

从原子核到分子

——微观世界的层次与粒子结构

陆 埏 罗 辽 复

(一) 原子结构与原子核的发现

十九世纪的“原子”还只是化学上的一个不成熟的概念,当作物质构造的一种不可分的基元。在电子被发现以后,人们开始意识到,原子应当有结构,而这种结构一定与电子有关。但是,电子是带负电的,如果原子内有电子,一定同时也有正电荷。原子内的正电荷究竟取怎样的形态呢?二十世纪初最为流行的一种原子模型,即汤姆逊模型,认为正电荷均匀分布于一个球内,电子一一嵌埋在球内各平衡位置上。

原子真的是这样的吗?“你要知道原子的组织同性质,你就得实行物理学和化学的实验,变革原子的情况”。1911年英国科学家卢瑟福等人就用 α 粒子轰击金属箔制的靶子,观察从各个方向散射出来的 α 粒子

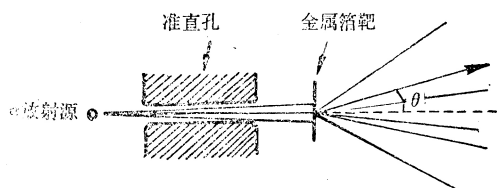


图 1



图 2

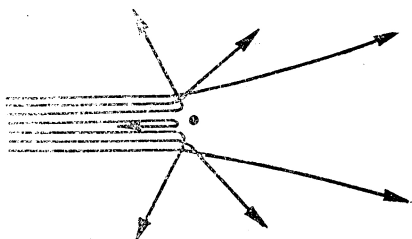


图 3

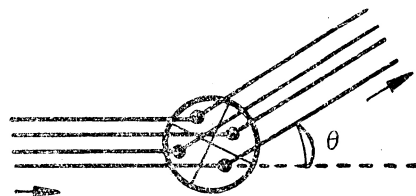


图 4

数(图1)。出乎意料之外,竟有并不不少的 α 粒子在偏离原方向相当大的角度 θ (甚至还有有的从相反方向)散射出来。由于 α 粒子比电子重七千多倍,它与电子碰撞不可能产生大角度的偏转; α 粒子通过正电荷均匀分布的汤姆逊原子时,起作用的有效电荷很小,也不可能产生大角度的偏转(图2)。从这个实验可以得出的唯一结论是:原子内的正电荷应当集中在一起,构成一个核心——原子核。 α 粒子射向这种几乎是点电荷的原子核,就会发生大角度散射(图3)。

电荷究竟是点状,还是分布在某一有限体积内?这个在研究原子结构时提出的问题,具有相当普遍的意义,在更深层次的探索中仍时时出现。严格地说,应当用量子力学来处理问题,把 α 粒子散射看作一种波(称物质波)在电荷上的散射(图4)。显然,从球体内不同部位散射出来的波有不同的位相,它们会相互干涉而减弱。散射角 θ 愈大,位相差就愈大,相互干涉减弱就愈甚。球体愈小,位相差就愈小。如果电荷集中于一点,那么全部散射波位相全同,不但不减弱,而且还加强。所以,只有在球体很小,小于波长的时候,大角度散射(大角度偏转)的几率才能大起来,换句话说,并不不少的 α 粒子的大角度散射表明了原子内存在原子核的观点是正确的。

由于原子的质量比电子大得多,它的极大部分质量集中在原子核,因此,原子可以看作由很重的、带正电的原子核与遥远地(相对于原子核半径来说)绕核运行的很轻的若干电子所构成。原子的半径,也就是外层电子与原子核之间的距离,约为 10^{-8} 厘米量级,而原子核的半径却只有 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米量级。如果把氢原子核比作太阳(太阳半径 $\approx 7 \times 10^5$ 公里),那么电子

还在比地球（地球与太阳距离 $\approx 1.5 \times 10^8$ 公里）更远处数百倍的地方！可见，原子内是十分空旷的。在一块固体中，各个原子几乎一个挨一个地排列着，原子与原子之间已无甚空隙，但每个原子内部却空旷得惊人。

（二）原子核结构与中子的发现

刚才讲了原子可分，原子核是否也可分呢？如果可分，它的结构又是怎样的呢？

学过一点化学的人都知道，决定元素的性质和元素在周期表中位置的原子序数 Z 就是原子内的电子数。但是，原子整体是电中性的，原子里有 Z 个电子，每个电子的电荷为 $-e$ ，所以原子核的电荷必定是 Ze 。由于电子电荷总是一份一份的，自然容易想到，原子核很可能也是由另一种带正电荷 ($+e$) 的粒子构成的。最轻的原子核（氢原子核）就带有电荷 ($+e$)。早在 1919 年，就有人用 α 粒子轰击氮原子核，结果发现氮原子核变成了氧原子核，同时放出一个氢原子核。由此可见，氢原子核确实就是各种原子核内作为电荷单元的粒子，被称为质子（用符号 p 表示）。质子质量约为电子质量的一千八百多倍。那么，原子核就只是由质子构成的吗？奇怪的是，各种原子核的质量并不等于、甚至也不近似等于 Z 个质子的质量。前者往往为后者的两倍甚或更多。这表明，原子核内除了质子以外还有别的东西。

要想弄清楚原子核内究竟还有什么东西，人们要用高速粒子当作炮弹去轰击它，变革它，看看变革中会发生什么现象。三十年代初，当用 α 粒子去轰击铍靶时，出现了一种新射线。这种射线的穿透能力十分强。当它穿入轻物质（如含氢、锂、硼、碳等物质）时，会使那些轻核获得很大动能。详细地分析这些现象后，发现所谓新射线实质上是从铍原子核内打出来的一种质量与质子质量相近的中性粒子，被称为中子（用符号 n 表示）。原子核就是由质子和中子构成的，这两种粒子统称为核子（用符号 N 表示）。

一个原子核往往由许多质子和中子构成。一个通常的氧原子核由 8 个中子和 8 个质子构成；一个通常的铅原子核由 126 个中子和 82 个质子构成。但是，中子不带电，质子带正电，而同性电之间是相斥的。什么力量使这么多的中子和质子牢牢地结合成原子核呢？这不是电磁力，而是一种新力，叫核力。核力是一种很复杂的相当强的作用力。

电子只有电磁作用（以及更弱千亿倍的弱作用），没有强作用。电磁作用是人们了解得最为清楚的一种力，描述这种力的理论——量子电动力学，在至今所做过各种实验（小至微观世界，大至天体现象）中还没有发现过明显矛盾，表明它在横跨大约 25 个量级的尺度范围（ 10^{-14} — 10^{11} 厘米）内均成立。因此，用电子来研究原子核内的电荷分布是十分有利的。那么用多大的能量的电子去轰击原子核才能反映出原子核内的

电荷分布状况呢？根据微观粒子所遵循的量子力学规律，电子能量愈高，其物质波波波长愈短（如表所示）。表

能量 (MeV)	1	10	100	1000
波长(厘米)	1.5×10^{-10}	1.2×10^{-11}	1.2×10^{-12}	1.2×10^{-13}

中 MeV 表示兆电子伏。如果被测客体直径比所用波长短得多，这个客体就如同点粒子一样，其内部结构不可能被探测出来。只有所用波长近于或短于被测客体直径，才能觉察出被测客体的内部结构。因此，为了研究原子核内的电荷分布，需要用上百 MeV 或更高能量的电子。实验上测量各种原子核内部电荷分布的结果绘于图 5 中。从图中可以看出，除十分轻的极少数原子核以外，其余原子核的电荷分布均有一个平坦区和一个比较陡然下降的边缘区。由边缘区可以定出一个平均半径 R ，不同原子核的半径可以表示为

$$R \approx 1.2 \times 10^{-13} A^{1/3} \text{ 厘米}$$

A 为核子数。换句话说，原子核的体积正比于其内的核子数。这个性质表明它有点像液滴，内含的“分子”（此处为核子）多，液滴就按比例增大。

这些结果并不表示原子核内的电荷真的是连续分布着的。从弹性散射（散射过程中不产生新粒子，原子核的内部状态不变）测得的电荷分布，只代表各个质子在原子核内的一种几率分布，并不否定原子核内存在着颗粒状的质子和中子。

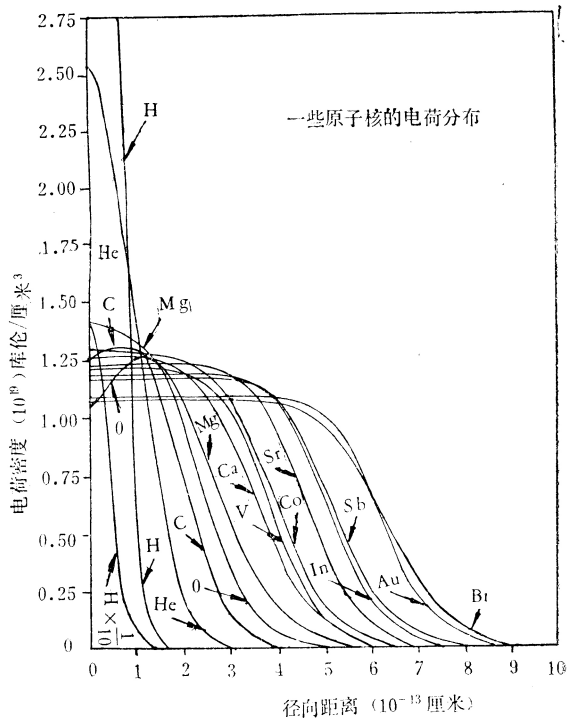


图 5

原子核与原子十分不同,前者由强作用制约,后者由电磁作用制约。它们构成微观世界的两个明显不同的层次。但原子核由核子构成,颇有点像分子由原子构成。原子核内核子与核子之间的核力与分子内原子与原子之间的化学力(实际就是带电粒子间的电磁力)十分相象,它们在较大距离上都表现为吸引,而在较短距离上都表现为强烈的排斥。原子核的运动形态与分子的运动形态也颇为类似,它们都具有转动和振动这类集体运动形态。因此,将原子核与分子看作微观世界的两个有别于核子与原子的付层次也许更合适些。人们对分子,原子,原子核已有较清楚的了解,自应继续努力,再向核子层次的结构挺进!

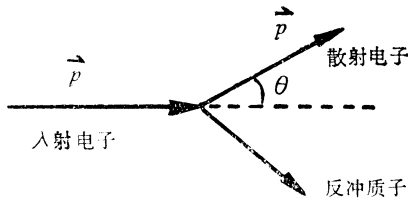


图 6

(三) 核子是点粒子吗

核子是点状的吗? 质子是点电荷吗? 为了探明这些,就得用更高能量(一千 MeV 以上)的电子去轰击它。实验的原理其实仍与卢瑟福的 α 粒子散射实验相似,只是改用了很高能量的电子。图 7 中的横轴代表 q^2 (动量转移平方)。 q^2 由电子散射后的偏转程度来决定,偏转越厉害, q^2 也越大,如果不偏转, q^2 就等于零。图 7 中的纵轴代表形状因子。形状因子有两种,一种叫电形状因子 G_E (它反映电荷分布),一种叫磁形状因子 G_m (它反映磁矩分布),都由粒子体内不同部位散射出来的波相互干涉减弱的程度来决定。如果质子是一个点电荷。散射值不会有干涉减弱,它的电形状因子 G_E 就应该是 1; 质子如果有一定大小,就必定有干涉减弱,电形状因子 G_E 就小于 1。图 7 的实验结果表明,偏转角越大(q^2 越大),相互干涉减弱也越厉害,电形状因子 G_E 越小。这样的实验曲线证实了质子的电荷的确不是点电荷,而是有一定大小的。[在没有偏转时($q^2 = 0$), $G_E = 1$,这是因为没有偏转时没有干涉减弱,并不说明质子是点电荷。]磁形状因子 G_m 也相仿,如果质子是点磁矩,没有干涉减弱,它的磁形状因子 G_m 就应该是 2.79 (质子磁矩是 2.79 个核磁子,一个核磁子 $= 3.15 \times 10^{-18} \text{MeV/高斯}$)。反之,如果质子的磁矩分布于一定大小的空间,就必定有干涉减弱。图 7 表明 G_m 在实验上确是也出现干涉减弱,而且 q^2 越大, G_m 减弱越厉害 [没有偏转时 ($q^2 = 0$), 没有干涉减弱,

$G_m = 2.79$]。中子电中性,但有磁矩,所以有磁形状因子 G_m 。中子的磁矩是 -1.91 个核磁子,负号表示磁矩方向与中子自旋方向相反。图上看到,中子的磁形状因子 G_m 也是随 q^2 的加大(偏转程度加大)而减小的,说明中子的磁矩也是分布在一定体积内。定量地说,质子和中子的半径约为 0.8×10^{-13} 厘米。与原子核相比较,核子是不小的,它们在原子核内相当拥挤。原子核的结构与原子的结构是十分不同的(图 8)。

(四) 强子结构与层子

用电子弹性散射方法测出的原子核的电荷连续分布,表明原子核有结构,但都不能指明隐藏着的中子和质子的存在。用电子弹性散射方法测出的质子和中子

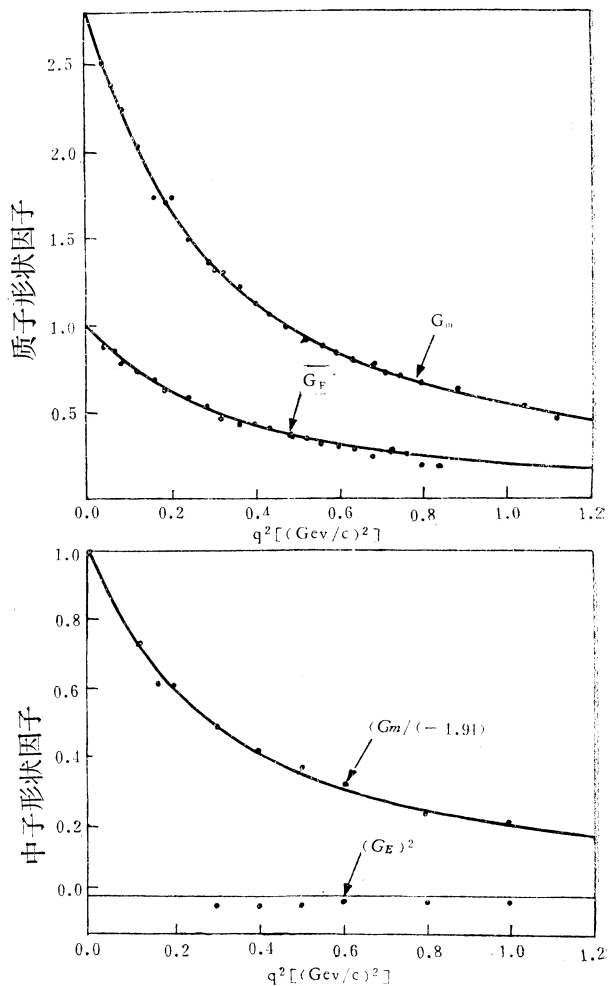


图 7

的形状因子(图 7),也反映了电荷和磁矩分布于某有限体积内,清楚地表明核子也必然有结构,但却也不能具体指出结构的成分。为了弄清核子的结构,必须用别的粒子或更高能量的电子再去轰击核子,变革它,把它击碎,看看里面究竟是什么东西?

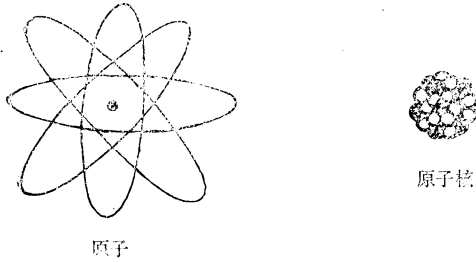
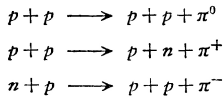
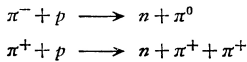


图 8

曾用高能质子或中子去轰击质子（通常是轰击富含氢的靶子），碰撞的结果仍包含有两个核子，只是又放出了一个 π 介子，如：

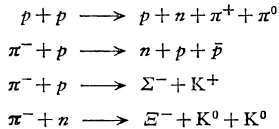


等。这里， π^\pm 和 π^0 代表带电 ($\pm e$) 和不带电的 π 介子，它们的质量约为电子质量的二百七十倍。 π 介子与核子之间有很强的作用。用高能 π 介子去轰击核子也可以发生



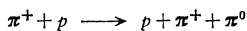
之类的过程。显然， π 介子不能被看作是核子的下一层次的成分，因为轰击后核子并没有减少。如果把质子看作由中子和 π^+ 构成，那么同样也可以把中子看作由质子和 π^- 构成，甚至也可以把质子看作由它自身和 π^0 构成。这种说法不能真正揭示核子内更深一层次的秘密。实际上，质子和中子是同一层次的东西，把质子和中子看作同一粒子（核子）的不同状态更为恰当。 π 介子与核子也是属于同一层次的东西。

用更高能量的核子或 π 介子去轰击核子，可以产生更多的 π 介子，或者形成一些新粒子，如

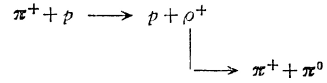


这里， Σ^- 、 Ξ^- 等为超子，与 K 介子一起统称为奇异粒子，而 \bar{p} 为反质子。 Σ^- 、 Ξ^- 、 K 等奇异粒子与核子、 π 介子属于同一层次，它们也不是核子结构的成分。现代的高能加速器已可将质子加速到 500GeV (500,000,000,000 电子伏！) 这样高的能量，用这种质子去轰击靶子，在一次碰撞中甚至可以伴生几十个粒子！

Σ 、 Ξ 、 K 、 π ……等均是不稳定粒子，它们的寿命只有约 10^{-8} — 10^{-10} 秒；有的甚至更短（例如 π^0 和 Σ^0 ）。此外，还有更短寿命的粒子，它们在刚生成的一瞬间就蜕变掉了，很不容易看到它们存在，一般只有从它们的蜕变子体的关联中寻找它们的踪迹。例如，对于



过程，曾进行过详细研究，发现其两个 π 介子之间存在着关联，它们是从一个母体蜕变出来的。换句话说，这个过程实际上包含着两个阶段：



ρ^+ 介子的质量约为电子质量的 1500 倍，其寿命只有约 4×10^{-24} 秒，亦即约一亿亿亿分之四秒！利用这种方法，又找了一大批寿命极短的粒子。

所有这些粒子可以分成两大类，一类叫做重子，包括 $p, n, \Delta, \Sigma, \Xi, \Delta, \Sigma^*, \Xi^*, \Omega$ ……，它们具有半整数自旋 $\hbar/2, 3\hbar/2$ ……；另一类叫做介子，包括 $\pi, \kappa, \eta, \rho, \omega, \phi$ ……，它们具有整数自旋 $0, \hbar$ ……。这些粒子之间有很强的作用，所以统称强子。在所有这些强子之间，不存在一些粒子由另一些粒子构成的任何迹象。因此，核子层次实际上属于整个强子层次。但是，存在着这么多同层次的强子本身说明，其背后必有更基本的东西。事实上，从这数百种强子的性质已经显现出某些系统性，颇有点像是上百种元素之间存在周期性那样。元素的周期律是原子中的电子在核外周期排列的结果，是原子具有内部结构的反映。同样，强子所表现出的系统性也是强子内部有结构的强烈暗示。事实上，通过对这种系统性的分析研究，已经越来越清楚地看出强子是有结构的。比较成功的一种模型认为所有这些强子是由三种 $\hbar/2$ 自旋的层子 u, d, s 及其反粒子 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ 构成的（如果把最近发现的 J/ψ 粒子以及粲粒子也包括在内，就还要增加一种带粲数的层子 c 和反层子 \bar{c} ）。按照这种模型，所有介子均由一个层子和一个反层子构成，例如 $\pi^- = (d\bar{u})$ ， $\kappa^+ = (u\bar{s})$ ， $\kappa^0 = (d\bar{s})$ 等；所有重子均由三个层子构成，例如 $p = (uud)$ ， $n = (udd)$ ， $\Sigma^- = (dds)$ ， $\Xi^- = (dss)$ 等；所有反重子均由三个反层子构成，例如 $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$ 等。

在这模型中，各种强作用过程均可简单地看作层子反层子对的产生和消灭，以及层子和反层子在散射中重新组合的过程。例如 $\pi^-+p \longrightarrow \Sigma^-+K^+$ 和 $\pi^-+n \longrightarrow \Xi^-+K^0+K^0$ 可用图 9 和图 10 清楚地表示出来。按照量子场论的作图规则，粒子运动方向和粒子线的箭头方向一致的时候，箭头的线代表粒子；粒

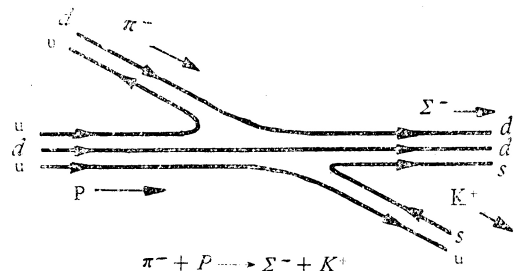


图 9

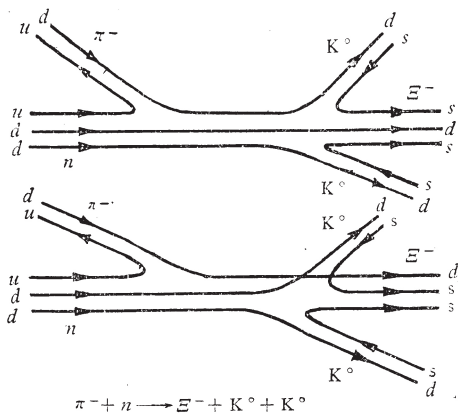


图 10

子运动方向和粒子线箭头方向相反的时候，箭头的线代表反粒子。例如图 9 中 π^- 是向右下走的，其中 u 线的箭头与此方向相反，所以 u 线代表 u 的反粒子 \bar{u} 。相仿 K^+ 的 s 线代表 s 的反粒子 \bar{s} 。图 9 和图 10 中还显示了一对 u, \bar{u} 的消灭，一对 s, \bar{s} 的产生。

强子的弱作用和电磁作用可以归结为单个层子的弱作用和电磁作用，例如弱过程 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 和电磁过程 $e^- + p \rightarrow e^- + p$ 可分别用图 11 和图 12 表示。图 11 中 ν 为中微子，因其反向运动，实为反中微子（即 $\bar{\nu}$ ）；图 12 中的波纹线代表传递电磁作用的虚光子。当然，弱作用也可以发生在图 11 的中间一个层子 d 上；电磁作用也可以发生在图 12 的另两个层子 u, d 上。只是为了简单起见，各只画了一个图。1965—1966 年我国高能物理工作者用层子模型对强子的弱作用和电磁作用进行了一系列理论分析，得到了与实验事实符合较好的结果，进一步论证了强子结构这个概念的正确性，论证了在弱作用和电磁作用范围内，相对论的量子场论也适用于组成强子的层子。

应当注意，这些层子具有非常特殊的性质。按照层子模型中的最简单的方案，层子的电荷不是质子电荷的整数倍， u, d, s 的电荷分别为 $+\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}e$

（另外 c 的电荷也是 $\frac{2}{3}e$ ），而迄今为止发现的所有粒

子，其电荷均为质子电荷的整数倍。目前，实验上还没有真正找到层子，强子结构的谜底还没有完全揭开。

（五）部分子

随着电子能量动量转移平方 q^2 的增大，弹性散射几率急剧下降。下降的原因有二：(i) 即使是点状核子，散射几率也随 q^2 增大而下降；(ii) 核子并非点状，由于干涉减弱，所以散射波随 q^2 增大而下降的程度又超过点状粒子，表现为形状因子随 q^2 增大而下降。因此，对于很大的 q^2 ，弹性散射几率已微乎其微。关于非弹

性散射，理论预言

$$e + p \rightarrow e + X$$

（ X 可以包括许多强子）过程也将随 q^2 增大而急剧下降。但出乎意料之外，用高能电子（4.5—19 GeV）做的实验发现，非弹性散射几率比理论预言的要大得多（约大 40 倍！）。这样大的几率只能解释为电子是在核子内部的点状电荷上发生散射。核子内部的这种点状电荷粒子被称作部分子。好象汤姆逊与卢瑟福之争又在这新的领域内重现了。

然而，现在的情况要复杂得多。这里遇到的不是简单的弹性散射，而是非弹性散射，并且是深度非弹性散射。 X 可以是十分复杂的多粒子系统。但是，在一个层次上看来是非弹性散射，在更深一层次看来可能仍然是弹性散射。举个例子说，考虑高能电子在氦核 D （由一个质子和一个中子构成的重氢原子核）上的散射过程

$$e + D \rightarrow e + p + n$$

从原子核的层次来看，这是非弹性散射，因为散射后原子核改变了性质；但从核子的层次来看，却仍然是弹性散射，因为散射后核子并没有改变。同样，电子在核子上的深度非弹性散射，在核子的层次来看是非弹性散射，在部分子的层次来看，仍可以看做是弹性散射。当然，实际情况是更为复杂的。核子内部诸部分子之间存在着极强的作用，当其中的一个与电子碰撞时，它受着其它部分子牵扯，不过，进一步的理论分析表明，在这种深度非弹性散射过程中，核子内的部分子发生显

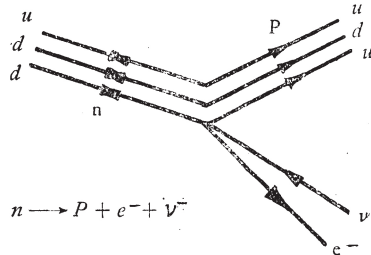


图 11

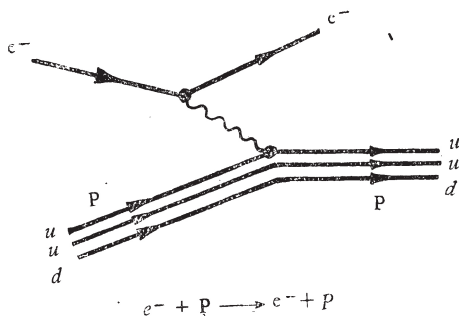


图 12

著变化的时间比起它与电子碰撞的时间来要长得多，因此，可以看成是单个自由的（似乎与其它部分子无关的）部分子与电子发生了散射，这是第一步；当电子在一个部分子上发生散射后，这个反冲的（被电子碰撞的）部分子走不多远就与其周围部分子强烈地作用，最终形成许多强子（即 X ）射出，这是第二步。因此，电子在核子上的深度非弹性散射实际上包括两个过程：一是电子在“自由”部分子上的弹性散射，一是反冲部分子与周围部分子之间的强过程（图 13）。

那么，部分子究竟是什么东西呢？最自然的一种猜想是，部分子可能就是层子（或者至少有一部分是层子）。但这个模型还存在着不少困难，实验上还没有真正找到层子，也没有找到双层子系统。迄今所发现的强子要么由三个层子构成，要么由一对层子（一个层子和一个反层子）构成。这种逢三饱和规律，虽然奇特，却是一个迄今为止仍无例外的实验规律。人们按照这个模型作了许多理论计算，发现它竟能成功地解释许多实验现象，例如《标度性定律》就是一例。所谓标度性定律是指：深度非弹性散射的结果不依赖于时间、

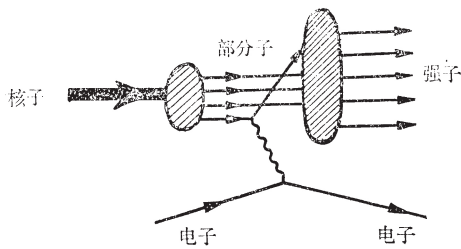


图 13

长度、质量标度的选取（只要不改变 b 和 c 的数值），把时钟、尺子、天平的刻度选大或选小一些，测量出来的结果是一样的。这个定律可以从部分子模型推导出来，而实验发现在相当宽的电子能量范围内这个定律成立。这些事实表明层子——部分子模型包含有合理成分，是值得重视的。

按照部分子模型，还会在许多情形中出现喷射现象。例如，在高能 $e^+ - e^-$ 对撞过程中直接产生的是一对部分子，它们将倾向于沿某个轴线并且朝相反方向射出。由于逢三饱和定律，这一对部分子最终将形成两束强子朝相反方向喷射出来。测量喷射强子束的角分布，可以对部分子的性质作出某些理论推测。如果不是产生一对部分子，那么可以预期，强子应当从四面八方飞出。实验上果真已经观测到了喷射现象，并测出了喷射束的角分布，由此推测部分子的自旋似应为 $1/2$ ，这对层子——部分子模型是一个有力支持。

（六）结语

人类认识微观世界经历了好几个阶段。我们日常所见到的各种物质，均由分子构成；分子又由原子构成；原子又由电子和原子核构成；原子核又由核子构成。这些现已成为众所周知的物质结构图象，在科学史上曾经经历了充满矛盾和极不平凡的发展过程。这些进展不仅使人类对物质结构的认识前进了一大步，一次又一次地证实了物质的无限可分；同时又开辟了微电子学、激光以及原子能等一个又一个崭新的技术领域。如今，人们又正在向更深一层次的“基本”粒子领域进军。揭开“基本”粒子结构秘密的长征虽然刚刚开始，但是这种热情必将会得到新的丰收，一幅现在还难以预料的灿烂前景必将展现在眼前！