

反常磁矩

——东方晓——

顾名思义,反常磁矩是相对正常磁矩而言的。为了弄清楚反常磁矩的意义,必须先从正常磁矩谈起。正常磁矩通常又叫做狄拉克磁矩或自旋磁矩。不失普遍性以电子为例来说明。电子自旋 $1/2$, 它的狄拉克磁矩为 $\mu_0 = \frac{e}{2m}$, 这里 m 是电子质量, e 是电子电荷。(本文用 $\hbar = 1, c = 1$) 一般文献上称 μ_0 为一个玻尔磁子。

我们知道,在有电磁场存在时,电子满足狄拉克方程:

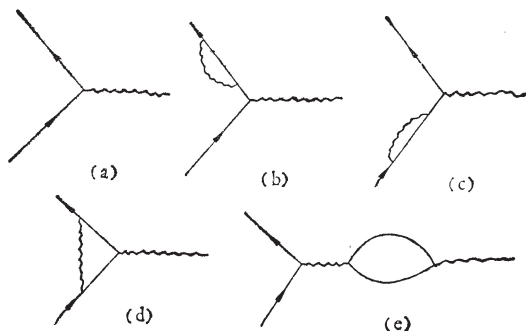
$$[E + c\phi - \alpha \cdot (\mathbf{p} + c\mathbf{A}) - \beta m]\psi = 0.$$

其中 ϕ 、 $\mathbf{A}$ 代表电磁场的标量势和矢量势。电子具有自旋磁矩是狄拉克理论的必然结果。而电子正常磁矩的大小正好等于一个玻尔磁子。同理,质子的狄拉克磁矩为 $\frac{e}{2M}\sigma$, 与电子比较,所不同的仅是把电子质量 m 换成质子的质量 M , 因为质子的电荷是正的,而电子的电荷是负的,所以它们的磁矩也相差一个负号。总结以上分析可以得出结论:粒子的正常磁矩与粒子的电荷及自旋成正比,而与其质量成反比。由此可以得出中子的正常磁矩为零。因为中子是电中性的。以上是狄拉克理论的预言,实验的结果又如何呢?

实验上测得,电子的磁矩并不正好是一个玻尔磁子 $\mu_0 = \frac{e}{2m}$, 而是

$$\mu = (1.00115965241 \pm 0.00000000020)\mu_0.$$

大于一个玻尔磁子。实验结果与理论预言并不一致。为了解释这一矛盾,理论上假设,电子除了正常磁矩外,还具有反常磁矩。实验上测得电子的磁矩大于一个玻尔磁子,完全是由于反常磁矩造成的。换句话说,实验上观察到的电子磁矩是电子的正常磁矩与反常磁矩之和。这样我们就定性地解释了关于电子磁矩观察结果与理论预言的不一致性。量子电动力学给电子反常磁矩以定量的解释。从原则上讲,测量电子磁矩实际上就是测量电子在磁场中的能量问题。用量子电动力学来处理,这就要计算电子被外场散射的最低级近似及高级辐射修正的费曼图(如图所示)。图(a)是最低级近似的费曼图,图b、c、d、e是精确到 α 级的图形。如果只计算图(a),其结果便和狄拉克理论预言的一样,只有正常磁矩,而且等于一个玻尔磁子 $\mu_0 = \frac{e}{2m}$ 。如果考虑到高级辐射修正,并把反常磁矩 $a_{\text{理论}}$ 用精细



电子与外场作用的费曼图

结构常数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$ 的幂级数表示出来则有:

$$a_{\text{理论}} = A\left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + B\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + C\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots$$

式中 A 、 B 、 C 分别代表 α 、 α^2 、 α^3 各级系数。如果把图 b、c、d、e 四个费曼图计算出来,便可以定出系数 $A = \frac{1}{2}$, 也就是说二级辐射修正对反常磁矩的贡献是 $\frac{\alpha}{2\pi}$ 。现在理论上已计算出六级辐射修正,也就是到 α^3 级,其最新结果是: $a_{\text{理论}} = (1159652200 \pm 40) \times 10^{-12}$ 。而实验的最新结果是

$$a_{\text{实验}} = (1159652570 \pm 150) \times 10^{-12}$$

我们看到理论与实验惊人地符合,到 10^{-9} 还丝毫不差,这是当今实验的一大成就,也是对量子电动力学的极好的验证,有力的证明了量子电动力学是一门高度精确的理论。

对于 μ 介子磁矩,最新实验结果是:

$$a_{\text{实验}} = (1165924 \pm 8.5) \times 10^{-9}.$$

理论计算到六级辐射修正的最新结果是:

$$a_{\text{理论}} = (1165921 \pm 8.3) \times 10^{-9}.$$

理论预言与实验结果也是符合的非常好。到目前为止,还没有看到 τ 重轻子磁矩的实验结果,不过大家都相信, τ 重轻子将和电子、 μ 介子一样,反常磁矩只是一个小小的辐射修正。总之,对轻子反常磁矩,理论预言与实验观测符合得这样好! 可以精确到 10^{-9} 量级而不差丝毫,这一事实说明了两个问题:第一,像前面提到的那样,说明量子电动力学是一门高度精确的理论;第二表明,如果轻子不是一个点,也是有结构的话,其半径不能大于 10^{-16} cm。

对于质子、中子等强子的磁矩,情况就与轻子完全不同了。前面提过,理论预言质子的正常磁矩是 $\frac{e}{2M_p}$, 而实验测得质子的磁矩是, $(2.7928456 \pm 0.0000011) \cdot \frac{e}{2M_p}$ 。容易看到,质子的反常磁矩比正常磁矩还要大的多。因此,质子的反常磁矩就不能像轻子那样,用辐射修正来解释了。由于中子电荷为零,故没有正常磁矩,

但实验却发现,中子有很大的反常磁矩,——

$$(-1.91304184 \pm 0.00000088) \frac{e}{2M_p},$$

这样大的反常磁矩,辐射修正是无能为力了。著名的层子模型曾经预言,质子与中子的磁矩比是 $\mu_p/\mu_n = -3/2$. 这与实验是基本符合的。现在,不少强子磁矩,实验上都已测出,不过还没有一个像样的理论,能够解释这些强子反常磁矩的来源。强子的反常磁矩还是一个没有解决的问题。