

中子并非任何场合都是电中性

张多文

(国家医药管理局上海医药设计院,上海 200040)

自由中子的电荷是由中子束通过电场测出的。实验测得电荷上限为 $10^{-20}e$, 电偶极矩小于 $6 \times 10^{-23} e \cdot \text{cm}$ 。然而,人们用高能电子散射测出中子有电流环,用低能中子对束缚无自旋原子的电子散射测出中子有微小电荷分离^[1]。从高能电子散射中子的数据分析得出中子的电荷结构:中心是一个半径为 0.2 fm 带正电荷 $0.35e$ 的核, 0.8 fm 内带负电荷 $0.5e$, 在 1.4 fm 内带有正电荷 $0.15e$ (通常把 0.8 fm 和 1.4 fm 内的电荷分别称作矢量云和张量云)^[2]。夸克模型提出:中子是由带电的 ddu 夸克组成;中子的核心为夸克,其外层为 π 介子及其他介子。中子有电荷分布和每层带有不同的电荷量,提供了中子不是任何条件下都是电中性的可能性。

以原子的电中性作类比,中子在任何场合均为电中性的说法也有商榷的必要。假如原子永保电中性,那么原子和原子接触或在外场作用下由于电荷量改变而形成复杂的物质世界也就不可能。本文从中子电中性非永恒的观点来分析中子实验中的一些现象。

一、中子和质子散射截面比值不恒定

一个具有电荷又有自旋的粒子是一个小磁体,它具有磁矩。中子有异常磁矩,这就证明中子内部有电荷结构。电子被中子散射首先是中子磁矩引起的;其次是诱发中子电磁性的电流引起中子中电荷局部聚积,当传递的动量大于零时,这种电荷聚积就会引起电散射,而且随着传递动量和能量的大小而改变。中子和质子非弹散射的截面比值随变量 ω 值 (ω 定义为动量

传递的平方与散射前后电子能量差之比,即 $\omega = 2Mv/q^2$) 而变,就反映了这种情况,详见图 1 所示^[3]。

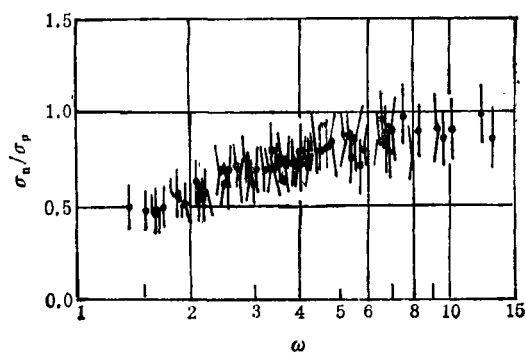


图 1

σ_n ——中子散射; σ_p ——质子散射

图 1 表明,如果中子和质子的电荷和磁矩在任何情况下都是不变的,那么就难于解释上面实验结果了。 σ_n/σ_p 的比值随函数 ω 增加而升值,不能由简单的夸克模型得到解释。按夸克模型推导,核子中的一个夸克(q)和散射电子交换光子(γ)时,散射截面为 σ_q ,则核子的总散射截面 (σ)

$$\sigma = \sum \sigma_q = \sum \sigma_q(E, \theta) = \sum e_q^2 \sigma_0(E, \theta), \quad (1)$$
$$e_q$$
 为夸克的电荷, E 为电子入射的能量, θ 为电子散射的角度。按(1)式,中子和质子各自的散射截面为

$$\begin{aligned} \sigma_n/\sigma_p &= \frac{[(1/3)^2 + (1/3)^2 + (2/3)^2]e^2}{[(1/3)^2 + (2/3)^2 + (2/3)^2]e^2} \\ &= 6/9 = 0.666. \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式的数值接近于图 1 中低 ω 值时的数值,但仍有差距;在高 ω 值时, σ_n/σ_p 值逐渐增大。造成这种变化,是核子的价夸克的电荷发生变化

还是核子内所谓海夸克的增加 $(q)^3, (q)^4 \bar{q}, (q)^5 (\bar{q})^2 \dots$? 无论哪一种说法, 中子的磁矩和电荷的变化都比质子快, 也即低 ω 值时的中子磁矩和电荷应不同于高 ω 值时的情况。

另外, 按 QCD 理论, 核子的结构函数(描写散射截面有两个结构函数: 其一为 $\nu\omega_1$, 它与电荷有关; 另一为 $\nu\omega_2$, 它与磁矩有关)的标度性只有一个微小的破坏, 这在低能散射时得到实验的证明。但是, Ball 等人^[4]用 2×10^{10} 个能量为 270 GeV 的高能 μ 子轰击核子, 观察到当核子打碎后的碎片总质量大于 $\sqrt{80 \pm 11}$ GeV 时, 结构函数破坏要比 QCD 预言大 15% 左右。这种现象同上述 σ_n/σ_p 比值变化一样, 很难用核子磁矩和电荷量不变来完满解释。

二、极化中子通过大块物质时自旋的转动

当中子束通过大块物质时, 人们通常认为中子与靶原子之间只可能存在着强相互作用和弱相互作用; 弱作用的效应造成宇称不守恒, 以此可以和强作用效应区分开来。如果一束中子横向极化, 它的自旋方向与中子束前进方向垂直, 那么弱作用的效应将是所有自旋方向都绕中子前进方向转过一个角度, 可由格拉肖等人的电弱统一理论计算出中子自旋转动的大约弧度/厘米(rad/cm)。若将一束中子通过某物质, 通过的距离为 z cm, 则自旋转动的角度为

$$\phi = (4\pi/p) (\text{Ref}) \rho z, \quad (3)$$

式中 p 为中子的动量, ρ 为中子通过物质的原子核密度, Ref 为原子中向前散射中子振幅宇称的破坏。Stodolsky 等人^[5]使极化中子束通过锡块, 按理论计算中子自旋转动角 $\phi = 1.3 \times 10^{-3}$ rad/cm; 但实测的 ϕ 值如下:

$$\text{Sn}^{117} \quad (-36.8 \pm 2.7) \times 10^{-6} \text{ rad/cm};$$

$$\text{Sn}^{124} \quad (-0.15 \pm 1.44) \times 10^{-6} \text{ rad/cm};$$

$$\text{Sn(自然元素)} \quad (-4.95 \pm 0.95)$$

$$\times 10^{-6} \text{ rad/cm.}$$

Sn^{117} 的实测值比理论值大 3000 倍。不同的同位素得出的结果都相近, 由此可以说明, 这种效

应不是由于电子引起的, 而是中子与靶原子核作用引起的。因此, 实验者推断中子和靶核子之间可能存在一种新的宇称不守恒力, 比弱力要强 1000 倍左右。

是否可以认为, 中子通过核场引起中子电荷分布的改变, 使中子带有小量负电荷, 这部分电荷与核荷相互作用引起了一种新力呢。中子有磁矩, 当它通过原子核时, 它将与极化核磁矩起作用, 这种相互作用如同两个磁偶子的相互作用, 若两磁偶子是平行的, 则它们彼此相斥, 反之则相吸。但是, 锡原子并未极化, 核磁矩的无规则取向使中子磁矩与核磁矩的作用观察不到。如果极化中子被核电场诱发带小量电荷(按照介子理论, 中子常常会离解成质子和 π^- 介子, 这种电荷分布使得在核附近的中子带一些电荷, 即由介子云所引起的静电效应, 此种效应已在中子-电子散射实验中观察到^[6]), 则任意电偶极子在非均匀电场中所受的力及力矩分别为

$$f = \nabla(P \cdot E), \quad (4)$$

$$L = P \times E, \quad (5)$$

式中 P 是电偶极矩(矢量), E 是偶极子所处的场强(矢量)。如果 P 与偶极子所在处场强 E 的夹角为 θ , θ 值可从 0 至 π , 根据(4)式, 极化带电中子所受的力

$$f = P \cos \theta,$$

$$E = P \cos \theta \left(\frac{dE}{dr} \right) e_r. \quad (6)$$

由(6)式可知: (1) 正的点电荷产生的电场 $\frac{dE}{dr} = -2e/r < 0$ 。若 $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$, 则力 f 的方向与 e 的方向相反, 即力方向朝场加强的方向; 若 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 则 $f = 0$, 即偶极子不受力。(2) 负的点电荷产生的电场仍是 $\frac{dE}{dr} = -2e/r < 0$, 同样可得到与正电荷相同的结论。由于锡原子核带正电荷, 极化中子如带小量负电荷, 当它通过原子核附近时, 将使中子自旋由垂直于前进方向转而朝向前进方向, 即力的加强方向, 从而造成实测值比(3)式计算值大的原因。

三、中子受电场的影响

最近, 继发现带电粒子受磁场影响产生衍射波相移(所谓 A-B 效应^[1])之后, 又有人测出中子受电场影响产生衍射波相移(所谓 A-C 效应). Cimmino 等人^[8]根据中子具有磁矩 μ 、质量 m 、速度 v 以及在电场 E 产生的正规动量为

$$p = mv + \frac{\mu}{c} \times E, \quad (7)$$

推导出中子波的衍射相移(即 A-C 效应)

$$\Delta\phi_{AC} = \frac{1}{\hbar} \oint p dr = \sigma \frac{4\pi\mu\Lambda}{\hbar c}, \quad (8)$$

式中 $\sigma = \pm 1$, Λ 为电极的线性电荷密度. Cimmino 等人按照实验条件代入(8)式得到的中子波的衍射相移计算值 $\Delta\phi_{AC} = 1.50 \text{ mrad}$, 而实际测量到的中子波衍射相移值 $\Delta\phi_{AC} = 2.19 \pm 0.52 \text{ mrad}$. 实测值比计算值大 1.46 ± 0.35 倍. 根据量子力学原理, 中子波衍射相移是强电场产生的电矢势造成的. 势的物理意义: 中子只要不与电场相碰撞, 而从其附近通过, 就会有一种细微的而又可测出的衍射波相移出现. 可是, 这种解释仅从中子具有微小的磁矩(中子的磁矩约为电子磁矩的二千分之一)出发, 不能使计算值与实测值一致. 在前面两个例子中, 我提到电场将影响中子的结构改变并使之带电荷, 电矢势的时空变化率可以产生电场, 这个电场也可使中子带有小量电荷. 如此中子受电场的影响不仅是由于磁矩的存在, 而且中子出现的电荷也在起作用. 长期以来人们

了解到, 负电荷(或正电荷)只要不与静止的正电荷(或负电荷)接触而从其附近通过, 那么就会产生加速度, 从而改变其动量和方向. 电矢势使一个带小电荷的中子从一点移到另一点, 得到能量并改变其波幅. 这为说明计算值和实验值出现偏差提供理由之一. 如果这个推测是对的, 则(7)式中的 mv 项应改为 $mv \pm eA$, 即

$$p = (mv \pm eA) + \frac{\mu}{c} E,$$

式中 e 为中子在核电场影响下诱发的电荷量, A 为电矢势. 中子的波长为 $\hbar/(mv \pm eA)$.

以上举出的实验结果都有可能说明中子不是在任何场合下均是电中性. 实验如能进一步确认, 那么我以往提出的核电荷量不等于原子序数^[9]就可以说明了; 同理, 同一个元素的同位素为什么化学活性不同也可以说明了.

本文得到唐孝威和杨长根二位教授的支持和帮助, 特表示感谢.

- [1] J. Byrue et al., 世界科学, No. 5(1983), 9.
- [2] R. M. Littaner et al., *Phys. Rev. Lett.* 7(1961), 144.
- [3] W. Kendal, *Scientific American*, No. 6(1971), 23.
- [4] R. C. Ball et al., *Phys. Rev. Lett.*, 42(1979), 866.
- [5] L. Stodolsky et al., *Phys. Lett. B*, 96(1980), 127.
- [6] D. J. 休斯著, 洪永炎译, 中子光学, 上海科学技术出版社, (1963), 66.
- [7] Joseph Imry et al., 科学, 41-8, (1989), 18; 殷学谦等, 物理通报, No. 4(1989), 1.
- [8] A. Cimmino et al., *Phys. Rev. Lett.*, 63 (1989), 380.
- [9] 张多文, 物理, 5(1976), 118.

(上接第 505 页)

用已有基础研究成果去解决实际技术问题的过程, 但往往也会碰到一些相当深奥的属于基础研究性质的问题. 我在利用 LiNbO_3 晶体制作集成光学器件的过程中, 就发现与 LiNbO_3 晶体有关的问题中仍有许多问题值得从基础研究的角度去探讨. 例如, LiO_2 分子外溢造成

LiNbO_3 晶体缺陷的类型是什么? 这种缺陷对晶体抗光辐射性能的影响机理; Ti 和 TiO_2 在 LiNbO_3 中扩散的形式如何, 最终的结构是否相同; 低温外延 LiNbO_3 薄膜层的电极化机理等. 并且相对来讲, 从事应用开发研究容易获得较多的科研经费, 抓住一、两个这样的理论问题深入探索、研究也是有条件的.