



## 核子结构的发现

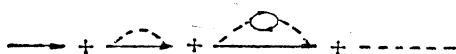


图 (1)

人们从认识分子、原子和原子核等物质结构的经验中总结出—条规律：物质是无限可分的，也就是说，客观的物质世界从小的方面来看也是无限的。这一唯物辩证的哲学思想使我们相信核子（质子和中子的统称）也仍然是可分的，是有内部结构的。哲学思想是一切科学工作的指导思想，但它并不能代替大量的、多种多样的、实际的科学研究工作。为了证明核子有结构，需要有充分的科学根据。为此，人们做了不少精密、仔细的科学实验，这些实验完全证明了核子确实有结构，核子内部存在着更深—层次物质单元——层子。但至今尚未发现自由的层子，因此有关核子结构的图象现在还不够清晰。下面我们就来谈谈人们是从哪些方面逐步认识核子内部有结构的。

### —、核子的反常磁矩

首先使物理学家相信核子有结构的信息来自核子的反常磁矩。那么什么叫反常磁矩呢？反常磁矩又怎么说明核子有结构呢？

我们知道，质子和中子同电子—样也是自旋为 $\hbar/2$ 的费米子。在至今所碰到的多种多样的实际问题中，都可以将电子近似地看作—个点粒子，这样的粒子的运动规律服从狄拉克方程，而且可以证明它的磁矩应该十分接近于 $\frac{e\hbar}{2mc}$ 。e是电子的电荷，m是电子的静质量， $\hbar$ 是普朗克常数，c是光速。如果质子和中子也可近似地看作点粒子，那么它们的磁矩 $\mu_p$ 及 $\mu_n$ 就应该分别接近于：

$$\mu_p = \mu_N, \quad \mu_n = 0$$

这里 $\mu_N = e\hbar/2m_Nc$ 称为核磁子， $m_N$ 是核子的质量。但是1933年史特恩等人的实验测到的磁矩却是

$$\mu_p = 2.78\mu_N, \quad \mu_n = -1.93\mu_N$$

就是说核子的实际磁矩同假设它们是点粒子时所应有的磁矩相差很大。从点粒子的理论看，这是一种反常现象。所以说质子、中子都带有明显的反常磁矩。为了解释核子的这种反常磁矩，人们开始怀疑核子是点

粒子的假设，并考虑核子的内部结构了。可是核子内部到底具有什么结构呢？人们在考虑问题时经常采用类比的方法。根据量子电动力学\*，考虑到真空效应，可以将—个自由电子看作—系列费曼图的迭加，这里图(1)中的第—项代表裸电子，第二项相当于电子先放出—个光子，随后又吸收这个光子，第三项中电子放出的光子先变成正负电子对，后来正负电子对湮没又变为光子，最后这个光子又被原来的电子吸收。还可以有很多更复杂的过程，在图(1)中都用省略号代替了。对于核子可以画出类似的费曼图，不过这里放出的不是光子和电子对，而是介子和强子对。于是，人们设想核

$$p \leftrightarrow n + \pi^+ \text{ 或}$$

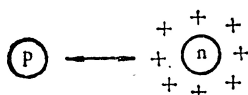


图 (2)

子可能被介子云所包围。具体说来，质子在它的一生中的某段时间可以作为裸质子状态度过，而在另—些时间却又可作为被 $\pi^+$ 介子云所包围的中子状态度过。我们可用图(2)来表示。同样，—个中子在它的一生中的某段时间也可看成为被 $\pi^-$ 介子云所包围的质子。我们可用图(3)来表示。显然围着核子旋转的带电介子云应该对核子的磁矩有贡献，这就定性地说明了核子的反常磁矩。然而这种看起来似乎有点道理—幅核子结构的图象是否真实，仍然需要通过实验来判断。

$$n \leftrightarrow p + \pi^- \text{ 或}$$

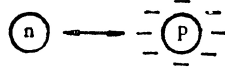


图 (3)

### 二、核子的电磁形状因子

因为人们对电磁相互作用比对强相互作用的—了解要清楚得多，所以选用电子做为了了解核子结构的探针最恰当。1956年，霍夫斯塔特等人首先用电子—质子散射证明了质子不是点粒子。因为核子很小，它的半径只有—个费米( $10^{-13}\text{cm}$ )左右。要更精确地了解如此小范围内的情况，电子必须具有足够高的能量。根据

海森堡测不准原理  $\Delta p \sim \hbar / \Delta x$ , 为了能分辨  $\Delta x = 10^{-14} \text{cm}$  这样的距离, 就要求电子的动量改变  $\Delta p \sim 2 \text{GeV}/c$ , 当然入射电子的能量就要  $> 2 \text{GeV}$ . 人们用能量越来越高的电子去轰击核子, 测量电子被核子散射的角分布 (即微分散射截面), 结果发现它与假设核子是点粒子时所应有的角分布 (莫特散射截面) 不一样. 为了描述核子的电荷分布和磁矩分布, 引进了两种形状因子, 电形状因子  $G_E$  和磁形状因子  $G_M^*$ . 它们都是动量转移平方 ( $q^2$ ) 的函数. 这样罗森布鲁斯得到了一个新的散射截面公式. 它与莫特散射截面的差别在于多了一个与  $G_E$ ,  $G_M$  和散射角度有关的因子, 由实验可以定出  $G_E$  和  $G_M$  随  $q^2$  的变化关系. 并可测定出质子和中子的电磁形状因子随  $q^2$  变化的曲线. 而且发现它们之间有如下的关系

$$G_E^p(q^2) = \frac{G_M^p(q^2)}{2.79} = \frac{G_M^*(q^2)}{-1.91} = G(q^2) \quad (2)$$

后来还发现可用简单极点之和来拟合  $G(q^2)$ , 即

$$G(q^2) = \sum_i \frac{q_i}{1 + \frac{q^2}{M_i^2}} \quad (3)$$

在  $q^2 = -M_i^2$  处,  $G(q^2)$  有极点, 由此预言了矢量介子  $\rho$ ,  $\omega$  和  $\varphi$  的存在. 随着入射电子能量的增高, 在  $q^2$  较大的范围内测定了  $G(q^2)$ , 发现可以用偶极点来拟合它:

$$G(q^2) = \left( \frac{1}{1 + \frac{q^2}{0.71}} \right)^2 \quad (4)$$

这样的电磁形状因子相当于电荷的指数分布, 即

$$\rho(r) = \frac{m^3}{8\pi} e^{-mr}$$

当  $r \rightarrow 0$  时  $\rho(r) \rightarrow \frac{m^3}{8\pi} = \text{常数}$ , 这说明核子内部不存在“硬心”. 但这决不意味着核子内部没有硬的颗粒, 只是这些颗粒并不集中在核子的中心.

这样, 电子和核子的弹性散射实验首先证明了核子不是点粒子, 其次还告诉我们核子不大象中心有一个核的梅子. 但核子到底象果子冻呢? 还是象石榴? 仍然是一个未解决的问题. 电子和核子的非弹性散射回答了这个问题.

### 三、电子和核子的深度非弹性散射

在电子和原子的散射中, 除了散射后原子仍然处于基态的弹性过程外, 还有将原子激发到分立态和将原子电离而进入连续能区的非弹性过程. 同样在电子和原子核的散射中, 原子核可以仍然处于基态 (弹性散射), 或者非弹性地被激发到分立的能级上, 此外还可以被分解并放出强子而进入连续能区. 电子和核子的散射也相仿, 除弹性散射外, 还有核子被激发到共振态和所谓  $\pi$  介子化的连续区的非弹性过程. (六十年代中期以后, 一批较高能量的电子加速器相继建成, 才有可能开展这方面的研究.)

一旦进入所谓  $\pi$  介子化的连续区, 散射过程实际上是

$$e^- + p \rightarrow e^- + \text{任何强子系统}$$

的过程, 通常叫做深度非弹性散射. 如果在实验中只观察被散射的电子, 而不观察强子终态, 则所测的截面上实际上是产生各不同强子终态截面之和, 费曼把这样的截面叫做单举截面. 开始人们认为随着动量转移平方 ( $q^2$ ) 的增加, 非弹性截面将与弹性截面一样下降得很快. 但  $q^2$  很大时 (即散射角很大时), 实验得到的非弹性截面比理论估计的要大 40 倍! 这使人们回想起卢瑟福用  $\alpha$  粒子散射发现原子核的实验, 在那个实验里, 有一定数量的大角度散射的  $\alpha$  粒子出现, 这里又出现了类似的情况. 因此深度非弹性散射的实验结果说明了核子内部存在着点状电荷, 费曼称这些点状电荷为部份子. 进一步的理论分析还说明部份子带  $\hbar/2$  自旋, 和层子一样. 近几年来用中微子做探针的实验也同样证明了核子的层子结构. 另一方面从强子分类的么正对称性发展起来的层子模型, 也取得了很大的成功.

核子有结构, 核子内部有点状的粒子——层子, 因此它比较象石榴, 而不象果子冻. 这就是我们今天对核子结构的认识. 但由于至今实验上没能直接找到层子, 因此我们对核子结构的认识仍然很不充分, 这是目前摆在高能物理工作者面前的重要课题之一. (金炳年)

\* 这是高能物理中理论和实验结果符合得最好的一个部分.

\*\* 如果核子是点粒子, 即没有与几何学上的点不同的形状, 则核子的形状因子  $G_E$  和  $G_M$  都应等于 1.