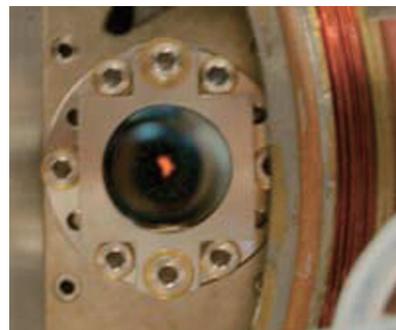


标准模型的伟大胜利

——预言电子磁矩到万亿分之一的精度

(清华大学 王青 编译自 Gerald Gabrielse. *Physics Today*, 2013, (12): 64, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)



电子是很惊人的粒子，它的半径小于 2×10^{-20} m，自旋为 $1/2$ ，具有角动量 $S = \frac{1}{2} \hbar \hat{S}$ 。电子的磁矩 μ 平行其自旋： $\mu = \mu \hat{S}$ 。为了测量电子磁矩，单个电子被悬挂在测量它的 Penning 井的强磁场中达几个月。留在 Penning 井的电子通常会保持几年平行或反平行于磁场 B ；这两个态的能量差为 $\hbar \omega_s = -2\mu B$ ，其中 ω_s 是自旋频率。自旋和磁矩的方向只在施加适当的驱动力时才会发生翻转，而当驱动频率趋近 ω_s 时，会有较多的自旋发生翻转。

自旋频率正比于磁场 B 。一个带电荷 e 质量为 m 的电子回旋加速器的频率 $\omega_c = eB/m$ 也正比于 B 。温度在绝对零度之上且小于 0.1 度时，电子足够冷以保持其在回旋加速器中的运动是在其量子基态上。当自旋翻转时，一个可测的回旋加速器运动在合适的驱动力下的单量子激发将增加能量 $\hbar \omega_c$ 。当驱动力趋于 ω_c 时，激发将更频繁地发生。从 $\hbar \omega_s = -2\mu B$ 和 $\omega_c = eB/m$ 中约掉 B 就给出磁矩作为两个可测频率之比， $\mu/\mu_B = -\omega_s/\omega_c$ 。玻尔磁子 $\mu_B = e\hbar/(2m)$ 是角动量为 \hbar 的环形电子运动的磁矩。磁矩 μ 是负的，这说明它反平行于自旋，因为电子电荷是负的。这样，电子磁矩 $\mu/\mu_B = -1.00115965218073(28)$ ，是所有基本粒子中所测到的最精确的性质。在最右边括号里的两位数是

不确定性。作为比较，缪子磁矩只测到其精度的大约 $1/2500$ 。

1928年，狄拉克引进了描述电子和其他自旋 $1/2$ 粒子的相对论波动方程。此方程预言 $\mu/\mu_B = -1$ ，是标准模型如下4项贡献中最大的： $-\mu/\mu_B = 1 + a_{\text{QED}} + a_{\text{hadronic}} + a_{\text{weak}}$ 。其中， a_{QED} 是来自于量子电动力学(QED)的额外贡献的 0.1% 。QED描写电子如何辐射和吸收光子，其中有些光子与“虚无空间”的轻子—反轻子对相互作用。 a_{hadronic} 是来自于电子和强子—反强子对相互作用所贡献的万亿分之二。标准模型的弱作用对电子磁矩 a_{weak} 的贡献小于测量精度。

量子电动力学给出 a_{QED} 作为精细结构常数 $\alpha \equiv e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137$ 的幂次展开表达式， $a_{\text{QED}}(\alpha) = C_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + C_4 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + C_6 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + C_8 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + C_{10} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \dots$ 公式中所显示的5项中的每项都比前一项小很多，但它们对磁矩的精确测量都是必须的。

C_k 可通过费曼图来计算。对 C_2 、 C_4 和 C_6 ，分别有1、7和72个可以解析计算的费曼图。施温格1948年计算了 C_2 。Charles Sommerfield和André Petermann 1957年分别独立地确定了 C_4 。Stefano Laporta和Ettore Remiddi 1996年完成了 C_6 的重要计算。Toichiro Kinoshita, Makiko Nio和其合作者数值计算了

C_8 和 C_{10} 所需要的令人恐惧的891和12672个费曼图。 C_{10} 的结果是2012年才给出的。

精细结构常数在物理中到处存在。在原子物理中，结合能、精细结构分裂和兰姆位移都正比于 α 的幂次。在凝聚态物理中， α 标志约瑟夫森结振荡和量子霍尔电阻平台。它是我们基本物理常数系统的一个重要部分。需要测量精细结构常数，因为它是标准模型中的输入参数。标准模型预言 μ/μ_B 需先确定 α 。实验最后给出 $1/\alpha = 137.035999049(90)$ 。标准模型用实验确定的 α 做输入，预言电子的磁矩 $\mu/\mu_B = -1.00115965218178(77)$ 。这是最精确的理论预言。它与实验测量值一致到万分之 1.1 ± 0.8 。

标准模型取得了巨大的成功，它不仅预言电子磁矩准确到万亿分之一，还成功地将构成宇宙中已知物质的基本粒子的所有性质统合在一起，这些粒子之间通过弱、电磁和强力发生相互作用。令人感到挫折的是，标准模型似乎不太完备，因为包含了太多的参数，引力也没被嵌进去。标准模型没能解释似乎构成大部分宇宙的暗物质和暗能量，还有物质宇宙是怎么从大爆炸中几乎对称的物质和反物质产物中衍生出来的。虽然我们庆祝标准模型的伟大胜利，但仍有人试图更精确地检测标准模型，也许我们会从奇妙的电子上学到更多的东西。