能量变化的唯一的度量。

【机械功】功是描述力的空间积累效应的物理量，力 \vec{F} 与力 \vec{F} 的作用点的位移 $d\vec{r}$ 的点乘积是为元功 δW ，即 $\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{r}$ 。力 \vec{F} 由 A 点到 B 点所作的功 $W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$ ，一般说来 W_{AB} 与从 A 到 B 的路径有关。在刚体上如作用有力偶，其矩为 \vec{M} ，当刚体有微小角位移 $d\vec{\phi}$ ，则元功为 $\delta W = \vec{M} \cdot d\vec{\phi}$ 。一个力系的功则为力系中每元素的功的和。

【广义功】广义元功的表达式为 $\delta W = X dx$ ，其 x 为广义坐标， X 为

对应的广义力。广义元功的定义是将机械元功定义包含在内。除上述机械元功外，常见有：(1) 当系统的体积 V 改变 dV ，系统所受的压强为 P ，则系统对外界所作的元功为 $\delta W = PdV$ ，此时广义坐标为体积 V ，广义力为压强 P 。(2) 在处理有关液体问题时，取液体表面为所考虑的系统时，设表面张力为 σ ，当表面积增大 ds 时，系统对外界做功 $\delta W = -\sigma ds$ ，此处广义坐标为面积 s ，广义力为表面张力 σ 。(3) 在讨论电介质问题时，设外电场为 \vec{E} ，电介质总电矩增加为 $d\vec{p}$ 时，系统对外界做功为 $\delta W = -\vec{E} \cdot d\vec{p}$ ，此时广义坐标为电介质的总电矩 \vec{p} ，广义力为外电场强度 \vec{E} 。(4) 在讨论磁介质问题时，设外磁场为 \vec{B} ，磁介质总磁矩增加为 $d\vec{I}$ 时，系统对外界做功为 $\delta W = -\vec{B} \cdot d\vec{I}$ ，此时广义坐标为磁介质的总磁矩 \vec{I} ，广义力为外磁感应强度 \vec{B} 。总之，系统与外界有相互作用时，做功是表示这种相互作用的一种方式，通过做功，系统与外界产生能量的交换，从而改变了系统本身的状态。

【功率】单位时间内的所做的功，功率 P 定义为力 \vec{F} 与力 \vec{F} 作用点的速度 \vec{V} 的点乘积，即 $P = \vec{F} \cdot \vec{V}$ 。功的量纲为 ML^2T^{-2} ，它的单位为焦耳 (J)，或牛顿·米 (N·m)。功率的量纲为 ML^2T^{-3} ，它的单位焦耳/秒 (J/s)，或瓦特 (W)，或马力 (H. P.)， $1J/s = 1W$ ， $1H. P. = 735W$ 。

【简单机械】 杠杆、滑轮、斜面、螺旋和劈的总称。

【杠杆】 具有两个受力点及一个支点的刚体杆。按支点、力点、重点的位置不同，可将杠杆分为三类。第一类杠杆是支点 O 在中间的杠杆。如天平、秤等等都属于第一类杠杆。天平的特点为两个力

臂等长。秤的特点为阻力臂 OB 小于输入力臂 OA ，因此是一个增力机械，用较轻的秤砣去平衡较重的重物。此时机械利益 $MA = F_B/F_A > 1$ 。撬杠、克丝钳都属于增力的第一类杠杆。第二类杠杆为重点 B 在中间，这类杠杆为增力机械，形成各式各样的工具，如铡刀，核桃夹等。它的机械利益 $MA > 1$ 。第三类杠杆为力点在中间，这种杠杆的机械利益 $MA < 1$ ，因此它不是增力机械，常用于阻力不大，但要求阻力点 B 活动范围较大机械上，汽车的挡风玻璃刷就是一例。

【滑轮】 由有沟槽的轮及跨过轮的绳或皮带或链条组成。如轮轴固定则为定滑轮，如轮轴不固定则为动滑轮。定滑轮可改变力的方向，不能改变力的大小，它的机械利益为1。动滑轮，由 B 点的向上位移 S_B 为重物 A 向上位移 S_A 的两倍，即 $S_B = 2S_A$ ，设重物 A 重 P_A ， B 点向上的拉力为 P_B ，则由于 $P_B S_B = P_A S_A$ ，故 $P_A/P_B = S_B/S_A = 2$ ，故动滑轮的机械利益为2。多个滑轮可组成滑轮组，滑轮组的机械利益视滑轮的多少而异。为获得较大的机械利益，人们发明了差动滑轮，定滑轮是一个塔轮，小轮半径为 r ，大轮的半径为 R ，大小轮固连在一起，则当 B 点下降为 S_B 时， A 点上升为 $S_A = \frac{R-r}{2R} S_B$ ，故机械利益为 $\frac{2R}{R-r}$ ，因此当 $R-r$ 较小时，就可以得到较大的机械利益。滑轮组在升降机，起重机等中得到广泛的应用。

【斜面与螺旋】 在劳动中，人们发现如果要重物升高到一个较高的位置上，利用斜面虽然走的路程要长一些，但要容易的多，这时要克服的力为 $P [\sin\alpha + \mu\cos\alpha]$ ，其中 P 为物体的重量， α 为斜面与平面的夹角， μ 为动滑动摩擦系数。以上即为斜面原理，螺旋

就斜面绕在圆柱体上而构成,因此螺旋是斜面原理的一个应用。螺旋可将转动变成平动,也可将平动变成转动。由于螺旋广泛的用传动与锁紧问题,人们创造出各式各样的螺纹以适各式各样的需要,现已有方形的,锯齿形的,三角形的以及梯形的螺纹。如机床的传动轴上多用方形螺纹,各种构件如欲锁紧时常用螺母与螺栓,或螺钉,此时常用三角形螺纹。螺旋也还有其他用途,如螺旋送料机,螺旋推进器,直升机的旋翼等。

【劈】 又称尖劈。由质地坚硬的物体构成,其几何形状为由两个成锐角的平面,但角度越小机械利益越大。

【机械利益】 输出力与输入力的比值。其中施于机械上的驱动力为主动力或输入力。从机械中得到有用的力为输出力。在应用简单机械时有两个目的。一个目的是用小力来获得较大的力,如第二类杠杆,对这种机械而言机械利益大于1。另一个目的是为了增大某指定点的位移,如第三类杠杆,对这种机械而言机械利益小于1。

【机械效益】 输出功与输入功的比值。其中输入力所作功叫输入功。输出力所作的功叫输出功。在不计摩擦时,输出功与输入功的大小相等。在机械利益大于1时,输入较小的力,可以得到较大的输出力,但输入力作用的位移值也必然大于输出力作用点的位移值。这就是所谓“得之于力者,必失之于速度”的力学“黄金律”。如计入摩擦时,由于摩擦的损耗,使得输出功恒小于输入功。在不计摩擦等损耗时机械效率恒等于1,在计入摩擦等损耗时,机械效率恒小于1。

【约束】对质点系运动的限制。约束提供的力为约束力。约束力的大小与方向一般为未知的，它决定于约束的性质，主动力，质点系的运动等情况。约束的分类较为复杂。(1)按约束力作功与否分为理想约束与非理想约束两种。约束力不作功的约束为理想约束，如质点约束在光滑曲线或光滑曲面，如两个刚体用光滑铰链铰接，如圆球在粗糙平面上滚动而不滑动，如质点系内任意两个点之间的距离都不变等。约束力作功的约束叫非理想约束。(2)从几何性质分约束为单面约束与双面约束。若质点系有 n 个质点，每个质点有三个坐标，故质点系有 $3n$ 个坐标，记为 x_1, x_2, \dots, x_{3n} 。用质点系 $3n$ 个坐标以方程式形式来描述约束，这个方程式叫约束方程。若约束方程为等式则约束为双面约束，若约束方程为不等式则约束为单面约束。如单摆摆长为 l ，若连接质点的为软索，则约束方程为 $x^2 + y^2 + z^2 \leq l^2$ ，此时约束为单面的。若连接质点的细刚体杆，则约束方程为 $x^2 + y^2 + z^2 = l^2$ ，此时约束为双面的。(3)如约束方程中不含时间 t ，则为定常约束（稳定约束）。如约束方程中含时间 t ，则为不定常约束（不稳定约束）。(4)完整约束与不完整约束。

若约束方程为 $\sum_{i=1}^{3n} a_i dx_i + a_0 dt = 0$ 。这种约束为微分约束，若 $\frac{\partial a_i}{\partial x_j} = \frac{\partial a_j}{\partial x_i}$ ， $\frac{\partial a_0}{\partial x_j} = \frac{\partial a_j}{\partial t}$ ， $i, j=1, 2, \dots, 3n$ 则上述一次微分式可积分成有限形式 $f(x_1, \dots, x_{3n}, t) = 0$ ，这时的约束为完整约束。否则为非完整约束。

【约束方程】见“约束”。

【广义坐标】确定力学体系位置的独立变量，通常用 q 表示。如一

个自由刚体的广义坐标可取为其质心 c 的坐标 x_c, y_c, z_c 及绕质心转动的三个欧拉角 (θ, φ, ψ) 。设某力学体系有 N 个广义坐标 q_1, q_2, \dots, q_n ，今有 N 个单值可微函数 $q'_i = q'_i(q_1, q_2, \dots, q_N)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 若雅可必行列式 $\left| \frac{\partial q'_i}{\partial q_j} \right| \neq 0$ ，则 q'_i ($i=1, 2, \dots, N$) 也可取为此力学体系的广义坐标。如对质点而言，其广义坐标可以选为直角坐标 (x, y, z) ，也可为球极坐标 (r, θ, φ) ，也可为圆柱坐标 (r, θ, z) 。

【自由度】 设质点系有 n 个质点，有 r 个完整约束， s 个非完整约束，则此质点系的自由度数 $N=3n-r-s$ 。即若质点系只有完整约束，那么广义坐标的个数就是此质点系的自由度数。如果质点系不但有完整约束，而且有非完整约束，则自由度数为广义坐标个数减去非完整约束个数。

【虚位移】 在某一瞬时，质点系为约束所允许的，假想的，无限小的位移叫虚位移。为了说明实位移与虚位移的区别，举例如下：设在转动杆上套有一个小环，小环可视为质点，则虚位移为小环沿杆向内或向外的微小的滑动，由于虚位移是假想的，所以完成虚位移不需要时间，即考虑虚位移时应视杆为静止的。约束力 N 与虚位移垂直，故约束力不作功， $\vec{N} \cdot \delta \vec{r} = 0$ 。对于实位移 $d\vec{r}$ 而言，完成实位移 $d\vec{r}$ 需要一定的时间，由于杆是运动的，故此完成实位移后应考虑杆已运动到一个新的位置。在实位移 $d\vec{r}$ 上，约束力 N 要作功， $\vec{N} \cdot d\vec{r} \neq 0$ 。

【虚功原理】 又称虚位移原理。对具有理想的、双面的、定常约束

的质点系而言，其平衡的必要与充分条件为作用于质点系的主动动力沿作用点的虚位移所做的虚功和为零。
$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\neq} \cdot \delta \vec{r}_i = 0$$
。此式又称为虚功方程。虚功方程可扩充到动力学中。设质点系由 n 个质点组成，作用在第 i 个质点上的主动力为 \vec{F}_i^{\neq} ，约束力 N_i ，此质点的质量为 m_i ，并有加速度 \vec{a}_i 则作用第 i 个质点上的主动力 \vec{F}_i^{\neq} 、约束力 \vec{N}_i 与惯性力 $m_i \vec{a}_i$ 达到平衡。设在此质点系上的约束为理想的，双面的，定常的，约束力的虚功和为零
$$\sum_{i=1}^n \vec{N}_i \cdot \delta \vec{r}_i = 0$$
。从而有
$$\sum_{i=1}^n (\vec{F}_i^{\neq} - m_i \vec{a}_i) \cdot \delta \vec{r}_i = 0$$
 此式称为达郎倍尔—拉格郎日方程或动力学普遍方程。

【动力学普遍方程】见“虚功原理”。

【达郎倍尔—拉格郎日方程】见“虚功原理”。

【广义力】普通意义下力的概念的延伸，是一个标量，通常用 Q 表示。设某体系的广义坐标为 q_i ($i=1, 2, \dots, N$)，当计算体系对外

界（或外界对体系）作微分功 dw 时有
$$dw = \sum_{i=1}^N Q_i dq_i$$
，则 dq_i 的系数 Q_i 称为对广义坐标 q_i 的广义力。广义力没有确定的量纲与单位，它的量纲与单位视广义坐标的量纲与单位而定，广义力与广义坐标之积的量纲与单位应与功的量纲与单位相同。当力学体系有势能 V 时，则广义力为
$$Q_i = -\frac{\partial V}{\partial q_i} \quad (i=1, \dots, N)$$
。

【广义动量】普通意义下动量概念的延伸。是标量。设力学体系的广

义坐标为 q_i ($i=1, 2, \dots, N$), 动能为 T , 则广义动量 P_i 定义为动能 T 对广义速度 \dot{q}_i 的偏导数, 即 $P_i = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。由于势能 V 为广义坐标的函数, 拉格朗日函数 $L = T - V$, 故此有时也将广义动量 p_i 写成 $P_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。广义动量的量纲与单位视广义速度的量纲与单位而定, 但要求这二者之积的量纲与单位和动能的量纲与单位相同。如定轴转动刚体的动能 $T = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$, 此处 I 为刚体对转轴的转动惯量, $\dot{\theta}$ 为角速度, 则广义动量 $P_\theta = \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = I\dot{\theta}$ 即刚体对转轴的动量矩。

【拉格朗日方程】 设力学体系有 N 个广义坐标 q_i ($i=1, 2, \dots, N$), 动能为 T , 广义力为 Q_i ($i=1, 2, \dots, N$), 则系统的运动方程为 $\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i$ ($i=1, 2, \dots, N$)。当作用在力学体系的力为有势力, 势能为 V , 则可引 $L = T - V$ 为拉格朗日函数, 则系统的运动方程为 $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$ ($i=1, 2, \dots, N$)。这两种运动方程都叫做拉格朗日方程。

【哈密顿原理】 哈密顿原理是: 保守的、完整的力学系统, 在相同时间内, 由某一位形转移到另一位形的一切可能运动中, 真实运动的作用量 $\int_{t_1}^{t_2} L dt$ 具有极值, 即真实运动作用量的变分为零 ($\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0$)。其中 L 称为拉格朗日函数, 它等于系统动能和势能之差, δ 表示变分。哈密顿原理被看作是力学 (乃至整个物理学) 中

的最高原理，拉格朗日方程和哈密顿方程都可由它导出。

【正则方程】又称哈密顿正则方程。首先由 $H \equiv (-L + \sum_{i=1}^N \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i)_{q \rightarrow p}$ 确定哈密顿函数 H 。以广义坐标与广义动量及时间 t 为变元，可导出 $\frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}$, $\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。这就是哈密顿正则方程，它适用具有完整约束的保守力学体系，在天体力学、经典统计力学等学科中起重要作用。

【相空间】又称相宇，经典统计力学中为描述微观状态的统计现象而引入的。设系统有 N 种粒子，其中第 j 种粒子有 N_j 个，每个粒子有 S_j 个自由度，则这个体系的自由度为 $f = \sum_{j=1}^N N_j S_j$ 。对此体系我们可选 f 个广义坐标 q_i ($i=1, 2, \dots, f$)，相应地有 f 个广义动量 P_i ($i=1, 2, \dots, N$)。以 f 个广义坐标， f 个广义动量构成一个 $2f$ 维空间，这个空间就叫相空间，或 T 空间，或相宇。这里的“相”是运动状态之意。相空间中每一个点代表系统的一种可能的运动状态。系统状态的变化就可以用一个点在相空间中运动来表示，这个点的轨迹就由哈密顿正则方程所决定。当系统从不同的初始状态开始运动，在相空间的代表点就沿不同的轨迹运动。

【最小作用量原理】拉格朗日最小作用量原理为：“设力学体系的自由度为 N ，广义坐标为 q_1, q_2, \dots, q_N ，从而构成一个 N 维的 q 空间，设力学体系为机械能守恒系统，则体系沿真实运动的路径拉格朗日作用量取驻值。”拉格朗日作用量 W 与哈密顿作用

量 $S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$ 间的关系为： $W = S + h(t_2 - t_1)$ 。此处 L 为拉格朗日函数， h 为能量积分常函数。若力学体系就是一个质点，则拉格朗日作用量 W 可写成 $W = \int_{t_1}^{t_2} 2T dt = \int_{t_1}^{t_2} mv^2 dt = \int_{s_1}^{s_2} mv ds$ 。由于质点的质量为 m ，故拉格朗日最小作用量原理可以写成为 $\delta \int_{s_1}^{s_2} v ds = 0$ 上式又叫莫培督最小作用量原理。莫培督最小作用量原理与费马原理启发了德布罗意提出物质波理论。

【摆】 分数学摆（单摆）与物理摆（复摆）两种。（1）数学摆： o 为悬挂点， om 为质量可以忽略不计且不可伸的柔索， m 为可视质点的小物体。运动微分方程为 $\frac{d^2\theta}{dt^2} + \sqrt{\frac{g}{l}} \sin\theta = 0$ ，此处 g 为重力加速度， $l = om$ 为摆长。设 θ 的最大值为 α ，利用期 $T = 2\pi \sqrt{l/g} [1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{2\alpha}{2} + \dots]$ 。（2）物理摆，刚体在重力作用下无摩擦地绕水平轴转动， o 为转轴， c 为重心， $oc = d$ ，刚体绕 o 轴转动惯量为 I ，则运动微分方程为 $I \frac{d^2\theta}{dt^2} + mgd \sin\theta = 0$ ，周期 $T = 2\pi \sqrt{I/mgd} (1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{2\alpha}{2} + \dots)$ ，此处 α 仍为 θ 的最大值。这与 $l = I/md$ 的数学摆有相同的周期，故 I/md 叫物理摆的简化长度。在 oc 的联线上取 $oo' = I/md$ ， o' 叫物理摆的摆动中心。将 o' 作为悬挂点时，摆的周期不变，利用这一性质可测当地的重力加速度，具有这样的用途的物理摆叫可逆摆。摆动中心也就是打击中心，即外冲量如垂直于 oc 线打到 o' 点时，则悬挂点 o 处无碰撞反力。

【单摆】见“摆”。

【复摆】见“摆”。

【陀螺】作定点转动的高速转动刚体。形状多为旋转对称的，由于刚体的形状的不同，转速的不同，支持方式的不同以及用途的不同各式各样的陀螺。不论什么样的陀螺，都有如下的几个特性。

(1) 定轴性。在作用于陀螺上外力系对支撑点的主矩为零时，且在初始时刻陀螺就绕过支点的对称轴高速自转，那么转轴的方向就始终不变，此即为陀螺的定轴性。

(2) 进动性。当外力系对支点的 O 的主矩 \vec{M}_O 不为零时则产生进动。设 \vec{L}_O 为陀螺对支点 O 的角动量，设陀螺的自转轴就是惯性主轴，陀螺对自转轴的转动惯量为 I ，自转角速度为 $\vec{\omega}$ ，对于高速自转陀螺而言 $\vec{L}_O \approx I\vec{\omega}$ ，由角动量定理 $\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \vec{M}_O$ ，可知 \vec{L}_O 的矢端点的速度等于外力主矩，形成进动角速度 $\vec{\Omega}$ ，而 $\vec{M}_O = \vec{\Omega} \times I\vec{\omega}$ ，若自转角速度 $\vec{\omega}$ 与进动角速度 $\vec{\Omega}$ 的大小都不变，且章动角速度为零，则这种运动叫正规进动。

(3) 稳定性。具有三个自由度的平衡的陀螺，当其可绕其过支点的某个惯性主轴高速自转时，转轴不只能保持固定方向，而且能抗微小的冲击作用，在小的冲击作用下，将产生微小的高频的章动，且转速越高，章动越小，稳定性越强。

【回旋仪】万向支架上的陀螺为惯性导航系统中的主要仪表。利用陀螺的特性，为在飞行器或潜艇内部确定航行方向之用。又称陀螺仪。

【连续介质】将物质视为连续地充满其所在的空间，描述此物质的物理参数与状态参数也都是时间与空间的连续函数，因此可用有关连续函数的数学工具来处理力学问题。

【应变】又称形变。在弹性上加载后所发生的形状变化。可分为两种，即长度变化与角度变化。全面描述在某点附近的应变要用应变张量。

【弹性力】一种理想化的保守力。在外力作用下，弹性物体产生变形后所产生的恢复力即为弹性力。当外力消失后，变形及弹性力也随之消失，无热能产生。弹性力在宏观世界是广泛存在的。

【应力】物体受外力作用后产生一定的变形，因此物体内相邻的两质点间的距离发生变化，物体内任一平面上两直线的交角也发生变化，从而产生物体内部质点与质点的相互作用力。

【胡克定律】由英国物理学家胡克于1660所发现，故名。胡克定律是弹性理论的基础。定义作用于弹性棒每一横截面两方的相互作用力 F 与横截面面积 S 之比为张胁强（应力）；定义棒的伸长或缩短 l 与棒长 L 之比；即相对伸长或缩短为张胁变（应变）。这样，胡克定律叙述为：如果张胁强不超过某一限度（叫的该种材料的比例限度），弹性棒的张胁强正比于张胁变，即 $F/S=Yl/L$ 。比例常数 Y 仅仅取决于棒材料的性质，而跟棒的具体尺寸无关，称为该种材料的杨氏模量。

【杨氏模量】见“胡克定律”。

【弹性应变能】又称弹性形变能，即弹性势能。可分为两种情况，即弹性力的势能及弹性体内应变能密度。

1弹性力势能 设弹簧长为 l ，一端固于坐标原点 o ，一端系有质点 m ，弹簧的质量可略去不计，质点 m 的径矢为 \vec{r} ，则作用于质点上的弹性力 $\vec{F} = -k \left(r - l \right) \frac{\vec{r}}{r}$ ， k 为倔强系数。以 $r=l$ 点为势能的零位置，则弹性力势能 $V = \frac{1}{2}k \left(r - l \right)^2$ 。

2弹性体应变能 以弹性体无应变状态为应变能零位置，则弹性体应变能密度 u 为 $u = \frac{1}{2} \left(e_{xx}\sigma_{xx} + e_{yy}\sigma_{yy} + e_{zz}\sigma_{zz} + e_{xy}\sigma_{xy} + e_{yz}\sigma_{yz} + e_{zx}\sigma_{zx} \right)$ 此处 e_{xx} 、 e_{yy} 、 e_{zz} 为正应变、 e_{xy} 、 e_{yz} 、 e_{zx} 为剪应变。 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 为正应力， σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} 为剪应力。就整个弹性力所占的空间区域将应变能密度对空间积分，可求得弹性体的应变能。弹性体应变能密度与弹性波波速之积即为弹性体应变能流密度。

【张力】对于绳索、链条类柔软而细长的物体，当其被拉伸时，在垂直于其长度方向的截面上的内力。从微观角度看，当物体受外力作用下，分子间产生相对位移，从而产生分子间吸引力，这吸引力在宏观上就反映为张力。另外一种张力是表面张力。在液体表面上任一假想的线段，在这线段左右有彼此相互作用力，这种力垂直于线段，而切于液体表面，且有使液体表面具有收缩的趋势，这种力名之为表面张力。设线段长为 l ，表面张力为 f ，则 $f = \alpha l$ 。此处 α 为表面张力系数，其量纲 MT^{-2} ，单位为牛顿/米 (N/m)。表面张力系数 α 与液体的物理性质有关；与液体外相邻的介质有关；与温度有关，随温度上升而减少。表面张力是液体表层分子相互作用的结果。

【表面张力】见“张力”。

【弹性体的平衡】在考虑弹性体的平衡时，一个力系用另一个在静力学上与此力系相当的力系来代替已不再成立，因此诸如力可沿其作用线移，力向作用线外一点搬移，力系简化等在刚体静力学行之有效的理论，在讨论弹性体的平衡时均不成立。在讨论弹性体平衡时的约束反力时，如问题是静定的，仍可用刚体的平衡条件去处理；如问题静不定的（超静定的），则还需要根据实际情况加上附加条件以求得约束反力。

【塑性】外力作用于物体后，其应力强度至少有一部分超过弹性极限，外力取消后仍残留有形变性质。研究具有塑性变形的力学问题有如下特点：（1）非线性性。应力与应变不存在一一对应的关系。物体的变形与其历史有关。（2）硬化现象。当物体受载后出现应力超过弹性极限后，再进行卸载，而后再进行加载后，物体的弹性极限有所提高，这一现象叫硬化现象。这与在弹性力学中，一个物体有一个固定的弹性极限不同。（3）加载与卸载规律不同。在弹性力学中，加载与卸载时应力与应变服从同一规律。但在塑性力学中，加载与卸载时应力与应变属于不同的规律。（4）屈服准则。这是在弹性力学所没有的。判定材料是处于弹性范围内还是超过了弹性范围的准则叫屈服准则。在弹性范围内的部分与不在弹性范围的部分之间有一个分界面，名为弹塑性分界面，通常这一分界面是持久的。正是由于有上述复杂现象，现在还没一个完整的、能全面概括塑性力学的理论。在各种理论中，比较广泛的理论有两个：（1）形变理论 当物体内的应力与外力成比例的增加时就叫简单加载。形变理论就适用于简单加载情况。理论简单、使用方便

为其优点；但不能反映塑性变形的本质为其缺点。在应力与应变之间的关系上还有伊柳辛理论、纳戴理论和亨奇理论三种。(2) 流动理论（增量理论）按照物性关系来讨论应力与应变的增量关系，它适用复杂加载情况，能反映塑性变形本质，从理论上看应用范围广，但实用上不方便。在物性关系上主要有莱维—米泽斯理论与普郎特—罗伊斯理论两种。

【硬化现象】见“塑性”。

【屈服准则】见“塑性”。

【结构塑性极限】结构中任一元件达到其塑性极限时即为此结构的塑性极限。

【蠕变】又称徐变或徐滑。固体在恒定温度下，在载荷不变下，其变形随时间增长而加大的现象叫蠕变。在常温下，一般可以不计蠕变现象，但在工程中有不少固体部件定在高温下运转，如化工机械，发动机的转子等，它们在摄氏几百度下工作，就必须考虑蠕变现象。如钢铁在 300°C 以上时，其弹性模量、屈服极限、强度极限等均明显地随着温度上升而减少。在一定温度、一定载荷下，由于发生蠕变，材料承受载荷的时间是有限的。构件由于蠕变而破损的时间叫破损时间。一般说来，在高应力下，构件破损时变形大，其机理为由于晶体滑移而产生韧性破损；在低应力下，构件破损时变形小，其机理为由于晶界裂纹等产生脆性破损。

【振动】在平衡位置附近的往复运动。广泛存在于自然界之中，在

连续介质中振动的传播即为波，大体上可分为有限自由度的机械振动，无限自由度的机械振动（如弹性体的振动）及电磁振动三大类，每一类又可分为线性振动及非线性振动两大类。外力作用在物体上，外力的功转化为物体的应变能。外力去掉后，物体要恢复其未受力时的状态，应变能转化为物体的动能，当物体达到其未受力时的状态，应变能变为零，动能达到极大值，由于惯性作用，物体将发生反方向的形变，物体的动能随之减少，到物体动能为零时，物体的应变能达到极大，如此反复形成振动，最后终因阻力作用而停止运动。

【一个自由度系统的线性振动】可分为简谐振动、阻尼振动与受迫振动三种。简谐振动 $x = A \cos(\omega t + \delta)$ ，此处 x 为物体偏离平衡位置的距离， A 为振幅， ω 为圆频率， δ 为初相角， $\omega t + \delta$ 为相角。简谐振动满足 $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ ，是最简单的振动。凡周期运动都可用富里叶分析的方法将其分解成简谐振动的和，应注意两个简谐振动的和不一定是周期运动，如 $A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1)$ 与 $A_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2)$ 之和仅在 $\omega_1/\omega_2 =$ 有理数时才是周期运动。阻尼振动，当物体受线性恢复力与和速度成反比的阻力时，其运动微分方程为 $\frac{d^2x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0$ ， n 为阻尼因子， $n > \omega$ 叫大阻尼情况，将不产生振动。 $n = \omega$ 叫临界阻尼情况。 $n < \omega$ 叫小阻尼情况将产生阻尼振动。此时振幅以 e^{-nt} 型式衰减。强迫振动。当物体还受有周期扰力 $h \sin(pt + \theta)$ 时将产生振动， h 为力幅， p 为扰力圆频率，此时运动微分方程为 $\frac{d^2x}{dt^2} + 2nx + \omega^2 x = h \sin(pt + \theta)$ 。在 n 不太大时，在 p 接近 ω 时，振幅急剧加大，变为共振。

【简谐振动】见“一个自由度系统的线性振动”。

【阻尼振动】见“一个自由度系统的线性振动”。

【受迫共振】见“一个自由度系统的线性振动”。

【共振】见“一个自由度系统的线性振动”。

【多个自由度系统的线性振动】设系统有 n 个自由度，广义坐标为 q_i ($i=1, 2, \dots, n$)，在线性近似下，运动微分方程可化为如下

型式：
$$\frac{d^2q_i}{dt^2} + \sum_{i=1}^n n_i \frac{dq_i}{dt} + \sum_{i=1}^n k_i q_i = F_i(t), \quad (i=1, 2, \dots, n),$$
在线性近似下，上式中的 n_i, k_i 都是常数。在无阻力，无扰力的情况

下，则有
$$\frac{d^2q_i}{dt^2} + \sum_{i=1}^n k_i q_i = 0, \quad (i=1, 2, \dots, n),$$
此为多自由度系统的自由振动方程。在 $q_i \neq 0$ 时，可求出 n 个固有频率来。对于每一个固有频率，系统有一个特定的振幅分布型式与此固有频率相对应，并称之为简正振动方式。而多自由度系统的振动即为诸简正振动的组合。

【简正振动】见“多个自由度系统的线性振动”。

【拍】两个频率相差无几的振动相加后，形成一个高频振动，但其振幅却以很低的频率作周期性变化。设这两个振动为 $A \sin(\omega t + \delta_1)$ 与 $A \sin[(\omega + \Delta\omega)t + \delta_2]$ ，其中 $|\Delta\omega| \ll \omega$ ，两个振动之和为 $2A \cos(\Delta\omega t + \delta_2 - \delta_1) \sin[(2\omega + \Delta\omega)t + \delta_1 + \delta_2]$ 有如“振

幅”为 $2A\cos(\Delta\omega t + \delta_2 - \delta_1)$ ，振动的圆频率为 $2\omega + \Delta\omega$ 。即“振幅”作低频变化，而 $\frac{\Delta\omega}{2\pi}$ 称为拍频。

【非线性振动】大多数振动系统可以进行简化为线性振动系统，这时我们需要知道在简化过程中丢掉的部分带来的影响有多大。少数系统不能简化为线性系统，这时我们只能按原来固有的非线性特性来处理问题。由于这时运动微分方程为非线性的，故名为非线性振动。一个自由度系统的非线性振动运动微分方程的型式如下：

$\frac{d^2x}{dt^2} = f(x, \frac{dx}{dt}, t)$ ，非线性振动系统的特性有：(1) 振动频率与

振幅有关 简谐振动中振幅与频率无关，在非线性保守振动系统

$\frac{d^2x}{dt^2} = f(x)$ 中振幅与频率有关。当振幅加大时，频率也随之提高时，

称之为系统具有硬特性。当振幅加大时，频率随之降低，称之为系统具有软特性。(2) 叠加原理不适用 由于描述非线性系统的微分方程是非线性的，故叠加原理不再适用。每个激发振动的力所产生的影响之和不再等于激发振动力之和所产生的影响。(3) 分频与倍频现象 若激发振动力圆频率为 ω ，在一定条件下，可能出现圆频率为 ω/n (n 为正整数) 的受迫运动，这就是分频现象。一般来说，也会出现圆频率为 $m\omega$ (m 为正整数) 的受迫振动，这就是倍频现象。(4) 跳跃与滞后现象。(5) 自激振动现象 这种现象广泛地存在于各个领域内，如天文学、电子管振荡器、电磁断续器等电子学系上，各种乐器、钟表以及动物的心脏等等。从自激励角度看可分为软激励与硬激励两种。软激励情况是：系统的平衡状态是不稳定的。只要有微小的扰动，系统就处于稳定的振动状态。硬激励情况是：系统的平衡状态是稳定的，但在足够大扰动下，

系统就可以处于稳定的自激振动状态。(6) 频率俘获现象 设自激系统的固有圆频率为 ω_0 , 外激励力的圆频率为 ω , 则系统在外激励力作用下, 振动中有圆频率为 ω_0 的成分, 也有圆频率为 ω 的成分。但当 ω 与 ω_0 接近到一定范围内时, 就只存在圆频率为 ω 的成分。(7) 振动的稳定性。线性振动都是稳定的, 因此不需要讨论稳定性问题。非线性振动则不然, 有的解是稳定的, 有的解是不稳定的。目前还没一个能适用于各种情况的非线性振动的解法。仅只在极少数特殊情况下可以求出精确解。在弱非线性情况下, 有一些近似解法。对于一个自由度的非线性问题可以用图解法等。总之, 对于非线性振动问题, 人们才走出了第一步。

【自激振动】 见“非线性振动”。

【隔振】 振动隔离的简称。在振源与待隔振系统中间加隔振器, 以便减少振源对待隔振系统的影响。隔振器就是具有阻尼的弹性元件。有用橡胶制成的橡胶隔振器, 所用的橡胶种类有天然橡胶、硅橡胶、丁基橡胶、丁腈橡胶、氯丁橡胶等。金属隔振器有圈状弹簧式的, 板状弹簧式的, 金属网式的等。还有空气垫隔振器。通常用传递比 T_A 来描述隔振器的性能。常见的需要隔振的情况有两种: 一种振源是一台大型机械, 隔振的目的是防止由振动将基础损坏。此时传递比 T_A 定义传递力的幅值与激励力的幅值的比。另一种是振源为基础, 隔振的目的是减小机座上机器的振幅, 此时传递比 T_A 定义为传递运动的振幅对激励运动振幅之比。为了达到较好隔振目的, 选择隔振器的频率 f_0 , 设 f 为激励力频率, 使 $f/f_0 > 2.5$, 这是起码要求。若 $f/f_0 > 6$ 则效果更好。

【减振】减小系统振动的各种措施。主要措施有：（1）提高机器部件的精度：对于转动或作往复运动的部件，由于提高了部件的精度，改善了惯性平衡状态，从而减小了振动。（2）提高构件的强度：从而减小了变形，提高了固有频率，避开共振，或减少了不同振动方式中的耦合，从而达到减振的目的。（3）增加阻尼作用：使振动的机械能变为热能，以此来达到减振的目的。对于金属板主要受拉压作用时，将阻尼材料贴在金属板上，称之为自由阻尼层处理。对于受剪切变形的金属板，则将阻尼材料作为夹层材料贴在金属板上，称之为约束层阻尼处理。

【随机振动】不能根据初条件确定的振动。不能确定的原因在引起振动的原因是随机的，如导弹与航天飞行器的喷气噪音，所遇到的不稳定气流引起的脉动压力等，都可以引起弹体的随机振动，有可能导致弹体的破坏，或弹体没坏，但通过弹体将振动传入到飞行器内部的零、部件上，从而导致内部设备的损坏，造成事故。随机振动主要研究如下三个方面：（1）研究随机振动激励源的物理机制及其统计特性。（2）研究在随机振动激励源作用下对系统及其设备的影响。（3）研究如何降低随机振动激励源的作用，如何提高系统与其设备的抗震能力。通常随机振动常呈高斯分布。近年来广泛使用数字计算机和快速傅里叶分析的方法取得了不少成果。

【浮力】流体中漂浮或浸没的物体所受流体静压力的合力，其大小和方向由阿基米德原理决定。

【阿基米德原理】古希腊学者阿基米德发现的关于浮力的原理，其

内容为：（全部或部分）浸在流体中的物体受到向上的浮力，其大小等于物体所排开流体的重量。如果水有明显的流动或者浸没物体的底部不与水接触，则阿基米德原理不成立。

【帕斯卡原理】在密闭容器中的流体任一部分的压力可向任何方向传播，且保持压强不变，这就是帕斯卡原理。帕斯卡原理还指出在流体内任一点的压强 P 与同过此点的面积之方向无关。帕斯卡原理仅适用于流体静止情况，对于流动的流体不适用。

【压力】垂直作用于物体表面的力。

【压强】垂直作用在物体单位面积上的压力。压强的量纲为 $MT^{-2}L^{-1}$ ，其国际标准单位为1帕(Pa)=1牛顿/米²(N/m²)，其他非法定计量单位有巴(bar)、毫米汞柱(mmHg)、毫米水柱(mmH₂O)、标准大气压(atm)、工程大气压(at)、千克力每平方厘米(kgf/cm²)、千克力每平方毫米(kgf/mm²)、托(Torr)等，其换算关系如下：1巴=10⁵帕，1毫米汞柱=133.322帕，1毫米水柱=9.80665帕，1标准大气压=101325帕，1工程大气压=98066.5帕，1公斤力每平方厘米=1工程大气压，1公斤力每平方毫米=10⁴工程大气压，1托=1133.322帕，1标准大气压=760毫米汞柱。

【标准大气压】见“压强”。

【工程大气压】见“压强”。

【阻力】物体在流体中运动时流体对物体的总作用力。阻力与物体

的运动速度方向相反，分空气阻力与水阻力两种。(1) 空气阻力

当飞行器在空气中飞行时，空气作用飞行器的力有两种，即压差阻力与摩擦阻力。压差阻力指飞行器前半部向后的压力大于后半部向前的压力，这两部分的压力差即为压差阻力。摩擦阻力来源于物体表面上的粘性力，摩擦阻力常常是十分可观的，但又是难于计算，常靠风洞实验去测定。粘性不只影响摩擦阻力，而且也影响压差阻力，这是因为流体有粘性，在一定情况下在物体后出现涡旋，从而明显地影响压力的分布，也就影响了压力阻力。通常引阻力系数 C_D 来描述阻力。阻力系数 C_D 定义为 $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$ ，此处

D 为阻力， A 为迎风面的截面积， ρ 为物体前方很远处空气的密度， v 为飞行器的飞行速度。阻力系数 C_D 还是飞行器迎角 α 、飞行马赫数 $M_{a\infty}$ 、雷诺数 R_e 的函数。高速飞机减少阻力的措施有：流线型的机身，光滑的表面，后掠的（或三角型的）机翼等等。(2) 水阻力 船在水面航行，其上半在空气中，有空气阻力；其下半在水中，除了压差阻力，摩擦阻力外，还多了波浪阻力（简称波阻）。船在水面航行时，水面形成波浪，水波带走能量，水波的能量来自船体对水所做的功。合理地改变船体形状可以明显地减小水波，从而减少了波阻。

【压差阻力】见“阻力”。

【摩擦阻力】见“阻力”。

【稳定流动】描述流动的参数（流体质点的速度、密度、压强、温度等）不随时间变化而变化的流动。稳定流动是一种理想情况下的

流动。实际上,流动参数只要在一个有限时间间隔内基本上不随时间变化,那么就可以将这一段时间间隔内的流动视为稳定流动。

【升力】当飞机飞行时相对气流作用于机翼的,在飞机对称面内垂直于气流方向的力。升力的大小决定于机翼的大小、机翼的形状和飞行的速度等因素。飞行速率小时,升力也小。

【流强】单位时间内从单位面积流过的流体数量,若 ρ 为流体的密度, \vec{V} 为流体质点的速度, \vec{n} 为面积元 ds 的单位法线矢量,则流经面积元 ds 的流强为 $\rho\vec{v}\cdot\vec{n}$, 而流量 Q 为 $Q = \iint \rho\vec{v}\cdot\vec{n}ds$

【层流】流体质点的轨迹是规则的光滑曲线时的流动。在流速较低、粘性较大的流体中多出现层流流动。若流体是不规则的运动,描述流体运动的物理量如速度、密度、温度、压强等值均有不规则的变化,只能从统计意义上求得它们的平均值,这种流动叫湍流。在流速较高,粘性较小的流体中易出现湍流。对于具体的流动,由层流湍流的变化可用临界雷诺数来表示。雷诺数低于其临界值时,流动为层流,高于其临界值时,流动为湍流。以直圆管中流体流动为例,设管的直径为 d ,流体的平均流速为 v ,流体的运动粘度为 γ ,则雷诺数 Re 定义为 $Re = vd/\gamma$,而临界雷诺数 Re_{cr} 从实验中测得约为 2300—2800,当 $Re < Re_{cr}$ 时,管中的流动为层流,当 $Re > Re_{cr}$ 时,管中的流动为湍流。

【湍流】见“层流”。

【位势流】对于无粘性的流体而言,如某个时刻在流体内部沿任意

封闭的“流体线”的环量为零，则此后流体质点的速度（ u ， v ， w ）可表示成为 $u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ ， $v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ ， $w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ ，上式中的 φ 叫做速度势，有速度势 φ 的流动叫位势流。速度势 φ 的引入能简化某些流体力学问题的计算，如对于流体密度 ρ 为常数的流体而言，速度势满足拉普拉斯方程，即 $\nabla^2 \varphi = 0$ ，这是一个线性微分方程，处理起来比原来要处理非线性方程组简单多了。

【重力波】在两种流体分界面上产生的一种以重力为恢复力的表面波。这种波可沿两种流体的分界面传播，而沿表面法线方向迅速衰减。

【边界层】当流体的粘性不大（如空气、水），且流体相对于固体有相对运动时，在固体表面的流体层中流速、温度、压力、变体变形率都十分大，因而粘性起了显著作用，这一层即为边界层。边界层的厚度视问题的不同而不同，如飞机表面的边界层的厚度以毫米计，但大气中地表的边界层厚度可达几公里，水中巨轮的边界层厚度可达1米或更多一些。边界层中的流体如作层流运动，则此边界层为层流边界层，如流体作湍流运动，则此边界层为湍流边界层。一般说来湍流边界层的厚度比层流边界层的厚度大。在飞机机翼及船体附近，一般是前面的边界层为层流边界层，后面的边界层为湍流边界层。研究边界层的基本方程还是纳维叶—司托克斯方程，但此方程太复杂，1904年普朗特利用边界层很薄的特点将纳维叶—司托克斯方程进行简化，得到边界层方程。研究边界层的目的在于如何计算与减小摩擦阻力。在机翼的后沿附近，可能出现边界层脱离现象，一旦出现边界层分离，机翼的升力骤减，为

了防止边界层脱离,在后掠的机翼上常装有翼刀。总之湍流边界层与边界层分离等问题迄今都是难于用理论来确定。

【涡流】形象地说具有旋涡的流动。当 $\nabla \times \vec{V} \neq 0$ 时,就有涡流存在,此处 \vec{V} 为流体质点的速度。

【粘性】流体抵抗形变或阻止相邻流体层产生相对运动的特性。各种流体都有粘性。从力学角度看,流体有切应力。从能量角度看,流体发生较快地变形,从而将动能转化成势能。从运动学角度看,一方面流体粘附于流体,另一方面每一个小流体元都有变形。例如,对飞行器而言,由于空气有粘性使飞行器在飞行时遭受到阻力,称为粘性阻力。在设计飞行器时就要设法减少粘性阻力(即摩擦阻力)。

【雷诺数】1883年雷诺在研究流体流动时引入一个无量纲量 $Re = \frac{\rho v l}{\eta}$, 此处 ρ 为流体的密度, v 为流体的特征速度, l 为特征长度, η 为流体的粘性系数。雷诺数 Re 表征着惯性力量级与粘性力量级的比值。对于 $Re < 1$ 的流动叫低雷诺数流动,这时粘性作用显著,如空气中雾滴的运动,胶体中悬浮的小颗粒的沉淀等。不同的问题中雷诺数的差异也十分显著,其变化范围可以从小于1到 10^{10} 级。如风吹电线时雷诺数可以从几百到几万。飞机飞行时雷诺数可从几百万到上亿。雷诺数越高,流体的粘性作用就越小,惯性力的作用就越大。对于具体的流体流动问题常存在一个临界雷诺数,当流速 v 较低时,流动的雷诺数低于此临界值,流动为层流;当流速 v 变大时,流动的雷诺数大于临界雷诺数时,流动就变成湍流。

【马赫数】流体质点的速率 V 与该点声速 a 之比, 用 Ma 表示, 马赫数反映了流体的可压缩效应。由于物体表面各处的流速不同, 音速也不同, $Ma = \frac{V}{a}$ 又称局部马赫数。而将飞行器的飞行速率 v 与飞行器前方很远处的音速 a_0 之比叫飞行马赫数, 记为 $Ma_\infty = v/a_0$, 通常也简称为马赫数。在 $Ma_\infty < 1$ 时, 为亚音速情况。在 $Ma_\infty < 0.2$ 时, 可以将空气近似地视为不可压缩流体。在 $Ma_\infty > 0.2$ 时就必须考虑空气的密度、温度及压力的变化。在 Ma_∞ 接近于 1 时, 称为跨音速情况, 这时飞行器附近的局部马赫数有的地方大于 1, 有的地方小于 1, 无论是做实验, 还是进行理论计算都十分复杂。 $Ma_\infty > 1$ 为超音速情况, 其中 $Ma_\infty > 5$ 时为高超音速情况。细长的具有尖端的飞行器以速率 v 飞行时, 其影响所及之处为: 若 $Ma_\infty < 1$, 则为飞行器前后整个空间; 若 $Ma_\infty > 1$, 则为以飞行器前端为顶点的圆锥, 圆锥的半张角为 $\theta = \arcsin \frac{1}{Ma_\infty}$, 此圆锥名为马赫锥。

【伯努利方程】设流体无粘性, 且密度均匀, 且作定常流动, 则沿流线有 $\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh = \text{常量}$, 这是伯努利于 1738 年提出的, 故名为伯努利方程, 此处 P 为压强, ρ 为流体密度, v 为流速, g 为重力加速度, h 为高度。这是流体质点沿流线运动时能量守恒的一种表达方式。当有能量损失时, 如有粘性存在时, $\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh$ 之值将沿流线渐渐减少。从理论上说, 伯努利方程中的常数量是因流线而异的, 但如在流场中某处截面上诸点的常量相同, 则在整个流场中此常量处处相同。

【激波】 又名冲击波，是一种在介质中以高于声速传播的压缩波。激波的波阵面十分薄，没有振动频率与波长，仅只表现为波阵面前后物理量是间断的。设激波后的压强为 P_2 ，激波前的压强为 P_1 ，则 $P_2/P_1 > 1$ 用来描述激波的强度， P_2/P_1 越大，激波越强。对气体而言 $P_2/P_1 \approx 1$ 时为声波。当 $P_2/P_1 > 1.05$ 时即为激波。空气中的激波可产生于超音速飞机的飞行，导弹、火炮弹丸的飞行时，此时的 P_2/P_1 值由几到20几。瓦斯爆炸时形成的激波 P_2/P_1 值可达十几、二十几。炸药爆炸，核爆炸情况， P_2/P_1 值可达几万到几十万。在水中进行爆炸 $P_2/P_1 > 500$ 时才能算激波，这是因为水的可压缩性较小之故。对于金属，由于金属的可压缩性更小，故 P_2/P_1 要求更高。在上百万大气压的压力下，金属内的应力可略去不计，从而可将金属视为流体，在更高的压力下常伴有高温产生，以致于金属原子内电子与原子核间作用也可忽略不计，从而将金属视为可压缩气体。对于可视为理想气体的气体而言，我们 D 表示激波的运动速度， u 、 p 、 ρ 、 T 分别代表流体质点的速度，流体的压强、流体的密度及流体的温度，对于波前的物理量下标为1，对于波后的物理量下标为2，根据质量、动量、能量三个守恒定律，可导出 $\frac{P_2}{P_1}$

$$= \frac{2\gamma Ma_s^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{D - u_1}{D - u_2} = \frac{(\gamma + 1) Ma_s^2}{(\gamma - 1) Ma_s^2 + 2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 \rho_1}{P_1 \rho_2} =$$

$$\frac{[2\gamma Ma_s^2 - (\gamma - 1)] [(\gamma - 1) Ma_s^2 + 2]}{(\gamma + 1)^2 Ma_s^2}, \text{ 此处 } \gamma \text{ 为比热容比,}$$

$Ma_s = \frac{D-u_1}{a_1}$ 叫激波的马赫数, a_1 为激波前的声速。对于 $Ma_s = 10$, $\gamma = 1.4$, $T_1 = 300^\circ\text{K}$, 可求出 $T_2 > 6000^\circ\text{K}$, 此时空气已严重解离, 上述三式不再正确。

热·物质的非固态

【热量】煤燃烧时放出热, 水加热时吸收热, 物体吸收或放出热的多少叫热量。热力学系统同外界或系统各部分间存在温度差发生传热时所传递的能量。1克纯水温度升高(或降低) 1°C 时吸收(或放出)的热量规定为1卡。热量是由于热接触引起的热力学系统能量的变化量, 同传热的过程有关, 它仅在系统状态发生变化时才有意义。热量与机械功间存在联系, 故热量和功相当, $1\text{卡} = 4.1858\text{焦耳} = 4.1858 \times 10^7\text{尔格}$ 。二者都是传递着的能量。区别在于做功同系统各部分的宏观运动相联系; 传热是系统同外界温度不一致而传递的热量, 是和物质的微观运动相联系的。对于一个微小变化过程, 热量的数值可由: $dQ = CdT$ 来表示, C 为某一过程的热容, dT 为系统温度的变化。对一个有限过程, $Q = \int CDT$ 要在给定过程的条件下进行。现法定热量单位为焦耳, 卡与尔格均为非许用单位。

【温度】物体内分子的热运动平均能量的度量, 它属于物体内的分子热运动平衡状态下分子动能的平均统计值。这个统计值体现在

宏观物体上是冷热的差别。物体愈热，组成它的分子平均动能愈大。由于分子热运动的相互碰撞，使同一物体中的分子动能逐渐趋向平均值而出现平衡态。热平衡的态函数就是温度，而且在同一系统中热平衡的各个物体具有相同的温度值。

【温度计】对物体的温度进行定量测量的测温仪表。根据测量温度的范围把温度计分为高温计和低温计。测量温度时，要选择一种在一定温度范围内随温度规律变化的物理量作为温度的标志，由该物理量显示被测物体的温度。根据温度测量所依据的物理定律和所选择的物理量作为温度标志的温度计有十多种。采用几何量作为温度标志的有玻璃液体温度计、双金属温度计、定压气体温度计。采用压强作为温度标志的有压力表式温度计、定容气体温度计、蒸气压温度计。采用某些电学量作为温度标志的有热电偶温度计、电阻温度计、半导体热敏电阻温度计。用顺磁物质的磁化率测量温度的磁温度计。用声速测量温度的声学温度计。用某些物体固有频率随温度变化来测温的频率温度计。采用光谱辐射度或辐射出射度作为温度标志的有光学高温计、光电高温计、全辐射温度计和比色高温计。

【高温计】测量的温度高于500℃时所使用的温度计。常用的高温计有光学高温计、比色高温计和辐射高温计等。

光学高温计是一种利用物体光谱辐射度测量温度的高温计。物体的温度 T 与亮度温度 T_c 的关系为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon(\lambda \cdot T)}$$

λ 为所测量的单色辐射波长，所用滤光片确定后， λ 和 C_2 就唯一确

定, $\epsilon(\lambda \cdot T)$ 查表可得, 用光学高温计测出物体的亮度温度 T_c 后, 由上式可得到待测温度。光学高温计测温范围是 $700—3000^{\circ}\text{C}$ 。

比色高温计的测量范围为 $800—2000^{\circ}\text{C}$, 测量精度高, 可接近量程上限的 1% 。它适合在有烟雾、灰尘或水蒸气等环境下使用, 在冶金和其他工业中应用较多。

【低温计】 一种测量低温物体温度的仪表。有很多种, 每种都是用一种特定的物理特性组成。目前所用的低温计主要有气体低温计、蒸汽压低温计、温差电偶低温计、磁低温计和电阻低温计。

【气体温度计】 以理想气体的体积和压强的乘积与绝对温度成正比的特性为依据而制成的低温温度计。主要有两种, 一种是固定气体压强而通过体积变化来测定温度的定压气体温度计; 另一种是用固定气体体积而测量压强变化的定容气体温度计。由于后者结构简单、测量精度高, 更被广泛应用。

【电阻温度计】 以电阻随温度变化而变化的原理, 通过测电阻值而测定温度的仪表。主要有金属电阻温度计(电阻值随温度上升而上升) 和半导体温度计(电阻值随温度上升而下降)。电阻温度计简单可靠, 特别在极低温情况下, 半导体温度计仍可提供非常高的精确测量值, 而被采用。

【蒸气压温度计】 用与液体呈热平衡状态的饱和蒸气压显示温度, 优点是在可使用的工作区间内灵敏度很高, 尤其是在沸点附近。缺点是可使用温度范围较窄。

【温差电阻温度计】利用两种相连接金属之间存在温差时将出现电位差的现象而制成的温度计。如果把两种金属连接成回路,将有电流流过接点。如果一端温度是已知的,通过测量电流值就可以知道另一端的温度。例如铜—康铜、铁—康铜、镍铬—康铜、镍络—金铁、金铂—铜等材料之间都具有这种特性,都用来制成温差电阻温度计,而且接点小,制作简便。

【磁温度计】利用某些顺磁材料的磁化率在低温下与绝对温度成正比的居里定律为依据来测量温度的低温计,特别适合1K以下的极低温度的测量。居里—外斯定律为 $\chi = C / (T - \theta)$, C 为居里常数, θ 为居里温度, T 为绝对温度, χ 为磁化率。

【热胀冷缩】一般物体都是在温度升高时膨胀,在温度降低时收缩。在相同条件下,固体膨胀得最小,液体膨胀得较大,气体膨胀得最大;物体的材料不同,变化也不同。热膨胀:保持压力不变,由于温度的改变造成固体,液体和气体发生长度或体积变化的现象。膨胀的程度用膨胀系数表示。固体热膨胀:固体的线膨胀系数

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_P$$

式中 l 是固体的长度、T 是温度、P 是压强。每一种固体都有一个特征德拜温度 Θ , 低于此特征温度时, α 随温度变化大; 高于此特征温度时, α 实际上是常数。处于室温的许多普通材料、其温度都接近或高于各自的特征温度, 其长度随温度的变化规律可用 $l = l_0 (1 + \alpha t)$ 近似表示。液体和气体的热膨胀: 液体和气体没有固定的体积, 只有用体积随温度变化才有意义, 常用体膨胀系数表示它们的膨胀程度。

$$\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

气体的 γ 可通过理想气体状态方程来计算，它与气体的温度和压强有关。液体的 γ 与压强近似无关，主要取决于温度。在相当大的温度范围内 γ 取作常数，但是温度从 0°C 升到 4°C 时，水的体积缩小了；在 4°C 以上它又随温度上升而膨胀。

【熔解·凝固】 物态通常为固态、液态和气态三种状态，温度低到一定值，一些特定的物体呈现固态，随温度升高变成液态，再升高又变成汽态。从固态变成液态的物理过程叫熔解，反之为凝固。晶体在熔解时的温度保持不变，即开始熔解时的温度一直保持到它全部变成液体。在这个过程中，外加的热量仅用于使固体变成液体。这点的温度叫熔点。熔解过程所吸收的热量叫熔解热。非晶体则没有固定的熔解温度，它可以一边加热一边熔解，物体的温度也随之升高。一般物体在固态时体积减小，而水在固态时体积却比液态时增加。熔点和压强有关。压强增加熔点变高，有机物熔点一般较低，无机物熔点一般较高。

【汽化·液化】 物质状态转变过程。物质从液态变成气态的现象称汽化，它有两种形式：蒸发和沸腾。蒸发：发生在液体表面的汽化现象。蒸发可以在任何温度下进行。提高液体的温度，增加液体的表面积和加快液体表面上的空气流动可以加快液体的蒸发。液体蒸发时吸热，所以蒸发有致冷作用。沸腾：在液体内部和表面同时发生的剧烈的汽化现象。液体在一定压强和温度下才能沸腾，此温度叫沸点。在相同压强下，不同液体的沸点不同。同种液体的沸点跟压强有关，与压强成正比。液体汽化时要吸热，单位质量的某种液

体变成同温度的气体时吸收的热量称为汽化热。物质从气态变成液态时的现象称液化。用增大压强和降低温度的方法实现将气体液化。气体液化时要放热，单位质量的某种物质，从气体变成同种温度的液体时放出的热量，等于它在这温度下的汽化热。

【升华·凝华】物态转变过程。物质从固态直接变成气态的现象称升华，升华时要吸热。物质从气态直接变成固态的现象称凝华，凝华时要放热。在升华过程中，外界要对固态物质中的分子做功，使其克服与周围分子间的结合力和固态物质的环境压强。单位质量物质升华时所吸收的热量叫升华热，在三相点升华热等于溶解热和汽化热之和。

【量热术】测量热量的方法。测量已知比容热的某物质的温度变化和通过已知潜热的某物质的状态变化求出的热量，属于间接测量法。测量热量的仪器称为量热器，有水量热器、冰量热器、蒸汽量热器和爆炸量热器等。用量热术可以测量物质的比热、熔解热、汽化热和化学反应中放出的热量。

【气体】以气态形式存在的物质总称。为了研究气体性质的方便将气体分为理想气体和真实气体。气体的状态与它的压强、体积和温度等物理量有关。压强由单位时间内气体分子或原子与器壁碰撞时传给器壁的平均动量决定。体积取决于容器的尺寸。热力学温度正比于单个原子的平均动能。状态方程描述了气体的压强、体积和温度间相互关系，理想气体状态方程只能描述压力较低的除碰撞外其它相互作用都不计的理想气体。真实气体有内部结构，分子间相互作用势不可忽略，不碰撞时也有相互作用，虽然相互作用非

常弱，分子基本上可以自由地在容器中运动，但它不适宜理想气体状态方程。气体的概念也可借鉴到其他领域中去，如把金属中的自由电子的集合叫电子气。

【阿伏伽德罗定律】 见“分子”中的“阿伏伽德罗定律”。

【理想气体】一种假设的理想化的气体。实际气体的简化。分析分子碰撞时它舍去了能量耦合，只考虑弹性碰撞，简化了某些问题的理论计算。系统的内能与气体体积无关，只与气体的温度有关，严格地等于各分子动能之和。实际气体的密度足够低时，它的性质接近理想气体，可当作理想气体来处理。宏观上理想气体遵守状态方程： $PV = \gamma RT$ ，式中 P 、 V 、 γ 、 R 、 T 分别是气体的压强、体积、摩尔数、气体常数和温度。微观上理想气体的分子体积与分子间平均距离相比可以忽略不计，除了弹性碰撞外，分子间和分子与容器壁间没有相互作用。

【玻意耳定律】 见“分子”中的“玻意耳定律”。

【盖—吕萨克定律】 见“分子”中的“盖—吕萨克定律”。

【理想气体状态方程】 描述理想气体状态变化规律的方程。对于一定质量的气体，可用压强 P 、体积 V 和温度 T 来描述它的平衡态

$$PV = \gamma RT,$$

γ 为摩尔数。 $\gamma = \frac{M}{\mu}$ 、 M 表示气体质量、 μ 是气体分子的分子量。 $R = \frac{P_0 V_0}{T_0}$ ， P_0 、 V_0 、 T_0 为标准状况下的压强、体积和温度， R 的数值

叫摩尔气体常数。

在压强为几个大气压时，各种实际气体一般都近似地符合理想气体状态方程。压强越低，符合的成度越高，压强趋于零的极限情况，一切气体都严格地遵从它。

【道尔顿分压定律】 见“分子”中的“道尔顿〔分压〕定律”。

【分子数按高度分布的定律】 分子数按高度分布的变化规律。单位体积的分子数 n_h 随着高度增加而指数地减少。 $n_h = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right)$ ， n_0 是 $h=0$ 时单位体积中的分子数。在一定的温度条件下，气体的压强和单位体积中的分子数 n 成正比，随着高度增加，压强 P 的变化规律和分子数按高度增加的递减规律相同。

$$P_h =$$

$$P_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right)$$

$$= P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right), \mu \text{ 是气体的分子量、} R \text{ 是气体恒量。温度在}$$

不同高度处差别很少时，可以近似用来确定大气中不同高度处的压强 P_h ，事实上高度差别很大时是不适用的。

【实际气体状态方程】 实际气体状态变化所遵守的方程。实际气体有着与理想气体不同的性质，体积变化时内能也发生变化，有相变等。在低压强下，理想气体状态方程较好地反映了实际气体的性质，随着压强增加，两者的偏离越来越大。实际气体的分子间具有分子力，在没有碰撞的时刻，分子间也有相互作用，因此其状态变化关系偏离理想气体状态方程。考虑了气体分子的自身体积影

响,分子运动的体积为 $v-b$ 。气体分子间是有吸引力的,作用力范围的半径大于分子的半径,气体的压强比容器对气体所施加的外加压强增大,增加的压强部分与体积的二次方成反比,实际气体状态变化遵守的方程为

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) (v-b) = RT,$$

a 、 b 是由实验确定的常数。此方程也叫范德瓦尔斯方程,它较好地给出了高压强下实际气体状态变化的关系,推广后可以近似地应用到液体状态去。另一个描述实际气体的状态方程为 $P = A + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots$, A 、 B 、 C ……都是温度的函数,并与气体的性质有关,这些系数分别叫第一、第二、第三,……维里系数。此方程是实际气体状态方程最完全的形式,第一项相当理想气体的情况,即分子间不存在相互作用;第二项考虑了分子成对相互作用;后面各项分别考虑了3个、4个分子相互作用的结果。

【气体分子碰撞】 气体分子相互作用的一种基本过程。大量分子频繁的碰撞改变了气体分子的速度和运动方向。在气体分子运动学中,不考虑分子的内部结构和平动以外的各种运动形式,一切碰撞都是弹性碰撞,碰撞前后的动量和能量的总和保持不变。由于三个以上分子碰撞的机会很少,只考虑二体碰撞,单位时间内的一个分子的平均碰撞数 \bar{Z} 为 $\bar{Z} = 4\sqrt{2}\pi r^2 \bar{v} n_0$, 分子的线度 $r \approx 10^{-8}$ 厘米,在标准条件下单位体积中的分子数 $n_0 \approx 3 \times 10^{19}$, 分子平均速度 $\bar{v} \approx 5 \times 10^4$ 厘米/秒,得到气体分子在单位时间内所经历的碰撞数约为 $Z \approx 3 \times 10^9 \text{秒}^{-1}$ 。

【气体分子平均自由程】气体分子相继两次碰撞间所走路程的平均值。气体分子动力学认为分子只在碰撞的一刹那发生相互作用,在其它时间分子作直线运动。相继两次碰撞所走的路程称为分子的自由程。气体分子的数目很大,碰撞频繁,因此自由程只有统计意义。分子在单位时间内通过的平均路程除以单位时间内的碰撞数 n_0 (见气体分子碰撞), 即得分子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 。
$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \delta^2 n_0}$$
$$= 2r$$
, 分子的直径。在真空技术和气体放电等领域中, 平均自由程是常用的重要物理量。平均自由程与温度成正比, 与压力成反比。

【气体扩散】在非平衡状态下, 气体各部分之间质量的传递和交换过程中的现象。一个独立系统经过足够长的时间, 最后总要达到平衡态, 在趋向平衡态的过程中, 由于质量的传递, 气体各部分间的密度差异将消失。通过面积 ΔS 扩散过去的气体质量 ΔM 为
$$\Delta M = -D \left(\frac{\Delta \rho}{\Delta x} \right) \Delta S \Delta t$$
, D 为扩散系数, ρ 为气体密度, x 为垂直于 ΔS 的 x 轴, 负号表示质量向密度较小的方向扩散。由于气体各部分的密度不同, 使气体分子从密度较大的区域自发地传递到较小的区域, 由密度差异引起的扩散主要分为两种, 一是同种气体因本身密度的不同而引起的自扩散, 二是发生在不同种气体间的互扩散。

【气体热传导】在非平衡状态下, 气体各部分之间能量的传递和交换过程中的现象。由于各部分气体温度不同, 或器壁间, 器壁与气体间温度不同, 使热量通过气体分子热运动从高温区转向低温区而产生传热现象。气体传热还可以由对流、辐射等产生。热传导仅指气体分子热运动中的传热, 这时能量由高温区传向低温区, 即热量从高温区传向低温区。设有一对温度不同的平行板, 单位时间

通过二板间面积 ΔA 的传热量 ΔQ 为 $\Delta Q = -k \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \Delta A$, $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$ 为垂直平行板方向的温度梯度, $k = \frac{1}{3} \rho v \bar{\lambda} C_v$ 为导热系数, 其中 C_v 为定容比热。

【焦耳—汤姆孙效应】 气体绝热通过小孔或多孔塞时压力减小, 气体温度变化的现象。这个过程又称节流过程, 节流过程中气体对外做功, 节流过程是不可逆的。节流过程中温度升高称为焦耳—汤姆孙负效应; 温度降低称为正效应。在低温技术领域中的应用节流生产低温液体, 例如液氮、液氧和液氢。

【液体的性质】 有一定体积、但没有形状的物体叫液体。液体具有很大的分子间作用力, 分子之间距离略微缩短, 就会引起它们之间很大的斥力, 因此压缩性很小。液体是各向同性的。在液体中可以观察到短程有序, 即它的相邻分子是相对规整排列的。液体分子在平衡位置附近作热振动, 用液体分子热运动的概念可以解释液体的流动性。液体的许多性质和固体的性质有很多相似之处。

【润湿】 液体与固体表面接触时, 沿固体表面扩张和收缩的现象。在固、液、气三相交界点作液体和固体表面切线, 两切线在液体中所成的角 θ 称接触角, 接触角大小反应润湿成度。 θ 为锐角时, 液体在固体表面上扩张, 固体被湿润。 θ 为钝角时, 液体表面不扩展即液体不湿润固体。当 $\theta = 180^\circ$ 时, 液体完全不湿润固体。当 $\theta = 0$ 时, 完全湿润。

当液体完全湿润固体时, 液体将布满全部固体表面而形成单分子膜。某些油类可以在水面上展布成油的单分子膜, 即完全湿润

在不同种类的液体也能出现。湿润和不湿润现象在工农业生产和日常生活中起着重要作用。

【毛细现象】将内径很小的毛细管插入液体中，管内外液面出现高度差的现象。用内径为 r 的毛细管插入密度为 ρ 的液体中时，管内液面上升（或下降）的高度 h 为 $h = \frac{2\alpha\cos\theta}{\rho gr}$ ， g 为重力加速度。管径过大时 h 很小，管内外的液面高度差难以看出。毛细管的材料为液体湿润材料时，管内壁液面升高呈凹状；若是不湿润材料时，管内液面下降呈凸状。毛细现象在科学技术和日常生活中都起着重要作用。人们在工程技术中常常利用毛细现象使润滑油通过孔隙进入机器内部去润滑机器。

【氦的超流现象】在超低温下氦的无粘滞性流动现象。在常压下如将温度降到 $T = 2.2\text{K}$ ， He^4 产生 λ 转变，这是一种第二类相变即液氦 I 转变为液氦 II。如果提高压力， λ 转变的温度就降低。液氦 II 通过毛细管时几乎完全没有粘滞性，粘滞系数小于 10^{-11} 泊。

【热力学系统】由大量微观粒子组成，并与周围环境以任意方式相互作用着的宏观客体。简称系统。与外界没有任何相互作用的系统为孤立系统；与外界有能量交换但没有物质交换的系统称为封闭系统；与外界既有能量交换又有物质交换的系统称为开放系统。一般把系统的周围环境称为系统的外界或简称外界。根据系统中物质的化学性质可将系统分为两类：由一种化学成分即一种分子的物质构成的热力学系统称为单元系，由两种以上化学成分构成的系统称为多元系。根据系统各部分的物理化学性质差异，将各向均

匀的系统称为均匀系或单相系，将系统各部分的性质有差异的称为非均匀系，如可将系统分为几个均匀的部分则称为复相系。

【热力学系统状态参量】描述系统的宏观性质的可以测量的宏观物理量，简称状态参量。状态参量分为四类：（1）几何参量。用以反映系统线度、形状和体积等几何性质。（2）力学参量。用来描述系统的压强、应力和表面张力等力学性质。（3）化学参量。用来描述系统中各种化学成分的数量等化学性质。（4）电磁参量。用来描述系统在电磁场中的性质。直接描述系统热性质的参量是温度。两个系统的所有状态参量中有一个不一致，就认为是两种不同的状态。如果系统的参量不随时间改变，则称为稳定态。如果稳定态不以任何外部过程的进行而变化，就称平衡态。处于平衡态的系统，它的温度是上述四类参量的函数，它们之间的函数关系就是物态方程。在热力学中系统的状态参量有内部参量和外部参量之分。内部参量描述系统本身的宏观物理性质，外部参量描述系统周围环境状况即系统所处的外界条件。例如气体的密度、温度和压力等是内参量，系统所在的电磁场中的电场和磁场强度等是外参量。

【温标】温度数值的定义。为了确定温度的数值，必须建立一种温标，它必须包含：定义固定点及其指定的温度值，所用仪器和公式。早期使用过的摄氏温标规定标准大气压的水沸点（ 100°C ）和冰点（ 0°C ）为固定点。用水银温度计时，规定了温度与毛细管中水银柱的高度成正比。不同人可以采用不同的温标，它们的数值彼此不相等，这些温标称为经验温标，例如早期的华氏温标，气体温标，亮度温标等，这些温标统称经验温标。经验温标的共同特点是选择不同的温度计测量同一物体，就会得到不同的温度数值，这

是经验温标的缺点。热力学温标的建立保证了温度测量的统一,它不依赖于某种特定的测温物质,是国际上公认的最基本的温度。热力学温标规定水的三相点的热力学温度为 273.16K ,热力学温标除用开表示外,也可用摄氏温度表示 $t=T-273.16$, T 为热力学温标,单位为开。

【热量单位】在国际单位制中,规定热量的单位为焦耳,而把卡列为暂时与国际单位制并用的单位。在国际单位制中功、能量和热量的计量单位是焦耳。 $1\text{焦耳}=1\text{牛顿}\cdot\text{米}=1\text{千克}\cdot\text{米}^2\cdot\text{秒}^{-2}=1\text{瓦}\cdot\text{秒}$ 。

过去计算热量的单位用卡(cal)表示,等于在标准大气压下使1克纯水温度升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 所需要的热量。由于水的比热容随温度不同而有微小区别,所以不同的温度下有不同的卡,一般都采用 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 卡,这是因为它和室温比较接近,使用方便。 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 卡定义为使1克纯水(无空气的)在 101.325kPa 恒定压力下,温度从 $14.5\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $15.5\text{ }^\circ\text{C}$ 所需的热量,其对应的能量值为 4.1855J 、 4.1816J 和 4.1897J 。

【热力学第一定律】能量守恒和转换定律在一切涉及热现象的宏观过程中的具体描述,热力学的基本定律之一。热力学第一定律涉及到内能同其它能量形式间的相互转换,给出了系统在状态变化过程中,从外界吸收的热量,系统本身的内能变化和对外界做的功三者之间的数量关系。在任意过程中,系统所吸收的热量 Q 在数值上等于该过程中系统内能的增加 Δu 和对外界做功的总和, $Q=\Delta u+A$,它揭示了热量是被传递的能量,是与功有关的同过程相联系的量。有许多幻想制造一种不消耗能量,但可以做功的机器,称

为第一类永动机。第一定律的另一种描述“第一类永动机是不可能制成的”。若不从外界吸收热量，却对外作了功，这是违反了能量守恒和转换定律的。

【内能】只与系统热力学状态有关的能量。它是系统的一个态函数，系统的内能包括分子无规则运动的能量，分子间的相互作用能，分子的内禀能量（原子内的能量以及原子核内的能量）等。分子的内禀能量在系统经历的任何热力学过程中不改变，因此在热力学中内能指分子无规则运动的能量和分子间相互作用能量。内能是系统状态的单值函数，内能变化 Δu 与过程形式无关，系统经过一个循环回到始态，在这个循环完成时内能变化 $\Delta u = 0$ 。对于理想气体来说，内能只与绝对温度 T 有关，并与气体的质量 M 成正比。对于真实气体，其内能是温度和压强（或温度和体积，或压强和体积）的函数。

【焓】热力学系统的状态函数，等于系统的内能加压强与体积的乘积 $H = u + PV$ ，在可逆等压过程中焓的增量表示热力学系统在此过程中吸收的热量。它是便于研究等压过程而引入的一个态函数。理想气体的焓只与其绝对温度有关， N 种理想气体混合物的焓等于各气体焓的总和 $H = \sum_{i=1}^N H_i$ ，等焓过程就是系统的焓不改变的热力学过程。焓在热工和化工上应用很普遍，化学反应都是在等压条件下进行，可用焓差计算系统吸收的热量。又因为焓是态函数，在热工和化工计算中，可以从特制的图表中查出物质在初终态的焓差值，即可知该过程所吸收的热量。

【热力学第二定律】一切涉及热现象的实际宏观过程进行方向的热力学定律。它总结出宏观过程的不可逆性。热力学第二定律有多种描述方式，最常用的描述有以下两种。克劳修斯描述：不可能把热从低温物体传到高温物体而不产生其他影响，即不可能有这样的热机，它完成一个循环后唯一的效果是从一个物体吸热并放给高温物体。开尔文描述：不可能从单一热源取热并将它完全变为有用的功而不产生其他影响。也可描述为第二类永动机是造不成的。第一种描述是说热传递过程是不可逆的，第二种描述是说功转变热的过程是不可逆的，两种描述阐明了不可逆过程的内在联系，由于这种内在联系使第二定律的应用远超出了热功转化范围。功转变为热的过程是组成宏观物体的分子由定向运动转变为更无规则的运动，由概率小的状态向概率大的状态转变。由热转变功则表示分子由不规则运动转变为有规则运动，是由概率大的状态向概率小的状态的转变，这种转变的概率太小以致观测不到，因而说它实际上是不可能实现的。任何一个宏观过程必须同时遵守热力学第一、第二定律才能实现。根据第一、第二定律得到热力学基本方程 $du \leq Tds - tA$ ，等号适用可逆过程，不等号适用不可逆过程。用这个方程可以原则上解决全部平衡热力学问题。如已知某系统的一些性质，根据基本方程就能预言系统的另一些物理性质。第二定律是在时间和空间有限的宏观系统中由大量实验结果总结出来的，因此它不能推广到由少数原子或分子组成的系统，也不能应用于时空都无限的宇宙。

【卡诺循环】两个等温过程和两个绝热过程组成的循环。设想一种热机的工作物质只与低温热源和高温热源（两个热源）交换热量，没有其他的能量转换，这种热机称为卡诺机，其循环称为卡诺循

环。循环是可逆的称为可逆卡诺循环,若不可逆的称为不可逆卡诺循环,一般讲的卡诺循环指可逆卡诺循环。在卡诺循环完成时,从温度为 T_1 的高温热源吸热 Q_1 , 输给温度为 T_2 的低温热源的热为 Q_2 , 全过程做的功 $W=Q_1-Q_2$, 循环的效率为 $\eta=\frac{W}{Q_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1}$, 若工作物质为理想气体, 卡诺热机的效率为 $\eta=1-\frac{T_2}{T_1}$, 在相同的高温热源和低温热源之间工作的一切可逆热机的效率都是 $\eta=1-\frac{T_2}{T_1}$, 同工作物质无关; 在相同的高温热源和低温热源间工作的不可逆热机的效率都不可能大于可逆热机效率, 此结论称为卡诺定理。卡诺定理给出了热机效率的极限, 指出了提高热机效率的方向。

【熵】 热力学系统的态函数。在可逆过程中熵等于系统从热源吸收的热量与热源的温度之比; 在不可逆过程中熵大于这个比值。一个实际过程除了应该遵守能量守恒外, 还有能量转换和传递的方向问题, 根据热力学第二定律关于热力学过程单向性的结论, 自发过程进行的方向取决于系统初态和终态的差异, 熵就是反应系统状态的物理量。熵的变化指明了自发过程进行的方向, 并可给出系统达到平衡的必要条件。熵的物理含意能与系统的微观性质相联系, 把熵与系统状态无序程度联系起来, 即系统无序程度越高, 系统越“混乱”, 对应的微观态数目越多, 熵就越大; 反之微观态数越少, 熵越小。熵在可逆绝热过程中不变, 在不可逆绝热过程中增加, 即系统经绝热过程由初态到终态, 熵永不减少, 此结论称为熵增加原理。一个孤立系统其内部一切变化与外界无关, 属于绝热过程, 因此熵始终增加。系统的熵达到极大值时, 系统必定达到

平衡态，没有外界作用，系统的状态不再变化将永久保持在平衡态。熵的应用不限于热力学、统计物理学学科，在控制论、概率论、数论、天体物理学等领域也有应用。

【自由能】 又称亥姆霍兹自由能。为了研究等温过程的方便而引入的一个态函数。它可以作为系统是否达到平衡和不可逆等温过程的进行方向的判据。自由能的数学表达式为 $F = u - TS$ ， F 为系统的自由能， u 为内能， T 和 S 分别为系统的熵和热力学温度。在等温过程中系统所作的功等于（对可逆过程）或少于（对不可逆过程）其自由能的减少。上式可变为 $u = F + TS$ ，自由能是内能的一部分。在等温过程中它可以转变为功，而另一部分则不能转变为功，因此自由能的减小值给出系统在等温过程中可以对外所作的最大功。在等温过程中系统不对外作功时，不可逆等温过程自由能只能向减小的方向进行。系统达到平衡态时自由能不再变化，所以自由能不再变化是系统达到平衡态的判据。

【吉布斯函数】 为了便于研究等温等压过程而引入的态函数，又称热力势、自由焓、吉布斯自由能。其定义为 $G = u - TS + PV$ ， G 为吉布斯函数， u 、 S 、 T 、 P 和 V 分别为系统的内能、熵、热力学温度、压强和体积。在等温等压可逆过程中系统对外所作的非体积变化功等于吉布斯函数的减少量，对于不可逆等温等压过程系统对外所作的非体积变化功少于吉布斯函数的减少量。吉布斯函数的减少量等于系统在等温等压过程中对外所作的最大功。当系统对外不作非体积功时，不可逆等温等压过程只能向吉布斯函数减少的方向进行。系统达到平衡时吉布斯函数达到最小值而不再变化，它可作为不可逆等温等压过程进行的方向和系统是否达到平衡态

的判据。吉布斯函数在许多化学反应过程和物理学中的相变过程中有着广泛应用。

【热力学循环】热力学系统经过一系列状态变化又回到初始状态的全部过程。状态变化所经历的过程可以分别是等温过程、等压过程、等容过程、等温等压过程、绝热过程、多方过程。

【可逆过程】系统状态变化经历的一种理想过程。系统由初态出发，经过某一过程达到某一终态，如果存在另一过程，消除了原来过程对外界引起的一切影响，同时使系统回到原来的初态，则原来的过程称为可逆过程。假定气缸与活塞之间无摩擦时，气体在膨胀过程中，系统的压强等于外界的压强，在逆过程压缩中，系统压强也与外界压强相等，每一微小过程都是与原来膨胀过程中一微小过程对应，所以此时的膨胀过程是可逆过程。若有摩擦力存在，膨胀时系统内压强大于外压强，压缩时则相反，经过相反过程不能使系统和外界恢复原样，因此是不可逆过程。可逆过程是一种理想化的过程，一切自发的热力学过程如热传导、扩散都是不可逆过程。

【等压过程】系统压强保持不变的过程。理想气体在等压过程中，体积与温度成正比，即 $\frac{V}{T} = \text{常数}$ 。在等压过程中，系统吸收的热量为 Q ，根据热力学第一定律、此过程中能量转换形式为 $\Delta Q = \Delta u + P\Delta u$ ， Δu 为系统增加的内能， $P\Delta V$ 为等压过程中系统对外界作的功。系统吸收的热量也可用另一形式表示 $\Delta Q = C_p\Delta T = \Delta H$ ，即等压过程中系统焓的增量等于吸收的热量，式中 C_p 为定压热容量。

等压过程在工程热力学、热化学中均有重要应用。

【等容过程】系统体积保持不变的过程。理想气体在等容过程中压强与温度成正比， $P/T = \text{常数}$ 。系统的体积在等容过程保持不变，系统所作的功 $P\Delta V = 0$ 。根据热力学第一定律，系统吸收的热量全部转化为内能增加。 $\Delta Q = \Delta u + P\Delta V = \Delta u = C_V\Delta T$ ，式中 C_V 、 ΔT 分别是定容热容量和系统温度的变化。由于汽油机中燃烧过程极快，计算燃料燃烧释放的能量值时，将此过程简化为等容加热过程。

【等温过程】系统的温度一直不变的过程。理想气体在等温过程中系统的压强和体积的乘积等于常数。 $PV = \text{常数}$ ，理想气体的内能只是温度的函数，因此在等温过程中内能保持不变，能量的转换特点是系统吸收的热量等于系统对外所做的功。卡诺循环由两个等温和两个绝热过程组成的。物质三态的转变也是在等温中进行的。

【绝热过程】系统与外界没有热交换条件下所进行的过程。在可逆的绝热过程中熵不变， $ds = \frac{dQ}{T} = 0$ ，因此可逆绝热过程又称等熵过程。在绝热过程中系统吸收的量 $Q = 0$ ，能量转换特点是系统对外界所作的功是以系统内能减小为代价的。理想气体在绝热过程中对外作的功是 $W = \frac{1}{r-1} (P_1V_1 - P_2V_2)$ ，其 $r = C_p/C_v$ ， C_p 和 C_v 分别为定压热容量和定容热容量， P_1 和 V_1 、 P_2 和 V_2 分别为初态和终态的压强和体积。在绝热过程中，用三个绝热过程方程将系统状态参量之间的关系表征出来 $PV^r = \text{常数}$ ， $TV^{r-1} = \text{常数}$ ， $P^{r-1}/T^r = \text{常数}$ ，由其中一方程能够导出另一个方程。同外界没有显著热交换的

过程都可以近似作为绝热过程来处理，这种处理方法在实际中应用很多。

【热机】依靠燃料燃烧时产生的热量来对外做功的机器。按工作物质接收燃料释放的热量方式，可将热机分为内燃机和外燃机两类。蒸汽机、汽轮机和喷气推进发动机等属于外燃机；汽油机和柴油机属内燃机。在内燃机中工作物质是燃料燃烧产生的气体，气缸内燃料燃烧释放的热量直接转为对外所作的机械功，能量的利用比较好，效率较高。外燃机中燃料在热机外部燃烧，热量通过热交换器传给工作物质，其效率比内燃机低，但是构造简单，工作可靠，可使用价格低的燃料煤，在铁路和水运以及在一些工业中还在大量使用。这两类机器都是靠工作物质在气缸内膨胀、推动活塞往复运动来对外作机械功的。

【致冷机】实现某一空间内的温度低于环境温度并保持这个温度的设备。把高于153K（-120℃）的温度称为普冷，1—153K的温度称为深冷，低于1K的温度称为超低温。使热量从低温物体传到高温物体达到致冷，是以消耗外界能量为代价的，需要外界做功来实现逆向传热。利用物质的相变吸热效应、液体膨胀产生的致冷现象和半导体温差电现象可以获得普冷温度；利用等焓节流膨胀和等熵绝热膨胀可将氧、氮、氦等气体液化获得1—153K的温度；用核绝热去磁和顺磁盐绝热去磁等获得超低温。致冷机主要由压缩机、冷凝器、热交换器、膨胀机和节流阀等组成。根据希望到达的不同低温温度要选择制冷剂、致剂以及其循环过程。将制冷剂绝热压缩后在冷凝器中放出过热热量，放出汽化热使其变成高压液体，绝热膨胀后达到降温目的，用这种循环的致冷机可达到普冷温度

$>153\text{K}$ 。等焓节流膨胀和等熵绝热膨胀可以获得深冷温度。被压缩到200大气压的空气在冷凝器中被回流的低压空气冷却后,节流膨胀到1大气压,部分空气液化,获得80K 的低温,未液化的空气经热交换器吸收高压气体的热量后返回压缩机再循环。氖、氢、氦的反转点较低,要将它们冷却到反转点以下才能实现液化。等熵节流膨胀比等熵绝热膨胀少获得一部分冷量和少回收一部分膨胀功,但节流阀简单,而膨胀机结构复杂、造价高,目前气体液化装置都采用二者结合的致冷循环,实现氢和氦的液化。

【系统状态的几率】系统某种状态所经历的时间间隔与对整个系统观察时间趋于无限长时的时间之比的极限值。系统处于某种状态的几率与物理量 A 取 A_i 的几率是一致的,如测量某物理量 M 为 N 次,测量值是 M_i 的有 N_i 次,则测出 M_i 的几率为 $w_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$ 。在系统状态连续变化的情况下,所讨论的是某物理量 M 在一定取值范围 $M \rightarrow M + dM$ 内的几率 $dw(M) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{dt_M}{T}$ 。所有状态的几率和等于1,这称为状态几率的归一化。在连续状态下 $\int dw(M) = \int e(M) dM = 1$, 式中 \int 为积分号, $e(M)$ 为几率分布函数。

【物理量的平均值】物理量多次测量值 M_i 的平均值。某物理量 M 测量了 N 次,测量值为 M_i 的有 N_i 次,值为 M_{i+1} 的有 N_{i+1} 次,其平均值为 $\bar{M} = \sum_i N_i M_i / N = \sum_i \omega_i M_i$, 在 M 连续变化的情况下 $\bar{M} = \int M_i d\omega(M) = \int e(M) dM$, 理论上的平均值只代表大量微观运动状态的平均结果,对某一物理量的某一次测量值不一定等于它

的平均值，测量值会出现涨落。当测量手段很精确，仪器的精度很高，这个涨落就可以观测到。

【玻尔兹曼统计】 全同粒子的经典统计方法。又称麦克斯韦—玻尔兹曼统计。玻尔兹曼统计只适用于大量近似独立子系统构成的系统。把由同一种分子组成的理想气体中的每一个分子看成一个个近独立子系统，各分子之间除了在相互碰撞瞬间，都认为没有相互作用。经典统计中对于状态的占有方式没有限制，而且每个分子都是可识别的。一个独立子系统它可能有 K_i 个能量为 ϵ_i 的状态，把 N_i 个分子放入 K_i 个状态中的方式共有 $W_i = K_i^{N_i} / N_i!$ 种。在气体中总分子数 $N = \sum_i N_i$ 和总能量 $E = \sum_i \epsilon_i N_i$ 已确定的前提下，要求熵达到最大值，可求得状态 i 的分布函数 $n_i = N_i / K_i$ 为 $n_i = \exp(\alpha + \beta \epsilon_i)$ ，式中 $\alpha = \mu / T$ ， $\beta = -1 / T$ ， μ 是化学势。这就是玻尔兹曼分布。

【量子统计】 研究大量分子组成的系统服从量子力学规律、处于平衡态的全同粒子的统计方法。它对经典统计的思想作了几点修正，粒子的能量不是连续变化的，求各能量状态分布函数的方法会有改变；完全相同的粒子是不可辨别的，交换这类粒子不导致系统出现新状态；考虑粒子（如分子、原子、质子和电子等）的统计分配时要考虑粒子的自旋影响，自旋状态不同是两个不同的状态；相空间不能任意的少，而是有一个最小限度。由一对对称波函数描述的粒子所构成的系统，称玻色系统，近独立粒子玻色系统的每一个量子态上占据的粒子数不限，这种粒子遵守的统计称玻色统计，或称玻色—爱因斯坦统计。由反对称波函数描述的粒子所构成的系统称费米系统，这种粒子必须遵守泡利不相容

原理，即每个量子态上只能有一个粒子，它们遵守的统计称费米统计，或称费米—狄喇克统计。这两个统计的总称为量子统计。

【布朗运动】液体中微小粒子表现出的无规律运动。在温度均匀的和无外力作用的液体中都能观察到颗粒作无规律的折线运动，这种运动称为布朗运动，这是布朗最早在显微镜下观察到的。直径约 10^{-7} — 10^{-5} 米的微粒受到周围液体分子热运动的不规则频繁碰撞，在某一时刻在某一方向的碰撞数大大超过其他方向的碰撞数，微粒就会出现一明显的位移。这种不平衡碰撞产生的力是一种大小和方向涨落不定的净作用力，它驱动着微粒作无规律的热运动。除了平动布朗运动外，还有转动布朗运动，如果时间很长，球形微粒的取向是等几率的，即没有某方向的取向更优越。粒子扩散的实质就是布朗运动产生了粒子位移，大量布朗粒子在媒质中的迁移过程就是扩散过程。布朗运动代表了一种随机涨落现象，它的理论在许多领域有重要应用，如对测量仪器测量精度限度的研究，电讯电路中背景噪声的研究等。

【等离子体】在一个空间区域中分别由带正电荷和负电荷的粒子（正、负离子）组成的、宏观上一般呈电中性的多粒子体系的物质状态。由于带电粒子间的作用主要是长程库仑力，每个粒子都同时和周围的许多粒子发生作用，因此等离子体在运动过程中一般表现出明显的集体行为，由于等离子体的组成和结构，它具有振荡、辐射和不稳定等特性，等离子体的性质不同于固体、液体和气体，常称为物质第四态。它是一种良导体。按成因分为天然等离子体（如太阳物质和地球电离层）和人工等离子体（如电离气体）。对等离子体可用体系的温度和所含自由电子的数密度（ 米^{-3} ）为参数来

分类。有时用等离子体所处的物理体系呈现的气、液、固状态来称呼它，如气态等离子体（电离气体），液态等离子体（电解质溶液）和固态等离子体（雪崩二极管）。

【电离度】 已电离的粒子数占据原有中性粒子数的百分比。引起物质电离的作用通常有气体粒子受其它高能粒子（电子、光子和离子等）的碰撞，高温气体中粒子间的互相碰撞，固体表面或内部被高能粒子撞击，固体表面电子的热发射和场致发射，以及在液体中电解质分子受溶剂分子的作用而电离等。气体在高温下的电离称热电离。描述处于热平衡态的电离气体的电离度用萨哈公式。以 n_a 、 n_i 和 n_e 表示电离气体中原子、离子和电子的密度数（单位为厘米⁻³），当离子主要为一价时， $n_i = n_e$ ，根据萨哈公式可得到气体的电离度 η ， $\eta = \frac{n_i}{n_i + n_a} = \frac{\rho}{1 + \rho}$ ，式中 $\rho = \frac{n_i}{n_a} = 10^{11} n_a^{-1/2} T^{3/4} \exp(-\epsilon_i/k_B T)$ 。 T 为电离气体的绝对温度， k_B 为玻尔兹曼常数， ϵ_i 为气体分子的电离能。通常当 $\eta \leq 0.01$ 时称低电离度， $\eta \simeq 0.10$ 时称中电离度， $\eta \simeq 1$ 时称完全电离。

【德拜长度】 在等离子体中，由于异性相吸，一个带电粒子总是被一些带相反电荷的粒子所包围中和，因此一个带电粒子的静电力平均地只能作用在某个距离内，这个距离称为德拜长度 λ_D 。 λ_D 也可看作一个带电粒子的电场被其周围带异性电荷的粒子所屏蔽的距离，因此又称 λ_D 为德拜屏蔽距离。在高斯单位制中， $\lambda_D = \left(\frac{k_B T_e}{4\pi n e^2}\right)^{1/2}$ ，式中 k_B 为玻尔兹曼常数， T_e 、 n 和 e 分别是电子的温度、数密度和电荷。显然等离子体中两个带电粒子间的距离小于 λ_D 时才能产生有效作用。当 λ_D 远小于等离子体的尺度时，等离子

体才在宏观上是电中性的。因此， λ_D 是等粒子体的空间特征参量。

【等离子体频率】在等离子体中，带正电荷粒子的质量比带负电荷的电子的质量一般大3个量级以上，因此可相对地把正离子看作固定不动，质量小的电子在静电力的作用下相对于正离子产生简谐振荡，称为等离子体振荡。在冷等离子体（即忽略电子热运动影响）中，振荡频率 ω_p 在高斯单位制中为 $\omega_p = \left(\frac{4\pi ne^2}{m_e}\right)^{1/2}$ ，式中 n_e 、 m_e 和 e 分别是电子的数密度、质量和电荷， ω_p 称为等离子体频率。在考虑电子热运动的热等离子体中，等离子体振荡会形成群速度不为零的纵波运动。这个纵波称朗缪尔波，其频率为 $\omega = (\omega_p^2 + \frac{3k_B T}{m_e} k^2)^{1/2}$ ， k_B 为玻尔兹曼常数， k 为波数， T 为电子温度。 ω_p 表征等离子体的定域振荡。这种振荡群速度为零，不形成行波。对于非磁化等离子体，当电磁波（横波）的频率大于 ω_p 时，才能在等离子体中传播。由于 ω_p 反映等离子体对电场扰动反应的快慢，它是表征等离子体的时间特征参量。

【等离子体参量 g 】以德拜长度 λ_D 为半径的球称德拜球。在等离子体中德拜球内的粒子数为 $n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3$ ，这里 n 为粒子数密度。由于德拜屏蔽是统计意义下的概念， $n \lambda_D^3 \gg 1$ 。通常把等离子体中一个粒子所占有效体积 g 称等离子体参数。显然 $g = (n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3)^{-1} = \frac{(k_B T_e)^{3/2-1}}{6\sqrt{\pi} n e^3}$ 。 g 由热平衡下等离子体静电势能与动能之比决定。 g

$\ll 1$ 的等离子体中粒子间的碰撞作用小而能按理想气体处理。这时

等离子体的主要运动形态是波长大于 λ_D 的各种集体振荡。自然界中等离子体几乎都满足 $g \ll 1$ 。当前主要研究这种情形。显然 $g \gg 1$ 的等离子体与 $g \ll 1$ 将有显著的不同。

【朗道阻尼】等离子体内静电振荡中由于波和粒子之间的共振作用导致波的阻尼（损失能量）的效应。它是苏联理论物理学家朗道在1946年提出的。这个理论提出后过了18年才在实验中得到证实。当等离子体中的粒子速度 v 与波的相速 v_p 接近时，粒子被波的电场加速而吸收了波的能量，使波衰减，这就是朗道阻尼。当 v 略超过 v_p 时，粒子被波的电场减速使波的能量增加，这称为朗道增长。朗道阻尼和朗道增长开创了波粒相互作用和等离子体微观不稳定性的非碰撞耗散的新机制的研究领域，是等离子体动力论的重要结果。

【等离子体温度】通常温度是体系处于热力学平衡态中表征体系内粒子平均动能的物理量。在等离子体内由于粒子间存在长程电磁力产生各种振荡，不存在严格的热平衡态，因此也不存在通常意义下的温度。但对等离子体中每种粒子可存在平均动能 \bar{E}_i ，因此对每种粒子可定义温度 $T_i = \bar{E}_i / k_B$ ， k_B 为玻尔兹曼常数。对等离子体可自然地定义它的平均温度为各种粒子温度的平均值。但一般情形下等离子体温度用电子温度表示。在热核聚变反应中的等离子体温度常用氘核或氚核的温度表示。通常等离子体的温度指的是粒子的平均动能，它的单位是电子伏（eV）。绝对（开氏）温标单位（K）和能量温标单位（eV）的换算关系是 $1\text{eV} = 11600$ （K）。

【绝热不变量】当一个粒子作周期或类周期运动时，如果决定粒子运动轨道的力场变化很慢，即表示场的变化的参量 λ 在一个周期 T 内的改变远小于参量本身： $t \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} \ll \lambda$ ，则此粒子在一个运动周期内的作用积分 $J = \oint p dq$ 是一个近似不随场改变的物理量，称为绝热不变量，这里 p 和 q 分别是粒子的广义动量和广义坐标。

当带电粒子在电磁场中运动时，对应于三种不同类型的周期运动，有三个绝热不变量。(1) 绕磁力线作回转运动时的磁矩；(2) 在两个磁镜之间沿磁力线方向往返运动的作用积分—纵向不变量；(3) 粒子偏离磁力线密切面的分运动在两个磁镜间绕磁场对称轴作环向周期运动时运动轨线所包围的磁通量。这三个绝热不变量是对等离子体实现磁约束的基础。在三个绝热不变量同时存在的磁场安排下，等离子体将被磁场约束在一个确定的空间范围。

【等离子体中的波】在等离子体中，正、负带电粒子间存在长程库仑相互作用和粒子的电离、复合和各种输运过程，使它成为一个极为复杂的弹性体。因此在等离子体中能形成多种波动和振荡模式。(1) 无磁场时的振荡模式。冷朗缪尔振荡。这是频率 $\omega_p = (\frac{4\pi n e^2}{m_e})^{1/2}$ 的定域振荡（见等离子体频率）。热静电纵波。是频率 $\omega = \omega_p^2 + \frac{3}{2} k_B^2 v_e^2$ 的群速度不为零的电子密度波。电磁波。色散关系为 $\omega^2(k) = \omega_p^2 + c^2 k^2$ 的电磁波。离子声波。普通声波与导致等离子体中的静电场相耦合的波。其色散关系为 $\omega = k c_s$ ， $c_s^2 = T_e / m_i$ 。(2) 有磁场时的振荡模式。剪切阿尔文波。对理想导电流体，磁力线沿流体成一弹性弦，从而使横向扰动沿它传播。压缩阿尔文波。

磁场在磁流体中的磁压与普通声波耦合形成的纵向磁声波。此外还存在带电粒子在磁场中的回旋共振，垂直和平行于磁力线传播的波和高频电磁波。在等离子体中除各种线性波外，由于非线性效应和色散、耗散相结合形成孤粒子波。这种波在等离子体动力论中也占有重要位置。

【磁镜效应】在具有梯度或曲率的缓变磁场中，带电粒子的磁矩是不变的（见绝热不变量）。同时带电粒子在恒定纵向不均匀磁场中运动时，将受到一个由强磁场区指向弱磁场区的作用力。因此向磁场增强的方向运动的带电粒子将受到磁场的反射，这就是磁镜。当

粒子相对于磁场梯度方向在锥角 $\theta \geq \sin^{-1} \sqrt{\frac{B_{\min}}{B_{\max}}}$ 时将被这个磁场

反射回来。当 $\theta < \sin^{-1} \sqrt{\frac{B_{\min}}{B_{\max}}}$ 时粒子将从镜中逃逸。这里 B 为磁场强度。显然增大磁场梯度可减小逃逸锥。这种通过适当安排梯度磁场来约束带电粒子的作用就是磁镜效应。

【等离子体内部相互作用】等离子体中粒子间除相互碰撞的短程相互作用外，还存在中程库仑屏蔽作用和长程库仑作用。后者产生各种集体运动，形成各种波动。因此等离子体可以看成是粒子和波的集合。等离子体中存在粒子间的相互作用，波之间的相互作用，粒子和波之间的相互作用。这些作用在动力论中用粒子态分布函数 $f_a(r, v, t)$ 的演化方程——福克——普朗克——玻尔兹曼方程和电磁场的麦克斯韦方程组描述。由于波的相干和湍流，粒子的扩散，波和粒子间的能量交换导致波和粒子集合的各种不稳定性。

【等离子体的不稳定性】磁约束等离子体存在各种不稳定性。(1) 宏观不稳定性是尺度大于拉莫尔半径和德拜长度的不稳定性。互换不稳定性：在凹向等离子体的磁场界面上相邻磁力管连同其上的等离子体互换位置；气球膜不稳定性：互换扰动的波矢在磁场方向的分量不为零时扰动模本身的不稳定性；扭曲不稳定性：纵向强流等离子体柱在弯曲或扭曲扰动下的不稳定性；腊肠不稳定性：纵向电流磁场约束下的等离子体表面在扰动下会沿电流方向相间压缩和膨胀；耗散不稳定性：冻结在等离子体中的磁力线在离子碰撞时解冻而产生耗散。(2) 微观不稳定性是尺度小于拉莫尔半径和德拜长度的不稳定性。朗道阻尼和增长(见朗道阻尼)；双流不稳定性：带电粒子束通过等离子体时其运动受扰动产生空间电荷效应的不稳定性；离子声不稳定性：电子相对于离子的定向速度超过声速时激发离子声波产生声辐射；损失锥不稳定性(见磁镜效应)；漂移不稳定性：等离子体中由于密度梯度和温度梯度导致的粒子漂移的扰动；捕获粒子不稳定性：磁约束等离子体中由于局部磁场梯度形成磁镜对粒子的捕获产生的不稳定性；参量不稳定性：等离子体振荡参量在外部电磁波调制下形成参量共振的不稳定性。消除等离子体的各种不稳定性是等离子体研究与应用的重要课题。

【等离子体的辐射】无约束等离子体是带电粒子在自洽电磁场中运动的体系。磁约束等离子体还受到外磁场的作用。带电粒子在电磁场中作量子的或经典的运动时要进行各种辐射和发射。退激发辐射：等离子体中的原子或离子在各种相互作用中轨道电子被激发到高能态，退激发时的分立谱(X射线)辐射；复合辐射：等离子体中离子和自由电子中和时的辐射，主要发生在低温等离子体中；

轫致辐射：等离子体中的带电粒子由于库仑碰撞使自由电子改变速度时的连续谱辐射；回旋加速辐射：电子在磁场罗伦兹力下作回旋运动时因速度变化的辐射。它随回旋轨道曲率的增大而增强。此外等离子体中的集体运动产生的各种振荡和波动也发射各种电磁辐射。等离子体辐射是等离子体能量输运和耗散的重要形式。由于扩散和碰撞，等离子体还发射中性或带电的高能粒子。

【等离子体光谱】等离子体的各种电磁辐射（见等离子体辐射）构成等离子体光谱。它的结构是在几乎整个连续电磁波谱上叠加了一些分立线谱。由于等离子体中每个发射单元都在自洽（及外加）电磁场中参与集体运动，因此其分立线谱被速度场的多普勒效应和（或）被电场的斯塔克效应加宽，并被磁场的塞曼效应分裂。这些被分裂、加宽的线谱及连续谱的结构成分和轮廓与等离子体的温度，等离子体的成分，各成分粒子的数密度以及等离子体的状态有密切的关系。

【自然界中的等离子体】等离子体这一不同于气、液、固的物质第四态广泛存在于自然界。宇宙可见物质的绝大部分（约99%）处于等离子态（见等离子体附图）。如太阳及其他恒星，行星际空间的太阳风，星际物质，星系际物质。由于能解释宇宙演化的大量观测事实，等离子天体物理学已成为理论天体物理学的新分支。等离子态在地球物质中虽不多见，但也有分布广泛的地球电离层和磁层，太阳风等都是等离子体。地球上的闪电，极光都是天然等离子体的辐射现象。地球上生物赖以生存的太阳光，就是热核等离子体进行核聚变反应释放出巨大能量的结果。

【等离子体物质的应用】人们研究物质的等离子态的性质和规律，除了对宇宙演化中的天体物理现象提供理论依据外，等离子态物质在人类社会中有广泛的应用。(1) 用作武器的氢弹爆炸。(2) 受控热核聚变。氢的同位素氘、氚以及氦处于高温高密等离子态（劳逊条件，即 $T \geq 10-10^2 \text{keV}$ ， $n_e t \geq 10^{14-15} \text{s/cm}^3$ ，这里 T 是温度， n_e 为粒子数密度， t 为约束反应时间）时发生核聚变反应释放巨大的核能。由于热核聚变能有望于解决人类在未来生存的能源问题，从而极大的推动了高温等离子体的研究。然而由于等离子体的复杂性（见等离子体的辐射，等离子体的不稳定性等），实现受控热核聚变还需要进行相当长时间的研究。当前以惯性约束聚变（见惯性约束聚变）和磁约束聚变（见磁约束聚变）两种受控方式进行研究。(3) 低温等离子体可用于磁流体发电，等离子体冶炼，等离子体加工，等离子体化工及等离子体器件的研制和应用等和等离子体发动机。

【惯性约束聚变】惯性约束是在不稳定的等离子体（见等离子体的不稳定性）中实现核聚变的一种约束方式。对装有聚变材料的，具有特定表面性能的，直径在毫米以下的小球——靶丸，用聚焦的强激光束或高能带电粒子（电子或离子）束多向对射。靶丸在各个相向束动量下压缩，使聚变材料密度在约 10^{12}atm 束压下达 10^3g/cm^3 。同时在强大的束能量下聚变材料处于等离子态。这种高温高密（约 100keV 、 10^3g/cm^3 ）等离子体在约 10^{-11}s 中使等离子体来不及扩散的时间内完成核聚变。这事实上类似于一个微型氢弹。通过微当量的缓炸过程来控制。这一可控聚变途径从60年代开始就进行原理上的研究，现在已朝着零增益能量的装置目标前进。

【磁约束热核聚变】磁约束是在不稳定的等离子体（等离子体的不稳定性）中实现核聚变的一种约束方式。一定强度的磁场（ B ）能对垂直于它的动量为 P_{\perp} 的，带电（ e ）粒子的分运动产生约束： $P_{\perp}c = eB\rho$ ，这里 c 是光速， ρ 是约束半径。显然一个磁单极场能对任意带电粒子产生约束。事实上通过对磁场的适当安排（见磁镜效应）就可实现等离子体磁约束。磁约束能把等离子体限制在一个由真空隔离的区域，这样可减小等离子体与容气壁的相互作用。磁约束中实现热核聚变必须满足劳孙条件： $T > T_0 = 10^2 \text{keV}$ ， $n_e \tau > (n_e \tau)_0 = 10^{15} \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。这里 T 为等离子体温度， n_e 为电子数密度， τ 为保持 T 、 n_e 的约束时间。这里要达到受控聚变要求，除解决向反应约束区注入聚变材料的复杂的技术问题外，还需要对等离子体输入能量（见等离子体加热）。按照约束磁场的分布形式，当前研制的装置有环流器（或托卡马克）和仿星器。由于这一研制意义重大，因而竞争激烈，进展较快，有望在不久的将来获得实用能源。

【等离子体加热】一般等离子体可以通过热交换加热提高温度。对用真空隔离的磁约束等离子体加热需要专门的方法。对环流器等等离子体加热的方法有：（1）欧姆加热。利用环流器等等离子体中流通的，用于产生磁场旋转变换的环形电流对等离子体本身（环流导体）进行欧姆加热（等离子体电阻加热）。由于高温下等离子体电阻变小而需要采用特殊措施。（2）中性粒子束注入。把粒子能量为 100keV ，束流功率达几十兆瓦的中性粒子束注入磁约束装置中，通过粒子束与等离子体的能量交换加热。（3）射频波加热。把适当频率的电磁波输入磁约束装置，通过等离子体内电子回旋共振（ $60\text{—}120 \text{G}_H$ ）、离子回旋共振（ $30\text{—}120 \text{M}_H$ ）或混合共振（ 2G_H ），进行共振吸收加热。通常用上述方法联合进行加热，来达到实验上

的温度条件。

【冷等离子体】见“等离子体频率”。

【热等离子体】见“等离子体频率”。

【固态等离子体】见“等离子体”。

【朗道增长】见“朗道阻尼”。

【磁约束】见“磁镜效应”、“磁约束热核聚变”。

【液态等离子体】见“等离子体”。

物质的固态

【固体】具有一定体积和形状的物质,可分为晶体与非晶体两大类。如冰、水晶、云母、岩盐、金属等为晶体;玻璃、松香、橡胶、塑料等为非晶体。晶体中的粒子(分子、原子、离子或原子团)具有规则的、周期性的排列。常有的一个基本特性是各向异性;另一特性是具有固定的熔点,晶体加热到熔点时熔解为液态。非晶态中的原子或分子则呈无规则排列,且不存在熔点,其熔解过程表现为随温度升高而流动性增加,因此非晶体也就是粘滞性很大的液体,

或称“过冷液体”。

【一维和二维固体】在诸如导电性、磁性、超导性、表面吸附性、传热性等方面具有明显各向异性的固体。根据其各向异性表现为一维或二维的特征，分别称为一维固体和二维固体。

【固体的内聚能】在给定的条件下，把固体分散成处于基态的自由原子所需的能量。内聚能等于结合能与电离能之差。金属钠在0K和1atm下的内聚能是107kJ/mol，即1.113eV/atom。

【能带】固体物理学名词。晶体中电子所能具有的能量值。在物理学中常形象地用水平横线表示电子的能量值，称为能级。一定能量范围内彼此相隔很近的许多能级，基本连成一片，形成一条带，称为能带。各种晶体的能带数目及宽度都不相同。相邻两能带间的能量范围称为“能隙”或“禁带”，晶体中电子不能具有这种能量。完全被电子填满的能带称为“满带”，满带中的电子不能导电；完全未被电子占据的称为“空带”；部分被电子占据的称“导带”，导带中的电子能够导电。价电子所占据的能带称“价带”。能量比价带低的各能带一般都是满带。价带可以是满带，也可以是导带，如在金属中是导带，所以金属能导电；在绝缘体和半导体中是满带，所以它们不能导电。但半导体很容易因其中有杂质或受外界影响，使满带中的电子数减少，或使空带中出现一些电子而成为导带，遂能导电。

【能带结构】假定固体中各原子彼此相隔一定距离，以致原子间没有相互作用，则这一系统的电子能级就将表征个别自由原子的那

些能级,因而许多电子都具有同一能量。现在设想这些原子慢慢地互相靠拢起来。随着原子间距离的逐渐缩小,外壳层电子开始互相作用。这种作用改变了它们的能量,而且事实上,把锐能级扩展成为一个可能的能级范围,此范围称为能带。可以预期,对于在固体中观测到的原子间距上的外层电子(或价电子)来说,这一形成能带过程的理论必然会得到很好的发展。一旦原子能级已经展开成带,价电子便不会被囚禁在个别原子之内,而是可从这一原子跳到另一原子上,其容易程度随能带宽度的增大而增大。虽然在一切固体中都存在着能带,但能带这一名称通常只是对于有序物质而言,即对于那些具有分明的晶体点阵的物质而言。在这种情况下,电子能态可以按照电子的晶体动量或电子的波矢 $\vec{k} = P/h$ 来分类 ($h = \frac{h}{2\pi}$)。若电子是自由的,则具有波矢 \vec{k} 的一个电子的能量如下式所示: $E(\vec{k}) = E_0 + \hbar^2 \vec{k}^2 / 2m_0$, E_0 是一个价电子的最低能态的能量, m_0 是电子质量。然而,由于晶体对电子的束缚效应以及原子施于电子的力,晶体中的电子并不是自由的。因此,能量与波矢间的关系 $E(\vec{k})$ 就更为复杂。对于各种类型的固体,有可能获得一个近似的描述;这种描述只有在原子充分接触、以致可将价电子看作是分布于整个固体之中时,才能成立。这一条件虽然在分子晶体中可能不会理想地满足,但在金属、盐类和价键晶体中却得以满足。在这种情况下,电子能级可以构成能带。在相当大的能量范围内,电子按照泡利不相容原理占据能级。在绝缘体中全满带和全空带是被所谓“禁区”分隔开的;而在金属中,电子占据的和未占据的能带是接触着的。本征半导体即便具有理想纯度和成分也显示半导体的性能,这相当于能级的满带和空带比较接近的情况,此时电子可以由热激发从一个能带跳跃到另一个能带。当论述

整个晶体的基态或最低少数几个激发态时，对绝缘体的情况可作另一种描述。在这种描述中，电子可认为局域在原子或离子周围，人们在研究不呈电子导电性的绝缘体的一些激发态（即所谓激子态）时，这种观点有特殊价值。用能带理论可以解释许多金属、半导体及绝缘体的性质。

【容许带】 固体中电子容许取值的能量范围。根据能带理论，固体中电子的能级分成许多组，每一组包含有大量密集准连续的能级形成一个能带，称为容许带。每一种晶体都有许多容许带，能量愈高的容许带其宽度愈宽。有时相邻的容许带可能互相交叠。

【禁带】 由能带理论所规定的两个相邻容许带之间不能为电子占据的能量范围。下一能带的最高能量与上一能带的最低能量之间的能量范围称为禁带宽度。一般半导体和绝缘体价带和导带之间的禁带宽度为0.1—10eV，例如锗和硅的禁带宽度分别为0.74eV和1.16eV。应当注意，所谓禁带中的能量不能为电子占据只是对体内扩展态而言，即体内扩展态的电子不能取禁带中的能量，而对于晶体中局域态的电子（例如局域在晶体表面附近或杂质的电子）则可以取禁带中的能量。

【价带】 当原子相互结合而形成晶体时，每一个孤立原子的能级将分裂为一个能带。对应于孤立原子中最外层轨道上的价电子能级的能带称为价带。价带通常也是被电子占据的能量最高的能带。对于金属导体，其价带没有被电子填满，价带中的电子是可以导电的，所以又称导带；对于绝缘体和半导体，在极低温度下，其价带各能态均被电子占据，价带中的电子不能导电；高晶体（特别

是半导体) 受热激发、受到光照或掺进杂质原子时, 价带往往失去少量电子, 留下一些空能级 (空穴), 从而产生空穴导电性。

【导带】 具有能导电的电子的最高能带。在半导体中, 温度极低时电子占有的最高能带是满带, 不呈现导电性, 但当存在热激发、光照或杂质原子掺入等条件时, 靠近最高满带的空带中往往会出现少量的电子, 产生导电性, 这样, 原来的空带便成为导带。在金属中, 价带是未充满的, 其电子可以导电, 因此价带便是导带。

【电子态密度】 电子能量介于 $E-E+dE$ 之间的量子态数 dZ 与能量差 dE 之比, 即 $N(E) = \frac{dZ}{dE}$ 。晶体中电子的能量是波矢量 \vec{R} 的函数, 即 $E=E(\vec{R})$, 电子态密度的一般计算公式为 $N(E) = 2v \int \frac{ds}{|\nabla_{\vec{R}}E|}$, 其中 $\nabla_{\vec{R}}E = \vec{i} \frac{\partial E}{\partial R_x} + \vec{j} \frac{\partial E}{\partial R_y} + \vec{k} \frac{\partial E}{\partial R_z}$ 。式中 v 为晶体体积, ds 为 R 空间中等能面上的面积元, 只要给出电子的能带结构 $E(\vec{R})$ 的具体形式就可计算 $N(E)$, 例如对自由电子有 $E(\vec{R}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$, $N(E) = \frac{4\pi v}{h^3} (2m)^{3/2} E^{1/2}$, 式中 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h 为普朗克常数。

【费米面】 在 k (波动向量) 空间, 晶体内电子能量分布为 E_F (费米能量) 的等能面, 即在绝对零度时电子所能占据的最高能级在 k 空间的图形。每一晶体的能带在 k 空间的分布均可能非常复杂, 能带与能带亦常有重合, 低能带的最高能量可能大于高能带的最低能量, 所以在费米面上不同部分的电子状态可能隶属于不同的能带, 因此费米面的形状就更为复杂。由泡利不相容原理可知, 只有在费米面附近的电子才有机会自由移动, 许多物质的性质均由

这些电子的运动决定，所以对于费米面的研究在固态物理中是重要的课题。 $T=0\text{K}$ 时，费米面以内的状态都被电子占据，而费米面以外的状态则没有电子。 $T\neq 0\text{K}$ 时， $E_F < E_F^\circ$ ，即费米面所包围的体积比 $T=0\text{K}$ 时要小些，此时，费米面内侧能量约为 $k_B T$ 范围的状态上的电子被激发到费米面外侧约 $k_B T$ 的能量范围的状态上。这些电子对金属的物理特性起更大作用。对自由电子，费米面为球面，球的半径 $k_F = \frac{\sqrt{2mE_F}}{h}$ ，称费米半径。实际金属的费米面，一般具有复杂形状。

【费米能级】 费米—狄喇克分布函数 $f(\epsilon) = [e^{(\epsilon-\mu)/kT} + 1]^{-1}$ 中的 μ 通常称为化学位 (chemical potential)，又称费米能级 (特别在半导体物理里)。在 $\epsilon = \mu$ 时 $f = \frac{1}{2}$ ，即是在能量为 μ 之状态被电子占据的机率是 $\frac{1}{2}$ 。在常温下 ($T \ll T_F$) 低于费米能级的状态几乎均完全填满，高于费米能级的状态则甚少被占据。费米能级是温度及密度的函数，在温度 $T \ll \mu/k$ 时 (一般在熔点以下的金属 kT 甚小于 μ)，可以求得它与温度的关系为 $\mu \approx \mu_0 [1 - \frac{x^2}{12} (\frac{kT}{\mu_0})^2]$ ， μ_0 是 0K 的费米能级 (即费米能量)。在半导体物理中，费米能级非常重要，对于一内禀半导体，可以算出 $\mu = \frac{1}{2}E_g + \frac{3}{4}kT \log \frac{m_h}{m_e}$ ，式中 m_h 和 m_e 分别为电洞及电子的有效质量， E_g 是能量间隙的大小。若 $m_h = m_e$ ，则 $\mu = \frac{1}{2}E_g$ ，亦即费米能级位于禁带的中间。

【费米温度】 定义为 $T_F = \frac{E_F}{k}$ ， E_F 为费米能量， k 为波兹曼常数，理

想费米气体的费米温度是： $T_F = \frac{E_F}{k} = \frac{h^2}{2mk} \left(\frac{3\pi^2 N}{V}\right)^{2/3}$ 。所以 $T \ll T_F$ 表示低温和高密度。在这种状态的费米气体称为简并的，因为在这种情形下的费米气体大部分均在 E_F 以下，每一状态大都均被二质点占据，所以 T_F 也称为简并温度，其值约为 $5 \times 10^4 \text{K}$ 。

【波矢量】 最简单的单色平面波的形式为 $e^{i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ 表示 \vec{k} 方向的振动，其振动的波长是 $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ ，其波的行进速度即相速度是 $v_\phi = \frac{\omega}{|\vec{k}|}$ 为等速前进的波，通常就称向量 \vec{k} 为波向量，又称波矢量。在量子力学中，一切波都可对应一粒子系统，因此由德布洛意、爱因斯坦关系，角频率为 ω 的波对应粒子的能量为 E ，其关系为 $E = \hbar\omega$ ， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ；同时波矢量 \vec{k} 则对应于粒子的动量 \vec{P} ， $P = \hbar k$ ， $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。通常平面波代表一束同方向 (\vec{k} ，行进的粒子。为了考虑波的进行与粒子速度之间的关系，可以想像 \vec{k} 向量有些分散。此类以 \vec{k} 为中心分散的波，重叠成一波包，这波包局限于空间的一小部分，由此可以定出粒子的大概所在。然后波包的群速度(整个波包移动的速度)可以当作粒子的速度。由数学的分析可知，此类波向量相近的平面波，构成一波包，多波的频率则是 \vec{k} 的函数，而其波包中心移动的速度(群速度) v_g 可以写为 $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ 。另一方面，在相对论中一粒子的速度是： $v = \frac{dE}{dP} = \frac{\hbar d\omega}{\hbar dk} = v_g$ 。所以在应用德布洛意、爱因斯坦关系之后，可知粒子速度和波包的群速度相同。

【准动量】 描述在晶格周期场中电子运动状态的一个物理量。根据量子力学，一个能量为 E 、动量为 \vec{P} 的自由粒子与一个单色平面波 $\varphi = A e^{i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ 相对应， ω 为角频率， \vec{k} 为波矢量，粒子的动量 \vec{P}

与波矢量 \vec{k} 有下列关系 $\vec{P} = \hbar\vec{k}$ 。式中 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ， h 为普朗克常数。在固体物理中，根据能带理论，在晶格周期场中运动的电子的波函数可写成布洛赫波的形式 $\varphi = e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}} u_{\vec{R}}(\vec{r})$ ， $u_{\vec{R}}(\vec{r})$ 为一周期函数， \vec{k} 为波矢量，与布洛赫波对应的电子事实上是没有确定动量的，但 $\hbar\vec{k}$ 在某些方面仍具有动量的一些特点，因此称 $\vec{P} = \hbar\vec{k}$ 为准动量。例如当有外场力 \vec{F} 作用于固体中的电子，使电子的运动状态发生变化，则可以证明有下列等式 $\vec{F} = \frac{d}{dt}(\hbar\vec{k})$ 。上式与牛顿定律具有相似的形式，其中 $\hbar\vec{k}$ 取代了经典力学的动量。又如在晶体点阵力学中，与平面波 $e^{i(\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega t)}$ 对应的晶格波量子—声子也具有准动量 $\hbar\vec{q}$ ，并且可以证明电子遭到晶格散射时可以吸收或放出一个声子，其波矢量满足下列关系 $\vec{k}' - \vec{k} \pm \vec{q} = \vec{k}_h$ ，式中 \vec{k} 与 \vec{k}' 分别表示散射前后电子的波矢量， \vec{k}_h 为一个倒格子矢量， $\vec{k}_h = 0$ 时称为正常过程 (N 过程)， $\vec{k}_h \neq 0$ 称为倒逆过程 (U 过程)，上式表示散射过程中应满足的准动量守恒关系。由此可见 $\hbar\vec{k}$ 与 $\hbar\vec{q}$ 具有动量的一些特点，但不完全等同，故称准动量。

【有效质量】 一物体受外力作用时，由牛顿第二定律可知，依 $\vec{F} = m\vec{a}$ 运动， m 是惯性质量，简称质量。但若此物置于很复杂的系统内，而此系统有内部的作用力，则要描述此物体的运动就非易事。在固态物理中，要研究电子在物质内，尤其在非金属物质内的运动时，电子与电子、电子与正离子均有作用力，若再加上外力 F ，要写出运动方程式就很复杂，所以就引出有效质量的概念，恰似在物质内的电子具此质量而仅受外力作用，不受其他内作用力的影响，于是运动方程可写为 $\vec{F} = m^* \vec{a}$ ， \vec{F} 为外力， m^* 是有效质量，即将所有其他的物质内作用力全归于 m^* 内。从电子能量依赖于

波矢的关系式 $E(\vec{k})$ ，便可以按照下述方法获得有效质量。假设函数 $E(\vec{k})$ 在 $\vec{k}=\vec{k}_0$ 处有一极大值或极小值，函数 $E(\vec{k})$ 在这一点附近可以展开为泰勒级数。为简单计，设 $E(\vec{k})$ 仅是 \vec{k} 的大小的函数，与 \vec{k} 的方向无关，则去掉泰勒级数中高于二次幂的项，便得到下式： $E(k) = E(k_0) + \frac{1}{2}(k-k_0)^2 \left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)_{k_0}$ 。将此式与 $E(\vec{k}) = E_0 + \hbar^2 \vec{k}^2 / 2m$ 对比，一个具有质量量纲的量 m^* 可由下式的关系定义： $\hbar^2 / m^* = \left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)_{k_0}$ 。 m^* 称为电子在 k_0 上的有效质量。对于许多简单金属来说，电子平均有效质量接近于 m_0 ，但比 m_0 小的有效质量也并非罕见。如在一种名为锑化铟的半导体中，导带有电子有效质量为 $0.013m_0$ 。在一个半经典近似中，固体中的电子对于外加电场或磁场的响应，就好象它是一个质量为 m^* 的粒子那样。电子运动方程如下式所示：

$$m^* \frac{d\vec{v}}{dt} = e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (*)$$

式中 \vec{v} 为电子速度， \vec{E} 为电场， \vec{B} 为磁感应强度， e 为电子电荷。有可能遇到能量 $E(\vec{k})$ 确实与 \vec{k} 的方向有关的情况。这种情况下，有效质量就是一个张量，这个张量的各分量由下式规定： $\hbar^2 / m_{ij}^* = \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}\right)_{k_0}$ 。 $(*)$ 式对于张量 m^* 仍然成立。有效质量强烈地依赖于方向的金属的一个例子就是铋。

【布里渊区】固体物理学的能带理论中用于划分波矢空间的一系列区域均称为布里渊区。因1930年布里渊首先提出用倒易点阵矢量的中垂面来划分波矢空间的各个区域，从而分类和描述各种电子态而得名。

【功函数】热电子放射（瑞查生效应）时，设由物体表面所放射的饱和电流密度为 i ，电子所带电荷的绝对值为 e ，波兹曼常数为 k ，绝对温度为 T ，则 $i = AT^n \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right)$ ， A 为常数，对金属而言， $n=2$ ，对半导体而言， $n=\frac{5}{4}$ 。式中之 φ 称为热电子的功函数。又在外界光电效应中，由低限频率 ν_0 及公式 $h\nu_0 = e\varphi'$ （ h 为普朗克常数）求出的 φ' 称为光电子的功函数。 φ 和 φ' 通常以伏特为单位，但有时将 $e\varphi$ 、 $e\varphi'$ 视为功函数，而以电子伏特（eV）表示。 φ （或 φ' ）相当于将单位正电荷由费米能级移至固体外真空中所作的功。由于金属中位于晶格座上离子的静电场作用，被束缚于金属内的电子能量是负的。因此，一电子要跳出金属表面，必须有相当的能量，其大小随金属的种类和金属表面的构造而不同。通常，其大小总在数电子伏特左右。如果将所需的能量 W 写成： $W = e\varphi$ ，则 φ 就称为功函数，就是将电子移出金属表面所需的最小电压。在非金属固体中，也有功函数存在，原理大致与金属中的相同。

【温差电现象】在固态或液态导体中，把热能直接变成电能（或者反过来），是利用三种相互关联的现象：塞贝克效应，珀耳帖效应和汤姆孙效应（包括磁场对每个效应的影响）来实现的。这些统称温差电现象。

【接触电势差】简称接触势差。两种不同金属紧密接触时，在两者接触处存在的一定的电势差。接触势差是由于两种金属的费米能级不同而产生的。设 F_1 、 F_2 分别为两金属的费米能级（ $F_1 > F_2$ ），当两者接触后，电子将由费米能级较高的金属1转移到金属2，金属1带正电使其费米能级降低，同时金属2带负电，费米能级升高，直

至两金属的费米能级相等时便达到平衡，此时在接触面两侧将出现符号相反的电荷，形成一个电偶层，于是层内出现一个内建电场，从而使两金属间出现一个接触电势差。

【塞贝克效应】一种温差电现象。设有两种不同的金属 A、B 接成闭合回路，如果两个接头的温度不同，则在闭合回路内有电流通过，亦即由于两接头存在温差产生了温差电动势，这就是塞贝克效应，温差电偶就是根据这个效应制成的。温差电动势由两部分组成：
(1) 珀耳帖电动势：两种不同材料的金属 A、B 相互接触时，由于两者的费米能级不同，电子会从费米能级较高的金属转移到费米能级较低的金属，并在层内产生一个内建电场，亦即出现一个接触电位差。这说明在两金属接触处有一驱使电子转移的电动势，称为珀耳帖电动势。珀耳帖电动势与两金属的材料有关，与温度亦有关，因此如果两接点有温差，则回路内总珀耳帖电动势不为零。
(2) 汤姆孙电动势：一金属棒两端温度不相等时，电子会从高温端向低温端扩散，于是在低温端出现负电荷，高温端出现正电荷，从而在导体内出现阻碍电子热扩散的内建电场，达到平衡时金属两端建立起一定的电势差。这说明由于温度不均匀在导体内存在一个电动势，称为汤姆孙电动势，其大小与金属材料 and 两端的温差有关，与金属棒的形状无关，因此当由两种金属联成一闭合回路并且两接点温度不同时，两种金属内的汤姆孙电动势反向而不相等，总电动势不为零。

【珀耳帖效应】1834年珀耳帖发现，在由两种不同导体连接而成的回路中通入电流时，其中一个接头变冷，而另一个接头变暖。如果掉转电流方向，效应也会跟着倒转，此时第一个接头变暖而第二

个接头变冷。1853年，伊西留斯曾证明，在每一接头上热量的流出量或流入量与电流 i 成正比。珀耳帖系数 Π_{AB} 定义为流经材料 A 与材料 B 之间的接头处为单位电流时每秒所产生的热量。根据惯例，在电流从导体 A 流向导体 B 的接头上，若发生冷却， Π_{AB} 则取正。由 Q. 伊西留斯的研究结果，确认珀耳帖系数与电流的大小无关。因此，它仅依赖于两种材料和接头的温度，因而可以写成 $\Pi_{AB}(T)$ ，或写成 $\Pi_A(T) - \Pi_B(T)$ ，这里 Π_A 和 Π_B 分别为材料 A 和材料 B 的珀耳帖系数。这第二个形式着重表明，珀耳帖系数是一个可对单个导体定义的整体性质。由于与珀耳帖效应相关的热传输量很小，并由于焦耳热和汤姆孙效应同时存在时所带来的复杂性， $\Pi_{AB}(T)$ 的准确测量往往有困难，因而很少予以仔细研究。它的值往往根据 S_{AB} 的实验值由开耳芬关系式确定。

【汤姆孙效应】1854年由汤姆孙（后来成为开耳芬勋爵）发现的一个现象。汤姆孙发现：对于某一金属导体会有一种可逆的横向热流流进或流出导体，其方向视纵向电流是从金属的冷端流向热端还是从热端流向冷端而定。于是，如果通上电流，在导体中原来存在的任何温度梯度就会有所更改。在原来温度均匀的载流导体中不会发生汤姆孙效应。根据这些观测可以证明：对于铜，在正电荷顺着温度梯度方向流动处就有热量输出，而在正电荷逆着温度梯度方向流动处则有热量输入。铁的情形正好相反。按照汤姆孙效应的方向，所有金属可分为两类。这些热流要求有一种分布式的电动势源作用在导体中的所有点上。沿导体长度方向的总汤姆孙电动势由 $\int_{T_1}^{T_2} \sigma d\tau$ 给出， σ 是所讨论的金属的汤姆孙系数， T_1 和 T_2 是该导体两端的温度。由于汤姆孙效应的发现，就有可能建立一个温差电现

象的完整的热力学理论。

【晶格波】在晶格中原子的振动的传播。晶体中的原子总是围绕着它的平衡位置不断振动，由于原子之间的相互作用，原子的振动以波的形式在晶格中传播便形成晶格波。晶格波的表示式为 $\vec{\mu} \left(\frac{l}{K} \right) = \vec{A}_K e^{i[\omega t - \vec{R} \left(\frac{l}{K} \right) \cdot \vec{q}]}$ 。 $\vec{\mu} \left(\frac{l}{K} \right)$ 为第 l 个原胞中第 K 个原子的位移， $\vec{R} \left(\frac{l}{K} \right)$ 为流原子的位矢， ω 为振动的角频率， \vec{q} 是波矢量。晶格波有下列几个特点：(1) 在上式中将 \vec{q} 换成 $\vec{q} + \vec{k}_n$ (\vec{k}_n 为倒格矢) 时，并不改变各原子的振动位相，亦即波矢量 \vec{q} 与 $\vec{q} + \vec{k}_n$ 代表相同的晶格波，因此只取一个倒格子原胞内的 \vec{q} 便够了。(2) 可以证明在有限晶体中， \vec{q} 只能取有限个值，在一个倒格子原胞中 \vec{q} 的总数等于晶体中包含的原胞数 N 。(3) 对应于一个 \vec{q} ， ω 可以有 $3n$ 个解 (n 为原胞内的原子数)，亦即对应于一个 \vec{q} 有 $3n$ 个振动模式，在具有 N 个原胞的晶格中总共有 $3Nn$ 个振动模式。(4) 在 $3Nn$ 个振动模式中有 $3N$ 个是声学模， $3N(n-1)$ 个为光学模。

【固体中的元激发】固体中具有确定的能量和相应的动量或准动量的基本激发单元。固体中包含大量的电子和核，它们的运动十分复杂。一种有效的描述它们运动的方法是，认为固体中的激发态是由一些元激发组成的。固体中的元激发是微观粒子在特定的相互作用下产生的集体运动状态的量子，在许多情况下，元激发又可用准粒子表示。每个元激发相当于一个准粒子，具有确定的能量和动量。体系中元激发的浓度，由体系的温度决定，在高温情况下，热运动的平均动能比元激发的能量要大得多，元激发的量子效应就被掩盖，所以一般只在低温条件下，元激发的量子效应才比较显

著。

【集体激发】晶格中的原子在其平衡位置附近振动，其偏离平衡位置的位移可以分解为简正坐标，而简正坐标随时间作简谐振动，因此可以认为晶体中晶粒的振动由简谐振子所组成，这种简谐振子的激发态的量子称为声子。声子是晶格振动的集体激发的量子，因为它不属于一个固定位置上的原子或离子，它是整个晶体中位于各个格点上原子振动的集体激发。每个格点上的原子的振动可以分解为各种不同的简正振动模的线性组合。同样，每一种频率和波矢确定的简正振动是由各个不同格点上的原子振动中所包含的这一波矢和频率成份的振动的线性组合，所以简正振动是属于整个晶格的集体振动，而声子是这种集体激发态的量子。类似地，金属或半导体中电子的等离子体振荡也是集体运动，等离子体子就是相应的集体激发的量子。

【准粒子】元激发的一种表示。用以描写多粒子体系的激发态的基本的激发单元。准粒子不是真实的实体的粒子，是在动力学考虑方案中引进的一个模型，随着动力学考虑的深入，需要引进不同概念的准粒子。

【极化子】带电粒子在极性介质中将受到屏蔽，在带电粒子周围有感应产生的极化云，这种感应的极化将随带电粒子一起运动。朗道将这种带电粒子及其感应的极化云作为整体称为极化子。在离子晶体或极性半导体中的传导电子是典型的极化子。

【激子】用于描写能在固体中传播的局域的元激发状态。它和固体

的类型有关,有两种极限情形。在分子晶体、稀有气体、固体、碱卤晶体中,原来在分子、原子或离子中出现的激发态,由于近邻格点原子间的耦合很强,这种激发可以很快地从一处传到另一处,而不伴随原子的运动。这种激发态称为 Frankel 激子。通常将 Frankel 激子的运动描写为电极化波的传播。这种激子在光吸收带或荧光辐射的特性上明显地表现它的特点。在 Si、Ge、CdS 和 Cu_2O 这一类半导体晶体中,光将电子从能量较低的价带激发到导带,在价带留下一个空穴,这些电子和空穴可以独立地运动,引起电导。然而,电子和空穴的库仑吸引力将它们结合成类氢的粒子——中性的可运动的激发态,这种激发态称为 Mott—Wannier 激子。其半径远比晶格常数大,而结合能却很小。在最简单情况下,其各能级能量 $E \propto n^{-2}$, 类似于氢原子。例如在 Ge 中,激子的结合能为 4MeV , 半径为 115Å ; 而氢原子相应地为 13.6MeV 和 0.5Å 。激子中的电子和空穴最终要复合,发出本征荧光辐射。由于激子是中性的,因此对光电导没有直接的贡献,但它们能陷于杂质原子或其他缺陷附近。商业上的发光二极管正是利用了束缚激子的发光。在 Ge 中,激子在充分的高密度和低温状态下,类似于水蒸气凝结成水滴似的能形成宏观的液滴。但在这种液相,电子和空穴不再束缚为激子而能独立地自由运动,成为电子空穴等离子体。

【等离子体振荡】金属中的价电子为整个晶体所共有,形成费米电子气,这些电子在带正电的离子的背景中运动,这种正负电荷浓度相等的体系类似于等离子体,若认为正离子是固定不动的,则由于电子之间的相互作用可能发生电子的集体振荡,这种振荡称为等离子体振荡。

【准电子】研究晶体中电子运动规律的一种单电子近似理论，它认为晶体中的电子除受一平均势场作用外，还受到一周期势场的作用，但此周期性势场很小，可以看作一种微扰，因此电子可以相当自由地在晶体中运动，根据这一设想，将晶格势场展开为傅丽叶级数，在一维的情况有：

$$V(x) = V_0 + \sum_n V_n e^{i\frac{2\pi n}{a}x}$$

a 为晶格常数，薛定谔方程可写成：

$$(\hat{H}_0 + \hat{H}') \psi(x) = E\psi(x)$$

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V_0$$

$$\hat{H}' = \sum_n V_n e^{i\frac{2\pi n}{a}x},$$

\hat{H}' 即为微扰势， \hat{H}_0 的本征值与本征函数分别为：

$$E_k^0 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V_0, \quad \psi_k^0 = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ikx}$$

k 为波矢量， L 为晶体的长度。选取 ψ_k^0 作零级近似函数，利用微扰理论便可以求出电子的能量和波函数。利用这种近似求得晶格电子的能量与自由电子不同，主要差别在于：在 k 空间中自由电子的能量 $E(k)$ 是连续变化的，而对晶格电子则将 k 空间划分为许多布里渊区，在每个布里渊区内电子能量是连续变化的，但在布里渊区的边界上能量可发生突变，于是出现禁带。

【电子—空穴液滴】在非常低的温度下，在锗和硅晶体中，因为生成的激子的浓度较高，导致激子凝聚的现象，这在许多方面类似于水分子在空气中凝成雾滴的情况。这个凝聚相叫做电子—空穴液滴，因为激子失去了它们的个性，小滴变成一种导电等离子体。通过激子蒸发或电子—空穴复合，液滴发生衰变，这复合过程会

产生特征的红外发光，每一个光子的能量略低于一个孤立激子的能量。如果激子的密度得到补充，液滴可以维持下去，连续激光照射是做到这一点的一个好方法。

【维格纳点阵】为简单起见，考虑单原子的固体。一个原子晶胞（称为维格纳-赛茨晶胞），用下列方法构成：画线把一个原子同它的第一组近邻和第二组近邻连结起来。其次，作垂直平分这些线的平面。这些平面划分出包围一个原子的固体图形。薛定谔方程的边界条件可表示成波函数和它的一级导数在这个晶胞表面上的条件。在维格纳—赛茨方法中，波函数用一组函数来展开；这组函数在原子晶胞内满足薛定谔方程，但不满足它表面的边界条件。假设晶体位在一个晶胞内是球形对称的，因此展开的函数是径向函数和球谐函数的乘积。然后，调整展开的系数使边界条件得以满足。

【金属电子论】研究金属中电子运动状态的理论。金属的许多有价值的特性都与金属中电子的运动有关，如导电性、磁性、超导性、导热性等。在大量自由电子之间的相互作用的研究方面，形成为金属电子的一个分支，即金属的多电子理论。近年来，又把量子场论引进多电子相互作用的分析中，它能解释很多电子理论中过去无法解决的复杂物理问题。

【点阵动力学】固体物理学领域的一个基础学科。研究晶体中的原子在平衡位置附近的振动和这些振动对晶体性质的影响。晶体中的各个原子均按不同的形状分布在不同的位置上，并在这个位置上作微小的振动，但其几何结构不变。研究点阵振动的频谱、点阵热力学函数、极性振动、介电性质、光学性质、点阵振动的色散

关系、点阵之间的力模型、点阵的相变学、点阵热力学、点阵热传导、点阵电传导、点阵的 X-衍射等自本世纪初陆续开始，50年代以来，点阵动力学实验得到很大发展，理论与实验互相促进，特别是在利用中子在晶体中的非弹性散射的实验直接测定了点阵振动的色散关系。

【声子】 晶格振动的简正模能量量子。这个概念类似于电动力学的光子。按照经典理论，这种简正振动的能量的许可值是连续变数，而按量子理论，任何一种简谐振子的能量只能取不连续的数值 $(n + \frac{1}{2}) h\nu$ ， n 是正整数， h 是普朗克常数， ν 是振子的频率， $\frac{1}{2} h\nu$ 称为零点能，其余部分是 n 个声子的能量。振动模能量的量子化对体系的热力学性质有重大的影响。因为每个振子的声子数必须是整数，因此振子系在平衡态时，频率为 ν 的声子的平均数由普朗克分布确定： $n^\circ = (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1}$ ， k 是玻耳兹曼常数。每个振子的平均能量是 $n^\circ h\nu$ ，它对比热的贡献是 $h\nu (dn^\circ/dT)$ 。除非温度 $T \gg \frac{h\nu}{k}$ ，振子的比热低于经典情形的数值 k ，因而整个晶格的热容小于 $3Nk$ 。绝缘体的热导率 $K = \frac{1}{3} cvl$ ， c 是晶格比热， v 是平均声子速度， l 是声子的平均自由程。在晶体中，如果原子间作用是简谐力，则在格波间没有能量的交换，可以认为声子的平均自由程为无穷大。格波间的能量交换可以看成产生或消灭某些声子。晶格的缺陷或者晶格原子作用力的非谐成分使声子的自由程变为有限值。最低阶的作用是三声子作用，在这种作用过程中动量 \vec{q} 和 \vec{q}' 的两个声子被消灭的同时产生一个动量 \vec{q}'' 的声子，或者一个声子被消灭的同时产生另外两个声子。晶格热导的理论可以建立在这种声子平均自由程的模型上，自由程的数值由声子间的作用和声子—散

射所确定。声子也能和晶体中的其他类型的激发相作用,例如和电子相作用。如将电子看成波矢为 \vec{k} 的波,那末它可以通过发射或吸收一个波矢为 \vec{q} 的声子从状态 \vec{k} 变成 \vec{k}' ,这时 $\vec{k}=\vec{k}' \pm \vec{q}$ ($\pm k$)。其中括号代表倒逆过程。声子—电子作用限制了电子的平均自由程,利用电子平均自由程的概念可以讨论电子的传导过程。再如,中子通过固体能够被声子所散射,通过吸收或发射声子而改变其能量和动量,借中子的非弹性散射可以确定声子的色散曲线即频率和波矢间的关系。

【电子-声子相互作用】用来描述点阵振动的各种频率、波矢和偏振的声子与电子的相互作用。实际上也是点阵振动和电子的相互作用。将原子视为离子和电子两部分,离子在各个点阵阵点上不停振动,因此它对电子的影响分为两部分;一是静离子所形成的周期电场对电子作用;另一部分为因离子振动而偏离周期电场时对电子作用的影响。

【非谐相互作用】晶体中处于平衡位置的原子间相互作用的势能将是稳定的,但原子总是在平衡位置附近作微小振动,它将引起相互作用势能的变化。势能对原子偏离作展开,如只取二次项而忽略高次项,原振动可近似为简谐振动,点阵振动的表达或可简化为相互独立的点阵波叠加。此时被忽略的高项项则为点阵的非谐相互作用项,它是非谐振动引起的效应。

【杂质模】如果晶体中混有杂质,使某些点阵原子被杂质原子取代,或者某些点阵原子出现空缺,则点阵原子之间的相互作用将随之变化,而必须用不同的振动模式来描述,这些模式被称为杂质模。

如果点阵中杂质原子比它取代的原子质量小，或者和周围原子的耦合比原来强，就可能产生在局部范围内出现比原来点阵振动谱中最高振动频率还高的高次模，称之为局域模；如点阵原子之间多一个原子或原子空缺，就会在原来振动模的空隙处出现新的振动模，称之为谱隙模；如果局域模出现共振则称之为共振模。

【表面模】表面是晶体周期性晶格中断的地方，可以看成是一种缺陷，它改变了表面附近原子之间的弹性系数和原子的排列情况，使得在原来无限晶体的体振动模频带之外产生一些局部区域在表面的振动模。其频率一般在体振动模的频率以下。根据晶格动力论分析，对“复式”元格，也可得声学支和光学支。对长表面声学波，也可用连续介质理论来分析，在可能的波矢 q 为实数时，振幅随着与表面的距离增加而指数衰减，这种波称为寻常瑞利波。如可能的波矢 q 为复数时，波将以振荡形式随距离衰减，这种波称为广义瑞利波，只存在于各向异性介质中。

【固体中的导热性】通常用符号 K 表示的热导率来量度固体中的导热性， K 是沿着一根长棒的稳定热流（每单位时间每单位面积传递的热量）与沿着该长棒的温度梯度的比率。在不同类型的固体中，热导率的变化很大，而且明显依赖于温度及固体的纯度和物理状态，在低温下尤其如此。由气体分子运动论，热导率可写成方程：

$$K = (\text{常数}) s v l,$$

这里 s 是每单位体积中的比热， v 是粒子的平均速率， l 是平均自由程。在固体中，热传导是由于晶格振动传导和电子传导，在绝缘材料中传导是通过晶格波；在纯金属中，晶格的贡献是可以忽略

的,而热传导主要是由于电子。在许多合金、不纯金属和半导体中,两种传导机构都有贡献。

【固体中的导电性】不同的固体具有不同的导电特性,通常用电导率 σ 来表示。根据电导率的数值及其与温度的依赖关系,可将固体分成三类:金属、半导体和绝缘体。

【霍尔效应】如果对一个通电的样品施一磁场,磁场的方向与电流垂直,则在垂直于电流和磁场的方向有横向电势差出现。这一效应于1879年为美国物理学家霍尔所发现,叫做霍尔效应。所产生的横向电场叫做霍尔电场。霍尔电场的大小与磁场强度及电流密度成正比。利用霍尔效应可制成霍尔器件。通过霍尔系数的测量,可确定半导体的导电类型和载流子浓度。还可以根据霍尔系数随温度的变化来确定杂质能级、禁带宽度和迁移率随温度的特性等。

【固体中的光电效应】射到固体、液体或气体上的可见光或其他电磁辐射,能释放出可在电场中运动的电荷,这个过程称为光电效应。光电效应包括以下三种不同现象:(1)外部的光电效应,通常称为光电发射,艾伯特·爱因斯坦最先在量子的基础上作了解释,在这个效应中,电子由固体(或液体)表面抛射到周围真空中,普通光电倍增管就是基于这种原理。(2)在气体中,经过所谓光致电离过程,可以产生电子及正离子。检测X射线的电离室就是这一效应的应用。(3)固体内部的活动电子和正“空穴”可以产生光电导或光生伏打效应。光电导用于电视摄像管,由复印过程及控制器件(用一种简单的外部电池供电)。光生伏打电池是一种能量转换器件,它自己供电。曝光表、太阳能电池是其应用例子。除了

这三个现象外，还有称为俄歇效应或自电离效应的原子内部光电过程—X射线吸收一部分可以归因于俄歇效应，在这种效应中X射线量子的光电吸收，使电子从原子抛出。由于光电激发或荧光也可以发生X射线吸收。最后，还有一种反光电效应，它只是正常光电效应的相反过程。在这个效应中，固体吸收一个电子，出现一个光子。通常不研究反光电效应，因为它是很难测量的过程。

【固体中的光散射】介质中沿一定方向传播的光，遇到不均匀物质时，会改变它原来的运动方向而向各个方向发散，即光子与有关微粒碰撞后，改变了原来运动的方向，称光的散射。如果光子与微粒发生碰撞，碰撞前后的光子动量和能量不变，只是光子运动方向改变，称弹性碰撞的散射。这时，散射光的频率和波长等于入射光的频率和波长；如果光子与微粒碰撞时把一部分能量转交给微粒，使微粒处于转动—振动的激发态，称非弹性碰撞的散射。这时，散射光的频率小于入射光的频率，而波长大于入射光的波长。按散射的物理现象，可分为：（1）瑞利散射，当光束在介质中传播时，其中一部分光被直径（约 $\frac{1}{5}\lambda$ — $\frac{1}{10}\lambda$ ）小于波长很多的分子散射时，称为瑞利散射。瑞利散射是一种弹性散射，即入射到介质中的光子与介质中物质分子相互碰撞时不发生能量交换；瑞利散射光的频率（或波长）与入射光的频率（或波长）是相同的，只是运动方向改变而偏离原来的传播方向。（2）喇曼散射，当光通过介质时，发现散射光中除了与入射光频率 ν_0 相同的瑞利散射光外，在瑞利散射光线的两侧还有频率 ν_s 、 ν_{as} ，……等散射光。这些由分子振动或固体晶格振动所引起的散射，称为喇曼散射。它是一种非弹性散射。在散射过程中，光和介质的相互作用使介质放出或

吸收光学声子，改变了光的频率，使散射光的频率（或波长）不同于入射光的频率或波长。（3）布里渊散射，光通过介质时，由于光波电场引起的电致伸缩，使光波与介质的弹性波发生耦合，造成光的散射。这种散射是由介质的弹性波引起的。布里渊散射是一种非弹性散射，由介质密度的起伏引起。散射光的频率不同于入射光的频率 ν_0 ，但频移很小。（4）受激散射，高强度的激光通过介质时产生的具有相干辐射的散射效应。受激散射光按指数规律放大，光谱线宽明显变窄。（5）共振喇曼散射，当激光束通过适当的介质，介质对入射光发生强烈的共振吸收时，会使微弱的自发散射光突然增加几个数量级。通常仅有一条喇曼谱线获得大的增益，这就是共振喇曼散射。共振喇曼散射的产生是入射光频率与介质中某个中间态的频率相一致而引起的。它发生在具有特定能量关系的能态之间。（6）自旋反转喇曼散射，在外磁场作用下，激光束在电子上散射会引起电子自旋方向的反转，喇曼散射光的频率便是 $\nu_s = \nu - g\beta H$ 及 $\nu_{as} = \nu + g\beta H$ ，这样的喇曼散射称自旋反转喇曼散射，式中 ν 为入射激光束频率， H 是外磁场强度， β 是玻尔磁子， g 称为电子的 g 因子。

【固体中的扩散】以分立原子的形式，穿过晶态固体点阵的实际的质量输运称之为扩散。对于一大批固体效应，如溶解性、相变、成核、退火、脱硫、再结晶、氧化、腐蚀、蠕变、焊接、烧经、回火、照像过程以及离子导电性等，扩散过程都是基本的，几乎固体中的任何变化——它的形状、强度，甚至它的颜色——通常是与点阵内的质量运动有关的。下面简述其扩散机制。对扩散的科学兴趣集中在阐明基本的原子机制上，这种机制既允许扩散发生而又不破坏点阵的固体性。为解释观察到的体效应所需要的单个原

子跳跃率是惊人的：在熔点以下较低的温度，固体中每个原子必须从一个“固定的”点阵位置跳到另一位置，每秒超过百万次。现已提出了大量模型，用精确的放射性示踪测量最后才有可能确定基本的原子机制。很清楚，只是由于晶格的不完整性才发生扩散。完整的晶格不允许质量运动。当温度低于绝对熔解温度一半左右时，扩散运动大多局限在表面及固有的无序区域：位错、晶粒间界及被高能粒子穿过所搅乱了的通道。在高温下，真正的体扩散是占优势的，那里，原子迁移通过整个体积。在大多数固体中，已查明对体扩散起作用的基本缺陷是空位——空缺的点阵原子；在有些情况中，缺陷是填隙子——位于非点阵位置的额外原子。这些缺陷可以在自由表面外部形成，也可在内部沿位错的割阶上形成。为了使熵达到最大值，缺陷倾向于点阵间的徙动达到无规分布。扩散流密度决定于裴克第一定律 $\vec{j} = -\vec{D}\nabla\vec{C}$ ，浓度 \vec{C} 的分布由裴克第二定律（连续方程）决定。对立方晶体，扩散系数 D 为标量，连续方程为 $\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{j} = \nabla \cdot (D\nabla C)$ ，其解与初始条件和边界条件有关。扩散系数是表征扩散运动快慢的量，单位是 $\text{米}^2 \cdot \text{秒}^{-1}$ ，一般为二阶张量。其值与粒子的热运动速度及散射因素有关。扩散系数 D 和温度的经验关系为 $D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{k_B T}\right)$ ，式中 ϵ 是有关的扩散过程的激活能， D_0 是常量，称为频率因子。其与晶体的熔点 T_m 有如下关系： $D_0 \propto \exp\left(\frac{\epsilon}{k_B T_m}\right)$ 。晶体中原子的扩散系数 D 与扩散机构有关。在较复杂的边界条件下，或存在化学梯度或热梯度时，扩散方程的解将更复杂，并且变成被测扩散系数与原子参量相关的问题。为了区分出在非平衡条件下对扩散有贡献的多种基本效应，初始界面的移动或标志物的仔细测量是对示踪测量的重要补充。

【固体中的相变】固体从一种形态、结构或状态转变为另一种形态、状态及结构。多数固体在加热或冷却到一定温度时，仍保持固体状态，但内部微观结构发生一些变化，从一种相态转变成另一种相态，这种现象于金属和晶体加热或冷却时尤为常见。

【晶体结构】晶体中原子、分子、离子或这些粒子集团以一定的方式排列形成一定的晶体结构。晶体结构可以千变万化，但都可以看作是一定的物质单元——晶胞代表的基元，在空间点阵的周期排列，而空间点阵是反映晶体三维周期性质的一种数学上的排向，有14种，即14种布喇菲点阵。详解参见“空间点阵”。

【晶体】自然界的固态物质，根据其结构特征，即原子或分子排列特征，可分为晶体和非晶体两大类。晶体与非晶体的最主要的差别在于组成晶体的各种粒子在空间呈有规律的周期性重复排列。

【单晶体】在晶态固体中，原子或分子按规则方式堆积，形成三维图案。为获得这个图案，可以在三维方向上重复某种图案单元，这种单元称为晶胞。当图案的周期性延伸至整块材料时，就称为单晶。晶核长大时，如果没有二次成核，也没有撞到其他晶体，就可以形成单晶。

【多晶体】由若干不同取向的小单晶体（即晶粒）组成的一种晶体。由于包含大量不同取向的晶粒，故其物理性质表现为各向同性。金属和合金一般都是多晶体。用金相方法（把金属表面抛光后用化学腐蚀液腐蚀，再用金相显微镜观察）和 X 射线衍射方法可以鉴定单晶体和多晶体。用粉末法可以测定多晶体的结构。

【晶面角守恒定律】在固体物理学中，晶面有两种不同含义：(1)指单晶体外形的表面。单晶体外形往往是一个凸多面体。这些多面体的表面称为晶面。晶面角守恒定律所指的晶面属这一种。(2)指通过空间点阵中不在一直线上三个阵点的平面。这样定义的晶面同时通过无限个阵点，是平面点阵。晶体外形的表面就是外露的平面点阵。晶面角守恒定律是关于外形晶面的一条实验定律。定律指出：同一物质的不同晶体在同一温度和压强下晶面的数目、大小、形状可能有很大的差别，但对应的晶面之间夹角是恒定的。因此，晶体本身的大小和形状，不反映晶体品种的特征，而外形晶面之间的夹角才是晶体品种特征的反映。由于晶体热膨胀的各向异性，晶面角将随温度而变。

【有理指数定律】关于单晶体外形晶面的一条实验定律。该定律指出：任意晶面在适当选择的三维坐标轴上的截距（用选定的长度单位来量度）都是有理数。具体说来，先在晶体上选择三维坐标系，其坐标轴平行于三条晶棱。再选一个与三个坐标轴都相交的晶面。此晶面在三轴上的截距 a 、 b 、 c 取为沿各轴的长度单位。则任意别的晶面在三轴上的截距是 $a' = ma$ ， $b' = nb$ ， $c' = pc$ 。实验发现， m 、 n 、 p 是有理数。有理指数定律反映晶体原子排列的周期性，也完全可以从理论上得到证明。

【晶带】相交成平行晶棱的一组晶面。这些晶棱的方向称为晶带轴。晶带不一定是晶体外表面。在晶体结构中凡平行于同一晶向的所有晶面组成一个晶带。该晶向就是晶带轴。以 $[uvw]$ 为晶带轴的晶带中所有 (hkl) 晶面满足下式： $hu + kv + lw = 0$ 。

【空间点阵】 又称空间格子，简称点阵或格子。点在空间中周期性的规则排列。空间点阵是一种数学上的抽象，它反映晶体中物质分布的三维周期性质。X 射线衍射对晶体的微观结构的研究指出，对于物质的密度或其它物理性质 Q ，如果用三个矢量 a 、 b 、 c 表示三维重复周期，则有 $Q(\vec{r}) = Q(\vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c})$ 。对于任何位置矢量 \vec{r} （选定任意坐标原点）和任何三个整数 u 、 v 、 w 上式都成立（不考虑晶体表面）。上式表示 \vec{r} 和 $\vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$ 各点物质分布相同，物理性质相同。从 \vec{r} 开始， $\vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$ 所表示的所有的点（称为阵点）组成一个无限的三维空间周期性的点阵。空间点阵学说是19世纪布喇菲提出的。

【晶系】 晶体结构根据晶胞对称性的分类。按晶胞三棱边长度 a 、 b 、 c ，和它们之间的夹角 $\alpha = \vec{b}\Delta\vec{c}$ ， $\beta = \vec{c}\Delta\vec{a}$ ， $\gamma = \vec{a}\Delta\vec{b}$ ，分为七个晶系：三斜晶系、单斜晶系、三角晶系、正交晶系、四方晶系、六角晶系、立方晶系。

【对称性】 晶体在外形和宏观物理性质中所表现出来的对称性。晶体的各种宏观对称性来源于晶体内部原子排列的周期性。这种周期性又反过来对宏观对称性所允许的对称操作施加严格的限制。对称操作不能破坏晶格的周期性。在此限制下，10种对称元素（1，2，3，4，6度旋转轴和 $\bar{1}$ 、 $\bar{2}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{4}$ 、 $\bar{6}$ 度象转轴）所组合成的对称操作群共32种，这32种称为点群。晶体对称性就是有也只能有这32个不同的类型。对称性中最直观的是几何形状的对称性。如以平面图形为例，正方形只有旋转 $\frac{\pi}{2}$ ， π ， $\frac{3}{2}\pi$ 才会与自身重合（即按对称

元素4, 2, 4+2进行对称操作后结果不变); 圆形对任何绕中心的旋转和以任何直径作反射成像都不变; 等腰梯形对两底中心联线反射成像不变; 不规则四边形则不存在任何左右对称的反射线, 其对称性最低。一种晶体的对称操作越多, 表明其对称性越高。

【点群】由点对称元素组合而成的操作群。用以描述晶体的宏观对称性。点对称元素共有10种, 即1、2、3、4、6度转轴和每种转轴加上对原点的中心反演。这10种对称元素由于受到布喇菲格子周期性的限制, 只能组合成32个不同的类型。因此, 晶体的宏观对称性由32个点群来概括, 它们是: 三斜晶系所属的 C_1 、 C_2 (S_2) 点群; 单斜晶系所属的 C_2 、 C_s 、 C_{2h} 点群; 正交晶系所属的 D_2 、 C_{2v} 、 D_{2h} 点群; 三角晶系所属的 C_3 、 C_{3i} (S_6)、 D_3 、 C_{3v} 、 D_{3d} 点群; 四方晶系所属的 C_4 、 C_{4h} 、 D_4 、 C_{4v} 、 D_{4h} 、 S_4 、 D_{2d} 点群; 六角晶系所属的 C_6 、 C_{6h} 、 D_6 、 C_{6v} 、 D_{6h} 、 C_{3h} 、 D_{3h} 点群及立方晶系所属的 T 、 T_h 、 T_d 、 O 、 O_h 点群。以上所列是点群的熊夫利符号, 其中 C 表示转动真轴, 下标表示非真轴的阶数; i 表示对称中心, 一个对称中心构成一个反演操作; D 表示二重轴, 它是与转轴 C 垂直的二度转轴, 下标表示其个数; h 表示与转轴垂直的对称面; v 表示与转轴平行的对称面; d 表示平分相邻两个二重轴之间夹角的对称面; T 表示正四面体对称; O 表示正八面体对称。

【平移群】平移是把空间点阵平行于某一方向位移到与原始位置不能区别的位置上去的一种对称操作。如果用 a 、 b 、 c 表示空间点阵的基矢, 则平移对称操作可表示为 $T = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$, 其中 u 、 v 、 w 是任意整数。任意两个阵点都以这种形式的平移矢量连接起来。平移群是空间点阵中平移对称操作的集合。可以证明: 由于宏观对

称元素加于空间点阵上的限制，平移对称操作的所有可能的不同集合共有14种。每一种集合都符合群的定义，称为一种平移群。14种平移群也称为14种布喇菲点阵。

【空间群】 空间点阵中宏观对称操作和微观对称操作的集合。可以证明：由于空间点阵的周期性的限制，对称操作所有可能的不同的集合共有230种。每一种集合都符合群的定义，称为一种空间群。晶体的一切可能表现出来的对称性（晶系、点群、平移群）都由空间群所决定。230种空间群也称为230种微观对称类型。

【简单点阵】 只在各晶胞的顶角上有原子的空间点阵。在简单点阵中每个晶胞有一个原子。在简单点阵中所有原子本身性质相同，每个原子周围环境也完全相同。例如，具有体心立方结构的碱金属和具有面心立方结构的铜、银、金都是简单点阵。具有密排六方结构的 Be、Mg 和具有金刚石结构的 C、Si、Ge 则不是简单点阵，因为在密排六方结构中相邻两层原子的周围环境不同，而金刚石结构是由两个面心立方结构套构而成的，处于一个面心立方结构的原子与处于另一个面心立方结构的原子周围环境不同。

【复式点阵】 即复点阵。由若干相同的布喇菲点阵相互位移套构而成的点阵。会有两种或更多种原子（离子）的点阵是复点阵，例如 NaCl 点阵是由一个 Na^+ 的面心立方点阵和一个 Cl^- 的面心立方点阵套构成的复点阵。含有同一种原子但每个原子的周围环境并非完全相同的点阵也是复点阵，例如具有密排六方结构的 Be、Mg 和具有金刚石结构的 C、Si、Ge 是复点阵。在密排六方结构中相邻两层原子的周围环境不同。金刚石结构是由两个面心立方结构沿

立方体对角线位移四分之一套构而成的，处于一个面心立方结构的原子与处于另一个面心立方结构的原子周围环境不同。

【倒易点阵】考虑一个空间点阵（或晶体），它的基本平移矢量用 \vec{a} 、 \vec{b} 和 \vec{c} 表示。这些矢量就是晶胞的边，它们的长度分别为 a 、 b 和 c 。因为在整个空间点阵中，各晶胞以同样的取向紧密地相互叠在一起，则任意晶胞顶点的矢量可写成 $\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$ ， u 、 v 、 w 为整数，是矢量 \vec{r} 端点的坐标。我们定义此空间点阵的反点阵。令反点阵晶胞的边为 \vec{a}^* 、 \vec{b}^* 和 \vec{c}^* ，则在反点阵中指到任意晶胞顶点的矢量为 $\vec{r}^* = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$ ， h 、 k 、 l 为整数。令倒易轴 \vec{a}^* 垂直于 \vec{b} 和 \vec{c} ， \vec{b}^* 垂直于 \vec{a} 和 \vec{c} ， \vec{c}^* 垂直于 \vec{a} 和 \vec{b} 。按 $\vec{c}^* \cdot \vec{c} = 1$ 规定 \vec{c}^* 的长度。即 $c^* c \cos\delta = 1$ ，可见 $c \cos\delta$ 是空间点阵一个面的晶面间距，而 \vec{c}^* 的长度是这个面间距的倒数。同样也可定义其它的倒易点阵轴： $\vec{a}^* \cdot \vec{a} = \vec{b}^* \cdot \vec{b} = \vec{c}^* \cdot \vec{c} = 1$ 。则可知若晶体的轴之间互成直角的话，那么倒易空间轴相互也成直角且平行于晶体轴。在这种情况下，倒易点阵轴的长度是晶体轴长的倒数。而一般情况下，倒易轴与晶体晶胞体积 V 存在关系：

$$V = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}, \quad \vec{a}^* = \frac{(\vec{b} \times \vec{c})}{V},$$

$$\vec{b}^* = \frac{(\vec{a} \times \vec{c})}{V}, \quad \vec{c}^* = \frac{(\vec{a} \times \vec{b})}{V}.$$

【晶体衍射】晶格的周期性特征决定了晶体可以作为波的衍射光栅，由于晶体中原子间距的数量级约为 10^{-10} 米，因此只要所用波的波长小于这个数量级时，就能观察到干涉现象，从而得到衍射图形（照片上的斑点或条纹等），这种利用晶体作为光栅的衍射，称为晶体衍射。由于 X 射线、电子束和中子束都可能得到与原子

间距同数量级的波长，因此都可以作为以晶体作光栅发生衍射的波源。衍射图形在一定的程度上反映了晶格中原子排列的情况，晶体衍射是探索物质微观结构以及结构缺陷等问题的强有力工具。

【密堆积结构】晶体中的原子在没有外来因素的影响下，由彼此之间的吸引力会尽可能地靠近，以形成空间密堆积排列的稳定结构。有两种密堆积结构：立方密堆积和六角密堆积。两种密堆积结构的空间利用率（晶胞内原子总体积占晶胞体积的百分数）均为 $\frac{\sqrt{2}}{6}\pi \approx 74\%$ 。

【晶类】自然界的固态物质，根据其结构特征，即原子或分子排列特征，可分为晶类和非晶类。晶类一般都具有规则多面体的对称外形，从微观上看，是由在空间排列得很有规律的微粒（离子、原子或分子）组成的。晶类物质在发生液—固态转变时有固定的熔点和凝固点。在一定压力下，给一种晶体加热到一定温度，晶体开始熔化，如果继续加热，晶体继续不断地熔化直至全部为液态。在液态和固态二相平衡时，晶体未全部熔化，温度保持恒定不变，此时熔化速度等于凝固速度，该温度即为熔点或凝固点。晶体具有各向异性，许多性质是随晶体位向而变的，且显示出晶体的对称性的影响。这是由于组成晶体的各种粒子在空间呈有规律的周期性重复排列，为长程有序，使得在不同晶面和晶面上微粒排列的方式和分布的密度不一样，从而引起晶体在各个方向上的物理、化学和力学等性质上的差异。根据组成晶体的微粒的种类，可以把晶类分为四类：离子晶体、原子晶体、金属晶体和分子晶体。离子晶体由正负离子组成。原子晶体是由原子以共价键结合在一起组成。

金属晶体由金属键将金属原子结合起来而构成。分子晶体是靠分子间力结合在一起来的。

【晶体生长理论】所有晶态固体皆由晶体所组成，晶体的生长通常按照下面的顺序发生：（1）结晶物体的分子通过介质（或溶液）向晶体表面扩散；（2）晶体表面的这些分子扩散到表面的特殊位置上；（3）进入晶体的分子在这些位置上结合起来；（4）结晶热由晶体表面扩散出来。晶体生长的速率可以由这四个因素来控制。晶体的生长是从结晶中心最初形成开始的。即众所周知的成核作用，提高晶体组分的过饱和度，即单独提高温度，晶体生长的速率就加快。然而在许多实际情况下，过饱和度随温度的降低而升高。在这种情况下，晶体生长速率在开始随着温度的降低而升高，到达最大值，而后减小。常常由于某些微量杂质使生长速率大大减小。成核后，在介质中瞬时生长成互相独立的晶体。然而，由于向几个不同的方向生长，最后它们将互相碰撞，并且会形成晶粒间界。在比较高的温度下，在这些多晶集合体中，晶粒的平均大小，在所谓晶粒生长过程中，随时间的延长而增大。为什么会这样呢？因为原来大晶粒在吞并小晶粒中生长起来。

【晶体生长技术】单晶体原则上可从固态、液态或气态生长而成。晶体生长是用一定的方法和技术（如熔体生长法和气相生长法），使单晶体由液态或气态结晶成长。由液态结晶又可分为熔体生长或溶液生长两大类。

【晶体缺陷】理想的晶体结构把金属晶体中原子的排列看作是完全规则的、整齐的，而且每个原子在结点上静止不动。但众多的实验

结果表明,实际的晶体比理想的晶体结构复杂得多。晶体中由于原子的热运动以及受到温度、辐照、压力加工等各种外界条件影响,使得在原子规则排列中出现原子排列不规则区,导致晶体结构的不完整性,这些不规则区称之为“缺陷”。实际晶体是原子的规则排列和不规则排列构成的统一体,“缺陷”的存在对晶体的机械性能、物理性能、化学性能及结晶、形变、相变过程都有很大影响。“缺陷”本身也有一定结构,一定的组态及一定的运动规律。晶体缺陷按照其几何特征可分为三类:(1)点缺陷:缺陷尺寸在间隙三个方向上都很小,相当于一个原子的大小,亦称零维缺陷,如空位,间隙原子、杂质原子和溶质原子。(2)线缺陷:缺陷尺寸在两个方向上都很小,在另一个方向上尺寸较大,这种缺陷称为一维缺陷,比如位错。(3)面缺陷:缺陷尺寸在一个方向上很小,在另外两个方向上较大。称为二维缺陷,如晶界、相界、晶体表面。此外,有些资料上把第二相粒子、夹杂物及空位团称作体缺陷,因为它们在三维方向上都有相当大小的尺寸。

【点缺陷】晶体中的原子以结点平衡位置为中心,不停地进行热振动,振动频率取决于原子间作用力,一般为 10^{12} — 10^{13} 次/秒,而振幅与温度有关。一定温度下,原子热振动的平均能量是一定的,但是各原子能量并不相同,是有起伏的,故在一定温度下,部分具有超额能量的原子有可能克服周围原子对它的束缚(克服能垒),而脱离原来的平衡位置,产生空位。离开平衡位置的原子有两种去处,一种可能跑到表面,此时产生的空位称为肖脱基空位;另一种可能跑到点阵间隙位置,此时形成弗兰克尔空位。金属晶体中常见的是肖脱基空位。另外还有一种点缺陷是杂质原子,当其尺寸大小与基体原子相近时,它能以置换的形式存在于结点位置上;若其尺

寸相对基体原子很小时,以间隙原子形式存在。晶体中的点缺陷不是固定不动的,原子热振动及能量起伏提供了点缺陷产生迁移运动的条件。空位在晶体中的迁移是随机的,无规则地作布朗运动,它受温度的强烈影响,间隙原子也可做同样的迁移运动。另外,点缺陷是热力学稳定的缺陷,一定温度下对应一定的热力学平衡浓度。点缺陷的存在对金属性能有影响,(1)会使在金属晶体内运动的电子发生散射,使电阻增大,有人通过实验得到电阻率与绝对温度 T 之间关系为 $\rho = A + BT + CT^2 + D \exp(-E_V/kT)$,式中前三项为随 T 升高、热振动加剧而引起的电阻率变化,第四项为温度升高引起空位浓度增加而造成附加电阻率 $\Delta\rho$ 。(2)点缺陷数目增加,晶体体积膨胀,密度减小。当晶体内产生一个空位时,体积膨胀大约为0.5个原子,产生一个间隙原子引起的体积膨胀相当于1个原子。另外点缺陷对晶体的相变,扩散、回复、高温形变及化学热处理均有较大影响。

【色心】透明晶体中由点缺陷、点缺陷对或点缺陷群捕获电子或空穴而构成的一种缺陷。它引起附加的光吸收带,使晶体着色,并因此而得名。色心的存在对某些固体电子器件带来危害,但大量人为控制的色心材料在诸如半导体、发光、信息存储、光电导、激光等技术中有着广泛的应用。

【位错】从几何特征上看,它是在一个方向上尺寸较大,而另外两个方向上尺寸较小的线缺陷。但从原子尺度来看,它不是一条线,而是一个直径为3—5个原子间距,长为几千至几万个原子间距的管状原子畸变区。在位错区内原子排列并非完全杂乱无章的,而是存在着特定的规律。位错有几种基本类型:刃型位错、螺型位错和

混合位错等。位错的存在对晶体的生长、相变、形变、扩散、再结晶等一系列行为，以及对物理、化学性质都有十分重要的影响。

【位错的守恒运动】位错所具有的重要特点之一是它可以运动。也正因为位错要受到一定大小的力的作用之后才可以产生运动，所以晶体具有一定的强度。位错有两种运动形式，一种为保守运动，也称之为守恒运动，即滑移，另一种为非保守运动。凡含有滑移的位错运动都导致晶体的塑性变形。位错线是已滑移区与未滑移区的分界线，位错运动时，在其所经过的区域晶体发生了相对滑动，滑移是指柏氏矢量在位错运动平面的法线方向上无分量的运动，位错运动平面是与柏氏矢量平行的，因此使得位错运动后晶体不发生体积变化，所以亦称之为保守或守恒运动。形变是依靠晶体内位错的运动。晶体发生塑性形变的机理是位错的滑移运动。因此，晶体发生塑性变形需要有一个大于某个值的切应力，它作用于躺在滑移面的位错上，使该位错进行滑移。宏观的塑性变形量，是晶体中许许多多位错在许许多多的滑移面上，共同进行滑移的结果。滑移的阻力在于晶格阻力，只有当位错受力达到一定的值时，足以克服晶格阻力和其它各种缺陷所造成的阻力时，位错才可以滑移。

【滑移】滑移是指晶体相邻的两部分沿着某一晶面在某个晶向上彼此间作相对的平行滑动。滑动距离是滑动方向上原子间距的整数倍，滑动后并不改变晶体内部原子原来的排列规则性。对表面经过抛光成镜面的单晶试样进行拉伸，发生塑性变形后，在原先抛光的表面上由于发生了相对滑移，出现了许多平行的条痕和高低不一的台阶，用电子显微镜观察条痕，发现每一条痕是由许多密集

的平行线群所组成，是某些晶面沿着某个方向发生滑移留下的痕迹，根据线群间距即台阶大小的不同，分别称为滑移带和滑移线。一个滑移面和位于该滑移面上的一个滑移方向的组合称为滑移系。滑移与晶体结构有关的三条规则：(1) 滑移总是沿着原子最密排的方向，即原子间距 b 最小的方向上进行。(2) 滑移通常出现于原子最密排的方向平面。称之为滑移系的原子最密排原理。这是因为最密排的晶面也是一组面间距 a 最大的晶面，这些晶面在相对切位移时阻力最小。(3) 滑移首先在晶体取向有利的，切应力达到位错滑移所需的 $P-N$ 力的滑移系上进行。滑移一般可分为单滑移、多滑移、交滑移等几种。

【旋错】即螺型位错，是位错的一种基本类型。滑移面上、下两部分作切滑移，滑移矢量 \vec{b} (滑移方向) 和已滑移区与未滑移区的分界线 \vec{t} 互相平行，这种位错线 \vec{t} 与滑移矢量 \vec{b} 平行的位错，称之为旋错。过渡区顶端在晶体中的连线为位错线。但原子错动最大或晶格畸变最大的地方是过渡区螺旋面的中心线，这才是真正的螺型位错线。所以螺型位错在空间实际上为一个螺旋状的晶格畸变管道，宽仅为几个原子间距，长则可穿透晶体。旋错有左旋和右旋之分。如果符合右手螺旋定则，则为右旋位错 (以右手拇指表示螺旋面前进方向，四指表示螺旋面旋转方向)；反之，符合左手螺旋定则为左旋位错。刃位错的正、负是人为规定的，随晶体位置而变，一般只有对同一晶体，同一滑移面上的不同位错进行比较时这种区分才有意义；而螺位错是根据其是否符合右手或左手螺旋定则，而确定为右旋和左旋，它不随晶体的位置而变。

【面缺陷】二维尺度很大而第三维尺度很少的缺陷，又称二维缺陷。

晶体中常见的面缺陷主要有两种：晶界和小角度晶界，小角度晶界又称之为亚晶界。实际晶体基本上为多晶体，是由大量外形不规则的小晶体即晶粒组成的。每个晶粒基本上可视为单晶体，所有晶粒的结构完全相同，但彼此之间的位向不同，位向差为几十分、几度或几十度。晶粒与晶粒之间的接触界面叫晶界，随相邻晶粒位向差的不同，其（晶界）宽度为5—10个原子间距，晶界上原子的排列不是非晶体似的混乱排列，但规则性较差。原子排列的总特点是，采取相邻两晶粒的折衷位置，使晶格由一个晶粒的位向，通过晶界的协调，逐步过渡为相邻晶粒之位向。晶界上一般积累有较多的位错，也是杂质原子聚集的地方。具体研究一下，晶粒也是由许多位相相差很小的所谓亚晶粒组成的。亚晶粒的结构若不考虑点缺陷，可以认为是理想的。亚晶粒之间的位向差只有几秒、几分，最多达1—2度。亚晶粒之间的边界叫做亚晶界，亚晶界是位错规则排列的结构。亚晶界是晶粒内的一种面缺陷，对材料的性能也有一定的影响。另外，由于空位在二维平面之累积，还有空位片，由于间隙原子在二维平面之累积，还有间隙原子片等。

【层错】晶体中原子结构呈堆垛排列，如果由于某种原因而使密排面的堆垛次序遭到了破坏，从而使得整个一层密排面上的原子都发生了变化错排，这种缺陷我们称之为层错。层错是一种面缺陷。一般说来，层错可分为两种类型：内禀层错和外禀层错。内禀层错亦称之为抽出型层错，它相当于在正常的堆垛次序中抽出一层而形成的。外禀层错亦可称之为插入型层错，它相当于在正常的堆垛次序中加入一层堆垛面而形成的。在面心立方晶体中常有这两种结构的层错。层错的产生，破坏了次近邻原子间的相互关系，使晶体的能态得到升高（层错能），但并未破坏最近邻原子之间的关系。

也就是说在层错外，只有从连续三层原子面的关系中，才能发现与正常堆垛次序的差别。所以，一般来讲，层错能的数值较低，从实验中可以测出层错能。出现层错的几率与层错能有关，层错能越高，出现层错的几率越小。

【晶粒间界】晶粒与晶粒之间的接触界面，即晶界。随相邻晶粒位向差的不同，其晶界宽度约为5—10个原子间距。晶界在空间分布成网状；晶界上原子的排列不是非晶体式的混乱排列，但规则性较差。原子排列的总特点是，采取相邻两（晶）粒的折衷位置，使晶格由一个晶粒的位向，通过晶界的协调，逐步过渡为相邻晶粒的位向。晶界上一般积累有较多的位错，位错的分布有时候也是有规则的。晶界也是杂质原子聚集的地方。杂质原子的存在加剧了晶界结构的不规则性，并使结构复杂化。晶粒间界是主要的面缺陷，在晶界上，原子的排列偏离平衡位置，晶格畸变较大，位错密度较高（可达 10^{12}cm^{-2} 以上），原子处于较高的能量密度状态，原子的活性较大，另外，由于有大量位向不同的晶粒的统计分布，各种性能在不同的方向上表现出近似的平均值，这是多晶体的在各个方向上性能相近的性质，叫做多晶体的伪各向同性。

【相界】若相邻两晶粒不仅位向不同，而且结构也不同，有时成分也不相同，则它们代表两个相，它们之间的分界面，称为相界面，根据界面上原子排列特点和匹配程度的不同，相界面分为三类：共格界面、非共格界面和半共格界面。（1）在两相邻晶体界面上，原子成一一对应的完全匹配，即界面上的原子同时处于两相晶格的结点上，为相邻两相晶体所共有，这种界面称为共格界面。由于晶面间距毕竟不是完全相等的，故形成共格界面时，必然在界面附

近产生应变,使界面上原子达到匹配。因而,共格界面常伴有应力、应变。(2)半共格界面:当两相邻晶面间距相差较大,则在界面上不可能做到完全一一对应形成半共格界面。假如 α 、 β 为两相邻晶体,它们的晶面间距 $a_\alpha > a_\beta$,且 $5a_\alpha = 6a_\beta$,则每经过 $5a_\alpha$ 或 $6a_\beta$,界面两侧出现相互匹配的晶面,在 $5a_\alpha$ 范围内其它晶面总存在一个多余的 β 相晶面,即一个刃型位错面,且每隔 $5a_\alpha$ 出现一次,故整个半共格界面由位错和共格区组成。

【亚结构】晶粒不是由严格平行的原子层构成的单晶体。实际上,晶粒是由尺寸为 10^{-5} — 10^{-3} cm的若干个单个块状晶体组成,这些小晶体的晶面彼此旋转一个很小的角度(数分)。晶粒的这种结构称嵌镶块结构,组成嵌镶块结构的块状晶体称之为嵌镶块。材料的各种加工过程改变着嵌镶块的大小和位相,从而导致(晶体)性能的变化。嵌镶块常合并成较大的块状晶体,此称亚结构,每个亚结构包含大量的嵌镶块,亚结构彼此相对位向差为数度。亚结构与嵌镶块一样,是晶体中的结构缺陷。这样,晶粒彼此间相对位向差可大到数十度;晶粒是由位向差只有数度的亚结构组成的;亚结构又是由位向差很小(数分)的嵌镶块组成的。然而,并不一定总是这样的三级结构。在许多情况下,晶粒可能仅由亚结构组成,而其内部不存在嵌镶块结构。使晶粒碎化为亚结构的热处理过程称之为亚结构化或者多边化。若亚结构粗大时,在光学显微镜下便能顺利地观察到。

【孪晶】接合面两边的原子排列成镜面对称的一对晶体。接合面就是孪晶界面,通常称之为孪晶面。孪晶有两种类型,一种是通过晶体生长形成的生长孪晶,如果是在退火时生长成的,又称之为退

火孪晶，另一种是通过塑性变形形成的机械孪晶，又称形变孪晶。形成孪晶的过程称为孪生。形成机械孪晶的过程是塑性变形的一种基本机制，是一种特殊的切变过程。机械孪晶是在相当大的切应力作用下，晶体沿着一定晶面上的某一特定晶向移动而形成的，这个晶面就是孪晶面或孪生面，这个晶向则称为孪晶方向和孪生方向，晶体的孪生面与孪生方向的组合，称为孪生系，孪生系又称孪生素素，仅仅由晶体的结构类型所决定。一些不易产生机械孪晶的面心立方结构的金属和合金，例如铜、镍等，经再结晶退火后，其晶粒中会出现孪晶，这种在退火过程中形成的孪晶，称为退火孪晶，也叫做再结晶孪晶或生长孪晶。有三种典型的退火孪晶形态：贯穿晶粒的完整退火孪晶，一端终止于晶粒内的不完整退火孪晶，晶界交角处的退火孪晶。孪晶两侧互相平行的孪晶界是共格孪晶界。孪晶终止于晶粒内的尖端或台阶处，则是非共格孪晶界。退火孪晶是在再结晶晶粒长大过程中形成的。

【晶体的键合】各种元素原子的化学活泼性，主要取决于它们的外层电子数目和空间分布。许多类型的物质要在很低的温度时才液化或固化，而另外一些物质，有很高的熔点，这说明在固态时它们具有不同强度的键合。三种主要的化学键合是：离子键合、共价键合、金属键合。还有物理键合。它们一起构成晶体的键合。离子键，即异极键，在本质上它几乎完全是静电性的。它是在电正性元素和电负性元素之间发生的。离子键的形成会导致能量大量降低，最终产物通常是大量盐的微晶。双分子原子中的离子键所具有的静电能，可以用库仑定律来计算。共价键则是由两个成键的原子共用电子对，没有一个原子是完全占有成键电子而形成闭合电子层的，有一种特殊类型的共价键称为配位共价键，一般情况下是形

成一个电子对的每个原子贡献一个电子，而配位共价键是在两个共用电子仅由键合原子之一单独提供时才发生。共价键和金属键的稳定性是起因于在一个以上核的影响下价电子位能的降低。在金属中价电子不是紧密地结合在离子芯上，因此不能期望形成强的电子对键。金属键合一般只发生于大集体中，形成多重键。金属的键合结构可以看成是共振杂化结构的极端形式，其中电子对键在不同原子对之间暂时发生。原子或分子之间键合的最弱的一种是范德瓦尔键合。它存在于惰性气体的原子之间，也存在于固体或液体中的非极性分子之间。范德瓦尔力是普遍存在的。它是瞬变电偶极相互作用的结果，发生于任何固体中，但是，在存在化学键合和氢键合的物体中，范德瓦尔键合的影响几乎可以忽略不计。物理键合主要就是范德瓦尔键合和氢键合。氢键发生于某些极性分子之间。这种极性分子含有与高电负性原子共价键合着的氢。键极性来源于电负性原子对键合电子的吸引比氢强，致使负电荷中心比正电荷中心更靠近电负性原子，从而在一个分子内的氢原子与另一个分子内的电负性原子之间存在很强的静电吸引能力，构成氢键，氢键合具有方向性。

【离子晶体】当电离能较小的金属原子（如碱金属原子或碱土金属原子）与电子亲和能较大的非金属元素的原子（如Ⅶ或Ⅵ族原子）相互接近时，前者易放出最外层的电子（价电子）而变成正离子，后者易接受前者放出的电子而变成负离子，出现正、负离子间的库仑作用，从而结合在一起。另一方面，由于异性离子相互接近，其满壳层的电子云交迭而出现斥力（泡利原理所致），当两种作用相抵时，达到平衡。这样结合成离子晶体。异性离子间的相互作用力，称为离子键。其特点是以离子为结合单元，正负离子相

间排列，由于正负离子的相对大小差异，其结构形式和配位数也有所差异。如：NaCl 晶体为套构的面心立方晶格，配位数为6，CsCl 为套构的筒立方格子（体心立方），配位数是8，其性能特点：结合较稳定，导电性能差，熔点高，硬度高和膨胀系数小。

【共价晶体】对电子束缚能力相同或相近的两个原子，彼此靠近时，各自贡献一个电子，又为两个原子共有，从而使其结合在一起，这种结合，称为共价结合或原子结合。能把两个原子结合在一起的一对为两个原子所共有的自旋相反配对的电子结构，称为共价键。共价键有两个特点：一是饱和性（以共价形式结合的原子所能形成键的数目有一个最大值）；二是方向性（各共价键之间有确定的取向）。以共价结合的晶体，称为共价晶体，也称为原子晶体或同极晶体。其特点是：熔点高，硬度高，低温导电性差等。由于共价键中的一对电子，自旋彼此相反，相邻两原子不能属同一类原子。因此，共价晶体的晶格属复式格子，典型的共价晶体有：金刚石、Ge、Si 等。

【分子晶体】对原来就有稳定电子结构的分子，如具有满壳层结构的惰性气体分子，或价电子已用于形成共价键的饱和分子，它们在结合时，基本上保持原来的电子结构。它们的结合，是由于分子间的范德瓦耳斯力的作用，这种结合的单元是分子，它们之间的分子力称为范德瓦耳斯键，或分子键，分子力来源于分子的电偶极矩。极性分子中的固有偶极矩产生的力称为葛生力（静电力）；感应偶极矩产生的力称为德拜力（诱导力）；非极性分子的瞬时偶极矩产生的力为伦敦力（色散力），三者统称为范德瓦耳斯力，其中以色散力的作用为最大。由分子力而使原来已具有稳定电子结构

的分子而结合成的晶体，称为分子晶体。典型的分子晶体有：Ⅷ族元素在低温下形成的晶体，大部分有机化合物晶体和 CO_2 、 SO_2 、 HCl 、 H_2 、 Cl_2 等晶体。分子晶体的结合很弱，导致熔点低，硬度低，多为透明绝缘体。

【金属晶体】这种晶体的结合特点是电子的“共有化”，在结合时，原来分属各自原子的价电子不再束缚于其本身而为所有“原子实”所共有。于是共有化电子形成的负电子云和浸在这个负电子云中的带正电的原子实之间出现库仑作用，原子越紧密，势能越低，从而把原子聚合在一起。这样的结合称为金属性结合，原子实与电子云间的库仑力称为金属键。在金属晶体中，一方面由于负电子云与带正电的原子实之间的库仑作用，使其排列紧密；另一方面，由于距离的不断减小，还会出现斥力，其来源有二，一是共有化电子云密度增加的同时，动能也将增加（动能正比于电子云密度的三分之二次方），二是当原子实相互靠近时它们电子云发生显著交迭，产生强烈的排斥作用，仅当原子间距达某一值时，引力等于斥力，达到平衡，形成晶体，ⅠA，ⅡA族元素与过渡元素结合晶体为典型金属晶体。其特点是原子排列紧密，结构多为六方密排和六角密排，配位数为12，少数为体心立方，配位数为8。金属晶体具有导电，导热性能好和金属光泽，以及较大的延展性。

【氢键晶体】一般中性的氢原子只和一个其他原子 X 形成一个共价键，由于氢原子核体积很小，唯一的一个电子与 X 原子形成共价键后，核便暴露在外，通过库仑作用，有时还可与一个负电性较大的原子 Y 结合，这种结合称为氢键结合。由氢键结合成的晶体，称为氢键晶体。这种晶体的熔、沸点一般较分子晶体高，这是

由于氢键作用较分子晶体中的范德瓦耳斯力强。

【离子导体】离子固体在室温下大多数是绝缘体。离子固体的电导率随温度升高而增加。纯离子固体能隙很宽，电子不会激发到导带。离子导电是由于离子在电场作用下产生电荷流动。在许多纯离子材料中，由于有肖特基缺陷存在，就可以进行扩散。空位对之中的两种空位在相反方向上的漂移就构成了电荷的净余流动。于是，晶体中的离子导电，正如熔盐和水溶液电解质的离子导电一样，涉及到物质以离子形式进行传输。固体中的导电如果仅仅是由于来自肖特基缺陷，则电导率可以表示为

$$\delta = nq (\mu_C + \mu_A)。$$

n 为单位体积中阳离子-阴离子空位对的数目； μ_C 和 μ_A 分别为阳离子和阴离子的迁移率。肖特基缺陷数目随温度变化关系为 $n \sim e^{-(\Delta H_s/2RT)}$ 。此处的 ΔH_s 除以阿伏加德罗常数等于形成一个阳离子-阴离子空位对所需要的能量。既然迁移率与扩散率有关，而后者是随温度的升高而指数上升，所以内禀电导率也随温度的升高而迅速上升。在离子材料中溶入与其价数不同的离子而形成置换固溶体时，为了维持电荷平衡，必然有另外一些象空位这样的缺陷出现。这些空位的活动能力（迁移率）虽然与温度有关，但空位数目则不然。因此离子固体的掺杂电导率对温度的敏感率远不如内禀电导率。非纯净离子固体的总电导率是由内禀电导率和掺杂电导率这两者构成。前者在高温占优势，后者在低温下占优势。

【快离子导体】又称超离子导体或固体电解质。离子晶体通常属于绝缘体。而快离子导体由于含有一定量的空位与间隙离子等缺陷，借助这些空位或间隙离子的移动，离子可进行扩散运动。在外电场

的作用下，这种离子晶体可通过离子的迁移而导电，其导电的性质和液体电解质相似，电导率可达 $10 \cdot \text{sm}^{-1}$ ，激活能降低到 $0.1—0.2\text{eV}$ ，这类物质人们称之为快离子导体。快离子导体与其他导体的不同之处在于它的电荷载流子是离子而不是电子，因此在传导电荷的同时还伴随有物质的迁移，正是这一特点使其得到了多方面的应用。与正常固体相比，快离子导体的电导激活能一般仅为正常固体的 $1/5—1/10$ ，激活能降低和电导率提高的可能机理之一是离子间的协同运动。目前已发现的快离子导体大约有300多种。大体上属于 $\alpha\text{-AgI}$ 型结构， $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型结构和氟化钙型结构的氧化物系三大类。稳定的 ZrO_2 等氧离子导体的离子电导率接近百分之百。可作高温燃料电池的固体电解质。快离子导体只能让一种特定的离子迁移通过，因此可做成离子选择性电极或敏感元件来分析各种溶液或混合气体中某组元气体。

【液晶】 介于固态和液态之间的各向异性流体，又称介晶态。液晶的发现打破了人们关于物质三态（固、液、气态）的常规概念。现在已经知道的液晶物质，多数是脂肪族化合物、芳香族化合物和甾族化合物。科学工作者发现，分子的几何形状和该分子是否存在液晶相有关。呈细长棒状、平板状或盘状的分子，才有可能存在液晶相。用偏光显微镜来观察液晶，根据它们呈现出来的纹理结构（一种图案），可以把液晶分成三种类型或三种相：（1）近晶型液晶或者说近晶相；（2）向列型液晶或向列相；（3）胆甾型液晶或者说胆甾相。近晶型液晶的分子分层排列，有同一方向，与晶体结构相近，故译名为近晶相。向列型液晶的分子位置杂化，但方向一致，故译名为向列相。胆甾型液晶，顾名思义，最早是从胆甾醇类物质中提取出现的，因此命名为胆甾相液晶。液晶在电场作用下，

光学性能发生变化，称之为电光效应。电子计算器、钟表等的数字显示就是液晶电光效应的应用。利用液晶的热效应（即是指液晶的光学性能随温度的变化）在医学上可用于进行皮癌检查和肿瘤部位的测定，还可用于测定细胞内的化学反应等。此外，还应用于航空机械以及冶金产品的无损探伤和高分子反应中的定向聚合等。

【热致液晶】在液相与晶体相之间能够存在一种兼有两者性能的第四状态的中间相，即液晶相。液晶这个词，即含有液晶相的意思，也用来表示呈液晶相状态及能呈液晶相状态的物质。液晶既具有液体的流动性又具有晶体的各向异性。粒子形状的典型例子有球状、板状和棒状。当棒状或板状粒子在取向上残存有某种意义上的有序性时，这种中间相叫液晶。当温度和压力变化时，将发生相变。主要因温度的变化而在单元系中出现的液晶称之为热致液晶。其特点是，在温度由低向高变化时，在从固态转变为液态之前，经历了一个或多个的中间态。热致液晶可通过温度改变而获得。

【溶致液晶】对于构成物质粒子的系统而言，其形状的典型例子有球状、板状和棒状。当棒状或板状粒子在取向上残存有某种意义上的有序性时，这种中间相叫液晶。当溶剂量变化时，将发生相变化。有些材料在溶剂中，随着溶剂量的变化，在多元系中一定的浓度区内，也会产生液晶态，此种液晶我们称之为溶致液晶。

【向列相液晶】一般物质，在温度较低时为晶体，加热后变为液体。然而，有些有机物质，在从固态转变为液态之前，经历了一个或多个中间态。它们的性质，介于晶体与液体之间，所以叫做液晶态，简称液晶。根据分子的排列情况，液晶相大致有三种类型：（1）向

列相；(2)胆甾相；(3)近晶相。向列相液晶，其分子形如雪茄烟，分子长轴近于平行，但不排列成层。这三种液晶相的分子运动以及对外界干扰的敏感程度是不同的。对于向列相分子来说，分子可以上下左右前后各个方位移动，并且，单个分子也能绕长轴旋转，对电磁场等外界干扰敏感。

【无序体系】按字面理解即为混乱无规则的状态。固体中的无序是相对于有序状态而言的，固体中有序状态就是晶体结构。无序的种类和特征可以根据晶体结构被破坏的方式和程度来定义，这就导致了各式各样的无序状态。例如在一个系统中，原子所占的位置和晶体的情况相同，构成具有周期性的格子，但占据这些位置的原子的种类是随机的，这种无规则形式就称为组分无序。而对于原子所占据的位置本身就是无规则的系统则称取位无序。而在原子取位不规则的系统中，若存在未饱和键，即悬挂键，则称拓扑无序等。

【非晶态材料】从材料内部的结构来区分，有晶态和非晶态两种，非晶态原子排列不象晶态原子那样规则排列及具有平移对称性和点对称性。

【非晶态半导体】非晶态半导体本身是非晶体，缺乏构成原子周期性排列的长程，但具有一定程度的短程，即短程有序，因此具有一些可以观测到的半导体性质。非晶态半导体，通常是用原子淀积的方法（如蒸发、溅射、化学汽相淀积，气体等离子体分解等方法）来制成薄膜状态。非晶态半导体常分成两个子领域，一个是四面体配位的类硅材料，另一个是硫化物玻璃。

【非晶态离子导体】具有离子导电性的非晶态材料。离子导体可分为晶态和非晶态之分。有些材料从熔体自然冷却就能形成非晶态，而更多的材料则要在快速冷却条件下才能制备成功。非晶态离子导体具有一些独特的特性，如它本身就是高缺陷结构，利于离子的迁移；成分可以在一定范围内连续改变，可使离子电导性最佳化；宏观特性是各向同性的、均匀的，这对应用很有利。它的缺点是与其他非晶态材料一样稳定性较差。

【玻璃】玻璃是二氧化硅与碱金属的氧化物经熔融所形成的非晶态固体。它的特性有：在常温下具有透明性、硬度和钢度，而在较高温度下具有塑性加工的性能，并有抗风化和抗酸蚀等性能（氢氟酸除外）。

【金属玻璃】又称非晶金属和玻璃态金属，都是非晶态结构，这种结构靠金属-非金属合金淬火而成。与正常的金属不同，非晶金属没有晶粒和晶界，结果形成紧密的原子网格。一般情况下，非晶金属比晶体金属更耐腐蚀，并具有高机械强度和高硬度。最为重要的可能是非晶金属的磁性。没有晶界就可以允许磁场变化时磁畴自由运动。因而使材料的磁滞和能量损失均很低，这对制造变压器芯很有吸引力。虽然非晶金属是玻璃态的，但是其性能并不脆弱。然而，由于是亚稳材料，不能进行热成型。由阿里德公司生产的一种非晶金属称为麦特格拉斯，其基体金属为铁或镍或铬。其非金属合金元素为碳、磷、硼或硅。这些合金的强度极限约为4500MPa，其断裂韧性优于高强钢。这种材料产品呈丝、带和片状。

【非晶态缺陷】与晶态缺陷不同，对于晶态固体来说，凡对周期性结构的偏离，统称为晶态缺陷（例如空位、间隙原子和位错等）。由于非晶态固体的长程无序性，缺陷的定义是从非晶态固体的结构特性作出发点的，即凡偏离于短程有序的组态即称为缺陷。而短程序是由原子的化学本性决定的，一般它满足原子的化学价的 $8-N$ 定则，形成一种正常的结构键合。因此可以认为凡偏离正常结构键合的组态就是非晶态固体中的缺陷。低于正常结构键合数的组态称为低配位缺陷，而高于正常结构键合数的组态则称为超配位缺陷。

【表面结晶学】研究固体表面区的原子作二维周期性阵列的学科，是表面物理学的一门基础学科。表面结晶学的基本内容是探究固体表面层原子及其以下若干层原子平行于表面的二维周期性排列的规律，以及彼此间的相对位置。大体可分如下几个方面的内容：（1）最表层原子排列的对称性质，这包括二维点群，二维空间群的描述；表面原胞的形状、尺寸以及表面原子基元的确定。（2）最表层原胞与衬底的相对取向，最表层原子与衬底原子间的距离的探讨。（3）表面区的原子排列与组份随距最表层原子距离的变化，以及表面台阶的高度及宽度的确定。表面结晶学包括了二维结晶学的内容，可看作表面结构学的一部分。

【二维点群】在平面内作周期性排列的原子或离子体系（二维晶体）可能具有的不包括平移在内的对称操作所组成的群为二维点群。它包括绕垂直于平面的固体轴的 n 度旋转，以符号 n 代表， $n=1, 2, 3, 4, 6$ ；对某一直线的镜象反映，称为镜线，以符号 m 代表；以及它们的组合。总共有10个二维点群。

【二维空间群】平面内作周期性排列的原子或离子体系可能具有的对称操作（既包括点群对称操作，也包括在平面内的平移）组成的群包括绕垂直轴的 n 度旋转，镜线反映在平面内的平移，以及它们间的组合，总共有17个二维空间群。其中13个二维空间群所涉及的平移均可表达成二维原胞基矢的整数倍的组合，可称为简单二维空间群；另外的4个二维空间群牵涉的平移则并不总能满足这一要求，其中包括由对某一直线的镜象反映与沿该直线方向平移该方向周期长度之半的复合操作，称为镜象滑移，用 g 来代表。

【表面结构】固体最表层及其下若干层原子的排列状况。表面结构包括构成表面区的原子的种类，彼此间的相对位置——键长与键角等要素。因此除去表面结晶学的内容之外，表面结构还牵涉表面区的各种缺陷，诸如空位、填隙原子、畴界等各种偏离二维周期性的不完整性。

【表面电子结构】测量外电场、电子、离子或光子引起的价电子发射或测量入射电子的非弹性散射，都能够用以研究固体——真空界面的电子结构。当发射的俄歇电子是价电子时，出现一种特殊情况，在此情况下，原来的空内层能级是严格定域的，发射谱线的形状可以指示这一原子实能级附近的局部电子结构，由附近电子电荷密度引起的原子实能级光电发射和俄歇跃迁所出现的能移（称为化学位移）也可以指示某种表面原子周围的局部电子结构，同这些定域内层电子的发射过程相反，价电子的光电发射、场发射、离子中和以及特征损耗谱测量技术用来估量它们在表面附近的平均行为，正是由于这种原因，才很难阐明洁净表面发射的这

种能谱，因为体内特征和表面特征的界限往往是含混不清的。因此，这些技术主要是用于确定化学吸附物质。

【表面能带】考虑晶体表面具有二维周期性结构计算所得的表面电子态能量，与二维波矢之间的关系称为表面能带。表面能带相应的表面电子态波函数局域于表面区，其幅度随着与表面的距离的增大而迅速衰减。表面能带与表面原子的成分和结构的对称性质有关。表面能带在能量上的范围可以处于体能带的许可范围，也可位于禁带范围。

【表面势】固体材料表面区电子的势场。表面势是固体内电子周期性势场到真空势场之间的过渡。表面势是表面电子态研究的重要课题，固体内情形类似，表面势也可看成三部分，即价电子和内层芯态电子的交换关联势、离子实和价电子之间的静电库仑势以及价电子之间的交换关联势之和。有外场存在时，当然要把外场的作用考虑进去。对金属而言，表面势仅向体内延伸几个原子间距就过渡到体内的势场，而在半导体表面，由于氧化层或其他表层覆盖膜中的电荷作用而形成的表面势，则会延伸至亚微米甚至微米数量级。表面势的存在一般导致表面区能带的弯曲。

【表面态】又称表面能级。由于晶格周期性在晶体表面处终止而在其禁带中（有时也在导带和满带中）引入的电子能级。从化学键模型看，表面态起源于表面原子朝外方向具有不饱和的价键（或称悬挂键）。如电子的波函数仅在表面区有较大的幅度，随着向体内距离的增大而迅速衰减，则这种电子态称为表面态。表面态的能量可以处于体能带的禁带内；也可存在于许可带的能量范围，这时

称为共振态。表面态如果存在于清洁表面，则称为本征表面态；受到外界吸附场或结构缺陷等影响形成的表面态则称为外诱表面态。

【表面振动】 固体表面层原子和分子的振动。由于表面原子只在平行表面方向上的排列有周期性，在垂直表面方向原子的分布失去严格周期性。表面原子的近邻配位与原子固体内不一样，因而表面原子具有的对称性和它受力的分布同体内原子差异显著，致使表面振动形成特殊的模式和独特的物理性质。

【表面分析技术】 表面物理学实验研究的手段。主要包括表面结构、成分和表面电子态的分析。表面结构分析的目的在于探测表面原子的排列状况，通常采用低能电子衍射（LEED）、反射式高能电子衍射（RHEED）、广延 X 射线吸收边精细结构（EXAFS）、场发射（FED）、场离子发射（FIM）等方法。表面成分的分析是为了鉴定表面的原子组份，通常借助于各类谱仪进行，如俄歇电子谱（AES）、X 射线光电子谱（XPS）、紫外光电子谱（UPS）、低能离子散射谱（ISS）、二次离子质谱（SIMS）以及离子探针（IMA）等。另外，用红外光吸收和电子能量损失谱（EELS）研究表面声子态从而获得诸如吸附物与衬底的化学键等方面的信息，也是表面分析的重要内容。表面电子态分析旨在了解局域在表面的电子能级按能量的分布及其被电子占有的情形。常用的方法包括光吸收、光电导、椭偏术以及光电发射。不同的方法各有所长，而以光电发射得到的信息最为直观。

【相减谱】 一种实验结果的分析技术。在表面发生某种变化的前后

分别测量能谱曲线，然后彼此相减，便得到相减谱。由相减谱即可获得关于表面变化过程的信息。例如分别测量清洁表面与吸附表面的紫外光电子谱，即可由相减谱得到关于表面吸附物的实验信息。

【低能电子衍射】缩写 LEED。一种有效的表面结构分析技术。将能量在 $10-500\text{eV}$ 范围的低能电子入射到固体表面，由于入射电子能量低，表面原子对电子束有很高的散射截面，这使表面原子能有效地散射入射电子，同时电子束的德布罗意波长与表面原子间距离有相同的数量级，因而表面成为入射电子束的衍射光栅。用荧光屏观察背向衍射束斑的分布（即所谓 LEED 图或 LEED 花样）就可推测表面原胞的几何信息，另一方面，对任一衍射束而言，其束斑强度随入射电子束的能量而发生变化，这种变化关系用曲线表示出来就是 $I-V$ 曲线或 LEED 谱。LEED 谱取决于表面原子的种类、具体位置以及表层与衬底间的距离。假设一定的表面结构，对之利用大容量电子计算机由 LEED 动力学理论计算 LEED 谱，并与实验 $I-V$ 曲线相对照，就可以判别具体的表面结构。LEED 是迄今最有效的表面结构分析技术。

【场离子显微镜】一种研究金属表面的实验设备。将待研究的金属试样作成针尖状，并使之处于万伏数量级的正电位，致使针尖周围形成甚强的电场，足以导致附近的成像气体原子（如 He），借助量子力学的隧道效应电离成正离子，正离子在针尖强电场作用下飞向带负电位的荧光屏，因此荧光屏上的亮斑直接对应于针尖上的原子排列，从而可得到表面原子结构的图像。场离子显微镜因此而得名。其放大倍数可达 10^6 ，空间分辨率可达 2\AA 左右。如金属针

尖所加的正电位足够高，以至针尖本身的原子将被电离而以离子形式放射出来，则可用质谱仪分析发射的离子从而鉴定表面原子的化学成分，这就是原子探针式场离子显微镜。

【反射式高能电子衍射】一种表面结构分析技术。采用高能电子(10keV 数量级)入射晶体表面(入射面与表面夹角为 3° — 5°)，在反射方向探测衍射束，观察衍射束的分布可以获得表面结构的几何信息。与 LEED 图相比，RHEED 的优点在于可获得高亮度、细聚焦的电子束，因而衍射斑有较高的亮度和清晰度，一些在 LEED 图中很模糊的衍射斑用 RHEED 则可清楚显示。

【俄歇电子能谱】处于激发态的原子可能发生两类过程。一类是内壳层空穴被外壳层电子所填充，由此释放能量产生 X 射线荧光。另一类是电子由外壳层落到内壳层，所释放的能量打出一个其电离势更低的轨道电子，这个过程称为俄歇过程。测定俄歇电子的能量可获得固体表面组成等方面的信息，利用这个原理可以进行表面分析。因为俄歇电子在固体中运行要经历频繁的非弹性散射，能逸出固体表面的仅仅是表面几层原子所产生的俄歇电子，这些电子能量大体处于10—500电子伏，平均自由程很短，大约为5—20埃，俄歇电子能谱所考察的只是固体的表面层。俄歇电子能谱可以作表面微区分析。

【X 射线光电子谱】缩写 XPS。一种重要的表面分析实验技术。光电子谱仪的工作原理是基于光电效应，设以 X 射线入射固体材料的表面，则试样表层的电子会吸收入射光子的能量而逃离材料成为光电子。光电子的数目按动能的统计分布曲线称为光电子能谱。

由于光电子可来源于试样的表层各种能量状态的电子，光电子能谱携带着丰富的有关表面区电子结构的重要信息。因此可应用 XPS 研究表面或体内的元素组成与电子状态。光电子谱仪不需要复杂的数据处理技术。光电子谱仪作为表面研究的一项重要实验手段，在表面物理、表面化学、多相催化与材料研究方面都得到广泛应用。应用 XPS 可作指纹鉴定，即利用各种元素的特殊光电子谱分析表面元素；应用 XPS 还可测定表面元素的芯态化学移动从而推断表面价电子状态的变化。

【紫外光电子谱】简称 UPS。一种重要的表面分析实验技术。其工作的原理是基于光电效应。除入射光子源为紫外辐射而外，其工作原理与 XPS 相同，由于紫外线光电子均来源于表面区的价电子，应用 UPS 可获知表面区的价带电子按能量的分布。应用 UPS 宜于研究固体材料表面的本征表面态以及吸附外来原子引起的吸附表面态。

【相图】表达多相体系的状态如何随着温度压力浓度这些强度性质而变化的几何图形。从相图中可以看出不同成分的物质在不同温度、压力或其它条件下所含各相的种类和相对数量，通过相图可以预测出一个混和体系的性质。目前应用和研究得最多的是合金相图，合金相图是研究新合金和制定合金的生产工艺，如合金的熔炼、浇注、塑性加工以及热处理规范的重要依据。相图中所示的合金状态是热力学上的平衡稳定状态，它不能表示在非平衡条件下的组织结构及其变化规律，例如铁碳相图中就没有指出在快冷条件下可以得到一种性能特别的贝氏体钢。然而非平衡的组织结构对合金的性能也有重要的影响，非平衡状态与平衡状态有着密

切的联系,所以非平衡状态的研究也以相图为基础。相图的研究以相律为基础,相律即在平衡体系中,联系体系内相数、组分数、自由度及影响物质性质的外界因素之间关系的规律。相律是分析和检验相图的工具。

【固溶体】当一种组元 A 加到另一种组元 B 中形成的固体其结构仍保留为组元 B 的结构时,这种固体称为固溶体。B 组元称为溶剂,A 组元称为溶质。组元 A、B 可以是元素,可以是化合物。固溶体分成置换式固溶体和间隙式固溶体两大类。置换式固溶体溶质原子处于溶剂原子的位置上,即置换了溶剂原子,如 α 黄铜中,锌置换了铜原子;间隙式固溶体是溶质原子处于溶剂原子的间隙处,如 α 铁中,碳原子处在铁原子排列的间隙处。

【有序—无序相变】一些替代式固溶体,当温度较低时,不同种类的原子在点阵位置上呈规则的周期性排列,称为有序相;而在某一温度以上,这种规律就完全不存在了,称无序相。固溶体在这一温度(称为相变温度或居里点)发生的这种排列的规律性的产生和丧失,同时伴有结构的对称性的变化,称为有序—无序相变。

【中间相】构成合金的各组元间发生化学相互作用,形成晶体结构不同于组元元素的新相。新相种类繁多,但它们的单相区均位于相图的中间部位,故统称为中间相,又称为金属间化合物。由于构成中间相的结合键大多为金属键,故这些相有一定金属性。金属化合物在性能上一般是硬而脆的,它们对金属材料的硬度、强度、耐磨性以至脆性有重要影响。有些金属间化合物,具有特殊性能,例如超导材料、形状记忆材料等,它们正成为一些新科技领域的重

要材料,目前正在继续深入研究中。影响控制中间相的主要因素是电子浓度因素、尺寸因素、负电性因素等。中间相可据此分为电子浓度化合物、尺寸因素化合物、正常价化合物等几大类。

【超结构】许多固溶体在低温时会成为有序固溶体,此时异类原子趋于相邻,这种相称为超点阵或超结构。只有在理想配比成分并具有简单金属晶体结构的理想单晶体中,才有可能得到完全有序的排列状态。实际上,由于晶体中存在各种缺陷和晶界,因此绝大多数情况下,不可能存在完全有序的状态。当固溶体成分不在理想配比值时,有序化程度还要减小,进行有序化的温度也比理想成分低,此外,有序化还伴随其它性质(如硬度、导电率)的变化。当异类原子的作用力很强时,发生无序的临界温度 T_c 可以高于材料的熔点。具有这种特性的合金就很象化合物。当作用力不太强时,一个有序固溶体到了某一临界温度就有可能成为无序固溶体,即使其成分对应于象化合物那样的理想配比值。许多典型的合金相在温度升高时会发生这种变化。

【金属间化合物】构成合金的各金属组元间发生化学相互作用,形成晶体结构不同于组元元素的新相。这些新相种类繁多,但它们的单相区均位于相图的中间部位,所以将它们统称为金属间化合物,又称中间相。构成各类中间相的结合键各不相同,可能存在离子键、共价键,但大多为金属键,因此这些相具有一定程度的金属性。典型成分的中间相可以用化学分子式来表示,但不少中间相的单相区可以在一定范围内变化,形成以化合物为基的二次固溶体。金属间化合物在性能上一般是硬而脆的,它们对金属材料的硬度、强度、耐磨性以至脆性都有重要的影响。

【马氏体相变】马氏体相变属于一种广义的位移型无扩散相变。通俗地说，钢淬火会变硬，很早就被人们所认识，但直到19世纪后期才知道其内部发生了组织变化，并将淬火形成的片状相命名为马氏体。1930年以后相似的转变又在许多非铁化合物以及非金属晶体中发现。马氏体并不一定变硬，热弹性马氏体则有弹性软化效应，而且与之相联系的起源性、铁弹性及形状记忆等现象也获得应用。

【脱溶分解】由于溶解度变化而在母相中形成新相的相变。溶质原子的溶解度随温度下降而明显降低的固溶体中会发生脱溶分解的相变。根据相图，如果成分为C%的合金在较高温度时为单相固溶体，在温度下降时，定形成两个相，其中一个原来是原来结构，只是成分有些变化，另一个相则为新相。在脱溶分解的合金中，脱溶分解所形成的新相往往不一定是相图上标出的平衡相，这需要经过一系列的过渡状态及过渡相，而这种过渡状态或过渡相出现的时间是和合金成份、分解时的温度有关。

【再结晶】再结晶过程通常是先在畸变最严重的区域形成无畸变的核，这个核紧接着向着畸变的基体生长，即再结晶核靠消耗其周围冷形变基体而生长，直到彼此相遇为止。这个过程可看作原先处于畸变晶格中的原子不断向无畸变晶格中转移的过程。再结晶过程是通过形核生长，彻底改变形变组织。其驱动力是形变金属中畸变能即储存能的降低，具体来说，是晶界两边的储存能差的消失。再结晶没有晶体结构和化学成分的改变，仅伴有晶体缺陷的运动和消除，所以说再结晶不是相变，而是一种组织转变。正由

于再结晶组织并不是按“来路回转”得到的形变前的组织，所以可以控制形变和再结晶条件，来调整再结晶晶粒的大小和再结晶体积分数。对于一些不能利用相变进行热处理的金属材料，常采用形变—再结晶过程来提高材料的机械性能。再结晶过程是一形核生长过程，这个过程的速率，可以用单位时间内形成新晶粒的体积即再结晶体积速度来衡量，并且可以表述为形核率与长大速度的函数。近年透射电子显微镜观察表明，再结晶形核是通过形变或回复之后的现成界面的突然弓出而发生的。又由于新晶粒的取向与形变基体中的晶粒取向明显不同，所以再结晶形核是靠无畸变区域与形变基体分隔开的，靠可动性较大的大角度晶界的突发式移动来实现的。

【晶须】一种非常细的单晶体纤维，其直径范围为 $3-10\mu\text{m}$ ，长度与直径的比值为 $50-10000$ 。因为是单晶，其强度接近于理论计算值。晶须晶体结构非常完整，而且横截面有圆形、方形、六方形三种。横截面的形状与晶体结构以及晶须的生长条件均有关系。目前最受关注的三氧化二铝晶须，其抗拉强度达到 20000MPa (3000000lb/in^2)，弹性模量达到 50000MPa (62000000lb/in^2)。其他可能的晶须材料是碳化硅、氮化硅、碳化硼和氧化铍等。现在晶须的研究和应用已在晶体学、半导体、磁学等几个方面得到了发展，尤其是它的耐腐蚀性、电学特性、超导特性已逐渐受到重视，而晶须在接近熔点的温度下仍能保持高强度和耐腐蚀性能更引人注目。一般的材料，强度的提高总伴随着脆性的加剧，但纯度足够高的高强度完整晶须是强而不脆的，这样的优异性能使它很适于用作高温材料。但是由于晶须太细小，不能直接作为工程材料使用。使用时，要用胶合剂把晶须粘在一起，组成复合材料。晶须的生长

方法有天然生长法、蒸气凝聚法、卤化物还原法、淀积法、电解法等。

【合金强化】强度是材料抵抗变形的能力。人们希望构件不致因强度不足而失效，因此，有必要提高合金材料的强度，称之为合金强化。由于位错的存在，目前金属的实际强度远低于理论预期的强度。金属借塑性加工而强化的途径主要有两条：（1）尽可能地减小位错，使其接近于完整晶体。可惜对于大块金属材料难以实现。因为随着晶须的长大，位错迅速增多，强度很快减低。（2）在金属中有大量位错时，尽可能设法阻止位错运动以及抑制位错源的活动（抑制位错增殖）。这种强化手段有多种形式，如冷变形强化、细晶强化、固溶强化、有序强化、分散强化、马氏体强化等。有时将几种强化手段结合起来，可有更显著的强化效果。对冷变形强化，冷变形过程中，位错密度增加，使位错之间的交互作用加剧，位错相互缠结并形成胞状结构，阻碍了位错的运动。有些金属材料还形成形变结构而得到强化。细晶强化中，由于晶粒细化，使阻碍位错运动的障碍晶界增多。固溶强化则是由于溶质原子溶入溶剂晶格，会使点阵畸变，小于基体原子的溶质原子移向位错周围的受压位置，而大于基体原子的溶质原子移向受张区域，形成气团，减少了点阵畸变，降低了位错的能量状态。有序强化则是增大系统总能量从而增大了对位错运动的阻力。当第二相以细小弥散的微粒均匀分布于基体相中，将产生显著的强化作用，这就是分散强化。马氏体强化则是固溶强化、时效强化、结构强化的综合结果。

【固体的断裂】材料在应力作用下经过加工硬化阶段后最终导致断裂。断裂的过程有两个部分，一个是裂纹的萌生，其次就是裂纹的

扩展了。断裂的形式可以分为脆性断裂和韧性断裂（或称延断裂）两种。前者指在断裂前没有塑性形变的。对于金属材料而言，完全脆断只是理想的过程，因为金属材料的断裂或多或少都伴随有塑性变形，所以对金属材料，其脆断实际上只是半脆断。韧断则是指断裂前伴随着相当程度的塑性功。决定材料是脆断还是韧断，除了材料本身的因素之外，还与外界条件有关，例如，温度、应变、速度、周围环境以及应力状态等。对于工程应用而言，脆断是最受人关注的，因为它的危险性最大。因此对于脆断的研究也最多。韧断虽然没有巨大的危险性，但是，研究韧断比起脆断要困难得多。

【热处理】提高金属材料及其制品质量的重要手段。是根据不同的目的，将金属材料（指成材）或零件加热到远低于熔点的某个特定温度，并在此温度停留一段时间，然后冷却至一定温度的工艺过程。一般说来，热处理过程都要经过加热→保温→冷却的三个阶段。热处理和其他加工、处理不同，它不改变金属成材或零件的形状或大小，而是通过改变金属的内部组织，从而改善金属的性能，提高材料的使用价值，满足各种使用要求，并因此而提高质量、节省材料及延长使用寿命等。热处理的任务是用加热和冷却方法不可逆地改变组织结构，而引起性能不可逆的变化，通常可在温度—时间坐标中表示热处理的任何一种形式。其实，热处理除温度外并不预先看到任何一种其他的变化作用。如果在加热时金属（合金）的表层由于与周围的介质相互作用结果而发生成分变化，则这样的热处理称为化学热处理，如果与温度相互作用的同时，还进行变形，它对组织的变化作出适当的贡献，则这样的热处理称为形变热处理（种类有：热处理+形变，形变+热处理等）。苏联科学院院士阿·阿·博奇瓦尔首先指出了热处理科学分类法：化学

热处理、形变热处理、普通热处理。普通热处理又分为：第一类退火、第二类退火、没有同素异构转变的淬火、具有同素异构转变的淬火等。热处理是机械制造工业发展的基础工艺,直接影响产品质量和产品的更新换代。

【淬火】把钢加热到 AC_3 (亚共析钢加热时,所有铁素体都转变为奥氏体的温度) 以上或者 AC_1 (钢加热时,所有珠光体都转变为奥氏体的温度) - AC_m (过共析钢加热时,所有渗碳体都溶入奥氏体的温度) 之间,保温后以大于临界冷却速度快速冷却,这种热处理操作称作淬火。淬火的目的是:通过淬火和回火获得一定的综合机械性能;改善钢的某些物理化学性质性能;为下一步热处理作好组织准备。通过淬火得到一定淬透性层深度的能力称为淬透性,金属的淬透性好,其淬硬层深度越大,表面和中心部分的性能差别就越小。淬透性的大小,用淬硬层的深度来表示。在淬火件尺寸、淬火冷却速度等条件相同时,金属的淬透性取决于其化学成分。金属淬火时变硬的能力,称为淬硬性。金属的淬硬性愈好,则淬火后能达到的硬度愈高。钢的淬硬性,主要取决于含碳量,一般说来,含碳量愈高则淬硬性愈好,淬火后能达到的硬度就愈高。淬火温度的选择,由钢的化学成分、工件尺寸形状、工件技术要求、钢奥氏体晶粒长大倾向、淬火时采用的加热方式和冷却介质等因素来综合考虑决定。

【退火】将钢制零件加热到稍高或稍低于临界温度,保持一段时间(即保温),然后缓慢冷却的一种工艺过程。退火后的钢件将得到接近于在平衡状态下转变的温度。退火的目的是:降低硬度,提高塑性,以便于切削加工或压力加工;减少残余应力;使成分均匀化;

细化晶粒，提高钢的机械性能。退火时的加热速度和保温时间、冷却速度等取决于材料的成分和处理目的。加热速度是指工件在加热炉内单位时间内温升的高低。加热速度的快慢取决于钢的成分、零件形状的复杂程度以及装炉量的多少等。保温时间是指工件达到加热温度以后继续保持温度的时间。一般按零部件的厚度或直径进行计算，即每毫米保温时间约为1.5—2.5分钟。冷却速度是指保温后单位时间降低温度的情况，一般退火钢件可随炉冷至500℃左右出炉空冷，对要求内应力尽可能小的钢件可冷却至200—300℃出炉。按工艺特点不同，可大致分为扩散退火、完全退火、等温退火、球件退火、不完全退火、再结晶退火、去应力退火等类型。

【半导体】电阻率介于金属和绝缘体之间且具有负的电阻温度系数的一类物质。在通常温度下，金属的电阻率约为 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ ，绝缘体的电阻率约为 10^{12} — $10^{20}\Omega\cdot\text{m}$ ，半导体的电阻率则约在 10^{-4} — $10^7\Omega\cdot\text{m}$ 之间，在常温下，当温度升高时，金属的电阻率线性增大，半导体的电阻率近似指数式地减小。金属有正的电阻温度系数，而半导体的电阻温度系数则是负的。除温度外，半导体的导电性能强烈依赖于所含微量杂质和晶格的不完整性。

【化合物半导体】两种或两种以上的元素组成的具有半导体特性的化合物。它包括晶态无机化合物、非晶态无机化合物、有机化合物和氧化物半导体。

【固溶体半导体】两种或两种以上的元素或化合物半导体相互溶合而成的半导体材料。随着每种成分在固溶体中所占百分比（X值）

在一定范围内连续地改变，固溶体半导体材料的各种性质（尤其是禁带宽度）将会连续地改变，但这种变化不会引起原来半导体材料的晶格发生变化。利用固溶体半导体这种特性可以得到多种性能的材料。

【有机半导体】具有半导体特性的有机化合物或分子络合物。例如，萘蒽、聚丙烯和聚二乙烯苯以及碱金属和蒽的络合物等。其中聚丙烯腈等有机高分子半导体又称塑料半导体。这些材料易于合成或制造。

【玻璃半导体】具有非晶态结构的半导体材料。一方面它具有像玻璃那样的非晶态无序结构，另一方面又与一般绝缘玻璃不同，它在通常状态下为高阻绝缘体，并不显示半导体性能。仅当外界条件超过某一临界值后才呈现导电性，由“关态”而转变到“开态”，这就是开关效应。而当外界条件取消后，材料并不恢复原状，这就是记忆效应。

【气敏半导体】对气体敏感的半导体材料，可随外界气体的成分而改变其导电特性。有N型、P型和混合型等几类，都是一些金属氧化物。N型气敏半导体在表面上吸附了氢、一氧化碳或甲烷等还原性气体后，发生还原反应，使电阻率减小。属于这一类的材料有二氧化钛、二氧化锡、氧化镉和氧化锌等。P型气敏半导体有二氧化钨、二氧化铬、氧化镍、氧化亚铜等，吸附了氧、二氧化硫等氧化性气体后，电阻率增大。混合型气敏半导体如三氧化铟和五氧化二钒等，不论吸附氧化性或还原性气体都能使电阻率增大。可根据其电阻变化来探测各种有害气体。用气敏半导体材料制成的元

件可用来检测气体中所含微量煤气、乙醇蒸气等含氧成分，可应用于环境保护方面。

【压电半导体】有压电效应的半导体材料。在外加机械压力下，随着晶体结构、外形的变化，电学特性也发生变化，这种现象称为正压电效应；反之，当晶体加上一个电压时，其结构和外形也会随之发生变化，这种现象称为反压电效应。

【本征半导体】载流子主要来源于本征激发的半导体。对于纯净和完整的半导体单晶，因其载流子只能来源于本征激发，故为本征半导体。对于掺杂半导体在室温下，因其载流子来源于杂质电离，故为非本征半导体；但当温度高而本征激发作用超过杂质电离时，就转变为本征半导体。在本征半导体中，导带电子的浓度 n 等于满带空穴的浓度 p ，即 $n = p = n_1$ 。 n_1 称为本征载流子浓度，其数值与半导体的禁带宽度 E_g 和温度 T 有关，在一定的温度下， E_g 愈小， n_1 愈大；在一定的 E_g 下，则 T 愈高而 n_1 愈大。本征半导体的费米能级称为本征费米能级，其位置刚好处于禁带中央。

【杂质半导体】导电性能取决于杂质的类型和含量的半导体。有两种基本类型： N 型半导体和 P 型半导体。掺有施主杂质，以电子为多数载流子的半导体，叫做 N 型半导体。 N 型半导体中的电子主要是由施主杂质提供。施主杂质浓度愈高，电阻率愈低。 N 型半导体的电阻率可以通过掺入不同浓度的施主杂质来控制。掺有受主杂质，以空穴为多数载流子的半导体，叫做 P 型半导体。 P 型半导体的空穴主要是由受主杂质提供的，受主杂质浓度不同，空穴浓度不同，电阻率也不同。 P 型半导体的电阻率也可以通过掺入不同

浓度的受主杂质来控制。如果半导体内同时掺有施主杂质和受主杂质，则它们的作用会相互抵消，即发生补偿作用。N 型半导体中掺一些受主杂质，则多数载流子浓度减小，电阻率增大。当在 N 型半导体中再掺入大量受主杂质，以致受主的浓度大于施主浓度时，N 型半导体转变为 P 型半导体。

【半金属】按照导电电子的浓度和导电能力来划分时所得到的介于半导体和金属之间的一类固体物质。如铋、石墨、锑、砷等。半导体的导电电子浓度为 10^{13} — 10^{17}cm^{-3} ，金属的导电电子浓度大于 10^{22}cm^{-3} ，而半金属则介于二者之间。半金属的能带结构也有其固有的特点：价带与导带的能量有所交迭，在绝对零度下，价带亦并不完全被电子所填充，导带亦并不完全是空态。

【P—N 结】在一块 P 型半导体中掺入施主杂质，使其中一部分成为 N 型导电区（或在一块 N 型半导体中掺入受主杂质，使其中一部分成为 P 型导电区），则这两个不同性质导电区之间的交界层就是 P—N 结。

【异质结】两种不同的半导体相接触所形成的结。要形成异质结，必须两种半导体有相似的晶体结构，而且原子间的距离必须相近，两种材料的热膨胀系数也要比较接近。

【光电导】半导体受到光照射时，吸收光子后引起载流子激发，电导率增加的现象。又称为半导体的内光电效应。附加的载流子可以来自带间跃迁，也可以来自杂质的激发，因此，光电导有本征光电导和杂质光电导之分，光敏电阻就是根据这种现象制成的，亦

称光导管，能使光信号转换为电信号。

【隧道效应】微观粒子能透入按经典力学规律它不可能进入的势垒区，反映微观粒子的波动性的一种基本效应。通常说的半导体中的隧道效应指的是电子对半导体中宏观势垒的穿透，这个宏观势垒是半导体的禁带造成的。

【载流子】存在于物体内部的带电粒子，它们在电场作用下能作定向运动而形成电流。在金属中，载流子一般是金属原子的价电子；在电解质中是离子；在半导体中是导带中的电子和价带中的空穴，载流子的数目随其中的杂质含量和外界条件而显著变化。

【霍尔效应】当电流垂直于外磁场方向通过导体或半导体薄片时，则在与电流和磁场二者垂直方向上，物体两侧产生电势差的现象。用于测量技术、电子技术和自动化等方面。

【掺杂】在纯半导体材料中加入杂质以控制其导电能力的过程。

【离子注入】又称离子掺杂。一种新型半导体掺杂和 P—N 结制作技术。同传统的杂质扩散方法相比较，具有掺杂温度较低，可以精确控制杂质分布等特点。已广泛用于半导体器件生产中。

【施主】掺入半导体中能提供导电电子而改变其导电性能的一类杂质。例如，掺入半导体锗和硅中的五价元素砷、磷等原子都是施主。如果在某一半导体的杂质总量中，施主的总量占多数，则这类半导体是 N 型半导体。参见“受主”。

【受主】掺入半导体中的一类杂质，它能接受半导体中的价带电子，产生同数量的空穴，从而改变半导体的导电性能。例如，掺入半导体锗和硅中的三价元素硼、镓等原子都是受主。如果某一半导体的杂质总量中，受主的数量占多数，则这半导体是 P 型半导体。参见“施主”。

【空穴】研究半导体导电性能时常用的一个概念。在半导体中，满带中留出了一些空位，这时就产生附加的导电性，其特点如同出现带正电荷（电量同电子相同）的粒子一样。这些在满带中因失去了电子而留下的空位，通常称为空穴，而将这种导电性称为空穴导电。

【半导体器件】利用半导体材料制成的各种电子器件的总称。如各种二极管、三极管等。

【半导体光电器件】能将光能变成电能的半导体器件的总称。这是根据半导体的光生伏特效应制成的。

【晶体管】对信号有放大和开关等作用，有三个或四个电极的半导体器件。晶体管可分为两大类：一类是结型晶体管，一类是场效应晶体管。

【半导体集成电路】集成电路的一种类型。利用外延、氧化、扩散、光刻、蒸发等半导体工艺，在一小块半导体单晶片上，同时制作出晶体管、二极管、电阻、电容等元件，并采用一定的方法，使

这些元件按照需要在电性能上互相隔离或互相连接，构成一定形状的电路上，这种电路又叫单块集成电路，有时也称为固体电路。半导体集成电路按所用晶体管类型的不同，可分为双极型集成电路和 MOS 型集成电路。

【半导体激光器】用半导体材料作为工作物质的激光器。它是利用受激辐射原理，使光在激发的工作物质中放大或发射（振荡）的器件。根据激发方法不同，半导体激光器可分为 P—N 结注入式、电子束激发式和光激发式三种。

【电介质电导】电介质并非理想绝缘体，在电场作用下均有一定的电流通过，此为电介质的电导。电介质的电导大小，一般用电阻率 (ρ) 或电导率 γ 来表示。电介质的电阻率和电导率分别规定为单位长度和单位截面积材料的电阻和电导。它们是表征材料导电性能的宏观参数，但与材料的几何尺寸无关。电介质在电场作用下能产生电流是由于电介质中存在能自由迁移的带电粒子（载流子）。按导电载流子种类，电介质的电导可分为：（1）电子电导（包括空穴电导）：载流子是带负电荷的电子（或带正电荷的空穴）。（2）离子电导：载流子是离解了的原子或原子团（离子），它们可以带正电荷，也可以带负电荷。离子电导时，伴随有电解现象发生。（3）胶粒电导：载流子是带电的分子团即胶粒，如油中处于乳化状态的水等。根据常压、常温条件下电导率的大小，材料可分为导体、半导体和绝缘体。物质的导电性与其凝聚态及组成结构有关。电介质一般是绝缘体，但广义的电介质还包括半绝缘体和某些处于特殊状态下的半导体（如载流子耗尽状态下的半导体）。固体能带论已成功地说明了晶体中的电子分布状态以及晶态导体、半导体及

绝缘体之间的区别。绝缘体半导体中，电子各处于价带，导带中缺乏电子，而且导带与价带之间为禁带隔开，只有在热、光等外界因素作用下，才可能使少量价带中的电子跃迁到导带上去成为导电的载流子。所以其电子电导率比较低。

【电介质有效场】电介质内部作用于某一点的总电场。计算有效场时要把特定的中心原子除去，因为某原子所产生的场不能使其本身发生电极化。使用有效场的概念，可以简单概括电介质中原子极化之间的库仑作用。莫索谛提出的外电场存在时，电介质内部电场的计算方法：由电介质中某一特定的被极化原子或分子开始，扩展到一个一定半径的球形之后，可将电介质看成是连续的介质，这个连续介质具有该材料极化的宏观性质。

【电介质谱】电介质的介电常数是个复量， $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ ，实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' 均与频率 ω 有一定的函数关系，这种 $\epsilon(\omega)$ 函数关系就叫做介电谱。由于介质中分子极化机制不同，介电谱又可分为谐振型和弛豫型两类。谐振型介电谱出现于电子极化和离子位移极化的情况。这时粒子的运动可以用弹性阻尼谐振子的模型表示，其特征是 ϵ' 由极大到极小迅速变化，而 ϵ'' 则呈现一个比较尖锐的峰。弛豫型发生于有极分子的松滞性介质以及有界面间极化的固体介质之间，在这些介质中，电极化过程的建立和变化要比外加于介质的电场的改变来得慢。偶极取向极化以及界面间极化均属于弛豫型介电谱，介电弛豫是具有统计性质的过程，可以用弛豫时间来概括系统达到统计平衡所需时间，典型的弛豫型介电谱特征是随着频率的增加，实部 ϵ' 由恒值范围缓慢降到一个低值 ϵ_∞ ，而虚部 ϵ'' 的变化则呈现一个宽的峰。

【极化强度】电极化强度矢量的简称。电介质中单位体积内分子偶极矩的矢量和，即 $\vec{P} = \sum \vec{P} / \Delta V$ ，极化强度与介质中场强的关系：在各向同性介质中，任意点的极化强度与该点的场强成正比，即 $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$ ， χ 为电介质的极化率， ϵ_0 为真空中的介电常数。在各向异性电介质中，同一点处的极化强度与场强的方向可以不相同，电极化率为二张量，称为介质的电极化率张量，它由介质本身性质所决定。极化电荷与极化强度的关系：电介质中在一闭合曲面内的极化电荷，等于该曲面内的极化强度通量的负值。均匀电介质中在任一方向的截面上出现的极化电荷面密度，等于极化强度沿着该截面外法线方向的分量。

【介电常数】在真空中场强为 E_0 的区域内充满电介质之后，场强减小到 E ，比值 E_0/E 就叫做这种电介质的介电常数，用 ϵ 表示。即 $\epsilon = E_0/E$ 。在充满电介质的空间里，场强公式应为

$E = \frac{kQ}{\epsilon r^2}$ 。在充满电介质的空间里，库仑定律应为： $F = k \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$ 。在电场作用下电介质极化产生束缚电荷，束缚电荷在介质内部产生电场，与外电场方向相反，所以使外电场减弱。一般我们有两种介电常数：电介质的绝对介电常数 ϵ ，电介质的相对介电常数 ϵ_r ， $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 1 + \chi$ ， ϵ_0 指真空中的介电常数， χ 指电介质的电极化率。

【电偶极矩】考虑偶极子在外电场中所受到的影响，由于组成偶极子的两个点电荷等值异号，两者所在处的场强又相同，所以两者受的电场力等值反向，整个偶极子受到的合外力为零，但偶极子受到一个力偶矩，此力偶矩大小为 $T = Fl \sin \theta$ ，其中 l 为偶极子两

个电荷连线的长度, θ 为连线与场强 \vec{E} 的夹角, F 为每个点电荷所受电场力的大小。因为 $F = Eq$, 所以有 $T = qEl \sin \theta$, 力偶矩的方向与电场方向与偶极子所在平面垂直, 从 $-q$ 到 $+q$ 引一个矢量 \vec{l} (其长度等于两者的距离 l), 则力偶矩矢量 \vec{T} 可用矢量叉乘的形式表示为: $\vec{T} = q\vec{l} \times \vec{E}$, 定义矢量 $\vec{P} = q\vec{l}$, 使得对 \vec{T} 有: $\vec{T} = \vec{P} \times \vec{E}$, 而定义的矢量 \vec{P} 叫做偶极子的电偶极矩。在外场强 \vec{E} 一定时, 偶极矩 \vec{P} 唯一地决定偶极子所受的力偶矩。再考虑电偶极子产生的磁场, 有: 偶极子在主动和被动方面的行为都取决于它的电偶极矩 \vec{P} 。

【非晶态电介质】 不是结晶状态的固态电介质。例如, 玻璃和塑料等。空气和甲苯不是固态, 所以只能称为气态电介质和液态电介质, 不能称为非晶态电介质。非晶态电介质是一个专门的物理名词, 指的是非结晶固态, 不能按字面涵义来理解。目前工业技术上应用的驻极体, 通常都用非晶态电介质制成。未经过特殊处理的非晶态电介质一般都是各向同性的。

【驻极体】 经外加电场作用, 在除去这个电场后仍长时间保持极化状态的电介质称为驻极体。1922年左右发现蜡和松香的混合物在强电场作用下从熔融态固化后再除去外电场, 得到的混合物固体仍能长久地保持着极化状态。驻极体具有压电效应和热电效应。技术上应用的驻极体多用极性高分子聚合物制成, 产生驻极体效应的机制有三种: 第一种是在强外电场作用下由电极注入电介质表面的电荷被束缚下来形成同极性电荷, 由此产生的驻极体称为同极性驻极体; 第二种是原来存在于电介质内部重心重合的正负空间电荷在外电场作用下因位移使重心分离而被束缚于新位置, 成

为异极性电荷；第三种是电介质中原来混乱取向的分子局部电矩，在外电场作用下被冻结了下来而产生持久的极化强度。后两种机构产生的极化与第一种方向相反，由此形成的驻极体称为异极驻极体。

【铁电体】介电常数很大并随外加电场强度而变化的物质。在外电场的作用下，铁电体呈现出很强的极化。当外电场足够强时，极化达到饱和。在外电场撤除后，存在剩余极化。这些特性可用铁电体的电畴结构来解释。酒石酸钾钠、钛酸钡等都是铁电体。

【软模】在铁电相变中往往可以找到高温相和低温相晶体的相互有联系的晶格振动模式，它们与自发极化的出现有关。当晶体温度下降到居里温度 T_C 时，高温模式振动频率下降并消失，同时出现低温振动模式。当温度由 T_C 继续下降时，低温模式振动频率逐渐增高。当铁电体的温度升高通过 T_C 时，两种振动模式及其频率的变化与前面相反。这一对振动模式称为铁电软模，因为当温度接近 T_C 时，它们的行为像是弹簧振子由于软化而使频率减低一样，而其它非铁电的固态相变中也可以找到软模。

【中心峰】又称软模中心峰。在用光散射或中子散射方法观察铁电软模时，除了看到随着温度趋向转变点其频率逐渐下降的软模外，临界区的散射频谱在零频上还可以发现一个峰，这个峰随着温度趋向转变点而变宽，称为中心峰。

【压电现象】某些电介质晶体（如石英、电气石、酒石酸钾钠等）在沿特定方向的压力作用下发生极化而在两端表面出现电势差的

现象。这称为正压电效应。它的逆效应，即置于电场中的电介质晶体会发生机械形变的现象，称为电致伸缩或逆压电效应。

【铁弹性】1969年日本物理学家相津敬一郎首先提出了铁弹性这一概念。他在研究 $Gd_2(MoO_4)_3$ 晶体位移相变时，发现应变 S 对应于外力 δ 的变化有滞后现象，应力与应变呈非线性关系，自发应变方向可因外力场而反向。此外将具有铁弹性的晶体称为铁弹体。

【介电击穿】又称介质击穿。在足够强的电场作用下，电介质的绝缘性受到破坏，导致难以控制的甚大的电流通过，叫介电击穿。介质击穿最基本的物理机构可以分为内禀击穿（或称本征击穿）、雪崩击穿和热击穿三种类型。内禀击穿和雪崩击穿属于电击穿，以区别于热击穿。

【电致伸缩】置于电场中的电介质晶体发生机械形变的现象。参见“压电效应”。

【媒递作用】认为不相接触的物体间的相互作用不是直接传递的，而是通过中间的媒质以有限速度传递的。这是一种能为实验证实的正确观点，是场的概念的起源。

【超距作用】现已抛弃的对于不相接触物体间发生相互作用的一种错误解释。当时认为：这种相互作用（如两电荷间的吸力或斥力）是以无限大速度在两物体间直接传递的，与存在于它们间的物质无关。

【玻尔磁子】磁矩的天然单位。它的表示式为 $\mu_B = \frac{eh}{2mc}$ ，其中 e 、 m 分别是电子的电荷和质量， $\hbar = h/2\pi$ ， h 是普朗克常数， c 是真空中的光速。电子的自旋磁矩即非常接近于一个玻尔磁子。

【回磁比】原子体系的角动量与磁矩的比率。这个比率通常用磁机工因数 g' 来表示。如式：
$$\frac{\text{角动量}}{\text{磁矩}} = \frac{2mc}{g'e}$$
，这里比率采用电磁单位，因此 e/c 和 m 为电子的电荷和质量，有时因数 g' 不严格地称为回磁比。回磁比的倒数 $\gamma = g'e/2mc$ ，叫做磁机工比率。一种物质的磁机工比率指明磁矩的来源。对于电子自旋的 $g' = 2$ 。对轨道角动量 $g' = 1$ 。对于大多数铁磁材料， g' 的实验值在 2 附近，表明对磁化强度的主要贡献来源于电子自旋。 g' 偏离 2 的多少表示轨道运动对磁化强度贡献的大小。另一方面，在超导体中， $g' = 1$ 的事实表明，产生迈斯纳效应的抗磁电流是电子引起的。磁性材料的回磁比可用回磁效应来进行测量。回磁效应是由磁性物质的角动量和磁化强度之间的关系所产生的一种效应。

【铁磁性】某些金属、合金以及过渡族（铁族）、稀土族和钢系元素的化合物所表现出来的一种性质。在居里温度下，这些物质的原子磁矩倾向于排列在共同方向之上。铁磁性的特点在于：一个磁化了的物体会强烈地吸引另一个磁化了的物体，这种现象早在公元前 600 年以前人们就知道了。原子具有磁矩的原因是该原子中电子的角动量不为零，因而具有净磁矩。在给定的外磁场下，原子磁矩的合效应给出较大的磁化强度或单位体积磁矩。在居里温度以上，铁磁物质的特性好象顺磁物质一样；它的磁化率（与温度有关）近似遵从居里-外斯定律。居里温度标记着原子磁矩排列成有序状态

和有序状态之间转变的温度，在居里温度之下，某些材料显示出亚铁磁性。铁磁体的特性是：在居里温度以下，在无外加磁场时可以具有自发磁化。在弱的外加磁场作用下，磁化强度增大得很快，可以达到饱和磁化强度值。一般饱和磁化强度是温度的函数。

【超顺磁性】当铁磁性物质的颗粒小于临界尺寸时，外场产生的磁取向力不足以抵抗热骚动的干扰，其磁化性质与顺磁体相似，称为超顺磁性。参见“顺磁性”。

【居里温度】标志铁磁性和顺磁性之间相互转换的温度。在这个温度以下，所有铁磁材料显示出自发磁化，即没有外加磁场时的磁化。温度升高，自发磁化强度降低，在较低温度下变化较慢，而在较高温度则下降很快。材料的磁化率遵守居里-外斯定律： $\chi = C / (T - \theta)$ ，其中 χ 是磁化率或电极化率， C 是各种材料的常数， T 是绝对温度， θ 即居里温度，通常称顺磁居里温度，在这温度磁化率应趋于无限，但在接近转变温度时，居里—外斯定律失效。因此，一般情况是 θ 要比真正的转变温度 T_C 稍高一些，亚铁磁性和顺磁性之间的相互转变也用居里温度来标志，反铁磁性和顺磁性之间的转变用奈耳温度 T_N 来标志，在 T_N 之下，虽然反铁磁体的总磁化强度是零，但它显示自发的次晶格磁化。居里温度标记着无磁矩排列的有序和无序的转变，这一现象非常类似于其他有序-无序转变。有个比热反常现象，其居里温度可以用改变成分、压力和其他热力学参数的办法来变动。

【亚铁磁性】一种强磁性在亚铁磁性物质中相邻离子磁矩倾向于反平行排列。亚铁磁性主要呈现在象熟知的铁氧体这样的化合物中。

在通常共线的或反平行的亚铁磁性物质中，在足够低的温度（低于居里温度）时，在有序阵列中原子磁矩指向上方和下方，因而磁矩只是部分地抵消而存在净的未抵消磁矩。这使得宏观晶体具有的磁性非常类似于铁磁性。铁氧体的最简单的磁性的品种可以用 $MO \cdot Fe_2O_3$ 来表示，其中 M 是二价金属离子。这种晶体属于尖晶石结构，在这一结构中有两类供金属离子占据的位置。所有亚铁磁性材料含一种以上的磁性离子或一种以上的结晶位置，或两种都不止一种。这样，在离子之间的基本相互作用中，就引入了非对称性。这种基本相互作用决定着原子磁矩的独特的排列。磁矩之间平行耦合或是反平行耦合可能由氧原子为中介使金属离子发生超交换作用而产生，这和反铁磁性很相似。奈耳将铁氧体分成次晶格，并假设次晶格之间存在外斯型分子场相互作用。

【反铁磁性】某些金属、合金及过渡元素的盐类所具有的一种性质。在这些物质中，原子磁矩是在足够低的温度下形成有序排列，这些排列是交错的或是螺旋式的，因而在外磁场为零时，不显示净磁矩。反铁磁体具有较大的顺磁磁化率，在奈耳温度 T_N 处存在一个磁化率的峰值，当温度大于 T_N 时，反铁磁性消失，磁化率 χ_m 与温度 T 之间是下列关系：

$\chi_m = \frac{\mu_0 C}{T + \Theta}$ ，式中 μ_0 为真空导磁系数， C 和 Θ 均为不依温度而变的常数。在奈尔温度 T_N 处，反铁磁体的热胀系数与比热等物理量均有突变。常见的具有反铁磁性的物质都是铁、钴、镍、锰等过渡金属的氧化物、氟化物或硫化物。产生反铁磁性的原因是过渡金属顺磁离子通过氧、氟、硫等离子的超交换作用。

【磁各向异性】实验发现，铁磁晶体沿某一结晶方向容易磁化，而沿另一结晶方向很难磁化。前者称为易磁化方向，后者称为难磁化方向。沿难磁化方向使铁磁材料达到饱和磁化所需能量较大，沿易磁化方向使铁磁材料达到饱和所需能量较小，这两种情况所需能量之差称为铁磁材料的各向异性。磁各向异性的起源是不同原子的自旋和轨道间的相互作用。原子和电子分布不是球对称时，自旋与轨道运动间的相互作用能与原子磁矩的方向有关，沿某些方向时，这项作用能最低，则原子磁矩就倾向于取这个方向。例如铁是立方晶体，它容易沿立方晶体的棱方向〔100〕及其等价方向磁化；钴是六角晶体，六角轴的方向是易磁化方向。

【磁体】具有磁性的物体。通常指产生较强磁场的装置，又称为磁铁。有将硬磁材料制成样品经过磁化能较长期保存其磁性的永磁体；有激磁线圈和软磁铁心组成的电磁体；有超导材料绕制的线圈可产生很强磁场的超导磁体。

【固体发光】当物体受到诸如光、电等的激发后，在不发生化学变化时，总要回复到原平衡状态，这时，一部分多余的能量将通过光或热的形式释放出来，其中在热辐射之外以光的形式发射出多余能量的现象称为发光。发光的全过程可分为受激过程和发射过程，以及一系列中间过程。受激过程是指可激活系统在吸收光子后而跃迁到较高的能态过程，发射过程则是激活系统回复到较低能态（一般为基态）而发射出光子的过程。由于激发方式不同，又可分为光致发光、阴极射线致发光、辐射致发光和电致发光等。

【单轴晶体】在各向异性的晶体中，光沿着某一固定方向传播时，

如同在各向同性的介质中传播一样，不会发生双折射现象，其折射率与偏振方向无关，这个固定的方向称为晶体的光轴。只有一个光轴的晶体称为单轴晶体、有两个光轴的晶体称为双轴晶体。晶体的光轴与几何光学中光学系统的光轴是两个不同的概念。晶体的光轴是一个固定的方向，而不是任意选定的线，但平行于这个固定方向的直线都可以是光轴；几何光学系统中的光轴是通过组成光学系统的球面中心的线，但平行于这条线的其它线则不是光轴。

【正晶体负晶体】如果光在晶体内的传播遵从折射定律，即折射光线在入射平面内，入射角正弦与折射角正弦之比等于晶体对该光的折射率（假定入射光所在的介质折射率为1），这种光称为寻常光，简称 o 光；如果光在晶体内的传播不遵从折射定律，即折射光可以不在入射平面内，入射角正弦与折射角正弦之比不等于一个常数，而是随入射角而变，这种光称为非寻常光，简称 e 光。用 n_o 表示 o 光的折射率， n_e 表示 e 光的折射率。无论光的传播方向如何改变， n_o 是一样的；当光沿着晶体的光轴方向传播时， n_e 与 n_o 相等，e 光的传播速度等于 o 光的传播速度；当光的传播方向逐渐偏离光轴时， n_e 就逐渐增大，到垂直于光轴的方向上， n_e 最大，这样的晶体称为正晶体；若当光的传播逐渐偏离光轴，如果 n_e 逐渐减少，到垂直于光轴的方向上， n_e 最小，这样的晶体称为负晶体。

【晶体双折射】在一部分晶体中，光的传播速度与它的偏振方向无关，当一束光入射到这种晶体表面上时，所产生的折射光只有一束，这样的晶体（如立方晶体系晶体）为各向同性晶体；在另一部分晶体中，光的传播速度与它的偏振方向有关，这样的晶体为

各向异性晶体，如方解石晶体等。当一束光入射到各向异性晶体时，常常会分解为两束偏振方向不同的光，向着两个方向折射，这种一束入射光会产生两束折射光的现象，称为晶体双折射。产生晶体双折射的原因是由于晶体内部的原子、分子在不同的方向上排列不同，从而使晶体在各个方向的性质不同。或者说，双折射是晶体具有各向异性所致。晶体所产生的两束折射光具有不同的折射率、不同的传播速度、不同的偏振方向、不同的传播方向。利用晶体的电光效应也可以产生晶体双折射。

【电光效应】光在各向同性介质或沿单轴晶体光轴方向传播时本无双折射现象，在外加电场作用下介质内部发生电极化而引起折射率变化，出现双折射，这种电致双折射效应称为电光效应。电光效应有两种：感生折射率的变化与外加场强成正比，称为一级电光效应。由德国晶体物理学家普克尔斯于1893年首先发现，故又称普克尔斯效应。折射率的变化与外加场强的平方成正比（如气体、液体和玻璃态固体），称为二级电光效应。由英国物理学家克尔于1875年在玻璃上发现，故又称克尔效应。电光效应的弛豫时间很短，在加上（或撤去）电场后 10^{-9} — 10^{-11} 秒的时间内即发生（或消失），可获得很高的调制频率（ 2.5×10^{10} 赫），故可用来迅速调节光的强度。压电晶体的一级电光效应比液体的二级电光效应灵敏度高且便于使用。另一类具有自发电极化的压电晶体（铁晶体）如铌酸锶钡等其电光效应所需的工作电压在100伏以下，故很有应用价值。

【声光效应】在声波引起的应变影响下材料的光学折射率发生变化。加在材料上的压力变化时，材料密度 ρ 随之变化，因而材料的

折射率 n 也发生变化, n 的微小变化 Δn 与 $n^2 \Delta \rho$ 成比例。内应力或压力与所引起的折射率变化之间的关系确定光测弹性系数 P 。一个低强度声波与通过它的光束之间的相互作用的能力正比于声功率和量值 M , $M = n^6 P^2 / v^3 \rho$, v 是声波在材料中的传播速度, M 仅依赖于媒质的性质, 常称为品质因数。大多数声光效应在1935年以前就已阐明并被观测到, 但其实际应用是在它们能成功地与激光技术结合以后。声控制光束(特别是激光束)的振幅、方向和频率的能力导致了形形色色实用装置的出现, 在声光器件中使用有完全确定频率和方向的激光最为有利, 这些器件正日益广泛地用于象扫描器、记录器和投影器中, 以及信号处理装置和激光控制器中。

【磁光效应】光在各向同性介质或沿单轴晶体光轴方向传播时, 本无双折射现象, 在外加磁场作用下, 使介质产生各向异性性质, 当光以不同于磁场的方向通过介质时, 也发生双折射现象。当光的传播方向与磁场方向垂直时双折射有最大值。这种磁致双折射的原因是构成介质的单个分子有各向异性的性质, 即具有永久磁矩。在不加磁场时各分子的排列杂乱无章, 使得介质在宏观上表现为各向同性, 而在加上足够强的外磁场时, 分子磁矩受到强磁场作用, 按一定秩序排列, 从而使介质在宏观上有各向异性性质。磁光效应还与介质性质及光波波长有关。磁光效应比较复杂, 种类也繁多。有科顿—莫顿效应, 它类似于克尔电光效应, 在液体中可观察到, 其大小与所加磁场强度的平方成正比。有佛克脱效应, 即在原子蒸汽中, 在靠近蒸汽原子的共振频率的地方, 磁场也可引起双折射。另外还有法拉第效应, 即由于磁致圆双折射导致的偏振面旋转的现象。

【结晶发光】物质在结晶时的发光。例如在饱和的氯化钠水溶液中加入盐酸溶液并摇动，氯化钠开始结晶并发出蓝光。

【电致发光】又称场致发光。电能直接转换为光能的一类发光现象，它包括结型电致发光和本征电致发光。前者指具有结型结构的半导体器件在电场作用下发生载流子注入时的发光，又叫载流子注入发光；后者指夹在两电极之间的发光材料在电场作用下发光。通常所说的电致发光往往指本征电致发光。它于1936年为德斯特里奥所发现，故又称德斯特里奥效应。本征电致发光的机制一般认为是在强电场作用下，电子的能量相应增大，直至远远超过热平衡状态下的电子能量而成为过热电子，这过热电子在运动过程中可以通过碰撞使晶格离化，形成电子、空穴对，也可以离乱或激发发光中心。当这些被离化的电子、空穴对复合或被激发的发光中心回到基态时便发出光来。电致发光材料以硫化锌系材料为主。加电场的方法有两种：一种是把发光材料分散在电介质中，叫做粉末电致发光；一种是把发光材料制成薄膜，称为薄膜电致发光。电致发光光谱因材料基质、激发剂、助溶剂及材料制备的灼烧条件而改变，温度和外加电压的频率对发光颜色也有显著影响。利用电致发光现象可制成电致发光屏，用于数字符号显示、特殊照相、象转换及象加强等。

【光致发光】用某种形式的电磁辐射照射物体而激发的一种发光。光致发光一词一般只指入射辐射是在电磁波谱中的紫外区、可见区或红外区的情况；用X射线或 γ 射线激发形成的发光通常有专门的术语。被吸收的激发光的单位能量的发光效率按激发光频率

而变化的曲线叫做激发光谱，激发光谱常常由与该光谱极其相似的发光物体的吸收光谱和吸收能量的发光转换效率所决定。光致发光既可以是荧光，也可以是磷光，或者两者兼而有之。某些磷光体受光或其他激发源作用。能量也可被贮存在磷光体中，以后用某些波长的光照射时才释放出来，这一类光致发光称为受激光致发光。对正常光致发光，只要激发光的强度不改变，光致发光的温度便是一个常数；而受激光致发光的强度则随着所贮存能量的释放而不断减小。光致发光的应用很广，日光灯就是将紫外光转变为可见光的最常见的光致发光装置。有的光致发光材料余辉很短，只在红外线刺激下才发光，可利用这一现象制成红外线探测仪。

【阴极射线致发光】用电子束轰击物质产生的一种发光。阴极射线致发光的主要应用是阴极射线示波器和电视显象管，在这些器件中，有一薄层发光粉均匀地涂敷在阴极射线管透明的玻璃面板上，阴极产生的电子束在管内的各种电极作用下，受到加速、聚焦和偏转后，撞击到发光层上，由此产生的发光一般是通过管子的玻璃面板，也就是从膜层不受轰击的一方去观察的。根据管上所要显示的信息类型，采用各种发光颜色和持续时间的磷光体或磷光体混合物，对于足够小的电流密度 j ，磷光体在阴极射线轰击下的发光亮度 B 正比于 j ，可是在较高的电流密度时出现饱和效应。 B 与轰击电压有关，根据经验关系式： $B = kf(j)(V - V_0)^q$ ，对不同的磷光体，其值在1和3之间。式中 k 是面极材料的一个常数， $f(j)$ 代表亮度对电流密度的依赖关系， V 是加速电压， V_0 是所谓的死电压， q 是特定磷光体的一个常数。电子束能量转变为光能的最高效率约20%。

【热致发光】有时泛指一种材料由于加热而产生的任何一种发光，但更多的是专指材料的温度稳步上升时出现的发光。含有发光中心的很多固体，往往含有一种或多种捕获电子的陷阱。

【辐射发光】 α 、 β 、 γ 及X射线激发物体所引起的发光。辐射发光又可称为高能粒子发光。当高能带电粒子入射发光体后，同发光体中的原子（或分子）碰撞，引起原子的激发或电离，从原子电离出来的电子，具有很大的动能，可以继续引起其他原子的激发或电离，因而产生大量次级电子。高能光子流入射发光体时，可产生光电效应、康普顿效应和电子对效应，这些效应都能产生大量次级电子。例如对于X射线，高达10%以上的发光量子效率并不难获得，这些都是有别于普通激发和发光的特性。

【热释发光】又称热致发光。在一定温度下激发发光材料，激发停止后，发光体内尚贮存部分光能。当提高发光体的温度后，可以使贮存其中的光能释放出来而产生发光，这种现象称为热释发光。激发时可将发光体置于低温下，采用紫外线激发、放射线激发、电场激发等。发光体内所以能贮存光能，是由于体内存在有电子陷阱的缘故。激发后，当逐渐提高发光体的温度时，陷阱中的电子因热激发而被释放出来，与发光中心复合而发光。发光体的温度不同。释放出来的光能就不同，光强峰值所在的温度近似地反映着陷阱的深度。所以通过对热释发光的研究，可以了解发光材料内陷阱的能级按深度的分布情况。

【摩擦发光】晶体在临断裂时的发光。现象早在17世纪初就有记载，而应该在更早被观察到的。这是一种很容易观察到的现象，例如糖

在罐中结成块,用刀去拨时就可能见到摩擦发光。其它如盐、玻璃、冰在充分黑暗环境中破裂时也发光。现在估计有一半晶体皆能有摩擦发光,而且认为结晶之无对称中心者更可能,因而与压电效应(也存在于无对称中心的晶体中)有连系,并解释为压电效应的电场致使在破裂时气体放电。也有些情况,例如硝酸双氧钠,其摩擦发光光谱包括其光致发光光谱,因而解释为在断裂中有紫外辐射存在于其气体放电中,而又激发出光致发光。有些摩擦发光光谱几乎与光致发光光谱一致,则解释有困难。摩擦发光其外文字头取自希腊文,定名在1888年,其实此字头的含义是断裂,但该字的正确含义是摩擦,因而此词从表面看与所指不太相符,不过在摩擦中也造成断裂,所以也用研磨、用针尖在某种材料上划痕来研究这一现象,断裂的意思就是让物质中新的表面暴露出来。

【发光体】能将所吸收的全部或一部分能量不通过热能的形式而发出辐射(主要是可见光)的物质。换言之,是一切荧光和磷光物质。

【激活剂】为了使基质材料中形成发光中心所掺进的微量杂质叫做激活剂。无机的固体发光材料通常都是以一种纯物质为主体再掺进一些杂质而制成。其中作为发光材料主体的物质称作基质。当只有基质时,若用电子束、紫外线或其他激发源作用,并非都能发出强的光束。要获得高效率的发光,必须在固体中形成发光中心。发光中心有多种类型,最基本的是使微量金属离子扩散进入基质,从而在禁带中引入新的局部能级所形成的发光中心。激活剂即是对基质起激活作用,使原来不发光或发光微弱的材料产生较强发光的一类杂质。

【共激活剂】与激活剂协同激活基质、加强激活剂引起发光的一类杂质。激活剂是对基质起激活作用,使原来不发光或发光微弱的材料产生较强发光的一类杂质。有时在某种情况下,为了更容易向基质中扩散激活剂,还要加进一些其他杂质。例如,在硫化锌中除加进作为激活剂的铜、银等杂质外,有时还加进一些氯、溴等杂质。这些杂质单独存在时虽不起激活作用,但它与激活剂一起往往构成复杂的激活系统,提高了材料的发光效率。参见“激活剂”。

【敏化剂】在敏化发光中有些物质起着促成的作用称为敏化剂外,在光化作用也有着完全相似的情况。敏化剂是帮助吸收某些辐射,自身并不起化学变化,只将能量转输给另一部分物质。在光合作用中的叶绿素就是一种敏化剂。在照相中敏化剂的功用也是很重要的,有光学和化学的两种敏化剂。此外还有超敏化剂,退敏也可以认为是一种敏化。紫外敏化则是另一种。敏化发光是只有予以敏化才会发光的发光体,例如有些发光体不能由紫外线激发发光,因为它不吸收紫外线,于是加入另一种激活剂(敏化剂)使其吸收。一般所发光除原有光谱带以外又另增加新谱带。

【荧光粉】粉末状的荧光物质。荧光粉(有时又称为磷光粉)是现在广泛使用的发光材料。其通常是在精制的基质材料里添加微量的激活剂,再加适当的熔剂,在几百度到 1000°C ,或者更高一些的温度下经数十分钟至几个小时烧成。荧光粉是由几微米至10几微米大小的微晶颗粒聚集而成的多晶体状态的发光材料。其发光特性决定于原料的组成、激活剂的种类和添加量、灼烧气氛和熔剂等。

【超导体】处于超导相(态)的物体。某些物体(主要是某些金属及合金以及近来发现的氧化物陶瓷系)当温度下降至某一定值时,其电阻突然趋近于零,比热也发生突变,物体发生相变。我们常把电阻为零的相称为超导相,而把另外的一个相称为正常相,并把发生相变的温度称为临界温度。超导体有下面主要特征:(1)电阻率趋近于零。(2)磁场能破坏超导相。即在一定温度下,施加一定磁场,能使物体由超导相转变为正常相。(3)超导体具有完全的逆磁性。处在外磁场内的物体当其温度下降至临界温度以下时,超导体能把磁感应线完全排斥在体外。(4)超导体的比热与 $\exp(-A/T)$ 成正比。这里 A 是比例常数, T 是绝对温度。(5)在可见光范围,超导体的光学性质与其在正常相时的光学性质相同,但在红外及微波波段,存在有一个阈值频率,在此阈值频率以下显示出零电阻率(即没有能量损耗)的特点。超导体的主要性质有零电阻现象,迈斯纳效应,同位素效应,磁通量子化和约瑟夫森现象等。到1986年为止,已发现的超导材料成千上万,仅周期表中就有54个元素内具有超导性(其中31个为超导元素,10个为薄膜超导元素,13个为加压超导元素)。超导体遍及纯金属、合金、化合物材料,形态上有单晶、多晶和非晶。这其中临界温度最高的是锆铌合金(Nb_3Ge)薄膜(临界温度=23.2K)。1986年4月,美国IBM公司瑞士苏黎世研究室的贝德诺兹和缪勒在 *Z. Phys. B.* 杂志上发表了关于Ba-La-Cu-O系可能具有35K高温超导性的文章。该项研究成果被认为是超导材料研究的一块里程碑,开创了超导研究的新局面。使超导研究突破了液氮禁区,进入液氮温区。关于超导电性的起因,目前主要有BCS理论,它是由美国科学家巴丁、库珀、施里弗于1957年提出来的。他们认为通过电子-声子-电子相互作用使动量和自旋相反的两个电子形成束缚态,即形成Cooper电子对。在外场作用下,库

珀对将获得附加的动量,并形成电流。由于库珀对受声子散射时,不会改变它的总动量,因此也不会改变电流,这样即使去掉外场,电流也不会减少,因而获得超导电性。由于库珀对的束缚能比较小,因此只有在低温下,也即只有在临界温度以下,才能形成库珀对,出现超导相。

【超导元素及合金和化合物】自从1911年昂尼斯发现汞、锡等元素具有超导电性以来,由于低温技术的发展,已发现或制出上千种超导材料。以前被认为是罕见的超导现象,现在已经是金属在低温下的普遍现象,但对于铜、银、金等在室温下的良导体以及一些铁磁和反铁磁元素仍未发现它们有超导电性。值得注意的是,在采用了特殊技术后(如高压技术、薄膜技术、极快速冷以及非晶无序技术等),以前不能显示出超导电性的许多元素现在也在一定条件下出现了超导态。利用薄膜技术可大大提高一些元素的超导转变温度。用离子注入技术研究不同离子注入后对 T_c 的影响,是近几年来的高新技术之一。稀土、类稀土及钢系元素的超导电性问题是值得深入研究的领域。为获得具有实用价值的超导材料的重要的技术手段是制造合金及化合物,这里有二元、三元和多元的化合物及合金。组成这些合金及化合物的元素可以都是超导元素,也可以其中之一是超导元素或都是非超导元素。近几年来,国际超导电性研究领域,非常规超导体的研究工作蓬勃发展(指一些不同于传统研究的,或已经在超导电技术中应用的超导体),它们主要包括:(1)重费米子超导体;(2)低电子密度超导体;(3)低维无机超导体;(4)超晶格超导体;(5)有机超导体;(6)非晶态超导体和颗粒超导体;(7)磁性超导体。由于发现了在液氮温区出现超导电性的新材料,则由超导技术引发的技术革命,涉及电力

工程、电能输送、电动机及发电机制造、磁流体发电、超导磁悬浮列车、超导计算机、高能加速器等都将提到日程上来，预计在本世纪末到下世纪初展开。

【超导微观理论】从研究电子运动来阐明超导电性的量子理论。超导电性发现以后，大量的实验证明，超导电性的产生是电子气状态的变化引起的；实验还证明，金属一旦变成超导，则体系能量要降低。但若电子间有某种吸引作用，则必然导致体系能量的降低。这个相互吸引作用来自何处是人们长期研究的问题。1950年从实验中发现了超导临界温度的同位素效应，指明了导致超导的机制是电子-声子相互作用。1957年库珀等人建立了BCS理论。BCS理论有两个基本概念。首先，超导电性的起因是费米面附近的电子之间存在通过交换声子而发生的吸引作用。其次，由于这种吸引作用，费米面附近的电子两两结合成对，叫做库珀对。BCS理论能够解释大量的超导现象和实验事实，是一个成功的理论。1962年约瑟夫森预言了一种与两块超导体间弱耦合有关的效应，不久就得到实验的证实，而命名约瑟夫森效应。理论的成就，促进了实际应用的发展。目前理论与实验的差异可缩小到百分之一左右。超导微观理论是固体理论中一个成功的典范。目前在某些领域已经开始进入实用阶段。

【BCS理论】见“超导微观理论”。

【库珀对】通过电子-声子-电子互作用，费米面附近两个动量相反自旋相反的电子所形成的束缚电子对。最初由L. N. Cooper在1956年提出，用来解释超导现象。以后在此基础上建立了BCS理

论。根据 BCS 理论，超导体内电子系统的基态是由库珀对凝聚而成。库珀对的束缚能可表示成 $E = 2\hbar\omega_D \left[\exp\left(\frac{-1}{g(0)V}\right) - 1 \right]$ ，这里 ω_D 是声子的德拜频率， $g(0)$ 是正常态电子在费米面附近的状态密度， V 是电子与声子间的相互作用系数。库珀对在晶体内受声子散射时，它的总动量保持不变，因此当库珀对在外场作用下获得附加动量后，即使去掉外电场，这些附加动量也不会因声子散射而衰减，这样由这些附加动量引起的电流也不会衰减，因而获得超导电流。由于库珀对的总自旋为零，所以它具有玻色子的许多特性。更进一步的理论表明：当计入多体效应后，两个电子间不再能形成稳定的束缚态，但是它们的运动仍然是相互关联着的，我们仍然能把一对对互相关联着运动的电子叫做库珀对。

【强耦合超导体】须用强耦合理论进行解释的超导体。主要指铅、汞等电子-声子间具有强耦合作用的超导体。由于电子-声子间的相互作用较大，两者间有比较强的耦合，因此不能再认为通过电子-声子-电子相互作用而引起的电子间吸引作用是瞬时的，因此不能再象弱耦合理论那样忽略推迟效应，为此强耦合理论直接从电子-声子相互作用哈密顿量出发，采用更为严格的方法进行讨论。由于超导凝聚态的出现，使通常的微扰理论不能被应用。1960年，奈姆布提出了一种新的方法，使标准的微扰展开图形解法能应用于超导态，以后艾力斯伯格建立了 Eliashberg 方程，求解此方程可以得到与实验相符的结果。

【第一类超导体】又称软超导体。超导体中的一类。除钒、铌、钽外，其他所有金属元素超导体均属于这一类。它存在一个临界磁场

H_C , 当外磁场 H_a 小于临界磁场 H_C 时, 它呈现出完全的逆磁性, 即它的磁化强度

$M = -\frac{1}{\mu_0} H_a$, 这里 μ_0 是真空磁导率, 因此超导体内的磁感应强度 $B = H_a + \mu_0 M = 0$ 。这类超导体内不允许出现超导态及正常态同时并存的情况, 即一旦当外磁场超过临界磁场 H_C 时, 整个超导体全部都转变成正常导体。根据 Ginzburg—Landau 理论, 要求这类超导体的 G—L 参数 $K < 1/\sqrt{2}$, 它们的相干长度大于它的穿透深度。相对于 II 类超导体来说, 它的正常态时导电电子具有比较大的平均自由程。

【无能隙超导体】 能隙参量为零的超导体。把磁性杂质掺入超导体内可以降低超导体的临界温度, 与此同时也可使能隙参量变小。能隙参量是超导体的重要参数。根据 BCS 理论, 通过电子—声子—电子相互作用, 费米面附近的两个动量相反、自旋相反的电子组合成库珀对, 这些总动量为零的库珀对聚集在一起形成超导基态, 超导基态与激发态之间能量并不连续, 而有一能量间隙, 此能量间隙即称之为能隙参量。在掺入的磁性杂质的某一浓度下, 可以使能隙参量变为零, 但临界温度 T_C 仍大于零, 这样在 $T < T_C$ 时, 就得到无能隙超导体。实际上除磁性杂质外, 某些其他扰动也可以使超导体出现无能隙状态, 只要在这种扰动作用下, 超导体是以二级相变形式转变为正常态, 那么此超导体总是先进入无能隙状态, 然后再转变为正常态。

【第二类超导体】 又称硬超导体, 超导体中的一类。钒、铌、钽等三种元素超导体及大多数合金超导体均属于这一类。它存在有两

个临界磁场，即下临界磁场 H_{c1} 及上临界磁场 H_{c2} 。当外磁场 H_a 小于下临界磁场 H_{c1} 时，它有完全的逆磁性，即超导体内的磁感应强度等于零。当外磁场 H_a 大于下临界磁场 H_{c1} ，而小于上临界磁场 H_{c2} 时，磁感应线开始通过体内部分区域，出现超导态与正常态同时并存的情况。随着外磁场 H_a 逐渐增大，正常态的区域不断扩大，而超导态区域不断缩小，当外磁场 H_a 达到上临界磁场 H_{c2} 时，整个物体全部都转变成正常导体。根据京茨堡—朗道理论，要求这类超导体的 $G-L$ 参数 $K > 1/\sqrt{2}$ 。它们的相干长度小于它的穿透深度。一般来说，它在正常态时导电电子的平均自由程都比较小。在实际应用上，II 类超导体比起 I 类超导体来，具有更大的价值。

【硬超导体】 即“第二类超导体”。

【超导磁体】 用超导材料绕制的磁体。它的优点是体积小、重量轻，耗电少，适合于制成具有某种特殊要求（如高均匀性、高稳定性、高梯度等）的磁体。特别是对三万高斯以上的直流磁场，超导磁体的优越性是无可比拟的。其缺点是只能在临界温度以下工作，因而必须与复杂的低温工程技术相配合才能使用。目前已制作出内径 3.1 厘米、中心场强为 17.5 特斯拉的超导磁体。超导磁体是高能物理、受控热核反应、固体物理、生物物理、医学等基础学科研究中的重要工具。在电工、磁分离等工业应用方面也在进行一些探索工作。

【超导量子干涉器】 利用超导体的量子干涉效应制作成的器件。常见的有双结量子干涉仪，它的大致结构即为，把一环形超导体分成两半，中间夹入极薄的绝缘层，当绝缘层的厚度比相干长度小

得多时，绝缘层两侧的超导电子相互发生耦合，在没有外加电场及磁场情况下，将有直流电流流过绝缘层。流过绝缘层的电流不仅决定于绝缘层及超导体的结构，而且也决定于绝缘层两侧超导电子波函数的位相差。如果在超导环包围的面积内有磁场通过，将使超导电子波函数的位相差发生正比于通过环形面积内的磁通量的变化，从而导致通过绝缘层的超导电流也随着磁通量发生变化。通过绝缘层 a 及绝缘层 b 的超导电流间又会发生相互干涉，最后可得通过超导环的总电流 $I = I_0 \cos \frac{\pi \Phi_0}{\varphi_0}$ ，这里 I_0 表示总电流的幅值，决定于绝缘层及超导体的结构。 Φ 是通过环内面积的总磁通， $\varphi_0 = \frac{h}{2e}$ 是磁通量子，因此根据电流的振荡周期即可决定通过环内的磁通量。环内面积可以精确测量，由此可以决定磁感应强度，它常被用作磁强计，用来精确测定磁感应强度，其分辨率可达 10^{-11} — 10^{-12} 特斯拉。

【超低温技术】一般将低于 0.3K 的温度称为超低温。超低温的实现有几种方法，如通过对 ^4He 液浴减压可达到 0.5K；利用 ^3He 液浴减压可达 0.3K；利用硝酸铈镁（CMN）等顺磁盐进行绝热去磁，可达几 mK 温度；利用 ^3He — ^4He 稀释致冷机可达 1.5mK，利用波密朗丘克冷却和绝热核去磁可达到更低的温度。

电 磁

【电磁相互作用】带电粒子与电磁场的相互作用以及带电粒子之间通过电磁场传递的相互作用,是自然界四种基本相互作用之一。这四种基本相互作用按强度依次排列为:强相互作用,电磁相互作用,弱相互作用和引力相互作用。电磁相互作用和引力相互作用都是长程力,所以他们可以在宏观尺度的距离中起作用而表现为宏观现象。研究电磁现象基本规律的学科是电磁学。宏观电磁现象的经典的动力学理论是以麦克斯韦方程组和洛仑兹力为基础的经典电动力学。微观的电磁作用理论是量子电动力学,它是麦克斯韦理论与20世纪初发展起来的量子力学原理的结合。近代物理实验结果证明量子电动力学的理论至少在距离大于 10^{-16} 厘米处是正确的。

【电荷】构成实物的某些基本粒子的固有属性之一。电荷有正、负两种;同种电荷相斥,异种电荷相吸。规定用丝绸摩擦过的玻璃棒所带电荷为正电荷,又称阳电荷;用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷为负电荷,又称阴电荷。电荷的国际单位制单位为库仑。电荷具有“量子化”特性,即任何带电体的电荷都只能是基本电荷($1.6021892 \times 10^{-19}$ 库仑)的整数倍。1911年密立根在油滴实验中第一次对基本电荷进行了令人信服的直接测定。通常的物质由原子构成,原子又是由原子核(内含质子和中子)和核外电子组成。

电子带负的基本电荷；质子带正的基本电荷；而中子电荷为零。在正常情况下，由于原子核内的质子数与核周围的电子数相等，原子呈电中性，因而整个物体也呈电中性，被认为不带电。当它们由于某种原因（如摩擦、受热或化学变化等）而失去一部分电子时，就带正电；获得额外电子时，就带负电。在任何孤立系中，各种化学反应或核反应中总电荷是一个恒量，即基本电荷的代数和保持不变。电荷周围存在电场，运动时会产生磁场。在电场中的电荷受到电场的作用力；在磁场中的运动电荷还受到磁场的作用力。

【电荷守恒定律】表述为：电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。任何封闭系统的总电荷永远不变，例如在摩擦起电过程中，某种电荷从一物体转移到另一物体，从而使两个物体带有等量异号的电荷。又如，尽管物质的基本粒子不断地、自发地产生、消失，并互相转化，但它们的净电荷量总是保持不变。荷电粒子变成新粒子时，新粒子精确地具有原来粒子的电荷。当荷电粒子从无到有，总会伴生出带等量、异号电荷的另一种粒子。荷电粒子的湮没需要有等量异号电荷的粒子一起湮没。该定律是电磁现象中的基本定律之一，普遍适用于宏观和微观现象。根据电荷守恒定律，单位时间内通过任一封闭曲面 s 流出的电荷量 $\oint \vec{J} \cdot d\vec{s}$ 应等于 s 面内总电荷量减少率，即 $\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dQ}{dt}$ ，其中 \vec{J} 是电流密度， Q 是包围在 s 内的总电荷量。此式又称为电流的连续性方程，是电荷守恒定律的数学表述。

【电中性】正负电荷的作用相互完全抵消的状态。从物质的微观结

构来看，任何所谓不带电的物体，并不是其中根本没有电荷，而是其中含有等量异号的电荷，且正负电荷中心重合，以致其整体处在中和状态，对外界不呈电性。

【摩擦起电】两种不同材料的物体相互摩擦后，分别带正、负电荷的现象。历史上，富兰克林首先规定用丝绢摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为正电荷；用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷称为负电荷。这一定义，国际上一直沿用到今天。摩擦起电实际上是使电子从一个物体转移到另一个物体的结果。因此，原来两个不带电的物体摩擦起电后，它们所带的电荷数值相等，符号相反。

【电荷密度】电荷分布疏密程度的量度。电荷连续分布在体内（表面、线上）时，单位体积（表面、长度）内的电量称为电荷体（面、线）密度。某点的电荷体（面、线）密度 ρ (σ 、 λ) 等于在围绕该点的小体积元（小面积元、小长度元） Δv (Δs 、 Δl) 内的电荷 Δq 与 Δv (Δs 、 Δl) 的比值的极限值，用公式表示为

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v}$$

$$(\sigma = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s}, \lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l}).$$

当电荷分布在导体或介质的表面附近很薄的一层里，且电荷沿纵深方向的分布对所研究的问题无关紧要时，就可把这表面层抽象成一个没有厚度的几何面，用电荷面密度来描写该面上电荷分布的疏密程度。当电荷分布在某根细棒或细线上，且电荷沿横截面的分布对所研究的问题无关紧要时，就可把细棒或细线抽象成一条几何线，用电荷线密度来描写该棒或该线上电荷分布的疏密程度。

【库仑定律】关于点电荷间相互作用的定律。相对于惯性参照系处在静止状态的两个点电荷 q_1 和 q_2 在真空中的相互作用力 \vec{F} 的大小与电荷的乘积 $q_1 \cdot q_2$ 成正比，与它们之间的距离 r 的平方成反比；作用力的方向沿它们的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸，用公式表示为

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$

式中 \vec{r} 是施力电荷指向受力电荷的矢径， $\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12}$ 法拉/米，称为真空电容率。库仑定律最早是由法国科学家库仑于 1785 年从扭秤实验总结出来的。近代实验（威廉斯、费勒，1971 年）证明了平方反比律偏差不大于 $\delta = (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。粒子物理实验和地球物理实验结果表明，两点电荷之间距离的数量级在 10^{-15} — 10^9 厘米的范围内，库仑定律是极其精确的。

【电场】存在于电荷或变化磁场周围空间的一种特殊形态的物质，是电磁场的一个方面。其基本特性是对位于场中的电荷施以作用力。电场的强弱和方向用电场强度来描述（点电荷 q 在电场强度为 \vec{E} 的电场中受到作用力 $\vec{F} = q\vec{E}$ ）。电场是矢量场，可以用电力线形象地图示。静止电荷产生的电场叫做静电场，又称库仑场。静电场的电力线不闭合，而是由正电荷出发，终止于负电荷。对于这种场可以引进电势和电势能的概念，是一种“有势场”。随时间变化的磁场产生的电场叫做感应电场，它遵从高斯定理和法拉第电磁感应定律，是无源涡旋场，因此感应电场又叫做涡旋电场。感应电场的电力线是闭合曲线。对于这种场，一般不能引进电势和电势能的概念，是一种“非势场”。普遍情况下电场为静电场和感应电场的

叠加。

【电场强度】描述电场强弱和方向的物理量，简称场强，常用符号 \vec{E} 表示，是一矢量。任意点的电场强度 \vec{E} 定义为放于该点的静止试验正电荷（体积和电荷量都充分小）所受的力 \vec{F} 与其电荷量 q 的比值，即 $\vec{E} = \vec{F}/q$ 。电场强度取决于源电荷，而与试验电荷无关。严格地说，在电场中引进一个小试验电荷，由于它本身也具有电场，会使原电场发生微小变化，所以把电场看作是在受到试验电荷扰动前每单位正电荷所受的力。通常，电场强度 \vec{E} 的方向和大小随空间和时间而变化，因此它是空间位置 \vec{r} 和时间 t 的函数，即 $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$ 。当 \vec{E} 随时间变化时，称为交变电场；当 \vec{E} 不随时间变化时，称为静电场；当 \vec{E} 不随 \vec{r} 变化时，称为匀强电场。在国际单位制中，电场强度的单位是牛顿/库仑或伏特/米。

【电场强度叠加原理】电磁学中的一个基本原理。表述为：在空间某点处，任意电荷系统产生的总场强等于组成电荷系统的各个电荷单独存在时在该点的电场强度的矢量和。例如在真空中某点，由几个静止点电荷 q_1 、 q_2 、 \dots 、 q_n 共同产生的电场强度 \vec{E} 为，

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i(\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$$

式中 \vec{E}_i 为点电荷 q_i 在该点处单独产生的电场强度， \vec{r} 和 \vec{r}_i 分别为场点和场源 q_i 的位置矢量， ϵ_0 为真空电容率。如果电荷分布是连续的，可以把它分为无限小的电荷元 Δq ，再把每一电荷元对电场的贡献 $\Delta\vec{E}$ 加起来（即求积分），就可以求出总电场强度 $\vec{E} = \int d\vec{E}$ ，其中，积分是遍及所有连续分布的场源。

【电力线】为直观地图示电场分布引入的假想曲线。电力线上各点的切线方向表示该点电场强度 \vec{E} 的方向；电力线的疏密程度表示电场强度 \vec{E} 的大小。在电荷所激发的电场中，电力线不是闭合曲线，它起始于正电荷，终止于负电荷。

【电位】又称电势。描写静电场性质的一个物理量。场中某点的电位定义为把单位正电荷从该点移动到选定的电位零点时，电场力所作的功。由库仑定律指出，静止点电荷间的相互作用力是有心力，其方向在两者的连线上，其大小只依赖于点电荷之间的距离。因此静电力对电荷所作的功与路径无关，仅由起点和终点的位置决定。若 \vec{E} 为电场强度， L 是场内的任一闭合路径，这一性质可表述为 $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ ，即静电场的环量恒为零；或 $\nabla \times \vec{E} = 0$ ，即静电场的旋度为零，为无旋场（静电场的环量定理），式中 ∇ 为微分算符，在直角坐标系中 $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 、为 x 、 y 、 z 轴的单位矢量。所以在规定了电位零点之后，场中各点的电位都具有确定的值。用场强 $\vec{E}(\vec{r})$ 或用电位 $\varphi(\vec{r})$ 来描述静电场完全是等价的。 \vec{E} 是一个矢量场， φ 是一个标量场，两者之间的关系是：电场强度等于电位梯度的负值，即 $\vec{E} = -\nabla\varphi$ 。由于标量运算比矢量简单，因此在许多具体问题中，往往先计算电位，再用电位梯度求出场强。电位零点的选择在不同问题中可以不同。如当产生电场的电荷分布在有限的空间内，理论计算时常把无限远作为电位零点；实用上常取地球（或电器外壳）的电位为零。国际单位制中电位的单位是焦耳/库仑，称为伏特。

【等位面】又称等势面。静电场中电位相等的点所构成的曲面。等位

面上各点的场强与等位面垂直,等位面与电力线正交。电荷沿等位面移动时,电场力对它不作功。可借助等位面图形象地描绘电位的分布。例如一个点电荷产生的静电场的等位面是以该点电荷为中心的球面。等位面的概念也可应用于其他势场(如引力势)。

【电位差】 又称电势差。静电场或稳恒电场 \vec{E} 中, a、b 两点间的电位差 φ_{ab} 等于把单位正电荷从 a 点移动到 b 点时电场力所作的功, 即 $\varphi_{ab} = \int_{ab} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ 。由于静电力做功与路径无关, 于是 a、b 两点的电位差等于这两点电位的差值, 即 $\varphi_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$, 式中 φ_a 和 φ_b 分别为 a 点和 b 点的电位。在直流电路中(因电场是稳恒电场, 也是无旋场), 电位差又称为电压。电位差的单位与电位同。

【零电位】 见“电位”。

【等位面】 见“电位”。

【电位差】 见“电位”。

【电势】 即“电位”。

【零电势】 见“电势”。

【等势面】 见“电势”。

【电势差】 见“电势”。

【静电势能】 又称静电位能。电荷因为处于外电场中而具有的一种相互作用势能。点电荷 q 在场中某点处的静电势能等于把它从该点移动到电势零点时电场力所作的功, 即 $W = q\varphi_e$, φ_e 为该点的电势。对电荷体密度为 ρ 的电荷体系, 它在外场中的静电势能为 $W = \int \rho\varphi_e dv$ 。静电势能是标量, 它的值与零电势点的选取有关, 选取方法参见“电位”。由静电势能可计算电荷或电荷系统(如电偶极子)所受的力和力矩。

【导体】 能很好传导电流的物体。导体中存在大量可以自由移动的带电粒子, 称载流子。在外电场作用下, 载流子作定向运动, 形成宏观电流。各种金属、酸、碱、盐的水溶液以及电离气体、人体、大地等都是导体。金属中的载流子是自由电子, 每立方厘米中约有 10^{22} 个。酸、碱、盐的水溶液中的载流子是正离子和负离子。导体具有很小的电阻率。例如在室温下, 各种金属的电阻率约为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 欧姆·米, 在极低温度下, 某些金属与合金的电阻率将消失而转为“超导体”。

【电偶极子】 一对间距 l 远小于它们到观察点距离的等量异号点电荷 $+q$ 、 $-q$ 组成的体系。它的特性用电偶极矩(或电矩) \vec{p} 描述, 是一矢量。 $\vec{p} = \vec{l}q$, \vec{l} 的方向规定由 $-q$ 指向 $+q$ 。在国际单位制中, 电偶极子 \vec{p} 在真空中产生的电场强度 \vec{E} 为

$$\vec{E} = \frac{r}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3(\vec{p} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}}{r^3} \right]$$

式中 ϵ_0 为真空电容率, \vec{r} 为电偶极子中心至观察点的矢径。电偶极子 \vec{p} 在外电场 \vec{E}_0 中的静电势能 $W = -\vec{p} \cdot \vec{E}_0$; 受到的平移力 $\vec{F} = p$

$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ ；力矩 $\vec{T} = \vec{p} \times \vec{E}_0$ 。这表明，只有当电偶极子处于非均匀电场中才受到沿电场强度增加方向的作用力。而不论在均匀电场还是非均匀电场中，它受到的力矩都将使 \vec{p} 转向外电场方向。电偶极子的例子很多，例如，在外电场作用下，原子外围电子云的中心稍偏离原子核，会形成感生电偶极子，水分子中的两个氢原子分别向两侧突出，以氧原子为顶点形成 105° 夹角，从而形成永久性电偶极子。电偶极矩的单位为库仑·米。

【电多极子】由 2^n 个大小相等、正负各半的点电荷排列成有规则的点阵组成的体系。在多极子系列中， $n=1$ 是电偶极子； $n=2$ ，称为电四极矩； $n \geq 2$ ，统称为高阶多极子。它们的特性分别用电偶极矩、电四极矩、电八极矩等等来描述。任意点电荷集合或任意分布电荷，如果能够用一个球面包围，则球外的电位可以用集中在球心的点多极子系列的合成电位表示，称为电场的多极子展开。

【绝缘体】具有良好的电绝缘或热绝缘的物体。电绝缘体又称电介质，电阻率很大，约为 10^8 — 10^{18} 欧姆·米，在通常情况下不传导电流。玻璃、橡胶、丝绸、琥珀、松香、硫黄、瓷器、油类、塑料以及未被电离的气体等都是良好的电绝缘材料。真空是最理想的绝缘体。电介质的重要性质包括电阻率、介电常数和击穿电压等。通常，电介质在外电场作用下将产生电极化，即电介质内的正电荷顺着电场方向、负电荷逆着电场方向作微小的位移。电荷的这种微小分离或极化，使电介质内的电场减弱，对其他电现象产生影响。例如电介质中电荷的相互作用力较真空中为小，而电介质在一电场作用下其单位体积内储存的能量为大。介质电容器的电容也比

真空电容器为大。用相对电容率（介电常数）、电容率、极化率等描述电介质的宏观电性质。当外加电压（电场）超过击穿电压（场强）时，电介质的绝缘性能会遭到破坏，不再成为绝缘体。电绝缘体在工程上大量用作电气绝缘材料、电容器的介质和特殊的电介质器件（如压电晶体）等。常用的热绝缘体有空气、木、棉、毛等。

【电介质】 见“绝缘体”。

【电介质极化】 外电场作用下，电介质呈现电性的现象。一般情况下，在没有外电场时电介质内部的正负束缚电荷平均说来处处抵消，宏观上不呈现电性。在外电场作用下，束缚电荷的局部移动会导致在电介质的表面和内部不均匀处出现电荷，显示出电性。这种现象称为极化，出现的电荷称为极化电荷。根据电介质的分子（或原子）结构，可将极化分为二种类型：（1）无极分子的位移极化。在这类电介质中，每个分子的正负电荷“重心”在没有外场时彼此重合，因此与这分子等效的偶极子的偶极矩为零。这样的分子称为无极分子。如气态的氢、氮及固态的聚乙烯分子都属于无极分子。在外电场作用下，无极分子中的正、负电荷的“重心”向相反方向作一个微小位移，形成感应电偶极矩。于是在与外电场垂直的电介质端面上，一端出现负电荷，另一端出现正电荷。这种极化机制称为位移极化。这时，在外电场的一定限度内，电场越强，分子的电矩越大，介质表面上出现的极化电荷越多，极化程度也越高。（2）有极分子的取向极化。在这类介质中，每个分子的正、负电荷“重心”在没有外场时并不重合，因此偶极矩不为零，这样的分子称为有极分子。如气态的二氧化硫及液态的水等分子都属于有极分子。在没有外场时，虽然每个分子有一定电矩，但是由于分子的

热运动,电矩的方向是混乱的,在宏观上呈电中性。在外场作用下,分子的固有电矩有沿外电场取向的倾向,外电场越强,分子电矩沿外电场的取向程度越高,极化程度也越高。这种极化机制称为取向极化。位移极化效应在任何电介质中都存在,而取向极化效应仅在由有极分子构成的电介质中存在。不过在有极分子构成的电介质中,取向极化效应比位移极化强得多,因此取向极化是主要的。对非均匀电介质,极化的结果除了出现极化面电荷外,其内部还会出现极化体电荷。

【电容率】表征电介质极化性质的宏观物理量。常用 ϵ 表示,等于电介质中的电位移 \vec{D} 与电场强度 \vec{E} 之比,在国际单位制中表示为, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 。也等于相对电容率 ϵ_r 与真空电容率($8.854187818 \times 10^{-12}$ 法拉/米)的乘积 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$,单位为法拉/米。电容率通常随电介质的温度和电磁波变化的频率而变。由于充满电容率为 ϵ 的平板介质电容器的电容与 ϵ 成正比,所以电容器用的电介质要求具有较大的电容率,以便减小电容器的体积和重量。

【绝对电容率】即“电容率”。

【相对电容率】又称介电常数。表征电介质性质的物理量。常用符号 ϵ_r 表示,等于电容器中充满均匀电介质时的电容值 C 与其中为真空时的电容值 C_0 之比, $\epsilon_r = C/C_0$ 。也等于电容率 ϵ 与真空电容率 ϵ_0 ($8.854187818 \times 10^{-12}$ 法拉/米)之比 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 。它与电介质极化率 χ_e 的关系为 $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ 。相对电容率随电介质的温度和电场变化的频率而变。在光学频率范围内,通常有 $n = \sqrt{\epsilon_r}$,式中 n 为媒质的折射率。

【真空电容率】在国际单位制下,在库仑定律的公式中引进的一个有量纲的常量。常用 ϵ_0 表示。它与真空磁导率 μ_0 和真空中光速 c 之间的关系为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

由光速实验值和 μ_0 的定义值 $4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/安培·米可求出 $\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12}$ 库仑²/牛顿·米。

【电位移】 又称电位移矢量、电感应矢量。描写电介质中电场的—个辅助性物理量,常用符号 \vec{D} 表示。在国际单位中,它的定义为 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$, 式中 \vec{E} 为电场强度, \vec{P} 为极化强度, ϵ_0 为真空电容率。在各向同性均匀电介质充满的静电场中,电场强度 \vec{E} 与自由电荷和极化电荷的分布都有关;极化强度 \vec{P} 仅与极化电荷的分布有关;电位移 \vec{D} 仅与自由电荷的分布有关。 \vec{D} 与 \vec{E} 之间的关系由电介质的性质决定,它们之间的关系式通常称为物质的介质方程。对各向同性的线性介质, $\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}$, χ_e 为介质的极化率,则 $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$, 式中 $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ 为介电常数。电位移的单位是库仑/米。

【电位移通量】简称电通量。通过电场中任一面积元 $d\vec{s}$ 的电位移通量 $d\oint_e$, 等于该点电位移 \vec{D} 在该面积元的法线方向上的分量与面积的乘积,用公式表示为 $d\oint_e = \vec{D} \cdot d\vec{s}$ 。通过某一曲面 S 的电位移通量等于电位移在该面上的面积分,即为 $\oint_e = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$ 。电介质存在时电场的高斯定理化为: $\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum_{(S)} q_0$, 式中 $\sum_{(S)} q_0$ 为闭合面

内自由电荷总和；或电场中任何闭合面上的电位移通量与该曲面所包围的自由电荷成正比。

【高斯定理】反映电位移与自由电荷分布相互关系的定理。可表述为：电场中通过任意闭合曲面的电位移通量与该曲面所包围的自由电荷成正比。在国际单位制中，其形式为， $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \Sigma q_0$ ，式中 \vec{D} 为电位移， Σq_0 为曲面 S 内自由电荷的代数和，对于各向同性的线性介质， $\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$ ， ϵ_r 为介质的介电常数， ϵ_0 为真空电容率， \vec{E} 为电场强度。如果整个封闭曲面 S 在一均匀的介电常数为 ϵ_r 的线性介质中，高斯定理又可写成 $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \Sigma q_0$ 。引用矢量算符散度 div ，高斯定理的微分形式为 $\text{div} \vec{D} = \rho_0$ ，或 $\nabla \cdot \vec{D} = \rho_0$ ，即电位移的散度等于该点自由电荷体密度 ρ_0 。高斯定理是库仑定理与电场强度叠加原理的结果，是描述电磁现象的一个基本定理。实验证明，不论对于静电场还是随时间变化的电场，高斯定理都是成立的，它是麦克斯韦方程组的组成部分。

【电容】描述单个或一组导体由于带电而引起本身电势改变的物理量。把电荷 q 充到单个附近没有其他导体或带电体的所谓孤立导体上，它的电位 φ 与 q 成正比，并且 q/φ 与 q 无关，因而定义孤立导体的电容 C 等于 q 与 φ 之比， $C = q/\varphi$ ，即使其升高单位电位所需的电量。如果使二个不带电的导体 A 和 B 充上等值异号电荷 $\pm q$ ，它们之间会产生电位差 $(\varphi_A - \varphi_B)$ 。这时电容 C 等于 $\frac{q}{\varphi_A - \varphi_B}$ 。电路中能产生电容的元件叫电容器。国际单位制单位为法拉(F)，即库仑/伏特。1法拉是极大的电容量，实用上常以微法拉(μF ，即

10^{-6} 法拉) 和皮法拉 (pF 即 10^{-12} 法拉) 作单位。

【电容器】两个任意形状用绝缘材料或电介质隔开的带有等值异号电荷的导体组合,这两个导体称为极板。按极板形状可分为平行板电容器、球形电容器、柱形电容器等;按极板间使用的介质分,有云母电容器、纸介电容器、陶瓷电容器、空气电容器和电介质电容器等;按容量是否可变来分,有可变电容器、半可变或微调电容器、固定电容器等。电容是电容器的主要性能参数之一,它取决于极板的形状、大小、相对位置以及极板间电介质的电容率。此外,实际电容器的性能参数还有工作电压(或耐压),损耗和频率响应,它们分别取决于所充电介质的击穿场强、介质损耗和它对频率的响应。实际电容器的种类繁多,应用广泛。例如电容器在电力系统中是提高功率因素的重要器件;在电子电路中是获得振荡、滤波、相移、旁路、耦合及波形变换的主要元件。

【静电平衡】导体系统中的电荷分布与电场分布都不随时间而变化的状态,导体系统达到静电平衡的条件是:所有导体内部的电场强度处处为零。导体系统处于静电平衡状态时还有以下特性:(1)每一导体是一个等势体,导体表面是个等势面;(2)导体外的电场处处与它的表面垂直;(3)带电导体的电荷只能分布在它的外表面上。

【静电感应】导体因受外电场的影响而在表面不同部分出现正负电荷的现象。例如,当带负电物体接近电中性导体时,导体受外电场作用,在靠近带电体的一端出现正电荷(异性相吸),远离带电体的一端出现负电荷(同性相斥)。若把该导体的负端瞬时接地,负电荷将流入大地,这样电中性导体通过感应就可以成为带正电的

物体。静电感应过程中导体表面出现的正负电荷称为感生电荷。

【感生电荷】见“静电感应”。

【静电屏蔽】排除或抑制静电场干扰的措施。接地的封闭金属壳是一种良好的静电屏蔽装置。它把空间分割成壳内外两个区域。当金属壳维持在零电位时，由静电场唯一性定理，可以证明，这时金属壳内的电场仅由壳内的带电体和壳的电位所确定，与壳外的电荷分布无关。因此接地金属壳对内部区域具有屏蔽作用。同样，壳外的电场仅由壳外的带电体和金属壳的电位以及无限远处的电位所确定，与壳内电荷分布无关。因此，接地的金属壳对外部区域也具有屏蔽作用。在静电屏蔽中，需要使金属壳的电位保持恒定，所以接地是十分重要的。静电屏蔽广泛地用于电器、仪表和电缆设备上，使其不受外部电场的干扰，也不对外界产生影响。实际上金属外壳不一定严格封闭，常用金属丝编织成的金属网代替，同样具有相当好的静电屏蔽作用。

【接触电现象】原来不带电的两种金属互相接触时，他们之间出现电位差的现象，这个电位差称为接触电位差。它的数值与两种金属的性质及接触面的温度有关，而与接触面的大小及接触时间的长短无关。其发生的原因是由于不同金属的电子脱离金属表面所需的功（称为逸出功）不同。因而在同一温度下两种金属相接触时，逸出功较小的金属由于失去电子带正电而具有较高电位、逸出功较大的金属由于得到电子带负电而具有较低电位，两种金属所带的正负电荷都分布在其接触面上而形成一偶电层，在金属内的电子密度不变。也正因为偶电层产生两种金属的接触电位差。当几种

不同的金属 A, B, C, D 相互接触时, 接触电势差的总和只与两端的金属 (A, D) 的性质有关, 而与中间金属 B, C 的性质无关。接触电效应在许多物理过程中起着重要作用。

【光电现象】 物体 (固体、液体或气体) 因吸收电磁辐射 (可见光、紫外线、X 射线或 γ 射线), 而使其电性质发生变化的现象。它主要包括光电效应、光电离现象、光电导效应、光生伏打效应、俄歇效应、康普顿效应及光核效应。

(1) 光电效应 物体在光辐照下释放电子的现象, 逸出的电子称为光电子, 赫兹于 1887 年首先从实验中发现。这个效应不能简单地用光的波动理论来解释。对此, 1905 年爱因斯坦提出: 光是由分立的量子 (光子) 组成, 每个光子的能量为 $E = h\nu$, 其中 h 为普朗克常数, ν 为光的频率, 光进入物体后与电子相互作用, 当电子吸收光子能量运动到物体表面时, 将一部分光子能量用于克服逸出物体表面所需的逸出功, 另一部分转换成光电子的动能。所以光电子的最大动能 E_K 为入射光子的能量减去逸出功 φ , 即 $E_K = h\nu - \varphi$ 。1916 年密立根用实验证明了爱因斯坦公式, 利用光电效应可以制成光电管、光电池、光电摄像管、光电倍增管等光电器件, 它们广泛地用于自动控制和电视等领域。

(2) 光电离现象 气体 (或液体) 因吸收光子能量大于其分子 (或原子) 电离能的光辐射, 使分子 (或原子) 电离成电子与正离子的现象。

(3) 光电导效应 材料在光辐射下其电导发生变化的现象, 大多数物体由于光照而电导增大。此现象是半导体的主要特征之一。决定光电导灵敏度的重要因素是自由载流子的寿命和光电导体的光吸收特性。

(4) 光生伏打效应 物体由于吸收光子而产生电动势的现象。当光照射到两种材料所形成的结面附近时，结面两边分别产生数量相同的正、负电荷，形成偶电层，于是产生电动势。当前光生伏打效应主要是应用在半导体的PN结上，把辐射能转换成电能。它的转换效率较高，理论计算值为24%，实验上已达到14%。

(5) 俄歇效应 在高能X射线照射下，原子内壳层释放出光电子，同时发射出另一个电子（即俄歇电子）的现象。这是因为发射光电子后内壳层留下的空位被较外层的电子填补时，所多余的能量可以使外壳层上的电子电离，并发射出去。

(6) 康普顿效应 X射线或 γ 射线通过物质时，其散射线中有部分波长增大的效应。它的改变量与入射线的波长无关，只由散射角决定。

(7) 光核效应 若光子能量特别高，其波长与核直径相当时，会发生各种光核反应的现象。

【光电效应】见“光电现象”。

【光电离现象】见“光电现象”。

【光电导效应】见“光电现象”。

【光生伏打效应】见“光电现象”。

【生物电现象】生物体借自身能量产生电流或电压的现象。在生命过程中，机体组织产生的电流或电压会在其邻近或较远的其他部位，甚至外部环境中产生特定的效应。例如神经传导、肌肉收缩以

及电鱼的放电都伴有生物电的产生、传递和生效。生物电的产生和活动,主要发生在细胞水平上。细胞是由细胞膜包容着细胞质和细胞核构成,整个活细胞浸在外液之中。细胞膜如一电容器,依靠代谢能量将不同离子分储膜两侧形成跨膜电势。当受刺激时,膜的通透性改变,离子对流,电势降低甚至反转。这个变化可以沿膜扩展而起到信息传递的作用。因此生物电是个局部的电化学反应,通过反应的连锁诱导而得以扩展。反应幅度决定于原跨膜电势。生物电的大小因组织和物种而异,从几十微伏到几百伏。神经细胞是个具有选择通透性的半透膜,它的通透性可以发生瞬时改变。在静息状态下,神经细胞内负外正,电位差约为0.1伏。当受激细胞所受刺激达到一定阈值时,则电位迅速反转(去极化),而这个去极化区就为邻近膜电荷提供了一个外流通道,使邻近膜电位降阈电压随之发生去极化,如此传导下去。霍奇金和赫胥黎曾把这个现象类比于脉冲在长传输线上的传输,导出数学公式来描述它。在极细神经纤维上,传导速度较低,约为1米/秒;在粗纤维上则可达100米/秒。因细胞膜可迅速复原,所以有时在1秒钟内可重复传导几百个冲动。感觉细胞受刺激时出现的“发生器电位”大致与刺激强度的对数成正比,而由此产生的神经冲动的频率与发生器电位成正比。对高等动物,生物电可引起神经冲动或触发肌肉收缩或触发腺体分泌;对某些低等动物也可能导致发光或放电。在某些鱼类,生物电还具有其他功能。例如水生动物在水体混浊缺光时能借助电感觉探测环境。软骨鱼可探知水中微弱电场,某些硬骨鱼甚至可以自己产生电流,因而附近的环境障碍或猎物造成的电流改变便可探知。电鱼的放电器官由肌肉组织演化而来,多个器官串联以提高电压,并联以加大电流,然后由神经控制同步发放。电鳗可产生600—1000伏的放电电压,供给高达1安培的放电电流。生物体还有压电

效应,电场也会对生物体的生长产生影响等多种生物电现象。生物电在医学上也得到广泛的应用。例如心电图、脑电图、肌电图、眼电图、耳蜗电图、胃电图等已是普遍使用的诊断技术。利用生物电现象还可以治疗某些神经和肌肉的疾病。

【铁电体】介电常数很大并随外电场而变化的电介质。铁电体内存在着许多称为电畴的自发极化小区域,在没有外加电场时,由于各电畴的自发极化方向不同,所以整个铁电体的电矩为零;在外电场的作用下,铁电体内大多数电畴能按一定方向排列,呈现出很强的极化,极化强度 \vec{P} 和电场 \vec{E} 之间的关系是非线性关系,并显示出类似于铁磁质磁滞效应的“电滞效应”。当外电场足够强时,极化达到饱和。在外电场消失后,仍存在剩余极化。给定材料在高于一定温度(称为居里温度)时,热运动会破坏电畴结构,使铁电特性消失。酒石酸钾钠和钛酸钡是典型的铁电体。

【压电现象】某些电介质晶体(如石英、电气石、酒石酸钾钠等)在沿特定方向的压力作用下,会在两端面上出现异号的电荷,端面间出现电势差的现象,在张力情况下,两端面上的电荷将改变符号。这种现象称为正压电效应,它具有可逆性。逆压电效应是对晶体施加电压(或电势差)时,会引起晶体发生形变的现象。如果电场反向,则机械形变的方向也随之倒转,所以交变电场会使晶体发生频率相同的交变机械振动。逆压电效应有点类似于电致伸缩,但电致伸缩通常比逆电效应弱得多,而且当电场反向时,不能产生相反的形变。压电效应已被广泛地应用于近代技术中。例如:压电晶体应用于拾声器、电唱头等电声器件,把机械振动(声波)变为电振动;利用压电效应可将一些非电学量(如压力、

振动频率及振幅等) 转化为电学量, 以便进行精密测量; 利用逆压电效应, 用一定厚度的石英片可以把高频交流电信号转换成同一频率的超声波。

【电致伸缩】在外电场作用下所有非导体或电介质所产生的微小形变或机械形变。当电场方向反转时形变方向却不变。在某些非导电晶体中还有一种类似的效应——逆压电效应; 不同的是在给定电场内所引起的形变一般远大于电致伸缩, 而且电场方向反转时, 形变方向亦随之反转。参见“压电现象”。

【电流】电荷的定向运动。可以由正电荷、负电荷或两者同时作有规则的移动形成。通常产生电流的条件是存在自由电荷和外电场。在电场中, 正负电荷总是沿着相反方向运动。因为正电荷沿某一方向运动和等量的负电荷沿反方向运动所产生的电磁效应等效, 所以传统规定正电荷流动的方向为电流的方向。不同类型导体的载流子(电荷携带者)各不相同, 金属中的载流子是带负电的自由电子, 它的流动方向与电流方向相反。电解液中的载流子是正、负离子; 导电气体中的载流子是正、负离子和电子; 半导体中的载流子是带正电的空穴和电子。当电流是由带正电的载流子和带负电的载流子沿相反方向流动而形成时, 总电流是这两者贡献之和。电流有磁、热、声、光、化学等多种效应。例如: 电流周围存在磁场; 电流在外磁场中受到作用力。电流通过电阻时使电阻发热; 通过电解质时引起电解; 通过气体时, 在适当条件下会导致发声、发光。电流的国际单位制单位为安培, 1安培等于每秒1库仑电量或每秒内 6.2×10^{18} 个电子的流动。

【传导电流】在电场力作用下，物体内部可以自由移动的电荷（称为自由电荷）相对于物体作定向运动所形成的电流，例如金属、电解液、导电气体等导体中的电流；玻璃、橡胶、油类等绝缘体中的漏电电流等。

【运流电流】又称对流电流。带电介质或介质带电部分在空间运动所形成的电流。运流电流的周围也存在磁场。例如当带电的平行板电容器绕垂直于板面的轴线高速旋转时会在周围产生磁场。

【直流电】简称直流。电荷流动方向不变的电流。常用符号 d. c. 表示。可由化学电池、燃料电池、直流发电机产生或借助于整流器将交流电整流得到，主要应用于各种电子仪器、电解、电镀、直流电力拖动等方面。

【交流电】大小和方向随时间作周期性变化的电流。其最基本形式是正弦交流电。连续两次达到一定值的时间间隔称为周期；每秒周数称为频率，单位为秒⁻¹，称为赫〔兹〕，用符号 Hz 表示；任一方向的最大值称为交流电的振幅。目前科学和工程上遇到的交流电，其频率范围从 10^{-4} 赫兹到 10^{12} 赫兹。中国电力网交流电供电的标准频率是50赫兹。

【电流强度】简称电流。单位时间内通过导体（或电流流经的区域内）任一截面的电量。常用字母 I 表示。电流强度是 MKSA 单位制中四个基本量（长度、质量、时间、电流强度）之一，它的单位是安培。可通过电流的磁效应、热效应，化学效应等来测量电流强度，测量仪器有电流计和安培计。

【**电流密度**】又称电流密度矢量。常用符号 \vec{j} 表示，其方向为该点正电荷流动的方向，其大小等于通过该点处垂直于电流方向单位面积的电流强度。通常电流密度在某一面积上的通量就是通过该面积的电流强度，即

$$I = \int_{S\#} \vec{j} \cdot d\vec{s}。$$

【**稳恒电流**】电路中各点电流密度的方向和大小都不随时间变化的电流。在稳恒电场（不随时间变化的电场）作用下，导体内部自由电荷作稳恒流动，形成稳恒电流场，这时流入任意区域的电流等于流出该区域的电流，即对任意封闭曲面 S ，电流密度 \vec{j} 的总通量 $\oint_{S\#} \vec{j} \cdot d\vec{s}$ 为零，或 \vec{j} 的散度恒为零，引用矢量算符散度 Div ，则 $\text{Div} \vec{j} = 0$ 或 $\nabla \cdot \vec{j} = 0$ ，此式称为电流的稳恒条件。这一条件表明稳恒电流线必为闭合曲线，因为导体中的电流会造成能量损耗，所以，若要维持稳恒电流，必须用电源装置提供能量（非静电力做功）。例如在化学电池或直流发电机的电路中，除外电路有从正极到负极的电流外，必然还有存在于电池或发电机内部由于化学作用或电磁感应作用引起的非静电力，使电流从负极流向正极，形成闭合的电流线。通常所说的大小和方向都不随时间改变的直流电就是稳恒电流。

【**稳恒电场**】存在于稳恒电流通过的导体内部和外部的电场。在稳恒情况下，电荷分布不随时间变化，从这个意义上说，稳恒电场与静电场相同，静电场所遵从的基本规律在稳恒电场中仍成立。与静电场不同的是：在导体内部存在维持稳恒电流的电源所产生的

电场，因此，导体内两点间可以有电位差；在导体外表面上电场亦不垂直于其表面；稳恒电场总是伴随着稳恒磁场。稳恒电场也是一种无旋场，引入矢量算符旋度 Curl ，稳恒电场 \vec{E} 满足 $\text{Curl}\vec{E}=0$ 或 $\nabla\times\vec{E}=0$ ，于是可以引入电势 φ ，令 $\vec{E}=-\nabla\varphi$ 。电势 φ 满足拉普拉斯方程。

【电压】 稳恒电路中任意两点间的电势差，单位为伏特。在准稳电路（如频率不高的交流电路）中，也可引进电压的概念，但此时的电压将随时间变化。电压有瞬时值，平均值和有效值之分，对于正弦交流电，其有效值为峰值的0.707倍，有时简称其有效值为电压。例如工业用电的电压一般为380伏特，照明用电的电压为220伏特等都是指电压的有效值。

【端电压】 电源两极间的电压。等于电场力在外电路中把单位正电荷从电流正极移到负极所作的功，即等于外电路上的电压降 $U=IR$ ，其中 I 和 R 分别为外电路的电流和电阻。当外电路断开（相当于外电阻 R 为无穷大）时，它等于电源的电动势。

【欧姆定律】 由德国物理学家 G. 欧姆于1826年首先通过实验发现的电学基本关系，即通过导体的电流 I 与其两端的电压 U 成正比，比值为导体的电阻 R ，用数学公式表示为 $U/I=R$ 。在一定条件（如一定温度、压力等）和电流与电压的变化范围不太大时， R 是一个常数，与加在导体上的电压以及导体中的电流无关。欧姆定律适用于金属、也适用于导电的溶液（酸、碱、盐的水溶液）。电路理论中把适于欧姆定律的电阻称为线性电阻。欧姆定律也可以用电源的电动势 ε 来表示。在一些电学教科书中，把包括电源在内

的闭合电路称为全电路，其电流强度 I 和电源的总电动势 ϵ ，总内阻 r 以及外电路总电阻 R 的关系为：

$$I = \frac{\epsilon}{R + r}$$

并称它为全电路欧姆定律。

【电阻】导体或电路元件通过电流时，其两端的电压 U 与电流强度 I 之比，常用符号 R 表示，即 $R=U/I$ 。单位是欧姆，用大写希腊字母 Ω 表示。例如，一段接于1.5伏特电池两端的导线稳定地通过1安培的电流，那么该导线的电阻就是1.5 Ω 。根据经典理论，金属的电阻是由于自由电子同晶格点阵上的原子碰撞，阻碍电子定向漂移运动而造成，这也是电阻中产生焦耳热的原因。截面均匀导体的电阻与其长度 l 成正比，与其截面积 S 成反比，即 $R=\rho \frac{l}{S}$ ，式中比例系数 ρ 为材料的电阻率，由导体材料的性质决定。导体和电路元件的电阻通常随温度的增加而增加。某些导体被冷却到极低温度时，其电阻为零。这些导体被称为超导体。电阻的倒数 $1/R$ ，称为电导，其单位为姆欧。

【电路】传送电流的回路。一般由电源、负载、联接导线和控制设备所组成。电源是向带电粒子提供能量以形成电流的装置（如电池、发电机等）。负载是使用电流的装置（如电动机、电子计算机等）。联接导线用于传输电能。控制设备用于执行控制任务（如开关等）。电路可按不同方式分类。直流电路只沿一个方向传送电流；交流电路中电流则随时间来回流动（如每秒钟来回流动50次），大多数家用电路都用交流电。串联电路中全部电流要流经每一个元件；并联电路则由若干支路组成，电流要分成若干支流，每一支路只

有一部分电流通过，复杂电路可由多个串联和串—并联支路组合而成。由电源、晶体管、变压器、电阻器、电感器、电容器、连接导线以及其他电子元件组成的网络也是电路。电路的参数（如电阻、电感和电容等）不随电流或电压大小及方向改变而改变时，称线性电路，否则称非线性电路。

【串联】把电路元件逐个顺次联接的方法。串联电路中每一个元件流过同样大小的电流。几个电阻串联时，其等效电阻等于各个电阻之和，几个电容串联时，其等效电容的倒数等于各个电容倒数之和，每一电容器任一极板上电量的绝对值相等。

【并联】把电路元件并列接在电路上两点间的联接方法。并联电路中每一个元件两端的电压都相等。几个电阻并联时，其等效电阻的倒数等于各个电阻倒数之和。几个电容并联时，其等效电容等于各个电容之和，总电量等于各个电容器电量之和。

【短路】电路中电位不同的两点直接碰接或被电阻（或阻抗）极小的导体接通时的情况。电力系统短路时电流很大，容易损坏电气设备和引起火灾，应极力避免。

【基尔霍夫定律】计算多回路电路的二个定律，概括了电荷守恒定律和能量守恒定律。第一定律是节点定律：任一时刻流入电路中某一节点的电流总和，等于从该节点流出的电流总和。第二定律是回路方程：按规定的正绕行方向，沿电路中的每一回路，电动势（电源电压）的总和等于该回路中每一电阻（在交流电路中为阻抗）两端电压的总和。根据基尔霍夫这两个电路定律，可以写出各

种电流方程,用代数方法求出电流值。该定律也可用于复杂的交流电路,如加以修正,还可应用于复杂的磁路。

【焦耳定律】定量说明传导电流将电能转换为热能的定律。1841年,英国物理学家焦耳发现载流导体中产生的热量 Q (称为焦耳热)与电流 I 的平方、导体的电阻 R 和通电时间 t 成比例。采用国际单位制,其表达式为 $Q=I^2Rt$ 或热功率 $P=I^2R$,其中 Q 、 I 、 R 、 t 、 P 各量的单位依次为焦耳、安培、欧姆、秒和瓦特。焦耳定律是设计电照明,电热设备及计算各种电气设备温升的重要公式。

【电功率】电流通过一段电路时电场力在单位时间内对电荷所作的功。常用符号 P 表示,在数值上等于电路两端的电压 U 和电路中电流强度 I 的乘积,即 $P=IU$,它也表征通有电流的电路中电能转化为其他形式能量(如热能、化学能、机械能)的速率。单位是瓦特,即焦耳/秒。

【电子导电】导体中主要的载流子为电子的导电过程。下面以金属导体为例给予简单说明。根据经典金属电子论,金属导体中存在由原子实(正离子)组成的晶格点阵和大量可移动的自由电子(原子的价电子)。无外电场时,室温下这些自由电子以大约 10^5 米/秒的平均速率作无规则的热运动,于是宏观上不显示电流。加上外电场后,自由电子受着逆电场方向的加速,它的定向运动速度增大,但由于其热运动速度很大,在极短时间后自由电子即与原子实碰撞而丢失定向运动速度回复原态。这一过程不断地重复发生,导致自由电子以一定的平均速度逆着电场方向“漂移”,形成宏观电流。在外电场作用下自由电子所获得的平均速度称为漂移速度。对于1

毫米铜导线，当通过1安培电流时，自由电子的漂移速率约为0.1毫米/秒，远小于其热运动的平均速率。当电路接通时，电场以光速 c （约为 3×10^8 米/秒）传播，在时间 $t=L/c$ 内，整个电路将建立起稳态电场及稳定电流，式中 L 是电路的长度。由于 $L/c \ll 1$ ，电流实际上是与电路的闭合同时开始。在欧姆定律适用的范围内，漂移速率 v 与电场强度的大小 E 成正比， $v = \mu E$ ，式中 μ 称为电子的迁移率。由于电子漂移运动而形成的电流密度的大小 j 则为： $j = nev = ne\mu E$ ，式中 n 是单位体积内的自由电子数，称为电子的数密度或浓度， e 是电子电量的绝对值。与欧姆定律的微分形式 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ 比较，可见金属导体的电导率 σ 为： $\sigma = ne\mu$ ，它与自由电子的数密度 n 和迁移率 μ 的乘积成正比。在导电过程中，自由电子在外场作用下所获得的定向运动动能，因自由电子不断地与晶格点阵上的原子实碰撞而传给原子实，使晶体中的热振动加剧，变成焦耳热。以上仅是对金属导体的导电过程所作的粗略解释，精确的定量理论是建立在量子力学基础上。

【离子导电】 导体中主要载流子为离子的导电过程。例如电解质导电，在电解质溶液中存在能参与导电的正、负离子。在没有外电场时，离子作杂乱无章的热运动，不显示出宏观电流。外加电场后，正离子沿电场方向、负离子逆着电场方向，分别发生“漂移”运动，形成宏观电流。电解液的导电性是单纯的离子导电性。在电离气体（如日光灯中的汞蒸气）中，离子参与导电，但游离的自由电子也参与导电，由于电子的质量远小于离子，在电场中的漂移速度较大，所以在气体中起主要作用的往往是电子导电性。

【电解液导电】 在外电场作用下，电解液中正、负离子的定向迁移。

在溶液或熔融状态下可离解为正、负离子而导电的物质称为电解质,电解质的溶液或熔融的电解质称为电解液。外电场常由浸没在电解液中分别与电流正负极相连的两块导体极板产生。导体极板称为电极,与电源正极相连的称为“阳极”,与电源负极相连的称为“阴极”。电解液导电时,其中的正、负离子沿相反方向运动,电流密度为 $\vec{j} = (n_+u_+ + n_-u_-)e\vec{E}$, 式中 n_+ 和 u_+ 分别为正离子的浓度和迁移率, n_- 和 u_- 为负离子的浓度和迁移率, e 为一个离子的电荷, \vec{E} 为电场强度。离子的迁移率等于在单位电场强度下一个离子所获得的迁移速率 v , 即 $u = v/E$ 。对电解液导电,欧姆定律仍然成立。当电流通过电解液时将伴随发生化学反应,在电极上析出物质或电极被腐蚀,这种现象称为电解。电解在工业上有广泛应用。

【气体导电】 气体中通过电流的现象。在通常情况下气体是由不带电的分子或原子组成,它是良好的绝缘体。但在外界某些因素(如紫外线、X射线以及各种放射线的照射,或将气体加热)的作用下,气体分子可发生电离,产生较多的自由电子和离子。他们在外电场作用下运动形成电流。如果电压足够高,则快速运动的电子和正离子与中性分子碰撞时,可使中性分子电离,而产生出新的电子和离子(碰撞电离),使电导增大。气体导电分成两类:依靠外界作用维持气体导电,且外界作用撤除后导电随之中止叫做被激导电;不依靠外界作用,在电场作用下能自己维持导电的叫做自激导电。在气体自激导电时,往往伴有发声、发光等现象。随着外加电压增加,气体由被激导电过渡到自激导电叫做气体已被“击穿”。使气体击穿的最低电压称为击穿电压。气体击穿后的放电形式有辉光放电,弧光放电、火花放电及电晕等。

【辉光放电】低压气体中伴有辉光出现的自激导电,极间电压较高,电流较小。在正常辉光放电时,极间电压几乎不随电流而改变。在异常辉光放电时,极间电压将随电流增加而增加。辉光放电时,气体中将出现交替分布的亮区和暗区,呈现瑰丽的发光现象,辉光的颜色随气体而异。辉光放电的主要应用是利用它的发光效应(如荧光灯和霓虹灯)和正常辉光放电的稳压特性(如氖稳压管)。

【弧光放电】伴有强烈的弧光并产生高温的一种气体自激导电。它的特点是极间电阻很小,所以尽管电压不高,但电流很大;电流增大时,极间电压反而下降。弧光放电的主要应用有:作强光源(如弧光灯);光谱分析中用作激发元素光谱的光源;医学上用作紫外线源(如汞弧灯);工业上用作强热源(如电弧炉、电弧焊)等。但在大功率电路的开关电器中,由于触头分开时会引起弧火,有可能烧毁电器触头,应采取灭弧措施。

【电晕放电】一种气体自激导电现象。在电压很高曲率较大的带电体附近,由于电场极强,促使表面附近的气体分子雪崩式地发生碰撞电离、引起气体自激导电。它常常发生在高压导线的周围和带电体的尖端附近。电晕放电时,气体的电离和发光仅局限在电极表面附近称之为“电晕层”的大气薄层里。电晕层外电场很弱,气体不发生电离碰撞。当带电体与周围导体间的电压增大时,电晕层会逐步扩大到附近其他导体,过渡到火花放电。电晕放电是一种不完全的火花放电。电晕放电是高压输电线上漏电的主要原因,应设法防止。利用电晕放电可使导体上积累的电荷逐渐消失,这就是避雷针泄放电荷的原理。

【火花放电】两极间的电压很高，但电源的功率不大时所形成的间歇性气体自激导电。放电过程中，碰撞电离只是沿着曲折狭小的发光通道进行。火花放电常常伴有爆裂声。由于空气被击穿后电流强度猛增，但电源功率不够，电压随即下降，致使放电暂时熄灭，待电压恢复后又进行放电。于是火花放电具有间歇性。雷电就是自然界中大规模的火花放电现象。火花放电可用于光谱分析，金属的电火花加工，钻细孔以及内燃机点燃装置等。

【气体放电】即“气体导电”。

【法拉第电解定律】表示电解中析出物质的质量与通过电量之间关系的两条基本定律。(1) 法拉第电解第一定律：电解过程中，电极上析出（或溶解）的物质的质量 M 与通过电解液的电量 Q 成正比，即 $M = KQ$ ，比例系数 K 称为该物质的电化学当量（简称电化当量）， K 在数值上等于通过单位电量时电极上析出（或溶解）物质的质量，它与该物质的化学性质有关。(2) 法拉第电解第二定律：物质的电化学当量 K 与其化学当量 C （即原子量 A 与原子价 Z 之比）成正比，即 $K = \alpha C = \alpha \cdot \frac{A}{Z}$ ，式中 $\alpha = 1/F$ ， F 为与物质无关的法拉第常数，其值为 9.648455×10^4 库仑/摩尔。法拉第电解定律是电化学中的重要定律，在电化生产中经常用到它。

【电源】把其他形式的能量转变为电能的装置。例如：发电机通常将机械能转变为电能；干电池、蓄电池将化学能转变为电能；光电池将光能转变为电能；原子电池将原子能转变为电能；温差电偶将热能转变为电能等装置都是电源。在电子设备中，有时把变换

电能形式的装置，如整流器、信号发生器等也称为电源。

【非静电力】存在于电源内部的非静电性质的作用。它能使正负电荷分离，并使正电荷聚积到电源的正极，负电荷聚积到电源的负极，从而使电源两极间产生并维持一定的电势差。不同电源的非静电力来源不同。例如在干电池、蓄电池中，非静电力是一种与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用；在温差电源中，非静电力是一种与温度差和电子浓度差相联系的扩散作用；在一般发电机中，非静电力起源于磁场对运动电荷的作用（一种电磁感应）。

【电动势】电源内部非静电力将单位正电荷从负极移到正极所做的功，即电源给予单位正电荷的能量。电源提供的电能是从其他形式的能量转化来的。例如在发电机中由机械能转化为电能，在化学电池中由化学能转化为电能。电动势是标量，国际单位制单位为伏特（V）。

【电池】将化学能、光能、热能、核能等直接转换为电能的装置。如化学电池、太阳能电池、温差电池、核电池等，其中化学电池通常简称电池。化学电池主要部分包括正负两个电极和电解质。工作时，电流由正极经过外电路流到负极，而在电解液内，正负离子则分别向两极迁移，电流从负极流到正极，称为电池的放电。放电时，电池的两个电极上发生化学反应，放电过程进行到电路断开或者一种化学反应物质耗尽。放电到一定程度后，经充电能使电池复原继续使用的称为蓄电池，如铅蓄电池；不能复原的称为原电池，如常用的锌锰干电池。电池的一个重要性能参数是其电动势，电动势等于单位正电荷由负极通过电池内部移到正极时电池

内非静电力（化学力）所作的功。它由电极材料的化学性质而定，与电池大小无关。电池的另一个性能参数是它的内阻，电池的电极面积越大，内阻越小。电池的能量是有限的，称为电池的容量，以安培小时表示。化学电池的优点是使用方便，性能可靠，便于携带，容量、电流和电压可在相当大的范围内任意组合等，应用十分广泛。

【温差电现象】在固态或液态导体中，利用三种相互关联的效应：塞贝克效应、珀尔帖效应和汤姆孙效应，把热能直接转换成电能和电能直接转换成热能的现象。

【塞贝克效应】两种不同导体组成闭合回路，当两个接点处于不同温度时，在回路中将产生电动势，会有电流出现。这种效应是德国物理学家 T. 塞贝克于1821年发现的。当时他观察到，磁针靠近由铜和铋所组成的回路时，在加热一个接头之后，磁针会发生偏转。这样组成的回路称为温差电偶，所产生的电动势称为温差电动势。在一定的温度范围内，温差电动势在数值上正比于两接点处的温度差。塞贝克效应应用于高灵敏度和高精度的温度测量，也可为某些特殊用途发电。

【珀尔帖效应】塞贝克效应的逆效应。当电流流过两种导体组成的闭合回路时，一接点处会变热（吸热），另一接点处会变冷（放热）。这种效应由法国科学家珀尔帖于1834年首先发现。半导体的珀耳帖效应较大，可用于制造致冷器。

【温差电偶】又称热电偶。利用温差电效应制成的一种元件，是温

差电偶温度计和温差电池的主要部件，广泛用于温度的测量和控制，温差电偶由两种不同的金属或半导体材料组成，它们的一端焊接在一起，此端称为工作端或热端，另一端称为自由端或冷端。测温时将工作端放在要测温度的部位，自由端保持恒定的低温度。如果两端温度不同，在回路中将产生温差电动势，其大小与两端的温度差大体成正比，其值可由连接在电路中的测量仪表显示出来。温度可从换算表上查得，或者从测量仪表的刻度上直接读出。温差电偶温度计的优点是精确可靠，结构简单，使用方便，工作温度范围宽。温差电堆是由若干个温差电偶串联而成，有较高的测温灵敏度。

【热电子发射】金属或金属氧化物由于受热而发射大量电子的现象。在一定温度下，热电子电流的最大值称为“饱和电流”，它与金属的电子功函数和温度有关。当温度较低时，热电子发射所产生的电流很小。当温度较高（1千度以上）时，由于金属内部电子热运动具有足够能量克服表面势垒的作用而大量逸出金属表面，电流迅速增大。现代许多电子器件都用热电子发射来获得电子流。

【次级电子发射】由初级电子或离子轰击物体，导致物体发射电子的过程。所发射的电子称为次级电子。带电粒子束的轰击将其动能传递给被轰物体，使物体内的电子获得足够的能量，克服吸引力的束缚而脱出物体表面。对应于每个初级电子（或离子）所发射出的次级电子数称为次级电子的产额 δ 。 δ 的大小与入射电子（或离子）的速度、入射角和物体的性质及其表面状态等有关。对于一定能量来说，电子同较重的离子相比，是一种更有效的初级粒子。氧化铯是一种良好的靶材料，它可以发射比轰击电流大10倍的次级

电流。光电倍增管的主要特征就是利用这种次级电子发射来放大电流。光电倍增管广泛用于检测微弱光信号。次级电子发射还在光子倍增器、扫描电子显微镜及许多电真空器件中得到实际的应用。

【磁场】在磁体、电流、运动电荷或交变电场周围空间里存在的一种特殊形态的物质，其基本特性是对场中运动带电粒子施加力或对场中有磁矩的粒子及物体施加力矩。描述磁场有两个不同的矢量：一个称为磁感应强度，用 \vec{B} 表示，其大小和方向可根据速度为 \vec{v} 的运动电荷 q 在磁场中受到洛伦兹力 \vec{F} 的公式 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ 确定，也可以根据磁矩 \vec{m} 在磁场中受到力矩 \vec{M} 的公式 $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$ 确定；另一个称为磁场强度，用 \vec{H} 表示。磁场强度可以看作仅由导线中的电流产生的，而磁感应强度 \vec{B} 是包括该磁场中各物质的磁性所提供的总磁场。例如当缠在圆柱软铁芯上的导线通以电流时，在铁芯中的磁场强度 \vec{H} 远小于磁感应强度 \vec{B} ，因为铁芯中无数个微小的固有原子磁体沿该磁场方向整齐排列， \vec{B} 就大大地增大了。磁场可以用连续又闭合的磁力线表示。力线的方向表示磁场的磁感应强度的方向、力线的密度表示磁感应强度的大小。静止的永磁体或稳恒电流产生的磁场，大小和方向都不随时间改变，称为恒定磁场或称静磁场。交变电流或运动永磁体产生的磁场，大小和（或）方向随时间改变，称为交变磁场（磁场大小和方向都改变）或脉动磁场（磁场只有大小改变而方向不变）。在国际单位制中， \vec{B} 的单位是特斯拉（T）， \vec{H} 的单位是安培/米。 \vec{H} 的单位是奥斯特（Oe）。 $1\text{安培/米} = 4\pi \times 10^{-3}\text{奥斯特}$ 。

【磁感应强度】又称磁通量密度。描写磁场强弱和方向的物理量。是一矢量。用 \vec{B} 表示，其大小和方向可根据速度为 \vec{v} 的运动点电荷 q

受到洛伦兹力的公式 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ 来确定。在磁场中的一给定点，磁感应矢量的大小等于作用在该点上以单位速度移动的单位电荷上的最大洛伦兹力 F_m ，即 $B = \frac{F_m}{|q|v}$ ，此时电荷运动的方向与磁场的方向垂直；其方向为由正电荷所受最大力 \vec{F}_m 的方向转向电荷运动方向时，右手螺旋前进的方向，即 $\vec{F}_m \times \vec{v}$ 的方向。在国际单位制中，其单位是特斯拉（T）。

【磁场强度】描述磁媒质中磁场的一个辅助物理量，常用 \vec{H} 表示，其定义为

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M},$$

式中 \vec{B} 是磁感应强度， \vec{M} 是磁化强度， μ_0 是真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/(米·安培)。在稳恒电流的磁场情况下，当均匀磁介质充满磁场所在空间时，磁感应强度 \vec{B} 与传导电流和磁化电流的分布都有关；磁化强度 \vec{M} 仅与磁化电流的分布有关；磁场强度 \vec{H} 仅与传导电流的分布有关。在国际单位制中， \vec{H} 的单位为安培/米。在高斯单位制中， \vec{H} 的单位为奥斯特。两者之间的关系为 1 安培/米 = $4\pi \times 10^{-3}$ 奥斯特。

【磁力线】形象地描述磁场分布情况的假想曲线。当它表示磁感应线时（ \vec{B} 线），曲线上每一点的切线方向表示该点磁感应强度 \vec{B} 的方向，曲线的疏密程度表示 \vec{B} 的大小。 \vec{B} 线都是围绕电流的闭合线，没有起点和终点，且任何两条磁感应线不能相交。当它表示 \vec{H} 线时，曲线上每一点的切线方向表示该点的磁场强度 \vec{H} 的方向，曲线的疏密程度表示 \vec{H} 的大小。应该注意， \vec{H} 线和 \vec{B} 线在性质上有着重要差异。

【毕奥—萨伐尔定律】稳恒电流激发磁场的基本规律。在真空中,载流导线中任一电流元矢量 $I d\vec{l}$ ($d\vec{l}$ 为载流导线上的线元,它的方向取为电流 I 的方向) 在空间某点 p 处激发的磁感应强度 $d\vec{B}$ 的大小为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$$

式中 μ_0 为真空磁导率, I 为电流强度, r 为该电流元指向 p 点的矢径 \vec{r} 的值, θ 为 $d\vec{l}$ 与 \vec{r} 之间的夹角。 $d\vec{B}$ 的方向垂直于 $d\vec{l}$ 和 \vec{r} 所决定的平面,且 $d\vec{l}$ 、 \vec{r} 和 $d\vec{B}$ 三者方向间呈右手螺旋关系。矢量表达式为

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

整个导线所产生的磁场等于各电流元在该点产生的磁场的矢量和。

【安培定律】 又称安培环路定律。表示稳恒电流所激发的磁场中磁场强度与传导电流分布相互关系的定律。其表述为:在稳恒电流周围的磁场中,磁场强度 \vec{H} 沿任一闭合回路 L 的线积分与通过该回路所围面积 S 内总传导电流强度成正比,在国际单位制中,其形式为

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{j} \cdot d\vec{s}$$

式中 \vec{j} 为传导电流密度。它是毕奥—萨伐尔定律与磁场强度叠加原理的结果。利用场论中的斯托克斯公式,引用矢量算符旋度 Curl 。可得安培定律的微分形式, $\text{Curl} \vec{H} = \vec{j}$ 。或写为 $\nabla \times \vec{H} = \vec{j}$ 。这表明,某一点的磁场强度的旋度仅由该点传导电流密度决定。J. 麦克

斯韦把这定律扩充到包括变化电场产生的磁场。例如对一电容器的两极板进行周期性充电和放电而改变电场时，电容器中虽无传导电流流过，却产生磁场。推广修改后的安培定律是描述普遍电磁现象的基本方程之一。

【磁标势】为简化磁场的计算。在一定条件下引入的一个辅助物理量，如果稳恒磁场 \vec{H} 的某个局部区域中没有传导电流，引用矢量算符旋度 Curl，则 \vec{H} 的旋度为 0，即 $\text{Curl}\vec{H}=0$ 或 $\nabla\times\vec{H}=0$ ，因而与静电场中引入电势的情况类似，可引入磁标势 φ_m ，引用矢量算符梯度 grad，使 φ_m 和 \vec{H} 满足： $\vec{H}=-\text{grad}\varphi_m$ ，或写为 $\vec{H}=-\nabla\varphi_m$ 。对于不存在电流的单连通区域，这样定义的磁标势在空间各点具有确定的值（可相差一常数）。对于真空或充满线性磁介质的空间，磁标势满足拉普拉斯方程 $\nabla^2\varphi_m=0$ ，与静电场中引入的电势不同，磁标势没有直接的物理意义。

【磁矢势】描述磁场的物理量，是一个矢量。磁场是一种无源场，磁感应线总是闭合曲线。因此，磁场中各点处磁感应强度 \vec{B} 的散度恒为零。引用矢量算符散度 div，则可写为 $\text{div}\vec{B}=0$ 或 $\nabla\cdot\vec{B}=0$ ，根据矢量分析理论， \vec{B} 总可以表示为某一矢量 \vec{A} 的旋度，引用矢量算符旋度 Curl，使 \vec{A} 与 \vec{B} 满足 $\vec{B}=\text{Curl}\vec{A}$ 或 $\vec{B}=\nabla\times\vec{A}$ 。 \vec{A} 即为描述磁场的磁矢势。由于任意函数 φ 的梯度的旋度恒为零，引用矢量算符梯度 grad，则可表示为 $\text{Curl grad}\varphi=0$ ，或 $\nabla\times\nabla\varphi\equiv 0$ ，则 $\nabla\times(\vec{A}+\nabla\varphi)=\nabla\times\vec{A}$ ，表明 \vec{A} 与 $\vec{A}+\nabla\varphi$ 描述同一磁场 \vec{B} ，所以 \vec{A} 和 \vec{B} 亦非一一对应。由于 \vec{A} 的这种任意性，我们可选取散度为零的矢势 \vec{A} 来描述磁场（这种选择称为库仑规范）。磁矢势的物理意义是它沿任一闭合曲线 l 的环量代表通过以该曲线为边界的

任一曲面 s 的磁通量, 即 $\int_L \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$; 对电磁场, 磁矢势对时间导数的负值等于感应电场 \vec{E} , 即 $\vec{E} = -\partial\vec{A}/\partial t$ 。

【磁极】 磁体磁性最强的部分。例如条形磁体的两端磁性最强, 是两个磁极。若将条形或针形磁体悬挂在地磁场中, 则两极总是分别指向南北方向, 指向北的磁极称为磁北极 (或 N 极), 指向南的称为磁南极 (或 S 极)。不同磁体的异名极互相吸引; 同名极互相排斥。任何磁体的磁极总是成对出现的, 把一磁体折成两段并不能把它的北极同其南极分离开, 而是磁体的每一半都有自己的北极和南极, 这是磁现象的基本特点。

【静磁场】 由稳恒电流在其周围空间所激发的不随时间变化的磁场。它的基本特性是: 磁感应强度 \vec{B} 在任意闭合曲面 S 上的通量恒等于零, 即

$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$; 磁场强度 \vec{H} 沿任一闭合回路 L 的线积分等于通过该回路所围面积 S 内总传导电流强度 (安培定律), 即 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{s}$, 式中 \vec{j} 为传导电流密度; \vec{B} 和 \vec{H} 的关系为 $\vec{B} = \mu\vec{H}$, μ 为介质的磁导率。

【磁场能量】 磁场所具有的能量。单位体积内磁场的能量称为磁场能量密度。某点的磁场能量密度 w_m 与该点的磁场强度 \vec{H} 和磁感应强度 \vec{B} 的大小和它们的夹角有关, 可表示为

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B}。$$

体积 V 内的磁场总能量 W_m 为

$$W_m = \int_V w_m dv = \frac{1}{2} \int_V \vec{H} \cdot \vec{B} dv.$$

在真空中 $w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$ ，式中 μ_0 为真空磁导率。

【磁路】 磁感应线集中通过的闭合回路。它常用磁导率很高的铁磁材料组成。例如，当把通电线圈套在带有小空气隙的环形铁心上时，磁感应线差不多完全集中在铁心和气隙中，铁心和空气隙一起形成磁路，通电线圈是产生磁场的源。在电路中用欧姆定律把电流，电动势（电压）和电阻联系起来，同样在磁路中也采用了类似关系来描述。磁感应通量是类似于电流；磁通势（mmf）类似于电动势，它等于绕在磁路上的载流线圈的匝数与电流的乘积，单位为安培—匝；磁路中的磁阻类似于电路中的电阻，它的大小依赖于磁路的几何形状和材料性质。对于横截面积均匀的一段磁路，其磁阻与其长度成正比，与横截面积及这材料的磁导率成反比，例如：铁与空气相比具有高得多的磁导率，所以铁便具有小得多的磁阻。一磁路中的磁通量在数量上等于磁通势除以磁阻，除了单回路磁路外，还有并联磁路、串联磁路等。

【地球磁场】 地球周围存在的磁场。英国科学家吉伯于1600年实验证实地磁场的存在，并提出“整个地球是一个大磁铁，磁极位于地理南北极附近”的论断。实际上地磁两极与地理两极的位置稍有差异。例如地磁北极在南纬 67° ，东经 143° 处；地磁南极在北纬 75° ，西经 101° 处。某处地磁场强度 \vec{F} 可用地磁三要素 H 、 D 、 I 表示： H 为水平分量； D 为磁偏角，它表示某一点的地磁场水平分量与该点的地理子午线之间的夹角，水平分量偏东， D 为正； I 为磁倾角，

它等于地磁场总强度与水平面之间的夹角，该角以总强度向下为正。地磁场水平分量 H 的延长线称为磁子午线。地磁场强度很弱，在赤道和两极分别约为 0.3 和 0.7 高斯。观测结果表明，地磁场和一位于地心的磁棒或磁偶极子的磁场分布相似。磁偶极子的轴线称为磁轴，磁轴与地面的交点称为地磁极，磁场垂直分量等于零的大圆称为磁赤道。磁轴与地轴的交角约为 11° ，磁偶极子的磁矩为 8×10^{21} 特斯拉厘米³。地磁场可分为稳定磁场和变化磁场。稳定磁场是地磁场的主要部分，约占 94%。稳定磁场的起源有多种假说，为多数人接受的一种假说认为地核中物质对流运动所形成的涡流是偶极子磁场的原因。变化磁场主要起因于电离层中存在的电流和太阳喷射出来的带电粒子流。

【磁性】 能够激发磁场，并在磁场中受到作用力的性质。自然界中有些物质在外磁场中呈现微弱的磁性（顺磁质或抗磁质）。少数物质能呈现出很强的磁性（铁磁质，如铁、钴、镍以及他们和其他材料组成的合金）。磁性是物质的固有属性。近代物理学指出，物质的抗磁性与原子中绕原子核运动的电子具有轨道磁矩有关；物质的顺磁性和铁磁性与电子的内禀磁矩有关。在通常情况下多数物质所以不呈现磁性，是由于热运动使原子和电子的磁矩不规则取向所致。

【磁介质】 在外磁场中因磁化而能增强或减弱磁场的物质。通常可分为：顺磁质、抗磁质和铁磁质。顺磁质和抗磁质在外场中呈现微弱磁性，且在外磁场撤去后，其磁性即消失。铁磁质在外磁场中呈现较强的磁性，在外磁场撤去后还能保留部分磁性（剩磁性），铁磁材料又分为具有高矫顽力与剩磁的硬磁材料（或永磁材料）和

具有较低的矫顽力与较窄的磁滞回线的软磁材料两大类。此外，已发现超导体是理想的抗磁体，它能把磁场全部排斥出去。

【顺磁质】在外磁场中呈现微弱磁性，磁化方向与磁场强度方向相同，会受到弱吸收的物质。如铝、钨、液态氧、氯化铜等。在顺磁质的原子中，有不完整的内电子壳层，电子的自旋磁矩不完全抵消，因而具有固有磁矩。无外磁场时，热运动使各原子磁矩无规取向，整个物体宏观上不显出磁性。在外磁场中，原子磁矩趋于沿外场方向排列，使磁感应强度增加，表现出顺磁效应。热运动对原子磁矩产生反排列作用，所以温度越高，顺磁效应越弱。在许多固态金属元素（例如钠和其他碱金属）中发现与温度无关的弱顺磁性，这是由于外加磁场影响某些束缚不紧的传导电子的自旋而引起。顺磁质的磁化率 χ_m 总是正值，室温下弱顺磁质 χ_m 的典型值约为 $1/100000—1/10000$ ，强顺磁质 χ_m 的典型值大约为 $1/10000—1/100$ 。

【居里点】又称居里温度。由铁磁质转变为顺磁质的转折温度。参见“铁磁质”。

【去磁】又称退磁。使已具有磁性的磁介质失去磁性的过程。例如将具有剩磁的铁磁质放在方向不断变化，数值不断减小的磁场中反复磁化，磁滞回线将逐渐缩小到原点，使剩磁完全消除。也可用加热使铁磁质中的磁畴取向混乱或用捶击打乱磁畴的有序排列等方法，使铁磁质失去磁性。

【铁氧体】又称铁淦氧。一种非金属磁性材料，一般指以氧化铁

(Fe_2O_3)为重要成分的强磁性复合氧化物,后推广到包括铁族或过渡族金属的磁性硫族化合物。其导电性属半导体型,导磁性属亚铁磁性。其电阻率比金属磁性材料高得多,涡流损耗小,是高频和微波电子设备中的需用材料。通常按其磁滞回线和用途分为5类:(1)硬磁铁氧体,其特征为磁滞回线的面积较大,并且有永磁体的功能。一般作恒磁磁源。用于电声器件、电器仪表、控制器件,工业设备和磁记录介质中。(2)软磁铁氧体。具有细长的S形磁滞回线,在外磁场消失后,极易失去磁性。例如:尖晶石型的锰—锌和镍—锌铁氧体,一般用于广播、通信和电视等射频波段的电子工业中,作为各种变压器,电感器,天线棒、磁记录头和调谐器中的磁芯。(3)矩磁铁氧体。具有近于矩形的磁滞回线,在外磁场消失后,可保留两种截然不同的剩磁状态之一。例如尖晶石型的常温用的镁—锰系铁氧体和室温用的锂系和镍系铁氧体等。一般作记忆元件,用于计算机存储器、无触点开关和磁放大器中。(4)旋磁铁氧体 又称微波铁氧体,一般用作微波元件。(5)压磁铁氧体 又称磁致伸缩铁氧体。一般作磁致伸缩元件,用于超声波换能器、水声和电信器件等。

【磁性材料】具有强磁性的材料。呈现出铁磁性或亚铁磁性,在外磁场作用下具有明显的磁化强度。按化学成份分为金属磁性材料和铁氧体磁性材料两大类。金属磁性材料主要由铁、镍、钴元素及其合金制成。他们具有金属的导电性能,通常呈现铁磁性,具有较高的饱和磁化强度,较高的居里温度,较低的温度系数,在交变磁场中有较大的涡流损耗与趋肤效应,因此这类磁性材料通常适用于低频、大功率的电力、电子工业。铁氧体是以氧化铁为主要成份的磁性氧化物。大多数为亚铁磁性,饱和磁化强度较低,其电阻

率比金属磁性材料高100万倍以上，在交变电磁场中损耗较低，广泛应用于高频、微波、光频段的器件。按应用又可分为：具有高矫顽力与剩磁的永磁材料；具有较低矫顽力，较窄磁滞回线的软磁材料；具有矩形磁滞回线，且矫顽力较小的矩磁材料；利用其旋磁效应的旋磁材料；利用其磁致伸缩效应的压磁材料等。磁性材料还有多晶、单晶、薄膜等形式。

【磁化】使原来不呈现磁性的物体在磁场中获得磁性。在构成物质的分子和原子中，由于电子运动而形成分子电流（或称安培电流），而存在一定的磁矩，称为分子磁矩。如果没有外磁场的作用，这些物体对外界不显示磁性。一旦受磁场作用，分子磁矩趋于定向排列，便显示出磁性。

【磁化曲线】表征物质磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间关系的曲线，在常温及通常的磁场强度下，弱磁性物质的磁化曲线为通过原点的直线。铁磁及亚铁磁等强磁性物质在居里温度以下时，磁化曲线较为复杂，通常为一直线，它的形状与材料，外界条件及它原先的磁状态都有关。 B 一般不是 H 的单值函数，呈现出磁滞现象，因此，强磁性物质的磁化曲线是与测量方法相联系的。参见“磁滞回线”。

【磁化强度】描述磁媒质磁化状态的物理量。它是一个矢量，常用 \vec{M} 表示。磁化强度等于单位体积内分子磁矩的矢量和，即 $\vec{M} =$

$$\frac{\sum \vec{m}_{\text{分子}}}{\Delta v}$$

式中 $\sum \vec{m}_{\text{分子}}$ 为媒质微小体积元 Δv 内全部分子磁矩矢量和。对于

顺磁与抗磁介质， \vec{M} 与外加磁场的关系为

$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ 。其中 \vec{H} 是媒质中的磁场强度， χ_m 是磁化率。对于顺磁质， $\chi_m > 0$ ；对于抗磁质 $\chi_m < 0$ 。在国际单位制中， \vec{M} 的单位为安培/米。

【磁化率】表征物质磁性的物理量，等于物质的磁化强度 M 与磁场强度 H 之比。常用符号 χ_m 表示，即 $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ 。因为磁化强度是单位体积内分子磁矩的合磁矩，所以 χ_m 是体积磁化率，简称磁化率。除了体积磁化率外，还定义了质量磁化率和摩尔磁化率，它们分别是单位质量的合磁矩和每摩尔数的合磁矩求得的磁化率。在国际单位制中， χ_m 是无量纲和无单位的物理量。按照磁化率的大小，可以把磁性材料分为三类：抗磁材料具有恒定的小的负磁化率，温度变化时略受影响。当把抗磁材料（如铋）置于磁场中时，外磁场会部分地被排斥出来， \vec{M} 与 \vec{H} 方向相反；顺磁材料具有恒定的小的正磁化率。顺磁材料（如铂）置于磁场中会使磁场增加，这是因为顺磁材料的原子具有小的磁矩，而这些磁矩部分地沿外磁场排列起来的缘故。室温下顺磁磁化率小于 $1/1000$ ，并随温度的升高而减小；铁磁材料（如铁和钴）的磁化率随外磁场变化而变化。铁磁磁化率远大于 1 ，这是因为这类材料是由高度自发磁化的原子磁矩团（磁畴）组成的缘故。

【磁导率】表征媒质磁性的物理量，等于媒质中磁感应强度 B 与磁场强度之比，常用符号 μ 表示，即 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 。常用的另一个物理量是媒质的相对磁导率 μ_r ，其定义是媒质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 之比，即 $\mu_r = \mu / \mu_0$ 。磁感应强度 \vec{B} 是媒质中实际磁场的量度，而磁场强度 \vec{H} 则是由线圈中电流产生的磁化场的量度。在真空中，

磁感应强度与磁场强度相同。在 CGSM 单位制中,真空磁导率没有量纲,其数值为1,因此 $\mu_r = \mu$ 。在国际单位制中,B 和 H 具有不同的量纲,真空磁导率 μ_0 定义为 $4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/(安培·米),而相对磁导率没有量纲。在真空中, $\mu = \mu_0, \mu_r = 1$ 。按照磁导率的大小,可以把磁媒质分为三类:抗磁质具有恒定的略小于1的相对磁导率。当把抗磁质(如铋)置于磁场中时,外磁场部分地受到排斥,媒质中的磁感应强度略小于磁场强度;顺磁质具有恒定的略大于1的相对磁导率。当把顺磁质(如铂)置于磁场中时,它沿外磁场的方向稍被磁化,使媒质中磁感应强度略大于磁场强度;铁磁质(如铁)具有随外磁场变化的相对磁导率。当外磁场从零开始增加时,相对磁导率增大,达到一最大值,然后减小,相对磁导率随外磁场变化的关系比较复杂,而且不是外磁场的单值函数。纯铁和许多磁性合金的最大相对磁导率可达10万以上。

【磁滞】在磁化和去磁过程中,铁磁质的磁感应强度不仅依赖于外磁场强度,而且依赖于它原先的磁化程度的现象。

【磁滞回线】磁滞是在磁化和去磁过程中,铁磁等强磁物质的磁感应强度不仅依赖于外磁场强度,而且依赖于它原先磁化状态的现象。磁滞回线可通过实验测得。磁滞回线以磁中性状态($B=H=0$)为起始态,当磁化场 H 逐渐增加时,磁感应强度 B 沿起始磁化曲线 OAC 磁化到 C 点附近时,B 几乎不随 H 增加,达到饱和值 B_s 。此后若减小磁场,B 并不沿原来的磁化曲线减小,B 的变化落后于 H,表现出磁滞现象。当 H 减到零时,B 不减小到零,其值 B_r 称为顽磁、剩余磁感应强度或剩磁性,永磁材料具有高的顽磁值。为使 B 减至零,需加一反向磁场— H_c , H_c 称为矫顽力。所以矫顽力是使

铁磁质磁化减至零所需的反向退磁场强度的值。当反向磁场继续增加,最终磁感应强度达到反向的饱和。如此延续一周改变磁场强度 H , 则形成一完整回线, 即磁滞回线。硬磁的剩磁较大, 磁滞回线较宽, 软磁的磁滞回线较窄。可以证明磁滞回线所包围的面积正比于铁磁质通过一磁化循环中所要消耗的能量。磁滞回线是铁磁材料制成电器件的一个重要设计因素。例如, 永磁材料要求高的 H_c 和 B_r ; 软磁材料要求低 H_c ; 记忆元件磁芯要求适当低的 H_c 及高的 B_r/B_s 值。

【磁效应】物质磁状态的变化引起其力学、声学、热学、光学及其电学等性能的变化; 或反之, 电、热、力、光、声等作用引起其磁性的变化。主要有磁力效应, 磁声效应、磁光效应、磁热效应和磁电效应以及他们的逆效应。物质的磁效应提供了物质结构, 物质内部各种相互作用及其相互联系的丰富信息, 对于基础研究具有重要意义。磁效应在科学技术、工农业生产和人们生活中也已经或正在获得重要应用。

【磁致伸缩】铁磁体在磁化状态发生变化时而引起其长度和体积变化的现象。体伸缩指其体积 V 的相对变化率 $\Delta V/V$, 线伸缩指其长度 l 的相对变化率 $\Delta l/l$ 。线伸缩很小, 只约为 $1/10$ 万。磁致伸缩和电致伸缩一样, 可用于微小机械振动的检测、超声波换能器和机械滤波器等。对磁致伸缩现象的研究, 有助于阐明强磁体内各种相互作用和磁化过程。磁致伸缩的逆效应为应力及应变对磁化的影响。他们统称为磁弹(性)效应。

【磁热效应】绝热过程中铁磁或顺磁介质的温度随磁场强度变化而

改变的现象，用热力学理论可以证明，绝热地减小磁场，将引起位于其中的铁磁质和顺磁质的温度降低。这种现象称为磁致冷效应。依据这一效应的绝热去磁法是现代得到低温的有效方法，可获得约 0.001K 的低温。

【磁声效应】强磁体中磁化状态与声振动之间相互影响和相互转换的效应。

【磁电效应】物质在磁场作用下其电学性质发生变化的现象。如磁物质在外加磁场的作用下电阻率发生变化的磁阻效应。

【磁光效应】介质在磁场作用下其光学性质发生变化的现象，主要包括法拉弟效应、科顿—穆顿效应，克尔磁光效应、塞曼效应和光磁效应。

【磁共振】物质在恒定磁场和交变磁场同时作用下，当交变场与恒定场满足一定的共振条件时，该物质对交变场的共振吸收现象。磁共振在本质上是一种能级间跃迁的量子效应。近代物理指出，物质中的原子是由原子核和核外电子组成，电子和原子核都具有磁矩。按照量子力学规律，具有磁矩的原子和原子核在外加恒定磁场中的能态是量子化的，即具有一系列能级。在磁共振实验中，把样品放在强磁场中，样品内原子的电子和核就处于不同的能级。如果在垂直于磁场的平面内再加一适当频率 ν 的弱交变磁场，当共振条件 $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ 满足时，许多原子和核就会从交变场吸收能量而从能量为 E_1 的能级跃迁到能量为 E_2 的高能级，产生共振吸收，其中

h 为普朗克常数。磁共振种类很多，若被研究的对象以电子的磁矩为主，称为电子顺磁共振，简称顺磁共振，交变场在微波波段；以原子核的磁矩为主，称为“核磁共振”（NMR），交变场在约10—100兆赫的射频频段；还有铁磁共振；回转磁共振等。磁共振现象在物理学、化学、生物学、医学和量子电子学等方面都有重要应用。

【磁感应通量】又称磁通量。表示磁介质中磁场分布情况的物理量。通过磁场中任一面积元的磁通量等于磁感应强度在该面元的法线方向上的分量与面积的乘积。通过任何闭合曲面的磁通量恒等于零。通过某一曲面的磁通量等于磁感应强度在该面上的面积分。单位为韦伯。

【生物磁学】研究生命物质的磁性、生物磁现象与生命活动过程中结构功能的关系以及外磁场对生物体磁影响的一门生物学和磁学相互渗透的边缘学科，它广泛用于农业、医药、环境保护和生物工程等方面。

【电磁感应】穿过闭合回路的磁通量发生变化而产生电动势的现象，这样产生的电动势称为感应电动势，由法拉第电磁感应定律确定。感应电动势按其产生的原因不同可分为动生电动势 $\epsilon_{\text{动}}$ 和感生电动势 $\epsilon_{\text{感}}$ 。在稳恒磁场中运动着的导体内产生的感应电动势称为动生电动势，它可用导体中运动的自由电子在磁场中受到洛伦兹力来说明。由于磁场变化而产生的电动势称为感生电动势。当导体运动和磁场变化同时存在时，总的电动势 ϵ 为 $\epsilon_{\text{动}}$ 和 $\epsilon_{\text{感}}$ 之和，即 $\epsilon = \epsilon_{\text{动}} + \epsilon_{\text{感}}$ 。电磁感应揭示了电和磁之间紧密的依存关系。广泛应

用于科技,工业等方面,如电子感应加速器、电动机、变压器、高频感应炉等。

【动生电动势】在稳恒磁场中,运动着的导体内所产生的感应电动势,它是由磁场作用于运动导体中带电粒子的洛伦兹力所引起,在数值上等于: $\epsilon_{\text{动}} = Bvl\sin\theta$, 式中 $\epsilon_{\text{动}}$ 为动生电动势, B 为磁感应强度, l 为导体的长度, θ 为导体运动速度 \vec{v} 和磁感应强度方向之间的夹角; 其方向由右手定则确定: 伸开右手掌, 使姆指与其余四指垂直, 让磁感应线方向从手心穿过, 使姆指指向导体运动方向, 这时四指所指的就是导体中感生电流的方向。

【感生电动势】固定回路中, 由磁场的变化所产生的感应电动势。它与导体的种类和性质无关, 是由变化的磁场所激发的“有旋电场”引起, 其值为: $\epsilon_{\text{感}} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$, 式中 $\epsilon_{\text{感}}$ 为感生电动势, \vec{B} 为磁感应强度, s 为固定回路所包围的曲面。以上公式均为国际单位制中的表示式。

【右手定则】又称发电机定则。确定导体在磁场中运动时, 导体中所产生感应电动势方向的定则。参见“电磁感应”。

【法拉第电磁感应定律】确定闭合回路中由于磁通量变化而产生感应电动势的定律。它是英国科学家 M. 法拉第根据1831年的实验观察发展起来的。表述为: 任一闭合回路内的感应电动势 ϵ 与回路所围面积的磁感应通量 φ 的变化率成正比, 即

$\epsilon = -d\varphi/dt$ 。式中负号反映感应电动势 ϵ 的正负总是与磁通量变

化率 $d\phi/dt$ 的正负相反, 而与回路绕行方向的选择无关。从这定律出发, 英国物理学家麦克斯韦推广了电场的概念: 空间不但可以存在由电荷激发的静电场, 也可以存在由变化磁场 \vec{B} 激发的涡旋电场 \vec{E} , 满足关系式 $\text{Curl } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, 或 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, 式中 Curl 为矢量算符旋度, ∇ 为哈密顿微分算符, 直角坐标系中 $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 是沿 x, y, z 轴的单位矢量, 这就是法拉第感应定律的微分形式, 它是描写电磁场的基本方程之一。如果磁通的变化率以韦伯/秒为单位, 则感应电动势的单位是伏特。

【楞次定律】 确定感生电流方向的定律。由俄国物理学家楞次1834年提出。表述为: 闭合回路中感应电流的方向, 总是使它所产生的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化。例如当线圈中的磁通量增加 (或减少) 时, 其中感生电流的方向是使它们所产生的磁场与原有的磁通量方向相反 (或相同)。楞次定律说明, 能量守恒定律同样适用于电磁现象。

【电感】 表达电路中时变电流与它在该电路或邻近电路中所产生的感应电动势的关系的基本电路参数。包括自感和互感。

电感是他们的总称。

自感: (1) 由于电路中电流变化而在此电路中产生感应电动势的现象。相应的电动势称为自感电动势。(2) 自感系数的简称。常用符号 L 表示: 一线圈的自感数值上等于该线圈中电流强度 I 的变化率为1个单位时, 在这个线圈中产生的感应电动势 ϵ , 即 $L = \epsilon / \frac{dI}{dt}$; 也等于线圈中电流强度 I 为1个单位时, 通过线圈本身的

自感磁通量——由线圈中电流产生的磁场通过该线圈所包围面积的磁通量 φ_s ，即 $L = \varphi_s / I$ 。在国际单位制中， L 的单位是亨利，相当于电流强度变化每秒1安培时引起1伏特的自感电动势。自感电动势会在回路中引起自感电流。根据楞次定律，这种自感电流反抗该回路中的引起自感电动势的主电流的变化、阻止它的增加或减少。因此，当电流开始流过线圈时，除了受到金属导线的电阻外，还受到自感的扼阻；当把载有稳恒电流并包含线圈的电路突然断开时，消减着的磁场会产生趋向维持这电流和磁场的感生电动势，引起开关的触点之间产生火花。因此可以把线圈的自感设想为电磁惯性，它既阻止电流变化又阻止磁场的变化。对于少数几种特别的电感器，可用简单的方法来计算其自感 L 。例如空心线圈的自感系数为

$$L = \mu_0 \frac{N^2 s}{l},$$

式中 l 为线圈的长度， s 为截面积， N 为总匝数， μ_0 为真空磁导率。

互感：(1) 当一回路中的电流变化时，在它邻近的另一回路中产生感应电动势的现象。所产生的电动势称为互感电动势。(2) 互感系数的简称。常用符号 M 表示。它在数值上等于当其中一个线圈中电流强度 I 的变化率为1个单位时，在另一线圈中所产生的感应电动势 ϵ ，即 $M = \epsilon / \frac{dI}{dt}$ ，也等于其中一个线圈中的单位电流 I_1 产生的磁场通过另一个线圈所包围面积的磁通量（或称互磁通量） φ_{21} ，即 $M = \varphi_{21} / I_1$ 。在国际单位制中，互感的单位是亨利。互感是变压器的工作原理。

【互感】见“电感”。

【涡电流】简称涡流，又称傅科电流。当导体块放在迅速变化的磁场中或相对于磁场运动时，导体块内部产生的感应电流。电流的流线呈闭合的涡旋状，故称涡流。涡电流是法国物理学家傅科发现的，所以也称为傅科电流。磁场变化越快，感应电动势越大，涡电流也越强。强大的涡电流在金属块内流动时，会释放出大量的焦耳热。利用这种热效应，制成高频感应炉，用于加热、熔化和冶炼金属。在变压器、交流电机等交流设备的铁芯中，存在由线圈中交变电流所引起的涡电流。使大量的能量变成热而损耗，涡流发热对电器是有害的，故铁芯常用互相绝缘的薄片（薄片平面与磁力线平行）或细条（细条方向与磁力线平行）叠合而成，以减小涡流损耗。

【傅科电流】即“涡电流”。

【趋肤效应】导体中有交流电通过或者处于交变电磁场中时，由于电磁感应而使电流或电磁场趋向分布在导体表面薄层内的现象。常用趋肤深度 δ 来描述他们在导体中趋于表面分布的程度， δ 等于导体内部交变电流或电磁场的振幅减小到其表面值的0.368倍时的深度。若交流电或电磁场的频率越高，导体的电导率和磁导率越大，则趋肤效应越显著。趋肤效应使导体内部基本不起导电作用，使其电阻及损耗增大。因此，载有高频电流的导体常做成管状或在陶瓷基片上镀以薄金属膜。由于趋肤效应，感应加热可以局限于表面。因此感应加热方法可用于金属表面的硬化处理。

【电磁屏蔽】排除或抑制高频电磁场干扰的措施。高电导率或高磁导率材料制成的壳罩是一种良好的电磁屏蔽装置。由于趋肤效应，

高频电磁波只能渗入导体表面的薄层，薄层的厚度可以用趋肤深度来描述（见“趋肤效应”）。电磁波的频率越高，导体的电导率和磁导率越大，趋肤深度越小，当壳罩壁的厚度大于趋肤深度时，它就具有良好的电磁屏蔽作用。电磁屏蔽壳接地后也可以屏蔽静电干扰。电磁屏蔽壳上不能随意开缝。否则屏蔽效果降低。

【电磁振荡】电路中的电荷和电流以及与他们相连系的电场和磁场作周期性变化的现象，其电流称为振荡电流。能够产生振荡电流的电路称为振荡电路。例如由电阻 R ，电感线圈 L 和电容器 C 所组成的振荡电路，其电容器 C 中储存的电场能量与电感线圈 L 中储存的磁场能量能不断地相互转换，引起电磁振荡。若电路中不含外源，仅由初始时刻存在于电路中的电场能量和磁场能量引起的电磁振荡称为自由振荡；由电路中的外源周期地供给适当能量，引起振幅不随时间衰减的电磁振荡称为强迫振荡。

【经典电动力学】电磁现象的经典的动力学理论。简称电动力学，研究电磁现象一般规律的学科。它是以电磁运动最基本的方程——麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式为基础，结合物质结构的知识，运用数学方法建立起来的完整的电磁理论，分别从宏观和微观的角度来阐明各种电磁现象。它与电磁学在内容上没有原则的区别，但电动力学更偏重于理论方面，研究电磁场分布，媒质在静电场和静磁场中所受的力，电磁波的激发、辐射和传播，以及带电粒子与电磁场的相互作用等电磁问题。由于狭义相对论的提出与电动力学的研究有密切的关系，所以它也经常放在电动力学中讨论。

【麦克斯韦方程组】描写有关电场和磁场的产生及其相互作用的电

磁场运动规律的基本方程组。

它由四个方程组成。是电磁相互作用的理论基础。由英国物理学家麦克斯韦于1864年首先提出。麦克斯韦方程组实际上是当时已发现的电磁现象的基本实验定律以及单个磁极不存在的事实和位移电流假设的综合，采用国际单位制，这些方程式可写成：

$$\text{Div}\vec{D} = \rho \text{ 或 } \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1)$$

$$\text{Div}\vec{B} = 0 \text{ 或 } \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Curl}\vec{E} &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \text{ 或 } \nabla \times \vec{E} \\ &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Curl}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \text{ 或 } \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

式中 Curl 和 Div 分别为矢量算符旋度和散度， ∇ 为哈密顿微分算符，在直角坐标系中， $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \vec{i} ， \vec{j} ， \vec{k} 是沿 x、y、z 轴的单位矢量，对任一矢量 \vec{A} 有 $\nabla \times \vec{A} = \text{Curl}\vec{A}$ ， $\nabla \cdot \vec{A} = \text{Div}\vec{A}$ ； \vec{D} 为电位移， \vec{B} 为磁感应强度， \vec{E} 和 \vec{H} 分别为电场和磁场强度， \vec{j} 为传导电流密度， ρ 为自由电荷密度。对于各向同性的媒质，场方程组的三个辅助关系式可以表示为： $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ ， $\vec{B} = \mu\vec{H}$ ， $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ ，其中 ϵ ， μ 和 σ 分别为介电常数（或电容率），磁导率和电导率。方程式（1）就是高斯定理，它可以从库仑定律推导出来，表述电场从电荷向外发散，方程式（2）表述不存在单独的磁极。方程式（3）表述变化着的磁场产生电场，这种场是一种“涡旋场”，这是将法拉弟电磁感应定律推广到普遍情况的结果。方程式（4）表述变化着的电场和电流都产生涡旋场，这是麦克斯韦引入位移电流假设，将安培定律推广到包括变化场的相互作用的结果， $\partial\vec{D}/\partial t$ 是位移电

流密度。

从麦克斯韦方程组出发，麦克斯韦在理论上得出电磁波存在的预言和光是电磁波的论断。这一论断随后为 H. 赫兹的实验所证实。麦克斯韦方程组是电磁场的普遍方程组，它和洛伦兹力公式合起来构成说明宏观电磁现象的理论基础——经典电动力学。

【位移电流】 电通量随时间的变化率。当电场变化时，在电介质（或真空）中通过任一曲面 s 的电位移通量（即电通量） $\varphi_D = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$ 的时间变化率 $d\varphi_D/dt$ 称为通过该曲面的位移电流；任一点电位移 \vec{D} 的时间变化率 $\partial\vec{D}/\partial t$ 称为该点的位移电流密度。19世纪英国物理学家 J. 麦克斯韦预言，即使不存在传导电流，磁场也必须与变化的电场相联系，这理论随即为实验所证实。因为磁场总是与电流相联系，则预期的磁场也认为是由另一种电流——位移电流产生的。麦克斯韦引入位移电流概念，将安培定律推广到非稳恒电流，推广了的安培定律形式为： $\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_r + \vec{j}_{\text{位移}} = \vec{j}_r + \partial\vec{D}/\partial t$ ，式中 ∇ 为微分算符，在直角坐标系中， $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \vec{i} ， \vec{j} ， \vec{k} 为 x ， y ， z 轴的单位矢量， \vec{H} 为磁场强度， \vec{j}_r 为传导电流密度， $\vec{j}_{\text{位移}}$ 为位移电流密度。它表明磁场不仅可由电流所激发，而且可由变化的电场所激发。于是磁场变化产生电场（电磁感应）；电场变化产生磁场（磁电感应），从而变化的电场和磁场可互为因果，在空间不断地交替产生、形成电磁场或电磁波。位移电流与真实电流不同，并不表示有真实电荷在空间流动，也不产生热效应和化学效应。称其为位移电流，仅是它与真实电流一样可以激发磁场。

【涡旋电场】 见“麦克斯韦方程组”。

【洛伦兹力】运动点电荷在磁场中所受的作用力。由荷兰物理学家 H. 洛伦兹于1895年首先提出。在国际单位制中，其形式为：

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$

式中 q 和 \vec{v} 分别为点电荷的电量和速度， \vec{B} 为点电荷所在处的磁感应强度。洛伦兹力的大小 F 为： $F = |q|vB\sin\theta$ ，其中 θ 为 \vec{v} 和 \vec{B} 之间的夹角，力的单位为牛顿。洛伦兹力的方向垂直于 \vec{v} 和 \vec{B} 所确定的平面，指向由右手定则确定：当右手四指由 \vec{v} 经小于 π 之角转向 \vec{B} 时，大拇指的指向就是正电荷受力的方向（若负电荷则受力方向相反）。在电场 \vec{E} 和磁场 \vec{B} 同时存在时，运动电荷受到的总作用力为电场力和磁场力之和，即 $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ 。一般此式也称为洛伦兹力公式，而且有时称为广义洛伦兹力。由于磁场对运动电荷的作用力与速度垂直，因此洛伦兹力对运动电荷所作的功率为

$$\vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{v} \cdot \vec{E}.$$

磁场力对运动电荷不作功。

【电磁势】描述电磁场的辅助物理量，包括标势 φ 和矢势 \vec{A} 两部分。它们与表示电磁场客观属性的可测量的物理量——电场强度 \vec{E} 和磁感应强度 \vec{B} 之间的关系是：

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t},$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A},$$

式中 ∇ 为哈密顿微分算符，在直角坐标系中， $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \vec{i} ， \vec{j} ， \vec{k} 是沿 x ， y ， z 轴的单位矢量。引进电磁势后可以将电磁

场所满足的麦克斯韦方程组化为电磁势所满足的一组微分方程，减少了未知量个数和方程个数，易于求解。由电磁势和电磁场之间的关系可以看出，在电磁势作下列称之为规范变换的变换时。

$$\begin{cases} \vec{A} \rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \nabla\psi, \\ \varphi \rightarrow \varphi' = \varphi - \frac{\partial\psi}{\partial t}, \end{cases}$$

\vec{E} 和 \vec{B} 保持不变，式中 ψ 为任意的标量函数，所以势 (\vec{A}, φ) 和势 (\vec{A}', φ') 描述同一电磁场，由于 (\vec{A}, φ) 的这种任意性，使得对不同的问题可以采用不同的规范条件来选定 \vec{A} 和 φ ，以便使基本方程和计算简化。应用最广的是库仑规范 $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 和洛伦兹规范 $\nabla \cdot \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\varphi}{\partial t} = 0$ 。采用洛伦兹规范时，在真空情况下，可从麦克斯韦方程得到下列达朗伯方程：

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} &= -\mu_0 \vec{j} \\ \nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} &= -\frac{\rho}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

式中 ∇^2 为一微分算符， $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ ，在直角坐标系中， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ， ρ 和 \vec{j} 分别为电荷和电流密度， c 是光速， ϵ_0 和 μ_0 是真空电容率和磁导率。可见在洛伦兹规范下，势的基本方程化为简单的基本形式，易于求解，并且其解的物理意义明显。

【赫兹矢量】在求解电磁波的辐射和传播问题中引入的描述电磁场的矢量函数。由于电磁势 (\vec{A}, φ) 可以加上一定的限制条件（见

“电磁势”)，因此由 φ 和 \vec{A} 的三个分量组成的四个量当中只有三个量是独立的。所以原则上可以用一个矢量函数去描述电磁场。赫兹于1888年找到了这种矢量函数。对任一给定的电磁场，可以引入一个矢量 \vec{Z} ，将洛伦兹规范下的电磁势 (\vec{A}, φ) 表示为：

$$\varphi = -\nabla \cdot \vec{Z},$$

$$\vec{A} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{Z}}{\partial t},$$

\vec{Z} 称为赫兹矢量，式中 ∇ 为微分算符，在直角坐标系中为： $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \vec{i} ， \vec{j} ， \vec{k} 是沿 x ， y ， z 轴的单位矢量，如果用矢量 \vec{P} 来表示电荷和电流： $\rho = -\nabla \cdot \vec{P}$ ， $\vec{j} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ ，则电磁势所满足的方程可以合并为一个方程

$$\nabla^2 \vec{Z} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{Z}}{\partial t^2} = -\vec{P} / \epsilon_0,$$

式中 $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ ，在直角坐标系中为： $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ， ϵ_0 为真空电容率。在研究偶极振子的辐射时，相应的 \vec{P} 即为偶极振子的电偶极矩矢量。已知 \vec{P} 则可求解出 \vec{Z} 。 \vec{Z} 求得后，即可由此求出源点以外空间各点的电磁场

$$\vec{E} = \nabla \times \nabla \times \vec{Z}, \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{Z})$$

【准稳电磁场】 忽略辐射效应和推迟效应时的交变电磁场。交变电磁场通常是以电磁波的形式向四周空间按一定速率传播的，所以空间中任一处的场量并不与同一时刻场源的电荷和电流值对应，

而其变化总是迟于场源的变化，呈现推迟效应；另外，电磁波的传播将从场源带走部分能量，呈现辐射效应。在电路及其附近的区域中，交变电磁场的辐射效应和推迟效应可忽略的条件称为准稳条件。准稳条件包括两个方面：(1) $\omega \ll \sigma/\epsilon$ 。式中 ω 为场源的角频率， σ 和 ϵ 分别为媒质的电导率和电容率。此条件由媒质的特性决定，它相当于要求位移电流 $\partial \vec{D}/\partial t$ 远小于传导电流 \vec{j} ，即 $\left| \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right| \ll |\vec{j}|$ （可允许局部的例外区，如电容器内部）。在此条件下，麦克斯韦方程组即退化为稳恒电场的方程组及稳恒磁场的方程组。(2) $l \ll \lambda$ 。其中 l 为所要考虑的区域线度， λ 是电磁波波长。此条件决定了准稳区的范围。由于推迟效应，场点的变化与源点的变化之间的时间差为 $\sim l/c$ ，相位差为 $\sim \omega \cdot l/c = 2\pi \frac{l}{\lambda}$ 。可见，这一条件相当于要求场点变化与源点变化之间的相位差很小，以致可以忽略推迟效应。例如对频率不高的输电线路， $f=50$ 赫， $\lambda=6000$ 千米，可以满足准稳条件。但当 $f=10^9$ 赫时， $\lambda=0.3$ 米，这时只有线度在几厘米以内的电路才能作为准稳电路来处理。在准稳条件下，可以用处理稳恒电场和稳恒磁场的方法来讨论准稳电磁场，一个电路上的总电流 I 可用集中参数的电路方程来确定（参见“电路”），但在频率较高时使得导线横向尺寸大于或相当于该频率的电磁波在导体中的趋肤深度时，电路的电感和电阻要采用相应频率时的值。

【电磁场】彼此相互联系的交变电场和磁场。静止电荷只在其周围空间产生静电场。运动电荷则同时产生磁场。变化的电场也能产生磁场，变化的磁场也能产生电场，于是交变的电场和磁场互为因果，可以离开电荷或电流在空间独立存在，形成电磁场。某处的电场或磁场一有变化，不论是什么原因，这种变化都不能局限于一

处,总是以光速向四周传播,形成电磁波。电磁场也具有质量、能量和动量。于是电磁波可以传送电磁能量和动量。

【坡印廷矢量】描述电磁场中的电磁能流的物理量,为矢量,常用 \vec{S} 表示。为纪念1884年引入该矢量的英国物理学家 J. 坡印廷而命名。坡印廷矢量 \vec{S} 的方向表示场中电磁能流的方向,它垂直于电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 所确定的平面,且 \vec{E} 、 \vec{H} 和 \vec{S} 三矢量呈右手螺旋关系。坡印廷矢量的大小表示单位时间内流过单位垂直面积的电磁能量,它与 \vec{E} 和 \vec{H} 的大小以及它们之间的夹角 θ 的正弦成比例,即 $S=EH\sin\theta$ 。用矢量公式表示为 $\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}$ 。坡印廷矢量的存在表明电磁场不仅具有能量,而且电磁能在空间不停地流通,可以从一处传播到另一处。坡印廷矢量的单位是瓦特/米²。

【电磁能】电磁场所具有的能量,是由场能和磁场能的总和。单位体积中的电磁能称为电磁能量密度,其值决定于电场强度 \vec{E} 、电位移 \vec{D} 、磁场强度 \vec{H} 和磁感应强度 \vec{B} ,可表示为: $\frac{1}{2}(\vec{E}\cdot\vec{D}+\vec{H}\cdot\vec{B})$,其中 $\frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D}$ 为电场能量密度, $\frac{1}{2}\vec{H}\cdot\vec{B}$ 为磁场能量密度。体积 V 中电磁场的总能量为 $W=\frac{1}{2}\int_V\vec{E}\cdot\vec{D}dv+\frac{1}{2}\int_V\vec{H}\cdot\vec{B}dv$ 。由于电磁场对电荷有洛伦兹力作用,所以电磁能可以通过场对运动电荷做功而与其他形式能量(如热能、机械能等)相互转化。电磁能也能以能流的形式从空间一处传播到另一处。

【电磁动量】电磁场所具有的动量。电磁场既具有能量也具有动量,表明了它的物质性。电磁动量是一个矢量。单位体积中的电磁动量

称为电磁动量密度 \vec{g}_{em} ，其方向垂直于电位移 \vec{D} 和磁感应强度 \vec{B} 所确定的平面， \vec{D} 、 \vec{B} 和 \vec{g}_{em} 三矢量呈右手螺旋关系，其大小与 \vec{D} 和 \vec{B} 的大小以及它们之间的夹角 θ 的正弦成比例，即 $g_{em} = DB \sin\theta$ 。用矢量公式表式为 $\vec{g}_{em} = \vec{D} \times \vec{B}$ 。体积 V 中的总电磁动量 \vec{G}_{em} 为： $\vec{G}_{em} = \int_V \vec{g}_{em} dv$ 。由于电磁场具有动量，所以电磁波入射到物体上时，会对物体施加一定的压力，这种压力称为辐射压力，这一点已为实验所证实。

【电磁质量和辐射阻尼】由与带电粒子不可分割地联系在一起的固有场（自场）所引起的附加质量称为带电粒子的电磁质量；加速运动带电粒子所激发的辐射场对粒子本身的反作用称为辐射阻尼。典型的自场是等速运动粒子的场（参见“运动带电粒子的电磁场”）。这时辐射场为零。粒子所产生的全部电磁场都属于自场。电磁场具有能量和动量，当粒子速度改变时，不仅它自己的动量和能量要改变，依附于它的自场的动量和能量也将随之改变。经分析表明，由于粒子携带着自场，它所表现出的惯性就比原来的大，相当于在原有质量 m_0 之上再加一个质量 m_e 。 m_e 就是带电粒子的电磁质量。计算出静止粒子库仑场总能量，然后利用相对论中的质能关系式，即可求出粒子的电磁质量。作为数量级估计，无论假定电荷 q 均匀分布在半径为 r_0 的球面上还是球体内，粒子的电磁质量为

$$m_e \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{c^2 r_0}$$

式中 ϵ_0 为真空电容率， c 为真空中的光速。如以 m_0 表示带电粒子非电磁起源的质量，则实验上所测量的带电粒子的质量（称为粒子的物理质量）为 $m_0 + m_e$ ，而不是 m_0 。若把带电粒子看作一个严格

的点(点模型), 即 $r_0=0$, 则粒子的物理质量将为无穷大, 这就是点模型的发散困难。在量子电动力学中常采用质量重正化的方法来解决这种发散困难。加速运动的带电粒子产生脱离开粒子向外辐射的场。这种辐射场将带走能量, 使粒子能量逐渐衰减, 因此, 它必然会对粒子产生反作用。这种反作用是通过辐射场对粒子的作用力来体现的。这种作用力即为辐射阻尼力。它可以通过能量守恒关系从带电粒子的能量辐射率导出。对于粒子作周期运动(振动或圆周运动)的情况, 有效辐射阻尼力 \vec{F}_r 为:

$$\vec{F}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q^2\dot{\vec{a}}}{3c^3}$$

式中 $\dot{\vec{a}}$ 代表加速度的时间变化率。

【运动带电粒子的电磁场】 微观带电粒子在运动中所产生的电磁场。这个问题虽然已经超出经典电动力学的范围, 但经典理论仍有一定的意义。例如, 在某些量子效应并不重要的情况下, 经典的结果仍近似正确, 有实用价值(例如计算高温等离子体或加速器中粒子的辐射); 另外, 即使在一些量子效应显著的情况, 也可以将经典结果与量子理论结果比较, 便于更好认识量子效应的特点。

在经典理论中, 通常忽略带电粒子的线度及其自旋磁矩, 而把它看作点电荷。这时运动带电粒子所激发的电磁势为:

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\dot{\vec{v}}]}{[\vec{R}] - \frac{[\vec{v}]}{c} \cdot [\vec{R}]}$$

$$\varphi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{[\vec{R}] - \frac{[\vec{v}]}{c} \cdot [\vec{R}]}$$

此结果称为李纳—维谢尔势。式中 q 代表粒子的电荷， c 代表真空中的光速， ϵ_0 和 μ_0 为真空电容率和真空磁导率， $[\vec{R}]$ 和 $[\vec{v}]$ 为辐射时刻 $t' = t - \frac{[\vec{R}]}{c}$ 的值。表明在观察点 \vec{r} 处时刻 t 的势是粒子在较早的时刻 t' 激发的，该时刻粒子位于 $[\vec{r}'] = \vec{r}'(t')$ 点上，其运动速度为 $[\vec{v}] = \vec{v}(t')$ ，而粒子与观察点的距离为 $[\vec{R}] = \vec{r} - [\vec{r}'] = \vec{r} - \vec{r}'(t')$ 。从李纳—维谢尔势，可以计算出任意运动的带电粒子的电磁场。匀速运动点电荷的场与匀速运动点电荷联系在一起，这时不存在电磁辐射。其表达式为

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \vec{R}}{\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) R^2 - \left(\frac{\vec{v} \cdot \vec{R}}{c}\right)^2\right]^{3/2}}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}$$

式中 \vec{v} 是粒子的速度，是常量， $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ 是观察点 \vec{r} 与同一时刻运动点电荷所在点 \vec{r}' 的相对位置。由此可以推出，匀速运动点电荷的场有如下特点：(1) 电场仍沿 \vec{R} 方向，但趋向于集中在与 \vec{v} 垂直的平面上，电力线的分布不再各向均匀了。当 \vec{v} 越趋近于光速，这种集中程度越大。(2) 电场 \vec{E} 和磁场 \vec{B} 相互垂直，磁力线在垂直于 \vec{v} 的平面内呈同心圆。(3) 能流线在包含速度矢量 \vec{v} 的平面内呈同心圆，圆心在运动电荷所在位置。表明，整个电磁场随粒子向前移动，而不存在电磁辐射。(4) 当 $v \ll c$ 时，若忽略 v^2/c^2 次及更高次项，则 $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\vec{R}}{R^3}$ ， $\vec{B} = \frac{\mu_0 q \vec{v} \times \vec{R}}{4\pi R^3}$ ，这与静电场和稳恒磁场中的结论类似。

高速运动带电粒子的辐射 接近于光速 c 运动的带电粒子有加速度时所产生的电磁辐射。其特点是辐射能量主要集中于朝前

方向。辐射的角分布（单位时间单位立体角辐射的电磁能）

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2}{16\pi^2\epsilon_0c^2} \frac{|\vec{n} \times [(\vec{n} - \frac{\vec{v}}{c}) \times \dot{\vec{v}}]|^2}{(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{n}}{c})^5}$$

式中 \vec{n} 为径向单位矢量。可以证明，不论加速度 $\dot{\vec{v}}$ 的方向如何，辐射能量主要集中于沿 \vec{v} 方向的锥角 $\Delta\theta$ 内， $\Delta\theta \simeq \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。

(1) 加速度与速度平行 ($\dot{\vec{v}} // \vec{v}$) 时，辐射的角分布

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2}{16\pi^2\epsilon_0c^2} \frac{\dot{v}^2 \sin^2\theta}{(1 - \frac{v}{c} \cos\theta)^5}$$

$\beta = v/c \approx 1$ 时，辐射主要集中于朝前方向，并以 \vec{v} 方向为轴旋转对称，沿 \vec{v} 方向 ($\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$) 没有辐射； $\beta = 0$ 时即为电偶极辐射。

(2) 加速度与速度垂直 ($\dot{\vec{v}} \perp \vec{v}$) 时，辐射角分布为

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2 \dot{v}^2}{16\pi^2\epsilon_0c^3} \left[\frac{1}{(1 - \frac{v}{c} \cos\theta)^3} - \frac{(1 - \frac{v^2}{c^2}) \sin^2\theta \cos^2\varphi}{(1 - \frac{v}{c} \cos\theta)^5} \right]$$

式中 θ 为 \vec{n} 和 \vec{v} 的夹角， φ 为由 \vec{v} 与 \vec{n} 所确定的平面与由 \vec{v} 和 $\dot{\vec{v}}$ 所确定的平面之间的夹角。其辐射沿 \vec{v} 方向 ($\theta = 0$) 最大，并集中于朝前方向。

【匀速运动点电荷的场】见“运动带电粒子的电磁场”。

【高速运动带电粒子的辐射】见“运动带电粒子的电磁场”。

【电磁辐射】电磁场能量以波的形式在空间传播。真空中它的传播速度是一普通常数 c ，即光速。电磁辐射除具有波的一般特性，如反射、折射、衍射、干涉等外，还具有微粒性。它是由光子组成。对于给定频率为 γ 的辐射，每个光子的能量为 $h\gamma$ ，其中 h 为普朗克常数。光子能量以电子伏（eV）为单位，1电子伏等于 1.602×10^{-19} 焦耳。光子也具有动量，但不具有静止质量。电磁辐射按其波长和频率的顺序排成若干频段，形成如表所示的电磁波谱，见“电磁波”。其中光子能量则构成能谱。表中，可见光及其邻近部分通常以波长表示；无线电波以频率表示；极高频辐射的观测是探测单个光子，其能谱由光子能量表示。振荡的电荷或电流系统，任意加速运动的带电粒子、原子能级之间的跃迁等都会发出电磁辐射。例如，天线辐射、原子和原子核辐射、电子的回旋辐射和韧致辐射。研究电磁辐射的理论基础是经典电动力学如量子电动力学。

【电偶极子辐射】振荡电偶极矩在远处所激发的电磁波。当两个大小相等，符号相反的电荷 $+q$ 与 $-q$ 相隔一个小距离 l 时，定义电偶极矩 $p = ql$ 。当 p 随时间 t 作周期性变化时，电偶极矩就处于振荡之中，振荡的电偶极矩称为偶极振子。它是最简单的球面波源，可以由麦克斯韦方程组求解其电磁场。当振子作角频率为 ω 的正弦振荡时， $p = p_0 \cos \omega t$ ， $p_0 = q_0 l$ ， q_0 是振荡电荷的幅值。对于振子的长度 l 远小于波长 λ 的情况，采用球面坐标系，在自由空间中电磁场的主要性质为：（1）当 $kr \ll 1$ ，即 $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ 时，振子的场分量近

似为

$$H_r = H_\theta = E_\varphi = 0$$

$$E_r \simeq \frac{p_0}{2\pi\epsilon_0 r^3} \cos\theta \cos\omega t$$

$$E_\theta \simeq \frac{p_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sin\theta \cos\omega t$$

式中 $k = \frac{\omega}{c}$ 是波数, c 是真空中光速, ϵ_0 是真空电容率。结果表明, E_r 和 E_θ 除了随时间变化外, 它们的空间分布和静电偶极子情况相似, 称为偶极振子的近区场。(2) 当 $kr \gg 1$, 即 $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ 时, 振子的场分量为

$$H_r = H_\theta = E_\varphi = E_r = 0$$

$$E_\theta = -\frac{k^2 p_0}{4\pi\epsilon_0 r} \sin\theta \cos(\omega t - kr)$$

$$H_\varphi = -\frac{\omega k p_0}{4\pi r} \sin\theta \cos(\omega t - kr)$$

表明偶极振子在远区的电场 \vec{E} 和磁场 \vec{H} 是具有相同频率和位相, 并以光速沿矢径 \vec{r} 传播的球面波。 \vec{E} 、 \vec{H} 、 \vec{r} 彼此相互垂直, 电场和

磁场的强度比为 $E_\theta/H_\varphi = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$, μ_0 是真空磁导率。振子所辐射

的功率可由周期平均坡印廷矢量 \vec{s} 求出

$$\vec{s} = \frac{ck^4 p_0^2 \sin^2\theta}{32\pi^2 \epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$$

式中 \vec{e}_r 是沿 \vec{r} 方向的单位矢量。因此沿振子轴线方向 ($\theta=0$), $|\vec{s}|=0$ 没有辐射; 而在垂直于振子轴线的赤道面内 ($\theta=\frac{\pi}{2}$), $|\vec{s}|$ 为

最大，辐射最强。若保持电偶极矩振幅不变，则辐射功率正比于频率的四次方。这些结果均为实验所证实。赫兹于1888年用类似于偶极振子的装置实验证实了电磁波的存在。

【电磁学量的单位制】电磁学量有多种单位制，常用的有以下几种：

(1) 绝对静电系单位制，简称静电单位制，又称 CGSE 制。它是以静电力为基础的绝对单位制，选取长度、质量和时间为基本量，基本单位是厘米、克和秒。电荷的单位是第一个导出单位，根据确定真空中相距为 r 的两个点电荷， q_1 和 q_2 之间作用力的库仑定律 $F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ ，并令 $k=1$ 定出，称为电荷的 CGSE 单位，又称静电库仑，简称静库。所有其他电磁学量的单位再由电荷的单位和有关的定律或定义导出，它们一般没有特别的名称，通常都以 CGSE 来标记。

(2) 绝对电磁系单位制，简称电磁单位制，又称 CGSM 制。它是以电流的磁力为基础的绝对单位制，选取长度、质量和时间为基本量，基本单位是厘米、克和秒，电流强度的单位是第一个导出单位，根据安培定律和毕奥—萨伐尔定律定出，称为电磁安培，简称磁安。所有其他电磁学量的单位再由电流的单位和有关定律或定义导出，它们一般都用 CGSM 表示，只有几个单位有特定的名称：磁感应强度单位为高斯，磁通量单位为麦克斯韦，磁场强度单位为奥斯特。

(3) 高斯单位制。它是一种混合的单位制，凡是电学量都用静电制单位，而磁学量都用电磁单位制单位。这时，真空电容率 ϵ_0 和真空磁导率 μ_0 都等于1，介电常数 ϵ 和磁导率 μ 都是无量纲的纯数。

(4) 国际单位制, 又称 SI 制。此单位制的电磁学部分的基本量为长度、质量、时间和电流, 基本单位分别为米、千克、秒和安培。1 安培电流等于 $1/10$ CGSM 制单位的电流。力、功和功率单位分别为牛〔顿〕、焦〔耳〕和瓦〔特〕。电荷、电场、电位单位可通过有关定义确定, 分别为库〔仑〕、牛/库 (等于伏/米) 和伏。这时, 真空电容率 $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2}$ 库²/ (千克·米) (其中 c 本身带量纲)。磁感应强度 B 和磁场强度 H 的单位通过法拉弟电磁感应定律和安培环路定律确定, B 的单位是特〔斯拉〕, H 的单位是安/米。真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 千克·米/库², $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ 。在电工和实用方面常采用这一单位制。

(5) 有理化米千克秒安培单位制。又称 MKSA 单位制, 是国际单位制中有关电磁学的一部分。

【安培】 简称安, 用 A 表示。常用的电流单位, 为纪念法国物理学家安培而命名。真空中相距 1 米的两根无限长且截面可忽略的平行直导线内通过一稳恒电流, 当导线每米长度所受的力为 2×10^{-7} 牛顿时, 则规定导线中通过的电流为 1 安培, 1960 年 10 月第十一届国际计量代表大会决定用安培作为电学量的基本单位, 并作为国际单位制中的基本单位之一。它与其他电流单位之间的换算关系为:

$$1 \text{ 安培} = 3 \times 10^9 \text{ 静安} = 10^{-1} \text{ 磁安}。$$

【库仑】 简称库, 用 C 表示。电量的单位, 为纪念法国物理学家 C. 库仑而命名。是国际单位制的导出单位, 定义为: 1 安培的电流通过导体时, 在 1 秒内流过导体任一截面的电量。1 库仑约相当于 6.25

$\times 10^{18}$ 个电子的电量，国际单位制基本单位表示的关系式为秒·安培。它与其他电量单位之间的换算关系为：

1库仑 = 3×10^9 静库 (CGSE 电量单位) = 10^{-1} 磁库 (CGSM 电量单位)。

【伏特】简称伏，用 V 表示。电位（电势）、电位差（电势差）和电动势的单位。为纪念意大利物理学家伏打而命名。是国际单位制的导出单位，定义为：在电路中两点间通过1安培恒定电流时，若所消耗的电功率为1瓦特，则规定这两点间的电压为1伏特，用国际单位制基本单位表示的关系式为米²·千克·秒⁻³·安培⁻¹。它和其他电位单位之间的换算关系为：

1伏特 = $\frac{1}{3} \times 10^{-2}$ 静伏 (CGSE 电位单位) = 10^8 磁伏 (CGSM 电位单位)。

【法拉】简称法，用 F 表示。电容单位。为纪念英国物理学家法拉弟而命名。它是国际单位制的导出单位，定义为：一平行板电容器两极板分别带有1库仑的异号电荷时，若两极板间的电势差为1伏特，则规定其电容为1法拉。实际应用上法拉的单位太大，所以常用微法（等于 10^{-6} 法拉，用符号 μF 表示）、皮法（等于 10^{-12} 法拉，用符号 pF 表示）等作为电容的单位。用国际单位制基本单位表示的关系式为米²·千克·秒⁴·安培²。它和其他电容单位之间的换算关系为：1法拉 = 9×10^{11} CGSE 电容单位。

【欧姆】简称欧，用 Ω 表示。电阻单位。为纪念德国物理学家欧姆而命名。它是国际单位制的导出单位，定义为：若在一导体两点间加

上1伏特的恒定电位差，在导体上产生的电流为1安培时，则规定该导体两点间的电阻为1欧姆(设导体内不存在任何电动势)。用国际单位制基本单位表示的关系式为米²·千克·秒⁻³·安培⁻²。它和其他单位之间的换算关系为：

1欧姆 = 9×10^{11} 静欧 (CGSE 电阻单位) = 10^{-9} 磁欧 (CGSM 电阻单位)。

【特斯拉】简称特，用 T 表示。磁感应强度的单位。为纪念美国物理学家特斯拉而命名。它是国际单位制的导出单位，定义为：如果在垂直于均匀磁场方向放置的长直导线中通过1安培的稳恒电流时，在每米长度的导线上受到1牛顿的磁力，则规定该磁场的磁感应强度为1特斯拉。用国际单位制基本单位表示的关系式为千克·秒⁻²·安培⁻¹。

1特斯拉 = 1 韦伯/米²。

【韦伯】简称韦，用 Wb 表示。磁通量的单位。为纪念德国物理学家韦伯而命名。它是国际单位制的导出单位，定义为：使通过单匝线圈的磁通量在1秒钟内均匀地减小到零，如果在该线圈中产生的感应电动势为1伏特，则规定原来通过该线圈的磁通量为1韦伯。用国际单位制基本单位表示的关系式为米²·千克·秒⁻²·安培⁻¹。

1韦伯 = 1伏·秒。

【亨利】简称亨，用 H 表示，电感的单位。为纪念美国物理学家亨利而命名，它是国际单位制的导出单位，定义为：若线圈中的电流变化率为每秒1安培而在线圈本身中因自感引起1伏特感应电动势时，则规定这个线圈的自感为1亨利。或者当两个相邻线圈中任

一个的电流变化率为每秒1安培,而在另一线圈中因互感引起的感应电动势为1伏特时,则规定这两个线圈的互感为1亨利,用国际单位制基本单位表示的关系式为米²·千克·秒⁻²·安培⁻²。它和其他电感单位之间的关系为:

1亨利=10⁹磁亨 (CGSM 电感单位) = $\frac{1}{9} \times 10^{-11}$ 静亨 (CGSE 电感单位)。

【高斯】简称高,用 G 或 G_s 表示。绝对电磁系单位制中的磁感应强度的单位。为纪念德国数学家、物理学家 C. 高斯而命名。定义为:如果在垂直于均匀磁场方向放置的长直导线中通过1绝对电磁系单位的稳恒电流(等于10安培)时,在每厘米长度的导线上受到1达因的磁力,则规定该磁场的磁感应强度为1高斯。它和国际单位制中的磁感应强度单位特斯拉之间的换算关系为:1高斯=10⁻⁴特斯拉。

【奥斯特】简称奥,用 O_e 表示。现为非许用单位。为纪念丹麦物理学家奥斯特而命名。绝对电磁系单位制中磁场强度的单位。定义为:当1绝对电磁系单位的稳恒电流(等于10安培)通过无限长的直细导线时,规定距离导线2厘米处的磁场强度为1奥斯特。在绝对电磁系单位制中磁感应强度 \vec{B} 和磁场强度 \vec{H} 的关系是: $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}$, 因而 B 的单位高斯和 H 的单位奥斯特实际上一致。奥斯特和国际单位制的磁场强度单位安/米之间的换算关系为:1奥斯特 = $\frac{10^3}{4\pi}$ 安培/米。

【麦克斯韦】简称麦,用 M_x 表示。现为非许用单位。为纪念英国物

理学家麦克斯韦而命名。绝对电磁系单位制中的磁通量单位。定义为：如果磁场的磁感应强度为1高斯，则规定在垂直于它的平面上，每平方厘米面积中所通过的磁通量为1麦克斯韦。它和国际单位制中磁通量单位韦伯之间的换算关系为：1麦克斯韦 $=10^{-8}$ 韦伯。

【电桥】用比较法精确测量电参量的仪器。1843年惠斯通发明。惠斯通电桥是一种由阻元件组成的桥式电路。 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为电桥的四个桥臂；平衡指示器 G 为较灵敏的检流计。当对角 A 和 B 之间接通直流电源时，如果 G 中有电流流过，称为不平衡电桥；若无电流流过，称为平衡电桥。电桥平衡的条件是： $R_1/R_2=R_3/R_4$ 。若已知桥臂中任何三个电阻值，则利用电桥平衡条件可求出第四个未知电阻的值。如果一桥臂使用压敏电阻或热敏电阻，则通过对它们阻值的测量，就可以推算出这些特殊电阻所在环境的压力或温度。除电阻外，电桥还能测量其他电参量，视各臂中使用何种电路元件而定。将电感、电容适当排列组合成电桥电路，就可以测量电感、电容和频率。这种电桥称为交流电桥。电桥的测量准确度和灵敏度都很高，在电磁测量中应用极为广泛。

【灵敏电流计】检测微弱直流电流的仪表。利用永久磁铁的磁场对载流线圈作用的原理制成。它的基本组成部分有固定的永久磁铁和活动的线圈。线圈用悬丝（或带）悬挂。当线圈通以直流电时，线圈在磁场中受到磁力矩作用发生偏转，同时悬丝也被扭转。由于弹性，悬丝产生反方向的弹性扭力矩。在一定的偏转角度下，线圈所受的磁力矩和扭力矩达到平衡时，线圈静止。偏转角 θ 和电流强度 I 成正比，即 $\theta=S_g I$ ，式中 S_g 是电流计的灵敏度，可由实验测定。在动圈的上端装有反射小镜，在距小镜一定距离处安装一标尺，由

小灯产生一束狭窄的光投向小镜，经小镜反射到标尺上，形成清晰的光标，可以指示动圈的偏转角。由于悬丝扭转的弹性和线圈的惯性，线圈在偏转时会在平衡位置附近振动，妨碍观测。因此常在线圈上附加一闭合铜丝圈及配以适当的外接电阻，利用线圈转动时在线圈中引起的感生电流来阻尼线圈的振动。这种电流计的灵敏度很高，极易受外界振动的影响，使用时应将它固定安装在稳固位置或坚实的墙壁上，所以又称为墙式电流计。常用作灵敏电桥和电位计的平衡指示器。

【冲击电流计】测量短暂脉冲电流所迁移的电荷量的仪器。它被广泛应用于磁测量中，也用于测量电容和高电阻。它的结构原理和灵敏电流计相仿，区别仅在于它的线圈较扁而宽，转动惯量较大，从而其自由振荡周期较长。当有脉冲电流通过线圈时，线圈就受到脉冲磁力的冲量而发生偏转。由于振荡周期比电流脉冲周期长得多，可以认为脉冲电流全部流过后，线圈才开始偏转。于是通过的脉冲电荷量 Q 正比于第一次最大的摆角 θ ，即 $Q = C_b \theta$ ，式中 C_b 是冲击常数，可由实验测定。由于冲击电流计和灵敏电流计的用途不同，所以读数方法也不一样，用灵敏电流计时读的是线圈的稳定偏转角，而用冲击电流计时读的是第一次摆动的最大偏角。冲击电流计的技术特性一般用电荷量灵敏度和振荡周期来说明。冲击常数（等于电荷量灵敏度的倒数）可达 10^{-9} 库/分度，振荡周期可达 20—30 秒。

【安培计】又称电流表。测量电流强度的仪表。常用的安培计是把磁电式仪表扩大量程改装而成。磁电式仪表在永久磁铁的两极间，有一可动线圈（动圈），它由张丝悬挂或通过游丝支架在钻石轴承上。

当电流通过时，处于永久磁铁磁场中的线圈将受到磁力矩作用而旋转。另一方面，由于线圈转动，扭紧张丝或游丝，从而产生反抗力矩。当线圈转到某一位置，反抗力矩与磁力矩相平衡时，线圈便处于静止状态。这时与线圈相连接的指针便指示出相应的电流值。因为磁电式仪表的动圈所能承受的电流通常很小，所以常用的安培计都由磁电式仪表 G 及分流电阻 R 组成， $I = \frac{R + R_g}{R} I_g$ ，其中 R_g 为 G 的内阻。分流电阻 R 选配好后，可从 I_g 直接读出 I 。如果分流电阻 R 很小，安培计的量程 I 就比原来磁电式仪表 G 的量程 I_g 大得多。除磁电式安培计外，还有电磁式安培计、热电式安培计等。

【伏特计】 又称电压表。测量直流或交流电压的仪表。电压值以伏、毫伏或千伏为单位在刻度盘上显示。常用的直流伏特计由磁电式仪表（见“安培计”） G 及串联电阻 R 组成。通常磁电式仪表的动圈电阻 R_g 为几百至几千欧姆，允许通过的最大电流 I_g 为几十微安至几毫安，于是它所能承受的电压很小。给仪表 G 串联一个高阻值的分压电阻 R 后，则可用于测量较大的电压 U 。在分压电阻 R 选配好后，可从 U_g （或 I_g ）直接读出 U 。如果分压电阻很大，伏特计的量程 U 就比原来磁电式仪表 G 的量程 $I_g R_g$ 大得多。除磁电式伏特计外，还有电磁式伏特计、热电式伏特计。晶体管伏特计（或晶体管电压表）是利用晶体管的整流和放大特性以测量交流或直流电压。这种仪表内阻很大，测量时几乎不会引入线路负载误差。数字式电压表是用模数转换（A/D 转换）器将待测电压转换成数字量，然后再用数码显示器显示出电压值。这种仪器精度高，抗干扰能力强，测量速度快。用它可以测出小到 10^{-8} 伏的电压并具有很高的输入阻抗。在半导体集成器件出现后，使它得到了广泛的应

用。

【高斯计】测量磁感应强度 \vec{B} 的仪器。它是利用半导体霍耳效应的原理而制成。它的基本组成部分有霍耳探头、恒流源及放大电路、指示电表等。测量时，将霍耳探头插入被测磁场中，并使探头中半导体薄片的平面与被测磁场的磁感应强度 \vec{B} 的方向垂直。这时，如果由恒流源产生的稳定电流通过半导体薄片，则在薄片中与磁场和电流都垂直的方向上的两个侧面，会出现正比于磁感应强度的电势差。这一电势差经放大电路放大处理后，由指示电表指示。电表指示值经换算给出或直接显示出被测磁场的磁感应强度 B 的数值。高斯计不仅可测直流电的磁场，还可测交流电的磁场。它具有量程宽、灵敏度高、测试简便等优点。

【磁强计】测量磁场强度的仪器。根据磁针在磁场作用下能产生偏转或振动的原理制成。

波

【波动】物理量或物理量的扰动在媒质(或真空)中的传播过程。过程中所传递的只是扰动的影响而非媒质本身。在自然界中，波动现象十分广泛。例如池面上的水波，空气中传播的声波，地球上经常出现的地震波，包括光的电磁波(如充满宇宙的各种光和各种射电、广播电视信号)，由广义相对论预言存在的引力波以及物质波

(如电子波、中子波)等。波的概念是物理学中少数极其重要的统一概念之一;实用上,波是信息的载体。

波形。波在空间和时间的分布。波动中的物理量(或其扰动)是空间位置和时间的函数,这一物理量函数 $\zeta(\vec{r}, t)$ 称为波函数,其特点是:在时间 t 出现在空间 \vec{r} 处周围的分布,会在时间 $(t+t')$ 出现在空间 $(\vec{r}+\vec{v}t')$ 的周围。 \vec{v} 一般说是个常矢量,它是有关物理量(或其扰动)的传播速度。于是波函数一般可写成

$$\zeta(\vec{r}, t) = F(\vec{r} \pm \vec{v}t)$$

式中 r 是矢径的幅值, +号和-号分别表示波沿负和正 r 方向传播, v 是波的传播速率。 $F(\vec{r} \pm \vec{v}t)$ 泛指自变量为 $(\vec{r} \pm \vec{v}t)$ 的各种函数。所以波形也就是波函数的形状。 F 函数的形式多种多样。一种很简单的函数是正弦或余弦,即波函数 $F(\vec{r} \pm \vec{v}t)$ 是

$$A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\vec{r} \pm \vec{v}t) \right] \text{ 或 } A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\vec{r} \pm \vec{v}t) \right]$$

这种波称为简谐波。它在空间和时间上都是无限地重复变化的;在空间上以 λ 重复, λ 是两相邻波峰(或波谷)间的距离,称为波长,在时间上以 $\lambda/v = T$ 重复, T 称为周期。 $f = 1/T = v/\lambda$ 称为频率。 A 称为幅值或振幅,自变量 $\frac{2\pi}{\lambda} (\vec{r} \pm \vec{v}t) = (kr \pm \omega t)$ 称为相位, v 称为相速度, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波数, $\omega = 2\pi f$ 是圆频率。零时刻的相位称为初相位。在某一时刻其上各点相位取等值的曲面称为等相面。波源总是在一定时刻发射波的,因此波总有前沿。波的前沿曲面叫做波阵面。波阵面一般是等相面。简谐波是最简单、最基本的波动,复杂的波动可以看作是由许多不同简谐波的合成。

波的类型。波可以按传播它的媒质分类。水面上的机械波叫水波,空气中的机械波为声波;电磁场在真空中与媒质中的传播则

称为电磁波（包括光波在内）。就媒质运动方向（或波函数所表示的物理量的方向）与波传播方向之间的关系而言，若前者的方向与后者的方向平行时为纵波（如声波），而相互垂直时为横波（如水面上的水波）。自由空间中的电磁波纯属横波，因为与它有关的物理量电场和磁场的方向与波的传播方向垂直。

波动方程。给出波函数随空间坐标和时间的变化关系的方程式。它以数学语言来表达波的特征。经典的波动方程是线性二阶偏微分方程。通过对具有特定边界条件的波动方程求解，能够揭示出不同条件下波的传播规律，认识波的本质。参见“波动方程”。

波的叠加。当两列以上的同类波在空间相遇时，各列波可互相穿过而不受破坏。在共存的空间内，总的波是各个分波的矢量和。这就是波的叠加原理。此原理的前提是所研究的系统是线性的，因为线性波的方程的几个解之和仍然是这个方程的解。

波的干涉。两列或两列以上具有相同频率、固定相位差的同类波在空间共存时，由于叠加，形成振幅相互加强或相互减弱的现象。相互加强时称为相长干涉，相互减弱时称为相消干涉。例如，平面光波射到一个开有两平行长狭缝的屏障时，在屏障后的幕上会出现明暗交替且平行于缝的干涉图样。

波的衍射。波在传播中遇到有限大障碍物或遇到大障碍物中的孔隙时，会绕过障碍物的边缘或孔隙的边缘，呈现路径弯曲，在障碍物或孔隙边缘的背后展衍，这种现象称为波的衍射。波长相对于障碍物或孔隙越大，衍射效应越强。例如，声波的波长一般可达几米，因此室内发出的声波可以绕过门、窗而传播到室外。

【波形】见“波动”。

【波阵面】见“波动”。

【相速度】见“波动”。

【群速度】波群传播能量的速度。波群是由一系列频率和波长不同的简谐波分波叠加而成的合成波。在通常的媒质中，分波的相速度是个常数。例如，各种颜色的光在真空中的相速都等于光速 c (2.99792458×10^8 米/秒)，是个恒量。但在某些媒质中，相速度因频率（或波长）而异。这种现象称为色散或频散。在色散媒质中，各个分波的相速度各不相同，运动快慢不一，则波群的波形将随时间变化，并“扩散”开来。但假若波群是由一系列频率差别不大的简谐波组成，这时在相当长的传播途程中总的波仍将维持为一整体，并以一个固定的速度运动。这个特殊的波群称为波色，其色波幅度最大部分的运动速度称为波群的群速度，如果波色由两个相速不同的分波组成，则群速度 $v_g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$ ，式中 ω_1 、 k_1 和 ω_2 、 k_2 分别为这两个波的频率和波矢。如果波色是由一系列频率相近的分波组成，则群速度 $v_g = d\omega/dk$ 。群速度的值比波色的中心相速度要小，二者的差与中心相速度随波长而变化的平均率成正比。群速度也是波色所表达信号的传播速率。

【反射与折射】为简单计，设两种介质的分界面为平面，在介质1中传播的波遇到分界面后，一部被反射回到介质1中，另一部被射入到第二种介质中去，前者称为反射波，后者称为折射波。入射波、反射波和折射波的波矢量与分界面法线的夹角分别称为入射角 θ_i ，反射角 θ_r 与折射角 θ_t 。入射角 θ_i 恒与反射角 θ_r 相等，这就是反

射定律。但对声波而言，如在固体与固体的分界面上反射时，那么反射波是两个，即反射横波与反射纵波。对于折射而言有 $A\sin\theta_1/A\sin\theta_2=c_1/c_2$ ，这就是折射定律。此处 c_1 与 c_2 分别为波在第一种与第二种介质中的传播速度。对于在固体中传播的声波，其横波与纵波传播速度不同，故此声波的反射与折射均比电磁波复杂。

【简谐波】 波动方程为 $f=A\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x\pm vt)+\delta\right]$ 时为平面简谐波， A 为波幅， $\frac{2\pi}{\lambda}=k$ 为波数， λ 为波长， x 为坐标， v 为波速， t 为时间， δ 为初相角。在同一时刻沿 x 轴相距为波长 λ 的正整数倍的地方运动情况相同。在同一地点在时间上每间隔 $\lambda/v=T$ 的正整数倍时运动情况相同。引 $f=\frac{1}{T}=\frac{v}{\lambda}$ 称为频率， $\omega=2\pi f$ 称为圆频率。简谐波是一种理想的波。此处的波速又称为相速度，可以认为它是相角为常数点的运动速度，即 $\frac{2\pi}{\lambda}(x\pm vt)+\delta=\text{常量}$ ，点的速度。将上式对 f 求导，可得 $\frac{dx}{dt}=\mp v$

【行波】 又称前进波。在没有外部边界的媒质中形成的波动。由于媒质没有边界，不会发生反射现象，因此行波具有传输能量和动量的特性。

【驻波】 在由确定的边界包围着的媒质中形成的波动。它是由入射波和在媒质的边界上反射回来的在同一直线上的反射波相互干涉的结果，是一种特殊的干涉现象。例如，简谐波在驻波腔内来回反射，驻波腔的长度是半波长的整数倍，腔端每个界面在反射时产

生 π 相位差，则在腔内形成驻波。驻波中振幅恒为零的点称为波节，相邻波节相距半个波长，两个波节之间的振幅按正弦形分布。振幅最大的点称为波腹。驻波的应用也很广泛，如管弦乐器便利用了驻波。

【横波与纵波】 见“波动”。

【线性波与非线性波】 若描述波的偏微分方程是线性的，则此波为线性波。对线性波而言叠加原理成立。即在空间如果有两列同一类型的波，则总的波为这两列波之和。叠加原理的依据为对线性偏微分方程而言，其两个解之和仍为其解，一般的小振幅的水波，弹性波，声波等均为线性波。深入研究可发现不少线性波有时也是非线性波，如超音速气流中的激波，在晶体大振幅的电磁波，大振幅水波等等，描述这种波的微分方程是非线性的，叠加原理不再适用。

【惠更斯—菲涅耳原理】 关于波传播过程中波阵面在媒质中传播规律的基本原理。由荷兰数学家、物理学家和天文学家惠更斯于1690年提出。认为，媒质中任一波阵面上各点都可看作是新的次波源，这些次波按其各自的速度向各方向传播，其后任一时刻，这些次波所形成的包络面，就是原波面所传播到的新波面。这一原理是研究各种光学现象的有效方法。例如，在均匀的各向同性媒质中，由于光以同样的速度向各方向传播，点源的包络面呈球面；而在许多晶体中，由于光的速度与传播方向有关，点源的包络面则呈椭球面。根据惠更斯原理，可以说明光的反射和折射定律，但不能说明衍射现象。1815年，菲涅耳引入波的相干性，认为，从同一波面

上各点所发的次波，经传播而在空间某点相遇时，要考虑到次波间的位相关系进行叠加，从而会产生干涉现象，补充了惠更斯原理。补充后的原理称为“惠更斯—菲涅耳原理”。它可以用来解释各种衍射现象。

【干涉】 见“波动”。

【衍射】 见“波动”。

【波的能量】 所有波动都携带能量。例如，弹性媒质中的机械波把某处媒质质点的振动传给波阵面前方原来是静止的媒质质点，就意味着波带有动能和势能。通常，用波内单位体积所具有的能量来量度波所携带的能量，称为波的能量密度。理论推导表明，弹性行波的平均能量密度是与媒质质点的密度、振幅的平方以及频率的平方成正比的。在单位时间内通过垂直于波矢的单位面积所传递的能量称为波的强度或能流密度，它等于波的能量密度与波的传播速度的乘积。

【波动方程】 给出波函数随空间坐标和时间的变化关系的方程式。它以数学语言来表达波的特征。经典的波动方程是线性二阶偏微分方程，它的一般形式是

$$\left[\nabla^2 - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] F(\vec{r}, t) = 0,$$

式中 v 是带有速度量纲的参量， \vec{r} 是空间坐标， t 是时间， ∇^2 是拉普拉斯算符，在直角坐标系中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。F(\vec{r}, t) 是波函数。例如，对于一维平面波来说，波动方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2}$$

真空中电磁波的波动方程可以表示为

$$\left[\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \vec{E}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\left[\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \vec{H}(\vec{r}, t) = 0$$

式中 \vec{E} 和 \vec{H} 分别为电场强度和磁场强度, c 为光速。通过对具有特定边界条件的波动方程求解, 能够揭示出不同条件下波的传播规律, 认识波的本质。

【多普勒效应】由于波源和观察者相对运动而引起的观察者接收到的波频率不同于波源发出的波频率的现象。是奥地利物理学家多普勒于1842年首先发现。多普勒效应引起的频率变化称为多普勒频移。例如, 鸣着汽笛的火车快速驶近时, 路旁的人所听到的汽笛的音调变高; 当火车快速驶离时, 听到的音调变低。又如, 在地球上用光谱仪观测一颗恒星发来的光, 如果地球和恒星相互靠近, 则观测到的光谱向紫端移动(频率变高); 如果地球和恒星相互退行, 则观测到的光谱向红端移动(频率变低)。多普勒效应有很多应用, 例如可以利用多普勒效应测量人造卫星运行的速度和高度等。

【声波】弹性媒质中传播的一种机械波。空气具有弹性, 若某部分空气受扰动而被压缩, 在压缩解除后, 被压缩的空气就发生膨胀。膨胀时, 第一部分气体推动它相邻的气体, 相邻的气体就被压缩, 以后又依次膨胀并推动另外相邻的气体, 从而在气中形成波动。声波就是在空气中或其他媒质中的压缩波, 它是一种质点振动方向

与波的传播方向一致的纵波。声波在媒质中的传播速度叫声速，20℃时空气中的声速约为344米/秒。声波具有机械能。声强是通过垂直于声波传播方向的单位面积上的平均功率。单位为瓦/米²。若以 I_0 表示相当于可听到的最弱声音的参考声强， I 表示声强，则声强的定义为 $10\log I/I_0$ ，单位为分贝。普通谈话的声强约为60分贝。当波传播时，媒质中某质点每秒钟振动的次数称为频率，单位为赫〔兹〕(Hz)。频率高于20000赫的声波（称为超声波）和频率低于20赫的声波（称为次声波）一般不能引起声感，只有频率在二者之间的声波才能被听到。声波可分为表面声波和体声波。

【声速】 声波在介质中的传播速率。声速大小因介质及波型不同而不同。(1) 气体中的声速 c 在均匀、无损耗的理想气体中，声速 $c = (r p / \rho)^{\frac{1}{2}}$ 此处 r 为气体定压比热容 C_p 与定容比热容 C_v 之比， p 为无声波时的气体静压， ρ 为气体密度。对于空气来说，声速 c (m/s) 与温度 t (℃) 有如下关系： $c \approx 331.45 + 0.61t$ 。(2) 液体中的声速 对于无损耗液体而言，声速 $c = (\gamma / \rho \beta_{is})^{\frac{1}{2}}$ 此处 ρ 为液密度， β_{ad} 为绝热压缩系数， β_{is} 为恒温压缩系数， $\gamma = \beta_{ad} / \beta_{is}$ 。对于水有 $c = 1557 - 0.0245(74 - t)^2$ 声速 c 以 m/s 计， t 以 ℃ 计。对于海水通常用如下实验公式 $c = 1449.2 + 4.623t - 0.0546t^2 + 0.161p + 1.391(s - 35)$ 此处 c 以 m/s 计， t 以 ℃ 计， s 为含盐量，以千分之一为一个单位。(3) 固体中的声速 在固体中由于波型复杂，迄今没有统一的公式来表达声速，对于具体的波型列表如下：均匀弹性体中的声速

波型 声速公式

纵波
$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

$$\text{横波} \quad c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$$

$$\text{弯曲波} \quad c = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{3\rho(\lambda\mu^2)}} \quad \text{板中的弯曲波}$$

$$\text{弯曲波} \quad c = \frac{\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{杆中的弯曲波}$$

$$\text{瑞利波} \quad c = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\text{扭转波} \quad c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{圆梁}$$

此处 ρ 为介质密度, E 为弹性模量, G 为切变模量, μ 为泊松比, d 为板的厚度, r 为杆的半径。对于各向异性材料就更为复杂了, 声速不仅与材料有关, 与波型有关, 而且与结晶类型、声波传播方向等有关。

【固体中的弹性波】又称固体中的应力波。固体中的一种机械波。固体具有弹性, 弹性力有使扰动引起的形变恢复到无形变状态的能力。由于这种弹性力的作用, 固体中某点或某部分受扰动而发生的形变, 如体积形变或剪切形变, 会以波动的形式传播到固体的其他部分。在波动传播过程中, 固体中的质点除在它原来位置上有微小的振动外, 并不产生永久性位移。在各向同性无限大的固体中, 有两种类型的弹性波: 媒质质点沿波传播方向振动的纵波和媒质质点在与波传播方向垂直的平面内振动的横波。

棒中弹性波。在固体棒中传播的弹性。对于真空中或空气中的各向同性无限长的细棒(棒截面尺度远小于波动的波长), 一般可以有三种不同类型的波动: 纵波、弯曲波和扭波。在弯曲波中其质点振动方向与棒轴垂直, 于是随着弯曲波的传播, 伴有棒的弯曲。

在扭波中其质点运动方向完全沿着柱坐标中方位角的方向，在垂直于棒的平面内作绕轴的角振动，而不改变到轴心的距离。

板中弹性波。简称板波。对于真空或空气中的各向同性长宽无限大的平板，当厚度大于板中波动波长时，一般板波有四种类型：瑞利波或叫表面波、弯曲波、纵波和横波。当板厚小于板中波动波长时，表面波不复存在，只有其余三种类型。

【棒中弹性波】见“固体中的弹性波”。

【板中弹性波】见“固体中的弹性波”。

【重力波】不可压缩流体中一种以重力为恢复力的波。有表面重力波和内重力波。表面重力波通常存在于两种不同流体（例如气体和液体）的分界面上，沿表面传播而沿与表面垂直的方向衰减。透入的深度与波长有关，这导致波的频散，当流体深度远小于波长的“长波”极限时，波是“非频散”的。内重力波存在于内部密度连续分层变化的同一种媒质中。例如，处于重力场中的大气。内重力波的一个重要特性是：能流方向一般说来并不沿着波矢方向，其相速度向下，而群速度向上。

【声表面波】又称瑞利波。沿半无限均匀各向同性弹性固体与空气或真空接触的表面传播，能量集中在表面附近的弹性波。英国物理学家瑞利于1885年首先从理论上给出。它有以下特点：（1）质点运动轨迹是一椭圆；（2）质点位移振幅的包络随深度增加而衰减，其能量大部分集中在离表面约几个波长的深度内，是一种表面波。对于各向异性并具有压电性的压电媒质中的声表面波，还具有下述

特性：随着这种表面波的传播，将伴有电场分布的传播。利用这一特性，在电子学领域内，作成多种对电信号进行模拟信号处理的声表面波器件，广泛应用于雷达、通信、电视等电子技术领域。

【瑞利波】 见“声表面波”。

【乐甫波】沿覆盖在半无限固体介质表面上的另一薄层介质中传播的一种切变弹性波。此时薄层介质类似波导，波的能量全部限制在薄层中。对各向同性的介质，这种乐甫波存在的条件是：（1）薄层介质的切变波波速须小于半无限介质的切变波波速；（2）频率须大于某临界频率。乐甫波是多模的，对不同模式的波，其临界频率是不同的，它是一种频散波。

【斯顿莱波】在两个半无限的固体界面上，当两个固体介质的参数满足一定关系时，传播的一种界面波。在两种介质中振动振幅均随离界面的距离增加而衰减，波能量集中在界面附近一、二个波长范围内。

【水波】处于平衡状态的水面某处受到扰动离开平衡位置，由于重力和表面张力等力的作用产生的波。它主要分为两类：波长不太长的表面张力波（涟波）和波长较长的重力波。重力波又分为深水波和浅水波：当水深大于半波长时，认为是深水波；水深小于 $1/4$ 波长时是浅水波。常见的水波有：风吹水面产生的涟波；投石于水中产生的波；越过海洋的潮汐波。水波特性的研究对于解释很多自然现象和对波动的深入了解都具有重要的实用和理论意义。例如，在对浅水重力波的研究得出，浅水波的波速与水深的平方根成正比，

所以随着海洋中的波浪向更浅的水中传播时,它们的波速减小,能量更集中于波峰附近,使波高增加直至破碎。在急剧倾斜的海滩,大波浪的破碎会产生很大的破坏作用,当打到障碍物上时,碎浪中被压缩的空气进入障碍物的裂缝中,会引起障碍物的大面积损坏。因而海堤要筑成光滑无缝隙的表面。

【分层媒质中的波】 分层模型媒质中传播的波。电磁波和包括声波在内的弹性波在其中传播的实际媒质(如大气、海水和地壳等)都有一个共同特点:它们的性质在水平方向上的变化比在铅直方向上的变化慢得多。于是可以把描述它们性质的各个参数近似地看成只是一个坐标(如铅直坐标 Z)的函数(通常称为剖面),并称具有这种特点的媒质为分层媒质,引进分层模型后,使某些波动传播问题大为简化。

【等离子体中的波】 以等离子体为媒质的波动现象。等离子体是由电子、正离子及原子或分子组成,正负电荷数近于相等,其特征是带电粒子间的相互作用以长程库仑力为主,它使媒质保持准电中性,并在其中形成各种集体运动。等离子体中的波就是其中粒子与自洽电磁场耦合在一起的各种运动模式。例如:低频波称为磁流体力学波,有沿磁力线传播的阿耳文波(横波)和声波(纵波)以及垂直于磁场传播的磁声波。频率较高时,阿耳文波分为快、慢波;频率更高时为电子回旋波和离子回旋波,可在相应回旋频率处发生共振。极高频时为普通电磁波。垂直于磁场传播的波有寻常波与非寻常波。寻常波的振荡电场平行于磁场,性质与无磁场时相同,只在频率高于等离子体振荡频率 ω_p 时才能传播 ($\omega_p = 56\sqrt{n_e}$ 弧度/秒。 n_e 为电子数密度 [m^{-3}])。非常波振荡电场垂直于磁场,性质

与磁场有关，有若干个共振与截断（折射率=0）频率，低频时为快阿耳文波，极高频时为普通电磁波。声波在频率较高时变为离子等离子体波；当频率高于 ω_p 时是电子等离子体波，当波长短于德拜长度 h [h (m) = 69 $(T_e/n_e)^{1/2}$, T_e 是电子温度 (K)] 时，波被强烈阻尼（朗道阻尼）。

研究等离子体中的波有重要意义。有很多现象涉及波在自然界等离子体中的传播问题。等离子体中的波动现象在实验室也有广泛的应用，例如在受控热核反应研究中，利用波进行诊断、预电离和加热、以及研究等离子体中的辐射现象、反常输运现象等。

【电磁波】 在空间以有限速度（光速）传播的电磁场的波。英国物理学家麦克斯韦于1864年在理论上预言存在电磁波，随后德国物理学家赫兹于1887年从实验加以证实。当电荷加速运动或振荡时，便产生电磁场，按麦克斯韦方程组，磁场变化能产生电场，电场变化也能产生磁场，变化的磁场和电场互为因果，在空间中不断产生，以波的形式向四周传播。电磁波是横波，它的电场和磁场矢量方向互相垂直，且均沿着与波传播方向垂直的方向振动。电磁波在真空中的传播速度约为每秒30万公里。无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线都是电磁波。不过它们产生的方式不尽相同，其波长（或频率）也不相同，如按波长（或频率）排列，它们就构成电磁波谱（见表）。

电磁波谱的波长分布表

	波长 (cm)	频率 (Hz)	光子能量 (eV)
宇宙线光子	3×10^{-22}	10^{32}	4×10^{17}

	波长 (cm)	频率 (Hz)	光子能量 (eV)
	3×10^{-20}	10^{30}	4×10^{15}
	3×10^{-18}	10^{28}	4×10^{13}
	3×10^{-16}	10^{26}	4×10^{11}
	3×10^{-14}	10^{24}	4×10^9
	3×10^{-12}	10^{22}	4×10^7
γ 射线	3×10^{-10}	10^{20}	4×10^5
X 射线	3×10^{-6}	10^{18}	4×10^3
紫外线~可 见光	3×10^{-5}	10^{16}	40
红外线	3×10^{-4}	10^{14}	0.4
微波	3×10^{-2}	10^{12}	4×10^{-3}
雷达	3	10^{10}	4×10^{-5}
超高频、甚高 频、调频波	300	10^8	4×10^{-7}
短波、无线 电、调幅波	3×10^4	10^6	4×10^{-9}
长波无线电	3×10^6	10^4	4×10^{-11}
	3×10^8	10^2	4×10^{-13}

【媒质中的平面电磁波】等相位面和等振幅面都是平面的电磁波。它在媒质中的传播特性与媒质的电磁性质有关。对于线性、均匀且各向同性的媒质、其电磁性质可用介电常数 ϵ 、电导率 σ 和磁导率 μ 三个参数来描述。通过求解麦克斯韦方程组，频率为 ω 的正弦定

态平面电磁波在这种媒质中的传播特性主要有：(1) 波沿传播方向按指数衰减，其衰减系数 $\alpha = \sqrt{(\omega\mu \sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2} - \omega^2\mu\epsilon) / 2}$ ，即波每传播单位距离其振幅降到原值的 $e^{-\alpha}$ 倍。(2) 有相位滞后现象，即波每传播单位距离，其相位较原值滞后一角度 β ， β 称为相位系数， $\beta = \sqrt{(\omega\mu \sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2} + \omega^2\mu\epsilon) / 2}$ 。(3) 它包含有两个相反方向的行波，具体解由边界条件确定。(4) 不论向哪个方向传播的波，其电场强度与磁场强度振幅之比为 $|z_\omega| = \sqrt{\omega\mu / \sqrt{\omega^2\epsilon^2 + \sigma^2}}$ ，电场强度超前于磁场强度的相位差 $\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ 。如果用幅值等于 $|z_\omega|$ ，幅角等于 φ 的复数 z_ω 来表示这一特性，则称 z_ω 为媒质的复数波阻抗。在有损媒质中，波的衰减是媒质的导电性造成其中的焦耳热损耗引起，随着波的传播，其振幅应逐渐减小；相位滞后是由于电磁波是以有限速度传播所造成。单位时间内等相面前进的距离为电磁波的相速值

$$v = \omega / \beta = 1 / \sqrt{(\mu \sqrt{\epsilon^2 + (\frac{\sigma}{\omega})^2} + \mu\epsilon) / 2}。$$

由此可见，只要 $\sigma \neq 0$ ，则 v 与频率 ω 有关，称为导电媒质的色散效应。在无损绝缘介质中， $\sigma = 0$ 。波以相速 $v = 1 / \sqrt{\mu\epsilon}$ 沿传播方向无衰减地传播。

在良导体中，只要频率不是极高，一般可以忽略位移电流，在 $\sigma \gg \omega\epsilon$ 时， $\alpha \approx \sqrt{\omega\mu\sigma / 2}$ 。波的幅值减弱到原值的 $1/e$ 时，波所传播的距离称为波在该导体中的贯穿深度 δ ，则 $\delta = 1 / \alpha = \sqrt{2 / (\omega\mu\sigma)}$ 。表面波的频率越高，贯穿深度越小。相位系数 $\beta \approx \alpha$ ，所以波长 $\lambda = 2$

$\sqrt{2}\pi/\sqrt{\omega\mu\sigma}$ 远短于空气中的波长。例如铜在3兆赫频率下波长只有0.242毫米，比在空气中小40万倍，波阻抗的值 $|Z_\omega| \cong \sqrt{\omega\mu/\sigma}$ 通常很小，因此良导体中虽然电场强度一般都较小，磁场强度却仍可能有较大的量值。另外磁场强度在相位上总是滞后于电场强度 $\pi/4$ 。良导体中电磁波的传播特性是对趋肤效应、邻近效应及电磁屏蔽进行分析和计算的基础。

一个有限波源所发出的波，在远处局部范围内，可以近似地被看成平面电磁波，另外，一般的波还可以看作是由许多平面波的叠加。因此对平面波的分析是研究电磁波性质及其传播规律的基础。

【平面电磁波的反射和折射】见“反射与折射”。

【电磁波在各向异性媒质中的传播】光学性质随光的传播方向而发生变化的媒质称为光学各向异性媒质。对于这种媒质，一般说来极化强度不再与电场强度同方向，磁化强度也未必与磁场强度同方向，所以已不能再用标量介电常数 ϵ 和磁导率 μ 来描述它们的电磁性质，而必须用张量来描述，这就导致电磁波（光波）在各向异性媒质中的传播与在各向同性媒质中的传播有显著的区别。例如，光线通过各向异性晶体方解石时会发生双折射现象。现代有许多学科和研究课题与各向异性媒质中波的传播特性有关。例如，光学中的晶体光学，等离子体物理学和电磁波传播学科中研究电磁波在磁化等离子体中的传播，在微波技术中研究并应用电磁波在磁化铁氧体中的传播等。

【光】通常指能引起人的视觉的电磁波，在真空中其波长范围大约

介于0.39—0.76微米之间。广义上说光包括各种波长的电磁波。已发现最长波长在 10^7 米左右，最短波长在 10^{-15} 米左右，在整个电磁波谱中，比较重要的是：无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线。除可见光外，都不能引起人的视觉，但可用仪器进行检测。光具有波粒二象性，即在一定条件下表现出波动性，而在另外的条件下表现出粒子性。

【 γ 射线】波长短于0.2纳米的电磁波。具有很强的穿透能力。1903年E. 卢瑟福证实它与 β 射线不同，并命名。 γ 射线常由放射性衰变中的受激原子核向基态跃迁而发射，也由某些亚原子粒子（如 π 粒子）衰变及粒子与反粒子湮灭而发射，这时 γ 光子的能量往往很大。原子核也可以吸收 γ 光子发生光致蜕变而射出粒子（如中子、 α 粒子），或发生光致分裂。高能 γ 光子在经过核附近时有可能会产生正负电子对。 γ 射线会被自由电子散射（康普顿效应）而丢失能量，或被原子吸收导致原子发射出电子（光电效应）。 γ 射线在医疗上可用于治疗肿瘤，在工业上用于对零件进行探伤。

【X射线】波长大约为 10^{-5} — 10^3 Å的电磁辐射，它的长波端与紫外线谱的短波重叠，短波端与 γ 射线谱重叠。W. 伦琴于1895年发现，由于当初不知其本质，故称为X射线。X射线有强穿透力，波长愈短，穿透力愈强。故称长波的X射线为软X射线，短波的X射线为硬X射线。X射线通常是在真空中由高电压加速的电子轰击厚实的靶材料而获得。当电子在原子近旁减速通过时，会发出连续的X射线，这就是轫致辐射。伴随轫致辐射的连续谱，还可以同时观察到分立的X射线谱线。这是由靶原子电子跃迁到内层空穴而发射的谱线，通常称为标识X射线。X射线能引起荧光和照相乳胶

感光。在医学中广泛应用 X 射线作人体的透视，在工业中用作零件探伤。

【紫外线】又称紫外光。波长范围在400—5纳米之间的电磁波。自然界中的主要紫外线光源是太阳。人工的紫外线光源有多种气体的电弧，例如高压汞弧、高压氙弧等。紫外线不能引起视觉，但照射在一些物质上能发荧光，或可见光。日常使用的日光灯就是利用紫外线照射在一些荧光粉上，使之发可见光。紫外线有杀菌作用。照射在人皮肤上，能使麦角甾醇变为维生素 D。但强紫外线对眼睛角膜和皮肤有伤害作用。波长短于200纳米的紫外线在空气中传播时损耗很大，只能在真空中传播，因此这一波段的紫外线称为真空紫外线。

【可见光】波长范围在4000—7000埃（ \AA ）之间的电磁波。它对人的眼睛能引起视觉。视觉灵敏度称为光视效能。人眼对不同波长的光有不同的光视效能，对绿光最灵敏。不同波长的可见光对眼睛引起不同的色觉，红色对应波长范围6470—7000 \AA ；橙色5850—6470 \AA ；黄色5750—5850 \AA ；绿色4912—5750 \AA ；蓝色4240—4912 \AA ；紫色4000—4240 \AA 。通常的可见光源有：太阳，白炽灯，气体放电管等。

【红外光】又称红外线。波长范围在7000埃（ \AA ）到几毫米之间的电磁波。太阳光及物体的热辐射中都包含红外线的连续谱。分子的振动与转动光谱通常处于红外光谱范围内。红外光不能引起视觉，但有显著的热效应，可借助温差电偶、光敏电阻、光电管等器件进行探测。因为一定波段的红外线能穿透雾以及夜间物体仍有热

辐，所以利用红外照相或其他检测方法可以观测到在大雾及夜间等特殊情况下用肉眼所观察不到的情景。

【反射定律】确定光（包括各种波）在反射现象中反射光线方向的定律。它是几何光学的基本定律之一。当光线在光学性质不同的两种媒质的平滑界面发生反射时，反射光线在入射光线和过入射点的法线所决定的平面内；入射光线和反射光线分居法线的两侧；并且反射光线与法线所夹的角（反射角）等于入射光线与法线所夹的角（入射角）。光的反射定律是从实验得出的，也可以从光的电磁理论推得。

【折射定律】确定光在折射现象中折射光线方向的定律。它是几何光学的基本定律之一。当光线在光学性质不同的两种媒质的平滑界面发生折射时，折射光线在入射光线和过入射点的法线所决定的平面内；折射光线和入射光线分居法线的两侧；并且入射光线和法线所夹角（入射角）的正弦与折射光线和法线所夹角（折射角）的正弦的比值，对给定的两种媒质来说是一个常数。该常数称第二媒质对第一媒质的相对折射率。

【折射率】表示透明物质折光性能的物理常数。它是表示两种媒质中光速比值的物理量。光在第一媒质中传播的相速度 v_1 与在第二媒质中传播的相速度 v_2 之比，称第二媒质对第一媒质的相对折射率，即 $v_1/v_2 = n_{21}$ 。任一媒质相对于真空的折射率称为此媒质的绝对折射率，简称“折射率”。某一媒质的绝对折射率，等于真空中的光速 c 与光在此媒质中传播的相速度 v 之比，即 $n = c/v$ 。两媒质的相对折射率，等于它们的绝对折射率之比，即 $n_{21} = n_2/n_1$ 。真空

的折射率为1,其他媒质的折射率均大于1。同一媒质对不同波长的光具有不同的折射率,称为色散。通常所说的某种媒质的折射率是对钠黄光(波长为5893埃)而言。媒质的折射率还与温度、压强有关。

【折射率测量】光线在折射率为 n 和 n' 的两种媒质光滑分界面上折射时所满足的折射定律: $n \sin i = n' \sin i'$ (i 和 i' 分别为入射角和折射角)是测量媒质折射率的基础。常用的折射率测量方法有偏向角法、自准直法、临界角法、V 棱镜法,以及干涉法等。

【费马原理】又称极端光程律或光学极短时间原理。法国数学家费马在1657年首先提出,光线在任何媒质中,由一点至另一点,沿所需时间为最短的路径传播。经后人修正为:光线从一点行进至另一点沿所需时间为极值(极大、极小或常量)的路径传播。它也可表述为:从空间中的一点 P_1 到另一点 P_2 的一条实际光线的光程,比连接这两点的任何其它曲线的光程都要短,条件是在此区域内的每一点有且仅有一条光线通过,光在此区域内不能发生折射,反射或弯曲而使两条以至更多条光线相交。费马原理的数学表达式是 $\delta L =$

$\delta \int_{P_1}^{P_2} n \cdot ds = 0$, 即光程 L 的一级变分等于零。从费马原理可直接推出光在均匀媒质中的直线传播定律,反射定律和折射定律也可由费马原理导出。一般而言,在折射率连续变化的非均匀媒质中,光线从一点到另一点的实际路程为遵循费马原理的曲线。

【实际光学系统】一个光学系统除了要考虑高斯光学的有关问题,

比如共轭物象的位置和大小、转象和转折光路等，还必须考虑实际能成象的范围、成象波段的宽窄、象的明亮程度和成象的清晰度等一系列问题。高斯光学只适用于光学系统的近轴区域，此外还假定了媒质的折射率不随光的波长而变化。这样，只有当光轴上或很靠近光轴的发光点用单色的元光束成象时，才会有完善的象。而在实际情况中，一方面实际的光学系统总有一定的通光孔径和一定的视场角，或者发光点不靠近光轴；另一方面由于成象光束多是由不同波长的光组成，系统的折射率不为常数，所以实际光学系统的成象相对于近轴成象存在象差。实际光学系统中的一个重要问题就是如何减小象差以提高象的清晰度。

【光的偏振】光的电矢量的振动方向不变，或电矢量末端在垂直于传播方向的平面上的轨迹呈椭圆或圆的现象。光的偏振是牛顿在1704—1706年间引入光学的。然而，更早就有人研究过偏振现象。例如，巴托林在1669年曾发现晶体中的双折射，惠更斯在1678—1690年间从理论上作了说明。光的偏振这一术语是马吕斯在1808年首先提出的，马吕斯、毕奥、菲涅耳、阿喇戈和布儒斯特等人对偏振的效应进行了广泛的研究。最后，麦克斯韦在1865—1873年间建立的光的电磁理论，才从本质上说明了偏振现象。光波是横电磁波，即光波的电矢量和磁矢量都垂直于光波的传播方向。在与传播方向垂直的二维空间里电矢量有各种各样的振动状态，这些状态称为光的偏振状态。

【偏振光】电矢量相对于传播方向以一固定方式振动的光。电磁波的理论及实验证明，光是一种横波，即电场及磁场的振动方向垂直于光的传播方向。按电矢量末端在光的传播过程中形成的轨迹，

偏振光主要分为线偏振光（又称平面偏振光）和椭圆偏振光（包括圆偏振光）。与偏振光截然不同的是非偏振光。非偏振光也称自然光，可以认为它是沿同一方向传播的两束光的叠加，这两束光偏振方向不同，且位相差作无规则的变化。这种无规则性决定了光矢量在垂直于光线的各方向上取向的几率是相等的。

【线偏振光】 又称平面偏振光或完全偏振光。光在传播过程中，其电矢量振动（在垂直于光波前进方向的平面内）限于某一固定方向的偏振光。电矢量的振动面称为偏振面。在早期的书籍中，曾规定偏振面垂直于振动面，现在基本上把振动面和偏振面等同起来。实验和理论都已证明，由一个偶极子振动所产生的光是线偏振光，并且偶极子在振动面内。绝大多数光源都不发射线偏振光而发射自然光，需要采取某些措施才能获得线偏振光，常用的方法有：光在透明媒质界面上的折射和反射，通过双折射晶体，通过双色性晶体等。

【椭圆偏振光】 在传播过程中，电矢量的端点在垂直于传播方向的平面描绘出的轨迹为一椭圆的偏振光。对着光的传播方向看，电矢量按逆时针方向转动的椭圆偏振光称为左旋椭圆偏振光；电矢量按顺时针方向转动的椭圆偏振光称为右旋椭圆偏振光。近代也有人采用另一种定义：当电矢量旋转方向与光前进方向组成右手螺旋关系时，称为右旋光；反之则称为左旋光。椭圆偏振光可以看成是两个互相垂直的线偏振光的合成，其电矢量的表达式为：

$$\vec{E} = A_x \cos \omega t \vec{i} + A_y \cos (\omega t + \delta) \vec{j}$$
，式中 \vec{i} 、 \vec{j} 是沿 x 、 y 轴的单位矢量。椭圆长、短轴的大小和取向与振幅 A_x 、 A_y 和位相差 δ 都有关。

【圆偏振光】在传播过程中,电矢量的端点在垂直于传播方向的平面描绘出的轨迹为一个圆的偏振光。圆偏振光是椭圆偏振光的一种特殊情况。对着光的传播方向看,电矢量按逆时针方向转动的圆偏振光称为左旋圆偏振光;电矢量按顺时针方向转动的圆偏振光称为右旋圆偏振光。圆偏振光可看成是两个振幅相等、位相差 $\frac{\pi}{2}$ 的相互垂直的线偏振光的合成,其电矢量的表达式为:
$$\vec{E} = A \cos \omega t \vec{i} + A \cos \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) \vec{j},$$
式中 \vec{i} 、 \vec{j} 是沿 x 、 y 轴的单位矢量。

【偏振光的干涉】有相同的频率和固定的位相差,并且在同一平面振动的两偏振光的干涉。阿喇戈和菲涅耳利用杨氏装置进行的实验表明:两束位相差恒定的平面偏振光叠加时,如果振动面互相垂直,则形成椭圆偏振光;如果振动面平行,则出现干涉现象。偏振光的干涉现象可以分为平行的平面偏振光的干涉和会聚的平面偏振光的干涉两类。

【旋光性】又称光活性。线偏振光沿晶体光轴方向传播时,其振动面发生旋转的性质。能引起线偏振光的振动面发生旋转的媒质称为旋光媒质。阿喇戈于1811年发现了晶体的这种性质。以后毕奥等人发现,许多有机液体和有机物溶液也具有旋光现象。此外,偏振光振动面的旋转还具有方向性。对着光的传播方向看,能使振动面按顺时针方向转动的媒质称为右旋媒质;使振动面按逆时针方向转动的媒质称为左旋媒质。一般地说,同一种旋光媒质具有两种互为镜像的结构形态,一种为左旋,一种为右旋。这种由物质结构决定的旋光性称为天然旋光性。实验表明,旋光性晶体对于某一单色

线偏振光所生的振动面旋转的角度 $\Delta\varphi$ 正比于光经过的物质层厚度 l , 即 $\Delta\varphi = \alpha l$ 。对于有旋光性的溶液, $\Delta\varphi$ 还与溶液浓度 c 成正比, 即 $\Delta\varphi = \alpha lc$ 。比例系数 α 称为媒质的旋光率, 亦称旋光本领。对某一媒质来说, α 与光波长、媒质温度等有关。旋光率随光波长而变的现象称为旋光色散。菲涅耳根据力学中的原理, 提出了旋光理论用来解释晶体的旋光现象。他假定: 沿晶体光轴传播的线偏振光系由两个沿相反方向旋转的、等频率的圆偏振光组成的。在旋光晶体中, 这两个圆振动有不同的传播速度。在右旋晶体中, 顺时针方向旋转的圆偏振光的传播速度较快; 而在左旋晶体中, 逆时针方向旋转的圆偏振光传播速度较快。设 v_L 和 v_R 分别代表左旋和右旋圆偏振光在晶体内的传播速度, n_L 和 n_R 为相应的折射率。左旋晶体 $v_L > v_R$ ($n_L < n_R$), 右旋晶体 $v_R > v_L$ ($n_R < n_L$)。组成线偏振光的右旋和左旋圆偏振光, 沿光轴传播一段距离 l 后, 合成的线偏振光的振动面相对于入射时就转过一个角度 $\Delta\varphi = (\pi l / \lambda) (n_L - n_R)$, λ 表示真空中的光波长。 $\Delta\varphi > 0$ 为右旋, $\Delta\varphi < 0$ 为左旋。折射率 n_L 、 n_R 与光的波长有关。菲涅耳通过实验证实了自己的旋光理论。从物质的分子结构上看, 晶体的旋光性既可来源于分子排列的不对称性(无对称中心), 也可来源于分子本身的不对称性。

【法拉第效应】 又称磁致旋光。在处于磁场中的均匀各向同性(非旋光性)媒质内, 线偏振光束沿磁场方向传播时, 振动面发生旋转的现象。法拉第于1845年发现在强磁场中的玻璃产生这种效应, 以后发现其它非旋光性的固、液、气态物质都有这种效应。实验表明线偏振光振动面旋转的角度 $\Delta\varphi$ 与磁感应强度 B , 以及光在媒质中通过的距离 l 成正比, 即 $\Delta\varphi = vBl$, v 称为费尔德常数, 它与媒质的性质、温度以及光的波长有关, 与磁场强度无关。磁致旋光的

方向与磁场方向有关，而与光的传播方向无关，这是磁致旋光与天然旋光的区别。若振动面的转向与磁场方向成右手螺旋关系，该物质叫正旋体，否则叫负旋体。

【泡克尔斯效应】某些晶体的双折射与外加电场强度成正比的电光效应。在强电场的作用下，本来是各向同性的介质也可以产生双折射现象；而本来有双折射性质的晶体，其双折射性质也要发生变化，这就是电光效应。德国物理学家 F. 泡克尔斯于1893年首先发现压电晶体的两个主折射率之差正比于外加电场强度 E ，即 $n_e - n_o = \gamma E$ ， γ 为比例常数。泡克尔斯效应只存在于没有对称中心的晶体中。泡克尔斯盒有两类：一类是在压电晶体的两侧面上蒸涂一对介质膜作为电极，使光的传播方向与外电场方向垂直，称为横向调制泡克尔斯盒；另一类是在压电晶体的两端面上蒸涂透明介质膜作为电极，使光的传播方向沿着外电场方向，称为纵向调制泡克尔斯盒。把泡克尔斯盒放置在一对透振方向正交的偏振器之间，就构成了电光开关。对于纵向调制来说，从 KDP 等常用晶体透出的寻常光（o 光）和异常光（e 光）之间的位相差为 $\delta = 2\pi n_o^3 \gamma_{63} v / \lambda_0$ ， γ_{63} 为晶体电光常数， λ_0 是真空中光波波长， v 为两电极间电位差。使泡克尔斯盒相当于半波片时所需的电压称为半波电压，其值为 $V_{\frac{\lambda}{2}} = \lambda_0 / 2n_o^3 \gamma_{63}$ 。

【应力双折射】又称光弹性效应。透明的各向同性的介质在压力或张力的作用下，折射率特性会发生改变，从而显示出光学上的各向异性。若介质本来就是各向异性晶体，则外力作用会使它产生一个附加的双折射。塞贝克在1813年和布儒斯特在1816年最早研究这一现象。对物体施以压力或张力，它就显示出负单轴晶体或正单

轴晶体的特性，有效光轴在应力方向上，并且所引起的双折射与应力成正比。若应力在晶体上是不均匀的，在各处的双折射就不一致，使通过它的光波上不同点产生不同的位相差。利用应力双折射效应，可以检验光学材料的内应力，观察各种力学结构的应力分布。

【光的干涉】两束（或多束）光波在空间叠加后，产生的光强分布与原来两束（或多束）光的强度之和不同，而出现明暗相间的现象。由于衍射也会造成明暗相间的条纹，因此当若干束光波在空间某一区域相遇而发生干涉时，应该是指在该区域中可以不考虑每束光波的衍射。另外，合成波场的光强分布在一段时间间隔 Δt 内应该是稳定的，这就是说光强并不是光场强度的瞬时值，而是在 Δt 内光场强度的平均值或积分值。为产生光的干涉现象，相遇的光波必须满足某些条件，称之为相干条件，满足相干条件的光称为相干光。以双波干涉为例，相干条件可以表述为：（1）两束光波的频率（因而波长）相同；（2）在叠加点两波有相同的振动方向，否则在该点的合成振动将不是简谐振动，因而不是产生干涉现象；（3）在叠加点两束光波有固定的位相差，否则由于位相差随时间作无规则且迅速变化引起的光强改变次数在测量所需的时间间隔内几乎是无限大，在叠加点只能获得平均光强度；（4）两光波在叠加点所产生的振动的振幅相差不悬殊，否则该点的合成振动的振幅与单一光波的振幅无实际差别，观察不到干涉现象；（5）两光波在叠加点的光程差不能太大，如果大于实际光波的相干长度，则无干涉现象。尽管干涉现象是多种多样的，但为满足相干条件，通常把同一光源发出的光分成两个或两个以上的相干光束，使它们各经过不同的路径后再相遇以产生干涉。产生相干光的方式有

两种：分波面法和分振幅法。

【杨氏干涉实验】分波面法双光束干涉实验之一。英国物理学家 T. 杨于1802年首先从实验上研究了光的干涉现象，其中较早期的是双孔干涉实验。这个实验方法是：用强光照明针孔 S，以它作为点光源送出球面波，射到距 S 为一定距离放置的屏 A 上。A 上有两个针孔 S_1 和 S_2 相互靠得很近，并且与 S 等距离，因而它们就成为两个同相的次级单色点光源，从它们出来的光束在远离屏 A 的区域叠加在一起，形成干涉图样。后来发现以狭缝代替针孔可得同样清晰的，但却明亮得多的干涉条纹，这样便有了以柱面波阵面代替球面波阵面的双缝干涉实验，这是杨氏干涉实验中最著名的实验。理论计算表明：由点光源 S_1 和 S_2 发出的光波在观察上任一点所产生的合成光强为 $I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$ ，其中 δ 为 S_1 和 S_2 发出的光波在观察点的位相差。两光波在观察屏上的不同点有不同的位相差，所以屏上各点的光强度会发生连续变化。在 $\delta = 2k\pi$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 的地方，光强度最大。而在 $\delta = (2m+1)\pi$ ($m = 0, \pm 1, \dots$) 处，光强为零。

【等倾干涉条纹】一种应用分振幅方法产生的干涉现象。平行平板在扩展单色光源照明下于无限远处（透镜的焦平面上）所产生的干涉条纹，这种干涉条纹是由有相同入射角的光形成的。平板可理解为受两个表面限制而成的一层透明物质，可以是玻璃板或云母片，也可以是空气薄板。这种干涉条纹首先为 W. K. 海丁格尔偶然发现，后来玛斯卡尔和陆末各自独立地对它进行深入研究。当单色扩展光源照射到折射率 n 和厚度 d 均为常数的平行平板上

时, 光的平行平面板的前后两表面发生反射, 可以证明两反射光的光程差 Δ 只决定于光在板面上的入射角 i , 即: $\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$, 式中 α 为折射角, 它由入射角 i 决定。因此倾角相同的光, 由平行平面板所产生的光程差也相同。等倾干涉图样只呈现在会聚相干平行光的透镜的焦面上, 不用透镜时, 干涉图样在无穷远。等倾干涉条纹的形状决定于具有相同入射角的光线在垂直于观察方向的平面上的交点轨迹, 一般在透镜焦面所得的干涉图样为一组共心环状条纹或一组共心弧状条纹。

【等厚干涉条纹】定域在楔形板附近, 与板的等厚度线一致的干涉条纹。它是一种利用分振幅方法产生的干涉现象。当所研究的是折射率 n 均匀而夹角 α 又很小的楔形薄板时, 如果光源距板较远或观察干涉条纹用的仪器的孔径很小, 以致于在整个视场内光线的入射角可视为不变的常数, 则板的上、下两表面反射光在相遇点的位相差可近似为 $\Delta = 2nd\cos i'$, 式中 d 为产生反射光的板厚度, i' 为折射角。若考虑到“半波损失”则 $\Delta = 2nd\cos i' + \lambda/2$, λ 为光波长。由此可见, 板上厚度相同的地方对反射光引起的光程差相同, 因此同一干涉条纹是由板上厚度相同的地方引起的反射光形成的。当楔形板很薄时, 只要光在板面上的入射角不大, 可以认为干涉条纹定域在板的表面, 一般薄膜的干涉就是这种情形。等厚干涉条纹的形状决定于薄板上厚度相同的地方的轨迹。

【白光条纹】白光(或可见光)的干涉条纹。白光的有效波长范围从大约4000埃伸展到大约7000埃, 且各种波长的光有一定组成比例。只有当对可见光区所有波长光的光程差等于零或数倍于波长时, 才能观察到白光的干涉条纹。在杨氏干涉实验中, 用白光照射

狭缝时，在零级条纹位置上有一个白色的中央条纹，两侧对称排列几个彩色的极大和极小，再往外是均匀的白色照明。白色条纹之所以具有这样的特点，是因为所有波长光的零级干涉条纹都重合在一起，而同一波长的相邻条纹的间隔又与波长成正比。因此随着干涉级次的升高，不同波长的干涉条纹发生越来越多的重叠。在屏上的每一点，对某些波长是亮条纹，对另一些波长则为暗条纹，所以看不出干涉条纹。

【牛顿环】一种等厚干涉条纹。牛顿于1675年观察到这种干涉条纹。他把一曲率半径很大的平凸透镜的凸面放在一块平板玻璃上，在两者之间形成以接触点为中心厚度逐渐增大的空气膜，膜上等厚度点的轨迹是一组以接触点为中心的同心圆。当平行单色光垂直照射时，在空气膜的上表面形成一组以接触点为中心的明暗相间的圆环干涉条纹，中央较疏而边缘较密。反射光牛顿环中心是一暗点，透射光中心是一个亮点。常用牛顿环测量透镜的曲率半径或光波的波长。

【光的衍射】光在传播过程中遇到障碍物时发生的偏离几何光学传播规律的现象。光的衍射也称作光的绕射，就是光可以“绕过”某些障碍物而在某种程度上传播到障碍物的几何阴影区。同时，衍射也使得几何照明区内出现某些暗斑或暗纹。换句话说，衍射使得几何影界失去明显的边界，且使得光强进行重新分布。达·芬奇的著作里第一次提到衍射现象，意大利科学家格里马尔迪首先给以精确描述。1818年，法国物理学家 A. J. 菲涅耳应用惠更斯作图并结合干涉原理，解释了衍射现象。后来由基尔霍夫给以完善的数学基础。按照惠更斯—菲涅耳原理，光波振面上的每一点可以认为是产

生球面子波的一个次级扰动中心，而以后任何时刻的波阵面则可看作是这些子波的包络。这些次级子波可以相互干涉，从而产生衍射现象。衍射也可以看作是障碍物改变了波前的复振幅，这种障碍物称为衍射屏。对于衍射系统，重点研究的是衍射屏前后的光场分布和接收屏上的光场分布。按照光源、衍射屏和观察屏三者之间距离的大小，衍射通常分为菲涅耳衍射和夫琅和费衍射，前者是光源和观察屏或二者之一到衍射屏的距离比较小的情况，后者是光源和观察屏都离衍射屏为无限远处的情况。

【巴俾涅原理】在光的衍射中，结构互补的一对衍射屏形成的衍射场中复振幅之和，等于自由传播时光场的复振幅。巴俾涅原理给出两个互补屏产生的衍射场之间的关系称为巴俾涅关系。如果一对衍射屏，屏1的透光部分正是屏2的遮光部分，这样的两个屏称为互补屏。根据菲涅耳—基尔霍夫衍射公式，设屏1的孔 Σ_1 造成的衍射场为 $\tilde{u}_1(P)$ ，屏2的孔 Σ_2 造成的衍射场为 $\tilde{u}_2(P)$ ，而光波通行无阻 Σ_0 面的光场为 $\tilde{u}_0(P)$ ，由 $\Sigma_1 + \Sigma_2 = \Sigma_0$ 可以得出 $\tilde{u}_1(P) + \tilde{u}_2(P) = \tilde{u}_0(P)$ 。只要两个互补屏的照明条件不变，对衍射场任一点，巴俾涅关系都是成立的。由于自由光场通常是已知的或易于计算的，利用巴俾涅原理可以较方便地由一种衍射屏的衍射图样求出其互补屏的衍射图样。巴俾涅原理给出的三场之关系是复振幅关系而不是光强关系，不能认为某个屏的衍射场在某处是亮的，则其互补屏的衍射场在该处一定是暗的。

【波带片】一种特殊的衍射屏。它由透明和不透明圆环交替组成，用以阻挡菲涅耳半波带中的奇数带或偶数带。在菲涅耳半波带中，相邻两带的对应点到其象点的距离相差 $\lambda/2$ ，产生的振动相差为半

个周期。因此，半波带的相邻两带引起的振动位相相反，奇数的带和偶数的带对象点振动的贡献互相削弱。当只有奇数带或只有偶数带时，在象点的合振幅将比整个波阵面产生的合振幅大许多。所以在点光源照明下，经波带片能得到亮度很高的象点。波带片有透镜作用，其聚光规律与透镜的成象规律类似，即 $\frac{1}{R} + \frac{1}{r} = \frac{1}{f} = \frac{R\lambda}{\rho_k^2}$ 。式中 R 、 r 分别是点光源和观察点到波带片的距离， ρ_k 是第 k 个带的半径。对给定的物点，波带片有多个焦距，而形成多个象点。

【夫琅和费衍射】光源和所考察的点到衍射屏的距离都是无限远或相当于无限远的情况下发生的衍射现象。夫琅和费衍射又称远场衍射。1821年德国物理学家夫琅和费首先发表了平行光单缝衍射的研究结果。此外，还有夫琅和费矩孔衍射和夫琅和费圆孔衍射。夫琅和费衍射可以认为是菲涅耳衍射的一个特例，由于它的计算要简单得多，因此单独归成一类进行研究。

【分辨本领】光学系统分辨细微结构的能力。通常又分为光学系统的象分辨本领和色分辨本领两类。从几何光学观点来看，一个无象差的理想光学系统的分辨本领是无限的。但实际上由于衍射效应的存在，即使理想光学系统的分辨本领也是有限的。一个物点发出的光波形成的不是一个象点，而是有一定强度分布的光斑，即爱里斑。物面上相距很近的两个分离的物点，在象面上就可能形成相互重叠的两个衍射图样。通常采用瑞利判据给出两个物点刚好可以分辨的条件，即：一个物点衍射图样的中心极大与另一个物点衍射图样的第一极小重合。一般光学仪器的象分辨本领都是以瑞利判据为基础的。“色散型”分光仪器的色分辨本领 R 定义为：波

长 λ 与在该波长附近能被分辨的最小波长间隔 $\delta\lambda$ 的比值, 即 $R = \lambda/\delta\lambda$ 。对于棱镜光谱仪, $R = b \cdot dn/d\lambda$, 其中 b 为棱镜底边的有效长度, $dn/d\lambda$ 为棱镜材料的色散率。光栅光谱仪的分辨本领 $R = kN = D\sin\theta/\lambda$, 式中 R 为光栅光谱的级次, N 为光栅狭缝总数, D 为光栅有效尺寸, θ 为谱线衍射角。

【光的散射】光在非均匀光学媒质中传播时, 因与媒质中分子或原子作用而发生强度分布、偏振状态及频率变化的现象。在均匀媒质中, 光只能沿着折射光线的方向前进, 光朝各方向散射是不可能的。为了能散射光, 必须有能够破坏次波干涉的不均匀结构。在各向异性媒质中, 密度起伏和各向异性起伏均能引起光的散射。散射光波长与入射光相同时, 称瑞利散射, 它满足瑞利定律: 任一方向的散射光强与波长的四次方成反比。散射媒质中存在声波引起媒质密度的涨落, 从而造成光的散射, 称为布里渊散射。散射光发生很小的频率移动, 且频移与散射角有关。散射光频率与分子中原子振动频率有关的散射称为喇曼散射或联合散射, 散射光中除了有与入射光同频的瑞利线外, 两侧还对称分布有频率减小的斯托克斯线和频率加大的反斯托克斯线。晶体中晶格的振动也会产生喇曼散射。

【光的色散】媒质中光的相速度或折射率随光的频率或波长而变化的现象。实验表明, 不同的媒质, 其折射率与光波长的函数关系是不同的。通常用色散率(也称色散本领)来表征媒质折射率随光波长变化的快慢程度, 它定义为

$$v = dn/d\lambda,$$

牛顿在1672年用棱镜形成白光的光谱开始研究光的色散现象。根

据折射率 n 和波长 λ 关系的色散曲线，可以分成正常色散和反常色散两类。前者是指媒质的折射率和色散率随波长变短而增加，后者是指媒质的折射率随波长变短而变小。光的色散实际上是媒质中的原子或分子那样的复杂系统，与电磁波的相互作用。洛伦兹从原子和分子的观点，提出色散的经典电子理论，说明了电磁波的频率对折射率 n 的影响。用量子理论讨论色散现象所得结果与经典理论结果基本一致。从广义上说，色散不仅指光波分解成频谱，只要物理量随波长而变就称为色散。

原 子 核

【原子核】原子的核心。集中了原子的主要质量，直径为 10^{-12} — 10^{-13} cm 量级。核中均匀地分布着质子和中子，统称为核子。核子的能级也是量子化的，它们之间由短程的核力相互联系着。1919年，卢瑟福第一次用 α 粒子轰击氮核使其发生分裂，并且证明有氢核发射出来，即质子。1932年查德威克发现了中子。中子是中性的，其质量近似等于质子的质量。目前，人们已确认，原子核是由若干个质子和中子组成的。这样原子核成了原子的深层微观中心，质子和中子又是核的深层微粒。轻原子核可以聚变成重原子核，这叫聚变反应，重原子核又可以分裂成轻原子核，这叫裂变反应。原子核分为稳定核和放射性核，放射性核可以放出 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线、质子和中子。 α 衰变、 β 衰变和质子衰变后，原子核的电荷就发生了变化，它将改变原子序数，即变成另一种原子核，而 γ 辐射

和中子衰变的电荷数不变,只改变了核的能级。核中的质子可以放出正电子和中微子变成中子,中子也可以放出电子和中微子变成质子。自由的质子是稳定的,它的寿命可大于 10^{31} 年。自由中子不那么稳定。中子、质子和 α 粒子都可以与核产生核反应,这对研究核作用力和核结构是重要的手段,只因对原子核有了深刻的了解,才能研制出核电站和受控热核反应装置,一旦受控热核反应研究成功,人类将不会再焦虑能源问题,因大海中有取不尽的重水,它们是聚核反应的最好燃料。现在人类已进入了核技术的和平利用时代,如质子、中子、电子治癌, X—CT, 正电子—CT 和核磁共振—CT 检查人体各重要器官的疑难怪病, 同位素示踪在工业、农业、医疗等各方面的应用等。核物理已应用到人类社会的多种领域。

【原子核的电荷】1911年卢瑟福用一束 α 射线轰击金属薄膜,发现有大角度的 α 粒子散射,并在此基础上提出了行星式原子结构模型:原子中存在一个带正电的核心,即原子核。原子是电中性的,核带有的正电荷等于核外电子的总负电荷。对原子序数为 Z 的原子,核带正电 Ze 。核的电荷数是一个严格的整数,它等于核内的质子数。质子带正电 e ,与电子的电量相等。

【原子核的质量】用质谱仪研究原子质量的结果表明,每种核素的质量均近似等于质子质量的整数倍。该整数被称为质量数 A 。1961年国际理论及应用化学协会决定采用 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 作为核质量的单位(u),它的绝对值为:

$1\text{ u} = 1.660566 \times 10^{-24}\text{ 克} = 931.5016 \pm 0.0026\text{ MeV}/c^2$ 。核内的中子数为 $A-Z$ 。

具有相同质子数 Z 和中子数 $A-Z$ 的一类原子核称为同一种核素。质子数相同,中子数不同的核素称为同位素。中子数相同,质子数不同的核素称为同中子素。质量数相同,质子数不同的核素称为同量异位素。质量数和质子数均相同,但能量状态不同的核素称为同质异能素。

【核力】使核子与核子组成原子核的强相互作用力。核力作用距离很短,约为费米量级 ($1\text{f 米}=10^{-13}\text{厘米}$),即核力是短程力。当两核子距离 $r=1-2\text{f 米}$ 时,核力是吸引力,比质子间的库仑力强得多,足以克服库仑排斥力的作用使核子结合在一起。在 $r<1\text{f 米}$ 时,核力为强排斥力,使核子不能无限靠近;在 $r>10\text{f 米}$ 时,核力可以忽略。核力具有饱和性,即原子核中每一核子通常仅和邻近的少数核子发生较强的吸引作用,核力还具有交换性,即当两核子相互作用时,它们可以交换自旋或电荷。实验发现氘核具有正的电四极矩,说明氘核的电荷分布是长椭球形,即核力含有非中心力的成分,核力还近似具有电荷无关性,即当两核子处于相同的自旋和宇称态时,质子与质子,中子与质子,中子与中子之间的核作用势相同,与核子所带电荷无关。目前对于核力的研究还不完全,通常采用两种途径,一方面用唯象的方法,对氘核和核子—核子散射等进行实验研究和理论分析,以了解核力的性质和可能的形式,另一方面还可以用量子场论的方法解释核力的本性。

【原子核的半径】通常在 $10^{-12}-10^{-13}\text{cm}$ 数量级,无法直接测量。通常是根据核与其它粒子的相互作用来间接测量。尽管方法不同,但是所有的结果都定性的一致,而且在一定程度上也定量的一致。

【核力作用半径】 α 粒子，中子及质子与核的散射，主要的作用力是核力。核力是一种很强的短程力。历史上卢瑟福和查德威克首先测量了核的大小，他们测定了 α 粒子在核上的散射截面与纯库仑作用算得的散射截面开始有偏离时的散射角。相应这个角，对应一个碰撞时能接近核的最小距离。此时核力作用已很显著。在这些实验的基础上，卢瑟福总结出轻元素的核半径可表示为：

$$R = r_0 A^{1/3},$$

这里 $r_0 = 1.2 \times 10^{-13} \text{cm}$ 。

【电荷分布半径】 即核内的质子分布半径。电子散射，谱线的同位素移动，核质量公式中的静电相互作用项等都可用以测量核的电荷分布半径。这些方法只涉及到电的相互作用。使用高能电子可以用来进行核结构研究测量德布罗意波长。实验的结果表明核半径为 $R = 1.1 \times A^{1/3} \times 10^{-13} \text{cm}$

核半径正比于 $A^{1/3}$ ，即核体积近似地与 A 成正比。 $R = r_0 A^{1/3}$ 。除了最轻的核，常数 r_0 均在 $(1.2 - 1.5) \times 10^{-13} \text{cm}$ 内。

【原子核的自旋】 中子和质子在核内不停地运动，它们的自旋和轨道角动量一起形成了原子核的自旋。通过原子光谱的超精细结构研究可以测得原子核的自旋。超精细结构是由于核的自旋与核外电子的总角动量相互作用的结果。核自旋的影响较小，这种能级分裂的情形也较小。设核自旋为 I ，能级分裂数为 N ，则有 $N = (2I + 1)$ 。测量结果表明：

(1) 偶 A 核的自旋为整数。偶偶核自旋为 0。

(2) 奇 A 核的自旋为半整数。中子和质子的自旋均为 $\frac{1}{2}$ 。

【原子核的磁矩】原子核是个带电系统，而且具有自旋，因而应该具有磁矩。核的磁矩定义如下： $\vec{\mu}_I = g_I \mu_N \vec{P}_I$

其中 $\vec{\mu}_I$ 为核的磁矩， \vec{P}_I 为核的自旋。 g_I 称为核的回磁比。 $\mu_N = \frac{e}{2m_N c}$ ，称为核磁子。 g_I 通常由实验测定。

对质子和中子而言， g_p 和 g_n 均不是2。它们都具有反常磁矩，实验测得

$$g_p = 5.586, \quad g_n = -3.826。$$

【原子核的电四极矩】大多数的原子核的形状是偏离于球形不大的轴对称椭圆，这意味着原子核具有电多极结构。核的形状决定着电四极矩的大小。实验上可以测得电四极矩，由此可以推知原子核偏离球形的程度。

【核统计学】根据量子力学原理，全同粒子系统的波函数是交换对称的或是交换反对称的。费米子服从交换反对称，玻色子服从交换对称。一个粒子是费米子或是玻色子，完全由它们的自旋所决定。玻色子具有整数自旋，费米子具有半整数的自旋。自旋与统计学之间的惊人联系具有深刻的理论道理。泡利于1940年最后阐明了这个道理（泡利不相容原理）。实验证明，偶 A 核具整数自旋是玻色子，奇 A 核具半整数自旋，是费米子。这些规则对由质子和中子建立的核模型十分重要。

【核子的同位旋】实验发现，核子之间的相互作用与核子的电荷无关，这导致了一个新的守恒量子数——同位旋的引入。在没有电磁作用时，质子与中子的质量相同。电磁作用导致了它们质量的差

异。引入同位旋后，把中子和质子当作同一种粒子（核子 N）的两种状态来处理。在同位旋空间（电荷空间）中，核子的同位旋 I 为 $\frac{1}{2}$ ，其第三分量 I_3 与核子电荷的关系为 $q=e(I_3+\frac{1}{2})$ 。因此，对质子 $I_3=\frac{1}{2}$ ，对中子 $I_3=-\frac{1}{2}$ 。

【原子核的同位旋】对每一种核素而言，如只存在强作用，同位旋 I 是个好量子数，其第三分量 $I_3=\frac{1}{2}(Z-N)$ ，式中 Z 为质子数，N 为 neutron 数。原子核的每个态均可用一个 I 值来表征。这些态是 $(2I+1)$ 重简并的。电磁作用使得简并被破坏。实际上，当电磁作用较小时，同一 I 值的各个亚稳态仍能用上述的方式来描述原子核的行为，这样的态称为同位旋相似态，它们是 1961 年发现的。一个同位旋多重态除 I_3 和 q 外其他量子数均相同。同位旋多重态的两项〔同量异位素 $(A, Z+1)$ 和 (A, Z) 〕之间的能量差为 $\Delta E=E(A, Z+1)-E(A, Z)\approx\Delta E_{\text{库仑}}-(m_n-m_p)c^2$

$$\Delta E_{\text{库仑}}\approx\frac{6e^2}{5R}Z$$

式中， m_n ， m_p 分别为中子和质子的质量，R 为原子核的半径。

【原子核的宇称】宇称是物体和它的镜像之间的对称性。在电磁作用和强作用时宇称是守恒的。习惯上，人们规定核子的内禀宇称为正。一个含有若干个粒子的系统的总宇称为

$$\pi=\prod_{i=1}^n\pi_i(-1)^l$$

式中 π_i 为每个粒子的内禀宇称， l 为系统的总角动量。对原子核，每个核子的内禀宇称均为正，故核的宇称为 $(-1)^l$ 。

【核子-核子相互作用】即核力，属强相互作用。强作用与电磁作用和弱作用的强度之比如下：

$$\text{强作用/电磁作用/弱作用} = 1/10^{-2}/10^{-12}$$

由此可见核力的强度很大。实验证明，核力主要是吸引力，核力的力程很短〔只有几个费米（ 10^{-13}cm ）〕，核力具有饱和性，核力与电荷无关，核力依赖于核子的自旋取向，核力中含有非中心力成分，核力中存在交换力和自旋轨道耦合力。

核力十分复杂，目前人们还不能用一个数学式子来完整地描述核力的行为。

【核力的介子理论】汤川于1934年为解释核力而引入一个重玻色子（介子），并指出，强作用点源的势为 $\varphi(r) = -g \frac{e^{-kr}}{r}$ ，式中 $k = \frac{mc}{\hbar}$ 为场量子康普顿波长的倒数。场量子的质量决定了势的范围。汤川理论解释了强作用力的短程性，并预言了介子的存在。这为以后的实验所证实。汤川的理论后来得到发展，认为核子被介子场包围，核子之间的作用就是介子的发射与吸收，即核子通过交换介子而发生作用。当交换一个赝标介子，产生的主要是交换力和张量力，即核力的长程部分；交换标量介子，主要产生中心力和自旋轨道耦合力，即核力的中程吸引力；交换一个矢量介子，主要产生核心附近的排斥蕊。

【核结构模型】目前人们对核结构和核力的行为了解的很不够，同时在数学上尚无法解出核的薛定谔方程。一些不同精度的模拟核行为的模型和一些经验参数被引入。这些模型一般分为独立核子

模型 (IPM) 和强相互作用 (SIM) 模型。在 IPM 中取最低级近似时, 就假定核子在一个共同的原子核位势中几乎独立地运动。在 SIM 中, 核子互相强烈地耦合起来。IPM 包括费米气体模型和壳层模型。SIM 包括液滴模型和集体模型。统一模型把壳层模型和集体模型的特点结合起来: 假定核子几乎独立地在一个共同的、缓慢变化的非球对称位势中运动, 并考虑单个核子和整个原子核的激发。尽管有些模型很成功, 但这些模型在引入时都包含了核力的已知性质。要使原子核理论尽善尽美, 还有许多工作要做。

【原子核的结合能】原子核的质量比组成它的各个自由核子的总质量要小。自由核子组成原子核时将会释放出能量。这部分能量称为原子核的结合能。原子核平均每个核子的结合能称为比结合能。比结合能曲线的一些特点:

(1) 对大多数稳定核, 比结合能近似为一常数约为 $8\text{—}9\text{MeV}$, 这种不变性是核力饱和性的另一种表示。

(2) 比结合能在铁 ($A=60$) 附近达到最大值。 A 增加时, 它缓慢下降; A 减小时, 它就较陡地下降。这说明, 比结合能由小变大时 (重核裂变或轻核聚变) 就会有核能放出, 俗称原子能。

【液滴模型】每个核子的平均结合能为一常数以及核密度为一常数, 这与液滴相似, 启发人们有可能用一个简单的公式来表达原子核的质量。液滴模型认为, 结合能中体积贡献部分为 $E_v = +a_v A$ 。表面能 E_s 正比于表面积, 并使结合能减小, $E_s = -a_s A^{2/3}$ 。体积项与表面项与液滴相对应。库仑能是由任意两个质子之间作用的静电斥力引起的, $E_c = -a_c Z^2 A^{-1/3}$ 。泡利不相容原理使得当原子核中一种核子多于另一种核子时需花费较多的能量, 这部分能量

就是对称能 E_a , $E_a = -a_a \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 A^{-1}$, 另外还有对能 $a_p \delta A^{-1/2}$, 其中对偶偶核 $\delta = 1$, 对奇 A 核 $\delta = 0$, 对奇奇核 $\delta = -1$ 。

球形核的结合能的半经验公式为 $B(Z, A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 A^{-1} + a_p \delta A^{-1/2}$ 。与实验测定的结合能相比较, 可以求出这些系数, 一组典型值为

$$a_v = 15.835 \text{ MeV},$$

$$a_s = 18.33 \text{ MeV},$$

$$a_c = 0.714 \text{ MeV},$$

$$a_a = 92.80 \text{ MeV},$$

$$a_p = 11.2 \text{ MeV},$$

液滴模型给出稳定核的 A 与 Z 的关系即 β 稳定线与实验相符, 并能解释一些核素 (^{43}Tc), (^{61}Pm) 没有稳定 β 同量异位素的原因, 能解释比结合能曲线, 还可以得到核半径。

【费米气体模型】 把核子看成简并的费米气体。除不相容原理效应外, 核子在整个球体内运动。用二个势阱 (一个属于中子, 一个属于质子) 来表示核子的运动情况。势阱内含有一定数量的能级, 每个能级上可以有两个核子, 一个自旋向上, 一个自旋向下。假定原子核的温度比较低, 核子处于它们可能处的最低能态, 即核子可以处于直到最大动能等于费米能量 E_F 为止的所有态。费米气体模型可以解释对称能, 但它没有考虑核子核子间的相互作用, 即认为核内聚集着一群独立运动的自由中子和质子, 是最简单的核模型。

【幻数】 实验发现, 核素的 Z 或 N 等于幻数 (2、8、20、28、50、

82或126) 中的某个数时, 该核素特别稳定。偶核素的相对丰度在幻数处明显高于附近的核素。幻数核的同位素数也较多。人们对核素中最后一个核子的分离能的研究也提供了幻数的清楚的证据。幻数的存在暗示着核内可能存有某种“壳层”, 这是液滴模型所无法解释的。

【壳层模型】由于幻数的存在, 说明核有类似于原子壳层的内部结构, 进而建立了壳层模型, 壳层模型的基本思想如下: (1) 核内存在一个平均场, 每个核子都在这个场中运动。对球形核, 这个场是有心场。(2) 每个核子在核内的运动是独立的。(3) 泡利不相容原理限制了每个能级上的核子数目。(4) 自旋轨道耦合给出了能级的次序。由壳层模型可以预言核的基态的自旋和宇称, 对偶偶核基态的自旋宇称的预言 0^+ 全部为实验证实。对于奇 A 核也可预言基态的自旋宇称, 与实验大部分相符合, 关于奇奇核也给出了一些结果。壳层模型特别解释了幻数的存在原因在于满壳层。

【集体模型】壳模型并未解决全部核问题。对满壳层 (球形核) 外加一个或几个核子壳模型较成功, 这时核仍近似为球形。但当介于两闭合壳层之间时, 价核子对核子系统的“极化”作用加强, 使核趋于永久形变。核明显偏离球形, 涉及很多核子的集体运动就显得重要了。例如, 壳层中间段, 核四极矩的实验值比单粒子求出的值大许多倍。这样就引进了集体模型。考虑原子核的集体运动, 得到许多振动, 转动能级, 它们分别处于 $60 < A < 150$ 和 $190 < A < 220$, $150 < A < 190$ 和 $A > 220$ 的核素区。

【统一模型】壳层模型和集体模型是两种极端的和观点相反的典

型。把它们合适特点结合起来得到原子核的统一模型。统一模型认为一个形变核是由在形变势阱（非球形势阱）中运动的独立粒子组成的。对单粒子的内禀运动按壳层模型的方式重新处理，并求得单粒子的能级次序。集体运动涉及的核子较多，运动速度相对较慢。因而统一模型认为内禀运动和集体运动是近似独立的。在形变核的任意状态，原子核都可以作转动或振动等集体运动，所以每个内禀能级都是一个转动能带或振动能带的带头。即这些能带是建立在每个内禀能级上的。

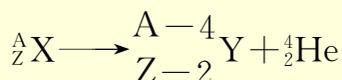
核子是在变化的核场中在各自的轨道上作独立运动，同时又跟随核作集体运动。这些运动互相影响，使得真实的情况十分复杂。

【核结构的微观理论】壳层模型势是由两体力对整个原子核取平均得到的。然而，当一个核子接近另一个核子时，还剩下一些平均势所不能包括的效应，这种短程剩余力导致成对效应（泡利原理使得两个核子趋于自旋单态）。核子的成对效应非常类似于超导中的库珀对。当核子远离壳层时，核力的长程部分使得核心极化。对壳层附近的核，对力很强，使核呈球形，球形壳层模型是成功的。对离开幻数的核，考虑短程对力和长程极化力的竞争。当壳层外的价核子较少时，极化效应太弱，不足以引起核心形变；当价核子较多时，极化力超过了对力，极化效应足够强时，就使得核发生永久形变，从而过渡到形变壳层模型。

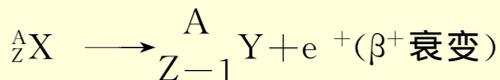
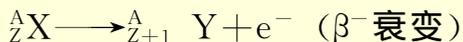
【超核与三体力】作用在一个核子上的原子核位势可以用超核来研究。在这种核里，一个或有时两个核子被超子（经常是 λ ）所代替。虽然被 λ 感受到的势不同于作用在一个核子上的势，但这些势之

间是紧密相关的,并且 λ 不受泡利原理的限制。超核的研究仍处在初期阶段,还有许多问题有待解决。通常我们只涉及核子之间的两体力。介子理论认为应该存在三体力,这个力只在三个核子靠在一起时起作用。一般认为它在核内不起主要作用。但在确立三体力是否存在之前,需要做更多的理论和实验工作。

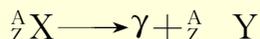
【放射性及原子核的衰变】原子核自发地发射各种射线的现象,称为放射性。1896年,贝可勒尔在研究铀矿的荧光现象时,发现了放射性。放射性射线的主要成分有 α 、 β 、 γ 射线。其中 α 射线是高速运动的氦核,它的电离本领大,贯穿本领小; β 射线是高速运动的电子流,它的电离本领较小,贯穿本领较大; γ 射线是波长很短的电磁波,它的电离本领小,贯穿本领大。有的原子核只发射 α 粒子,有的只发射 β 粒子,有的在发射 α 粒子和 β 粒子的同时还发射 γ 射线。此外还有发射正电子,质子,中子等其它粒子。对放射性核素加温加压或加磁场,都不能抑制射线的发射。放射性现象是由原子核的变化引起的,与核外电子状态的改变关系很小。使原子核发生衰变的作用力有强作用力,电磁力和弱作用力。这三种作用引起的衰变全部被发现。衰变寿命与作用力的类型有密切的关系,对强衰变,电磁衰变和弱衰变,衰变寿命的数量级大约为 10^{-23} 秒, 10^{-18} 秒和 10^{-10} 秒。衰变放射的粒子或量子的类型并非总能说明发射过程的相互作用。原子核的衰变主要有三类,即 α 衰变, β 衰变和 γ 衰变。其中 α 衰变属强相互作用类型, β 衰变属弱作用类型, γ 衰变属电磁作用类型。我们常用下列的式子来表示原子核的衰变,其中X表示母核, Y表示子核。 α 衰变可表示为



β 衰变可表示为



γ 衰变可表示为



在 γ 衰变中，核只改变了它的能量状态。有时，衰变的子核还可以再发生衰变，称为级联放射性衰变。

【放射性衰变的连续理论】放射性衰变的基本规律与核蜕变的机制无关。我们把原子数目当作连续的变量来处理。这种处理是合理的，因为原子的数目通常是相当大的。放射性衰变的基本规律如下：已知一原子，它在时间 dt 内衰变的几率为 λdt 。常数 λ 称为衰变常数，它的量纲为时间的倒数。 λ 表示给定物质及其衰变方式的特性，它与被研究原子的年龄无关。 λ 是一种核的特性，它不受任何一般物理作用的影响。如果开始时有 $N(0)$ 个原子的放射性物质，在 t 时刻的原子数为 $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$ 。这是放射性衰变规律的另一种表示。

【半衰期和分支】我们常常使用半衰期 T 来表示原子核的衰变。半衰期定义为开始时的原子核数目衰减掉一半的时间。显然

$$T = \log 2 / \lambda = 0.693174 / \lambda$$

有些物质以多种方式同时进行衰变，每一种衰变通常是不同的，它们的作用机制也可能不同。这种现象称为分支。对不同的分支都对应有不同的 λ 。分支比定义为

$$R_i = \frac{\lambda_i}{\sum_i \lambda_i}$$

半衰期测量和分支比测量对原子核的研究具有十分重要的意义。

【放射性单位：剂量学】在给定样品中每秒衰变的原子数 λN 称为该样品的放射性强度，即活度。习惯上常用居里 (Ci) 和贝可勒尔 (Bq) 来表示。

$$1 \text{ 居里} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 次衰变/秒}$$

$$1 \text{ 贝可} = 1 \text{ 次衰变/秒}$$

在许多情况下，人们所关心的并不是一个源的活度，而是在一定条件下辐射贯穿物质时所产生的电离。如果两个放射源产生相等的电离，则认为它们是等价的。在辐射生物学和保健物理中常使用伦琴 (R) 来表示 X 或 γ 射线的照射剂量。伦琴定义为“这样的 X 或 γ 辐射量，其伴生的微粒子辐射在 0.001293 克空气中产生电离，其正负离子的电量均为一个静电单位”。被物质吸收的能量的量称为辐射的吸收剂量，吸收剂量的单位叫做拉德 (rad)。1 伦琴的照射剂量相当于空气中受到 0.83 拉德的吸收剂量。虽然在物理学中测量辐射累积的能量是个很简单的问题，但是测定它的生物效应则相当困难，甚至无法准确定义。为此引入了相对生物效应 (RBE)。一个已知辐射的 RBE 是在所研究的器官上该辐射的吸收剂量与产生相同生物效应的标准辐射（一般为 200keV 的 X 射线）的吸收剂量之比。即 $(RBE)_{n,a} = D_n/D_x$ ，式中 $(RBE)_{n,a}$ 为辐射 n 对生物效应 a 的相对生物效应。对于不同的辐射和不同的生物效应将有不同的 RBE。吸收剂量与其 RBE 的乘积称为剂量当量 (DE)，以雷姆度量（人的拉德当量）。剂量学中使用的另一个物理量是电

离辐射的线性能量传递 (LET)：它是单位射程上累积的能量，并以每微米 keV 数来度量。

【辐射防护】辐射是有危害的，国际辐射防护委员会 (ICRP) 颁布了最大容许剂量。见表。

人身剂量限制一览表

器官或组织	职业工作人员 (雷姆/年)	普通居民 (雷姆/年)
性腺和造血器官	5	0.5
皮肤、骨、 甲状腺	30	3
手和前臂、 脚和踝部	75	7.5
其他单一器官	15	1.5

为防止过量辐射，常采用如下措施：(1) 避免产生辐射或放出辐射的同位素。(2) 确保任何放射性物质都装在容器内或装在防止扩散的多层阻挡层内。(3) 在辐射源和个人之间加屏蔽层。(4) 禁止接近辐射危险区。(5) 用大量的空气或水来稀释排放的放射性物质，降低有害物质的浓度。(6) 限制工作人员在辐射区的停留时间，以减少接受的剂量。辐射随距离增大而平方减少，在屏蔽材料中指数衰减。可以用两种方式对待放射性物质——贮留和分散，并通过距离防护，屏蔽防护和时间防护等方法避免辐照。

【 α 衰变】 α 粒子的质量亏损大，从能量角度看，核放出一个 α 粒子是有利的。从质量半经验公式，可明显看出只有重核 ($A \geq 150$) 才

有 α 放射性。 α 衰变属强作用过程，强衰变的寿命很短（约 10^{-23} 秒），但 α 衰变的寿命却较长（通常在 10^{-7} 秒— 10^9 年），而且差别较大。母核在放出 α 粒子时会受到不同程度的阻碍，阻碍因子使得 α 衰变的半衰期不同程度的变长。

【 α 衰变的量子理论】 α 粒子在核内受到子核的库仑斥力和核力的吸引。我们可以用适当的势垒来表示这种作用。 α 衰变可看成一个量子力学的势垒穿透。势垒的高低不同， α 粒子的穿透几率便不同。量子力学的计算表明 α 衰变的半衰期强烈地依赖于衰变释放的能量，

$$\log \lambda = - \frac{(2mB)^{1/2}}{h} R$$

$$\left[\pi \left[\frac{B}{E} \right]^{1/2} - 4 \right] + \log \frac{v_0}{R}$$

式中 $B = \frac{zZe^2}{R}$ 为势垒的高度， R 是子核的半径， v_0 是 α 粒子在核内的运动速度， E 是 α 粒子的衰变能。

盖革——努尔塔总结了一个半经验公式：

$$\log_{10} \lambda = C - DE_{\alpha}^{-1/2}$$

式中 E_{α} 为 α 粒子的衰变能 (MeV)， C ， D 是与 Z 有关的常数。

【 α 谱精细结构】 α 衰变通常涉及一个处于基态的核。但许多 α 辐射体给出了 α 粒子的线状谱。因为 α 跃迁有几个终态能级。测量这些不同能级间的 γ 射线后，证实了这一点。这种 α 能量的复杂分布，称为 α 能谱的精细结构。这些 α 线的强度也不同。强度主要决定于能量，能量影响势垒的透明度，其次还决定于角动量对势垒的影响，另外还有其它一些因素，在 α 能谱的精细结构中，通常只有一

种能量的 α 粒子强度较大，其他几种强度较弱，能量也较低。

【 γ 辐射】在原子核发射的辐射中， γ 射线的发现是很早的。原子核通过发射 γ 光子从激发态跃迁到较低能态的过程，称 γ 跃迁或 γ 辐射。这个过程是电磁作用引起的。原子核的能级是分立的，两能级间的 γ 跃迁的能量是单一的。 γ 辐射具有多极性。因此， γ 跃迁可以给出原子核能量和量子数的信息。 γ 跃迁是分析核现象的有力工具。

【 γ 辐射的多极性】原子核是带电系统。核子在核内运动，且核具有形变。因此作为电荷—电流分布系统的原子核具有电多极矩和磁多极矩，原子核的 γ 辐射也具有多极性。根据被 γ 光子带走的角动量，可以把 γ 辐射分为不同的极次。 $L=1$ 叫偶极辐射， $L=2$ 叫四极辐射，…… 2^L 极辐射。跃迁前后原子核的宇称相同时， γ 辐射具有偶宇称；反之，就具有奇宇称。宇称的奇偶性和 L 的奇偶性相同时为电多极辐射，相反时为磁多极辐射。通常用 E_L 表示电 2^L 极辐射，用 M_L 表示磁 2^L 极辐射。 γ 辐射跃迁几率 λ 有如下特点：

- (1) 电辐射快于同级的磁辐射。
- (2) 辐射的极次越低跃迁越快。
- (3) $\lambda_M(L) \approx \lambda_E(L+1)$ 。

有些多极跃迁是禁戒的。 γ 跃迁的选择定则 Δl 表示核的角动量变化， $\Delta\pi=0$ 表示初态和末态的宇称相同， $\Delta\pi=1$ 表示初末态的宇称相反。

【内转换】原子核退激时，没有直接发射 γ 光子，而是把能量传输给原子中的某个电子，使它射出。该出射电子的动能等于 γ 跃迁能

量减去电子的结合能。这种现象叫内转换,通过这种作用原理射出的电子称内转换电子。根据内转换电子来自那个壳层,称为 K 壳层转换, L 壳层转换等。对于某给定的跃迁,所发射的电子的平均数与 γ 射线的平均数之比称为内转换系数 α ,也可以按照电子来自那个壳层而区分为部分内转换系数 $\alpha_K, \alpha_L \dots$ 。显然

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \dots$$

内转换系数取决于核的原子序数,跃迁能量以及跃迁的多极性,与具体的核模型无关,是核能级分类的有力手段。例如,当核很快地接连发射两个辐射(其中有一个是 γ 辐射),那么从内转换电子的能量就可以知道哪个辐射先发出。通过内转换电子的能量可求出 γ 跃迁的能量。内转换过程常常伴随特征 X 射线或欧歇电子的发射。

【同质异能态】有时选择定则使得电磁跃迁变慢。当初态和末态的角动量相差较大时,就会出现这种情况。激发态的寿命很长。“很长”的意思是可被测量。这类激发态叫亚稳态或同质异能态。核的同质异能性常伴随着 β 衰变,并且内转换系数较大。轻核 ($A < 39$) 常没有同质异能素。同质异能素优先集中在 Z 或 N 刚低于幻数而 A 是奇数的核的“岛”中,叫“同质异能素岛”。壳层模型可以满意地解释这种现象。对偶偶核,激发一个核子要涉及对能,这能量太大,不能形成同质异能素。对刚低于幻数的核,有角动量差别很大 (> 3) 而能量接近的轨道,它们给出了“同质异能素岛”。

【 γ 辐射的角关联】通常,当同一个核接连发出两个 γ 射线时,此两个 γ 射线的发射方向是有关联的。设这两个发射方向的夹角为 θ ,则相继发射的 γ 射线之间的角度为 θ 的几率 $P(\theta)$ 是 $\cos\theta$ 偶次

幂的多项式，最高幂次为 $2|\Delta L|$ 。

角关联不只限于 γ - γ 级联，也观察到 β - γ 级联辐射， γ 辐射与俄歇电子级联，以及其他情况。他们的角关联公式是相似的。

【穆斯堡尔效应】核在发射 γ 射线时，由于原子核的反冲作用， γ 射线的能量会变小，对于吸收需要稍大一点的能量。如果 γ 射线的宽度较大，发射级与吸收级有足够的重叠可产生共振辐射。但在原子核的 γ 辐射中， γ 射线的宽度较窄，不足以产生共振辐射。为消除原子核的反冲，穆斯堡尔建议将原子放入固体晶格以便使其固定，即将放射 γ 光子的原子核与吸收 γ 光子的原子核束缚在网格中。当发生反冲时，受反冲的是整个晶体，反冲的影响可以忽略。因此，整个过程可看成是无反冲过程。这种无反冲共振吸收，称为穆斯堡尔效应。用穆斯堡尔效应测 γ 谱，可得到很高的能量分辨率，可直接观测到核能级的精细结构、核的同质异能效应，广义相对论中的引力红移，应用于固态研究等方面。

【 β 衰变】 β 衰变是一种发射电子的核转变，其它类型的核转变特别是发射正电子和核俘获轨道电子的转变，也称 β 衰变。 β 衰变是弱作用过程。现在人们已经知道 β 衰变时核除了发射电子外，还要发射中微子。中微子是电中性的，它的静止质量为零（ $<60\text{eV}$ ），自旋为 $\frac{1}{2}$ ，是费米子。中微子与物质相互作用截面很小（约为 10^{-43}cm^2 量级），因而很难被探测到。三体的 β 衰变，使电子能谱呈连续性（ β 电子的最大能量为 β 电子的衰变能），这是区别 β 电子和其它单能电子（特别是内转换电子）的主要特征。

【中微子】中微子是最难理解的核粒子，与它有关的证据大部分都是间接的。中微子不仅在 β 衰变中出现，而且也在 π 介子， μ 子和其它粒子的衰变中出现。实验表明，只存在三种类型的中微子和它们的反中微子，即

$$(\nu_e, \bar{\nu}_e), (\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu), (\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$$

与三代轻子 e, μ, τ 相对应。

中微子与反中微子的质量，自旋，电荷和磁矩的大小均相同。它们的区别在于“手征性”的不同。即中微子的自旋与它的动量是反平行的，反中微子的自旋则平行于它的动量方向。用螺旋性来表征自旋和动量的关系如下：

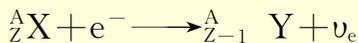
$$H = \text{螺旋性} = \frac{\vec{P} \cdot \vec{\sigma}}{|\vec{P}| |\vec{\sigma}|}$$

则中微子的螺旋性为 -1 ，反中微子的螺旋性为 $+1$ 。在 β 衰变中，核发射一个中微子，相当于吸收一个反中微子。

【 β 衰变的三种类型】将中微子考虑在内， β 衰变的三种类型可以用下式表示



轨道电子俘获：



β 衰变的本质在于衰变过程中的一个中子转变成质子，或者是一个质子转变成中子。在发射一个 β^- 电子时伴随一个反中微子的发射，在发射一个 β^+ 电子时伴随一个中微子的发射。在轨道电子俘获过程中伴随着子核的特征 X 射线发射或俄歇电子的发射。

【 β 衰变的费米理论】 β 衰变中，一个中子转变成一个质子，产生一个电子和一个反中微子。类比于原子发光，费米提出 β 衰变是电子—中微子场与原子核的相互作用。费米假定宇称守恒，尽管后来发现宇称不守恒产生了一些重大变化，但他的理论结果大部分仍是站得住的。

费米理论的主要成果是仅仅引入一个新参量（耦合常数 g ）就对下列诸问题作出了解释：（1） β 能谱的形状；（2）衰变的最大能量和平均寿命之间的关系；（3）跃迁的分类和确定选则定则。跃迁的分类与选择定则如表所示。

β 衰变的选择定则表

跃迁类型	选择定则
容许跃迁	$\Delta I=0, \pm 1, \Delta \pi=+1$
禁戒 一级禁戒跃迁	$\Delta I=0, \pm 1, \pm 2 (0 \rightarrow 0)$ 除外, $\Delta \pi=-1$
跃迁 n 级禁戒跃迁	$\Delta I=\pm n, \pm (n+1)$ $\Delta \pi=(-1)^n$

费米理论得出 β 粒子的动量 P ，动量分布 $I(P)$ ，和 β 电子能量的关系如下

$$\sqrt{I(P)} / FP^2 = \text{常数} (E_m - E)$$

式中 F 为库仑改正因子， E_m 为 β 电子最大能量。实验上常常作 $\sqrt{I(P)} / FP^2$ 对 E 的图（居里标绘），对理论和实验进行比较，并确定 β 衰变能。费米理论具普适性，稍作修改也适应于其他类型的弱作用过程。

【萨晋定律与比较半衰期】根据费米理论，可算出 β 衰变的衰变常数 λ 为

$$\lambda \approx \frac{m_e^5 c^4 g^4 |M_{if}|^2}{2\pi^3 \hbar^7} f(Z, E_m)$$

其中 $|M_{if}|^2$ 为跃迁的矩阵元， g 为弱作用耦合常数，它的数值为 $g = (1.435 \pm 0.001)$ 尔格 cm^3 当 $E_m \gg m_e c^2$ 时， $f(Z, E_m) \propto E_m^5$ 。即 $\lambda = \text{常数} \times E_m^5$ 历史上常把这一关系叫萨晋定律。

β 衰变的半衰期强烈地依赖于衰变能量，即使同一类型的跃迁，半衰期差别也很大。为反映出不同的跃迁类型的特征，引入比较半衰期 $fT_{1/2} \approx \frac{2\pi^3 \hbar^7 \ln 2}{m_e^5 c^4 g^2 |M_{if}|^2}$ 。跃迁矩阵元 $|M_{if}|^2$ 的大小反映了各种跃迁类型的差别。表给出了各级跃迁的 $\log fT_{1/2}$ 值。

各级跃迁的 $\log fT_{1/2}$ 值表

跃迁级次	$\log fT_{1/2}$
超容许跃迁	2.9—3.7
容许跃迁	4.4—6.0
一级禁戒（非唯一）	6—9
一级禁戒（唯一型）	8—10
二级禁戒	10—13
三级禁戒	15—18

【 β 衰变过程中的宇称不守恒问题】1956年，李政道、杨振宁提出

在弱相互作用中宇称不守恒。1957年，吴健雄等人在极化原子核 ^{60}Co 的 β 衰变中证实了 β 衰变中宇称不守恒。对 ^{60}Co 原子核，当沿着自旋反方向发射 β 粒子时，其镜象过程就是沿自旋方向发射 β 粒子。如果 β 衰变时宇称是守恒的，则原子核沿自旋方向和沿自旋反方向发射 β 粒子的几率相等。在实验中发现 β 粒子沿着自旋反方向的几率大于沿着自旋方向的发射几率。这个实验令人信服地证明了 β 衰变时宇称不守恒。后来人们又做了许多类似的实验都证明了在弱作用中宇称不守恒。在强作用和电磁作用中宇称守恒定律仍然是成立的。

【双 β 衰变】原子核同时发射两个电子和两个反中微子的转变，称为双 β 衰变。双 β 衰变可以检验中微子和反中微子是否是全同粒子。例如 ^{130}Te 双 β 衰变到 ^{130}Xe ，对 β 衰变来说，这种二次过程的几率极小，其平均寿命为 $10^{22\pm 2}$ 年的量级，并且两个电子之间的动量不平衡。如认为中微子和反中微子是全同的， ^{130}Te 只需放出两个电子就直接转变为 ^{130}Xe ，两个电子的动量互相平衡。此时，反中微子先被发射后又被吸收，这个再吸收就好象前一种情况的二次发射，其半衰期是 $10^{16\pm 2}$ 年，比前一种情形短得多。实验测量到 ^{130}Te 双 β 衰变到 ^{130}Xe 的半衰期为 $10^{21.34\pm 0.12}$ 年。双 β 衰变实验证明中微子和反中微子是两种不同的粒子。

【原子核反应】原子核与原子核，或者原子核与其他粒子之间的相互作用所引起的各种变化叫做核反应。为实现核反应，需使一个原子核或其他粒子必须足够接近另一个原子核，一般须达到核力的作用范围内。最早人们是用放射源产生的高速粒子去轰击原子核来实现核反应，但弱点很多，目前已很少见了。人们也利用宇宙射

线来实现核反应。它的特点是能量很高，但强度很弱。利用带电粒子加速器或反应堆进行核反应是实现人工核反应的最主要的途径。它的强度很高，入射粒子的能量可调，是进行核物理研究和原子能应用的有力工具。

核反应过程对原子核内部结构的扰动以及所涉及到的能量变化一般比核衰变过程要大得多，核反应现象丰富多采，是获得原子能和放射性核的重要途径。

【核反应分类】核反应一般可表示为 $A+a\rightarrow B+b$ 。简写为 $A(a,b)B$ 。其中 A 和 a 分别表示靶核和入射粒子， B 和 b 表示剩余核和出射粒子。如按出射粒子的不同，核反应可分为两大类，即核散射和核转变。核散射是指出射粒子和入射粒子相同的核反应；核转变是指出射粒子和入射粒子不同的反应。核散射又分弹性散射和非弹性散射两种。弹性散射是指散射前后系统的总动能相等，原子核的内部能量不发生变化。非弹性散射指散射前后系统的总动能不相等，原子核的内部能量发生变化。核反应按入射粒子种类不同也可分为：

(1) 中子核反应。

(2) 带电粒子核反应。它又可分为：质子核反应；氦核核反应； α 粒子核反应；重离子核反应。

(3) 光核反应。

核反应按入射粒子能量不同，还可分为：

(1) 低能核反应。入射粒子动能 $E < 50\text{MeV}$ 。

(2) 中能核反应。 $50\text{MeV} < E < 1000\text{MeV}$ 。

(3) 高能核反应。 $E > 1000\text{MeV}$ 。

核反应按靶核质量数 A 的不同又可分为：

- (1) 轻核反应： $A < 25$ 。
- (2) 中量核反应： $25 < A < 80$ 。
- (3) 重核反应： $A > 80$ 。

按入射粒子的能量 E 和靶核的质量数 A 的分类标准不是绝对的，有时采用别的标准。

【核反应能】核反应过程中释放的能量，称反应能，通常用符号 Q 表示。反应能就是反应后的动能减去反应前的动能。 $Q > 0$ 的反应叫做放能反应， $Q < 0$ 的反应叫做吸能反应。对吸能反应， $Q < 0$ ，为使核反应进行，必须使入射粒子的动能大于某一数值。在实验室坐标系中，能够引起核反应的入射粒子最低能量，称为该反应的阈能。

【核反应截面】核反应截面 σ 定义为

$\sigma =$ 单位时间发生的反应数 / [单位时间的入射粒子数 \times 单位面积的靶核数] 它的物理意义是表示一个粒子入射到单位面积内只含一个靶核的靶子上所发生的反应几率，或者说，表示一个入射粒子同单位面积靶上一个靶核发生反应的几率。反应截面 σ 的单位通常采用 10^{-24}cm^2 ，称为“靶恩”，记作 b 。 σ 与入射粒子能量有关。反应截面随入射粒子能量的变化关系称为激发函数。

在核反应中，还常使用微分截面 $\sigma(\theta, \varphi)$ 。它定义为

$\sigma(\theta, \varphi) =$ 单位时间出射至 (θ, φ) 方向单位立体角内的粒子数 / [单位时间的入射粒子数 \times 单位面积的靶核数]

对 $\sigma(\theta, \varphi)$ 积分，就可以求得总截面 σ 。一般情况下，微分截面 $\sigma(\theta, \varphi)$ 对方位角 φ 是各向同性的，因而 $\sigma(\theta, \varphi)$ 实际上只与 θ 有关。微分截面 $\sigma(\theta)$ 随 θ 角的变化曲线称为角分布。

【反应道】对一定的入射粒子和靶核，能发生的核反应过程往往不止一种。对应于每一种核反应过程，称为一个反应道。反应前的道称为入射道，反应后的道称为出射道。对同一个入射道，可以有若干个出射道。反之亦然。产生各个反应道的几率不同，往往随入射粒子的能量而变化。

【核反应中的守恒定律】大量实验表明，核反应过程遵守下面几个守恒定律：

- (1) 电荷守恒。
- (2) 质量数守恒。
- (3) 能量守恒。
- (4) 动量守恒。
- (5) 角动量守恒。
- (6) 宇称守恒。

【细致平衡原理】对可逆反应 $A + a \rightleftharpoons B + b$ ，正逆过程的反应截面有如下关系式

$$\sigma_{\alpha\beta}/\sigma_{\beta\alpha} = p_b^2 (2I_b + 1) (2I_B + 1) / p_a^2 (2I_a + 1) (2I_A + 1)$$

这个关系式称为细致平衡原理。式中 $\sigma_{\alpha\beta}$ 和 $\sigma_{\beta\alpha}$ 为正逆过程的反应截面， p_b ， p_a 为入射和出射粒子的动量， I_i 为每个粒子的自旋。细致平衡原理只适用于参与反应的各粒子的非极化情形。

【核反应模型】1957年，外斯柯夫提出了核反应过程的三阶段描述，给出了核反应过程的粗糙图象。

第一阶段，入射粒子接近到靶核核场作用范围内。粒子可能被

靶核吸收，发生核转变，也可能被靶核散射。描述这一阶段的核反应模型，叫光学模型。

第二阶段，粒子被靶核吸收后，与靶核发生能量交换。入射粒子可以把能量交给靶核后飞出（直接反应），也可以与靶核一起形成复合核。描述入射粒子和靶核组成的复合系统的核反应模型是复合核模型。

第三阶段核反应的最后阶段。复合核系统分解成出射粒子和剩余核。描述复合核系统“衰变”的核反应模型是蒸发模型。

【光学模型】光学模型认为，原子核好象一个半透明的玻璃球，入射粒子与靶核的作用如同光波射在玻璃球上，一部分透射或反射，一部分被吸收，透射或反射的光波相当于粒子被散射。被吸收的粒子进入靶核，引起核反应。光学模型认为靶核对入射粒子是半透明的，它的理论处理是：对于入射粒子与靶核的作用引入一个复数势阱，实部表示透射或反射，虚部表示吸收。把这个势阱代入薛定谔方程中求解，就可计算出散射截面和吸收截面。

【复合核模型】复合核模型认为一般的低能核反应分两个阶段进行，而且两个阶段独立无关。第一阶段是复合核形成，即入射粒子与靶核作用后融合成激发的新核，这个核叫复合核；第二阶段是复合核的衰变，即复合核分解成出射粒子和剩余核。复合核模型把原子核比作液滴。当入射粒子射入靶核后，与周围核子强烈作用，把能量传给附近的核子。附近的核子又把能量传给周围的核子，直到能量传递达到动态平衡，从而形成复合核。这一阶段类似液滴的加热过程，复合核总是处于激发态。复合核并不立即衰变，只有在频繁碰撞后某一核子上聚集到的能量大于分离能时，该核子就可

以从核中飞出，完成衰变。这一阶段类似于液滴的蒸发。复合核衰变的方式一般不止一种，且寿命较长（ 10^{-15} 秒量级）。

【核反应中的共振】实验测得核反应激发曲线 $\sigma(E)$ 在入射粒子能量为某些数值时，出现尖锐的峰，这种现象称为核反应共振，这些能量称为共振能量。复合核模型认为，复合核具有一定的能级结构。当入射粒子的能量达到共振能量时，就会被强烈吸收，形成复合核的截面特别大，从而反应截面也就特别大。

在共振附近的截面和入射粒子的能量关系为

$$\sigma_{ab}(E) = \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

这个关系式称为布莱特——维格纳公式，简称为 B—W 公式。式中， λ 为折合约化波长， E 为入射粒子的能量， E_0 为共振能量， Γ 为共振态的总宽度， Γ_a ， Γ_b 为共振态到 a 态和 b 态的部分宽度。

【黑核模型】在入射能量不太高时，往往会发生共振。当入射能量增大时，复合核处于较高激发态，能级宽度加大，间距缩小。能级相互重叠，连成一片，形成连续区。黑核模型可以解释连续区激发曲线的平滑变化。黑核模型认为，入射粒子不论具有什么能量，都能被靶核强烈吸收，好象光学中的黑体一样。入射粒子被核吸收后，立即把能量全部交给靶核，并与靶核一起形成复合核，然后复合核进行衰变。黑核模型还认为复合核衰变时开道数目很大，可以忽略再通过入射道衰变的几率，因此复合核的形成截面就是反应截面。黑核模型只适用于入射粒子能量较大（ $>1\text{MeV}$ ）的情况。

【蒸发模型】蒸发模型主要用来讨论复合核处于高激发态时的衰变情况,是一种统计理论。蒸发模型认为处于激发态的复合核好象是一个液滴,复合核的衰变类似液滴的蒸发。复合核衰变时,出射粒子的能谱具有麦克斯韦分布的特点,在适当条件下角分布也是各向同性的。在复合核的各种衰变方式中,发射中子的几率较大,因为发射带电粒子受库仑势垒的影响。

对重的复合核,它的衰变不但可以通过蒸发粒子,而且可以通过裂变来实现。一般来说,对轻核,库仑势垒较低,发射带电粒子 P , α 粒子与发射中子的几率差不多;对中量核,发射中子占优势;对重核,发射中子和裂变相竞争,有时裂变占优势,但发射带电粒子的几率很小。

【直接核反应】入射粒子与靶核中的少数核子直接作用,而不形成复合核,称为直接核反应。在直接核反应中,入射粒子与靶核作用,把部分能量交给靶核的一个或几个核子,而这些核子还来不及把能量分给其它核子,就从核内发射出来。直接核反应的角分布对 90° 角不对称,而是明显前倾,这是直接核反应的特点,常见的直接核反应有以下几种:

(1) 削裂反应。入射粒子打在靶核边缘,其中的一个或几个核子被靶核俘获,其余部分继续飞行前进。

(2) 拾取反应。入射粒子与靶核作用时,从靶核中拾取一个或几个核子结合成较重的粒子并向外飞出。

(3) 敲出反应。入射粒子把部分能量交给靶核中的一个或几个核子而使其飞出靶核。此时入射粒子往往被靶核吸收。

(4) 非弹性散射。入射粒子与靶核作用时,把部分能量交给靶核使其激发,而自己继续飞行。

(5) 电荷交换反应。入射粒子与靶核作用时, 不交换粒子, 只交换电荷。

【光核反应】 γ 射线与原子核作用引起的核反应称光核反应, 常见类型有 (γ, n) 和 (γ, p) 反应。光核反应是电磁作用引起的。光核反应的阈能是最后一个核子的结合能。 (γ, n) 反应的产额较大。

光核反应的激发曲线上有时呈现出宽度为几个 MeV 的共振峰, 称为光核反应的巨共振。巨共振现象的成因是入射光子的频率等于原子核集体振动的频率, 此时吸收截面最大, 发生巨共振。当出现多极振动时, 就会有多个巨共振峰。巨共振现象的研究, 可以获得原子核形变的信息。此外, 光核反应中存在直接过程, 尤其是重核的 (γ, p) 反应。直接过程也能形成巨共振。

【中子核反应】中子与靶核作用时不受库仑势垒的阻挡, 即使能量很低的中子也能引起核反应。中子核反应的类型主要有:

(1) 弹性散射 (n, n) 。

(2) 辐射俘获 (n, γ) 。复合核通过 γ 跃迁退激。

(3) 非弹性散射 (n, n') 。

(4) 其它类型, 如 (n, p) 、 (n, α) 、 $(n, 2n)$ 、 (n, np) 等。

能量小于50MeV的中子按能量分类可分为:

(1) 慢中子 ($E < 1\text{keV}$)。

(2) 中能中子

($1\text{keV} < E < 500\text{keV}$)。

(3) 快中子

($0.5\text{MeV} < E < 10\text{MeV}$)。

(4) 特快中子 ($E > 10\text{MeV}$)。

中子的能量不同, 反应的类型亦不同。

【慢中子和中能中子引起的核反应】主要的反应是弹性散射和辐射俘获, 其他反应很少发生。对轻核, 由于能级间距大, 很少出现共振, 辐射俘获截面很小。对中量核, 能级间距变窄, 会出现共振散射, 辐射俘获截面仍然较小, 散射截面随中子能量升高而增大。对重核 (非幻数核), 能级间距进一步变窄, 在很低能量时就出现共振, 在共振附近, 辐射俘获占压倒优势。辐射俘获截面 $\gamma_{n\gamma\alpha} \frac{1}{\sqrt{E_{n0}}}$ ¹¹³

Cd 对慢中子的俘获截面很大, 常作为吸收慢中子的材料。辐射俘获使原子核的中质比增大, 反应产物常具有 β^- 放射性。慢中子与轻核作用, 也能引起发射带电粒子的反应, 如 $^{10}\text{B} (n, \alpha)$ 、 $^6\text{Li} (n, \alpha)$ 和 $^3\text{He} (n, p)$ 等。

【快中子核反应】主要反应类型有弹性散射, 非弹性散射, 辐射俘获, 带电粒子发射, 多粒子发射以及裂变反应等。

快中子能区的弹性散射主要是势散射, 除在低能端某些轻核存在共振散射外, 复合核散射截面一般不大。随着中子能量的提高, 复合核弹性散射的几率越来越小。重核的非弹性散射几率一般较大, 轻核的几率一般较小。随着中子能量的增加, 辐射俘获的几率越来越小。中子引起的发射带电粒子的反应一般以 (n, p) 和 (n, α) 反应的几率为最大, 而且随着中子能量的提高, 直接过程增强。当入射中子能量超过靶核的中子结合能时, 就有可能发生 $(n, 2n)$ 反应, 且反应截面随中子能量的增大而增大, 直到发生 $(n, 3n)$ 反应时。多粒子发射的几率一般较小。

【带电粒子核反应】 带电粒子与靶核作用时，受库仑势垒的阻挡。当粒子能量低于库仑势垒时，引起反应的几率很小。带电粒子核反应按入射粒子的质量数可分为轻带电粒子核反应，和重离子核反应。常见的轻带电粒子核反应有 p、 α 粒子和氦核核反应等。重离子是指比 α 粒子重的离子，重离子核反应的类型十分丰富。

【库仑散射】 核与核之间的相互作用，在核力范围外，主要是库仑相互作用。当两个碰撞的原子核的相对运动动能 E' 小于库仑势垒的高度时，主要是在库仑场中的弹性散射。库仑散射在入射粒子和靶核不同时，称为卢瑟福散射。它的微分截面表达式为

$$\sigma_R (\theta_c) = \left[\frac{z_1 z_2 e^2}{E'} \right]^2 \frac{1}{16 \sin^4 (\theta_c / 2)}$$

式中 θ_c 为质心系中的散射角， E' 为相对运动动能， z_1, z_2 为两核的电荷数。

入射粒子与靶核相同时的库仑散射称为莫特散射，它的微分截面表达式为

$$\begin{aligned} \sigma (\theta_c) = & \frac{z^4 e^4}{16 E'^2} \left\{ \csc^4 \left[\frac{\theta_c}{2} \right] \right. \\ & + \sec^4 \left[\frac{\theta_c}{2} \right] \\ & + \frac{(-1)^{2I}}{2I+1} \csc^2 \left[\frac{\theta_c}{2} \right] \\ & \left. \sec^2 \left[\frac{\theta_c}{2} \right] \cos \left[\frac{z^2 e^2}{\hbar v} \ln \left\{ \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\theta_c}{2} \right] \right\} \right] \right\} \end{aligned}$$

其中， I 是粒子自旋， v 是粒子相对运动速度。

【质子核反应】 质子引起的核反应常见的有以下几种类型： (p, α) 、 (p, n) 、 (p, p) 、和 (p, γ) ，偶而也有 (p, d) 反应。当质子能量足够高时 ($>0.2\text{MeV}$)，可以产生辐射俘获和中子发射，也可以产生弹性散射和非弹性散射以及发射其它带电粒子。 (p, α) 反应通常放能，对重核的截面不大。 (p, n) 反应通常吸能，反应的剩余核往往具有 β^+ 或 K 俘获放射性。一般情况下， (p, γ) 反应的几率很小， (p, d) 反应的阈能较高。当质子能量小于 (p, n) 反应的阈能时，或是 (p, α) 反应受到禁戒时， (p, p) 和 (p, γ) 的相对几率较大。质子核反应在质子能量小于 4MeV 时，会出现很多共振。

【 α 粒子核反应】 α 粒子引起的核反应是历史上研究得最早的核反应。1919年卢瑟福实现的第一个人工核转变的反应 ${}^14_7\text{N}(\alpha, p){}^17_8\text{O}$ ，就是用放射源 RaG' (${}^{214}\text{Po}$) 放出的 α 粒子来进行的。 α 粒子核反应的情形与质子核反应的情形差不多。当 α 粒子的相对运动动能与库仑势垒相等时， (α, p) 和 (α, n) 反应的截面几乎相等， α 粒子的能量再高时，发射多粒子就有可能。当 α 粒子的能量不太高时， (α, n) 反应占压倒优势。1932年发现中子是通过 ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$ 反应，后来常用 (α, n) 反应来制备放射性中子源。

【氘核核反应】 组成氘核的质子和中子间结合得很松，结合能只有 2.22MeV 。氘核反应释放的能量通常都很高，聚变反应常用氘核来做燃料。氘核在接近靶核时，库仑作用使中子一端靠近原子核，质子被排斥得离核较远。由于氘核结合得较松，中子易被核力俘

获，质子则受库仑力而飞开，发生削裂反应。通过对削裂反应（ d, p ）的角分布研究，可获得核能级的自旋和宇称。另外氘核还能发生敲出反应。

【重离子核反应】指比 α 粒子为重的离子引起的核反应。重离子核反应的库仑作用强，形成的复合核的激发能高，角动量大。重离子的德布罗意波长短，在很多情形下，可用半经典近似来处理重离子核反应。周期表上的所有元素几乎都可被加速作入射粒子。重离子核反应可分为：

- (1) 库仑激发（碰撞参量大于道半径）。
- (2) 直接反应（碰撞参量大约等于道半径）。
- (3) 深度非弹性反应（碰撞参量略小于道半径）。
- (4) 全融合反应（碰撞参量小于道半径）。

【重离子直接反应】包括弹性散射，非弹性散射和少数核子转移反应。能量低于库仑势垒的弹性散射属库仑散射。高能的弹性散射的微分截面出现振动变化，小角度时类似卢瑟福散射截面，大角度时要小很多。非弹性散射时，靶核或出射粒子处于激发态，情况类似轻粒子的非弹性散射。少数核子转移反应是表面作用的重要过程，能量交换一般不大。转移反应中，交换一个核子的截面最大，随着转移核子数的增多，截面逐渐变小。

【重离子深度非弹性散射】深度非弹性散射介于直接反应和复合核反应之间，是重离子反应所特有的。反应的产物具有一定的统计性质，同时也部分地保留了入射道的特点。反应产物分为两组，高能组由准弹性散射造成，低能组由深度非弹性散射造成。随着碰撞参

量减小，核力开始起作用，两核相切时，摩擦力使入射粒子的相对运动被阻尼。碰撞参量越小，摩擦力越大，入射粒子的动能转移为原子核内激发能的程度就越大。低能组的能量比高能组能量低很多，且它们的自旋方向相反。

【全融合反应】全融合反应包括复合核过程，也包括复合系统在向平衡态过渡时发射粒子的过程。全融合反应的截面比复合核的截面大，但与整个反应的截面相比，仍很小，尤其对重核，这给通过复合核反应合成超重元素带来了困难。重离子核反应形成的原始复合核的激发能较高，角动量很大。可以通过几次级联中子蒸发来退激，也可以裂变，还可以在几次中子蒸发后发生级联 γ 辐射退激，对轻核，发射质子和 α 粒子的几率也较大。

【重离子反应中的转晕现象】重离子反应形成的复合核的角动量大。对这些高自旋转动态，实验发现，转动惯量与转动角频率的平方严重偏离线性关系。转动惯量随转动角频率平方的变化曲线呈现S形，这种现象叫做转晕现象。对转晕现象，有人认为，随着转动能级自旋的增加，科里奥利力使对关联破坏，原子核从“超导态”相变到“正常态”，从而发生转动惯量的异常变化。

【中子】电中性的基本粒子，20世纪30年代发现的，它的质量为 1.008665u ，和质子的质量(1.007825u)差不多。中子的自旋为 $\frac{1}{2}$ ，电荷为零。中子具有反常磁矩，值为

$$\mu_n = (1.913148 \pm 0.000066)\mu_N$$

式中， μ_N 为一个核磁子。中子可以 β 衰变。自由中子的半衰期约为

11分钟。

中子的穿透力极强，能穿过很厚的铅板。对中子的研究，与裂变的发现及核反应理论的建立与发展有着重要的作用。中子在工、农、医等各个领域有广阔的应用前景。

【中子源】 中子源大致分为以下三类：

(1) 放射性中子源。利用放射性核素衰变时放出的一定能量的射线，去轰击某些靶物质，产生核反应而放出中子的装置。放射性中子源主要有 α 放射性中子源，光中子源和核自发裂变中子源。

(2) 反应堆中子源。是利用重核裂变，在反应堆内形成链式反应，不断地产生大量的中子。反应堆中子源的中子通量大，谱形较为复杂。

(3) 加速器中子源。利用各种带电粒子加速器去加速某些粒子，用它们去轰击靶原子核产生中子。加速器中子源可以在较广阔的能区内获得单能中子。

【热中子、冷中子和超冷中子】 热中子是指中子的动能等于它在室温 ($T=293\text{K}$) 时的热能，热中子的动能的数值为 0.0253eV 。热中子与物质相互作用的截面较大，它能诱发很多核反应。冷中子是指平均能量比热中子能量更低的中子。超冷中子是指平均能量低于 10^{-7}eV 的中子。此外，在慢中子能区中，还有共振中子，超热中子、超镉中子等名词，这些都是表示不同能量的慢中子，没有十分明确的能量界线。

【中子与宏观物质的相互作用】 中子与物质相互作用，主要是中子与物质原子核的相互作用，它与核外电子的作用可以忽略不计。中

子与原子核作用,情况比较复杂,包括弹性散射,非弹性散射,辐射俘获和裂变等。对散射,仅改变中子的能量。对辐射俘获和裂变等反应,中子被吸收。中子能量不高时,在一些轻核上弹性散射起主要作用,散射截面几乎不变。中子能量很大时,散射截面也几乎不变。在吸收截面中最重要的是辐射俘获的贡献,这一过程较多地发生在重核上,可以在中子的所有能区上发生。吸收截面随靶核和中子能量的不同而变化。

【中子的慢化】在有些实际应用中,常需要能量为 eV 量级的慢中子。把能量高的快中子变成能量低的慢中子的过程,叫中子的慢化或中子的减速。中子与核碰撞将损失能量,特别是轻核。通常用两个量来描述中子的平均弹性碰撞,它们仅决定于核,与中子能量无关,它们是

(1) $\overline{\cos\theta}$ (散射角余弦的平均值),它等于 $\frac{2}{3A}$, A 是靶核的质量数。对轻核,中子倾向于向前散射;对重核,中子几乎各向同性地散射。中子的迁移平均自由程

$$\lambda_t = \lambda_s / (1 - \overline{\cos\theta}),$$

$$\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$$

为散射平均自由程, Σ_s 为总散射截面。

(2) ξ (能量的自然对数的平均变化)。对氢 $\xi=1$,对碳 $\xi=0.16$,对重核

$\xi = 2 / (A + \frac{2}{3})$ 。中子能量从 E_i 慢化到 E_f 的碰撞次数为 $N = \ln$

$(\frac{E_i}{E_f}) / \xi$, 通过的距离即慢化长度

$$L_m = \sqrt{\frac{\lambda_s^2}{\xi(3 - \frac{2}{A})} \ln\left(\frac{E_i}{E_f}\right)}$$

常用的慢化剂有水、重水、石墨等。

【中子的扩散】当中子慢化到与慢化剂原子的热扰动可比较的能区时，中子在碰撞时不是获得能量就是损失能量，以达到平衡。这就是说中子从密度大的地方向密度小的地方迁移，这过程称中子的扩散。

中子的密度 $n(r) = \frac{Q}{4\pi Dr} e^{-r/L_D}$ ，其中 D 为扩散系数， L_D 为扩散长度， Q 为中子的源强。可以看出中子密度正比于源强，并随距离 r 的增加而指数减小。

在反应堆物理中定义中子的徙动面积 L^2 ，

$$L^2 = L_m^2 + L_D^2$$

式中， L_m 为慢化长度。为屏蔽中子源，介质的线度大于 $5L$ 就可以了。

【中子的衍射】中子的德布罗意波长 $\gamma = \frac{0.286}{\sqrt{E}} (\text{\AA})$ ， E (eV) 是中子的能量。中子与物质相互作用时，只当中子波长与物质结构的线度差不多时，波动性才比较明显。要使中子在原子或晶体上产生衍射，只有较低能量的中子才行。热中子的能量为 0.0253eV ，相应 $\lambda = 1.82 \text{\AA}$ ，正好与原子线度和晶格间距同数量级。

衍射是波动性最突出的特征。1936年，人们就发现中子从晶体表面散射时出现衍射现象。中子衍射的布喇格公式为

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

其中 λ 是散射中子的波长, n 为衍射级次, d 为晶格间距, θ 为中子的掠射角。

【裂变与聚变】重核分裂成几个中等质量原子核的现象称为原子核裂变。1938年哈恩和斯特拉斯曼等人发现,用中子束轰击铀的产物出现中等质量的原子核,并放出大量能量。裂变是原子核的一种运动形态,它所释放的大量能量为人们提供了一个重要的新能源。轻原子核聚合成较重原子核的反应称为核聚变反应,简称核聚变。轻核聚变比重核裂变能放出更大的结合能。宇宙中能量的主要来源就是原子核的聚变。

【自发裂变】自发裂变是原子核在没有外来粒子轰击的情形下自行发生的核裂变。实验发现只有很重的核才能自发裂变。自发裂变与 α 衰变的势垒穿透类似,裂变的半衰期与势垒穿透的几率密切相关。一般说来,偶偶核的半衰期有随 Z^2/A 下降的趋势。同一种元素的各种同位素的半衰期差别较大。奇 A 核的自发裂变的半衰期比相邻的偶偶核的半衰期大。

【诱发裂变】在外来粒子轰击下,入射粒子与靶核组成复合核,复合核的激发能超过裂变势垒的高度时,裂变的几率显著增强。这种裂变称为诱发裂变。在诱发裂变中,中子裂变最重要。中子与靶核之间没有库仑势垒,能量很低的中子就可进入核内使核激发而发生裂变。裂变过程又有中子发射,从而有可能形成链式反应。热中子可引起裂变的核素叫易裂变核,又称核燃料。 ^{235}U , ^{239}Pu 和 ^{233}U 等都是核燃料。 ^{235}U 天然存在,但丰度很小。 ^{239}Pu 和 ^{233}U 要由核反应产生。

【裂变的液滴模型理论】液滴模型认为，一般核在球形时处于势能最低点，当核发生形变时，库仑能与表面能有相反变化。形变较大时，裂变核有可能向更大的形变发展，直至断裂。一个大液滴断裂成两个较小的液滴后，由于库仑斥力，两个荷电液滴分离飞开，裂变完成。对偶-偶核，液滴模型理论较成功。但对同一元素的各种同位素其自发裂变半衰期有较大变化，液滴模型无法解释。

【链式反应】易裂变物质吸收一个慢中子后发生裂变，裂变中子又可以引起易裂变核产生新的核裂变。这样一个使裂变反应持续进行下去的反应过程叫链式反应。产生链式反应的最基本的条件是：当核吸收中子而产生裂变时，裂变中子中至少有一个又能引起一次裂变。超过一个中子引起裂变，链式反应就会不断增强。

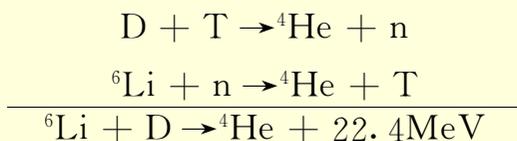
【裂变反应堆】裂变反应堆是实现可控制的链式反应的装置，简称反应堆。裂变产生的主要是快中子，但裂变要慢中子诱发才最有效。为产生自持的链式反应，释放出的快中子必须被慢化。中子在慢化时，可能被慢化剂俘获，也可能没有被裂变核俘获。总之考虑各种因素后，最后至少有一个慢中子能引起新的裂变，链式反应才会持续下去。反应堆要保持链式反应，但又不能使它无法控制。常用吸收截面很大的镉（Cd）或硼（B）做成柱形的控制棒来调节反应堆内的中子密度。裂变产生的能量通常通过冷却剂（如水）传出。

【原子弹】原子弹中的燃料几乎是纯的 ^{235}U 或 ^{239}Pu ，它们都是可裂变核素。一小块这种燃料是不会爆炸的，因为中子逃逸的太多。当

质量足够大（达临界质量以上），就会发生链式反应。这时核反应数一开始就指数增加，直到爆炸为止。原子弹的作用程序如下：引爆之前，裂变材料分成几个亚临界块，以防止偶然的核爆炸。用电引爆装置触发化学炸药爆炸，把亚临界块迅速推向中心，达到或超过临界质量，从而引起核爆炸。

【热核反应】将上亿度的等离子体约束在一定区域内，并维持一段时间，使其中轻核产生聚变反应，称为热核反应。等离子体是大量正离子和电子的集合体，是物质的一种新形态，称为物质的第四态。热核反应，要在高温高压下才能进行。太阳和其他恒星内部不停地进行着热核反应，能量以光和热的形式不停地向外辐射。

【氢弹】氢弹爆炸是一种人工实现的不可控热核反应。氢弹中的爆炸材料主要是氘、氚、锂的某种凝聚态物质，锂的作用是在爆炸过程中提供氦的供应，反应式为



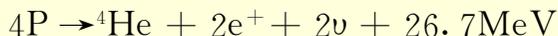
氢弹爆炸的初始高温由裂变的原子弹提供。装在氢弹内的裂变物质产生高温高压，使轻核聚变，放出更大的能量。一般原子弹的爆炸威力为2万吨（TNT炸药）级，氢弹的爆炸能力为100万吨级。

【受控热核反应】要实现受控热核反应，必须建立一个热绝缘的稳定的高温等离子体。热核聚变的能量应该大于加热和约束等离子体所用的能量。要达到自持等离子体聚变反应，必须满足以下三个条件：（1）等离子体必须加热到所需温度；（2）等离子体的密度

必须足够大；(3)所需要的温度和密度必须维持足够长时间。等离子约束装置主要有磁约束装置和惯性约束装置。磁约束装置中,最重要的是“托卡马克”装置,它提供一个围绕着电流的圆形磁场,这种磁场有助于“箍缩”等离子体和阻止等离子体扩散,也可作为加热等离子体的手段。惯性约束装置中,用激光或带电粒子来压缩和加热非常小的氘氦混合物小靶丸。小靶丸象个小型氢弹爆炸,并把能量传给壁面和冷却介质。

【宇宙线】从外层空间来的高能粒子一直不断地轰击着我们,地球表面每秒钟每平方厘米约有一个粒子穿过,投射到地球大气上的辐射是由原子核,电子,正电子,光子和中微子等组成。通常仅称带电粒子为宇宙射线。宇宙线在地球大气顶层与大气中的氧或氮等原子核相互作用,并产生级联过程。没有到达地球大气的宇宙线称为初始宇宙线。初始宇宙线中大部分是带正电的粒子,主要成分是高能质子,另处还有从氮到铁的各种原子核。宇宙线的来源目前尚不清楚,但大部分专家认为它是银河系产生的。超新星和中子星能产生宇宙线。在星际空间的粒子同磁场相碰撞而被加速。

【星体的能量】在核反应发现以前,星体内产生源源不断的能量是不可解释的。现在人们已知道,这些能量来源于原子核聚变。4个氢原子聚变成一个氦原子大约放出7MeV/核子,反应总方程式为



其中约25MeV用来加热星球,其余部分被中微子带走。这个反应是通过碳循环序列反应或是pp循环来完成的。其中碳循环在热星球中占统治地位,在较冷的星球上(如太阳),pp循环更重要。

【核合成】重元素是在星体形成后产生的。在一个星体内，引力压力趋向于减小星球的体积，内部气体压力趋向于反抗这一缩减，在星体内部，压力和温度是巨大的。在这种环境下，原子将完全电离成等离子体，核反应提供星体的能量以维持内部压力。但核燃料用尽时，星体由于引力而收缩，中心温度和压力增加，新反应就会发生，将达到新的平衡，新元素会不断形成。星体内核燃烧和引力收缩交替进行，二者都包含有重元素的合成。

【中子星】中子星半径约10公里，中心密度超过核物质密度（约 10^{14} 克/cm³）。在星球演化的早期阶段，内部温度很高，强作用过程是主要的。这一过程相对星体演化的特征时间是很快的。演化中的星体将保持在核平衡状态。后来当弱作用变得重要时，已经不能保持平衡。 β 衰变发射中微子带走部分能量，使星体尽量趋于平衡。

在中子星最外层主要是 ^{56}Fe 。在密度约为 10^4 克/cm³的地方，原子完全电离，电子的简并压力抵抗引力收缩。在密度高于 10^7 克/cm³处，多次电子俘获使得核素非常丰中子。在星心处，密度超过 10^{14} 克/cm³，形成中子、质子和电子的连续流体，其中中子占主体。中子的简并压力和硬核斥力一道抵抗引力收缩。

【探测技术与实验方法】核物理的种种实验都离不开对核辐射的探测。利用核辐射与原子电子的相互作用可以进行这种探测。探测核辐射的仪器称为探测器。探测技术是一门重要的实验技术，随着核物理和基本粒子物理的发展，以及原子能的广泛应用而发展。放射性是通过原始的核乳胶（X光胶片）发现的，原子的核模型是由原始的闪烁探测器（肉眼观测 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 的闪烁荧光）的实验结果所确认的。早期人们研制了正比计数器，G—M计数器，核乳胶和

云室等探测器，后来又研制了闪烁计数器，半导体探测器等，大大促进了原子核物理的研究和核技术的应用。高能物理的发展，为探测技术的发展注入了新的活力。如今，对物质结构更深层次的研究工作都离不开探测技术。在实际应用中，探测器和核电子学仪器联系起来成为整体，对不同类型的测量要选择不同的探测器类型。

【辐射探测的基本原理】辐射探测基本上是指记录射线数目，测定它的强度，确定射线的性质（如能量、动量、飞行方向等）。对不同的探测要求，制成的探测器的类型不同。绝大多数探测器是利用带电粒子对物质原子的电离和激发作用，也有利用契伦柯夫辐射和穿越辐射效应的。对不带电的粒子，通常都是利用其他作用机制产生次级带电粒子，通过探测次级带电粒子而间接地来探测的。射线按荷电性质，可分为三类：

- (1) 带电的射线： α 、 p 、 d 、 e^{\pm} 等。
- (2) 电磁辐射： γ 、 X 等。
- (3) 中性射线： n 、 ν 、 π^0 等。

【带电粒子探测】带电粒子通过物质时，会与物质原子的轨道电子发生库仑作用。轨道电子能量较低，相互作用的结果使轨道电子获得能量。轨道电子处在一定的能级上，当它获得的能量较少时，就会跃迁到较高的能级上；当它获得的能量较多时，就被电离。入射粒子在其路径上与许多原子作用，不断损失能量，产生许多正负离子对和激发原子，直到能量耗尽或穿出物质。绝大多数探测器都是利用电离或激发效应来探测入射粒子，它们的差别在于记录的方法不同，大致分为三类：

- (1) 收集电离电荷的探测器。包括气体探测器，半导体探测器

等。

(2) 收集荧光的探测器。包括闪烁探测器等。

(3) 利用离子集团作为径迹中心的探测器。包括固体径迹探测器、核乳胶、气泡室等。

另外带电粒子在原子核的库仑场中会发生韧致辐射，特别是电子。韧致辐射与探测器物质作用也会产生电离和激发。

【X 和 γ 射线探测】X 射线和 γ 射线是能量很高的电磁波，它们通过物质时，与核外电子和原子核的电磁作用产生光电效应，康普顿散射和电子对效应等。这三种作用都会产生次级电子，它们在探测器物质内会引起电离和激发效应。光电效应中，光子被吸收，能量全部交给一个电子。重元素的光电效应比轻元素强的多，低能 γ 射线又比高能的强得多。康普顿散射指 γ 光子的能量远大于电子的束缚能，光子与电子的散射就象电子是自由和静止一样。康普顿散射造成 γ 射线的连续谱。电子对效应是指 γ 射线与原子核电磁场作用，产生一个正负电子对。电子对效应在高能时占优势。光电效应和电子对效应发射的次级电子能量单一，且对高 Z 物质作用几率大。通常选用高 Z 材料来作 γ 射线探测器。

【中子探测】中子不带电，它与物质原子的电离和激发效应可忽略，中子通过物质的行为主要取决于它与物质原子核的强相互作用（即核反应）。探测中子只能通过中子核反应形成的次级粒子间接地进行。中子核反应的形式有很多种，这由中子的能量和探测器物质决定，反应的产物也不相同，因而就有不同的探测方法。探测中子的方法主要有：

(1) 核反冲法。记录中子与原子核弹性散射后的原子核。主要测

量快中子的能量。

(2) 核反应法。测量反应产物是带电粒子的核反应。主要探测慢中子通量和快中子能谱。

(3) 核裂变法。探测裂变放出的碎片，通常用来测中子的通量。

(4) 活化法。原子核吸收中子后，变成具有放射性的同位素。活化法主要用来测中子通量。中子探测器通常就是探测带电粒子的探测器加上进行中子反应的部分。

【正比计数管和 G—M 计数管】在电离室中，收集电场的强度取决于外加的工作电压。一开始，电流正比于工作电压 V 。然后在一定范围内，电流和 V 无关（电离室饱和），即电离室工作状态，只收集初始离子。工作电压超过饱和区电压后，初级离子在电场中被加速，容易发生次级电离。因而初始离子得到倍增，该装置处于正比计数管工作状态。正比计数管可用来研究软 β 射线和 X 射线。工作电压进一步升高，超过某一值时，装置中的离子就触发自持放电过程，放电电流与初始电离无关，处于 G—M 计数管工作状态。常用猝灭的办法来停止自持放电。G—M 计数管有 100 微秒量级的死时间。

【核电子仪器】核测量中的信号幅度通常很小，需要电子学放大器。核测量用到的放大器要具有较大的增益，好的线性和稳定性，快的时间响应和低的噪声。在核测量中常用的放大器有前置放大器和主放大器等。在许多应用中，常要使用记录脉冲数目的自动装置，即定标器。它是由双稳态触发电路和甄别电路来完成的。在核物理学中，常使用符合电路或反符合电路，只响应于符合脉冲或分离脉冲。用上述基本电路和 ADC 或 DAC 可组成复杂而通用的

仪器，如多道脉冲幅度分析器等。

【辐射探测器的主要特性】 (1) 探测效率，大致分为四部分：1. 探测器对源所张立体角 Ω 不是 4π 所造成的几何效率；2. 粒子入射到探测器界面上，由于散射或窗的吸收等造成的边界效率；3. 粒子进入探测器内探测器能将它转变成电脉冲讯号的物理效率；4. 电子仪器的甄别阈，分辨时间等造成的电效率。(2) 坪特性，探测器的计数率在一定的物理条件变化时变化相对较小，这个变化范围叫“坪”。计数系统要求探测器具有坪区，且希望坪斜较小。常用高压坪曲线，甄别阈坪曲线等来表示坪特性。(3) 计数率线性和分辨时间，分辨时间 τ 为探测器在记录一个粒子后的 τ 时间内，对第二个粒子不灵敏。分辨时间包括探测器分辨时间和电子学分辨时间。显然，当计数率较高时，由于存在分辨时间，使得计数率与实际的粒子数偏离线性。(4) 能量线性和刻度。探测器输出脉冲幅度和粒子在探测器内损失的能量的线性关系，称为能量线性。但在低能端和高能端存在非线性，它包括两部分：1. 探测器固有的非线性，电荷饱和、窗的吸收和边界效应造成的非线性；2. 电子学线路的非线性。在能量测量时，常要进行能量刻度，做非线性修正。(5) 能量分辨率。即探测器分辨不同能量粒子的特性，常用半高宽与峰值的幅度值之比来表示。影响能量分辨率的因素有：1. 电离离子数的统计涨落；2. 脉冲堆积；3. 窗厚不均匀，或入射粒子的入射角不同造成的窗的不均匀吸收；4. 分析器的道宽；5. 探测器噪声和电子学噪声。(6) 空间分辨率。即探测器分辨粒子位置的能力；(7) 时间分辨率。影响时间分辨率的因素主要有：1. 输出脉冲的上升时间；2. 输出脉冲的宽度；3. 输出回路的时间常数；4. 电子学线路的分辨时间等；(8) 抗辐照损伤能力。

探测器参量表

探测器	时间分辨能力(秒)	死时间(秒)	空间分辨能力(cm)	能量分辨率(%)
电离室	10^{-3}	10^{-2}	a	1(α)
正比计数器	10^{-6}	10^{-5}	a	14(x)
G—M 计数器	10^{-6}	10^{-4}	a	—
半导体探测器	10^{-8}	10^{-6}	0.5	0.1—1
闪烁探测器	10^{-8}	10^{-6}	a	10
切伦科夫探测器	10^{-9}	$\sim 10^{-8}$	a	10^{-3}
塑料	10^{-9}	10^{-8}	a	几+

a 表示与探测器大小有关

【计数测量】通常选择探测效率高，分辨时间小，坪特性较好的探测器。对重带电粒子常用 PN 结型半导体探测器和 ZnS (Ag) 闪烁探测器；对 β 射线和电子常用 G—M 计数器或正比计数器等；对高能带电粒子常用塑料闪烁探测器等；对 γ 射线和 X 射线常用 G—M 计数器和 NaI (Tl) 闪烁探测器，低能的 γ 射线和 X 射线常用正比计数器和半导体探测器；对慢中子常用 BaF₃ 正比计数器、裂变室等，快中子用含氢物质的探测器等。在计数测量中还要考虑本底计数，寿命和环境影响等因素。

【带电粒子能谱仪】对重带电粒子，电磁谱仪的能量分辨率较好(0.01%—0.1%)，在最精密测量中都是用这类谱仪。但电磁谱仪

设备庞大，费用高，耗电多，探测效率低，不便于进行多道记录。在普通场合下，广泛使用半导体探测器作为重带电粒子谱仪。在 β 射线和电子的精密测量中，仍用磁谱仪。在某些场合，可用闪烁探测器（能量分辨率为10%左右）和半导体探测器（能量分辨率为1%左右）。

【 γ 射线能谱仪】 γ 谱仪一般选用 NaI (Tl) 闪烁谱仪和同轴 Ge (Li) 半导体谱仪。低能 γ 谱仪常用正比计数器，半导体探测器等。 γ 射线的能谱十分复杂，除有 γ 射线能量的全能峰外，还有康普顿连续谱，反散射峰，次级效应产生的电子，X射线和湮灭 γ 射线逃离探测器造成的逃逸峰，迭加效应造成的迭加峰，放射源和内转换效应产生的X射线峰等。为提高峰康比，往往选用重元素做探测器物质。人们常用剥谱法，逆矩阵法，最小二乘法等，并借助计算机来分析复杂的 γ 谱。

【粒子鉴别技术】常用的粒子鉴别方法有以下几类：

(1) 脉冲形状甄别方法，根据各种带电粒子在探测器中产生的脉冲形状来区分粒子，主要用在中子与 γ 射线之间的甄别。

(2) 飞行时间法，主要测量质量差异较大的粒子。根据它们通过一定距离的飞行时间的差异来鉴别粒子。

(3) $\frac{dE}{dx}$ 方法，根据带电粒子在物质中的能量损失的程度不同来鉴别粒子。

(4) 磁分析方法，根据不同质量，不同电荷的带电粒子在磁场中的偏转不同来鉴别粒子。在实际应用中，常采用以上几种方法的组合而鉴别粒子。

【核寿命测量】包括核素衰变 (α, β) 的寿命和核激发态的寿命的测量。对 α, β 衰变的长寿命核常用：

(1) 直接测量法，根据放射性衰变规律直接求出核素的衰变常数。

(2) 比放射性法。比放射定义为 $A_m = \frac{-dN}{dt}/m$ ，单位质量的放射性核素数目为 $n_N = \frac{N}{m}$ ，则衰变常数 $\lambda = A_m/n_N$ 。此法适用于半衰期10年以上的核素。

(3) 子核含量法。根据一定时间内，子核的含量的变化来确定衰变常数。此法适用于特长寿命的核素。

对短寿命核素，常用的方法主要有：

(1) 直接测量法，适用于 $1-10^{-4}$ 秒的核素。

(2) 延迟符合法，适合测级联衰变的中间态寿命和核反应生成核的激发态寿命，它们有确定的起止信号。适用 $10^{-4}-10^{-10}$ 秒的核素。

(3) 微波调制法，根据带电粒子束在高频场中到达确定靶上时，相位差的变化来确定粒子寿命，它的适用范围是 $10^{-9}-10^{-12}$ 秒。

(4) 核反冲法，包括反冲核的飞行距离法（适用范围为 $10^{-9}-10^{-12}$ 秒）和发射 γ 光子时的 γ 能量多普勒线移法、多普勒线移衰减法（适用范围 $10^{-12}-10^{-14}$ 秒）。

(5) 确定能级宽度法，根据测不准原理确定能级的寿命。

【同位素示踪】示踪方法是引入少量放射同位素，并随时观察其行踪的方法。示踪方法的灵敏度很高（有的只有20个原子就可鉴别出来），辐射是专一的，不受放射性衰变的干扰。在肥料中掺入少量放射性 ^{32}P 可以找到给植物施磷肥的最好方法。给人体注射无害的

放射性 ^{24}Na 溶液，可进行人体血液循环的示踪实验。监视掺合了放射性同位素流体的行踪可以确定许多种物质的流速。

【同位素检测】材料的某些物理性质用一般的方法很难搞清楚，但是通过观察辐射和物质的相互作用可以容易地进行测量。测量放射源放出的 β 粒子透过塑料薄膜或纸张之后的 β 粒子数就能确定塑料薄膜或纸张的厚度。用探测 γ 射线通过物质的方法在外部可以测定管道里流体的密度。通过研究被氢慢化的中子可以估计土壤的含水量。在油井钻探中，“测井”过程可以根据把探测器从天然放射性岩区移到含石油或其他液体区时计数的变化，也可以用中子水分测量仪测量石油的存在（石油中含氢）。

【同位素测年代】用 ^{14}C 测量考古学年代。宇宙射线在大气中由于核反应不断形成 ^{14}C ， ^{14}C 与氧化合最后进入有机体内。活着的动植物中的碳和大气中的碳有相同的同位素组成。动植物死后，C的转换停止并且 ^{14}C 开始以5730年的半衰期衰变消失。很明显用测量碳的比放射性的方法可以确定一个含有机碳的物体的年代，这个方法所确定的极限大约在30000年左右。用铀和它的同位素确定地质年代。我们不知道地球早期的年代，但是在某一时期以不同成分结晶和分凝的岩石达到现在的结构。放射性测年代基本上与岩石形成的时间有关。如果在岩石形成时含一定量的铀，其中积累着 ^{238}U 衰变的氦和8次 α 衰变的 ^{206}Pb 。根据铀、氦的含量比，即可得出岩石的年龄。

【废物利用】生产核能产生的各种同位素，是有害的废物，但也可给人类提供安全的保障。 ^{85}Kr 可作为机场跑道和煤矿照明用的自

发光源的激活成分，发光的颜色取决于荧光体，亮度取决于 ^{85}Kr 的总量。其优点是寿命长，不需要能源，与天气条件无关。使用 ^{85}Kr “束流断路器”，可作为警报器开关。 ^{241}Am 是 α 放射体，它的辐射可使空气电离，烟雾可使电导率发生改变，它可以做成防火用的烟雾探测器。

【同位素在农业上的应用】农作物繁殖的科学包括选择稀有的植株并使它们杂交以获得永久的和能再繁殖的杂交品种，这些杂交产品可以获得高产、抗病和能适应新环境的农作物。辐射的应用可以加速这种过程，通过辐照种子或用辐照过的植株进行插枝，可以诱发人们所希望的突变。为根除某些虫害，成功地应用了所谓雄性不育术。根除的程序是，在实验室大量繁殖雄性虫，用 γ 辐射使它们绝育，然后把它们放到虫灾地区。绝育雄性虫和正常雄性虫之间展开激烈竞争，在一个周期后，害虫数量大大减小。

【辐照在化学中的应用】辐照能改进纤维，用电子或 γ 射线可使某些聚合物的平行分子链连接起来（即交联）。辐射过的聚乙烯具有较好的抗热性，经过辐射后的适宜的聚合物结合到纤维基底上，可以制成各种不吸尘土的织物。使用高能 γ 射线可以引发某些反应，是一种很好的催化剂。 γ 辐照可用于木材的塑化加工，使木材表面光滑并能防火。 γ 辐照能延长食品的在架时间，它的研究还在进行中。

【辐照在医学上的应用】辐射可来自远距离治疗仪中离开病人有一段距离的放射源，或者来自插入人体的密封容器中的同位素，或者来自含有同位素的注入液或摄取液。辐射剂量对治疗某些疾病

(如癌症)很重要。多年来习惯使用 X 射线,但人们发现 ^{60}Co 源的贯穿 γ 射线对人体较深部位能产生较高剂量,对皮肤影响却极小。利用加速器产生的带电粒子进行辐照,可治疗反常大脑垂体。在某些情况下,慢中子照射含硼溶液的肿瘤是有益处的。用同位素磷和碘照射白血病和甲状腺机能亢进部位具有好的疗效。 ^{137}Cs 的 γ 辐射能有效地杀死病原体,可供医疗用品消毒用。使用 X 射线, ^{60}Co γ 射线和中子照相法可以检查人的身体并诊断疾病。

【中子活化分析】利用中子与待测样品发生核反应,生成放射性核素(称活化或激活),然后测量其放射性活度和能谱,由反应截面,中子通量,射线能量和强度,以及半衰期,确定待测样品的元素成份和含量。常用慢中子的 (n, γ) 反应来激活样品,或快中子的阈能反应来激活样品。

活化分析可用于纺织业中的检验低劣产品,石油工业中检验石油的初馏程度,也可用于犯罪调查,艺术作品的鉴定,疾病的诊断等方面。

【带电粒子核反应分析】具有一定能量的带电粒子入射到靶物质时,将引起核反应。如果反应的剩余核具有放射性,则根据放射性核素半衰期及射线强度测量,就可以定出被分析元素的种类和数量,这种方法叫带电粒子活化分析法。如果直接测量核反应产生的出射粒子,来确定被分析样品元素的种类和数量,这种方法叫带电粒子瞬发辐射分析法。带电粒子核反应分析成为表面层物质分析的一种重要手段,它特别适用于轻元素分析,不仅能给出元素的含量,而且能给出元素的深度分布。

【X 射线荧光分析】以一定能量的光子、电子、质子、 α 粒子或其他离子轰击样品，从样品原子中激发出特征 X 射线，然后用 X 射线能谱仪分辨出不同元素的特征 X 射线，并测量其强度，从而确定待测元素的种类及含量。X 射线分析技术具有灵敏度高，多元素同时分析，对样品无损坏等优点，在环境保护，生物医学，材料科学，考古，刑事侦察等方面有广泛的应用。

【背散射分析】离子入射到靶物质中，与靶核发生大角度库仑散射，称为离子背散射或核背散射。被散射的离子跑出靶物质，用带电粒子能谱仪（半导体能谱仪）来分析这些背向散射出来的离子能谱，可得出元素的质量、含量和它的深度分布情况。背散射技术广泛用于半导体工艺，薄膜制备，冶金等领域，它具有方法简便可靠，不破坏样品结构等特点，是物质表面层分析的有效手段。背散射技术对重元素分析灵敏度较高，对轻元素分析不灵敏。

【射线照相技术】包括用 X 射线， γ 射线或中子对活组织或物质的内部情况的研究。X 射线贯穿人体组织的程度取决于物质密度，骨骼与其他密集物的影子会出现在照相胶片上。 ^{60}Co 的 γ 辐射对检查金属中的缺陷特别有效，用带有钴射线照相设备的扫描装置扫描，可以揭示金属的内部裂缝、焊接缺陷和非金属夹杂物。有些物质对光子不敏感，但这些物质中富有氢，如塑料和橡胶，这时中子照相法就弥补了 γ 射线照相法的不足。

【核磁共振技术】磁场中的样品的原子核在外加射频场的作用下，当外射频满足某些条件时，就会产生原子核系统对电磁波的强烈吸收，这种现象称为核磁共振。在同一磁场下，核不同，各核的回

磁比也不同，因而其共振频率也不相同。在核磁共振现象中，高能级上的核必须以非辐射方式放出能量，回到低能级，即通过核磁共振驰豫过程，恢复核自旋体系的玻尔兹曼平衡，使低能级上的粒子数再度过剩，才能继续发生核磁过程。驰豫时间与化学键联有关。核磁共振方法不破坏样品，能迅速准确、精密地研究物质内部结构，在化学，分子结构和固体物理等领域有广泛的应用。

【正电子湮没技术】正电子与物质中的电子相遇时会发生湮没现象。湮没时会发射 γ 光子，其中 2γ 湮没几率最大。正电子湮没技术包括正电子湮没寿命测量， 2γ 湮没角关联测量和湮没 γ 射线多普勒增宽测量。通过对正电子湮没过程的研究可以得到样品中有关电子密度和电子动量密度分布的信息，从而可以得到样品中缺陷浓度的变化和有关相变的信息。正电子湮没技术对样品的材料的种类无任何限制，对材料的温度几乎没有限制，对样品中原子尺度的缺陷和各种相变极端敏感，在材料科学的研究方面有广泛的应用。

【固体的辐照效应】当重带电粒子入射固体材料时，沿粒子路径会引起材料的辐射损伤，造成位错原子和空位，或使高分子物质的化学键打断，形成分子碎块，自由基等。用大倍数的电子显微镜可以看到这个很窄的辐射损伤区的截面，截面的线度很小，只有几十埃。

【半导体离子注入掺杂】利用加速器产生的具有一定能量的正离子束流，轰击半导体材料。通常用硼离子轰击N型硅，磷离子轰击P型硅，这种离子注入掺杂法形成PN结，制成的工艺简单。用磁分

析器能排除杂质，使离子束具有高纯度，这样做成的材料对环境更稳定。通过调节离子束的能量和强度可以很容易得到所需深度和掺杂浓度。

【医用 CT】 CT 的英文意思是“计算机断层成像”。它的基本原理是：放射源和探测器同步逐点移动，测得某一方向的投影数据，然后同步转某个角度，再测得另一方向的投影数据……。最后可以得到受辐射物体内部各阵格的剂量值的联立方程组，从而得到各阵格的剂量值，由此可以得到物体内部的密度分布。当然在图像重建的过程中离不开计算机。

在医学上，CT 使得对人体的检查手段日臻完美，逐渐形成系列化的全面诊断学科，使医学影像达到一个新的发展阶段。尽管 CT 的门类较多，但从测量数据获取方式的类别划分，主要有三种方式：

(1)透射法。X—CT, γ —CT 等。

(2)放射法。正电子 CT
(PECT)。

(3)核磁共振法。核磁共振 CT
(MRI—CT)。

【X—CT】 X 线管放到受检体一侧，检测器置于另一侧。X 射线透过受检体时受到衰减，衰减值反映射线经过透射路径时被吸收的状况，其数值决定于相应路径上受检体的组织构成。按等距移动这一对源和检测器或并排设置多组源和检测器，可以测得受检体在该平面的全部透射投影值。X—CT 是目前技术最成熟，安装使用最多，临床经验最丰富的一种。扫描和获取数据的时间已达毫秒级

水平，空间分辨达毫米量级，对占位性病变的准确率达95%以上。 γ 相机显示的通常是平面图象，如配以计算机和准直器等装置，便具有断层显示的功能，成为 γ -CT。

【PECT】即正电子CT。将同位素等放射源注入受检体内，它所释放的正电子与体内存在的电子符合作用，向相反方向射出两束 γ 射线，分别由周围位置相对的检测器接收。在实用中大都用数十或数百个检测器排成圆环状，将受检体包围在其中的方法。精度受所能排列的检测器数目限制。

核医学示踪能反映体内生化变化，可以显示组织器官的功能。目前正电子CT的主要技术问题是提高空间分辨率，减少放射性强度涨落，要求快速和动态成象。

【核磁共振CT】又称干净的诊断方式，因磁场对人体组织没有近期明显伤害。核磁共振中存在驰豫过程，定义 T_1 为射频场撤除后恢复到初始状态的时间， T_2 为自由感应信号衰减到零的时间。核磁共振信号和 T_1 、 T_2 构成成象的基础。对不同的组织， T_1 和 T_2 值不同。 T_1 、 T_2 的变化反映生理生化状况。核磁共振信号（通常是氢核的核磁共振信号）的大小也能区分人体的不同器官。核磁共振图象与其他CT图象相比较，可以更清晰地显示软组织的细节。核磁共振CT设备中没有放射源和探测器阵列，主要依靠计算机软件方法，这极大地方便了断面厚度和位置等参数的改变，且避免病人的移动。此外它还没有电离辐射，不因器官密度不同而产生虚影等。核磁共振CT的成像时间有待于缩短，空间分辨率亦有待提高。

【沟道效应与阻塞效应】带电粒子在单晶体运动时出现的一种现象，发现于60年代。在单晶体中，原子有规则地按一定方向整齐排列，构成晶格点阵。沿晶轴方向，晶格点阵之间存在沟道走廊，沟道周围是由原子列围成的“壁”。当一束准直很好的正离子束沿某晶轴方向注入时，离子被限制于原子列成很小角度的范围内，离子所受的停阻作用较小。这种现象称为沟道效应。离子注入技术是沟道效应的很好应用。另一方面，如果单晶本身的原子列上的某个原子核向原子列沿线方向发射一个正粒子，必然受到列上前面邻近原子的散射而改变方向，正粒子不能沿与原子列成很小角度的范围内发射。这使得该正粒子的角分布沿晶轴（面）方向出现一个“坑”。这种现象叫阻塞效应。阻塞效应可直接测量核能级寿命，测量的时间范围在 10^{-15} — 10^{-18} 秒。

基本粒子

【基本粒子】本义指无内部结构不可再分的物质基本单元。最早发现的基本粒子是电子。此后，在原子性质和原子结构的研究中，先后发现了质子和中子。研究表明，体积很小、质量很大的带正电的原子核和带负电的电子在电磁作用下构成了原子；质子和中子（通称为核子）在一种作用强度很大的短程力（后称强相互作用）的作用下构成了原子核。构成宏观物质的原子并不是构成物质的最基本组元，它是由电子、质子和中子构成的，人们把这些构成原子的组元称之为基本粒子。基本粒子所具有的与通常物质性质

不同的产生、湮灭等性质，由相对论量子场论来描写。后来，在研究原子核性质、原子核结构、核子之间的强相互作用性质的实验中，以及观测宇宙线的实验中，又发现了大量基本粒子。到60年代相继发现了200多种基本粒子。按照它们的性质可分为三类。一类是传递相互作用的粒子，如光子（电磁相互作用传递者）；第二类是只参与弱相互作用和电磁相互作用的轻子，如电子，中微子；最后一类是不仅参与电弱作用，而且还参与强相互作用的强子，如表1列出的一些最低能态的强子，表中列出了这些粒子的自旋、宇称和质量。其中质量是以兆电子伏为单位。每种粒子符号右上方的（+，-，0）号标志以电子电荷为单位的电荷，分别表示带一个正电荷，一个负电荷和中性粒子。所发现的粒子中大部分是强子。

表1 一些最低能态强子和它们的性质

强子	(自旋) 宇称	质量 (MeV)
π^\pm	0^-	140
π^0	0^-	135
K^\pm	0^-	494
K^0, \bar{K}^0	0^-	489
η	0^-	549
η'	0^-	958
D^\pm	0^-	1869
D^0, \bar{D}^0	0^-	1865
D_s^\pm	0^-	1971
B^\pm	0^-	5271
B^0, \bar{B}^0	0^-	5274
ρ^\pm, ρ^0	1^-	770
ω	1^-	783

强子	(自旋) 宇称	质量 (MeV)
K^*	1^-	892
φ	1^-	1020
J/ψ	1^-	3097
Υ	1^-	9460
p^\pm	$1/2^+$	938
n^0	$1/2^+$	940
Λ^0	$1/2^+$	1116
Σ^+	$1/2^+$	1189
Σ^0	$1/2^+$	1192
Σ^-	$1/2^+$	1197
Ξ^0	$1/2^+$	1315
Ξ^-	$1/2^+$	1321
Ω^-	$1/2^+$	1672

对强子的性质和轻子—核子深度非弹性散射实验的研究表明,如此众多的强子(比门捷列夫周期表所列元素还多)并不是基本的,而是由带分数电荷的更基本的组元——夸克构成的。迄今为止所发现的强子都可由称为上(u),下(d),奇异(s),粲(c)和底(b)五种夸克构造出来。例如,质子是由两个上(u)夸克和一个下(d)夸克构成, π^+ 介子由一个上夸克和一个反下夸克构成。作为基本粒子的强子已不基本。但是,迄今为止还未发现轻子有内部结构,人们现在把轻子和夸克通称为基本粒子,有时也称粒子。粒子之间除了存在可忽略的极弱的引力作用外,还存在着弱相互作用,电磁相互作用和强相互作用。表Ⅱ列出了这四种基本相互作用力的性质。

表2 四种基本相互作用力

力的类型	引力	弱力	电磁力	强力
产生作用的距离	延伸到非常大的距离	小于 10^{-16} 厘米	延伸到非常大的距离	小于 10^{-13} 厘米
10^{-13} 厘米距离处的强度	10^{-38}	10^{-12}	10^{-2}	1
产生裂变的时间 (对于一个典型的质量强子)		10^{-10} 秒	10^{-20} 秒	10^{-23} 秒
传递粒子	未发现	W^{\pm} 、 Z^0	光子	胶子
粒子质量	未知	$m_{W^{\pm}} = 80$ 吉电子伏 $m_{Z^0} = 91$ 吉电子伏	0	假定为0

在电、弱和强相互作用下粒子产生、湮灭和相互转化的规律由规范理论来描写。描写粒子电弱作用下运动变化规律的是电弱统一规范理论，描写强相互作用下夸克之间的运动变化规律的是量子色动力学（SU(3) 定域不变的规范理论）。现在认为，电弱统一理论和量子色动力学统一描述了构成物质世界的最基本组分的三代轻子和三代夸克以及它们的反粒子（见表Ⅲ）在弱电强作用下的运动变化规律。

表3 粒子的一些性质

轻子		自旋=1/2		夸克		自旋=1/2	
味	质量 (吉电子伏)	电荷	味	近似质量值	电荷		
ν_e	$<2 \times 10^{-8}$	0	上 (u)	4×10^{-3}	2/3		
e	5.1×10^{-4}	-1	下 (d)	7×10^{-3}	-1/3		
ν_μ	$<3 \times 10^{-4}$	0	粲 (c)	1.5	2/3		
μ	0.106	-1	奇异 (s)	0.15	-1/3		
ν_τ	$<4 \times 10^{-2}$	0	顶 (t) (还未观测到)	>89	2/3		
τ	1.777	-1	底 (b)	4.7	-1/3		

【光子】电磁场的量子。通常用希腊字母 γ 表示。在真空中，所有光子都以常速度 c (称为光速) 运动。光子静止质量为零。光子的自旋量子数等于1，其值为 $\frac{h}{2\pi}$ ， h 为普朗克常量。它是电中性粒子，是带电粒子间电磁相互作用的传递者，只参与电磁相互作用。光子的能量 E 和动量 P 可分别表示为： $E=h\nu$ ， $P=h/\lambda$ ，其中 ν 是光的频率， λ 是光的波长。不同光子具有不同的频率和波长。光子能量分布在很宽的范围：从高能 γ 射线，X 射线，紫外线，可见光，到低能红外线，微波，射频和热辐射等。量子电动力学理论完全描写了光子与带电粒子之间的电磁相互作用。光子概念的提出以及对它的研究和确认，直接影响并推动了量子力学和相对论量子场论的建立和发展。光的连续电磁波观念成功地解释了光的各种宏观实验现象。但是，到了19世纪末，它在解释热辐射（黑体辐射）时，遇到

了不可克服的困难。1900年，普朗克发现，若视热辐射为一份一份不连续地进行，就可圆满地解释它的实验规律，并称热辐射能量的最小份额为（能）量子。1905年，爱因斯坦利用这一概念成功地解释了光电效应，并把电磁场的量子命名为光（量）子。1913年，玻尔接受这一观念，提出原子系统的量子化条件，揭开了量子论研究的序幕。1922年通过观察研究光子与电子散射的康普顿效应，从实验上确认了光子的存在。1927年，狄拉克建立了电磁场量子化理论，从而开创了相对论量子场论的研究和建立的新时代。

【 W^\pm 粒子】又称中间玻色子。分为带单位正电荷和负电荷两种，自旋（量子数）为1，质量 $m=80.6$ 吉电子伏，衰变宽度 $\Gamma=2.25$ 吉电子伏。 W^\pm 是传递弱相互作用的规范粒子，使参与作用的粒子的电荷改变一个单位（又称带电流弱相互作用）。 W^\pm 传递弱相互作用产生的效应，在很早的 β 衰变现象中就被发现，从而使人类第一次认识到，自然界还存在着这样一种新型的基本相互作用。实验上， W^\pm 是1983年从 $W \rightarrow e\nu$ 事例发现的。理论上，早在探索弱相互作用理论的初期，许多物理学家就根据量子场论原理推测，短程（比强相互作用力程还短）弱相互作用一定由质量很大的所谓中间玻色子传递。但是直到20世纪60年代电弱统一理论建立、预言了它的质量后，才被实验重视，并把对它的发现和实验研究作为检验电弱统一理论正确与否的重要实验。结果，它的质量实验值与理论预言值完全符合。它的发现，是对电弱统一理论的重要支持。

【 Z^0 粒子】一种电中性规范粒子，属于中间玻色子。其自旋量子数为1，质量 $m=91.16$ 吉电子伏，衰变宽度 $\Gamma=2.5$ 吉电子伏。 Z^0 传递粒子间的弱相互作用，不改变粒子的电荷（又称中性流弱相互作用）。

用),但使宇称破坏。 Z^0 粒子的质量首先是由电弱统一理论预言的,因此,寻找 Z^0 粒子及其在弱相互作用中产生的现象,就成为检验电弱统一理论的重要实验。1973年,由 $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + (A, Z)_0 \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \sum_j (A, Z)_j$ 实验发现了 Z^0 产生的效应。1983年,从 $Z \rightarrow e^+e^-$ 实验发现了 Z^0 粒子。其质量的实验值与理论的预言值符合得相当好,进一步确认了电弱统一理论的正确性。

【胶子】传递夸克之间强相互作用的粒子。 $SU(3)$ 色对称性的规范场的量子。理论上指出,胶子是电中性矢量粒子,具有色量子数,有8种,质量为零,自旋量子数为1,只参与强相互作用。迄今为止,实验上尚未发现自由胶子。可能存在胶子的迹象最早出现在电子—质子深度非弹性散射实验中。实验表明,质子里点状带电物质的能量仅为质子能量之半。那么,另一半必定由电中性成分携带,因而推测质子中存在不参与电磁相互作用的成份,后称其为胶子。另一个实验是正负电子对撞湮没产生的三喷注现象,其中的两个喷注被认为是运动夸克形成,而另一个喷注被认为是发射胶子形成的。由于胶子带色荷,胶子与胶子可形成色中性的束缚态,一般称为胶球。所以,胶子存在的更直接的实验验证,要等待胶子球的发现来确认。(尽管有些实验已发现具有胶球的某些性质的强子态,但仍存在不确定因素)。

【黑格斯粒子】电弱统一规范理论中使 W^\pm 和 Z^0 规范粒子获得质量的黑格斯机制预言的粒子。通常用字母H表示。理论上指出,它是电中性标量粒子,与稳定物质的耦合非常弱,与 Z^0 耦合相对强些,在最小电弱统一理论中只有一个这种粒子,但不能预言其质量。实

验上，至今尚未发现它，只是给出其质量的下限为24吉电子伏。观测黑格斯粒子的实验是检验电弱统一理论的重要实验，现在加速器可以产生相当多的 Z^0 粒子，人们期望能在 Z^0 的衰变中观测到它。关于黑格斯粒子的研究，是目前粒子理论和实验所关心的重要问题之一。

【轻子】不参与强相互作用、自旋量子数为 $1/2$ 的费米子族。由于最初发现的轻子—电子和 μ 子的质量均比最轻的强子 π 介子还轻而得名。1975年发现的它的第三代成员 τ 子，其质量比重子族中的核子还重。轻子的本质特征是不参与强相互作用，只参与电磁相互作用和弱相互作用。它们都有反粒子。迄今，已发现了五种轻子。按照粒子物理的标准模型，应该存在三代六种轻子： (ν_e, e) ， (ν_μ, μ) ， (ν_τ, τ) 。但实验上尚未发现与 τ 子相伴随的轻子 ν_τ 。此外，实验上，一直到 10^{-16} 米这么小的尺度，仍未发现轻子的内部有结构。人们认为，它们和三代夸克（见夸克模型）是构成物质的最深层次的组分。所有轻子都具有轻子数，这是个可加量子数。正反轻子的轻子数分为 $+1$ 和 -1 。每代轻子还有标志其代的可加量子数，它们分别是电子轻子数， μ 子轻子数和 τ 子轻子数。迄今为止的实验表明，电子轻子数和 μ 子轻子数在它们所参与的反应过程中，都保持守恒。除质量外，在参与相互作用时，轻子具有完全相同的性质。轻子究竟有多少种？为什么？这是粒子物理尚待解决的重要问题。

【电子】轻子的一种，通常用英文字母 e 表示。是人类发现的第一个“基本”粒子，是电荷的最小单元（可单独存在的），最轻的带电粒子。它构成了原子的负电部分。1897年，英国物理学家汤姆逊通过测量阴极射线中带电粒子的荷质比，发现了电子。电子的发现不

仅打开了研究“基本”粒子的大门，也为人类科学地认识原子和原子结构奠定了基础。电子的质量等于0.51兆电子伏，寿命的下限为 2×10^{22} 年。由于电子带电、稳定、无内部结构，在高能物理研究中，常用加速的电子作为探针，探测强子的内部结构；也用加速的高能正负电子碰撞，产生并研究高能粒子。对各种物理条件下物质中电子行为的研究，是发展电子技术的基础。

【正电子】又称阳电子，电子的反粒子。带单位正电荷。它与电子除了所带电荷的符号相反以外，其他与此无关的性质完全相同。1928年，英国科学家狄拉克研究描写电子的相对论量子方程时，首先在理论上预言了正电子。1932年，安德森在探测宇宙线的云室中，发现在磁场中有与电子偏转方向相反的径迹。分析表明，产生该径迹的粒子之质量、荷质比和磁矩等物理量的绝对值与电子的完全相同，从而确认了正电子的存在。正电子与电子相遇会立即湮灭为光子。由于宇宙空间经常存在较多的自由电子，所以就很少见到正电子。正电子的发现验证了相对论量子场论的正确性，从而使人类加深了对物质世界和真空的认识。

【 μ 子】轻子的一种，带单位负电荷，其质量是电子质量的207倍。1936年由安德森和尼德迈耶首先在宇宙线中发现。其寿命为 2.2×10^{-6} 秒，衰变为电子 e^- 、反电子中微子 $\bar{\nu}_e$ 和 μ 中微子 ν_μ ： $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 。因为它的质量与汤川预言的传递核力的介子之质量相近，发现之初曾误认它是参与强相互作用的 π 介子。直到1947年发现 π 介子之后，人们才认识到， μ 子与电子相比，除了质量大、不稳定、带 μ 子轻子数外，其他性质完全相同，它不参与强相互作用，在电磁相互作用和弱相互作用下的性质，由弱电统一理论描写。

【中微子】电中性轻子,常用希腊字母 ν 表示。是无静止质量的稳定粒子,自旋有平行或反平行于它的运动方向的两种取向,携带动量和能量。已经发现的中微子可分为四种:电子型中微子 ν_e 及其反粒子 $\bar{\nu}_e$, μ 子型中微子 ν_μ 及其反粒子 $\bar{\nu}_\mu$ 。理论上认为应该存在但实验上尚未发现的是 τ 子型中微子 ν_τ 及其反粒子 $\bar{\nu}_\tau$ 。中微子只参与弱相互作用。由于弱相互作用强度小,力程短,中微子对物质的穿透能力极强,穿过地球那么厚的物质,只有 10^{-10} (百亿分之一) 的中微子与物质作用。因此,直接探测中微子是很困难的。1931年,泡利在解释 β 衰变实验时,为了保持能量和动量守恒,认为实验中测量不到的所谓“丢失能量和动量”,可能被一种电中性的质量非常小的粒子带走了。1932年,费米研究描述 β 衰变现象的理论时,把这种粒子命名为“中微子”。后来,科学家为了确认中微子的确存在,曾试图直接探测中微子。1956年,科恩和莱因斯检测到,核反应堆产生的反电子中微子 $\bar{\nu}_e$ 被探测物质俘获后产生的逆 β 衰变过程: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 。该过程中, $\bar{\nu}_e$ 作为一个真实粒子打在质子 p 上,产生了上述反应。1973年在日内瓦的欧洲核子研究中心,利用高能核子加速器产生的高能 ν_μ ,检测到 $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ 和 $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \nu_\mu$,其中 N 代表原子核。通过测量被激发的原子核 N' 及能量变小的 ν_μ ,证实了上述过程确是 ν_μ 作为一个粒子打在了 N 上。探测中微子时,或者具备产量非常丰富的中微子源,或者利用上千吨物质作为探测装置,有时两者兼备,否则探测到中微子的机会是极少的。中微子穿透能力极强的特性有着重要应用。在高能物理中,人们常用它探测强子的内部结构。在天体物理中,人们试图通过对来自宇宙空间的中微子的检测,获得恒星内部的真实信息,研究恒星的内部结构,以及恒星演化过程中粒子的反应过程。因此,天文物

理也对中微子的研究有着浓厚的兴趣。理论上,并不要求中微子一定无静止质量,因此,许多物理学家仍继续测量中微子的质量,并提出中微子质量不为零的各种理论。但迄今为止所得结果,是中微子质量上限愈来愈小。

【 τ 子】轻子的一种,又称重轻子,1975年 M. 珀尔等从实验中发现它的质量为1777兆电子伏,寿命为 0.3×10^{-12} 秒,带单位负电荷。由于它可衰变为强子,寿命短,研究起来较其他轻子困难些。 τ 轻子的发现使轻子由两代增加到三代,这恰好与已发现的夸克之种类数相同,这对认识粒子物理的标准模型有重要意义。与它伴随的中微子 ν_τ 还有待今后发现。

【强子】参与强相互作用的粒子族。它的众多成员可分为介子和重子两大类。已经发现的强子,质量分布在100多兆电子伏到十几吉电子伏的广大区域。除了质子是稳定的,中子的寿命很长之外,所有其他强子都不稳定,在 10^{-24} — 10^{-8} 秒时间里,通过强相互作用、电磁相互作用或弱相互作用衰变为其他粒子。强子都可通过高能正负电子对撞、轻子与核子碰撞以及质子与质子碰撞等产生。除了电荷数之外,描写强子特性的量子数还有奇异数、粲数和底数等。这些量子数不为零的粒子分别称为奇异粒子、粲粒子和底粒子。预计还存在具有顶数的顶粒子。由于强子之间的强相互作用是短程力,所以只有强子之间彼此“接触”时才能发生强相互作用。强子具有内部结构。按照强子结构的夸克模型(见夸克),迄今所发现的强子都可由上(u)、下(d)、奇异(s)、粲(c)、和底(b)五种夸克构成。这些夸克通过带色的胶子(见量子色动力学)束缚成强子。而强子之间的强相互作用力,则是把夸克束缚成强子的色力

的剩余力。按照粒子物理的标准模型,还应存在一种至今尚未发现的强子,称为顶强子,它由与底夸克构成弱旋二重态的顶夸克构成。从理论和某些间接实验估计,它的质量之大,可能大于150吉电子伏。为了发现和研究顶强子,正在设计和制造能量更高的加速器。从原理上,现在虽然已经有了可完全描写夸克之间强相互作用的量子色动力学,但由于它的红外囚禁性质,还未完全建立起可从强子的夸克结构推导出强子所有性质的完善理论。

【介子】自旋量子数为整数的强子。介子都不稳定,其大部分成员通过强相互作用衰变,这部分介子有时亦称不稳定介子。有些介子衰变成两个 π 介子,它们被看作两 π 系统的轨道角动量激发态。它们的自旋与质量有明显的规律性,在以自旋和质量平方为坐标轴的平面上,这些粒子分布在一条直线上,这条直线称为雷极轨迹。描写介子性质的量子数有:自旋、宇称、同位旋、奇异数、粲数和底数等。每种介子都有由这些量子数标志的确定的性质,自旋为0、宇称为正的介子称为标量介子;自旋为0、宇称为负的介子称为赝标介子;自旋为1、宇称为正的介子称为轴矢介子;自旋为1、宇称为负的介子称为矢量介子。在以同位旋第三分量 I_3 为横轴,奇异数 S 为纵轴的平面坐标图上,各赝标介子按这两个量子数填充,将形成一个“八卦图”。按照数学中群论,这种特征说明强相互作用具有 $SU(3)$ 群所表示的对称性。如若认为存在 u 、 d 、 s 三种夸克,并且具有如表所示的性质,那么所有的赝标介子均可由它们及其反夸克构成。从此打开了研究强子结构的大门。迄今所发现的介子,都可由上(u)、下(d)、奇异(s)、粲(c)、底(b)夸克构成。

量子数	夸克种类					
	d	u	s	c	b	t
电荷	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
同位素 第三分量	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0
奇异数	0	0	-1	0	0	0
粲数	0	0	0	+1	0	0
底数	0	0	0	0	-1	0
顶数	0	0	0	0	0	+1

【 π 介子】属于赝标介子，是最轻的强子。1935年，日本物理学家汤川根据核力的短程性质，及电磁相互作用通过光子传递的理论，在解释核子之间的强相互作用时， π 介子曾作为核力的传递者首先被预言。但是，直到1947年，它才在宇宙线中被发现。 π 介子分为带正电、负电和电中性三种。带电 π 介子的质量为140兆电子伏，主要通过弱相互作用衰变为轻子，寿命为 10^{-8} 秒。电中性 π 介子的质量为135兆电子伏，主要通过电磁相互作用衰变为光子。其寿命为 10^{-17} 秒。按照强子结构的夸克模型， π 介子由上（u）、下（d）两种夸克的正反夸克对构成。

【K 介子】属于赝标奇异介子。主要通过弱相互作用衰变为非奇异

粒子，1947年首先在宇宙线中发现。它的质量较大，寿命较长，参与强相互作用。由这些特征可以推断，它带有强相互作用守恒、弱相互作用破坏的新量子数——奇异数。它有四个成员，两个带电，两个电中性，它们构成两个同位旋为 $\frac{1}{2}$ 、互为反粒子的二重态。带电K介子的质量为494兆电子伏，中性K介子的质量为498兆电子伏。对中性K介子衰变的研究，导致了弱相互作用宇称不守恒的发现；还导致发现了正反粒子变换（C）和宇称变换（P）两者联合变换（CP）下不变性破坏，即CP破坏现象。并且，中性K系统是迄今为止唯一的CP破坏源。因此，尽管K介子已被发现近50年，但研究它的兴趣至今不减。带奇异数的K介子的发现，为研究构成非通常物质的粒子打开了大门。按照强子结构的夸克模型（见夸克），K介子是由一个奇异夸克（或反奇异夸克）和另一个上（或下）夸克（或反夸克）组成。

【奇异粒子】 奇异数不为0的强子，包括奇异介子和奇异重子。它的显著特征是，在强子碰撞中产生截面大，寿命长。另一特征是这类事例同时成对产生（协同产生）。这表明，它们是通过强相互作用产生，通过弱相互作用衰变。由于这些特征不同于当时已经知道的核子、电子和 π 介子等的特征，因此而得名。对这类事例的系统分析表明，造成上述特征的原因是：这类粒子带有新的量子数——奇异数（见奇异数），常记为S。它是个可加量子数，在强相互作用下S守恒，在弱相互作用中，S的变化遵守 $\Delta S = \pm 1$ 。引进奇异数后，可以解释所有涉及奇异粒子的现象。强子碰撞中，只有同时产生带有等量异号奇异数的粒子，才能保证强作用前后奇异数守恒，所以它们总是同时成对产生。

【奇异数】描写强子内部性质的可加量子数。通常用字母 S 表示。它在强相互作用守恒,在弱相互作用不守恒。实验上正是根据这种性质引进奇异数的。在有奇异粒子参与的过程中,系统的总奇异数 S 的改变量 ΔS 遵守如下规则:(1) $\Delta S=0, \pm 1$; (2) 若 $\Delta S \neq 0$, 则系统总同位旋改变量的绝对值 $|\Delta I|=1/2$; (3) 在半轻子衰变过程中, 强子总电荷 Q 的改变量 $\Delta Q=\Delta S$ 。

【粲数】 又称 C 数。描述强子内部性质的一种可加量子数。与奇异数 S 类似, 在强相互作用中 C 守恒, 在弱相互作用中 C 不守恒。人们在解释奇异数改变的中性流被压低的弱相互作用实验时曾推测, 除当时已被公认的上 (u)、下 (d)、奇异 (s) 夸克之外, 还存在第四种夸克, 称为粲夸克。带粲数的强子比其他强子质量大, 寿命长。第一个由粲夸克构成的强子是 J/ψ , 就是根据这种性质被发现的。

【粲偶素】 正反粲夸克构成的束缚态系统。它是首先由丁肇中和里希特分别独立发现的, 并称之为 J/ψ 。这个粒子具有与光子相同的量子数。通过对粲偶素谱系的测量, 发现它的谱系与电子—正电子构成的束缚态谱系非常类似。因而认为粲夸克与电子一样, 也是真实存在的粒子。而粲偶素谱系的特征被作为粲夸克存在的证据之一。因 J/ψ 质量比较大, 按照量子力学不确定性关系, 相当于正反粲夸克相距较近。按照量子色动力学的渐近自由性质, 可以应用微扰量子色动力学进行计算。运用微扰量子色动力学得到的正反粲夸克之间与味无关的强相互作用势, 可得到与实验相符的粲偶素谱系。这样, 不仅检验了微扰量子色动力学, 而且这也是夸克之间的强相互作用与味无关的一个证据。由于重夸克构成的粒子偶素

具有这样的性质，由底夸克构成的底偶素系统，也是人们研究的有趣的问题。

【底数】 又称 b 数，描述强子内部性质的一种可加量子数。带底数的强子都含有底数的携带者——底夸克。它的发现及性质，与粲数类似。不同的是，按照粒子物理的标准模型，由于它的存在，使人们确信，一定还存在另一种量子数——顶数，以使带顶数的夸克与底夸克构成弱旋二重态。此外，底介子还是人们寻找新的 CP 破坏源的热点。

【重子】 自旋量子数为 $1/2$ 奇数倍的强子。其所有成员都带有可加量子数——重子数。迄今为止的实验证明，在粒子相互作用过程中，重子数始终守恒。用类似于介子分类的方法，按照自旋和宇称两个量子数对重子进行分类，60年代以前发现的重子都可填在 SU(3) 群的8维和10维表示里。这对建立重子的夸克模型起了关键作用。从这个规律推断，所有重子都由三个夸克构成，所有反重子都由三个反夸克构成。尽管现在已发现了由五种夸克构成的介子，但只发现了由上 (u)、下 (d)、奇异 (s)、和粲 (c) 四种夸克构成的重子。含底夸克 (b) 的重子尚未发现。

【质子】 氢原子的原子核。通常用英文字母 P 表示。它构成所有元素原子核的正电部分。它所带的电荷与电子的等量异号，质量是电子的1836倍，重子数为 +1，是最轻的重子。目前测得其寿命的下限为 2×10^{30} 年。通过电子—质子散射实验测得质子的半径（电荷分布区域半径）为 0.81×10^{-15} 米。对电子—质子深度非弹性散射实验结果的分析表明，质子内部存在类点结构。按照强子结构的夸

克模型，它由两个上（u）夸克和一个下（d）夸克构成。由于它具有稳定、带电、质量大以及加速时能量损失小等特征，在高能物理实验中，常用它作为加速粒子，以产生和研究更高能量的粒子。

【中子】 原子核中的电中性粒子。是1932年查德威克用 α 粒子轰击硼时发现。中子的自旋为 $1/2$ ，重子数为 $+1$ ，质量为 939.6 兆电子伏。处于自由状态时的平均寿命为 888.6 秒，衰变为质子 P，电子 e^- 和反电中微子 $\bar{\nu}_e$ ($n \rightarrow P + e^- + \bar{\nu}_e$)。按照强子结构的夸克模型，中子由两个下（d）夸克和一个上（u）夸克构成。它的衰变归结为其中的一个下夸克的衰变： $n (udd) \rightarrow P (uud) + e^- + \bar{\nu}_e$ ，即中子中的一个 d 夸克衰变为一个 u 夸克，一个电子和一个反电中微子。中子的磁距 $\mu =$

-1.9 核磁子。由于中子不带电，它的磁矩是其内部所含带电组份产生的效果。各种低能物理条件下中子行为的研究，是开发核能和放射性应用的基础。

【超子】 奇异数不为 0 的重子。由于它的质量超过核子的质量而得名。其产生和衰变的性质与奇异介子一样，都是通过强相互作用协同产生，通过弱相互作用衰变。它的一个成员，反西格马负超子 (Σ^-)，是我国物理学家王淦昌教授领导的实验组于 1956 年发现的。按照强子结构的夸克模型，超子均由奇异数总和不为 0 的三个夸克（或三个反夸克）构成。它们的衰变主要取决于奇异夸克的弱衰变，所以超子的寿命都近似相同 ($\Sigma^0 (uds)$ 除外，它是通过电磁作用衰变)，为 10^{-10} 秒量级。

【共振态】 通过强相互作用衰变的强子的总称。这个概念最初是从

研究原子核反应现象中产生的。在研究原子核碰撞发生的核反应现象时发现，当入射原子核的能量取某些确定值时，散射截面或反应截面会突然增大。这种截面随能量变化的行为与经典物理中的共振现象非常相似，故称之为共振。按照量子力学所描述的规律，这种现象出现的原因是，在共振发生的能量，入射粒子与靶原子核形成一个新的亚稳态复合核，称这种亚稳复合核为共振态。在粒子物理领域里，1952年费米等人在 π 介子与核子碰撞的实验里，在质心能量为1236兆电子伏附近发现了第一个所谓(3, 3)共振(同位旋和自旋都是 $\frac{3}{2}$ 的态)。后来又发现许多这类共振。研究表明，这些共振态除了寿命极短、能级有一定宽度外，与其他粒子没什么差别，它们也具有确定的质量，电荷，自旋，同位旋等量子数。从强子结构角度看，它们都可由更基本的组分——夸克构成。粒子物理中通常把经过强相互作用衰变的强子称为共振态，把不能通过强相互作用衰变的粒子称为稳定粒子。

【夸克】简记为 q 。由强子性质推测其存在的强子组份。20世纪50年代前，已建立的微观物质结构图象是：电子与带正电的原子核在电磁相互作用下形成了原子；质子和中子在电荷无关的强作用力作用下形成了原子核。电磁相互作用由光子传递，核子之间的强相互作用由 π 介子传递。尽管当时对核子之间的强相互作用性质及其理论了解得还不清楚，但构成物质世界的基本组份和机制都已具备，而且这种图象的基本框架看起来既简单又完整。许多物理学家试图应用发展起来的实验技术，利用 π 介子与核子碰撞进一步研究强相互作用性质，以建立完整的强相互作用理论。然而，实验结果却出乎人们的预料。 π 介子与核子高能碰撞实验，不仅没有给

强相互作用性质和理论的研究带来实质性进展，反而发现了越来越多的带有新量子数的介子和重子。如果这些强子都是基本的，这将与科学家的信念和追求相违背。因此，科学家们开始对已发现的一百多种强子寻求简单而统一的描述。1961年，盖尔曼和尼曼在利用SU(3)群的数学工具研究介子和重子的分类时发现，如果对具有相同自旋和宇称的介子和重子按其不同的电荷和超荷进行分类，已发现的介子和重子都可填在SU(3)群的表示里。进一步分析表明，如果认为重子是由三个更基本的带分数电荷的粒子构成，介子由这种粒子的正反粒子构成，就可自然地得出所有强子的静态性质。由于实验上从未发现这些质量不大带分数电荷的粒子，盖尔曼认为这可能只是个数学符号，不一定是构成强子的真实存在的组份。而在这方面独立工作的兹外格大胆地建议，这可能是真实存在的粒子。后来盖尔曼命名它为“夸克”(quark)，其含意是“三个”的意思，因为当时已发现的强子都可由三种所谓上(u)、下(d)和奇异(s)夸克构造出来。并称强子的这种夸克结构为“夸克模型”。

核物理学家根据已发现的强子，已经推测出一系列夸克的存在及其性质。其中t夸克构成的强子至今还未发现，它是从标准模型推测其存在的，根据间接实验和理论分析，现在认为它构成的强子质量至少为300吉电子伏。此外，每种夸克还可带有三种不同的颜色(并不是通常颜色而是新的自由度)，所有夸克的重子数和自旋分别是 $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{1}{2}$ 。夸克的电磁相互作用性质和弱相互作用性由所谓电弱统一理论描述，夸克之间的强相互作用由量子色动力学描述。按照量子色动力学，夸克将永远囚禁在强子里，不能以游离的自由夸克形式存在。参见“夸克禁闭”。

【部分子】根据轻子—核子深度非弹性散射实验理论上推测其存在的强子内的点状组份。是费曼首先提出并命名的。把强子看成由许多点状部分子构成的观念又被称做部分子模型。这种模型只有在强子的动能远大于它的静能的情况下才有实用价值。对高能轻子—强子碰撞，部分子模型只能给出定性或半定量的结果；对轻子—强子的高能碰撞，由于轻子是无结构的点粒子，它与部分子的作用，或者是电磁相互作用，或者是弱相互作用，可以给出稍多的定量结果。对于电子—质子深度非弹性散射，在无穷大动量参考系（即质子处在极端相对论的情况）下，质子可被看成彼此无相互作用、动量分布可由实验确定的点状部分子的集合。从实验可确定部分子具有如下性质：（1）大约有50%的质子动量由部分子携带；（2）部分子的大小大约是质子半径的5—10%；（3）带电部分子的自旋量子数等于 $\frac{t}{2}$ ；（4）部分子所带电荷是电子电荷的分数倍。许多证据都表明，带电部分子具有夸克的性质。后来称为夸克—部分子模型。实验表明，部分子中包含价夸克、海夸克和胶子。价夸克决定强子的静态性质，其数目由夸克模型确定；海夸克的数目和味均不确定，但要求它的总和具有真空的性质，即要求它们以正反夸克对出现；胶子的数目亦不定，是夸克之间强相互作用的传递者。夸克—部分子模型为轻子—核子的高能相互作用提供了一个简单定量的描述，并已广泛应用于轻子—夸克相互作用的研究中，如中微子—核子碰撞的中性流弱相互作用过程，电子—正电子碰撞产生成强子以及强子—强子碰撞产生成轻子对（可以看成正反夸克对）的过程。部分子与真实粒子的差别在于，它不能孤立自由地存在，只能存在于短程动力学控制的区域里，只能在强子内部找到它。部分子模型在数学处理上还存在困难。因此，

它虽然有直观特性,并且在实验的唯象分析中显示出实用价值,但只能认为,它是对强子结构的一个暂时的推测性的描述。而量子色动力学则是从基本理论出发,统一描写了强子内部的夸克之间的带色强相互作用。

【轻子—核子深度非弹性散射】一种研究核子结构的实验。它与研究原子结构的卢瑟福实验的出发点类似,即用 α 粒子轰击原子, α 粒子被原子核散射,从而发现原子的核式结构。该实验有两种类型: i) $e+N \rightarrow e + \text{强子}$; ii) $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + \text{强子}$ 。它们分别把电子 e 和中微子 ν_μ 作为探针,作用机理分别为电磁相互作用和弱相互作用,以此探测强子的内部结构。ii)中的 μ 为 μ 子, μ 子和电子 e 都属于轻子。如果只测末态轻子,例如对i)只测末态 e ,那么测得的截面,只是电子传递动量的平方 $q^2 = (P_f - P_i)^2$ 和电子的能量损失 ν/m_N 的函数。式中 m_N 为核子质量, P_f, P_i 分别为电子的末态和初态动量, $\nu = P_N \cdot (P_f - P_i)$, P_N 为核子动量, ν/m_N 表示电子传递给核子的能量。如果 q^2 和 ν/m_N 都很大,则称这种过程为深度非弹性散射。这个实验发现了强子内部的近似自由的类点组份,导致部分子的提出。

【自由度】单值地确定某一力学体系运动状态所必须的,并且在定义域内可任意变化的物理量的数目,称为该力学体系的自由度。微观粒子的自由度可分为时空自由度和内部自由度;宏观物体只有时空自由度。例如,为了单值地描写质点的位置变化,就必须要知道它在上下、左右、前后三个方位的变化,因此质点的自由度为3,再加上时间就是时空自由度。强子的同位旋与时空无关,则属于内部自由度。随着人类对物质世界认识的深入,自由度可能逐

渐增加。自由度可以是有限的，也可以是无限制的。涉及到由大量粒子构成的统计系统、物质场的自由度就是无限的。

【自旋】 微观粒子的固有角动量。微观粒子的这种性质最初是从实验观测中发现的。乌仑贝克和古兹密特为了解释已观测到的氢原子谱线多重结构时发现，如果认为氢原子是由质子和电子组成，要使量子理论计算的氢原子能谱与实验观测相符，电子必须带有 $\frac{h}{4\pi}$ 的固有角动量。他们的这种观念被以后的许多实验所证实，并且被后来建立的狄拉克方程所描述。为了理解电子自旋，尽管一些人可以用经典力学中的刚体自转相类比，确切讲，这是不正确的。自旋是微观粒子的基本方程描写的、由实验确立的微粒子的基本属性。由多个粒子构成系统的角动量，等于各个粒子自旋和各个粒子相对角动量之和，粒子自旋以及自旋与其他角动量耦合，服从量子理论里角动量加法规则。为了描述上的习惯，现在仍把认为由更基本组分夸克组成的强子的角动量称为自旋。

【宇称】 表征粒子或粒子组成系统在空间反射下变换性质的物理量。常用符号 P 表示。在空间反射变换下，若粒子的场量不变，称该粒子的宇称为正；若场量改变符号，称该粒子的宇称为负。玻色子的正反粒子，宇称相同。费米子的正反粒子，宇称相反。由于费米子的旋量波函数在空间反射下的特殊性质，使一些粒子无绝对宇称，某些守恒量子数的存在，使它们具有相对宇称。针对这些守恒量，粒子物理中已有公认的约定标准，用来规定各种粒子间的相对宇称。例如，针对守恒量子数重子数，规定中子的宇称为正，其他重子的宇称则按其有中子的相对宇称的同异而规定为正或

负。对 n 个粒子组成的系统,其宇称等于 n 个粒子的宇称之积再乘以这 n 个粒子之间的 $n-1$ 个轨道宇称之积,轨道角动量量子数 L 与轨道宇称 P 之间的关系满足 $P = (-1)^L$ 。强相互作用和电磁相互作用产生的粒子转换过程,宇称保持守恒。弱相互作用下产生的粒子转换过程,宇称不守恒。1956年,李政道和杨振宁通过对大量实验结果的理论分析,提出弱相互作用下宇称不守恒的观念,其后不久吴健雄在实验中证实了这个判断。弱相互作用中宇称不守恒的发现,为建立弱相互作用理论提供了新的线索。

【同位旋】描述强子内部性质的一个量子数。通常用字母 I 表示。强子的这种内部性质是从核力的电荷无关性发现的。实验发现,质子—质子、质子—中子和中子—中子之间的强相互作用是完全相同的。尽管质子带电,中子不带电,对于强相互作用来说,它们是无区别的。自旋为 $1/2$ 的电子,可以处在自旋 Z 分量取 $\pm 1/2$ 的两种状态。与此相仿,质子和中子完全可以看成是同一种粒子——核子的两种带电状态。因而,引进类似自旋的量子数——同位旋。核子的同位旋 $I=1/2$, I 的第三分量 I_3 可取 $1/2$ 和 $-1/2$ 两个值,分别对应质子和中子。所有强子都有确定的同位旋,并以同位旋多重态的形式出现。强相互作用与粒子是否带电无关,因而同位旋在强相互作用下守恒。电磁相互作用和弱相互作用下,同位旋不守恒。处在同一同位旋多重态的粒子,质量之间的差别,是由电磁作用和弱作用引起的。按照强子的夸克模型,强相互作用中同位旋的对称性,反映了上 (u) 夸克 ($I=1/2, I_3=1/2$) 和下 (d) 夸克 ($I=1/2, I_3=-1/2$) 之间的近似对称性。强相互作用下同位旋转动不变性,实际上部分地反映了强相互作用与夸克味的无关性。

【盖尔曼—西岛规则】强子的电荷、同位旋和奇异数之间关系的一种表述。处在同一总同位旋 I 的同位旋多重态之诸强子，具有不同的电荷，强子的电荷 Q 与同位旋第三分量 I_3 之取值，有如下关系：

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}N \quad (1)$$

式中 N 为重子数。对质子， $I_3 = \frac{1}{2}$ ， $N = 1$ ， $Q = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ ，即电荷数为 1。对中子， $I_3 = -\frac{1}{2}$ ， $N = 1$ ， $Q = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0$ 。对 π 介子： π^+ 的 $I_3 = 1$ ， $N = 0$ ， $Q = 1$ ； π^- 的 $I_3 = -1$ ， $N = 0$ ， $Q = -1$ ； π^0 的 $I_3 = 0$ ， $N = 0$ ， $Q = 0$ 。它们都满足 (1) 式。奇异粒子被发现之后，盖尔曼和西岛和彦提出，奇异粒子也应具有类似的关系。为此，他们适当地改变 (1) 式，把奇异数 S 也包括进去，写成：

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}Y \quad (2)$$

式中 $Y = N + S$ ，称为超荷数。反粒子具有符号相反的 I_3 、 N 和 S 值。20 世纪 60 年代以前发现的强子都服从这个关系，故称 (2) 式为盖尔曼—西岛规则。强子的量子数之间关系的这种统一描述，是强相互作用的 $SU(3)$ 对称性的研究基础之一。

【自旋与统计的关系】粒子的自旋与粒子服从的统计的关系。在量子统计学里，存在两种统计规则，即费米—狄拉克统计和玻色统计。自旋量子数为半整数的费米子服从泡利不相容原理：同一个确定的量子态只能容纳一个费米子。这就导致了描写全同费米子系统的波函数必是反对称的，即当体系中任意两个费米子互换时，波函数改变符号，这就是费米—狄拉克统计，因而也称自旋量子数为半整数的粒子为费米子。由于费米子的这种统计性质，导致了量

子场论里费米子场必须服从反对易关系。自旋为整数的粒子，一个确定的量子态可容纳的粒子没有限制，描写它的波函数是对称的，称为玻色统计。因此人们也称自旋为整数的粒子为玻色子。在量子场论里玻色子场服从对易关系。

【对称性和守恒量】物理系统的状态和运动规律在某种对称变换下具有的不变性质，在物理学中一种这类变换，对应一个守恒物理量。例如，量子统计力学里，由于全同粒子之间的不可区别性质，全同粒子系统中两个粒子互换系统不变，由此导致自旋与统计的关系。又如，物体的位置都是针对某个参照系而言，即物体的绝对位置具有不可确定性，它使空间平移具有不变性。对于放在北京的时钟，无论在广州还是在北京去看它，它都是一样走法，并不因为观察者位置之不同而观察到它走快或走慢的现象。空间平移不变性导致了动量守恒。物理学中常用拉氏量描写一个物理系统。在某种对称变换下拉氏量形式不变，往往对应物理上的某些守恒量。下表列出了一些对称变换的不变性和相应的守恒量。一个物理系统在某个对称变换下具有不变性，实验观测上表现为该系统存在相应的不可测量的物理量。例如宇称，在无弱相互作用的系统里是守恒的；但是在含有弱相互作用的系统里，从粒子衰变的产物是可以区分出左和右的。即左右可测量，因而弱相互作用就破坏了宇称守恒（见宇称）。可见，不同物理系统可能具有不同的不变性，相应地具有不同的守恒量。这种不变性（或等价地说，某些守恒量）被破坏，是由于不同相互作用的规律不同所致。除此而外，还有一种对称性破坏的方式，称为对称性自发破缺。

不可测量的量	对称性	守恒量
绝对位置	空间平移	动量
绝对时间	时间平移	能量
空间绝对方向	空间转动	角动量
绝对左（或右）	空间反射	宇称
绝对电荷符号	正反粒子	电荷共轭宇称

在守恒量中，人们最早认识到的能量动量守恒，开始是从唯象经验总结出来的，并被无数事实所证明。但是从不可测量的量来分析，可以进一步认识到时间空间均匀性的本质，使人们对物理规律的认识更加深入。对称性和守恒量是物理过程所必须遵守的规律和选择规则。对它的研究，已经引导并大大推动了人们对自然界基本规律的认识。

【色】夸克的内部自由度之一。与夸克之间的强相互作用相关。运用夸克模型描述强子时，曾遇到自旋与统计关系相冲突的困难。例如，由三个自旋量子数为 $1/2$ 的S夸克构成的 Ω^- 重子，总角动量量子数为 $3/2$ 。实验表明它是3个S夸克构成的最低能态，因而处于空间对称的S态。而三个自旋为 $1/2$ 的粒子要构成自旋为 $3/2$ 的态，必须处于三个粒子自旋相互平行的对称态。那么，计及空间和自旋两方面，描写 Ω^- 粒子这个状态的波函数就应该是对称的。这就违反了全同费子系统的波函数必须是反对称的规则。为了解决自旋与统计关系出现的这一困难，人们对夸克引进了新的自由度——

“色”。它使每种味道夸克都可取三种颜色（俗称红黄蓝），构成重子的三个夸克处于颜色反对称态（或色单态），构成介子的正反两个夸克处于互为反色的色单态。这样，不仅解决了自旋与统计的矛盾，而且这种描述还自然地满足重子和介子都无色，并且与迄今为止尚未发现自由夸克这一事实相一致。夸克有三种颜色自由度还有其他证据。例如，用部分子模型解释：实验测量的 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 衰变率； e^+e^- 湮灭为强子与湮灭为 $\mu^+\mu^-$ 的截面之比，若使理论与实相符，也必须对每种味夸克引进三种颜色自由度。由于每种夸克都可取三种颜色，夸克的味与色无关，色与味也无关，这恰好是已知的强相互作用的性质之一，致使夸克的颜色自由度与建立夸克之间的强相互作用理论联系起来（见量子色动力学）。

【味】 描述夸克种类的自由度。夸克模型产生之初，只发现了由三种夸克（即上（u）、下（d）、奇导（s）夸克）构成的强子。10年之后（1974年底），丁肇中和 B. 里希特分别独立地发现了由新的第四种夸克——粲（C）夸克构成的强子 J/ψ 。1977年莱德曼发现了由第五种更重的夸克——底（b）夸克构成的强子。为了描述夸克的种类，人们引进了味的概念。到现在人们已经发现了上述五种味道的夸克。预计还应该存在第六种夸克——顶（t）夸克。它存在与否将对粒子物理标准模型产生重大影响。这是目前设计制造能量为几百吉电子伏的粒子加速器所要解决的问题之一。

【代】 按照粒子物理电弱统一标准模型，轻子和夸克在弱相互作用下的跃迁，可用 SU(2) 左手二重态 $(\nu_e e)$ ， $(\nu_\mu \mu)$ ， $(\nu_\tau \tau)$ 和 (u, d') ， (c, s') 和 (t, b') 表示。按照质量从小到大，发现的时间从早到迟把它们分别称之为第一代轻子和夸克，第二代轻子和夸

克和第三代轻子和夸克。理论尚未解决的问题是：无法回答究竟有多少代费米子，为什么代与代之间的质量差别如此大？这两个问题是目前理论研究上的有兴趣问题。

【衰变】一个粒子自发地蜕变为两个或两个以上的其他种粒子的过程。粒子的衰变是由粒子之间的相互作用引起的。由强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用引起的衰变依次称为强衰变、电磁衰变和弱衰变。粒子的衰变寿命和衰变方式一般与相互作用性质有关。通过强相互作用衰变的粒子，寿命最短，大约在 10^{-20} — 10^{-24} 秒。通过弱相互作用衰变的粒子，寿命最长，大约在10几分钟到 10^{-13} 秒。通过电磁相互作用衰变的粒子，寿命在 10^{-13} 秒到 10^{-18} 秒之间。一个粒子可以有不止一种衰变方式，粒子的性质和引起衰变的相互作用的性质决定了不同衰变方式的比例（称为分支比）。现已发现的300多种粒子中，只有质子、电子、中微子和光子不衰变。但是，粒子物理学把不发生强衰变的粒子都称为稳定粒子。在这种意义上，已发现的稳定粒子大约有54种。

【衰变寿命】粒子从产生到衰变存在的平均时间，又称平均寿命。尽管粒子可能有多种衰变方式，但一种粒子的平均寿命之值是唯一的。它是粒子的基本属性。按照量子原理，一种粒子的寿命与其质量满足一定的关系。只有完全稳定的粒子，其质量才有完全确定的值。可衰变粒子的质量，正如它的个别事例的寿命一样，一般都分布在某个确定值附近的确定范围内。由此可定义一个所谓衰变宽度的量。在自然单位中，衰变宽度与衰变寿命互为倒数。通常，把某种粒子衰变几率最大值所对应的质量定义为该种粒子的质量。寿命很短的粒子，例如寿命 $<10^{-20}$ 秒的粒子，衰变宽度很大。实验

上常常通过测量粒子的衰变宽度来确定粒子的寿命。有时就直接用宽度来表示粒子寿命的长短。

【电磁相互作用】自然界中已知的四种基本相互作用之一。表现为带电粒子与电磁场之间、带电粒子之间的作用等。它属于长程作用。在四种基本相互作用中，它的作用强度仅次于强相互作用，观察它的效应相对容易些，人类对它的性质及其产生的效应，研究得最清楚，有关它的理论也发展得最完善。电磁相互作用产生的宏观现象主要表现为：静电作用，稳恒电流，电磁感应，电磁波的产生、传播和辐射等。这些现象可完全由麦克斯韦方程统一描述，通称宏观（或经典）电动力学。它所产生的微观现象主要表现为：光电效应，原子或原子核的跃迁，正反带电粒子的产生和湮没，带电粒子发射或吸收光子等。这些现象都与宏观电动力学的经典理论相冲突，描写这些现象的理论是电磁场量子化的理论，称为量子电动力学。在量子电动力学里，相互作用强度可表示为 $\alpha = \frac{e^2}{2\pi\hbar c}$ ，式中 e 是电子电荷， c 是光速。 α 是个很小的无量纲量， $\alpha \approx 1/137$ 。它这种性质使量子电动力学成为既可有效地进行微扰计算，又是可重整化的完整精确理论。

【弱相互作用】一种力程短强度弱的基本相互作用。力程比强相互作用的还短，约 10^{-16} 米左右；作用强度要比电磁相互作用的小 10^3 倍。其作用效果最初表现为一种粒子自发地蜕变为其他粒子，例如，原子核的 β 衰变，是由于原子核里的一个中子自发地蜕变为质子，电子和反电中微子所致 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)。除了光子和胶子以外，其他粒子都参与弱相互作用。弱衰变是粒子物理中最普遍的现象。

象。弱相互作用的另一个特点是具有较低的对称性。弱相互作用下空间反演、电荷共轭和时间反演的对称性都被破坏，同位旋、奇异数、粲数、底数这些在强相互作用中守恒的量子数，在弱相互作用下都不守恒。弱相互作用理论起初是普适费米型弱相互作用理论。它是考虑到弱相互作用的唯象特点，并在借鉴电磁相互作用理论形式的基础上建立起来的等效理论。由于相互作用强度弱，理论的最低次计算与实验结果基本相符。但是，由于该理论是不可重整的理论，不能处理高级修正项出现的发散困难，无法计算高阶效应，因而不能作为基本理论。考虑到理论形式中的弱作用流和电磁流的相似之处，以及非阿贝尔规范场论的发展，真空自发破缺理论和黑格斯机制的产生，60年代末建立了电弱统一理论。这是个可重整的基本理论。参见“电弱统一理论”。

【强相互作用】自然界的基本相互作用之一。开始，它是作为把核子束缚成原子核的与电荷无关的短程力，被人们发现的。其特点是：(1) 相互作用强度大，大约是电磁相互作用强度的 10^2 — 10^3 倍；(2) 作用力程短，相当于强子尺度 (10^{-13} 米) 那样大；(3) 比起其他的基本相互作用，它具有最大的对称性，保持最多的守恒量，电磁相互作用和弱作用破坏的一些守恒量，它都保持守恒；(4) 对轻子与核子的深度非弹性散射实验的分析表明，在小于 10^{-16} 米的区域，随着距离的减小，相互作用强度变弱。最早探索强相互作用理论的，是日本物理学家汤川。在电磁相互作用理论的启发下，在1935年他试图用一种质量不为零的所谓介子，作为强相互作用的传递者，来解释强相互作用的短程性质，并且给出了这种介子的质量。1947年发现了 π 介子之后，一般都认为核子之间的力是通过 π 介子传递的。在这之后科学家们从实验和理论两个方面对强相

互作用性质进行了大量研究。实验上主要是利用强子与强子碰撞的手段，试图揭示出尚属未知的强相互作用的性质。结果，随着实验能量的提高，发现了种类越来越多的新强子，使得强相互作用的问题变得越来越复杂。在理论上，由于作用强度大，无法运用类似于量子电动力学的微扰计算。科学家们试图发展S矩阵理论，来描写强相互作用现象，结果仍做不到理论与实验的具体结果相联系。20世纪60年代对强子分类的成功，以及电子与核子深度非弹性散射实验，揭示出强子内部有点状结构，以及70年代规范理论的发展，导致了描写夸克之间强相互作用的基本理论——量子色动力学的建立。夸克之间的强相互作用是通过色胶子传递的。而强子之间的强相互作用，则被看成是把夸克束缚成强子的色力的剩余力。虽然量子色动力学在定性或定量上描写了强子的一些性质，但仍未达到可以从夸克结构导出强子所有性质的完全理论。

【狭义相对论】爱因斯坦在1905年提出的阐述不同惯性参考系的物理观测与时空观念之间关系的理论。它所包含的日常直观不可理解的物理结论，已全部被实验所证实。它与量子论一起构成了现代物理的两大基石。

在绝对时空的牛顿力学里，物理观测服从伽里略相对论。处于A和相对A以常速度 \vec{v} 运动的B两个参考系中的观测者，当它们观测同一物理事件D时，如果用 $(\vec{r}; t) = (x, y, z; t)$ 和 $(\vec{r}'; t') = (x', y', z'; t')$ 分别表示D在A和B两参考系里的坐标，假定在 $t=0$ 时，A，B两观测者处于相同的空间位置，那么，

$$\begin{aligned} \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{v}t & \vec{r} &= \vec{r}' + \vec{v}t \\ t &= t' & t &= t' \end{aligned} \quad (1)$$

这就是伽里略相对论变换。如果事件 D 是以常速度 \vec{v} 相对 A 运动的粒子，从 (1) 可推得伽里略速度加法，如果相对于观测者 B 的粒子速度用 \vec{v}' 表示，那么

$$\begin{aligned}\vec{v}' &= \vec{v} - \vec{v} \\ \vec{v} &= \vec{v}' + \vec{v}\end{aligned}\quad (2)$$

这个结果与人们日常的直观经验是一致的。但是，在电动力学里这个结果遇到了困难。描述经典电磁相互作用的马克斯韦方程预言的光速与观测者无关，无论是观测者 A 还是相对 A 做以常速度 \vec{v} 运动的观测者 B，光速都是同一常数 c 。为了解决这个与直观经验相冲突的问题，一些科学家提出，马克斯韦方程可能只适用于固定在“以太”上的绝对参考系。后来不少实验家试图探测宇宙中“以太”产生的效应，最后，以迈克尔——毛雷实验证明“以太”不存在的结果而告终。这就证明不存在描述电磁作用的绝对参考系。在这个基础上，爱因斯坦提出了两条假定：(1) 在所有惯性系里，物理定律都是相同的；(2) 真空中的光速是常数，与观测者和光源的速度无关。爱因斯坦为了解决马克斯韦方程的预言与伽里略变换的矛盾，他提出时间应该不是绝对的。如果假定速度 \vec{v} 沿着 \vec{x} 轴方向，从时间不是绝对的假定可导出：

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) & x &= \gamma(x' + vt) \\ y' &= y & y &= y', \\ z' &= z & z &= z'\end{aligned}\quad (3)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \quad t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \geq 1 \quad (4)$$

(3) 式称为劳仑兹变换。当参考系的相对速度 $|\vec{v}| \ll c$ 时，劳仑兹变

换可近似化简为伽里略变换 (1), 在低速情况下与日常直观经验相一致。狭义相对论所包含的主要物理结果都包含在劳仑兹变换里, 其主要结果为:

(1) 长度收缩。如果有一根沿 x 轴放置、长度为 L_0 、相对 B 静止的长棒, 那么, 在相对于 B 以常速度 v 沿着 x 轴方向运动的参考系 A 里, 棒的表观长度为:

$$L = \gamma^{-1} L_0 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} L_0 \quad (5)$$

因为 $1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right) \leq 1$, 当 $|\vec{v}| > 0$ 时, $L < L_0$, 在参考系 A 里棒的长度变短了, 又称劳仑兹收缩。

(2) 时间变慢。如果在参考系 B 的同一位置, 在时间间隔 τ 内先后发生了两个事件, 那么参考系 A 观测该两事件发生的时间间隔为:

$$t = \gamma \tau = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \tau \quad (6)$$

因为 $\left(1 - v^2/c^2\right)^{-1/2} \geq 1$, 在参考系 A 里, 两个事件发生的时间间隔拉长了。值得注意的一个特点是, 所有相对论效应, 对于两个做相对运动的惯性参考系都是对称的。就是说, 在参考系 B 里观测参考系 A 里的事件, 会得到完全相同的效应。从 (5) 和 (6) 式容易看出, 只有当 v 很大或接近光速 c 时, 相对论效应才明鲜。高能粒子实验里的许多事例都具备这个条件, 相对论不仅指导实验数据分析, 而且在这个领域里得到了充分验证。

(3) 相对论质量和质能关系。以 m_0 表示物体静止质量, 那么从劳仑兹变换可导出该物体以速度 v 运动时的质量:

$$m = m_0 \gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad (7)$$

$$\approx m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2$$

$$= \text{静能} + \text{动能}$$

$$= \text{总能 } (\epsilon)$$

$$\text{即 } \epsilon = mc^2 \quad (8)$$

当原子核裂变时，如果裂变产物质量之和小于母核质量，就会释放出与该质量差 Δm 相联系的能量 Δmc^2 。根据这个关系，人们开始研究和利用核能。对于所有高速运动的情况，相对论效应都比较明显。狭义相对论不仅是研究高能微观粒子的重要理论工具，在未来宇航设计中也将起着重要作用。

【量子场论】按照量子力学原理建立起来的场的基本理论。量子场论是相对论和量子论的有机结合，统一地描述了微观粒子性质及其相互作用，为分析高能微观粒子实验、建立特定的动力学模型提供了理论基础和有力工具。对一些多自由度物理问题，如多体问题、统计问题等也有许多成功的应用。量子场论诞生于20世纪20年代末的电磁场量子化。当时，电磁辐射在微观领域显示出的量子现象，促使一些物理学家开始探索描述电磁辐射量子行为的理论。为了描述电磁辐射显示出的电磁场的波一粒两相性，按照已经发展成成熟的量子力学，一个自然的方法，是将经典电磁场进行类似于经典力学场那样的量子化。1927年狄拉克在他的关于原子的电磁辐射的理论文章里，首先对电磁场进行了量子化。1928年狄拉克建立了相对论不变电子波动方程，以后又陆续地完成了对其他静止质量不为零的粒子场的量子化。对于已满足相对论不变的马克斯韦方程的电磁场，其量子化是比较直接的。对其他静止质量不为

零的粒子,要首先求出作为粒子场所满足的相对论不变场方程,然后再对该粒子场进行量子化。按照量子场论,每种粒子都对应着一种场。与空间各点相对应的、场系统的 N ($N \rightarrow \infty$) 个相互独立的场量 $\varphi_i(x, t)$ ($i=1, 2, \dots, N$, x 空间坐标, t 为时间坐标), 可看作力学系统的无穷多个广义坐标。按照力学中的方法,可以定义与这些广义坐标相对应的正则动量 $\pi_i(x, t)$ 。根据量子力学原理,把这些量作为算符,并且,对玻色场和费米场分别引入场量和正则动量之间的正则对易关系和反对易关系,就可以导出量子场所满足的海森伯运动方程。除了这种正则量子化表述形式以外,量子场论还有其他表述形式。其中费曼1948年建立的路径积分形式,在非阿贝尔规范场(见规范场)的量子化中得到了很大发展,并获得了很大成功。除了不存在相互作用的自由场情况外,还无法精确求解由此得出的量子场方程。对于自由场情况,运用平面波展开方法,不仅能自然地给出正确的自旋与统计关系,而且可清晰地展示量子场论给出的物理图像和物理意义。其中一个直接结果,是粒子可以产生和湮没,即在某种自然界基本力作用下,可产生粒子;粒子产生后,在与其他粒子作用时,可以湮没而转变为其他粒子。量子场论给出的图像框架是:空间充满了各种场,当所有场都处在能量最低的基态时,空间表现为无任何可观测粒子的真空。这些场相互渗透相互作用着。在某种自然界基本力作用下,场可以激发。场的激发态表现为粒子的产生,不同激发态表现为粒子的数目和状态的不同,场的相互作用可以引起激发态的改变而表现为粒子的各种反应过程。为了求解量子场方程,人们从两个途径进行了研究。一种是 S 矩阵(见 S 矩阵)方法。运用绝热近似下的渐近条件,粒子从初态跃迁到末态的振幅之 S 矩阵,可用场算符编时乘积的真空期待值表达出来。只要定域场满足微观因果律,在不需要

场的动力学知识的情况下,仍可以确定S矩阵的一些性质。但是得不到可与实验结果直接比较的理论结果。另一种方法是微扰方法。在相互作用耦合常数是无量纲小量的情况下,用微扰方法,可成功地计算各种粒子反应过程的矩阵元。其中量子电动力学就是极好的例子。它把系统的哈密顿量构造成一个按耦合常数展开的幂级数序列,把一个具体物理过程的矩阵元,表示成幂级数中不同量级的贡献。由于展开系数非常小,只要计算低次幂的贡献就可达到相当好的精度。而且,展开式中的每一项都可用所谓“费曼图”直观地表示出来。反过来,也可以按照规则,从表示某一物理过程矩阵元的费曼图,直接写出该物理过程矩阵元的表达式。这种方法不仅可以与实验结果比较,而且实验竟以极精确的测量验证了所有计算结果。由于量子场论要处理无穷多个自由度,无质量粒子和定域场论的类点结构,在微扰计算中出现了无穷大的困难。在可重整的理论中,通过控制积分体积,仔细处理渐近态以及重整化等途径,这些困难得到圆满解决。相对论量子场论的两个最重要成就是发现了CPT定理和自旋与统计关系。CPT定理是与特定动力学无关的物理学中普遍遵守的定理(见CPT定理)。相对论量子场论的最新发展,是关于重整化群的研究。重整化群是等效哈密顿量变换群。它描写随着唯象观测标度的改变物理系统的动力学是如何变化的。这一技术应用在统计力学的临界现象和强子小距离行为的研究中,已取得了很大成就。因此,相对论量子场论研究取得的任何进展,都可能对物理学其他某些领域产生巨大影响。

【CPT定理】量子场论描述的系统所遵循的与模型无关的最普遍的规律。是量子场论的基本性质。其内容是,正劳仑兹变换下不变的任何定域拉氏理论,相对于电荷共轭(C)、空间反射(P)和时

间反演 (T) 联合变换下是不变的。它是在如下假设下得到的：(1) 理论形式在正洛伦兹变换下不变；(2) 所有相互作用哈密顿密度都是定域的，并且可由场算符和它的有限次微商表示出；(3) 服从正确的自旋与统计的关系；(4) 相互作用哈密顿量是厄米的。

CPT 定理在弱相互作用过程中有个著名的应用。 β 衰变过程是破坏宇称 P 的不变性和电荷共轭变换不变性 (C) 的，但 CP 联合变换仍保持不变，要保持 CPT 不变要求时间反演变换 (T) 不变性应当保持。1964 年以前所研究过的弱相互作用过程都符合这个规律。1964 年实验发现 K^0 介子衰变过程破坏 CP 不变性，后来非常准确的实验表明，时间反演变换 (T) 不变性也是破坏的，但 CPT 联合变换仍保持不变性。

【量子电动力学】 简称 QED。电磁场量子化的电磁相互作用理论。量子化的电磁场由电磁量子——光子描述。带电粒子间的电磁相互作用由光子传递。根据物理系统的具体情况，带电粒子可分别取经典、量子、非相对论和相对论近似。对含有带电粒子的成对产生和成对湮灭过程，带电粒子必须用相对论量子场论描述。光子和电子构成的物理系统的量子电动力学，可用如下拉氏量表述（取 $C = \frac{h}{2\pi} = 1$ 单位）：

$$L(x) = L_e(x) + L_p(x) + L_i(x)$$

其中 $L_e(x)$ ， $L_p(x)$ 和 $L_i(x)$ 分别是自由电子，自由光子和电子与光子相互作用的拉氏量：

$$L_e(x) = \bar{\psi}_e(x) \left(i \sum_{\mu=0}^3 \gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - m \right) \psi(x)$$

$$L_p(x) = -\frac{1}{4} \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 F_{\mu\nu}(x) F^{\mu\nu}(x)$$

$$L_i(x) = -\sum_{\mu=0}^3 j_{\mu}(x) A^{\mu}(x) F_{\mu\nu}(x) = \frac{\partial A_{\nu}(x)}{\partial x^{\mu}} - \frac{\partial A_{\mu}(x)}{\partial x^{\nu}}$$

$$j_{\mu}(x) = e\bar{\psi}(x)\gamma_{\mu}\psi(x)$$

$A_{\mu}(x)$ 是电磁场四矢势, r^{μ} 是四行四列狄拉克矩阵, $\psi(x)$ 是表示电子场的四行一列矩阵, $\bar{\psi}(x) = \psi^{\dagger}\gamma_0$, $\psi^{\dagger}(x)$ 是 $\psi(x)$ 的厄米共轭, e 和 m 分别是电子的电荷和质量。利用最小作用量原理, 可从 L 求出含有电磁相互作用的电磁场所满足的运动方程(量子化的马克斯方程)和电子运动方程(量子化的狄拉克方程)。作为相对论量子场论的 QED, 在含有相互作用的情况下, 是不能精确求解的。利用自由场方程的平面波解, 采用场的时间发展由自由哈密顿量决定(用自由场)、态矢的发展由相互作用哈密顿来决定的相互作用表象, 对于从 $t \rightarrow -\infty$ 到 $t \rightarrow \infty$ 的跃迁过程, 可成功地进行微扰计算。经过重整化处理(见重整化), 计算中出现的所谓紫外发散(出现的无穷大)可以全部吸收到实验可测量的物理参数(电子电荷和质量)中去, 因而圆满地克服了发散困难。以现代技术所能达到的最精密实验, 检验理论计算的辐射修正, 理论与实验惊人得符合(参见兰姆位移“电子反常磁矩”)。实验表明, 在现今实验所能达到的 10^{-17}m 小尺度内, 量子电动力学仍然是正确的。量子电动力学是电磁相互作用的准确而又完整的理论, 也是物理学中最经得起检验的最精确的基本理论, 因此成为建立其他相互作用基本理论之可借鉴的样板。

【费曼图】 量子场论微扰计算的一种图示表示。是用方法的提出者的名字命名的。它为所考虑的物理过程提供了一个直观图像。对于

给定的物理过程，它可以把微扰计算中要考虑的项都用图表示出来。相反，按规则（称费曼规则）根据这些图可直接写出要计算的微扰积分。它在微扰计算中起着指导作用。在相对论量子场论里，粒子可与外场作用，也可以通过虚规范粒子与其他粒子作用。费曼根据相互作用理论形式和微扰展开式的特点，给出了费曼规则：如何用图把所考虑的具体物理过程和要计算的项表示出来；如何根据费曼图把需要计算的积分写出来。在量子电动力学里，对于只有电子（ e^- ）、正电子（ e^+ ）和光子（ γ ）的系统，相互作用可表示为 $e\bar{\psi}(x)\gamma_\mu\bar{\psi}(x)A_\mu(x)$ ，可以看出，在同一点 x 有三个场：电子场，正电子场和光子场，即一次相互作用与这三个场相关联。

现在，费曼图和费曼规则已被广泛地应用在其他可重整的规范理论的微扰计算。电弱统一理论和量子色动力学在进行微扰计算时都应用费曼图和费曼规则，使得物理图像又清楚，计算又方便。

【康普顿散射】一种检验光的量子理论的重要实验。证明光子存在的实验。按照经典理论，光在散射时波长是不变的。但是，1920年以前从 X 射线照射物质的实验已观察到 X 射线波长的改变。1923年康普顿试图用光子与静止自由电子的弹性散射来解释散射波长的改变，并证实光子的存在。他认为如果光子作为一个粒子打在一个静止的自由电子上，一定会把它的一部分动量传递给电子，因而电子会获得一部分动量。根据这个物理图象，他首先从理论上导出了散射波长移动公式： $\lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta)$ ， λ 和 λ' 分别是光的入射波长和散射波长， λ_C 为电子的康普顿波长，它由电子质量决定 $\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$ 。 θ 是散射角。对于 $0 < \cos\theta < 1$ ，散射波长总大于 λ 射

波长。为了准确地检验理论结果,他选择价电子束缚很弱的石墨作为散射物质,这样可把电子近似地看作是自由的。通过测量 X 射线对石墨散射的不同散射角的波长与强度的关系来检验理论。实验结果与理论计算完全相符,从而证明了光的量子理论的正确性。而且这个实验已被公认为是探测到光子的实验。

【发散困难与重整化】在相对论量子场论的微扰计算中,对于某些理论(如 QED),最低次理论计算结果与实验符合得相当好。但是,如果试图通过计算高级项来提高理论计算精度,就会出现无法与实验比较的无穷大的结果,这就是量子场论微扰计算中遇到的发散困难。研究表明,产生无穷大有三个原因。一是量子场论具有的无穷多个自由度产生的,这种发散是通过适当选取积分限来解决;二是由理论中含有无质量粒子(如光子)产生的所谓红外发散,这可以通过仔细处理渐近态来解决;三是量子场论的类点结构(即粒子作为几何点)造成的所谓紫外发散。即理论中的参数是在任意小的距离的意义下定义的(而具体实验都只能达到有限距离),这种发散是通过所谓重整化来解决的。重整化的手续是,运用标准程序,把微扰计算中的有限部分从出现无穷大的积分中分离出来,然后把留下的无穷大并入理论中的物理参数,如耦合常数,质量等,把这种重新定义的物理参数作为实验可观测的有限的理论参数。经过这样重整的理论,就成为具有预言能力的自治理论。并不是所有相对论量子场论都能重整。可重整的一个重要条件,是相互作用耦合常数是个无量纲的小量。可重整与否不仅是检验理论是否合乎基本理论的要求,而且在探索新理论的研究中,还具有指导意义。近 20 多年来的电弱统一理论和量子色动力学的建立及其发展,就是例证。引力理论中的量子化发散问题,由于不可重整而未获解

决。这使一些致力于量子引力研究的理论家，试图从构造基本力统一的理论，来建立引力的量子理论，但至今未获得成功。

【真空极化】一种典型的量子电动力学效应。传递两带电粒子之间的电磁相互作用的光子，不满足物理粒子的能量—动量关系，是观察不到的虚粒子。按照量子场论，这种虚光子有时还会以虚正反粒子对的形式存在，这样就会对光子传递的带电粒子之间的电磁相互作用产生影响。从场的观点，虚光子转变的虚正反电子对在两带电粒子之间将被极化，正电荷将吸引虚电子而使之靠近，同时将排斥正电子而使其远移，这就非常类似于电偶极极化。真空极化效应是可观测的，实验测量的兰姆位移，电子反常磁矩都证实了真空极化效应的存在，并且与理论计算完全相符。真空极化还产生一种与经典电磁学的性质完全不同的所谓非线性 QED 效应。它是由于光子产生虚正反电子对以及正反电子对再湮灭的过程而产生的。这就使两个光子的散射截面不等于0。

【兰姆位移】相对论量子力学预言的氢原子简并能级 $2P_{1/2}$ 和 $2S_{1/2}$ 的分裂。由于兰姆和雷瑟用微波共振方法首先发现而被命名。两能级分裂的原因主要是量子化的电子场和电磁场的高次相互作用引起的，量子电动力学非常精确地计算出这种能级移动。尽管实验不断改进精密度，理论计算始终与实验相符，兰姆位移实验是量子电动力学三大实验支柱（分电子和 μ 子反常磁矩）之一。

实验是测量两能级差 ΔE 的共振频率 $\Delta\nu = \frac{\Delta E}{h}$ ，目前给出的最精确实验值为（1976年）：1057.862兆赫兹而辐射修正的理论计算值为（1975年）1057.864兆赫兹。

【电子反常磁矩】量子电动力学高级修正给出的电子磁矩。按照量子力学，自旋为 $\frac{h}{4\pi}$ ，电荷为 e 的电子，其磁矩 μ 为一个玻尔磁子

$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$ 。按照量子电动力学计算的高级修正为：

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\mu_B} &= 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) \\ &\quad - 0.328478445 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \\ &\quad + 1.184 (7) \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 + 0 (\alpha^4) \end{aligned}$$

$\alpha = \frac{e^2}{2\pi\hbar c}$ ，是精细结构常数，它的最准确的实验值为

$$\alpha^{-1} = 137.035987$$

理论计算达到十位有效数字，其结果为

$$\mu/\mu_B = 1.00115965238 \quad (26)$$

实验为

$$\mu/\mu_B = 1.00115965241 \quad (20)$$

小数点后九位都一致，这是检验量子电动力学正确性的重要证据，足见理论与实验的惊人相符。

【规范理论】一种由粒子的某种内对称性确定粒子之间相互作用形式的理论。“某种内对称性”是指与粒子之间相互作用有关的内对称性。作为一种基本原理，规范理论已成为现代粒子物理的理论基础。理论的基本做法是，把与粒子内对称性对应的运动规律整体不变性（即与时空无关，任何时空点都相同）推广到定域不变性（与时空有关），就自然地诱出传递相互作用的所谓规范场，并且同时给出它们相互作用的理论形式。

对由 $\psi(x)$ 描写的带电自由费米子，它的运动可由如下拉氏量：

$$L_0 = \bar{\psi}(x)(i\delta - m)\psi(x) \quad (1)$$

描述。其中 $\delta = \gamma_\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu}$ ， γ_μ 为狄拉克

4×4 阶矩阵，当 $\psi(x)$ 做如下的所谓 $U(1)$ 变换时：

$$\psi(x) \rightarrow e^{iQ\theta}\psi(x) \quad (2)$$

(其中 Q 和 θ 为与时空无关的量，其意义是对全部时空 Q 和 θ 均为常量，故称整体变换。) 那么：

$$\partial_\mu \psi(x) \rightarrow e^{iQ\theta} \partial_\mu \psi(x) \quad (3)$$

与 $\psi(x)$ 变换一样，因此，在 $\psi(x) \rightarrow e^{iQ\theta}\psi(x)$ 变换下，(1) 式保持不变。如果认为 $Q=e$ (电子电荷)，变换 (2) 恰好是电磁学里的第一类规范变换，该变换不变性的物理意义是电荷守恒。规范理论由此而得名。这种由 v 群描写的不变性只有一个群的生成元，自己与自己是可交换的，故称阿贝尔规范场。对于秩更高的群描写的不变性，可能有多个生成元，这些生成元之间满足确定的代数关系，彼此不能交换，而把由这种不变性诱出的规范场称为非阿贝尔规范场。

如果把上述 $U(1)$ 整体不变性推广到 $U(1)$ 定域不变性，让 θ 与时空相联系，即 $\theta \rightarrow \theta(x)$ ：

$$\psi(x) \rightarrow e^{iQ\theta(x)}\psi(x) \quad (4)$$

$$\partial_\mu \psi(x) \rightarrow e^{iQ\theta} \partial_\mu \psi(x) + iQ \partial_\mu \theta(x)$$

$$[e^{i\alpha\theta(x)}\psi(x)]$$

要使 (1) 保持形式不变，必须引进在 $V(1)$ 变换下做如下变换的规范场 $A_\mu(x)$ ：

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \theta(x) \quad (5)$$

让 $\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - iQA_\mu$ ，则可得到 $V(1)$ 定域变换不变的拉氏量。

$$L_1 = \bar{\psi}(x)(i\partial\!\!\!/ - m)\psi(x) - Q\psi(x)\gamma_\mu\psi(x)A^\mu(x) \quad (6)$$

其中 $-Q\psi(x)\gamma_\mu\psi(x)A^\mu(x)$ 为带电费米子与电磁场 $A_\mu(x)$ 的相互作用理论形式。

杨振宁和米尔斯最早把这种 $U(1)$ 定域规范不变性推广到秩更高的非阿贝尔群。非阿贝尔规范理论在构造电弱统一理论和量子色动力学（以及弱电强大统一理论）中得到进一步地发展和完善，并且起着主导作用。以上推导只验证了把 $U(1)$ 整体规范不变性推广到 $U(1)$ 定域规范不变性得到的理论形式，它与人们从总结实验结果中得到的理论形式完全一致。现在理论的发展表明，可以用微分几何方法，对任意半单李群所表述的对称性都可求出协变微分形式，从而求出规范场，以及粒子场与规范场的相互作用形式。

【电弱统一理论】 又称电弱相互作用的标准模型。 $SU(2) \times U(1)$ 对称性自发破缺的规范理论，统一描述轻子和夸克的电弱相互作用的可重整的基本理论。只包括轻子的理论形式又被称做温伯格—萨拉姆模型，这是用理论的最早提出者的名字命名的。

弱相互作用的唯象特征有许多与电磁相互作用不同之处，例如，弱相互作用下宇称和电荷共轭宇称都不守恒、作用强度弱、力程短等。但在探索弱相互作用理论时，人们自始至终都借鉴量子电动力学的理论形式，并首先建立了相当成功的弱相互作用的等效理论。在寻找可重整的基本理论时，注意到弱相互作用等效理论具有的矢量部分与电磁相互作用理论相类似的性质，而考虑电弱相互作用统一的可能性。在非阿贝尔规范理论发展的基础上，以及对

称性自发破缺和黑格斯机制的发现，最终导致电弱相互作用统一理论的建立。

电弱统一理论主要有三个要素：给出传递弱相互作用和电磁相互作用的规范玻色子的 $SU(2) \times U(1)$ 规范对称性；为了描述弱相互作用短程性质，通过对称性自发破缺给弱相互作用中间玻色子以质量所需的带电标量场的弱旋二重态 $\varphi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix}$ ；和参与弱相互作用的左手费米子弱旋二重态 $\psi_i = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu_i \\ d_i' \end{pmatrix}, i=1, 2, 3$ ，表示费米子代。 d_i' 中的 ‘.’ 是由于夸克与轻子不同，与它在同一弱旋二重态下的 F 夸克质量不为零而产生的与轻子的差别。

当将整体 $SU(2) \times U(1)$ 规范对称性推广到定域规范对称性时，可自然给出四个矢量玻色子： $W_\mu^i (i=1, 2, 3)$ 和 B_μ 。并且有两个耦合常数 g 和 g' 与 $SU(2)$ 和 $U(1)$ 对应。 W_μ^1 和 W_μ^2 适当地组合可给出传递带电流弱相互作用的带电中间玻色子 W_μ^+ 和 W_μ^- ； W_μ^3 和 B_μ 适当地组合可给出传递中性流弱相互作用的中性中间玻色子 Z_μ^0 和传递电磁相互作用的电磁场 A_μ 。这个组合给出了弱相互作用和电磁相互作用之间的联系，并且以所谓温伯格角来表示。

电弱统一理论的最引人注目的预言是，中性流弱相互作用过程和传递弱相互作用的重中间玻色子 W_μ^\pm 和 Z^0 的质量，这些预言都被实验所证实。现在存在的问题是，还未发现顶夸克和标量黑格斯粒子。这是目前高能物理实验所要做的最重要的实验。

【对称性自发破缺】某些相对论量子场论具有的性质，它是由系统的相互作用性质决定的。这种性质表现为真空的对称性小于相互作用的对称性，它类似于一定低温下的铁磁体、超导体以及液氦

所显示的长程有序现象。如果描写系统动力学的拉氏量具有某种对称性，而能量最低的基态或真空态不是一个，并且处于简并状态，当真空取定其中的某个状态时，则系统的对称性就自动地破缺，故称对称性的自发破缺。这种对称性的破缺不是外界作用的结果，而是由量子场的真空性质造成的，因而有时也称对称性的真空自发破缺。戈德斯通曾证明，对称性的自发破缺将自动激发出带有与对称性相对应的守恒荷所具有的量子数的零质量标量粒子，通称这种粒子为戈德斯通粒子。量子场的对称性自发破缺是黑格斯机制的发现和建立电弱统一基本理论的关键。

【黑格斯机制】一种用标量场实现规范对称性自发破缺的机制，是由它的发现者黑格斯的字命名的。对于一个具有整体规范不变性的带电标量场系统，当把它推广到定域规范不变时，会自动地引进规范场以及标量场与规范场的相互作用。如果标量场的规范对称性是自发破缺的，将使系统里的零质量规范矢量粒子获得质量，自动消除由于对称性的自发破缺而产生的零质量标量粒子（戈德斯通粒子）。有时也称规范粒子吃掉了戈德斯通粒子。黑格斯机制的发现是建立电弱统一规范理论奠定了基础。

【量子色动力学】简称 QCD。建立在夸克内对称性基础上的强相互作用理论，一种具有 $SU(3)$ 规范对称的非阿贝尔规范理论。在强子的夸克模型里，为了保持自旋与统计的关系，夸克必须携带所谓“颜色”自由度（参见“色”），每种夸克可带三种不同颜色，强子必须处于色空间的全反对称态，即色单态，强子不带色。这样，色与味无关，无论夸克的味怎样，从强相互作用角度看，都是等价的。这些特征类似于强子之间的强相互作用的电荷无关性；因

此，人们把夸克之间的强相互作用与色自由度联系起来，而认为夸克之间的强相互作用具有色对称性。

如果用 ψ^{ai} 表示第 a 味第 i 色夸克的场，角标 a 和 i 分别代表味和色的指标， i 的可能取值为 $i=1, 2, 3$ ，那么，色对称性要求，在 $\psi^{ai} \rightarrow \psi'^{ai} = \sum_{j=1}^3 U_{ij} \psi^{aj}$ 变换下，理论形式不变。考虑到物理要求， U

取行列式等于1的么正 3×3 矩阵的形式， $U = \exp \left(i \sum_{\alpha=1}^8 \frac{\lambda^\alpha}{2} \theta^\alpha \right)$ ， λ^α 为八个迹为零的 3×3 厄密矩阵， θ^α 为八个参量，与它对应应有八个守恒量。这种形式就是 $SU(3)$ 群描述的对称性。按照规范理论（见“规范理论”条），要求理论具有定域 $SU(3)$ 不变性，即让 $\theta^\alpha \rightarrow \theta^\alpha(x)$ 使其与时空点联系起来，就自然导出具有定域 $SU(3)$ 对称性的强相互作用拉氏密度：

$$L = - \sum_{\mu, \nu, \alpha} F_{\mu\nu}^\alpha F_{\mu\nu}^\alpha - \sum_{i, j, \alpha, \mu} \bar{\psi}^{i\alpha} \gamma_\mu (\delta_{ij} \partial_\mu - ig A_\mu^\alpha \frac{\lambda_{ij}^\alpha}{2}) \psi^{j\alpha} - \sum_{i, \alpha} m^\alpha \bar{\psi}^{i\alpha} \psi^{i\alpha}$$

式中

$F_{\mu\nu}^\alpha = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + gf_{\alpha\beta\gamma} A_\mu^\beta A_\nu^\gamma$ ，式中 $f_{\alpha\beta\gamma}$ 是 $SU(3)$ 群的结构常数，由下式定义，

$$[\lambda^\alpha, \lambda^\beta] = 2if_{\alpha\beta\gamma} \lambda^\gamma,$$

式中 g 是相互作用的耦合常数， m^a 是第 a 味夸克的质量， A^α ($\alpha=1, 2, \dots, 8$) 是八个规范场，描写八个自旋为1，质量为零的规范粒子—胶子。胶子与量子电动力学 (QED) 中的光子类似，它可以被夸克吸收或发射，传递夸克之间的色作用力。由于这种力把夸克束缚成强子，这就是胶子名称的由来。而不带色量子数的强子之间的强相互作用则是把夸克束缚成强子的色力的剩余作用。

QCD 作为可重整的规范理论，其结构和性质有许多与 QED 相似之处。但也存在重要的不同。QCD 是非阿贝尔规范场，有八个

规范粒子。光子不带电荷，光子与光子之间不能直接作用；而胶子带色荷，它不仅能传递夸克之间的色力，而且胶子之间可直接作用。 L 表达式中的 $gf_{\alpha\beta\gamma}A_{\mu}^{\alpha}A_{\nu}^{\beta}$ 就是胶子与胶子的自作用项。由此产生了 QCD 的一些诸如：渐近自由，夸克和胶子禁闭，例外态等重要性质。

量子色动力学虽然在统一解释强相互作用现象上取得很大成功，但是由于它的禁闭性质，涉及到强子的所谓大距离非微扰问题时，理论还不能完全解决。它还远未达到从强子的夸克结构导出强子所有性质的程度。

【渐近自由】量子色动力学 (QCD) 描述的强相互作用的一种性质。在 QCD 微扰计算中，当计算到高级项时，会遇到类似于量子电动力学 (QED) 中的真空极化问题。在 QED 里，由于真空极化的屏蔽作用，使电子有效电荷随着与电子距离的减小而增大，使电磁相互作用随着距离的减少而变强。对于非阿贝尔规范场的 QCD，问题要复杂。除了带色夸克产生色屏蔽外，由于胶子本身带色荷，存在自作用，它对真空极化也有直接贡献。研究表明，处在真空中的色荷，吸引真空中产生的规范粒子，在它的周围聚集相同的色荷 (QED 里是聚集相反电荷)，造成反屏蔽效应。计算表明，在夸克味不超过 16 的情况下，真空中胶子分布所产生的反屏蔽效应，超过夸克对产生的屏蔽效应。随着距离的减小，有效色荷也减小，相互作用变弱，致使有效相互作用强度随着距离的减小而趋于零。这就是渐近自由。

按照量子力学的不确定关系，小的空间距离相当于大的能-动量。根据这点以及量子色动力学的渐近自由的性质，把微扰 QCD 应用在粒子物理中强子的高能过程中，已经取得了很好的结果。

【夸克—胶子禁闭】夸克质量不大（上，下，奇异），胶子质量为零，但迄今为止实验上却从未观察到自由夸克和胶子。根据量子色动力学的反屏蔽性质，把夸克或胶子从强子中打出来，理论上，不是微扰论所能解决的问题。在夸克模型里，强子都是无色的，人们设想，带色量子数的夸克和胶子，由于动力学的原因，被禁闭在半径约为 10^{-15} 米量级的强子内，只有像强子这样无色的粒子才能作为自由粒子出现。人们认为，由于反屏蔽效应，两色荷之间色力线不像两电荷之间的电力线分散在空间，而是集中在两色荷的连线上，形成一根弦。色力线带的能量正比于弦的长度，当两色荷之间距离增加时，弦的能量也增加，当能量增加到一个强子质量时，弦就断裂，生成一对新的正反色荷。每段弦的两端都有一对相反色荷，使得自由粒子总是以强子形式出现，从而保持色禁闭。在格点规范理论里，对格点数不多的情况进行蒙特—卡罗法模拟得到的初步结果支持连续时空的规范理论有色禁闭性质。

【例外态】非由正反夸克对或三个夸克（或三个反夸克）构成的强子。按照量子色动力学，对夸克构成的强子态只有色单态的限制。胶子带色荷；可与夸克耦合。因此，在理论允许范围内，还应存在由胶子组成的束缚态 gg （俗称胶子球），以及其他多夸克态和胶子与夸克的混合态。这些例外态存在与否，是对 QCD 的重要检验。理论上对这种粒子谱曾有过不少研究，实验上也对它们衰变的特有的终态进行探测，但至今都没有确切结果。

【格点规范理论】连续时空分割成离散格点的规范理论。格点的点阵上定义为费米子，格点连线定义为规范场，拉氏函数满足格点

上的规范不变性。当格点间距离趋于零时，格点规范理论趋于连续时空的规范理论。在格点规范理论里，在一定物理条件下，耦合常数 g 随格点间距离 a 的减小而减小，当 a 趋于零时可用弱耦合展开，相当于连续理论的微扰论；当 a 大时 g 的值也大，要用强耦合展开，而相当于量子色动力学的大距离的非微扰区。因此，人们试图用格点规范理论研究量子色动力学的大距离非微扰性质。人们用格点规范理论计算耦合常数、强子谱以及强子衰变这些涉及量子色动力学非微扰问题，主要计算方法是在电子计算机上做蒙特—卡罗模拟。要提高理论精度，就需要增加足够的格点数。由于计算机容量的限制，该理论目前还得不到完全确定的结果。

【夸克—胶子等离子体】一种由大量自由夸克和胶子组成的新物质态，是传导强相互作用色荷的宏观体系。通常的核物质，由夸克组成的可自由存在的强子保持构成物质的最小单元。但是当给足够多的核物质以足够大的压强使其处于足够密的状态时，强子将会彼此渗透而不能作为最小单元存在。按照量子色动力学的渐近自由性质，足够接近的夸克和胶子可处于自由状态，这样就形成一个宏观上仍然是无色的，但可传导色荷的新物质态。理论上主要是运用可处理从大距离到小距离量子色动力学的格点规范理论运用计算机模拟寻找相变点。实验上为了提供足够多的核子而运用高能重离子碰撞实验来观察形成新物质态产生的现象。寻找相变点和研究可观测标志新物质态的新性质是目前关心的重点，也是建造重离子加速器的目的之一。目前仍处于研究探索状态。

【粒子物理标准模型】量子色动力学、电弱统一理论描述三代轻子和三代夸克的强相互作用。电磁相互作用和弱相互作用理论框架。

规范对称性为 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 。除了顶 (t) 夸克和黑格斯粒子实验上没发现外,所有实验结果都与理论相符。它的最大缺点是,至少有18个理论不能预言的自由参数,致使一些物理学家试图建立各种相互作用统一的模型以达到更高的理论确定性。

【弱电强大统一理论】统一弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用的规范理论,简记为(GUT)。粒子物理标准模型有三个规范群和三个耦合常数。存在的问题是三个对称群来源于什么?它们是否可以统一,因而可发现它们之间的关系?构造大统一规范理论的关键是寻找合适的规范群,其必要条件是在目前实验能量下能给出标准模型的理论并且不会给出与标准模型相冲突的预言。在所构造的模型中最后确认可与标准模相容、形式较简单的是 $SU(5)$, $SO(10)$ 和它的推广例外群 E_6 。

三个耦合常数随能量的变化的变化如:所示。在这个模型中三个耦合常数由两个参数 m_x 和大统一耦合常数 q_{GUT} 描述。因而可导出一个可给出温伯格角的关系。

另外一个预言是重子数和轻子数破坏的过程。在大统一理论里,费米子——轻子和夸克同处在一个 $SU(5)$ 的表示,这样,在超重玻色子作用下,它们之间可相互转化,如果夸克转变为轻子,或反之,那么就破坏了重子数守恒和轻子数守恒。一个令人注意的结果是质子可以衰变: $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 。按照 $SU(5)$ 大统一模型的理论计算结果,理论计算质子寿命小于实验下限,因此,最小 $SU(5)$ 大统一理论一般认为被质子衰变实验否定。

【磁单极子】带单极性磁荷的粒子。在经典电磁学里,物体可以带正电,也可以带负电。但具有磁性的磁体,其南极和北极总是联在

一起的,因而认为磁性来源于环形电流。1931年狄拉克研究恒定磁场里运动的电子的波函数相位与电磁场量之间的关系时,考虑到量子原理里波函数相位的不确定性,导出了电荷量子化条件:

$$\frac{eg}{nc} = \frac{n}{2} (n = 1, 2, \dots)$$

其中 e 和 g 表示电荷和磁荷。当 $n=1$ 时对应最小的磁荷和电荷,并分别称之为单位电荷和单位磁荷。上式表明,任何带电粒子所带电荷都一定是单位电荷的整数倍;任何带磁荷粒子所带磁荷也必定是单位磁荷的整数倍。因此,如果磁荷确实存在,该式在一定程度上解释了观测上的电荷量子化。研究表明,SV(5)弱电强大统一规范理论存在磁单极解。从该理论里的超重矢量玻色子的大质量可推出磁单极的质量在 10^{16} 吉电子伏的量级。这是目前实验室能量所不能达到的。后来不少理论家开始研究磁单极子与其他粒子的相互作用性质,探索物理上可能产生的新现象以及它的存在对宇宙的形成和演变产生的影响。尽管实验上无论是在宇宙线,磁铁矿石还是在陨石中寻找,都找不到,但由于磁单极子毕竟是从现有理论得到的自然结果,并且可解释电荷量子化,因而仍吸引一些理论家和实验家在继续进行研究。

【孤子】 某种非线性方程的限定空间区域且不弥散的解。关于孤子的研究,最早起源于现象观察。在某种特定条件下,它作为河流中产生的形状和速度随着传播不改变的奇特“波包”,早在1834年曾被人们观察到(见李政道《场论简引和粒子物理》)。为了描述这种奇特“波包”的形成和性质,科学家们试图在流体力学里寻找和建立具有这种奇特解的方程。后来在一维波的色散方程和非线性方程结合起来的方程里得到了这种奇特解。因而认为这种奇特“波

包”是由于色散现象与非线性效应相抵消造成的。由于这种形状和能量是不随传播改变的稳定“波包”解不同于随着传播将扩散的平面波迭加形成的“波包”，而称其为孤立波。随着计算机技术的发展，1964年人们通过用计算机模拟孤立波的传播，来研究两个孤立波相向运动产生的碰撞过程，结果表明，碰撞前后的两个孤立波的波形不变，这种特征恰如两个粒子的弹性碰撞，后来就把这种孤立波称为孤子。近年来的研究，又把一维经典孤子扩大到三维孤子；又发展了一套求得量子孤子解的普遍方法。其中一个引起人们注意的结果，是霍夫特和波利亚科夫在某种特定模型下得到的在全空间能量有限的正则磁单极解。由于这种模型不是现实物理模型，又有一些理论家研究其他模型的孤子解。孤子的概念不仅在流体力学、粒子物理里受到重视，在其他涉及非线性问题的领域，对孤子概念也十分感兴趣。

【费米子】 见“自旋与统计关系”。

【玻色子】 见“自旋与统计关系”。

【超对称】 关于玻色子和费米子之间的对称性。对标准模型里的每个粒子都引进超对称伴侣子 (Partner)，致使对于每种费米子都对应一个自旋为0的标量粒子 (Sfermion)，对于每个基本玻色子都对应一个自旋为 $\frac{1}{2}$ 的玻色子 (Bosinos)。如果超对称谱是精确对称，粒子与影子粒子质量一定相等，实验上没观察到这种粒子。因此，希望通过超对称破缺使得伴侣子具有破缺标度能量，但至今还无法确定破缺能量标度。因此目前实验还没有支持超对称的证据。

【广义相对论】关于引力的几何理论。1916年，爱因斯坦把限于惯性参考系的狭义相对性原理推广到加速参考系，从而建立了描述引力作用的广义相对论。爱因斯坦通过分析假想的升降机实验，建立了等效原理——引力作用的效果与加速度产生的表观现象不可区分。他还把时间和空间当作相互平等的独立坐标分量，使时间与空间构成一个四维时空。在此基础上，又建立了广义相对论的数学表述原理——广义协变原理——在任意坐标系中，物理定律的理论表述必须是协变的（理论形式不变）。通过这两个原理，爱因斯坦把物质及其运动与描写引力场的四维时空几何联系起来，建立了引力场方程：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{C^4}T_{\mu\nu}$$

式中： C 为真空中光速； $G=6.672\times 10^{-11}$ 米³/千克·秒²，是牛顿引力常数； $T_{\mu\nu}$ 是与物质质量和运动状态相关的能量—动量张量； $R_{\mu\nu}$ 是时空曲率张量， $g_{\mu\nu}$ 时空度规张量。等式左端是描写引力场的四维时空几何量。从方程可以看出，质量不但因惯性在加速参考系里产生表观上的“力”，而且也是引力源。按照广义相对论，由于质量的存在，导致时空弯曲，因而产生了引力。

广义相对论只给出了很少的预言。又因它的效应十分微弱，实验检验十分困难。尽管如此，它预言的来自遥远星际空间的光穿过太阳表面时会产生0.0005度角的微小偏离，已在误差为10%的测量中被验证。它所预言的超新星的爆发和黑洞，都已被观察到。由于引力与宇宙的形成及演化、宇宙的大尺度结构紧密相关，人们至今仍以极大的兴趣在继续研究引力理论。当尺度小到普朗克标度（ 10^{-36} 米）时，引力的量子效应将会明显。这使一些物理学家开始探索引力的量子理论。由于引力场量子化的不可重整的困难，没

有取得进展。但近年来,一些粒子理论家在研究自然界基本相互作用的统一时,已涉及到普朗克标度的物理。因而,一些理论家试图通过建立自然界基本相互作用统一的理论,来描写引力的量子效应。虽然在所构造的理论中发现了某些较好的性质,但现在仍处于理论的探索阶段。

【超弦理论】一种超对称的弦理论。弦理论是把构成物质的基本组份作为一种一维延展弦的理论。弦理论的场变量不是像通常场论那样定义在时空点上,而是定义在一维延展弦上。由于这种弦只有普朗克长度(10^{-36}m),而不影响我们现在能量的普通场论。弦的每种振动模式对应一种粒子,可定义费米弦和玻色弦。对超弦规范理论的研究,使人们发现了这种理论的优点。在普朗克标度,弦的激发可能会使引力与量子论协调起来,因而吸引了许多理论家去研究,研究目标是用只有一个参数统一描写包括我们现在能区的粒子物理。但至今没有找到能达到这种目标的现实模型,而且理论中的复杂数学形式所表征的物理含意至今也未完全清楚。该理论是一种相互作用统一理论尝试,其前景如何还需等待未来的研究。

物质微观结构探索

【分子和原子的探测】对分子和原子本身结构及其内在规律的清楚了解要通过对它们的结构及特性进行实验探测,这个工作是20世纪初由一批物理学家通过实验和理论相结合实现的。

比较典型的实验有分子光谱和原子光谱的实验，它对原子和分子结构理论的研究和发展起了很大作用； α 粒子和原子的散射实验，对确定原子是由核和核外电子组成的起着决定性作用；电子和原子的散射实验，它对确认原子是有能级的，即核外电子是不连续的壳层结构起了关键作用；电子电荷的测定；电子质量的测定；原子质量的测定——抛物线法；质谱仪，它比抛物线法有更多的优点，它把电场和磁场组合起来，对带电粒子有聚焦作用，可以测量多种不同原子的质量。

【原子光谱】19世纪下半期发现线光谱是由原子发射的，不同的线光谱即为不同原子的光谱。在20世纪初又发现这些谱线的规律与原子内电子的分布情况及运动规律有密切联系。从此原子光谱的实验规律便成了研究原子内部结构重要依据，推动了原子结构理论的发展。

1885年瑞士的物理学家巴尔麦发现氢原子光谱中可见部分谱线的波长满足如下公式：

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

其中 B 为一常数，等于3645.6埃，1埃=10⁻⁸厘米，而 n 为整数。当 $n=3, 4, 5, 6$ 时，上式准确地给出了氢光谱中可见光部分四条谱线的波长。 n 大于6以上的谱线在可见光谱以外。

瑞典的物理学家黎德堡把上公式简化成更简单的波数公式：

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right);$$

$$n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

其中 $R=4/B$ ，称为黎德堡常数。 $R=109677.581$ (厘米)⁻¹。当 $n \rightarrow$

∞ 时，波数趋于一个极值 $R/4=27419.395$ (厘米) $^{-1}$ 。还发现远紫外部份波数满足：

$$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right); \quad n = 2, 3, \dots$$

红外区有三个线系，分别满足：

$$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right); \quad n = 4, 5, \dots$$

$$\nu = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right); \quad n = 5, 6, \dots$$

$$\nu = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right); \quad n = 6, 7, \dots$$

统一的公式为：

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right);$$

$$m = 1, 2, 3, 4, 5; \quad n = 2, 3, 4, 5, 6$$

后来黎德堡和瑞慈等人又发现碱金属的光谱线都是双线的，锂光谱的双线很窄，钠光谱双线较宽，并满足如下公式：

$$\text{主线系: } \nu = 1S - nP; \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

$$\text{第二辅线系: } \nu = 2P - nS;$$

$$n = 2, 3, 4, \dots$$

$$\text{第一辅线系: } \nu = 2P - nD;$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\text{柏格曼系: } \nu = 3D - nF;$$

$$n = 4, 5, 6, \dots$$

P, D, S, F 分别为四个线系的修正数。原子光谱是因原子的核外电子只能在满足量子化条件的轨道上运动，m 壳层能量和 n 壳层能量差满足玻尔频率条件：

$$h\bar{\nu}_{nm} = E_n - E_m$$

其中 h 为普朗克常数, $\bar{\nu}_{nm}$ 是电子从 m 壳层跃迁到 n 壳层辐射出光子的波数。由此可见, 对原子光谱的研究, 可以方便地分析出原子的核外电子的壳层情况。通过它玻尔成功地给出了氢原子结构模型。这是人类对微观原子结构的第一次成功的揭示。

【分子光谱】 分子也有特定的光谱, 但不是线光谱, 而是带光谱。这是因为每一组光谱线一端极密, 分辨能力较差的仪器往往不能分辨出谱线来。分子光波的波长范围包括远红外线、近红外线、可见光及紫外光。分子光谱分为三类, 每一类都与分子的内在结构及内在运动有关。

分子的振动光谱 在双原子分子内, 原子核与原子核之间, 原子核与各电子之间都有相互作用力, 其结果使原子在两平衡位置上作微小的振动。相互作用力是满足量子力学的非弹性力, 谱线为 $\Delta n = \pm 1$ 的基谱线和 $\Delta n = \pm 2, \pm 3, \dots$ 的泛谱线合成。可用光的吸收实验研究。

分子的转动光谱 分子各原子核不作振动, 而整个分子作转动的分子光谱。它的特点是在波数尺度上各谱线间隔相等, 显然远红外光谱满足这一特点, 从中可以测出分子的转动惯量为 10^{-40} 克·厘米²量级, 并可求出双原子的两原子核距离在 10^{-8} 厘米量级。

分子的电子振动光谱 除上面两种光谱外, 还存在着两个原子壳层电子振动的能谱, 所以分子光谱实际上是三种光谱的迭加。因电子壳层很复杂, 所以电子振的光谱很复杂, 使分子的每个光谱带中有很多条靠得很紧的电子振动谱线, 在分辨率不高的情况下, 很像带状光谱。如果对分子光谱作精细地分析, 可以得到分子的振动、转动及电子振动等许多知识, 如它们的振动频率, 转动

惯量，原子间的距离，以及电子壳层的能级分布等。而且还可以用类似的方法分析多原子的光谱。

【 α 粒子与原子的散射】在20世纪初科学家对原子结构提出两种不同的模型。一是1903年由汤姆孙提出的模型，即带正电的原子物质与电荷质量都是均匀的分布在原子球体中，带负电的电子是一粒一粒的分体在球体的不同位置上。另一种是1912年由卢瑟福提出的模型，即在原子中心的很小体积内存放着原子的绝大部分质量和正电荷，带负电的电子则分布在与原子大小同量级的封闭轨道上不停地绕核旋转，好象行星系一样，且正负总电荷相等。究竟哪一种对， α 粒子对原子的散射实验很好地解答了这一问题。 α 粒子是原子量为4，带两个正电荷的氦离子，可以直接来自某些放射性元素，速度可达 $1/15$ 的光速。因质量为电子的7400倍，所以具有很高能量。让平行的 α 粒子束穿过很薄的金属箔，用闪烁屏可借放大镜看到 α 粒子打在屏上放出的闪光。实验证明 α 粒子偏转了方向，偏转 90° 的约占 $1/8000$ ，有少数可偏转达 180° 。当时已知道原子直径约为 10^{-8} 厘米，如果原子中带正电荷的物质均匀分布在原子中，无法计算出它能使带正电荷的 α 粒子产生大角度散射的静电斥力，只有集中在 10^{-12} — 10^{-13} 厘米的大质量的正电荷球才可能产生 α 的大角度散射，这个实验否定了汤姆孙原子结构，而证实了卢瑟福的原子核结构模型。如果用泡室或流光室等径迹室来做这个实验就更直观了，因从径迹中可清楚地看到 α 粒子与核作用时的偏转，还可以看到反冲核的径迹，从径迹密度还可以看到反冲核所带的电荷情况。

【电子与原子的散射】卢瑟福的核模型是建立在经典电磁理论基础

上的,但这个模型确与经典电动力学存在着尖锐的矛盾。因为绕核运动的电子有加速度,根据经典电动力学,电子应自动发出辐射而不断减小能量,电子轨道会不断减小,原子成为不稳定原子。实际原子是稳定的。玻尔提出电子的轨道是量子化的,电子的能量也只能量子化地改变。这种由核和核外量子化的电子壳层构成原子的模型被电子与原子的散射实验很好证明。

用运动的电子与原子碰撞(如汞原子),当电子能量很低时,只产生弹性碰撞。当电子能量增加到 4.9eV 时,电子把全部能量转移给汞原子,汞原子会发射出波长为 2537埃 的水银光谱线。这是因汞的壳层电子被入射电子打到了另一能级上,但这能级是不稳定的,它会自动跑回原能级,放出从电子上获得的能量。入射电子能量再增加,电子损失的能量却停留在 4.9eV 上,直到电子能量等于 6.7eV 时,汞原子的电子又被打到另一个能量的轨道上,退回原轨道时发出波长为 1850埃 的另一水银谱线。当电子能量增加到 10.4eV 时,汞原子的电子被打出汞原子,汞原子被电离。证明了汞原子的壳层电子有两个激发态,只有入射电子等于激发能时,电子才改变轨道产生能级跃迁,否则它将在轨道上稳定运行。很完美地证明了玻尔的原子的壳层模型。

【电子电荷的测量】最早的电子电荷是从法拉弟的电解定律推断出来的。实验证明一克原子的任何单价离子都带有相同的电量,而和离子种类及质量无关,这个电量叫法拉弟常数 F ,等于 2.892×10^{14} 绝对静电单位。一克原子的二价离子电量为二价的二倍,一克原子的三价离子带有三倍电量。根据阿伏加德罗定律,一克原子的任何物质永远含有相同的原子数 N ,则每个单离子的电荷为: $e = F/N$, $N = (6.0228 \pm 0.0011) \times 10^{23}$ 。实验还证明离子的电荷只能是 e 的

整数倍,而不存在分数倍。因而当时就断言单价离子的原子是由带正 e 的离子和带负 e 的电原子组成的,给电原子起名为电子。后来通过油滴试验准确测出了电子电量 $e = 4.805 \times 10^{-10} \text{CGSE}$ 。在阿伏加德罗常数的测量中,进一步修正的电子的电量: $e = (4.8025 \pm 0.0010) \times 10^{-10}$ 静电单位。

【电子质量的测量】因带电粒子经过电场或磁场要产生偏转,所以很容易想到通过电场或磁场来测量电子质量。可惜的是偏转还与电子的电量及速度有关,所以往往用飞行时间法先测出速度进而测量电子的荷质比。

早在20世纪30年代,就用双电容器法测出电子荷质比为 $e/m = (1.7590 \pm 0.0015) \times 10^7 \text{CGSM/克}$ 。用纵磁场聚焦法测量结果为:

$$e/m = (1.7592 \pm 0.0005) \times 10^7 \text{CGSM/克}$$

由此很容易算出氢离子的荷质比:

$$e/m_H = (9573.5 \pm 1) \text{CGSM/克}$$

可以得到氢原子的质量是电子质量的1837.5倍,现在已精确测出电子质量为: 0.5110024MeV 。

【原子质量的测量】因原子是中性的,无法在电、磁场中偏转,所以往往把原子电离成带正电的离子,再用重粒子谱仪、质谱仪等测量出离子的质量,从而得到原子的质量。现在介绍一下最早的测量法——汤姆孙抛物线法。在高气压的放电管的阴极中心打一小孔,被放电管电场加速的各种离子们飞向阴极并有一部份从小孔中飞出,形成正离子束。如果小孔为0.1毫米直径长二厘米,飞出

的正离子束将是平行束,而且有各种不同的能量。束流如果被彼此平行或反平行垂直于束流的电场与磁场偏转向彼此垂直的方向,如让以后的束流打在垂直方向的荧光屏或照像板上,相同质量不同速度的离子将显示出一条抛物线,满足如下关系:

$$E^2/x = (A^2/B) \cdot (e/m)$$

式中 E 为电场引起的偏转方向, x 为磁场引起的偏转方向, A 和 B 为仪器的常数, e/m 为离子的荷质比。不同质量的相同电荷离子将形成不同抛物线,从抛物线可算出原子的质量。

【质谱仪】质谱仪是对抛物线测量法的改进,因抛物线法不同能量的相同离子是散开在线上的,打出的荧光强度很弱,测量很困难,质谱仪把电场和磁场改为相互垂直,使离子在两种场中的偏转方向相反,因而起到聚焦作用,这样相同质量,不同能量的离子将被聚焦在同一点,不同质量的离子被聚焦在不同点,从而大大提高了对原子质量测量的精度。为了提高精度,后来又出现了双聚焦的质谱仪,质量测量精度可达 $1/15000$ 。

【原子核的探测】人们在研究原子时,已认识到原子核带有正电荷,电量为电子电荷的整数倍,倍数与门捷列周期表中元素的序数相同,核的质量近似等于原子量单位的整数倍(原子量单位为氧原子质量的 $1/16$),这个整数值称为质量数,它刚好等于核中的质子数+中子数。但质子和中子是怎样构成原子核的?核有多大?那些不稳定的核放出些什么?这些就得借助于核物理实验方法和各种核探测器了。要想研究核就得借助一些微观“子弹”,这些“子弹”可来自放射性同位素放出的射线: α 、 β 、 γ ,或人工从加速器和反应堆中产生的质子、中子等粒子。

【核的大小】通过电子、中子、质子和 α 粒子被核散射以及研究 μ 介子原子放出的x射线都可以得到核半径，由下列公式给出：

$$R = r_0 A^{1/3}$$

式中 r_0 是一常数， A 为核的质量数。实验证明核物质密度几乎是相同的。测出的 $r_0 = (1.2 - 1.4) \times 10^{-13}$ 厘米。

【核重量】见“原子质量的测量”。

【核成分】在原子核中质量数等于质子数和中子数之和的实验结果，使人们认识到核是由质子和中子组成的。如果质子和中子有特定的比例数，这核就稳定，否则就会放出正反 β 射线。是否核中也存在着正反 β 粒子甚至 α 粒子呢（因为有些核会辐射出 α 粒子）？大量的研究证明其答案是否定的。正 β 来自质子转变成中子、正电子和中微子；负 β 来自中子转变成质子、电子和反中微子，自由质子是稳定的，现在还没有发现自由质子衰变。它的电荷是正的，质量为电子的1837倍。自由中子是不稳定的，可衰变成质子、电子、反中微子。中子是中性的，重量大约比质子重2.5倍电子质量（约为 0.0023×10^{-24} 克）。电荷相同而重量不同的核称同位素，它们具有相同的物理化学性质。电荷不同而重量相同的核称为同量异位素，它们具有不同的物理化学性质。

【核力】质子是带电的，为什么会有多个质子聚集在 10^{-12} 厘米小的核中而不被库仑斥力分开呢？这主要因核子有短程的核力——核子的结合能。核原子量的精细测量表明，核质量总比组成核的自由质子和自由中子质量和小千分之几。这个质量差值就是核的结合

能,一个核子的结合能约在6—8兆电子伏范围内。它比电磁斥力要大得多,使得核子能紧紧地结合成核。

【核能级】与原子和分子的电子壳层结构相似,核子在核中也是按壳层分布,也有确定的能级,不同的是它还像液滴一样有整体的形状变化,能级还与整体变形有关。通过 α 、 β 、 γ 与核子的核聚变和核散射研究,核有稳定的基态和不稳定的激发态。基态一般属于壳层被填满的球形核。如果球形核外还有核子,它会使核变形变成不稳定核,并辐射出某种粒子使核再回到稳定的基态。所以研究核能级对了解核结构和核力,有重要意义。它使人类更清楚认识热核反应和聚核反应,对和平利用原子能起着理论指导作用。

【核物理实验中对粒子的鉴别】要想研究核结构和核能级,就必须用一些粒子和核产生核作用,来研究它的产物。识别粒子是一种重要的核实验手段,常用的方法有脉冲形状鉴别法,射程法,飞行时间法,磁场偏转分析法和能量分析法。

【脉冲形状鉴别法】我们可以通过分析闪烁计数器、碘化钠晶体、铅玻璃、电离室、正比计数器等探测器的输出脉冲的幅度来研究带电粒子甚至中子和 γ 粒子的能量。脉冲形状分析一般把脉冲幅度数字化,也可以用电荷数字化,即把脉冲所对应的电荷变成数字,再求出它所对应的能量。

【射程法】用粒子穿过介质的长度来分析粒子能量,用这种方法可以分析出动量相同但质量不同的粒子,簇射计数器,强子量能器及中子量能器等基本上利用这个原理。

【飞行时间法】用飞行时间来识别粒子的一种方法。当不同粒子动量相同时,它在磁场和电场中偏转的曲率半径也相同。因有可能是不同速度引起的曲率半径变化,所以可以用两个计数器,一般用闪烁计数器或小平板电容器放在粒子通过的不同位置上,即可以用带电粒子通过两个探测器的时间差和两探测器之间的距离,求出这粒子的飞行速度,进而求出粒子质量。

【电磁场偏转分析法】用带电粒子在电磁场中偏转的曲率半径,结合飞行时间法来识别不同质量的带电粒子。这是在核物理谱仪和粒子物理谱仪中经常被使用的一种方法,如磁谱仪和质谱仪中都采用了这种方法。

【能量损失法】用带电粒子经过介质时引起介质电离而已损失能量,如从介质的电离损失的信息分析出带电粒子能量损失情况,就可以知道它是由什么粒子引起的,因不同质量的粒子在相同的速度下,电离损失也是不同的。这是在径迹室、电离室、正比型探测器中被普遍应用的方法。

【核辐射的方向角关联】如果核在一足够短的时间内级联放出两个粒子,它的几率将与这两个粒子的夹角有关。这种关系就叫核辐射方向的角关联。通常情况下,核辐射是各向同性,只有核自旋方向被极化的系统,辐射几率才与方向角有关。观察角关联时,相当于在一个确定方向上测量第二个辐射粒子的辐射几率,即相当于把发出第一个辐射方向几率最大的自旋方向的核挑选出来看第二个辐射几率,因而出现各向异性。观测条件:(1)在两次辐射的时间

内核状态没发生变化。(2) 只有相同粒子的辐射。(3) 两个探测器对辐射粒子的极化不灵敏。通过角关联的测量可以获得有关能级和辐射角动量以及辐射混合比等物理参数。

【在束核谱技术】把加速器或反应堆的束流引起的核反应产物，特别是 γ 射线直接送到探测器，来研究原子核结构和性质的方法。低能加速器尤其是重粒子加速器的发展，极大地推动了这一技术。因为重粒子核反应可以使核成为高自旋激发态，它会改变核结构，能观测到低自旋激发态观测不到的新性质。探测时往往用多种探测器、多重符合进行综合测量。这种技术主要用来研究核激发态能级、激发态能量、寿命、核的宇称、自旋等。束流可用带电束、中子束、 γ 束。在束核谱学还可用来研究固体物理和原子物理等其他学科。

【核靶的制备技术】核靶是放置在束流上，让其和束流粒子发生核作用的物体。它的厚度、面积、耐辐照能力、均匀性、化学纯度等对实验都极为重要，所以有各种制备技术要求。核靶有三大类：自支撑靶，用纯净的靶物质按实验要求，加工成厚度和面积合理的薄片，直接放在支撑架上；衬底靶，把靶物质通过真空蒸发、电镀、滚压、重离子溅射、电磁同位素分离器等方法附着在金属片、碳薄和有机膜上，再固定在支撑架上；气体靶，即把靶物质气体放在一小室中，作靶。靶室往往就是探测器，使用很方便。

【核极化靶】靶物质被极化了的靶。极化度越高极化靶的质量越高。置备极化靶可用静态极化法和动态极化法两大类。极化靶在实验物理中主要用来研究高能粒子的自旋；在核物理中用来研究

核子—核子、核子与核相互作用同自旋的关系并测量共振能级的自旋，对于基态形变核可以研究形变形态及各种核过程同形态的关系。美籍中国物理学家吴健雄曾用极化的 ^{60}Co 的 β 衰变实验，证明了弱相互作用中宇称不守恒。

【核物理实验中的数据获取及分析】核物理实验中一种复杂的，与计算机配合的电子学数据采集和分析系统。在各种量能器中用幅度数字化线路加计算机，在飞行时间谱仪中用时间数字化线路加计算机，在定位探测设备中用自动控制系统触发、计数分析出粒子径迹。数据获取又叫在线系统，数据分析又叫离线系统。主要用于能谱分析、多参数综合谱分析、角分布测量、飞行时间测量、同位素识别等。除核物理外，它们还在高能物理、放射化学、核医学、生物学、冶金、探矿、材料分析、石油勘探等多种科技领域被广泛应用。参见“粒子实验物理”中的“数据获取及分析”。

【实验室坐标系】用实验室做参考系定出的坐标系统。通常用 x 、 y 、 z 三个互相垂直的坐标来确定空间的某一点，这是核物理实验中必不可少的坐标系统。

【质心坐标系】以母粒子作坐标原点的运动参考系，这对研究高速运动母粒子的衰变情况非常方便，所以在核物理和粒子物理实验中经常通过用质心系和实验室系相互变换来较快地计算出感兴趣的物理量。

【气体电离探测器】利用气体放电原理，通过收集带电粒子穿过探测器时使其介质气体的电离来测量入射粒子的仪器。包括电离室、

正比计数管和盖革计数管。由于它的结构简单、性能可靠、成本低、使用方便，一直在核物理实验中被广泛利用，近年来又被发展利用到粒子物理实验中。它可以探测的带电粒子有 α 粒子、 β 粒子、质子等。对于中性粒子如：X 射线、 γ 射线、中子等，它们虽不能引起气体电离，但往往可以和气体介质产生别的作用而产生出带电粒子，所以中性粒子也可以被气体电离探测器探测，只是探测效率不及带电粒子。这种装置可以用来测量粒子的强度、粒子的能量，及粒子的种类。但这些都对低能粒子有效，对高能粒子探测却很难如此简单进行。

【电离室】一种最早的测量核辐射的气体电离探测器之一，早在 1911—1914 年间，就用它成功地发现了宇宙线。最简单的电离室由两块平行板构成，一块接几百至几千伏正高压，一块通过电阻接地。当带电粒子经过时，使两板之间气体电离，正离子飞向阴极，电子飞向阳极。两板上产生感应电荷，在接地的电阻上就形成一脉冲信号。由于电子飞行速度比离子要大三个量级，电子将快速到达阳极，在到达前，由于是正反离子对共同贡献，脉冲上升，随着电子减少和离子被阴极吸收，脉冲慢慢下降，直到正离子被吸收。由此可见，电离室相当于简单的 RC 放电线路，不同的电离室就是选择不同的 RC 值设计出来的。如果离子收集时间为 T^+ （约为 10^{-3} 秒），电子的收集时间为 T^- （约为 10^{-6} 秒），当取 $RC \gg T^+$ 时，为离子脉冲电离室，它收集了全部电子和离子，可以用它来测量带电粒子的能量。当取 $T^- < RC < T^+$ 时为电子电离室，它比较快，可以用来测量带电粒子的强度。但由于它的脉冲幅度与离子对产生地点有关，不能直接用它来测能量。为了把电离室做得又快又能测能量，人们把它改进成屏栅电离室，可以在重离子物理中测量重

带电粒子能量并鉴别粒子，也可改进为圆柱形脉冲电离室，既可测能量，又可作记数器。

【盖革计数器】较早的气体电离探测器，1928年由盖革和弥勒发明，又称为G-M计数器。主要用在辐照装置中各种厚度计、探伤仪、密度仪等各种仪表中。

盖革计数器按其形状分为圆柱形和钟形两种。圆柱形是在一根玻璃管内壁喷一层特殊的导电材料作阴极，中心轴上拴一根金属丝作阳极。当带电粒子穿过管子时，使管中的气体电离，电子飞向阳极并被加速而电离更多的气体原子。在这离子增值的过程中，有很多原子被激发，退激时放出紫外光打到阴极上使其表面发射出光电子，这些光电子又被加速飞向阳极，产生更多离子和紫外光，再打出光电子……，电子很快被收集，空间留下很多正离子，这些正离子像一个壳包围住阴极，使空间电位减弱而无法加速电子，则放电停止，直到此壳到达阴极被吸收，空间电场才恢复。正离子打到阴极上也会使阴极表面打出电子，而引起二次发射，使空间放电一次又一次进行下去，为了阻止二次发射，在管中必须加一定含量的可以吸附电子的负电性气体及能吸收紫外光的卤素气体，使一个粒子通过只输出一个电脉冲。

坪长和死时间是盖革计数管的两个重要指标参数。坪长是指在固定强度放射源照射下，能保持计数率不变的高压工作范围，坪长越长，计数管工作越稳定可靠，一般为300伏左右。死时间是指电场的恢复时间，约为200微秒。由此可见，盖革计数器不能进行快计数。但它也有灵敏度高、输出信号大两大优点，所以用得还比较多。

【正比计数器】输出信号与初级电离有一定正比关系的气体电离探测器。它的结构简单，价格便宜，既可作为计数器用，又可以用来测量能量，所以在原子物理、核物理和粒子物理中广泛被用来测量各种带电粒子，中性粒子的计数率和能量，还用于大型的簇射计数器，强子量能器，中子量能器和 μ 子探测器中。

最简单，最常用的正比计数器是圆柱型的，即用一金属管（粗细按不同实验需要而定）。中心拉一根与管绝缘的直径为20-100 μm 的金属丝作阳极，管中充一般为一个大气压的氩混合少量甲烷、二氧化碳、异丁烷，如果用三氟化硼、氩或 He 气体，还可以用来测量慢中子和快中子的能谱。当带电粒子穿过管子时，首先使气体电离，电子飞向阳极，由于阳极丝周围电场很强，电子在这里形成雪崩式增值，这叫气体放大，在相同条件下，气体放大倍数基本相同，因而输出信号幅度只与初极电离成正比关系，但是在雪崩过程中，有很多激发原子退激也会有退激光子打出光电子形成雪崩的现象，影响了正比特性，必须在气体中加能强烈吸收光子的多原子气体，以便减小光电子的产生，从而增大气体放大的稳定性。正比计数器输出的脉冲信号是随着雪崩形成过程感应产生的，所以上升时间很快，而下降时间为电子和离子被吸收的时间，比较慢，通常上升时间为小于10ns，幅度为1—2mV。工作坪长可为400伏，死时间小于1 μs 。所以它可以在高强度下来测量放射性强度并测量其能量。

【固体径迹探测器】用绝缘固体材料来记录质量大于质子的带电粒子径迹的探测器。材料包括云母、石英及各种矿物晶体；玻璃、陶瓷等非晶体；聚磷酸酯、醋酸纤维、聚酯等聚合物塑料。它是20世纪60年代发展起来的新型探测器。可探测质子、 α 粒子、重粒子、裂变碎

片和宇宙线中的原子核。它有在强本底下工作和保持古代重粒子穿过径迹能力,可以用在强入射束中测量某核裂变的几率、裂变产物、裂变碎片的角分布,寻找超重核、磁单极子、分数电荷夸克等。可以利用阻塞效率测量复合核寿命。通过分析陨石、月岩和塑料中记录的古代和现代宇宙线中的原子核的成份和能谱、太阳粒子的成份和能谱,正在用其研究宇宙射线的起源、恒星演化、太阳系元素合成和行星演化等方面的问题。在地质和考古学中,利用地球矿物或物体中积累的 ^{238}U 自发裂变径迹和陨石矿物中积累的 ^{238}U 和已绝灭的 ^{244}Pu 自发裂变径迹,可以测定地球物质或天体的形成或受热年代,以及测定考古年代。在分析化学、地球化学、冶金学、结晶学和生物医学中,可以测定铀、钍、钷、硼、锂、铅、铋等多种元素的微小含量和微观分布。在铀矿普查中,通过纪录铀子体氦的 α 径迹,寻找地下铀矿。另外利用蚀刻后径迹微孔形状,可以制作电子工业、化学工业和医学上需要的微孔过滤器。固体径迹探测器与别的径迹探测器一样是通过带电粒子经过其中留下的径迹来探测辐射粒子的只是它有自己的特点:(1)径迹是因带电粒子在穿过的路径上对材料有一定的辐射损伤留下的痕迹,不仅用电子显微镜可以直接观察到,而且因受损伤的材料化学活性改变了,则放在强酸或强碱中沿着径迹会溶刻出一条细长的孔洞,直径可达几微米,可以用光学显微镜观测。(2)在常温情况下径迹有极长的记忆时间,如核裂变碎片留在云母中的辐照损伤,如果温度低于 145°C ,可保留45亿年以上,这对宇宙的形成及考古是难得可贵的特性。(3)可以识别不同粒子。不同的电荷,不同的速度的带电粒子在同一固体中损伤密度不同,穿过的长度也不同,不同的损伤密度在同一溶济中腐蚀速度也不同,所以可以用蚀刻速度和径迹长度来识别粒子。甚至使其具有阈效应,能在低辐射损伤的一些粒子强本底下工作,

如 α 可以在强的 β 、 γ 、 X 的本底下用固体径迹室探测。(4)径迹的高温退化。具有径迹记忆能力的物质,大量保留在地球、月岩和陨石中,它们是天体演化的活见证。但在高温下,径迹会减弱或消失,所以可以通过退火情况来研究地球、天体的局部或整体的高温情况。

总之,随着人类对固体径迹探测器的进一步深入研究,它将会更好地用于揭开宇宙形成之谜。

【位置灵敏探测器】能测定入射辐照粒子位置的探测器。早期有云室、核乳胶计多数管。近年来,随着高能粒子物理实验的发展研制出很多种新型探测器,很多探测器都被引用到核辐射实验中。如:多丝火花室、多丝正比室、漂移室、半导体位置灵敏探测器、电阻丝正比室、流光室(主要用在多径迹的重离子束实验中)、延迟线读出多丝室、位置灵敏气体闪烁正比计数器等。这些探测器绝大部分都在粒子的探测中有较全面的描述。这里只简单介绍最后一个:它是通过测量原始电离引起的第一次闪光和电离电子漂移到光导区的第二次闪光时间差来确定射线位置的仪器。它具有能量分辨好、计数率高、探测面积大等优点。

【中子探测器】能探测中子的数目和能量的仪器,因中子是引起核裂变的子弹,要想和平利用原子能,必须很好地认识并控制中子,另外放射性同位素的产生和应用、原子核物理的研究都要求对中子进行探测。但中子不带电,不能用通常探测器的电磁作用探测,但它是强子,可以同原子核产生核作用,所以可用它引起核作用产生的次级带电粒子来探测。反冲核法:把中子打在某种物质上,中子和核子弹性碰撞,打出反冲核。反冲核是带正电荷的重粒子,

反冲核的能量与中子能量满足这样关系： $E_{核} = [4A/(A+1)^2]E_n \cos^2\theta$ 式中 A 为核的质量数， E_n 为中子能量， ψ 为反冲核飞出角。对于氢核 $A=1$ ，如果 $\psi=0$ ， $E_{核}$ 刚好等于 E_n ，即中子把能量全部转给了氢核。所以通过反冲核的研究可以知道中子情况。

核反应法：中子打在物质上会与核产生核反应，如果我们知道反应过程及反应截面，我们也可以通过产物来研究中子。探测慢中子应用最广泛的是 $B^{60}(n, \alpha)Li^7$ ，甚至可用 BF_3 气体做成充气正比计数器来研究中子。**核裂变法：**重核俘获中子后会产生裂变，如铀-235 接受一个中子会裂变成锶-38 和氙-54，这些核裂片都是带电的，测量他们的强度就可以计算出入射中子的强度。但因核裂变过程要放出很大核能，它不来自中子能量，则无法从这些核裂片测出中子能量。**激活方法：**把容易激活的物质做成薄片，放在要测量的中子流中照射一定时间，薄片里很多原子就俘获中子而变成放射性。通过测量被激活的放射性强度，就可以算出中子流强度。也可以用氢载 6Li 或 ^{10}B 的核乳胶及固体径迹探测器中的反冲核来测量中子。

【磁谱仪】利用运动的带电粒子在磁场中的偏转半径来研究粒子能量的实验装置。一般分为两部分，一为磁铁，它提供粒子的偏转磁场，低磁场时可用常规磁铁，高磁场用电磁铁，特高磁场为了省电和空间，还可用超导磁铁。常用的有 β 谱仪，它不仅测量 β 的能谱，精密测量还可以测量 β 的自旋和极化，另外重粒子谱仪也是研究重粒子的必不可少装置。

【 β 谱仪】测量 β 能谱的装置。它可以用来精确地测量 β 谱的形状，还可以测量 γ 射线的内、外转换电子，从而提供建立原子核衰变

图所必需的数据。这对研究核结构、鉴定放射性同位素、分析中微子的质量等都是非常重要的。最常用的 β 谱仪是 β 磁谱仪。大家都知道一带电为 e 、质量为 m 的粒子，在磁场强度为 \vec{B} 的磁场中以速度为 \vec{v} 运动时满足的运动方程为：
$$\frac{d}{dt} (m\vec{v}) = e\vec{v} \times \vec{B}$$
（GSM单位），如果在垂直均匀磁场的平面中运动，上式变为： $P = m\vec{v} = eB\rho$ ， ρ 为电子运动的曲率半径。因而对已知的磁场，只要测出 ρ ，就可以知道通过它的电子动量。1910年，巴叶尔和汉思首先利用狭缝磁场测出电子的能量。进而发展成用均匀磁场。 β 磁谱仪有很多种，如：最古老的半圆聚焦谱仪是利用带电粒子在均匀磁场中有半圆轨道聚焦的特性；双聚焦谱仪是对轴向 x 及径向 ρ 进行双向聚焦，有较好的分辨率，是在研究感应加速器中提出来的；环状谱仪（或称橘子形谱仪）是为了改进横向磁场谱仪的传射率小的问题发展起来的，其磁场分布如同一通电导线外的磁场分布，后来改进为用一定形状的线圈适当排列成环状谱仪；均匀磁场的螺线管谱仪；纵向非均匀磁场谱仪；混合磁场谱仪；符合 β 磁谱仪； β — γ 符合谱仪； e — e 符合谱仪； e — γ 角关联谱仪等。上述这些谱仪都是在不同时期按不同的物理目的发展建立起来的。另一种 β 谱仪是利用 β 粒子在探测器中形成的脉冲信号的幅度分布来测量 β 的能谱，主要有闪烁体和半导体探测器。这种探测器结构简单，使用方便，可在常温下工作，但能量分辨率低，只有10%。低温下的锗、锂探测器有很好的能量分辨本领， β 能量为几千电子伏的分辨率也可达到百分之几。

【重粒子磁谱仪】一种测量分析质量大于质子的粒子引起的核反应中反应产物能谱的装置。它能把不同动量的带电粒子通过磁场后

分散开，分别聚焦在不同位置的探测器上，并结合飞行时间谱仪或电离能量损失来识别重粒子反应产物中各带电粒子的电荷和质量。典型的重粒子磁谱仪早期的有 E. 卢瑟福的 180° 单聚焦研究天然 α 衰变的磁谱仪；20世纪60年代出现的高分辨、大立体角、宽动量量程的分裂磁极谱仪；70年代研制成功的由一块四极透镜，两块多极透镜，三块二极磁铁的 QDDD 磁谱仪，用来分析轻粒子或轻的重离子；QQOQ 磁谱仪适用于非常重的离子，它由一块偏转 45° 的二极磁铁，三个四极透镜和两个六极透镜组成。上述磁谱仪都是安装在轨道上，可在水平平面上绕靶旋转以改变探测入射角。也有一些谱仪例外，它是根据特殊的实验目的专门设计的。

【在线同位素分离器】一种把加速器、反应堆中核反应产生的新核素（如超铀元素和远离 β 稳定线的核素等）直接传送到同位素分离器中进行电离、分离、收集，以便分析鉴别短寿命同位素的合成及衰变等特性的实验装置。它的原理是先让带电粒子或中子束流打靶箔，新核素在核反应中反冲出来，进入分离器离子源的放电室中被电离，再被一个带有几万伏的高压电极从离子源中拉出，再用静电或磁透镜聚焦，然后进入分析磁铁。不同质量的离子被偏转在不同位置的收集室中，再用探测器对它们的衰变特性进行测量分析。

【脉冲幅度分析器】测量电脉冲信号幅度分布的仪器。在核物理和粒子物理实验中，有很多种探测器的输出信号的幅度与入射粒子的动量、能量等参数有关，需要对这类探测器的输出信号进行幅度分析，以便知道入射粒子的某些特性。如果这些信号太小，先要用线性放大器，把这些信号线性放大，再把脉冲按幅度大小分类，

再用计数器记录每类信号的数目。最简单的脉冲幅度分析器是单道，它每次只能记录某一幅度区间内的输入脉冲计数，调节这区间的位置多次测量，可以得到输出脉冲的幅度分布。显然它只对输出脉冲重复稳定的信号测量才有效。对于不稳定的信号，必须一次测出它的幅度分布，即用把需要测量范围划分成若干个相等区间的多道，这样由给出的道数就可以知道输入脉冲的幅度。

【高能粒子实验方法】人类用来研究目前可能认识到的物质最小微粒的结构与性质实验手段。这方法主要有两种：一种是靠大自然恩赐给人类的宇宙射线，即宇宙在形成和演变过程中发射到地球的各种粒子：电子、光子、 μ 介子、质子、中子、 α 粒子及其它核碎片和中微子等，来研究物质深层的秘密。另一种用高能加速器产生各种高能粒子的实验方法。它用加速器把容易得到的粒子一步步加速到高能作为初级粒子，再用它来轰击不同物质（靶），使它和物质中的其它粒子发生反应，打出我们探测器能够接受的次级粒子，通过小计算机控制快电子学取出探测器中的信号，再送进大计算机进离线分析处理这些数据，就可以得出物理结论。

【宇宙线实验物理】研究宇宙线起源、性质的一门物理实验。早在1911年赫斯就用电离室借助气球在不同高空测出强度的变化，得出宇宙线来源于宇宙空间的结论。后来的20年中，通过不同纬度和东西方宇宙线强度的变化搞清地磁场对宇宙线强度的影响和初级宇宙线带正电荷的看法。30年代后的20年中，人类先后在宇宙线中找到了正电子、 μ 、 π 介子、 κ 介子、 Λ^0 、 Σ^\pm 、 Σ^0 、 Z^- 等超子，这是初级宇宙线在大气中的强子簇射和电磁簇射产生的次级粒子，并引导50年代以来建立的各种人工加速器，发现了各种强子家族，

基本搞清了强子结构。1957年人造卫星的发射成功,对宇宙空间中初级宇宙射线的研究提供了新天地,给合宇宙飞船、高空气球上的宇宙线实验,宇宙线研究转向了天体物理,包括银河系的宇宙线受太阳系的影响使能谱、强度、成分等的变化情况及太阳发射的宇宙线成分等。近年来大面积乳胶室和广延大气簇射的实验,已深入到超高能粒子物理实验领域,初级宇宙线能区可高于 10^{14}eV ,大于目前人工加速器的最高能量。甚至含有 $2 \times 10^{20}\text{eV}$ 的粒子成分。这些能区宇宙线性能研究,在超高能粒子物理和天体物理等领域中将会起到独特的作用。宇宙线实验往往根据不同的物理目的。选择不同的观测方法:用高空观测研究宇宙线起源和天体物理;高山观测宇宙线的初级簇射,接近广延大气簇射中心情况;海平面观测研究 10^{14} — 10^{20}eV 的初级粒子于大气作用的情况;地下观测研究超高能 μ 和中微子的产生,超高能 μ 与物质的相互作用,甚至中微子和物质相互作用产生 μ 的情况。

【高空观测宇宙线】用气球、飞机、火箭、卫星把观测仪器运载到高空,研究宇宙线起源和宇宙线的初级作用。一般用契伦科夫计数器、闪烁计数器、固体径迹探测器测量粒子的电荷、速度、强度等,用量能器和径迹室测定粒子的能量和次级粒子,配合金属准直器可以观测来自中子星的X射线方向、强度、能量。测量到的原始数据一般都数字化以后发送到地面分析处理。对高空送来的信息处理是极其重要而又极其复杂的工作。它的重要性在于:(1)可以搞清初级宇宙线的强度和成份,这对研究其与大气的作用和广延大气簇射有重要的参考作用。(2)初级宇宙线是各种天体演化过程的产物,特别是各种高能天体物理过程的产物,携带着这些过程的丰富信息。(3)初级宇宙线穿过了极其复杂的宇宙空间,不

断地与星际物质作用而改变成分和能量并发出射电波、 γ 射线和X射线。(4) 由射电波、X射线和 γ 射线探测可以推断银河系宇宙线分布情况和太阳系磁场情况。尽管宇宙线起源研究如此复杂，但人类已初步推断出它起源于太阳和其他恒星表面的高能活动、超新星爆发、脉冲星、类星体和活动星系等。

宇宙线粒子大多数来自银河系，太阳系只提供一小部分。超新星爆发是银河系宇宙粒子的主要来源。还有少部分超高能粒子可能起源于银河系以外的星球系。

【高山观测宇宙线】高山上减小了大气对宇宙线的簇射发展，所以流强减弱了，而探测到的高能粒子效率增加了，强子增多了。所以高山实验特别有利于观测强子的作用过程。中国在云南3200米高山上大型云室磁谱仪和西藏5500米高甘巴拉山上的大面积乳胶室就是为了观测高能核作用的。大面积普通乳胶室还可以记录 γ 族，用来研究强子和光子的相关分析。双团 γ 族结构还可以用来分析大横动量的喷注产生。

高山乳胶室已探测到一些特殊事例，如在恰卡尔塔亚山记录到多重子型事例，在帕米尔记录到穿透力特强的强子束事例，在中国甘巴拉山记录到同时有几个大横动量(2—10GeV/c)事例等。

【海平面观测宇宙线】在地面上用大面积的多阵列探测器群，利用符合触发记录是研究广延大气簇射重要手段。中心区用强子探测器，观测强子核作用级联和能量，探测器主要用塑料闪烁计数器或火花室，观测簇射轴心，特别是多轴心簇射的大横动量簇射；外围用塑料闪烁体作电子密度计数器，测量电子密度和横向分布；在吸收体下或地下的 μ 子探测器可帮助确定簇射中心；契伦科夫计

数器可测量簇射过程中大气萤光。再配合快电子学和自控系统,可测出大气簇射到达的方向、轴心位置、总带电粒子数以及超高能核作用等信息。具有优良角分布的小型阵列还可以寻找发射 $>10^{14}\text{eV}$ 光子的银河系内的超高能 γ 源,用来研究蟹状星云、天鹅座 X-3和船帆座 X-1等天体问题。

【地下宇宙线观测】大地是吸收宇宙线中强子、电子、 γ 和低能 μ 子的天然物质,所以在地下观测 μ 和中微子是一个极好的场所。可用多丝室、闪烁计数器等探测器组成望远镜或描述仪,以研究超高能 μ 的天顶角和中微子产生的 μ 。因 μ 多数来自 π 和 K 介子的衰变,可帮助确定强子的簇射轴心,还可研究原子衰变和太阳中微子振荡。

【加速器实验物理】20世纪50年代以后高能粒子实验物理已由宇宙线时代转为加速器实验物理时代,人类可以用自己设计制造的加速器提供的高能粒子源来研究粒子的结构、组成、相互作用及表征各种粒子不同特性的物理量。开始建立的几台3—30GeV的加速器主要用来做质子打固定靶实验,主要贡献是找到了理论上预言的反质子、反中子、 Ω^- 超子以及200多种强子共振态。这为强子结构的三夸克模型建立打下了有力的基础。又是布鲁克海文30GeV的质子打固定靶实验和费米的400GeV的质子打固定靶实验,丁肇中和莱德曼等人在70年代先后找到了 J 和 χ 粒子,使夸克模型由三种味道发展成六种味道,使质子的固定靶实验发展到顶峰。虽然固定靶实验直到现在还在做相当多的有意义工作,但还应当说70年代以后已转入了对撞机的实验时代。比较有代表性的实验有在丁肇中实验同时期在 e^+e^- 对撞机上找到了与 J 粒子相

同的 ψ 粒子和第四种夸克组成的强子家族，更重要的是发现了重轻子 τ ；西欧中心的正、反质子加速器 ($2 \times 270 \text{ GeV}$) 和费米的 $2 \times 1000 \text{ GeV}$ 的同类加速器相继问世，并于1983年在西欧中心的正、反质子对撞实验中找到了传递弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 ，进而在费米同类实验中被证实。但直到现在还没有发现理论预言应该存在的 H 粒子和第六种夸克组成的粒子，所以正在筹划建造更高能量的对撞加速器。

【固定靶实验】用加速器产生的束流一次或两次打固定靶，用多种探测器、快电子学、计算机选择记录分析有意义事例的实验。直接来自加速器的束流叫初级束，一般为质子或电子。如果探测器本身就作靶物质，可以直接把它打进探测器，配合跟随的其他探测器来接受作用后的次级粒子。这主要适用于径迹室，如泡室、流光室、多极火花室、核乳胶、固体径迹室等。对于电子学探测器，只能用初级束打一特制的固定靶，再用谱仪来记录分析次级粒子。很多实验不希望用质子或电子束，而用 π 介子、K 介子、中子、超子、 μ 子、中微子、光子等，再用磁场、束流分离器等选择感兴趣的次级束，再打次级靶，以供谱仪探测分析。探测器一般按照实验目的设计成谱仪，分为单臂谱仪、双臂谱仪、多粒子谱仪、前向谱仪、大接受度谱仪等。谱仪中往往用闪烁计数器的符合和反符合选择触发，用契伦科夫、穿越辐射、飞行时间等探测器分辨粒子，用定位探测器测顶点、用定位探测器配合磁场测动量，用簇射计数器测电子和光子轴心和能量，用强子量能器测强子轴心和能量，用吸收体后的 μ 探测器测 μ 。固定靶实验在历史上曾取得过辉煌的成就，它发现了200多种共振态粒子，证认了理论上预言的反质子、反中子、 Ω^- 超子的存在，还发现了理论上没预言的 J/ψ 和 Υ 粒子。

因为它可以产生特殊束，相当于特殊粒子的工厂，所以在研究稀有事例的稀有衰变中有独到之处，现在在西欧和费米的质子加速器上，还用固定靶实验做大量的这方面工作，如超子的弱电辐射衰变，重轻子 τ 的衰变分支比、粲介子和粲重子的产生机制及其衰变分支比。所以它是一种不容忽略的高能粒子实验领域。

【两股束流对撞实验】用加速器产生的两股束流对撞，让两股束流中的高能粒子直接相互作用，再用多粒子谱仪来研究它的作用机制和产物的实验。这类加速器和实验在1974年美国加州的 SLAC 用 e^+ 、 e^- 对撞发现 ϕ 粒子以后，迅速地发展起来，美国、西德、法国、前苏联、日本、中国都在其同期或以后建造了多台正负电子对撞机，用以研究粲物理和重轻子物理，中国最近还给出了重轻子 τ 质量的最精确测量。西欧中心和美国费米实验室还用很短的时间把原来的质子加速器改为正反质子对撞机，并找到了传播弱作用媒介的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 ，这对弱电统一理论是一极大的贡献。为了找黑格斯 (H) 粒子和第六种夸克组成的粒子，西欧中心和美国曾准备分别建造 LHC 和 SSC，也是属于这种类型的实验，只是具有更高的能量和更大规模的测试设备。为什么这类实验现在如此受重视呢？(1)因为它直接由两种基本粒子相互作用，作用机制清楚，没有其他靶核作用的复杂本底。(2)粒子的产生阈对粒子的产生很灵敏，而对撞机又很容易精细地改变两股束流的能量，便于对新粒子质量的精确测量。这类实验所用的多粒子谱仪大体类同。中间用高空间分辨率的顶点探测器包住束流管道以便测作用顶点和短寿命粒子的衰变顶点。外面是可以测电离损失和空间位置的径迹室，它放在线圈磁场中，以便测带电粒子动量，再外层契伦科夫或飞行时间探测器，以便识别带电粒子动量，再外

是簇射计数器和强子量能器，最外面是 μ 探测器。束流的两端还放两个前向谱仪，探测器结构基本和桶部相同。探测器的尺寸是由束流能量决定的，最大的有几层楼高，当然造价也是很贵的，美国的SSC曾准备花100多亿美元的加速器和谱仪的建造费，而且是极其大型的综合高、精、尖工程，必须有很强的经济和技术实力和第一流的物理设计思想。

【粒子与物质的相互作用】物质微观结构中的基本粒子相当微小，例如质子、中子等强子直径小于 10^{-13} 厘米，电子的直径小于 2×10^{-16} 厘米，因而无论用什么样的放大镜和显微镜都无法直接看到它们，幸运的是这些粒子穿过介质时，要和介质产生相互作用而留下信息，如带电粒子与介质中的原子产生电磁作用，使与它相遇的原子电离而自己因此而损失一定能量； γ 光子会把原子外层的电子打出来而产生光电子；强子会与相遇的原子核产生核作用而引起强子簇射；快速电子在介质中会产生韧致辐射等，探测器就是抓住这些作用留下的信息来研究这些粒子。粒子与物质的作用大体上分为弱作用、电磁作用、强作用三种。中微子只能参与弱作用，很容易区别于别的粒子，也最难探测。中性粒子不参与电磁作用，但中性强子可以参加强作用。带电粒子虽都可以产生电磁作用，但在 10^{10} 电子伏以下的不同粒子电磁作用带来的介质中原子电离密度是有差别的，因而电离损失的差异成了多年来人们研究不同带电粒子的重要手段，如云室、泡室、流光室、时间投影室等。另外因强作用和电磁作用使粒子在介质中有特定的射程和次级粒子的发展变化，人们用这特点研究出簇射计数器、中子量能器，强子量能器等来测量粒子的能量及区分轻子和强子。总之，人们利用粒子与物质形形色色的相互作用，研究出各种不同的探测

器，去捕获粒子的信息用以对粒子进行深入的研究。

【电离损失】当高能带电粒子穿过介质时，就会与运动轨道中的电子碰撞，使电子所属的原子激发或电离，而粒子自己损失一部分能量并把这能量传递给被碰撞的电子。如果电子获得的能量超过原子对它的束缚能，这电子将飞出原子壳层而使原子电离成离子。电离损失就是带电粒子在与电子碰撞过程中的电磁作用引起的能量转移，它与入射粒子的电荷及速度有关，因而科学家们研究出电离室、云室、泡室、核乳胶、流光室、时间投影室等来通过电离损失测量入射粒子的电荷和运行速度。

这从单位长度上的电离损失很容易看到：

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_0 Z}{m_e v^2 A} (\ln(\frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)}) - \beta^2)$$

其中 v 是入射粒子速度， e 是电子电荷， Ze 是入射粒子电荷， m_e 是电子质量， N_0 是阿伏伽德罗常数 (6.022×10^{23} /克分子)， Z 是介质的原子常数， A 是介质的原子质量数， $\beta = \frac{v}{c}$ ， c 是真空中光速。

【库仑散射】当带电粒子打进介质原子的电子壳层而进入原子核的电磁场区域时，它将和核产生电磁作用，类似于两个刚球的弹性碰撞而改变入射粒子的方向，而使核反冲，保持总能量守恒。带电粒子与原子核的相互作用几率比与电子相互作用几率要小得多，只有后者的 $1/10^9$ 。核使入射粒子散射到 θ 角度，对应立体角 $d\Omega$ 的微分截面为：

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{1}{4} \frac{2Ze^2}{pv} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

其中 p 、 v 、 Ze 分别是入射粒子的动量、速度和电荷， Z 是介质的原子序数。从公式中可以看到，当 θ 角很小的，库仑散射的截面很大。因而，在带电粒子通过介质的路径上，通常要产生多次小角散射，它们的累积往往使带电粒子出来时有一个明显的角度变化。

【核反应】 粒子与原子核直接的作用。当带电粒子能量足够大，可以克服介质原子核的静电势垒时，它就可以打进原子核而与原子核产生各种各样的核反应。如打碎原子核产生核碎片，核中的质子、中子产生深度非弹性散射并产生新粒子等。

【韧致辐射】 快速带电粒子如果打进介质原子核场，就会辐射出 γ 光子而损失一部分能量，这个过程就叫韧致辐射。如果入射带电粒子的动能为 E ，辐射光子的能量可以是 $0-E$ 的连续谱，并且与入射粒子质量平方成反比，与靶材料的原子序数成正比。由于电子的质量远小于其他带电粒子，所以只有电子穿过介质时有很强的韧致辐射，而重带电粒子只有在很高能量时，韧致辐射带来的能量损失才不可忽略。

【契伦科夫辐射】 当一个带电粒子以速度 v 穿过折射率为 n 的透明介质时，如果 v 大于光在介质中的速度 $\frac{c}{n}$ (c 是光在真空中速度)，带电粒子就会与介质间发生电磁相互作用而发出电磁波，即辐射出契伦科夫光。

契伦科夫光是以一定角度辐射出来的，因为当 $v \geq \frac{c}{n}$ 时，只有满足 $\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$ ($\beta = \frac{v}{c}$) 条件的 θ 角上的电磁波干涉相加，而其他方向上的干涉相消，其波长集中在可见光到紫外光范围内。

【穿越辐射】 当一个高能带电粒子穿过两种不同介质的介面时，粒子会在不同介质原子的电磁场影响下辐射出可见光和 X 光而损失一部份能量，称为穿越辐射。这种辐射的一个极为重要的特点是，当高能带电粒子穿越一个真空与介质的介面时，辐射的 X 光区总能量与粒子的相对论能量 γ 成正比。 $(\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2})$ 这刚好弥补了高 γ 值的带电粒子在介质中电离损失饱和的缺点，使 γ 值很高的粒子也能相互区别。

【粒子之间的相互作用】 粒子之间的相互作用归纳起来有四种：强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用。与之对应的粒子衰变有强衰变、电磁衰变和弱衰变三种。它们是研究粒子性能和结构的重要依据。参见“相互作用”。

【相互作用长度】 从粒子入射到介质中至它与介质原子发生第一次作用的平均距离叫相互作用长度。如果入射的是原子核或强子，它们与介质原子核产生的第一次作用平均距离叫核作用长度。

【辐射长度】 高能电子通过介质时因韧致辐射使电子的能量减小到原能量的 $1/e$ 所走的平均距离。电子的平均辐射能量损失为：

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dx} = \frac{4r_e^2 N_0 Z^2}{137A} \left[\ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) + \frac{1}{18} \right]$$

其中 $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$, N_0 为阿伏伽德罗常数 (6.022×10^{23} /克分子) Z 是介质的原子序数, A 是介质的原子质量数。由公式可见, 辐射能量损失与介质有关。在核物理和粒子物理实验中辐射长度常常被用作长度单位, 用此来描述能量损失的情况, 如果电子在介质中走过一个辐射长度, 它的能量减小到原来的 e^{-1} 。

【吸收长度】 又称粒子的射程。当带电粒子在介质中飞行时, 要不断与相遇的原子作用而使介质原子电离或其它作用而损失能量, 当能量减小到零时飞行的平均距离就是吸收长度。同一种粒子在相同介质中的吸收长度应长于相互作用长度。如果已经知道粒子的电荷和质量, 测出它的吸收长度, 就可以确定其能量; 如果已知粒子的电荷和动量, 那么测出它的吸收长度就可以确定其能量。

【正反粒子对产生】 粒子反应过程中经常出现正反粒子同时产生的现象。如1932年发现高能 γ 光子经过原子核时会被核场作用转化成一正一负电子。后来还发现正反粒子对湮灭时可以通过虚光子产生其他正反粒子对。如 e^+e^- 湮灭可以产生 $\mu^+\mu^-$ 对、 $\tau^+\tau^-$ 对等、 D^+D^- 对; 质子反质子湮灭可以产生正反中子对等。正反粒子也可在强子打靶后随同其他粒子一起产生, 这对研究强子结构模型起很重要的作用, 即在两种强子相互作用时, 可以把组成这两种粒子以外的夸克成对的产生出来。正反粒子除了可以从虚光子产生以外, 还可以从虚 Z^0 和虚胶子产生。量子电动力学、弱电统一理论、量子色动力学可以分别去相当好地描述对应的三种正反粒子对产生机制。

【正反粒子对湮灭】正反粒子对产生的逆过程就对应正反粒子对的湮灭过程，只有正反电子对可以在湮灭时产生出一对 γ 光子。这个过程正好说明物质不灭这一真理。从微观上看，物质只能从一种粒子转化成另一种粒子，并在转化过程中满足质—能守恒定律。例如正反电子湮灭成另一对粒子后，这对粒子的总能量必须和正反电子总能量守恒。正反电子湮灭成两个 γ 子后，虽然光子的质量为零，但这对光子的能量一定等于正反电子的总能量。

【粒子的衰变】粒子存活一定时间后自动地转化为二个或两个以上的其他粒子而自我消失的过程。衰变是由场之间的相互作用由不稳定粒子向稳定粒子的转化。同一种粒子可以按几种不同的相互作用来转化，强相互作用为强衰变，电磁相互作用为电磁衰变，弱相互作用为弱衰变，还有一种为弱、电、强混合作用的弱—电辐射衰变。现在已经发现有300多种基本粒子，但绝大多数是具有强衰变寿命极短的共振态，不能产生强衰变的粒子有54种，未发现其衰变的粒子仅有11种：质子、电子、电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子、它们的反粒子及光子。按大统一理论，即使这11种粒子也可以衰变，只是寿命很长。如质子寿命大于 10^{31} 年，电子的寿命大于 10^{22} 年。但直至今日还没有真正测到它们的衰变。

【衰变分支比】粒子衰变方式是多种的，分支比指某种衰变所占的比例。通常把每种衰变称为衰变道，不同衰变道所占的分支比差别往往很大，如中子衰变到 $p e \bar{\nu}_e$ 的分支比几乎是100%，另一种可能的衰变分支比仅可能是 $<10^{-24}$ 。 $n \rightarrow p \mu^- \bar{\nu}_\mu \Sigma^+$ 由弱衰变到 $p \pi^0$ 分支比为51.64%，衰变到 $n \pi^+$ 的分支比为48.36%，而由弱电辐射衰变到 $p \gamma$ 的分支比仅为 1.22×10^{-3} 。有些粒子有几十种衰变道，而

且很多种衰变道的分支比可以用实验测量出来，如 J/ψ 粒子衰变到 e^+e^- 和 $\mu^+\mu^-$ 的各为6.9%，可测量的强子衰变道共有50多种，还有可测的辐射衰变20多种。

【粒子平均寿命】 粒子两次衰变之间的时间差为粒子的寿命。在测量时往往有一定的统计涨落，使测量的时间有一定的宽度，而不是一个确定值，取峰值所对应的测量时间为平均寿命。粒子的寿命相差很大，质子最稳定，寿命可大于 10^{31} 年，电子次之，寿命大于 10^{22} 年。自由中子寿命只有 1.11×10^3 秒。通常强衰变的平均寿命约为 10^{-23} 秒，电磁衰变的平均衰命为 10^{-16} 秒，弱衰变的平均衰命大于 10^{-10} 秒。

【粒子探测器】 探测粒子的工具。探测器大致可以分为两大类，一类是径迹探测器：云室、泡室、乳胶、流光室、火花室，它们大多用拍照的方法记下粒子轨迹，再对照片进行自动分析。这些探测器在历史上曾立过很多奇功。但他们受到照像技术的限制，不能做高计数率、大统计工作。随着快电子学和计算机的发展，电子学探测器快速的发展起来了，它们有闪烁计数器，契伦科夫计数器、多丝正比室、漂移室、自猝灭流光管、硅感应条探测器等。高能物理实验通常不是用一种探测器实现的，往往用多种探测器组合来满足实验要求。例如把两个闪烁计数器固定在一定距离的粒子轨道上，测出粒子经过这两个计数器的时间，就可以算出粒子飞行的速度。用几个多丝室或漂移室与磁铁配合，测出粒子在磁场中的偏转就可以算出它的动量。用多层吸收体和多个闪烁计数器夹心摆放可以测出被吸收粒子的能量。用几个空间定位极高（ 10^{-6}m ）的硅感应条探测器可以测出 10^{-13} 秒粒子的飞行很短距离的短寿命

粒子的寿命,或高精度的衰变顶点。粒子的产生和衰变往往是多粒子过程,要研究清楚一个新粒子,往往要测量好多个粒子和好多个物理参量,所以现在的高能物理实验总是用多种探测器,多种测试手段,再用一台型计算机控制的一个大型谱仪,各个探测器分工合作来完成一个的实验。探测器又可以按不同的介质分成气体探测器、固体探测器、液体探测器、混合型探测器。它们都是以粒子与介质的各种相互作用为基础研制出来的。

【气体探测器】用气体作介质,通过气体放电的工作原理研制出来的各种高能粒子探测器。带电粒子穿过气体介质,使介质原子电离成正离子和电子,这是气体放电的第一阶段—电属阶段。在电极高压形成的高压场作用下,电子向阳极漂移并被进一步加速,能量增加到介质原子的电离域值以后,电子又可以使介质原子电离,如此多次而使电子和离子迅速地增加并和向阴极漂移的离子形成一对正负离子团。这是气体放电的第二阶段——雪崩阶段。这时的雪崩点就是初级电离点的扩大,数目仍为初级电离数,保持着和入射粒子能量成正比的关系,工作在这一放电阶段的探测器有多丝正比室、漂移室、时间投影室。当正负离子团中的电子和离子数目足够多时,正离子团和电子团之间的内电场可以达到和电极的外电场相等,这时电子和离子在零电场状态下,出现大量地复合现象而向周围发出光子。这些光子又会从介质原子中打出光电子,在原正负离子团以外形成新的离子对。在原离子团的两侧,由于内外电场的方向相反相消,新生成的电子不会被加速,无法形成新的雪崩。但两端的内外电场是相互加强的,所以新生成的电子被更快地加速而形成新的雪崩,这时因雪崩加大,由于统计涨落,相邻的雪崩反而会出现吞并现象,向两端发展成雪崩串。这是气体放电

的第三阶段——流光放电阶段。工作在这阶段的粒子探测器有流光室、自猝灭流光管等。当雪崩串发展到两极时，两极之间有了放电通道，出现了气体放电的第四阶段——火花放电。工作在这阶段的探测器有火花室、多丝火花室等。

【云室】一种早期的核辐射探测器，也是早期的带电粒子径迹探测器。1896年由威尔逊提出的，故又称威尔逊云室。一个带电粒子穿过饱和蒸汽时，它可以使轨道上的气体分子电离，如能让饱和蒸汽快速绝热膨胀，因温度的骤降使蒸汽处于过饱和状态，此时离子就会作为凝聚中心而生成小水滴而把粒子的轨迹显示出来。

云室所用的气体大多是空气或氢气，蒸汽大多是乙醇和甲烷。室体的直径为几十厘米到几米，重复频率约为3次/秒，灵敏时间为数毫秒到几秒。云室可与磁铁配合测量带电粒子的动量，通过电离密度配合动量区分带电粒子种类。1932年安德森用云室抓到了第一个反粒子——正电子，1936年他又找到比电子质量大207倍的新粒子，1947年张文裕用云室研究其与物质相互作用弄清这新粒子是另一种轻子 μ 子。

云室可用电子学探测器控制触发。后来人们又用高低温扩散法将其发展成扩散云室。

【火花室】工作在气体火花放电阶段的带电粒子径迹探测器，1959年由日本人福井崇时和宫本重德发明的。它的主要结构是一个充满惰性气体混合适量其他气体的气体盒，气压为一个大气压。盒中放着多层间隔为0.2—1.0mm的金属板，板上交替接高压和地，接上10—20kV的脉冲高压，这就是一个窄间隙火花室。如果把金属板间隙加大到几十毫米，加上几百千伏的脉冲高压，上升时间大

于 $1\mu\text{s}$ 就是一个宽间隙火花室。

工作过程是：当一个带电粒子穿过火花室时，它把气体介质电离。如果在1微秒时间内加上脉冲高压，电子就会在电场作用下形成金属板间火花击穿。各金属板间火花连线就是粒子的轨迹。火花轨迹可用照像机和摄像机两种方法记录，死时间为0.1秒到几十毫秒。如果把金属板改成多根金属丝，就可用连接在丝上的电子线路取出火花信号，这就是多丝火花室，它可以和其他电子学探测器配合使用。

【阻性板计数器】工作在火花放电区，是在火花室基础上发展起来的一种新型探测器。具有上升快（小于 1ns ）、幅度大（ 100mV ）、噪音小、造价低等特点，正被考虑在未来的大型实验中用作飞行时间谱仪来识别粒子和快触发。它的结构很简单，一般用两块2毫米厚的体电阻率为 10^{-10} — 10^{-12} 欧姆/ cm^3 的普通光学玻璃或电木板，中间距离为0.5毫米。外面一边用金属板接地，另一边涂上石墨接6—8千伏高压放一层绝缘膜再放上金属感应条，粒子通过时在两玻璃板间火花放电，透过高压石墨电板感应到金属条上，可从金属条上取出上升很快的正信号。它们被放进充满氩气等金属屏蔽盒中。

【流光室】工作在气体放电流光区既可直接看到带电粒子轨迹，又可识别粒子的气体探测器。于1963年由苏联人奇科瓦尼等人发明。它的室体结构很简单：一个气体盒，内充氖、氦、二氧化碳等工作气体。一般盒的一边是金属板，另一边拉金属丝以便照像。它们由金属框架连为一体作阴极。气体盒中间也拉上金属丝作阳极。阳极联接上升时间为1—2毫微秒，宽度为3—20毫微秒，幅度为几百

千伏的高压脉冲。这是流光室的一大技术难点，它需用很复杂的高压毫微秒脉冲技术。流光室经常与磁场配合使用，这样用径迹弯度测动量，再用流光密度识别粒子。它可以和电子学探测器配合使用，即用电子学探测器作快触发，既触发电子计数又触发高压流光室可用来寻找稀有粒子。

它的最大优点是：(1) 可以直接看到作用顶点，适合于寻找短寿命粒子。(2) 可承受多到上百条的粒子径迹的测量，适合于多粒子衰变和研究复杂的强子产生过程。它的缺点是用照相方法为分析带来困难。它的指标是：死时间可小到1微秒，流光直径一般为1—2毫米，流光长度~5毫米。美国耶鲁大学的善德万斯研究的精密流光室其分辨率可好于30微米，因而可以直接看到寿命为 10^{-13} 秒的各种粒子的衰变。

【自猝灭流光管】工作在气体放电流光区的初始阶段的电子学探测器。是在流光室基础上发展起来的，但采用很多的猝灭气体来控制流光的发展，而不是靠高压脉冲的宽度，因而可以工作在直流高压下。

它的结构很简单，原始的流光管类似于原始的正比管；只是阳极丝由直径为20微米增加到40微米以上。这主要为了减小丝周围的电场梯度，使雪崩有发展到流光的空间需要。因此时的流光长度约3毫米，则管的直径需大于8毫米，以免火花击穿。西欧中心的ALEPH实验用聚氯乙烯塑料做成8条 8×8 （毫米）²的方形长槽，上面盖一块塑料薄板，内壁涂上石墨做阴极，每槽中心用50微米的丝作阳极。再装进一个密封的塑料盒中，内充25%氩+75%的异丁烷+少量的二甲基甲烷。接地的石墨是一种半透明的地电极。电信号可以感应到盒外的金属条上，而取出感应信号。这样的结构便

于机械化大面积生产，因而造价低。由于它工作在流光区，信号比正比信号大20倍以上，读出电子学线路简单。

因有结构简单、造价低、噪音小、工作电坪长等优点，一些大型的实验如：对撞机实验和宇宙线实验，常用它来做 μ 子探测器、簇射计数器、强子量能器等。

【多丝正比室】工作在气体的雪崩放电区，具有正比特性的气体探测器。是西欧核子中心的夏帕克等在1968年深入研究正比计数管后把多个计数管联成一体新型探测器。它的主要结构是：一个气体盒，里面装有一个大气压的氩、二氧化碳、甲烷、异丁烷等不同比例的混合气体，中间拉距离为1毫米左右、直径为20—40微米的阳极丝，两边拉距离为1毫米左右、直径为50—100微米的阴极丝，阳极和阴极之间距离为2—8毫米，极间电压为2000—5000伏。室体可为 10×10 — 400×400 厘米或长方形。它的工作原理是：当一个带电粒子穿过室体时，使介质原子电离，在极间电场作用下，电子向阳极漂移并被加速，在阳极丝周围，电场很强，电子在这里形成雪崩并飞向靠近的一根阳极丝，这根丝上就产生一个负脉冲，而相邻的阳极丝上感应出正脉冲，如用一个只能接受负信号的电子线路，就可以读出电离点的位置。因为相邻的阴极丝上也感应出正脉冲，所以可用只记录正信号的电子线路读出阴极信号，并用中心法或重心法给出电离点的位置。如果一个阴极丝和阳极丝垂直，另一个阴极丝和阳极成 45° ，则用三个丝平面还可以定出多个粒子同时穿过多丝室的分别位置。多丝正比室的死时间可小于20毫微秒，所以接上快电子学线路可以允许 10^6 — 10^8 个/秒带电粒子穿过，加上计算机的快速发展，它已很快被高能物理、核医学等广泛应用。

【漂移室】和多丝正比室一样也工作在气体放电的雪崩区，并有正比特性。但它定位除了靠读出信号丝外，还要测出电子从电离点飞到信号丝的时间来更精确地定出电离点位置。夏帕克等人在研究多丝正比室时发现信号有较大的时间晃动，他们指出这是由于电离点离信号丝的距离不同造成的。很快沃伦特和夏帕克分别在1969年研究出另一种新型探测器——漂移室。漂移室的结构与多丝室的最大区别是阳极丝距离由1—2毫米加大到几毫米至几十个毫米，为了改善电场均匀性在两阳极丝之间又加一根直径为100微米加负电压的电位丝，阴极丝、气体盒、所充气体与多丝室大体相同，但极间距为几十厘米。漂移室与多丝室一样，已成为高能物理实验不可缺少的探测器之一。同时已用于核物理、宇宙线实验、生物及医学等领域。

【时间投影室】一种用在美国斯坦福正负电子对撞机上的既可以测带电粒子位置、又可以通过能量损失来辨别粒子的工作在雪崩区的气体探测器，它是用多丝室代替径迹室的成功尝试。它的结构很复杂。一个装有10个大气压的氩气加二氧化碳（4:1）园柱形气体罐，轴心穿过正负电子束流真空管道，罐的直径为2米，长度为2米。罐的中心对准正负电子对撞点，用75微米的金属丝拉制成阴极丝，加负150kV的直流高压。罐的两端首先沿径向方向均匀分成六个扇形。每个扇形单元从罐的终端向内有三个电极：阴极感应条、阳极丝和场丝、栅极。三个电极之间距离为1厘米。栅极丝在最内层，它用直径为76微米的金属丝垂直径向方向每8毫米拉一根，共192根。用同样直径的丝在阳极丝面上与栅极的对应位置拉192根电场丝。再在每两电场丝之间拉一根直径为20微米的阳极丝，阳极

丝也是192根。最外层是与阳极丝平行的放12条由面积为 7.5×7.5 毫米方块组成的阴极感应条。整个气体罐又放在一个超导磁场中，磁场强度为20千高斯，方向与多丝室的电场方向平行。它的简单工作原理是：正负电子碰撞后生成的带电粒子在磁场作用下螺旋形飞出，在其路径上使气体电离，电子在不同电离点延电场方向漂移向阳极，最长漂移距离为1米。在阳极丝周围产生雪崩并被阳极丝吸收输出一个负脉冲，对撞时间与负脉冲时间差，即为电子飞行时间。同时感应块的重心法可以给出吸收极雪崩电荷的吸收点，精度为125微米，阳极丝给出径向位置精度为1.15毫米，漂移时间给出z方向位置，精度为2毫米。因每根轨迹要经过192次取样， $\frac{\Delta E}{E} = 2.6\%$ ， $\frac{\Delta p}{p} = 0.6$ 。在这样好的分辨能力下，可以识别 $p < 15 \text{ GeV}/c$ 的 π 、K、p等粒子。

【固体探测器】用固体作介质的探测仪器。因固体的密度大，单位长度上与粒子的作用比气体的强得多，所以它有体积小、灵敏度高、测量精度强等特点，不仅适应于带电粒子，也适用于中性粒子，是在微观世界实验中最常见到的探测器类型。典型的有固体闪烁计数器和半导体探测器。

【核乳胶】一种能记录单个带电粒子径迹的特制胶片，它是由普通照相底片发展来的。1896年贝可勒尔发现铀盐能使乳胶感光，人们就着手研究用其来测量射线总强度，1949年出现了第一批核乳胶商品。当带电粒子经过乳胶时，它首先使溴化银晶体产生一些自由电子，其中一部份落在灵敏中心上而使其带负电，它再吸引间隙银离子结合成银原子，多次重复后，这个灵敏中心就成了乳胶的

潜影中心,显影后它们就变成可见的银粒。即可通过粒子轨道上的银粒密度判别粒子种类,在早期的宇宙线实验中曾用它发现了 π 、 K 、 Σ^+ 、 $\bar{\Lambda}^0$ 等新粒子。因它的空间分辨本领高,70年代还用它来测量寿命为 10^{-13} 秒的短衰变粒子射程。还可利用中性粒子在乳胶中作用的次级粒子来探测中性粒子,在铀矿的研究中用来作中子相机和中子计量测量。

【乳胶室】如果把乳胶片或X软片与铅板一层层叠放,就构成了高能物理另一种探测器——乳胶室。最早的乳胶室是美国的卡普隆用铜板建于1952年。它必须用显微镜才能看到粒子通过的残迹,很不方便。1957年日本的西村纯采用X射线片代替乳胶片,可以直接测量底片,把测量速度提高3000倍,后来乳胶室普遍被用到气球、飞机、火箭上,还可与其他仪器配合做成大面积的高山乳胶室用来测量超高能(10^{12}eV)的 γ 簇射和强子喷注。中国的甘巴拉山(5500米)就建了一个乳胶室,曾得到重要的实验结果。由于乳胶室测量能区高、观察精细,在宇宙线的超高能实验中用来预言未来加速器的能区有着重要的作用。

【闪烁计数器】粒子通过介质引起介质原子或分子或激发再退激发的光辐射探测器。它是1947年由科尔特曼和卡尔曼发明的。主要由闪烁体、反光层、光电倍增管、电子线路四部份组成。它对粒子的探测效率高,时间分辨率和空间分辨率好,不仅可以给出粒子通过的信号,还可以通过对光信号的幅度分析测出通过粒子的能量(一般要粒子停留在其中),也可用两块闪烁体放于一定距离处测出粒子通过它们的时间差来测定穿过它们粒子的速度,从而给出粒子质量。它的高能物理实验中最广泛应用的探测器,在快触发

选择中更是必不可少的。闪烁体按化学性质分为有机和无机两种，对 α 粒子测量还可用气体闪烁体。

【有机闪烁体】分子较大的苯环碳氢化合物，常用的有蒽、芪、对联三苯等芳香族有机化合物。但它们都比较慢。如蒽的发光时间长达30ns，芪的发光时间为4.5ns，后来又研制出性能更好的塑料闪烁体。它是在苯乙烯溶剂中加入第一和第二溶质后聚合而成的。其发光过程与液闪相同，发光时间可以短到2—3ns。它还有光传输性能好、机械强度高、耐潮解、性能稳定和避光贮存8—10年后发光效率无明显变化等优点，并有很强的耐辐射性能，所以塑料闪烁体在高能物理应用中居各种闪烁体之首。

【无机闪烁体】指一些无机盐晶体中加少量激活物的闪烁体，如加铊的碘化钠晶体 NaI (Tl) 对 γ 有很高的探测效率，约为蒽的两倍多。而且光峰值在4150Å左右，有利于光电倍增管的光电转换，常用来作粒子辐射衰变中的光子探测，缺点是易潮解。又如加铊的碘化铯：CsI (Tl) 对 γ 的探测效率更高，而且不易潮解。但它的发光效率低，对 γ 的能量分辨不如 NaI (Tl)。然而在液氦低温下它的发光效率比 NaI (Tl) 更高。再如加银的硫化锌：ZnS (Ag) 对重带电粒子有很高的探测效率，而对 γ 不灵敏，常用来测量高 γ 本底下的 α 粒子和质子。

【气体闪烁体】用一些高纯度的气体：氙、氪、氙、氦等作发光材料的闪烁体。它们被带电粒子激发后退激发出的主要是紫外光，可配合光电倍增管使用。也可以加入第二种气体把紫外光转为可见光用普通光电倍增管。由于不少气体都对电离和激发有自猝灭作

用，因而所用气体的压强必需很高。气体的发光时间一般都很快，有的小于 ns 量级，它的密度又小，常用来测量 α 粒子和其他重粒子，如核裂片等，适合于作重粒子实验的选择触发器。

【硅感应条探测器】一种半导体探测器，但信号是取自硅片一面的感应条上对空穴-电子对的感应信号，所以有较好的位置分辨本领。随着光刻技术和微电子学的发展，现在的感应条能做得很精细，可以几十微米一根，空间分辨率最小可达5微米，在近几年的高能物理实验中已大量用来做高精度的顶点探测器和动量测量装置（必须和磁铁配合，测带电粒子在特定磁场中的偏转角）。因它对 γ 和 X 射也有较高的探测效率，在未来的医学成象中也会发挥它的威力，得到高空间分辨率的医学图像。

【半导体探测器】直接用半导体材料作工作介质的探测器。是1949年由麦凯发现用 α 照射 PN 结二极管能观察到电信号而逐步改进发展起来的。

这种探测器的结构很简单：在一块半导体材料上设置一个高掺杂的 P 层作阴极，和一个高掺杂的 N 层作阳极。当粒子通过后，产生的空穴-电子对分别飞向并被阴极和阳极吸收而产生出同入射粒子在其中损失能量成正比的电脉冲信号，因而对此信号分析后就可以知道被全吸收的入射粒子能量。对掺杂硅和锗的半导体，产生一对空穴-电子对只需约 $3eV$ 的能量，所以它的能量分辨率比闪烁计数器和气体探测器高得多。这种探测器发展很快，形成多种类型：有用于中子探测的面垒型；用于 X 射线荧光分析仪的 Si (Li) 锂漂移型；用于 γ 谱学研究的 Ge (Li) 锂漂移型；用于 X 射线和 γ 及高能粒子探测的平面型高能锗探测器等。

【契伦科夫计数器】用契伦科夫辐射的方向来分辨粒子的装置，既可以用气体介质，又可用液体和固体介质。因带电粒子诱发的辐射光和粒子运动方向夹角 θ 满足如下关系：

$$\cos\theta = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta}$$

c 是光速， n 为介质折射率， $v = \beta c$ 为粒子速度。对已知介质，测出 θ 。如又知粒子动量就可算出粒子质量。1955年美国人就是从一定动量的 π 介子束中发现反质子的。这种探测器由三部份组成：辐射介质、光收集系统和光探测系统。按其功能又分为阈式和微分式。阈式的计数器只收集 $v > \frac{c}{n}$ 粒子的辐射光。用改变 n 来改变阈值，因而气体在高速粒子的实验中是理想的介质，它可用改变气压来改变阈值。阈式的计数器只有一个光收集点，光学系统要把入射的各锥角的光子都聚到这一点上。用两个阈式的契伦科夫计数器符合可以很好地选择实验所需要的粒子。

微分式契伦科夫计数器用一个球面镜把不同入射粒子诱发的不同锥角内的平行光，聚焦在其焦平面的不同小园环内，分别收集不同园环上的光，测出其辐射角，就可推出各粒子的速度。在高速情况下因角度相差很小，所以往往用10—20米长的气体介质，经过光学系统的色差校正后，速度分辨率可高达 $\frac{1}{10^7}$ ，所以在大型实验中广泛使用。

【液体探测器】用液体作介质的探测器，因带电粒子不仅能使气体电离和激发，也能使液体电离和激发，用适当手段也可以显示出带电粒子轨迹或给出粒子通过的一些信息，如气泡室和液体闪烁

计数器就是两种典型的液体探测器，前者还对高能物理有过重要的贡献。

【气泡室】用气泡来显示带电粒子轨迹的液体探测器。1952年由美国人格拉泽发明的。60年代是它最辉煌的年代，用它发现了很多新粒子和共振态。在中性流实验中也有开拓性贡献。

气泡室的主体是一个装有特殊液体的容器，在特定温度和压力下让液体作绝热膨胀，在50毫秒时间内如有带电粒子穿过，路径上就产生很多离子对，离子对复合时局部发热而形成过热气泡，把路径上一连串的气泡拍摄下来就得到径迹照片。在液体未沸腾前再压缩液体让气泡消失，可进行下次绝热膨胀。

按介质液体需要，气泡室分为低温泡室和常温泡室两种，前者用液氢、液氘、和液氦。液氦低温最低（3—4K），液氢次之（25—29K）、液氘约比液氢高5K。因液氢是纯质子靶，对研究质子结构很重要。氘核中有一个质子一个中子，常用来研究与中子的相互作用。常温泡室又叫重液泡室，它是用氟利昂作液体介质的。它没有复杂的低温系统，原子核又重，常用于研究 γ 和中微子的实验。

气泡室因结构复杂，照片分析又比较困难，20世纪80年代以来已逐渐被电子学探测器所取代，只有少量实验仍用快循环泡室作顶点探测器，用全息照相的方法，与电子学探测器配合作选择触发，用来寻找短寿命的新粒子。

【液体闪烁计数器】利用粒子穿过介质时引起介质原子激发再退激时发出的光信号来探测粒子的仪器。通常把发光物质溶解于有机溶液内。常用甲苯和二甲苯等作溶剂，加某些有机闪烁物质作第一溶质（荧光物质），另一些作第二溶质（称波长转换剂）。当粒子通

过闪烁液体时，首先使溶剂分子激发，产生波长很短的辐射，又很快被溶剂吸收，吸收的能量使第一溶质被激发，退激时发出波长为 $3500\text{—}4000\text{ \AA}$ 的荧光，又被第二溶质吸收，分子退激时发出波长为 $4200\text{—}4800\text{ \AA}$ 的光。这种光能和普通光电倍增管工作波长相匹配。

液闪计数器具有发光时间短（ $2.6\text{—}4\text{ns}$ ）、透明度好、成本低等优点，常用于测量中子和 β 射线。近来有人在闪烁液体内用光导纤维拉成网格做成大型的量能器，既可测能量，又可定位，有一定发展前途。

【量能器】量能器是高能实验物理的一个重要的参量，它用探测器把入射粒子全吸收，而由探测器的信号大小确定其能量，由信号的中心推出入射粒子的位置。它是在粒子物理实验中被广泛采用的装置。特别是对于高能中性粒子的能量和位置的测量，它是唯一有效的手段。随着快电子学和计算机的发展，量能器的信号产生和收集过程只需 $10^{-8}\text{—}10^{-7}$ 秒，用它来参加触发判选，更是高本底过程复杂事例选择触发的有力手段之一。量能器主要物理依据是电磁簇射——主要适用于光子和电子，和强子簇射——主要适用于强子。它们都是让入射的初级粒子在介质中作用产生多个次级粒子，次级粒子再与介质作用产生更多的次级粒子，这样用不太厚的介质就可以把入射的粒子能量全部吸收掉。介质中如插进能探测带电粒子的探测器，探测器的输出信号之和将与入射粒子能量有特定关系，从而给出入射粒子能量，并由簇射轴心给出入射粒子的位置与方向。吸收介质往往用铁或铅，探测器用各种多丝室、液氩电离室、闪烁计数器（碘化钠晶体、BGO晶体、塑料闪烁体）等。量能器是不能探测 μ 子这样粒子的，因 μ 子不是强子，不

能产生强子簇射；它虽有电荷能产生电磁作用，但它的质量比电子大207倍，几乎不能产生韧致辐射，则不可能有级联电磁簇射。这样很容易用量能器将 μ 子与电子、强子区别开来。由于在一般介质中，高能强子的平均自由程($\lambda_0=17.1\text{cm}$)比同能量的电子、光子的平均自由程($\chi_0=1.76\text{厘米}$)大10倍，所以从簇射的发展情况也很容易把强子与电子、光子区别开来。电子是带电的，光子是中性的，在量能器前放一闪烁计数器很容易区别开电子和光子及带电强子和中性强子。所以识别粒子是量能器的一个重要的功能。

【强子量能器】 测量强子能量的一种实验装置。因为强子是种类最多、出现几率最大的粒子，对它们的能量测量，是一种重要的高能实验物理的探测手段。

高能强子在介质中的平均自由程($\lambda_0=17.1\text{厘米}$)比高能电子、光子的平均自由程($\chi_0=1.76\text{厘米}$)大近10倍，所以一般全吸收型的不适合作强子量能器，而取样型则往往被选用。即用足以吸收全部次级粒子的铅或铁，分成很多层，每层的厚度要保证次级粒子中的强子、电子、光子都能飞出来，以便被设在各层之间的具有线性能量响应能力的探测器所探测。次级粒子的产生主要来自核簇射，即当入射的强子首先和介质产生核作用而产生次级强子，次级强子与介质再产生核作用，产生更多的再次级强子，形成强子簇射。有些强子如 π^0 ，寿命只有 10^{-16} 秒就衰变成 2γ 光子， γ 光子又可与介质产生电磁作用形成电磁簇射，每层的介质厚度必须要考虑到电磁分量也能足够取样，以便减小测不到的能量。测量不到的能量主要来自下面几方面：(1)核激发能：强子簇射中，有些强子引起核激发，低于核位阱时核就不会发射出强子，而使这部份能量无法探测，这部分不可测量能量将会占可测量能量的

10—20%。(2) 次级强子衰变成某测量困难的粒子飞出量能器带走一部份能量。如： π^\pm 衰变成 μ^\pm 和中微子，中微子能量无法用强子量能器探测， μ^\pm 在强子量能器中既不会形成电磁簇射，更不会形成强子簇射而飞出量能器，带走它飞出时的能量。(3) 次级强子中的一些中性强子，虽然也飞进了取样探测器，但取样探测器无法测量到。(4) 取样探测器的非线性给测量结果带来偏差。所以往往要用计算机模拟配合实验刻度，给出强子量能器的各种参数以后，它才成为一个可用的实验装置。

【簇射计数器】测量光子和电子能量的探测器。一种是全吸收型，如碘化钠晶体和铅玻璃。另一种是经济实惠的取样型。全吸收型的吸收介质本身又是探测器。对于碘化钠晶体 (NaI (Tl))，平均原子系数为32，它的辐射长度 $X_1 = 2.6$ 厘米。当电子或光子穿过时，首先与介质产生电磁作用，产生出多个次级电子和光子，这些电子和光子，再与介质作用（也为电磁作用），产生出更多的再次级电子和光子，直到电子和光子的能量低于介质原子的电离能。这些次级电子还能使介质激发而退激成波长约为4000 Å 的荧光，而且发光效率比塑料闪烁体高5倍，所以具有很好的能量分辨本领。如果把这些光信号收集起来送给光电管，从光电管输出的信号就可以推算出入射电子或光子的能量。在实际应用中，由于吸收晶体所需的尺寸太大，而且又需特殊形状，所以往往把晶体做成一个个晶体球，再堆积成所需的探测器。铅玻璃也是一种全吸收型簇射计数器，它用重量比为50%的铅和透明玻璃合制而成，辐射长度接近于碘化钠晶体。它能把簇射的次级电子转换成契伦科夫光，而被光电管收集。由于契伦科夫光的产生必须要求次级电子在铅玻璃中速度大于光在其中的速度 ($\beta > 0.6$)，所以有一部份存积能量无法

探测，因而它的能量分辨率不及碘化钠晶体，但却好于取样型的。量能器取样型的量能器把能量吸收介质于探测器分开。吸收介质往往用铁或铅。取样探测器采用塑料闪烁体或气体探测器。由于有80%的能量存积在吸收介质中，所以其探测能量的效率不及吸收型的，但对于测量高能及超高能的光子和电子，这是一种很实惠的办法。因这时所需吸收介质尺寸太大，用全吸收型的价值太昂贵，而用一层吸收体，一层探测器叠放成取样型确是价廉适用的。

【粒子谱仪】高能粒子对撞或者打靶以后会产生出很多种粒子向各种方向飞出，而这些粒子中又有很多粒子能产生一次或更多次的衰变。高能物理实验就是要从如此复杂的背景中捕获住有意义的某种粒子，并测出它的质量、寿命、有那些衰变分支，自旋、宇称等物理参量。因而用一种探测器不可能达到这一实验目的，必须用很多种探测器配合使用，即用一个由计算机来控制的、既能探测初级粒子、又能探测次级粒子；既可探测带电的粒子、又能探测中性的粒子；既可探测长寿命粒子、又能探测短寿命粒子；既可探测动量能量、又能探测质量的综合谱仪。往往用闪烁计数器作快触发，用磁谱仪测动量，用契伦科夫计数器和飞行时间探测器测速度，用强子量能器测强子能量，用簇射计数器测电子和光子的能量，用CAMAC或快总线取数据，用计算机总控制判选和取数据等。并且根据不同的实验目的按排不同的谱仪，主要有单臂谱仪、双臂谱仪、前向谱仪、大接受度谱仪和多粒子谱仪。固定靶实验这几种谱仪都有使用，而两股束流对撞的实验只能用多粒子谱仪。

【单臂谱仪】把探测器放在一条直线上，只测量一个带电粒子物理

参数的探测系统，只适用于固定靶。

有些事例在整个探测范围内只出现一个带电粒子，而别的粒子又无法探测，则必须精细测量这个带电粒子各个物理参数，才能分析清楚这个事例，因而设计一个专用的谱仪放置在这个事例的飞行路线上。一般用闪烁计数器放在直线的不同位置上作选择触发，用一个或多个契伦科夫计数器识别粒子，用磁铁配合定位探测器测动量，用簇射计数器或强子量能器测能量，并用一台小型计算机作在线触发计数。

【双臂谱仪】有些事例衰变成两个带电粒子，需要用两个方向的探测器组成双臂谱仪来探测。 J 和 χ 粒子都是用双臂谱仪发现的，只是前者测正负电子，后者测正负 μ 子。 J 粒子谱仪是一个典型的双臂谱仪，它用布鲁克海文 28.5 GeV 的质子束打九块铍皮，每块厚 1.78 毫米，两片距离 7.5 厘米。从靶上以 $\pm 14.5^\circ$ 飞出的正负电子分别进入谱仪两个臂。每臂中有 4 个闪烁计数器组成的描述仪，选择有一个电子对，两个契伦科夫计数器判别这两个电子对，三个偶极磁铁配合四个多丝正比室测量正负电子的动量，再用铅玻璃计数器和簇射计数器测正负电子能量。要求谱仪的质量分辨率小于 $5\text{MeV}/c^2$ ，质量接受度约 $2\text{GeV}/c^2$ 。这谱仪对 e^+e^- 探测效率为 100%，对强子对的排斥比为 10^8 比 1，能识别 $T_1^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ 的本底，并有长时间工作稳定性。实验找到 $J \rightarrow e^+e^-$ ， $M_{e^+e^-} = 3.1\text{GeV}/c^2$ ，质量峰宽度小于 5MeV ，这就由正反第四种夸克组成的 J 粒子。

【前向谱仪】把探测器安装在粒子飞行方向的小立体角内，来探测事例中的部分或全部粒子的实验系统。

此谱仪往往用在高能束流打固定靶产生的新粒子衰变测量

中。如费米实验室用 $800\text{GeV}/c^2$ 的质子束打铜靶后，再用17米长的选择磁铁得到 $350\text{GeV}/c^2$ 的超子束，其中 Σ^+ ，通过弱电辐射衰变成 $p\gamma$ ，在 Σ^+ 的运动方向上用一个超导磁铁和三个硅感应条探测器精密测量 Σ^+ 的能量和衰到 $p\gamma$ 的衰变顶点，用三个二级磁铁和四个多丝室测 p 的动量，用穿越辐射和铅玻璃测 γ 的方向和能量。 p 通过铅玻璃中间的小孔穿过。整个谱仪有100米长，接收度为50%，用4个闪烁计数器作符合和反符合选择这个衰变过程，测量 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 的分支比只有 10^{-3} ，很好的研究了弱、电、强为一体的稀有衰变过程。用这谱仪可以做 Σ^+ ， $\bar{\Sigma}^+\Xi^-$ 等弱电辐射衰变，和几种超子束的极化，磁矩等物理工作，其中 $\Sigma \rightarrow p\gamma$ 研究CP破坏问题。

有时也把对撞机实验中束流两端的探测系统叫前端探测器，但它只是整个谱仪的一部分。

【大接受度谱仪】能覆盖大的立体角并能测量事例中大部甚至全部粒子的谱仪。对撞机上用的谱仪都是大接受度谱仪，覆盖角可接近 4π 立体角。固定靶实验中虽谱仪的立体角在实验室系中是一个锥角，但对衰变粒子的质心系中确也接近 4π 立体角。费米实验室的E781的SELEX谱仪就是一个大接受度谱仪，它对寻找的粲重子衰变，不仅可以用前向谱仪测量向前的粒子，也可以用后向谱仪接受在粲重子系中向后的粒子。大接受度谱仪比前向谱仪的探测效率提高近一倍，有利于稀有事例的寻找。SELEX谱仪用穿越辐射探测器选择 $600\text{GeV}/c^2$ 混合束中的 Σ^- ，用两个能定 x, y 位置的硅条探测器定出 Σ 的位置，再用它打靶，如产生粲重子，它会在 10^{-13} 秒时间内衰变成别的粒子，粲重子的飞行距离只有几个毫米，用五个硅条探测器测量衰变顶点，用四个硅条探测器组和两个分析磁铁组成前向探测器来测量在衰变母体中向前飞行的粒

子,用大面积的漂移室来测量向后飞行的粒子,用铅玻璃簇射计数器测量电子和光子能量,用契伦科夫计数器来识别带电粒子的种类,再用四个大面积的多丝室和一个分析磁铁来测量寿命在 10^{-10} 秒能飞行几米到十几米远的粒子的衰变后带电粒子动量,用大面积的铅玻璃量能器测所有过程中的中性粒子。

这个谱仪能识别 $250\text{GeV}/c^2$ 能量下的 π 和 K 介子。人们希望用这种谱仪来研究粲重子的产生机制,衰变情况;找 b 夸克的新粒子和四夸克态粒子,其运行经费为600万美元。

【多粒子谱仪】能对多种粒子、多种事例过程进行测量分析的探测系统。在固定靶和对撞机实验中使用。每台中高能核物理及高能加速器上均有一台以上的多粒子谱仪,它由多种探测器组合而成,能适用多种实验的需要。北京正负电子对撞机上的北京谱仪就是一种典型的多粒子谱仪。

【北京谱仪】装在北京正负电子对撞机上的多粒子谱仪。简称BES。某物理目标是研究用束流能量为 $1.5\text{—}2.8\text{GeV}$ 的正负电子,在亮度为 $10.2\text{—}1.7\times 10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的情况下对撞湮没后产生的粲粒子和 τ 重轻子。BES由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、 μ 子鉴别器、亮度监测器及磁铁、电子学系统、触发判选系统及数据采集系统和VAX785等部份组成。这些探测器安放在正负电子对撞点的束流管道周围,以对撞点为中心呈圆柱型空间对称。中心漂移室:紧贴束流管,与主漂移室配合测带电粒子的径迹和动量,还与飞行时间计数器配合作触发判选用。它用两层碳素纤维构成的同心圆筒作支架的圆筒形漂移室,长 1100mm ,内筒半径为 94mm ,外筒内半径为 148mm ,筒壁贴 $50\mu\text{m}$

厚的铝箔。两端用12mm厚的合金铝板,之间拉四层信号丝,每层48根 $\phi 38\mu\text{m}$ 的不锈钢丝,每两根信号丝之间有一对 $178\mu\text{m}$ 的镀金铍铜丝,丝与端板之间绝缘,从信号丝端取走信号,用电荷分配法给出Z轴的方向,位置分辨率为 $\frac{\Delta L}{L} \approx 0.8\%$, $\gamma-\Phi$ 平面的单丝位置分辨率为: $V_s \approx 220\mu\text{m}$,工作气体 $\text{Ar}:\text{CO}_2:\text{CH}_4=89:10:1$ 。

主漂移室:在中心漂移室之外用碳素纤维,内径310mm,外径2300mm,用铝筒全长3380mm。两端用铝板,共分10层,丝径为30—40 μm ,其中偶数层丝与Z轴平行,奇数层为斜丝,倾角为 $3.5^\circ-5.0^\circ$ 用来测Z轴坐标。各层单元数为48—108个不等,共计702个单元,有灵敏丝2808根,辅助丝加灵敏丝共计19380根。工作气体同中心漂移室,它主要用来测带电粒子的动量和能量损失: $dE/dx (\approx 1.37\text{KeV/cm})$,对 π/k 分辨范围可达500MeV/c,十层覆盖角为 $70\% \times 4\pi$,单丝探测效率为95%, $r-\Phi$ 平面上单丝定位精度为200—250 μm ,乙轴定位精度在2.3—2.5mm之间。

飞行时间计数器(TOF):由桶部和两个端盖组成。桶部用48个闪烁计数器(每块 $2840 \times 156 \times 50\text{mm}^3$)沿与轴平行方向固定在主漂移室外桶上。端盖由24个梯形闪烁体组成外径为220cm,内径为69cm的环形端板,时间分辨为330ps。

簇射计数器由桶部和两个端盖组成。桶部是由24层自猝灭流光管(SQS管)和24层吸收体组成的圆桶形探测器。内径2470mm,外径2532mm,长4230mm,共有13440个工作单元。端盖为24层SQS管和23层吸收体做成内径为746mm,外径为1920mm,厚度为410mm的园板,用4488根SQS管。能量分辨率为 $\Delta E/E = 22\%/\sqrt{E}$,用来测量电子和 γ 和能量。对50mwev的 γ ,探测效率为65%,而大于100M_ev的 γ ,探测效率为100%。

μ 子鉴别器安装在 BES 的最外层,由三层吸收体和三层 μ 子计数器组成。共用1512根正比计数管。计数管用内径为 $60 \times 50\text{mm}^2$,长4212—4637mm 的方形管,阳极丝为 $\Phi 48\mu\text{m}$ 不锈钢丝。立体角为 $(63-67)\% \times 4\pi$,对 μ 子探测效率为95%。

亮度监测器:通过对小角度的散射的测量来确定 BEPC 的亮度。由11层5.6mm 厚的铅片和6mm 厚的塑料闪烁体组成的量能器和计数器及辅助计数器三部份组成。共有两套,对称地放在对撞点两端,亮度不准确度小于3%。

触发判选系统是北京谱仪的快速实时事例选择和控制系统,把本底从 $10^6/\text{秒}$ 压缩到每秒数次,并把好事例全部保留下来,还可以对中性事例触发判选。该系统分三级,因 BEPC 的对撞周期为 800ns,第一级在一个周期内完成,不引入任何死时间,事例率约为 1—2kHz。第二级只占用第二个周期,引入死时间约为 0.1%,事例率为 10—30Hz。第三级被认为是“好事例”判选,由它启动 BADC 进行 A/D 变换并通知计算机(VAX—785)准备计数,读完数后,计算机立即通知触发判选让电子学系统准备接受新事例,一个好事例的变换、读出、记带时间约需20ms。在 J/ψ 能量处, BEPC 亮度为 $1 \times 10^{30} \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ 时,宇宙线本底为 0.5s^{-1} ,束流相关本底为 4.5s^{-1} ,而 J/ψ 事例率为 2.5s^{-1} 。

【高能实验中的电子学】 在高能物理实验中用放大、甄别、成形、符合等探测器所需的线路统称为电子学。按其功能可分为以下几种:

线性线路:把探测器输出的信号线性放大成可供幅度、电荷量、时间等作数字化处理的大的模拟信号的电路。

触发逻辑电路:把初步满足物理要求的各探测器信号之间的

关系，用符合、反符合、逻辑门等综合在一起的线路。

数字化电路：把线性放大后的信号数字化。

读出电路：把多丝、漂移、硅条、等位置灵敏探测器的输出信号放大、甄别、数字化等线路系统。

高压电源：供给各种探测器和光电倍增管的高压。

监视和控制系统：用来监测、控制谱仪中各探测器运行的系统。

对这些线路的要求是时间响应快，上升时间只有 $1\text{—}3\text{ns}$ ，重复频率高，高达 $100\text{—}150$ 兆赫，性能长时间稳定，信噪比小，价格低等特点。由于高能实验物理规模大，需要电子线路种类多，并且是世界性的大协作，1967年美国把核电子学标准化，称作NIM系列，1970年欧洲又把数据获取和处理的接口标准化，叫CAMAC标准。近几年又发展成快总线，把计数率从每秒钟 10^6 提高到 10^8 。可以说高能物理是电子线路的大市场，它的发展推动了电子线路的发展，而电子线路的发展又为高能物理发展提供了保证，如果没有快电子学、快总线、大型计算机，大型实验谱仪是不可能建立起来的。

【NIM 系统】为机箱尺寸、插件尺寸、接口规格、电源规格（ ± 6 伏、 ± 12 伏、 ± 24 伏）、输入输出电平都格式化的电子线路系列。该系统的线性线路有线性放大器、线性扇入和扇出、衰减器等；甄别器；逻辑单元有二重逻辑单元、多功能逻辑单元、逻辑扇入和扇出、时间平均器等。

【CAMAC 标准】把数字线路之间及其与计算机之间数据传输国际标准化的线路。该标准也对机箱的尺寸标准化，并在机箱背面用一

多线印刷线路板把不同插件之间相互联系，它也是插件和计算机之间的数据传输通道。每个机箱中有25个插件，最右边的24和25站通常放机箱控制器，其余23站可以插各种类型的CAMAC插件。机箱控制器可以发出的指令包括：地址（*A*）、站号（*N*）、和功能码（*F*）。CAMAC插件为：模拟-数字量转换（ADC），它把模拟信号的幅度数字化；时间-数字量转换（TDC），它把时间信号数字化；记存器，用来记录定位探测器与记存器对应的单元是否有信号输出。这三种插件一般都由门信号来控制是否要记录由探测器送来的信号，由LAM信号通知是否把寄存信号送给计算机。

【快总线】一种高速数据获取、数据处理和控制系统的工业标准。它适用于高能物理、核物理和天体物理等方面的物理实验的数据获取。快总线在80年代初由北美的几个高能物理实验室的一个科学家小组提出。US—NIM委员会负责此标准的发展和组织世界各国发展此标准的活动。快总线的硬件主要由机箱、插件和机箱段接插头（总线）组成。插件分主插件和从插件。主插件可以申请和控制总线并能与此总体相联的从插件进行通信和数据传输。从插件不能获取总线的控制权。多个机箱通过段的联接可以组成一个庞大的通信系统。快总线的软件主要是数据获取和系统控制的标准子程序。

快总线的主要特点是：（1）很大的地址和数据空间（32位）。（2）高速的工作频率（ECL可以达到10MHz）。（3）通过段联接的总线允许进行并行处理。（4）系统具有多种和广泛的通信能力。（5）数据传输可以是握手方式或非握手方式。（6）具有中断和对多个主插件申请总线控制权的仲裁能力。快总线从它诞生时起就引起了全世界高能物理学家的关注。经过十几年的发展，作为一种

成熟的数据获取系统标准应用于欧洲 LEP 对撞机的几个大型探测器上。

【粒子的选择触发】用来将有用的事例从众多的背景中选择出来的电子线路系统。不论是固定靶实验还是对撞实验并不需要把所有过程都记录下来，而是从复杂的背景中把物理上有价值的物理过程挑选出来，这样就根据不同的实验目的设计不同的触发判选。

触发判选是根据实验者感兴趣的事例与背景过程最突出的区别，把它从成千上万个背景中选择出来，既提高了探测效率，又节省了磁带和计算机机时。因而对一些稀有事例的实验是极为主要的。例如，在质子打固定靶的实验中找 J/ψ 粒子， J 谱仪选用 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ ，它比背景中的 $\pi^+\pi^-$ 和 $k^+\pi^-$ 的强度要小 10^8 倍，通过触发判选， 10^8 个背景只有一个被误认为是 e^+e^- ，如果没有如此好的选择能力，实验是无法进行的。触发判选有两种方式，一种用快电学判选逻辑，另一用在线计算机进行硬件选择和软件的判选。

【硬件快触发】直接用快电子学线路把实验好事例初步选出来。快触发一般用闪烁描述仪配合符合和反符合进行初步的好事例选择，把相当多的背景排除掉。如费米的 E761 实验是选择 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 过程，实验中用 s_1 和 s_2 选择带电粒子 Σ^+ ，用 s_3 作反符合放在 γ 的路径上配合中性粒子转换成带电粒子的铅屏后放一 s_4 作符合判选 γ ，则它们的组合就是 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 的快触发系统。有时需配合专用硬件选择器来配合描述仪作快电子学触发。如 1975 年西欧中心把多丝室的信号送到快电子学逻辑选择系统中，来剔除掉大部份本底。

【计算机逻辑判选】用计算机的逻辑控制来保证好事例能即时被记

录而不被随之而来的背景中断。主要由下面几个条件来实现：(1) 在计算机读一个好事例的过程中，不允许实现新中断。(2) 在计算机读走 CAMAC 全部数据前，不能打乱保存在其中的原数据。(3) 读取结束后计算机立即处于允许中断请求状态，随时准备响应下一个事例处理请求。(4) 下一事例来后，立即向计算机发出中断请求，同时该事例信号送入 CAMAC 保存。实现这四方面逻辑判选就保证了好事例被可靠地记录。

【实验的数据分析】把粒子实验物理中的磁带上数据一个事例一个事例地变成随机的空间径迹，从中求出随机的动量、能量、质量及其他物理参数，再由总的随机分布得到期待的物理结果。这个过程叫实验的数据分析。数据分析分在线分析和离线分析两种。在线数据分析：用在实验取数据过程中，主要目的是保证得到可信的数据。主要手段有四种：(1) 监示各种探测器高压是否稳定及束流情况，把结果显示在荧光屏上供实验者随时观察。(2) 取样部份数据分析处理看实验数据的质量是否稳定可靠。(3) 把取样分析结果做成直方图显示在荧光屏上随时观察变化情况。(4) 把取样的一部份事例图形重建看径迹是否满足实验要求。如上四方面有一种不理想，就得停止实验，检查并解决出现的问题后再继续实验。在线分析往往用一个专用的小型计算机来承担监示和数据采集的任务，70年代一般用 PDP/11 计算机，现在已基本被 VAX—750, VAX—780, 或 VAX—785 等计算机代替。为了提高在线事例选择判选，近来又用多个 CPU 并联，与快总线一起协助在线计算机完成数据采集任务。离线分析：经过在线初步判选后记在磁带上的实验数据是最原始的数据，必须与物理联系起来才能得到有用的结果。另外原始数据中为了不丢失好事例，往往混进很多背景。

所以排除背景、给出物理结果的工作都不在实验现场，而把磁带拿到大型计算机上进行严格的计算和判选，最后得到满意的物理结果。另外为了得到理想的实验结果，实验前必须对实验装置按物理目的进行认真的设计计算，这是离线分析的又一个重要的内容。主要任务为：(1) 计算实验装置的接受度。(2) 实验所需的束流亮度。(3) 实验所需时间、能得多少事例。(4) 需什么样探测器、磁铁、吸收体，它们的尺寸及所放位置、对它们的精度要求。(5) 把实验数据物理化。(6) 排除混进的本底。(7) 求出各种物理参数的统计分布。(8) 拟合上面的统计分布得到实验结果。(9) 给出实验的系统误差和统计误差。(10) 与理论模型比较看结果是否可靠。在线中的程序为了加快取数速度，往往用接近计算机语言的汇编语言，在线分析程序用 FORTRAN 的比较多。通常总是把取数放在计算机执行任务的第一优先级上，首先保证把数据取下来，离线分析程序一般用 FORTRAN 语言，程序都做得比较大，主要包括数据输入、数据判选分析、结果输出三部分。

【蒙德卡罗在数据分析中的应用】 又称统计试验法。它用已知的整个物理过程中的每一随机因素的概率分布，用数学的方法把它模拟出来。这是微观实验中经常采用的方法。它可以设计得很严密、全面，所以用它模拟的各种随机物理过程的结果比较全面地反映这些物理量的统计性质。随机数有均匀分布随机数、任意给定分布随机数（离散分布随机数；连续分布随机数如 (a, b) 区间均匀分布随机数、指数分布随机数、二项式分布与泊松分布随机数等）、多维变量随机数等。现在有很多物理过程已经有很成熟的蒙特卡罗程序，如模拟电磁级联过程的 EGS 程序已在世界通用。西欧中心的 GEANT₃ 蒙德卡罗程序是一个极为综合的模拟程序，它已把

各种参数输入格式化，并收集了多种物理过程的产生器，几乎是只要把你的物理参量和探测器参量按它的要求送进去，就可以得到你满意的结果。但它太通用，很费机时，有时只用它来检验某些简单的蒙德卡罗程序是否可靠。粒子实验物理中的模拟包括如下几方面：(1) 反应事例的产生。(2) 反应中的粒子在探测器中的情况。(3) 事例编码。(4) 事例数据的记录格式。用蒙德卡罗模拟可以设计实验装置，检查比较数据分析结果。预计未来的实验情况，是研究微观世界中必须掌握的方法。

【粒子加速器】一种利用电磁场将带电粒子束加速到高能量的装置，简称加速器。最早的加速器是考克饶夫和瓦尔顿在1932年初建成的倍压加速器，把质子加速到700keV，实现了第一个由人工加速粒子进行的核反应。同年劳伦斯设计建成了第一台回旋加速器，被加速的质子能量达到1.25MeV。同一时期，范德格拉夫研制成功了静电加速器，能量为1.2MeV。1940年克斯特制成了电子感应加速器，能量达到2.3MeV。1945年韦克斯勒和麦克米伦提出了自动稳相原理，为高能加速器的发展开辟道路。1946年回旋同步加速器在苏联建成，把质子加速到190MeV。随着微波和高频技术的发展，从50年代起，质子驻波和电子行波直线加速器迅速发展起来。与此同时，质子同步加速器也开始研制，1952年3GeV的质子同步加速器在美国建成。同年，利文斯顿和库朗特提出了交变梯度强聚焦原理，在这基础上建成了强聚焦同步加速器。在此期间，扇形聚焦回旋加速器和串列静电加速器也研制成功并获得发展。1956年克斯特和奥尼尔提出采用高能粒子束对撞来提高有效作用能的概念，导致了60年代以来对撞机，特别是正负电子对撞机和质子—质子（反质子）对撞机的发展。20世纪60年代以来的进展还有重离

子加速器、极化粒子加速、自动控制 and 超导磁铁、超导腔技术等。兼用和专用的同步辐射光源和自由电子激光获得迅速发展。加速器的种类已超过20种，数量也日益增多，就单束能量而言，质子已达到1TeV (=1000GeV)，电子达到50GeV。一台加速器通常由四个部分组成：(1) 产生带电粒子的设备—电子枪或离子源；(2) 加速带电粒子的设备—加速系统，导引磁场系统，聚焦系统，真空系统等；(3) 束流测量和控制设备；(4) 束流引出设备。对于不同类型的加速器，这几个组成部分也有所不同。对于多台加速器组成的复合体，粒子束可由上一级加速器引出并注入下一级；而对撞机中相向运动的两束束流在其中对撞，可不需要引出设备。加速器种类繁多，可按不同方式分类。按采用的电磁场形态分，有高压加速器、感应加速器、直线加速器、回旋加速器和同步加速器等。按束流运动轨道分，有直线型加速器、回旋加速器和环型加速器等。按加速粒子种类分，有电子加速器、质子加速器、重离子加速器和全粒子加速器等。按束流能量分，有低能加速器 (<100MeV)、中能加速器 (0.1—1GeV) 和高能加速器 (>1GeV) 等。按聚焦性能分，有弱聚焦加速器和强聚焦加速器，又有分离作用和组合作用之分。按产生的次级粒子种类分，有光子工厂或同步辐射光源，中子发生器和粒子工厂 (K、 ϕ 、 τ/c 和 B 粒子工厂等) 等。按产生电磁场的设备分，有常规加速器和超导 (磁铁、高频腔) 型加速器。按工作方式分，有打静止靶加速器、同步辐射光源和对撞机等。科学、技术和工农业的发展对加速器不断提出要求，推动它向更高能量、更大流强和更好性能发展。自1932年第一台加速器问世以来，加速器的最高能量大致以每10年一个数量级的速度增长，而单位能量的造价则下降，两者的直接原因是加速器原理和技术的逐步发展。粒子加速器是人类变革原子核和“基本粒

子”、探索物质微观结构的重要工具，同时在工农业生产、医疗卫生、科学技术、国防建设等国民经济领域都有十分重要的用途。

【高压加速器】让带电粒子束一次或多次通过直流高压电源产生的电场而获得加速的装置。按产生高压的方法不同，可分为倍压加速器和静电加速器两类。按倍压电路不同，倍压加速器家族中又有高压倍加器（又称串激倍压整流器）、地那米加速器（又称高频高压发生器）、绝缘芯变压器和强脉冲倍压发生器等。静电加速器采用输电带或输电链向空心的金属电极输运电荷，从而获得高压来加速粒子。串列静电加速器是50年代加入静电加速器家族的新成员，粒子通过高压电极被加速一次后在电荷转换装置中改变其带电极性，从而实现在同一电极电压下两次加速粒子，提高其能量。高压加速器在原理上可加速任意一种带电粒子，且能量可连续调节，但受到高压绝缘和材料击穿的限制，其能量不能太高，通常在几十 MeV 到几十 keV 之间。高压加速器可用作中子发生器、离子注入机和高能加速器的注入器等，并在分子、原子和核物理研究、微量分析和辐照加工等领域都有广泛的应用。

【感应加速器】利用交变磁场所产生的感应涡旋电场加速带电粒子的装置。最常见的是环形电子感应加速器。它利用具有特殊分布的轴对称交变磁场将电子束导引在一个环形真空盒内沿一固定的圆形轨道运动，并在感应电场作用下加速。由于磁体随能量上升而明显增大和辐射效应的限制，其最高能量约为300MeV，典型值为25MeV，平均流强为 μA 量级。电子感应加速器主要用于肿瘤的辐照治疗和构件的无损探伤。将感应加速技术与直线加速器技术相结合，人们还发展了电子和离子感应加速器，用以产生高达10kA

的脉冲电子和离子束，用于抗核加固、材料热击波、集团加速和自由电子激光等方面的研究。

【直线加速器】采用沿直线轨道分布的高频电磁场加速电子、质子和重离子的装置。为了获得 $1-20\text{MeV/m}$ 甚至更高的加速梯度，通常用高功率的高频或微波功率源来激励加速腔。直线加速器的加速电场有行波和驻波两类。由于电子即使在低能时也接近光速，大部分电子直线加速器取行波加速方式，采用盘荷波导结构。在行波加速腔内装有环形金属盘片，用以减慢电磁波的相速。适当调整盘片的位置和圆孔的直径，即能使行波的相速度与粒子同步而持续加速。质子和重离子直线加速器则一般取驻波加速方式，采用带漂移管的谐振腔结构。适当选择漂移管的尺寸和位置，使轴向电场不满足加速要求时，粒子处在漂移管内受到屏蔽作用，而在通过漂移管间隙时得到加速。离子质量愈大，通常荷质比就愈小，相同能量下的速度也愈低，工作频率也就愈低，从而加速器的尺寸就愈大。直线加速器具有束流强度高、能量可逐节增加等优点，缺点是昂贵的高频、微波功率源。低能直线加速器在医疗和工业辐照中广泛应用，而中、高能直线加速器则在核物理和粒子物理研究中占有重要地位，并且是高能同步加速器和储存环、对撞机性能优良的注入器。

【高频四极场加速器】一种采用高频电源在四极谐振腔上激起交变电场对离子束聚焦和加速的新型加速器，在谐振腔中，四根金属杆沿园筒形腔体相隔 90° 放置，相对的导体杆极性相同，相邻的杆极性相反，构成四极场聚焦。而轴向加速电场则是通过金属杆沿束流通道方向的几何形状的周期性调制而获得的。由于在这种加速

器中粒子的聚焦和加速都是电场的作用，因此对低能束流十分有效。它具有强流、高效、结构紧凑、使用方便等优点，是一种有发展前途的新型低能加速器，除了可部分取代高压加速器作为注入器外，还有其他多方面的用途。

【回旋加速器】一种利用高频电场将粒子沿螺旋线形轨道加速的谐振加速器。这类加速器把谐振加速方法和磁场导引粒子作回旋运动结合起来，用不太高的电压多次加速粒子，达到较高能量。回旋加速器自1932年问世以来，已形成庞大家族，包括经典回旋加速器、扇形聚焦回旋加速器和电子回旋加速器等。经典回旋加速器采用均匀场磁铁和一对 D 形真空盒。固定频率的高频电压加在 D 形盒上，使粒子穿过其间隙时得到加速。随着能量提高，粒子运动轨道半径增大而回旋频率降低，最后不能被高频场加速，从而限制其最高能量约为20MeV。为克服这个困难，在20世纪60年代初研制出扇形聚焦回旋加速器，在磁极上安装扇形磁铁，产生沿方位角变化的磁场使粒子在轴向聚焦，而磁场沿方位角的平均值从中心沿半径逐渐增强，使粒子旋转周期保持不变，因而又称为等时性回旋加速器，其典型工作能量为25—100MeV，流强为0.1—1mA。兰州近代物理研究所在1988年建成的重离子装置就属于这一类加速器。电子回旋加速器又称微波回旋加速器，用于加速电子。与经典回旋加速器相同，它也采用稳定磁场和固定高频场频率，不同的是它采用微波谐振腔取代 D 形电极，因而加速频率和电压高，使电子每加速一次的能量增益与其静止能量可比拟，取相应的回旋周期增量为高频周期的整数倍，即能实现倍频谐振加速。电子回旋加速器的能量受到磁铁体积的限制，通常为10—30MeV。离子回旋加速器在核物理实验、同位素生产和快中子治

癌等方面有广泛用途，而电子回旋加速器则多用于医疗和剂量标准，也用作电子同步加速器的注入器。

【同步回旋加速器】一种保持主导磁场恒定而调变加速电场的频率使之与粒子旋转频率同步的回旋加速器，又称调频回旋加速器。严格地说，束流中只有一个粒子即同步粒子满足谐振加速条件。1945年发现的自动稳相原理表明，在一定条件下，非同步粒子的相角会自动围绕同步粒子的相角振荡。自动稳相原理不仅使同步回旋加速器得以发展和实际建成，并为建造同步加速器提供理论依据。加上它是第一种自动稳相型加速器，又称稳相加速器。原则上同步回旋加速器可将粒子加速到任意高的能量，但由于受磁铁体积的限制实际达到的最高能量为700MeV，由于调频的需要这种加速器只能脉冲工作，平均流强仅几个微安。因此，大多数同步回旋加速器已改建为扇形聚焦回旋加速器。

【同步加速器】一种保持主导磁场和加速电场与粒子同步使之沿固定的环形轨道运动的加速器。在环形真空盒的某些位置安放磁铁和高频腔等设备对在其中运动的粒子进行偏转、聚焦和加速等。由于电磁场仅限于环形真空盒的某些区域，因而大大减小设备特别是磁铁的体积，从而在技术上提供了把束流加速到高能的可能性。早期的同步加速器在偏转磁铁中引入一定量的场梯度，使粒子在水平和垂直方向同时得到聚焦。在这种弱聚焦加速器中，束流横向截面尺寸仍较大，限制其最高能量为10GeV左右。在强聚焦加速器中粒子水平方向聚焦和散焦（即垂直方向散焦和聚焦）两种磁铁交替放置，使聚焦性能进一步改善。其中偏转和聚焦作用由同一类磁铁承担的称为组合作用聚焦系统，而由偏转磁铁和聚焦磁

铁分别承担的为分离作用聚焦系统。现代同步加速器都基于这种强聚焦原理，大多数采用聚焦性能更好、安排使用更灵活的分离作用磁铁方案。按所加速的粒子不同，有电子同步加速器、质子同步加速器和重离子同步加速器之分。由于电子在低能时的速度就接近光速，因而电子同步加速器通常采用恒频电场加速。而1GeV级的质子和重离子加速器在加速过程中粒子的速度仍有较大范围的变化，因而需要采用调频电场，且离子愈重调频范围愈大，同时对真空度的要求也愈高。同步加速器是高能加速器的主要类型，包括高能打静止靶加速器和用作提高注入能量的增强器，各种储存环（见“储存环”）和环型对撞机（见“对撞机”）等。同步加速器还应用于中子治癌、介子工厂和同位素生产等。按1992年11月统计，世界上有32台电子同步加速器，17台质子同步加速器和7台重离子同步加速器在1GeV以上的能区工作，其中能量最高的是美国费米实验室的TEVATRON，单束能量高达1000GeV。

【储存环】一种储存、积累、加速带电粒子进行对撞、产生同步辐射光以及提供高流强束流的同步加速器，分别用作对撞机（参见“对撞机”）、同步辐射光源和积累环等。按储存粒子的种类不同，有正负电子储存环、质子储存环和重离子储存环等。为了使束流寿命达到数小时以至数十小时，环形真空盒的横截面尺寸要足够大，真空度须高达 $10^{-7} - 10^{-8}$ Pa。

【对撞机】一种同时加速两束相向运动的带电粒子使之对撞来提高有效作用能的高能物理实验装置。根据相对论原理，能量为 E 的高能粒子轰击静止靶（设靶粒子的静止能量为 E_0 ），其有效作用能为 $\sqrt{2EE_0}$ ，由于 $E_0 \ll E$ ，大部分能量都转化为质心系的动能而浪费

掉了；而两个动能为 T 的粒子对撞，其有效作用能等于质心系总能量 $2T$ 。例如，动能为 1000GeV 的质子和反质子在 TEVATRON 中对撞的有效作用能相当于 $2 \times 10^6\text{GeV}$ 的反质子与静止靶中的质子对撞。这就是为什么 80 年代以来建造的高能加速器绝大多数是对撞机的缘故。除了能量以外，对撞机的另一个重要指标是亮度，束流对撞时单位时间发生某种反应的次数等于亮度与该反应的截面之乘积。对撞束流越强、对撞点束团尺寸越小，对撞频率越高，亮度也就越高。限制亮度提高的主要因素是束流与束流对撞时的电磁相互作用和单束集体效应（见“束流集体效应”）。提高能量和亮度是对撞机发展的两个主要方向。美国曾计划建造的超导超级对撞机（SSC）利用能量为 20TeV 的两束质子对撞，质心系能量达 40TeV ，设计亮度为 $10^{33}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。研制中的 ϕ 、 τ/c 和 B 粒子工厂实际上是相对能区亮度为 $10^{32}\text{--}10^{34}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高性能对撞机。按对撞粒子不同，对撞机家族中有正负电子对撞机、电子—电子对撞机、质子—反质子对撞机、质子—质子对撞机、电子（正电子）—质子对撞机和重离子对撞机等。它们既有作为对撞机的共性，如都需要将束流在对撞点处聚焦到很小尺寸并在其附近提供安放探测器的直线节等；又有各类加速器的个性。能量相同而电荷相反的粒子（如正负电子、质子—反质子等）可在同一环里储存、对撞，在其他情况下，则需要两个环分别加速两种粒子而在若干对撞点交叉。为了获得性能良好的反质子，质子—反质子对撞机需要在其注入器中采用束流冷却技术（参见“束流冷却”），并用反质子积累环来提高流强。也有的正负电子对撞机采用正电子积累环作注入器。电子环型对撞机的能量受到与其四次方成正比的同步辐射损失的限制。为了克服这个困难，提出了线型对撞机的方案。为了使其能量和亮度能与环型对撞机竞争，需采用更高频率和

功率的微波源，产生更高的加速梯度，要求束流强度和重复频率更高、束团尺寸更小等，这些都对加速器技术提出了挑战。按1992年11月统计，世界上有9台正负电子对撞机、2台质子—反质子对撞机和1台电子—质子对撞机在运行。其中只有一台线型对撞机（ $2 \times 50 \text{ GeV}$ 的 SLC）。TeV 级的线型对撞机尚在研究阶段，重离子对撞机预计在1996年问世。1988年建成的中国第一台高能加速器——北京正负电子对撞机在 2 GeV 时亮度达 $8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，是预计在20世纪末建成的 τ/c 粒子工厂问世以前在这个能区性能居国际领先的对撞机。

【北京正负电子对撞机】中国第一台高能加速器，常用其英文字头缩写为 BEPC。1984年10月破土动工，1988年10月对撞成功，由注入器、储存环，北京谱仪和同步辐射装置四大部分组成。注入器是一台长202m 的行波直线加速器，可以把正负电子加速到 1.3 GeV 以上。束流通过总长度为210m 的正负电子输运线注入到储存环的真空盒中。周长为240m 的储存环里，安装有各种磁铁、高频腔和束流测量、真空等设备，将正负电子束偏转、聚焦并加速到 $1.55—2.8 \text{ GeV}$ 进行对撞，提供高能物理实验和同步辐射研究使用。北京谱仪（参见“北京谱仪”）安放在储存环中的南对撞点，其功能是精确测量正负电子对撞产生的粒子的径迹、电荷、能量和动量等。同步辐射实验区分布在储存环南侧的东西两翼。电子在储存环中沿弧形轨道运动时产生的同步辐射光，通过光束线进入各实验站，进行固体物理、表面物理、生物物理、光化学、材料科学、医学和光刻等方面的研究。北京正负电子对撞机在 2 GeV 时的峰值亮度达到 $8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，单束电子流强达到 150 mA ，它既是一台在 $\tau/\text{粲}$ 物理能区占国际领先地位的对撞机，又是一台高性

能的同步辐射光源。

【同步辐射】相对论性带电粒子 ($v \approx c$) 在电磁场中偏转时产生的一种电磁辐射, 最先在电子同步加速器上发现, 故得此名, 又称同步加速器辐射。由于离子的静止质量比电子大三个量级以上, 即使在 TeV 级的质子同步加速器中, 同步辐射损失依然是不重要的。而对 MeV 级的电子同步加速器, 同步辐射已十分显著。同步辐射使粒子在横向和纵向的振荡阻尼, 并与量子起伏达到平衡态。这也是为什么电子同步加速器中束流易于稳定和束流发射度较小且不依赖于入射束性能的原因。对于给定的轨道半径, 同步辐射的功率与粒子能量的四次方成正比, 这是阻碍电子同步加速器能量提高的主要因素。同时又发现它具有宽阔的连续光谱、高度的准直性和偏振性等特点, 加上高功率和高亮度, 使电子储存环成为一种性能优异的新型强光源而得到广泛应用, (参见“同步辐射光源”)。同步辐射又是天体物理中的一种重要辐射机制。

【同步辐射光源】一种利用相对论性电子(或正电子)在磁场中偏转时产生同步辐射的高性能新型强光源。电子同步加速器的出现, 特别是电子储存环的发展, 推动了同步辐射的广泛应用。同步辐射的早期研究是在电子同步加速器上进行的, 有人把它称为第零代光源。第一代则是在主要用作高能物理实验的正负电子对撞机上的“寄生”光源。北京正负电子对撞机上的同步辐射装置就属于这一类。第二代是专门为同步辐射应用而建造的储存环, 主要使用偏转磁铁引出的同步光。1990年建成的束流能量为800MeV的中国合肥同步辐射装置属于这一代。第三代是亮度更高、以插入元件(扭摆磁铁或波荡器)产生光辐射为主的储存环。中国台湾已经建

成一台1.3GeV的第三代光源。尽管多数第三代光源还处在设计或建造阶段,人们已在讨论性能更好的第四代光源。同步辐射光源通常有两个工作能区,一个是真空紫外/软X光,相应束流能量为1—2.5GeV;另一是硬X光光源,束流能量为5—8GeV。为了克服离子俘获效应,提高束流寿命,在储存环中需要装备离子收集电极,有的还采用较难获得的正电子运行。按1992年11月的统计,世界上有38台同步辐射光源在运行,18台在建造中,13台在设计阶段,分布在15个国家的47个实验室,应用于原子物理、分子物理、固体物理、表面物理、化学、生物学、医学、天文学等基础研究领域和光刻、计量、显微照相、材料科学、环境研究等技术科学领域。

【自由电子激光】一种利用相对论性电子束产生的相干光辐射,常采用其英文词头字母简称为FEL。产生FEL的装置称为自由电子激光器。普通激光器都基于原子、分子或凝聚态物质中束缚电子的跃迁,因而产生的激光受到束缚能态的限制,通常只能产生某种波长的激光。FEL来源于自由电子本身,因而具有调频范围宽的特点,可覆盖从X光到亚毫米波的整个波段,特别是能填补远红外和超紫外或直至光这些相干辐射空白区。自由电子激光器通常由产生相对论性电子束的加速器和波荡器与相应的光谐振腔组成。电子束通过波荡器中沿轴周期变化的横向磁场轨道发生周期性偏转(波荡),如果这种波荡与激光束(入射的或电子本身的相干辐射)的光场保持某种相位使电子减速,就能产生激光功率放大或自持激光振荡,即自由电子激光。用于FEL的电子束可由储存环或各种直线型加速器(电子直线加速器、电子感应加速器和强脉冲倍压发生器等)产生,要求电子束脉冲流强度高(10—

1000A)、能散度小 ($\leq 0.5\%$)、脉冲短和发射度小,并对束流能量、流强和轨道的稳定性提出很高要求。自由电子激光器有两个工作能区,一个是电子束能量较低(约1MeV)的喇曼区,与分子物理中的喇曼散射类比而得名,产生较长波长的激光;另一是电子束能量较高的康普顿区,同光子与电子的康普顿散射类比而得名,产生短波长激光。自由电子激光优越于同步辐射是它的相干性,优越于普通激光又有其频率的可调性,并比这两者有更高的功率和亮度,且产生效率高,因而在受控核聚变、凝聚态物理、材料科学、激光光谱学、光通讯、光化学、医学、激光加工、同位素分离以及激光武器等领域有着诱人的应用前景和发展潜力。

【超导加速器】主体设备采用超导技术的加速器,如超导回旋加速器、超导同步加速器、超导直线加速器和超导对撞机等。其中采用的超导技术主要是超导磁铁和超导腔。超导磁铁主要应用于回旋加速器和质子、重离子同步加速器、小型同步辐射光源,特别是高能质子、重离子对撞机中,用于产生高磁场、降低功率损耗和减小磁铁和隧道长度等,也用在同步辐射光源中作扭摆磁铁以缩短辐射波长。超导磁铁的绕组通常采用铌钛合金丝绕合成的导线制造,在4.5K下最高场强达6—7T,在1.8K下达10T。美国曾计划超导超级对撞机SSC中有近8000块超导偏转磁铁工作在4.35K下,场强6.7T。超导腔主要用于电子储存环、正负电子对撞机、超导直线加速器和线型对撞机上,通常采用铌等超导材料制作,工作在4K左右,加速场强5—10MV/m。典型的超导直线加速器是美国的连续电子束加速装置CEBAF,其中两台400MeV的直线加速器包含338个超导腔,由42个制冷单元冷却,工作在2K下,加速场强为9MV/m,品质因数 5×10^9 。至于设计中的一台 $2 \times$

250GeV 的超导型对撞机 TESLA，长度达 20km，加速场强 25MV/m，规模更大，要求也更高。高临界温度超导材料的研究进展，为超导加速器的发展注入了新的活力和希望。

【电子枪】 产生电子束的器件。按其产生的电子束的极化特性，有非极化和极化电子枪之分；按其工作方式，有连续束和脉冲束电子枪之分；按其工作原理，有热发射（热式）和场致发射（冷式）两种。电子枪一般采用三电极结构：阴极发射电子，栅极起调节、聚焦作用，阳极引出电子，平均流强为毫安级，脉冲流强为安培级，寿命可达数千小时。电子枪用作电子加速器的粒子源，同时也直接应用于各种使用低能电子束的场合。粒子加速器的发展，如自由电子激光和线型对撞机等，对电子枪提出了大流强、短脉冲、长寿命和高稳定度的要求，推动电子枪技术的提高。

【离子源】 产生离子束的装置。按其产生的离子束的极化特性，有非极化和极化离子源之分；按其工作方式，有连续束和脉冲束离子源之分；按其工作原理可分为气体离子源和固体表面离子源两大类。在气体离子源中，阴极发射的电子束和气体放电产生的电子撞击中性的气体原子或分子形成等离子体，由阳极和吸极引出得到离子束。属于气体离子源的有高频离子源、潘宁源（又称 PIG 源）、双等离子体离子源、双彭源和弧放电离子源等。在固体表面离子源中，电离过程可由热效应维持，也可利用外部高电场及离子束、电子束或光子来维持，分别相应于热表面电离离子源和溅射离子源等。负离子源和多电荷重离子源用于负离子加速器和重离子加速器中。串列离子加速器的固体剥离膜和气体剥离器可看作一种特殊的离子源。离子源是各种离子加速器以及离子注入机、

质谱仪、电磁同位素分离器、受控核聚变、离子束表面处理与分析 and 离子推进器等装置中的关键部件。

【束流】束状运动的粒子流，粒子加速器工作的客体。按粒子种类不同，有电子、正电子束和质子、反质子束以及重离子束等之分；按束流时间结构，又有连续束和脉冲束之分，后者通常由彼此相隔的束团组成。描述加速器中束流性能的物理量主要有能量、强度和发射度。束流能量通常是指其中心粒子的动能，对于电子加速器一般是指其总能量。单位时间通过某一截面的粒子数称为束流强度，简称流强，有平均流强和脉冲流强之分。被加速的粒子一般都带电，常用毫安（mA）、微安（ μA ）等电流强度的单位来表述束流强度。束流中粒子的运动状态可用直角座标 x 、 y 、 z 及其对应的动量 p_x 、 p_y 、 p_z 组成的六维相空间来描述，每个粒子相应于其中一个点，束流则对应于一个六维相椭球，表征其运动范围和束流品质。相椭球在 (x, p_x) 、 (y, p_y) 和 (z, p_z) 相平面上的投影面积分别为水平、垂直方向（统称横向）和纵向的束流发射度，与束流在水平、垂直方向的包络尺寸、散角和能散度、束团长度相关。发射度越小，束团尺寸、散角和能散度越小。

【束流传输线】传输带电粒子束流设备的集合，通常由偏转元件（如二极磁铁、静电偏转器和切割磁铁等）、横向聚焦元件（如四极磁铁、四极电透镜和螺线管等）、纵向变换元件（如聚束器、能散调节器等）、束流测量元件（如束流截面探头、位置探头、束流变压器、法拉第筒等）、真空部件（管道、泵、计、阀门等）和各种专用传输元件（如束流准直器或光阑、分束器和废束收集器等）等部分组成。束流传输线的基本任务是高效率地传输束流，同

时也根据需要改变束流的性能和参量，实现与前级和后级的发射度匹配等。束流传输线广泛地应用于粒子加速器以及核物理与粒子物理实验、电子显微镜、受控核聚变和核燃料生产等领域。

【束流集体效应】束流在加速器中所受到的除外加电磁场（由磁铁、高频腔等元件产生，引起单粒子效应）以外的电磁场引起的各种效应，包括空间电荷效应、束流与残余气体中电子和原子核的弹性和非弹性碰撞及其与离子的作用、束流内部粒子散射、束流与环境（真空管道、类腔结构和谐振腔等）的相互作用以及束流与束流的相互作用等。束流集体效应随流强提高而增强。空间电荷效应在非相对论性情况下较为显著；束流与残余气体组分的作用则与真空度密切相关；束流与环境的相互作用常用等效 R-L-C 电路讨论，环境特性即用阻抗来描述；而束流与束流的相互作用则是对撞机特有的效应。束流集体效应引起粒子振荡频率改变、束流发射度增长、寿命下降以至束流不稳定等现象，是加速器物理中长期研究的课题，对于各种强流加速器和对撞机十分重要。

【束流冷却】一种减小束流发射度的技术。这里的“冷却”借用了热学中温度的概念：束流中粒子的横向和纵向振荡的幅度越大，即发射度越大，意味着粒子相对于中心轨道和平均能量的不规则运动的动能越大，束流“温度”就越高。束流冷却有电子冷却和统计冷却（又称随机冷却）两种。在电子冷却装置中，一束发射度很小的电子注入到质子束流管道中与之平行运动，调整两束的速度相等，由于库仑作用质子束会把热运动的能量传递给电子束而得到降温、冷却，在统计冷却装置中，利用感应电极获取束流横向（或纵向）密度分布质心位置的信号，并将此信号放大后加在下游

的一个脉冲电极（或谐振腔的间隙）上，将束流质心推向中心轨道（或中心能量），通过反复作用即可将束流横向（或纵向）发射度减小，达到冷却束流的目的。束流冷却成功地应用于反质子积累环中，使质子与反质子对撞成为现实。

【加速器新原理】不同于常规加速器所采用的、能提供更高加速梯度的加速原理。常规加速器在高能区已接近技术和经济力量的极限。如果没有新的加速原理，人类征服更高能量的步伐将不得不停缓下来。例如，曾计划建造的能量为 $2 \times 20 \text{ TeV}$ 的美国超导超级对撞机 SSC 的周长达 87 km ，预算造价 116 亿美元。又如，尚在研究中的 $2 \times 250 \text{ GeV}$ 线型对撞机，如取常规加速梯度 17 MeV/m ，总长达 30 km 。可见，只有提高加速梯度才能缩小加速器尺寸、降低造价。要实现对粒子的持续加速，必须要获得与粒子运动同步的纵向加速电场。新加速原理就其能量来源可分为两大类。第一类是能量从光子传递给粒子，属于这一类的有各种激光加速器，如逆契伦柯夫效应加速器、逆自由电子激光加速器、等离子体拍波加速器和光栅加速器等。作为一种短波长相干电磁波，激光具有能量密度高、聚焦性能好等优点，电场强度可达 10^5 — 10^9 MV/m ，需要解决的问题仍然是在粒子运动方向上得到高电场并使之与速度低于光速的粒子同步。第二类是能量从粒子传递给粒子，其中又有两种，一种是利用高速运动的等离子体凝团或强流相对论性电子束提供的集体场加速带电粒子，有相干加速器、电子圈加速器和线型束加速器等。理论估算表明，采用这些方法可达到比常规加速器高数十到数百倍的加速梯度，但实验中却遇到难以获得稳定的集体场等方面的困难。另一种是利用谐振腔、等离子体或其他设备为介质，用低能强流束在介质中激起电磁波来加速粒子，属于这一种

的有尾场加速器、等离子体尾场加速器和双束加速器等。尽管不少实验装置验证了这些新原理，但加速梯度远没有达到理论估计的 1GeV/m 量级。总的来说，各种新加速原理尚处于小规模实验阶段，其加速机制尚未研究透彻，在实验上还有许多困难，离开实际应用尚远。但经过不懈的探索和研究，新加速原理将逐步得到应用，开辟粒子加速器的新时代。