第六篇 物质的组成与结构

第Ⅰ卷侧重讲“理”,讲物质的运动 第Ⅱ卷要转换视角,由理转向“物”,把学习的重点放在物质的组成与结构上.实际上它们是同一个问题的两面.

1. 物质具有复杂的层次结构

现代物理学把物质划分为不同层次，各个层次的物质有其特殊的组分、结构与性能.对每一层次的探索与研究，形成了一个物质科学体系（见表1).现代物理学又为这个体系提供了统一的理论基础.

表1 物质层次的划分及其相应学科

研究客体	空间尺度/m	主要学科
?	↑	物理学前沿
目前观测所及宇宙	$10^{26}\sim10^{27}$	宇宙学
超星系团、星系团	$10^{23}\sim10^{24}$	天体物理学
星系(银河系)	$10^{18}\sim10^{22}(10^{21})$	
恒星(太阳)	$10^{4}\sim10^{12}(10^{9})$	空间物理学
地球	10^{7}	地球科学
凝聚态物质	$10^{-3}\sim10^{6}$	凝聚态物理
介观物质	$10^{-8}\sim10^{-6}$	介观物理学
分子	$10^{-10}\sim10^{-8}$	原子物理学、分子物理学、光学、化学
原子	10^{-10}	
原子核	$10^{-15}\sim10^{-14}$	原子核物理学
强子	10^{-15}	粒子物理学
夸克、粒子	$<10^{-16}$	
?	↓	物理学前沿

需要全本请访问 www.ertongbook.com

根据现代物理学可对每一层次的物质进行层内分析与逾层分析.通过层内分析，为某一层次物质的整体属性与功能建立恰当的描述体系；通过逾层分析，把不同层次的物质联系起来，既要研究由较低层次的元素通过相互作用力结合为较高层次系统，又要研究将某一层次的物质还原为低一层次的元素及其相互作用力.我们把它具体化为四个问题：

(1) 某一层次物质的整体属性，通过相图把它们恰当地描述出来.

(2) 确定物质的组分，使之成为以下一个层次物质为元素组成的系统.

(3) 确定物质系统的相互作用势能的具体数学形式，求解微分方程给出系统的定态解.

(4) 由物质系统的组成及其定态，解释实验总结出来并在相图上描述的物质的整体属性，预测物质系统的结构与性能.

2. 物质的演化

现代物理学研究的客体包括整个空间尺度范围内的物体.发现极小尺度的微观粒子的性质可以直接影响到诸如宇宙形成、演化等宏观尺度极大客体的性质.按照物质的空间尺度大小排列的标度序列，形成了一种蛇吞尾的方式，如图 1.它从普朗克标度 10^{-38} km到宇宙边界标度 10^{22} km，把对粒子性质的研究同对宇宙起源的研究联系起来，以描绘宇宙演化史.即宇宙大约在 150～200 亿年以前从“大爆炸”中创生，随着它的膨胀、冷却，逐渐衍生成众多的星系、恒星、行星直至出现生命,并通过人类进行自我认识.现代物理学认为它所描述的物质层次结构是在宇宙演化过程中形成的,这种‘形成’是合乎规律的,并为天文观测与地面实验所证实.根据这一观点，今天我们所观测到的一切，都是宇宙膨胀的某种遗迹.

3. 四种基本相互作用

迄今我们发现了四种基本相互作用，物质世界千变万化的现象归根到底是这些相互作用的结果，见表 2.尽管物理学家孜孜以求的目标是给出能够同时描述四种相互作用的统一理论，但在多数情况下，由于其强度和力程的巨大差异，对实际问题有可能通过不同层次的研究把四种作用逐一理清，而不需要同时全部理解它们.我们在研究一种相互作用时，往往可以忽略其它影响.因此,可以不必为理解原子而去理解原子核，核物理学家也不必等待粒子物理学家的结果.也正是由于这个原因，使我们对物质体系的认识能分层进行.

为通俗起见，四种基本相互作用有时也对应地称为四种基本力.由于引力作用和电磁作用是长程的，相应的力就是早已熟悉的引力和电磁力.20 世纪发现的两种基本力之一是强力(或核力),它是四种力中最强的,依赖于它,原子核、中子、质子才得以形成.但它是一个短程力，当距离超过 1.4 fm 时，强力就消失了.

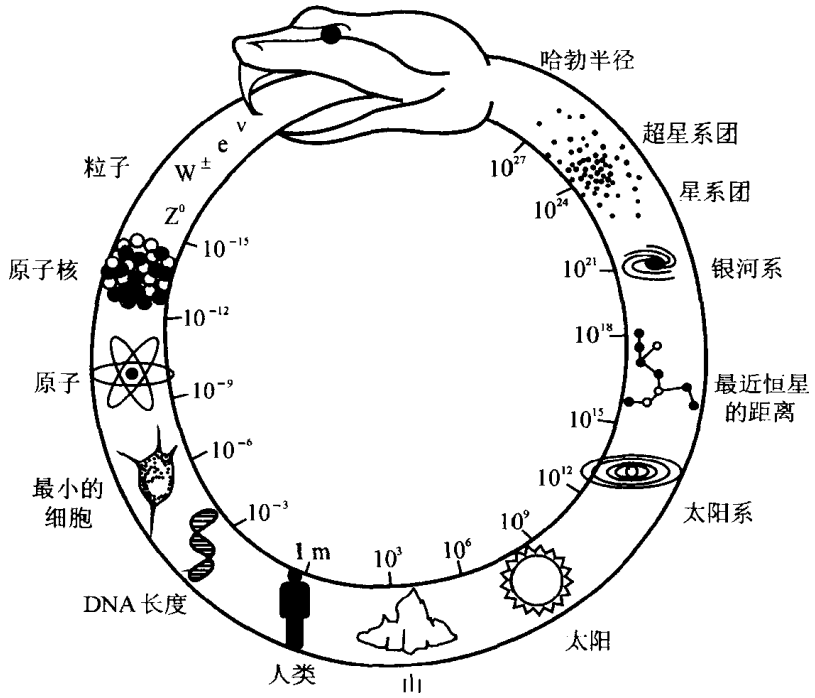


图 1　蛇吞尾图，形象地表示了物质空间尺度的层次和宏观世界与微观世界的联系

表 2　四种基本相互作用

相互作用类型	引力相互作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
作用距离	长程	$< 10^{-14}$ cm	长程	$< 10^{-13}$ cm
相对强度	10^{-38}	10^{-13}	10^{-2}	1
典型衰变时间		10^{-10} s	$10^{-16} \sim 10^{-20}$ s	10^{-23} s
媒介粒子	引力子?	中间玻色子 $W^{\pm}, Z^0$	光子 γ	胶子 $g_1 \sim g_8$
媒介粒子质量	未知	约 90 GeV	0	假定为 0
被作用客体	一切物体	强子,轻子	强子,e,μ,τ,γ	夸克,胶子,重子

正是这个距离决定了原子核的大小.在日常生活中并不能感受到这个力.粒子可以按是否参与强作用进行分类.我们把参与强作用的粒子，统称为强子，不参与强作用的费米子称为轻子.例如中子、质子是强子，而电子是轻子.强子中的费米子称为重子而玻色子称为介子.弱力为另一种基本力，它也是短程力，其作用距离更小.中子与原子核的放射性衰变，以及许多其它粒子的衰变，都是通过弱力发生的.

第十六章　粒子物理

人类一直在寻找基元物质，认为基元物质是永恒不变的、最基本的物质，是万物之本.在古希腊，起初曾把它们叫做元素.到哲学家德谟克利特（Democritus，公元前 470—380)提出“原子说”,认为元素是由不变的、不可分割的“原子”组成的,自然界除了存在原子与虚空以外,别无它物;人们的感觉:色、味、硬度等可观测性质，是通过感官在头脑中幻化出来的，并不存在于自然界中，这种感觉需要用原子的组合和运动加以解释.从此“原子”假设成了自然科学发展的一个指导思想，它包含了物质可分性极限的意思.

人类在探索原始物质的航程中，已经历了 5 个层次:分子、原子、原子核、强子及夸克，并且通过各种实验手段直接或间接地证实了它们的存在.在向微观世界极限挑战的历史中，当人们在某个尺度上达到了一个层次后，以后又会发现这个层次还不是最基本的，即它们并不是不可分或没有结构的.20 世纪中期,人们曾把强子层次的粒子称为基本粒子（一些早期的书中常见到这种称呼）.但现在人们知道,这些“基本粒子”并不“基本”,故而将研究强子层次以下所有各层次的物理学分支称为粒子物理学.

那么存在不存在基元物质呢？如果存在，物质航程的终点在哪里呢？对这个问题的回答，可以有以下多种可能.

1. 物质是无限可分的.

这种观点认为物质的层次是不可穷尽的，不存在真正的基本粒子，所有发现的粒子是更小粒子的复合物.在哲学上也确有这个命题，但实践是检验真理的唯一标准.目前的实验事实还看不到支持这种观点的迹象.

2.“物质可分”有其极限.

存在不能再分割或不再有内部结构的基本粒子，所有物体都是这些基本粒子的复合物.就目前的研究进展来看，这种结论也许还为时过早.

3. 存在一个既是基本的又是复合的物质层次.

在这个层次上，存在一组同类粒子.说粒子是基本的，是指实验从未观测到这组粒子的碎片或这组粒子的内部结构，能观测到的总是整个粒子；说粒子是复合的，指分割它时，并非变为粒子的碎片，而是产生更多的其它同类粒子，从这个

需要全本请访问 www.ertongbook.com

意义上，它是其它同类粒子的复合物.但这组粒子是相互组成的，粒子谱是封闭的，超越这组同类粒子之外不存在任何东西，由此达到了物质航程的终点.实际上,这种回答改变了‘基本’与‘复合’的定义.

4. 对于不同层次，物理规律是不同的，“可分”的概念也应该有不同的涵义，需要深化.

按照经典的定义，可分是指可以把客体的部分在空间隔离到任意远的距离，且部分小于整体.按照目前对夸克及所谓“夸克禁闭”现象的研究，人们对于“可分”的涵义有了新的理解:传统的‘可分’概念是机械的,应该被‘有内部结构’取代.或者说，由夸克组成的粒子不可分但有内部结构.

究竟自然界选择哪一种可能性，最终只有靠实验来回答，当然这种回答也可能是相对的.由此可见，物理学的发展不仅对自然科学，也对哲学等社会科学和人类的世界观产生巨大的影响，这体现了物理学的基础性.

本章将对粒子物理的基本内容和有关物理图象加以简单介绍.

16-1 第一代‘基本’粒子

16-1-1 物理与化学

在讨论物质的组成与结构时，我们不得不提到化学及其与物理学之间的关系变化.在经典物理时期，对物质的运动和组成的研究分属于物理与化学两门学科.它们之间有一种约定俗成：化学迷恋于追究物质的组成，而那时的物理学家还不能解释物质结构的稳定性，也回避物质的组成及其变化.

近代化学萌芽于拉瓦锡(A. L. Lavoisier)的元素学说(1774年)和道尔顿(J. Dalton)的原子学说(1803年)，由此化学进入了持续至今的以原子论为主线的新时期.1860年,康尼查罗(S. Cannizzaro)采纳了阿伏伽德罗(A. Avogadro)假设,理顺了当量与原子量之间的关系，修正了当时的化学反应式与分子式，确立了原子—分子论，奠定了近代化学的理论基础.它指出：不同元素代表不同原子；原子在空间按一定方式和结构合成分子；化学上纯物质的最小单元是分子，由分子聚集成物体.

不同原子由原子性质——原子量与原子价——标记与分类.1866年,门捷列夫(D. I. Mendeleev,1834—1907)对当时已知的63种元素进行了分类.当他按原子量大小顺序排列时，发现了原子价起伏的周期律.他以原子价为横坐标，把具有相同原子价的化学性质相似的元素作为一族排在同一列，以周期数为纵坐标，描写不同行元素化学性质的周期性，制成了元素周期表.它实质上是化学元素的相图,每一个化学元素,都用相图上一点(或一格)描述.门捷列夫在表内大

胆地留下一些空格，并选出了三格，预言了尚未发现的元素及其化学性质．1875年、1879年、1885年分别发现了三种新元素填充了这三个空格，证实了他发现的元素周期律（表 16－1）.但对周期律的解释，超出了当时人类知识的界限．

到本世纪，随着对原子内部结构的了解，特别是量子力学的诞生，使人们不仅能够解释元素周期律，而且可以对化合物的发现、合成进行定量计算甚至设计，形成了以量子化学为主体的现代化学，并为资源开发提供了科学依据．

表 16－1　元素周期表(仅含自然存在的 103 种元素)

周期																		
第一周期	1 H																	2 He
第二周期	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
第三周期	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
第四周期	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
第五周期	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 To	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
第六周期	55 Cs	56 Ba	57—71 *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bl	84 Po	85 At	86 Rn
第七周期	87 Fr	88 Ra	89—103 * *															
镧系元素	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
锕系元素	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

元素周期律把地球表面存在的几十亿种分子约简为 103 种原子，所有分子都由它们组成．今天，物理学家还在实验室里人工合成新的元素，迄今已经得到第 111 号元素．图 16－1 是各种元素的电离能，即从中性原子中拿掉一个电子所需要的能量．从图中可见，具有高电离能的元素正是各种惰性元素，说明它们具有高度稳定性．相应的原子序数 $Z=2,10,18,36,54,86$ 曾使人感到迷惑不解，因此被称为幻数．只是随着量子力学的发展和原子壳层结构的发现，它们才得到圆满解释．

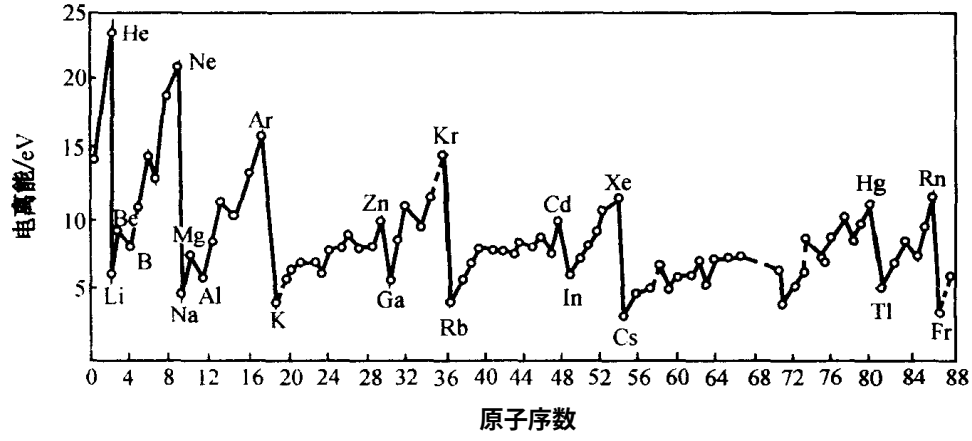


图 16－1　元素的电离能

16－1－2　原子的核模型

1897 年，汤姆逊(J. J. Thomson, 1850 —1940) 对放电管中阴极射线的研究发现了电子，它是一切物质普遍的组成成分之一.

1908 年，卢瑟福对 α粒子轰击金箔发生散射实验的研究，证实了原子的核模型：原子由带正电的原子核和带负电的电子组成；原子的大部分质量集中在空间范围约 3 fm 的原子核内，电子绕核运动的半径约为 10^5 fm，原子靠电力把电子与原子核束缚在一起. 从此，人类认识深入到原子内部及原子核中.

1930 年，居里夫妇用高速 α 粒子(氦核)轰击铍(Be)核，发现了一种穿透本领极大的中性射线，并把它解释为 γ 射线，即高能光子. 卢瑟福本人并不相信这种解释，他的学生查德威克(S. J. Chadwich 1891—1974)根据 α 粒子引起的核反应产物的动量能量关系，确认了中子(n)的存在. 他认为：中性射线与各种物质相互作用后，无例外地产生核反冲现象. 用它轰击石蜡，测出反冲质子的能量为 5.7×10^6 eV 轰击氦时，反冲氦核的能量为 1.2×10^6 eV. 若假设中性射线是光子，用康普顿效应计算，光子能量分别为 55×10^6 eV 与 90×10^6 eV. 计算结果不同表明，只有两种可能：或者中性射线是光子的假设不对，或者康普顿效应计算公式失效. 但后者会导致能量动量守恒定律失效的严重危机. 查德威克作了中性射线是中子以及中子与质子质量几乎相等的假设后，发现与实验结果相符，并推算出中子质量为 $m_n = 1.006\,7\ m_p$. 他以确凿的事实证明了中子的存在，荣获了 1935 年诺贝尔物理奖. 海森堡在此基础上提出了由质子和中子组成的核模型，把质子和中子统称为“核子”.

海森堡的质子－中子核模型，又把自然界中发现的几千种核素简化为两种核子组成的系统. 人们把组成原子的三种粒子 质子、中子、电子，称为第一代“基

本 ’粒子.

原子与原子核的新模型，修正了门捷列夫元素周期表.卢瑟福认为,元素的原子序数，应按核电荷数 Z 排列，而不能按原子量排列.如氩(Ar）原子量为 39.944,核电荷为 18,而钾(K)原子量为 39.096,核电荷为 19,按原子量排列,钾应排在氩前面，这就破坏了化学元素的周期性.

16-1-3 核素图

同元素一样，引入核素，表示具有相同核组成 Z、N、A 的核,其中质子数 Z

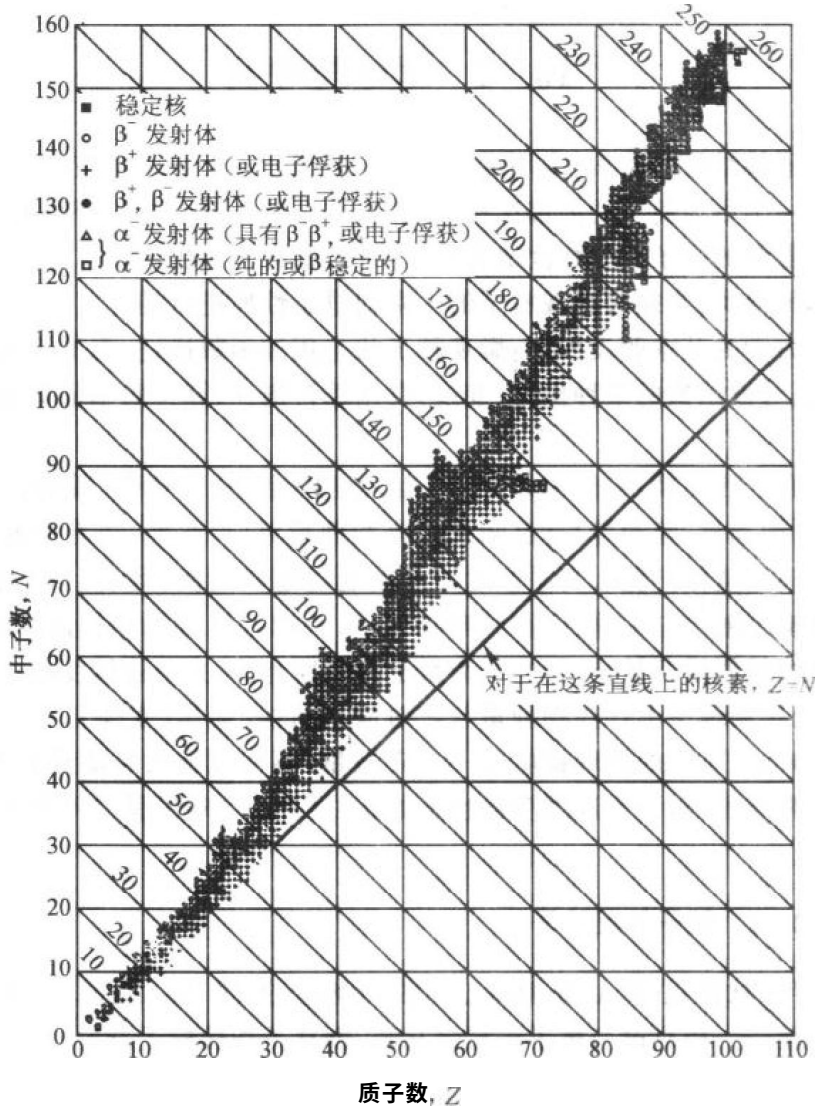


图 16-2 稳定核素及放射性核素.与 Z 轴成 45°角的直线是 $Z=N$ 的直线,与 Z 轴成 135°角的直线是质量数 A 相同的直线

又称为原子序数，N 为中子数，A 为质量数. 把自然界中观测到的核素在以 Z 为横轴，N 为纵轴的二维相图上用一点表示出来，如图 16－2所示. 图上核素分布成一个带. 在带中稳定的核素（都比^{208}Pb 轻）有 208 个，天然放射性和人工放射性核素已超过 2 000 个. 带中两侧的核素通过 β 衰变过程到带的中心，成为稳定线上的核素，它们由轻到重分布在 $N = Z$ 直线的上方.

实验上发现 Z 相同但 N 不同的核素有相同的原子序数，在元素周期表中处在同一格中，属于同一种元素，称为同位素. 如碳有三种天然同位素：$^{12}_{6}C$. $^{13}_{6}C$, $^{14}_{6}C$,其中 $^{12}_{6}C$ 占 98.89%，另外还有四种人工同位素.

16－2　对称与守恒

对原子核结构的探索，常用加速器中的高能质子轰击原子核、质子、中子，希望揭示出一个更为简单的内部结构. 但实验并未使亚原子世界变得更简单些，反而产生了更多的强子. 到 20 世纪五六十年代，就有了 300 多种强子. 为了对强子作进一步的分类，必须对微观粒子的一系列量子性质进行描述.

量子力学的基本假设如下：微观粒子的态用波函数描述，态的演化用薛定谔方程描述，对波函数的某种操作（变换）要用算符描述，算符的本征值是可观测的粒子性质.

变换有连续变换，它们由无穷小的运动建立起来（如平移、旋转），这种变换的本征值(如动量、角动量)有已知的经典物理量对应. 此外，还有不连续（分立）变换，如左右(镜像)变换，右手永远不可能通过连续变换(运动)与左手重合，但可以通过镜反射与左手重合. 在经典物理中，一切自然过程都是连续的，不连续变换为连续性假设所禁止. 但它却为量子力学所允许. 由不连续变换产生的可观测量，在经典物理中不存在物理量与之对应. 当这种操作(变换)，对方程是一种对称操作时，它对应的物理量就是一个守恒量，不管波函数的演化如何复杂，该物理量始终守恒. 对于不连续变换也是如此，只是这个守恒量并不存在它的经典对应而已.

16－2－1　粒子与反粒子

1928 年，狄拉克(P. A. M. Dirac, 1902—1984)(见图 16－3)把 20 世纪两个最重要的原理——相对论与量子论结合起来，创立了现代粒子理论.

1. 负能态

薛定谔方程，由于应用了经典关系：

$$E_k = E - E_p = \frac{p^2}{2m} \geqslant 0 \qquad (16-2-1)$$

要求自由粒子恒有正能态解，而相对论中自由粒子能量有关系：$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$，即

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4}$$

说明存在正能态与负能态两种解．负能态的存在，导致自由电子有 $2m_0c^2$ 的能隙．

经典物理假设电子能量是连续变化的，具有正能态的电子，$E \geqslant m_0c^2$，无法通过连续变化过渡到负能态，负能态的存在不影响电子的运动，我们可以把电子的负能态解从理论中剔除．但量子力学原则上允许电子的量子跃迁，因而不能把负能态与正能态隔离开．负能态的存在会影响电子的运动，它将自发地向负能态跃迁，导致整个自然界失去稳定性．

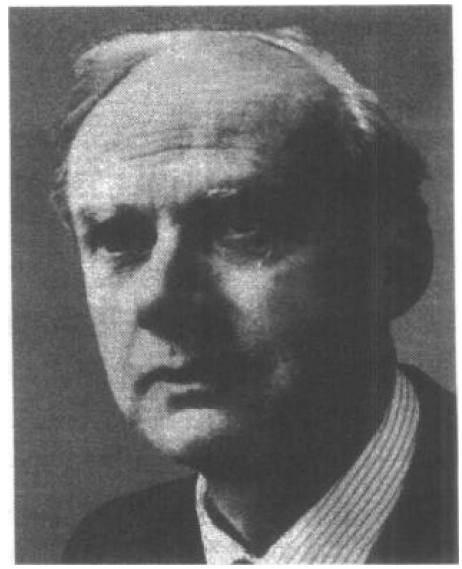
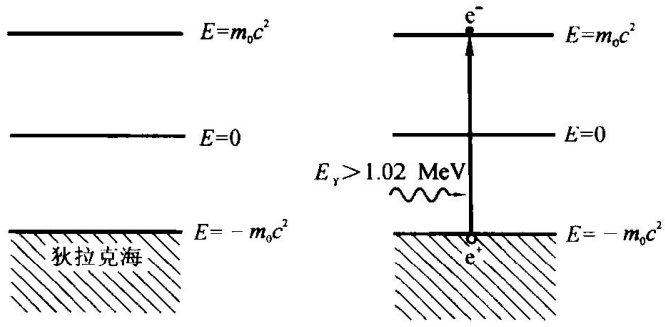


图 16－3　狄拉克

2．真空态

为解释自然界的稳定性，1930 年狄拉克提出了新的真空概念．他认为真空并非是一无所有，而是一个系统．按泡利不相容原理，该系统所有负能态都为电子填满，形成“狄拉克海”，从而阻止正能态的电子向负能态的跃迁，而所有正能态空着．真空是一个具有无限大负电荷、负质量的复杂系统．

要观测真空中的电子，外界要对电子提供大于 $2m_0c^2$ 的能量，才能使电子从负能态跃迁到正能态．通常仪器不能提供这样大的能量，因此无法观测到真空“狄拉克海”中的电子(见图 16－4)．



(a) “真空”　　(b) 正负电子对的产生

图 16－4

3．反粒子

当外界对电子提供了能量 $E > 2m_0c^2 = 2 \times 0.511$ MeV，电子从负能态(E_

需要全本请访问 www.ertongbook.com

跃迁到正能态(E_+)，此时真空态被激发了，系统的激发态对真空态的能量偏离值为

$$\Delta E = E_+ - (-E_-) = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4} + \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4} \quad (16-2-2)$$

前一项是带负电的具有正能量的电子，后一项是“狄拉克海”中出现的一个空穴，它的行为完全同一个带正电的具有正能量的“正电子”一样.狄拉克引入了‘反物质”概念，并预言了第一个反粒子——正电子的存在.1923 年 8 月 2 日，安德逊(C.D.Andeson,1905—)在利用威尔逊云雾室拍摄到的宇宙射线径迹照片中发现了这种粒子,其质量、自旋、电量与电子相同,但电性相反.为此，他与发现宇宙线的赫斯共同获得了 1936年诺贝尔物理学奖.狄拉克认为，人们不能直接观测到真空态，只能观测到对真空态的偏离.他用反物质的概念，描述了这种偏离.真空态是基态，此时系统中既观测不到粒子，也观测不到反粒子.当在一个很小空间体积中注入足够大的能量时，如 γ射线(光子)能量,就可使真空态激发,在过去习惯称为‘真空’的地方;‘无中生有’地观测到电子对,反之电子对又可以发生湮没而发射光子（即电子向负能态跃迁而发光），即 $2\gamma \leftrightarrow e^- + e^+$. 粒子与反粒子对的产生与湮没，是相对论量子理论的自然结果.布莱克特(P.M.S.Blackeft)和奥恰利尼(G.P.S.Occhialini）用实验证实了这个预言.他们用 γ射线照射厚 0.05 mm 的铝箔，当光子能量 $h\nu > 2m_0c^2 = 1$ MeV 时，存在“反常吸收”（又称真空吸收），同时在铝箔外观测到电子对，其中正电子能量为 0.52 MeV.1981 年利用重离子加速器中的高能离子发生对撞，人工制造了原子序数 $Z > 271$ 的重核.重核的基态能量 $E_1 = -13.6Z^2(\text{eV})$,当 $Z > 271$ 时,$E_1 < -2m_0c^2 = -1$ MeV,局部制造了一个负能束缚态，这时真空中的负能态电子将跃迁到此态.实验在重核所在处观测到了一个 1 s态的电子，以及一个正电子，证实了狄拉克对真空的解释：$Z_1 + Z_2 \rightarrow Z \rightarrow Z^- + e^+$.狄拉克相对论量子理论的普遍结果就是存在反物质，每一个粒子都应存在相应的反粒子，粒子可以被创造，也可以被毁灭.粒子并非只是以自身形式存在的简单东西，而是一个复杂的动力学系统.一个质子，也可能是一个质子加一对电子与反电子.这种物理图像，对物质的可分性问题给出了同德谟克利特原子论截然不同的回答.

4. 虚粒子

一方面，能量守恒定律断言，粒子是不能“无中生有”的，要在真空中产生粒子对需要向真空提供 $E > 2m_0c^2$ 的能量.另一方面，量子力学不确定关系断言：$\Delta E \Delta t \geqslant \hbar/2$，能量测量的不确定度与时间测量不确定度成反比，不确定关系允许在很短时间内，能量测量值具有足够大的不确定性，以致使粒子完全随机地处在产生与湮没之中，使真空处在量子涨落状态.我们把这种在真空中随机产生而又很快消失的粒子对，称为虚粒子.由于它们是在观测范围内存在的东西，并不违

反能量守恒定律，当我们对真空作长时间观测时，如能量守恒定律所预言的那样，其能量统计平均值为零.正像当我们从高处观测大海时，看到的是它的平均值，那是一个平静的海面.当我们向真空注入所需能量时，虚粒子就会转化为真实粒子.对撞机就是一种向真空注入能量的技术，它使高能粒子对对撞，在湮没过程中向真空注入能量束以创造新物质.这种关于“真空”“虚无”的新概念“虚无中包含了所有的存在”、“一切已存在的或可能存在的都潜伏在真空之中”，是相对论量子理论的重要的思想成果.

16-2-2 盖尔曼-西岛关系

粒子是按其性质分类的，随着对粒子性质了解的不断加深，分类的方法也在不断变化.例如，化学把化学反应中保持不变的客体称为原子，按原子量与原子价的不同，分为不同类的原子，在元素周期表上标记.以后，不同类的原子又被视为第一代“基本”粒子(电子、质子和中子)系统的多重态.

把不同粒子归结为态的不同，使粒子分类简化了，而态的描述变复杂了.

1. 自旋

自旋是对单个粒子进行分类的第一个原则.由于统计性质不同，凡自旋为半整数($n+1/2, n=0,1,2,\cdots$)的粒子称为费米子，服从泡利不相容原理.由于我们周围的实物都由费米子组成，因此常称其为实物粒子.凡自旋为整数($n, n=0,1,2,\cdots$)的粒子称为玻色子，不服从泡利不相容原理，它们传递场的相互作用，也称为场粒子.

2. 重子数与轻子数

对强子再用自旋分类，费米子称为重子而玻色子称为介子.对粒子衰变和反应过程的实验分析，发现单个重子和单个轻子在过程中既不能产生，也不能湮没,但粒子-反粒子对是可以产生与湮没的.根据这个观测结果，引进两个新的物理量：重子数和轻子数，用以表示两个重要的守恒定律.

重子数用 B 表示，$B=0,\pm1$.重子 $B=1$,反重子 $B=-1$,其它粒子 $B=0$.轻子数用 L 表示，$L=0,\pm1$.轻子 $L=1$,反轻子 $L=-1$,其它粒子 $L=0$.实验证明：在所有的相互作用中，重子数与轻子数都守恒.

3. 同位旋

1933 年，海森伯建立原子核模型时就认为强力与电荷无关.核子即中子与质子不是两种粒子，而是同一种核子的两重态(p,n);$\pi^{\pm},\pi^{0}$介子不是三种粒子，而是同一种介子的三重态(π^{+},π^{0},π^{-}).正如自旋 $m_s=\pm1/2$ 的两个电子，不对其作磁观测时，它们有相同的行为；作磁观测时，有不同的能量和角动量.但此时我们并不认为它们是两种粒子，而是电子的两重态，用二维自旋空间中的态矢描写.由此类比，海森伯为核子引入了同位旋的概念，核子态的态矢用二维“同位旋

空间'中的态矢描写.同位旋描写为这个抽象空间的一种旋转操作，其算符的本征值即同位旋量子数用符号 I 表示.同位旋在 z 轴分量的量子数用符号 I_z 表示.对于重子，$I=0,1$，对应核子的二重态(n,p).对于介子，$I_z=0,\pm1$,对应介子的三重态(π^0,π^+,π^-).不对强子作电测量，多重态是简并的，它们有相同的质量；作电测量，简并消除，它们有不同的质量.$m_nc^2=939.55$ MeV，$m_pc^2=938.26$ MeV,中子与质子的能量差 1.29 MeV，来源于双重态在电场中产生的能级分裂.实验证明，在强作用中，同位旋是一个对称操作，I、I_z 都是守恒量；在电磁作用中,I 不守恒,但 I_z 守恒；在弱作用中,I、I_z 都不守恒.

4. 奇异数

实验发现，有些强子有下面的奇异性质：

(1) 有一些过程，虽然需要的阈能很低，但实验始终观测不到，如 $n+n\rightarrow\Lambda^0+\Lambda^0$ 或($\Lambda^0+K^0,\Sigma^0+\Sigma^0$).

(2)对于象 $\pi^-+p\rightarrow\Lambda^0+K^0$ 这些强作用过程，高能粒子 π^-、p 在碰撞中产生的奇异粒子 Λ^0、K^0 都是成对出现的，有“协同现象”.而它的逆过程并不存在，即奇异粒子 Λ^0、K^0，不能通过强作用而只能通过弱作用衰变产生强子：$\Lambda^0\rightarrow\pi^-+p$.

为了解释这种奇异性，盖尔曼和西岛（K. Nishijima）引入一个新的量子数——奇异数 S.对奇异粒子,$S=\pm1$.例如 K^0粒子 $S=1$,Λ^0 粒子 $S=-1$.对强子中的非奇异粒子，如核子和 π 介子，$S=0$.不参与强作用的粒子，不规定它们的奇异性.

实验证明，在强作用与电磁作用中，奇异数是一个守恒量.在弱作用中，衰变前后奇异数不守恒，但奇异数变化 $|\Delta S|=1$,这是奇异粒子衰变的‘选择定则’.

5. 盖尔曼－西岛关系

到 1961 年前后，已经发现的强子数越来越多（表 16－2).显然它们不可能都是基本的.

表 16－2 强子性质

强子	J^P	B	S	Y	$I_z(I)$	Q	$m/(\mathrm{MeV}/c^2)$
π^+	0^-	0	0	0	+1(1)	1	139.56
π^0	0^-	0	0	0	0(1)	0	134.97
π^-	0^-	0	0	0	−1(1)	−1	139.56
K^+	0^-	0	1	1	$+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	1	498.65
K^0	0^-	0	1	1	$-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	0	497.67

续表

强子	J^P	B	S	Y	$I_z(I)$	Q	$m/(\mathrm{MeV}/c^2)$
$\bar{K}^0$	0^-	0	-1	-1	$+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	0	497.67
K^-	0^-	0	-1	-1	$-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	-1	498.65
η	0^-	0	0	0	0(0)	0	547.45
p	$\frac{1}{2}^+$	1	0	1	$+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	1	938.27
n	$\frac{1}{2}^+$	1	0	1	$-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	0	939.59
Σ^+	$\frac{1}{2}^+$	1	-1	0	+1(1)	1	1 189.87
Σ^0	$\frac{1}{2}^+$	1	-1	0	0(1)	0	1 192.55
Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	1	-1	0	-1(1)	-1	1 197.43
Ξ^0	$\frac{1}{2}^+$	1	-2	-1	$+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	0	1 314.9
Ξ^-	$\frac{1}{2}^+$	1	-2	-1	$-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	-1	1 321.32
Λ	$\frac{1}{2}^+$	1	-1	0	0(0)	0	1 115.63

在总结前人工作的基础上，盖尔曼发现，电荷 Q，重子数 B，奇异数 S 和同位旋分量 I_z 之间不是相互独立的．如果引入超荷量子数 $Y = B + S$，它们之间可以通过一个经验规律联系起来，称为盖尔曼－西岛关系：

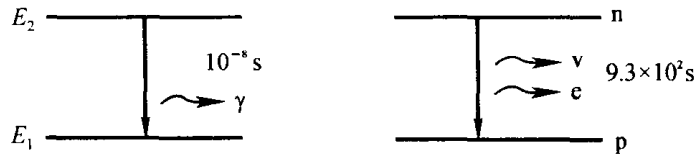
$$Q = I_z + \frac{B+S}{2} = I_z + \frac{Y}{2} \tag{16-2-3}$$

例如：

$$\text{核子：} B = 1, S = 0, Q = I_z + \frac{1}{2} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \text{电量 } q = eQ = \begin{cases} e & (\mathrm{p}) \\ 0 & (\mathrm{n}) \end{cases}$$

$$\text{介子：} B = 0, S = 0, Q = I_z = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad \text{电量 } q = eQ = \begin{cases} e & (\pi^+) \\ 0 & (\pi^0) \\ -e & (\pi^-) \end{cases}$$

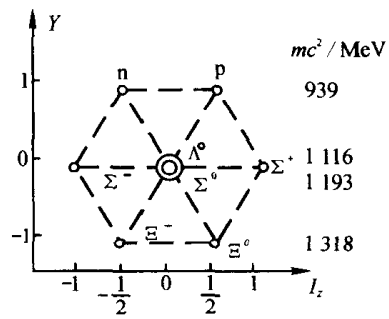
由此，以 I_z 和 Y 为坐标轴构造二维相空间，可以把强子的同位旋多重态按照自旋、宇称、质量重新分类，填充到 $I_z - Y$ 图上．与化学元素在周期表上的分类相似，需要把已知的强子填充到合适的位置中．我们知道，对氢原子的量子态，可以用一组量子数(n, j, m_j, m_s)标记它．氢原子的“衰变”，表现为原子跃迁辐射光子的过程，如 $2\mathrm{p} \rightarrow 1\mathrm{s} + \gamma$．与此类似，可把各种强子看成一个或几个基本系统的各个量子态，它们用量子数(I_z, Y)标记，并把强子的质量谱看成上述基本系统的能级谱．把粒子的衰变看成基本系统量子态之间的跃迁，如图 16－5 所示．



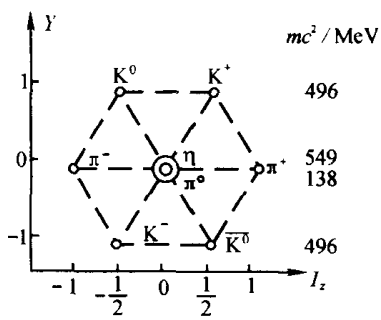
(a) 原子态‘衰变’,“衰变”时间约 10^{-8}s　(b) β衰变,衰变时间约 10^{3}s

图 16-5　衰变

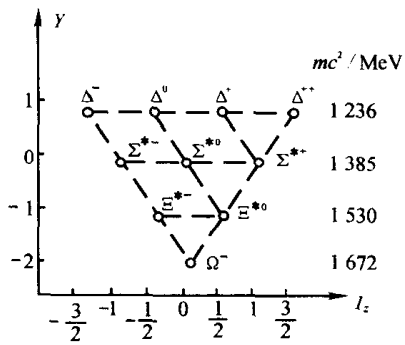
根据这种多重态思想和对称性原理，利用群论这一数学工具，1961 年盖尔曼和奈曼(Y. Neéman)分别提出了名为‘八重法’的分类方案.它不仅使已知强子在相图上的分类呈现明显的规律性（如图 16-6所示),同时提出对于新强子(如 Ω^-)的预言,并为实验所证实.八重法虽然给出了强子对称性和粒子分类之间的



(a)



(b)



(c)

图 16-6　(a) $S=1/2, B=1$,偶宇称，质量最小的八个重子构成八重态；
(b) $S=0, B=0$,奇宇称,质量最小的八个介子构成八重态；
(c) $S=3/2, B=1$,偶宇称,重子十重态

关系，但并没有说明其物理根源.尽管如此，八重法的成功为探索强子的内部结构提供了重要线索.

16-2-3 *CPT*变换

1. 不连续变换

电荷共轭变换 C，把正反粒子互换，它并不仅仅把正负电荷互换.由于正反粒子具有相同的质量、自旋和寿命，但电荷、重子数等相加性量子数具有相反的符号,因此 C 变换是改变电荷及所有相加性量子数符号的变换，用算符 $\hat{C}$ 描述.对波函数的二次 C 变换为原来的波函数，有

$$\hat{C}\Psi = \Psi', \hat{C}^2\Psi = \hat{C}\Psi' = \Psi \tag{16-2-4}$$

若 $\hat{C}$ 的本征函数为 Ψ_C,其本征值 η_C 称为 C 宇称,有

$$\hat{C}\Psi_C = \eta_C\Psi_C, \hat{C}^*\Psi_C = \eta_C^*\Psi_C$$

则

$$\eta_C^2 = 1, \eta_C = \pm 1 \tag{16-2-5}$$

空间反演变换 P,把 $\boldsymbol{r}$ 变成 $-\boldsymbol{r}$.同样可引入算符 $\hat{P}$,如果我们取 $\boldsymbol{r}$ 的方向为 x 轴，空间反演变换就等价于我们熟悉的镜像反演：$x \to -x$,于是有

$$\hat{P}\Psi(x) = \Psi(-x), \hat{P}^2\Psi(x) = \hat{P}\Psi(-x) = \Psi(x) \tag{16-2-6}$$

若 $\hat{P}$ 本征函数为 Ψ_P,其本征值 η_P 称为 P 宇称,有

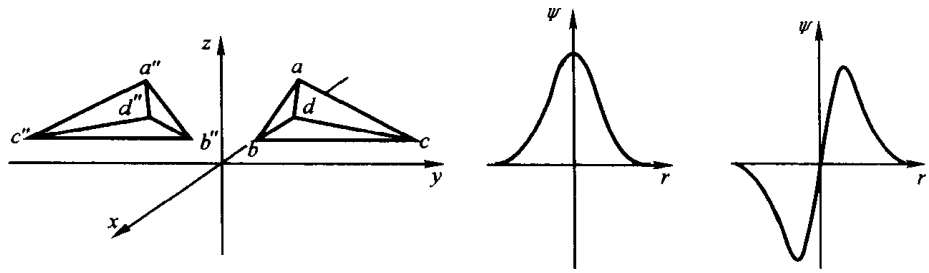
$$P\Psi_P = \eta_P\Psi_P, \hat{P}^2\Psi_P = \eta_P^2\Psi_P$$

则 $\eta_P^2 = 1, \eta_P = \pm 1$. P 宇称量子数只有两个，对应的本征函数如下：

$$\eta_P = 1, \Psi_P(x) = \Psi_P(-x) \quad \text{（为偶宇称态，是偶函数）} \tag{16-2-7a}$$

$$\eta_P = -1, \Psi_P(x) = -\Psi_P(-x) \quad \text{（为奇宇称态,是奇函数）} \tag{16-2-7b}$$

这反映了两种不同的空间反射对称性，见图 16-7(a)、(b).每一个粒子都有确定的宇称，称为粒子的内禀宇称，与粒子的时空运动无关.



(a) 镜像反射　　(b) 偶宇称和奇宇称的波函数图形

图 16-7　宇称变换 P

需要全本请访问 www.ertongbook.com