

中子的寿命

J. Byrne

一、引言

当Chadwick和Goldhaber首次精确测定了中子的质量的时候就预言,中子应该具有 β 衰变的特性,能自发地衰变成质子、电子和中微子(Chadwick和Goldhaber 1935)。这一衰变过程最早由Snell和Miller探测到。他们从强中子束中观察到了受电场吸引的正离子。后来他们证实,正离子的产生率恰好对应着半衰期为10—30分钟的中子 β 衰变(Snell和Miller 1948, Snell等人1950)。差不多在同一时期,Robson验证了这种正离子确实是质子并且估算出中子的半衰期为9—25分钟(Robson 1950)。中子寿命的首次实验测定也是由Robson进行的,实验误差大约是20%。在同一个实验中,他还测定了中子衰变的电子能谱(Robson 1951)。

现在,我们已经知道中子衰变的电子能谱的最大能量端点值为 $E_0 = 782.318 \pm 0.017$ KeV,它是由中子和氢原子的质量差决定的(Wilkinson 1982)。这个值对具有 β 活性的核来说几乎是很典型的。相应地,对反冲质子谱的最大能量端点值为755eV。这个值确实太低,不能用传统的带电粒子探测器来记录。

二、中子寿命的重要性

在考虑中子寿命的实验测定问题之前,还很少有人精确地测定那些已知的不稳定基本粒子的寿命。在此,我们有必要简要地讨论一下为什么这个最基本的常量是很重要的。诚然,中子的寿命对天体物理学有着重大的关系,因为它涉及到宇宙早期氦的产生这样

一个核心问题(Tayler 1968,1979,1980)。中子寿命对基本粒子物理学的重要性还在于如下的事实,尽管用 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的ft值的组合,可以得出弱相互作用的耦合常数。由于矢量耦合常数 g_V 和轴矢量耦合常数 g_A 在很大程度上与核的结构有关,中子的寿命如何实际上就给出了 $|g_V|^2 + 3|g_A|^2$ 组合的量度。然而,还有另外一条途径可以用来确定这些耦合常数。这条途径就是依赖于中子的 β 衰变,而且只需要假设这一衰变过程是通过时间反演不变的纯的(V-A)耦合,在这些假设的条件下,我们可以推导出宇称守恒时电子—中微子角关联系数 a 和宇称破坏时电子—中子自旋关联系数 A 的表达式

$$a = (1 - \alpha^2) / (1 + 3\alpha^2)$$

$$A = -2(\alpha^2 - \alpha) / (1 + 3\alpha^2)$$

这里 $\alpha = |g_A/g_V|$ 。对别的一些关联可能也起相似的作用,不过,从实验的角度看,这两个关联是最重要的。所给的 a 值也涉及到强相互作用,因为它通过Goldberger-Treiman关系同 π 介子—核子耦合常数相联系。在任何情况下,知道了 α 的值和中子的寿命,就能充分唯一地确定弱相互作用耦合常数。

三、实验测定

在中子寿命的所有实验测定结果中,最显著的特点是测得的中子寿命值随着测定的年代不断减小。应当看到,除了Kugler等人(1978)和Kostvintsev等人(1980)的实验是采用“瓶装”超冷中子的方法外,其余的都是采用强中子束的方法。此外,Spivak等人(1955)、Sosnovski等人(1959)和Bondarenko等人(1978)的实验基本上是采用相同的装置,只不过有所改进而已。由Christensen

等人(1967, 1972)所给的两个值是出自于同一个实验的数据。

三十年前,为精确测定中子的半衰期,Robson做出了许多努力。在他的实验装置中,中子衰变产生的质子被偏转出中子束而引导到一个电荷放大器的初级上去,这电荷放大器就起一个探测器的作用。 β 粒子则用磁谱仪聚焦到一个蒺晶体闪烁体上。这样一来,既记录了中子衰变产生的两个粒子,又利用来自两个探测器的符合事件消除了本底。源的有效体积是按机械模型确定的轨道精心计算得到的。对于必须考虑的符合探测效率的空间变化的计算则甚为复杂。

Robson 得到的中子半衰期值 $t = \tau \ln 2 = 12.8 \pm 2.5$ 分钟。20%的误差是因为很难以一定的精度确定中子发生衰变的确切位置。D'Angelo 进行的实验大大地消除了这一误差源。他拍摄了几例中子在扩散云室中的衰变事件。然而,他给出的结果 $t = 12.7 \pm 2.5$ 分钟表明,他并没有对 Robson 实验中的误差有任何改进。这主要是由于在 D'Angelo 的实验中计数的统计性太差,而且无法消除云室中气体发生核反应产生的干扰本底。这个实验的一个重要特点是使用磁镜把中子束偏转到云室中去,从而降低了 γ 本底,预注管差不多也起了引导中子的作用。

第一次精确测定中子半衰期的是 Sosnovski 和他的同事们进行的。这些实验开始于1950年左右,而初步结果是在1955年在日内瓦举行的原子能和平利用第一次国际会议上公布的。该实验是让准直后的慢中子束通过一段电位为20kV的空心电极,中子衰变产生的质子偏离中子束而进入一个自由区,再被聚焦到一个接地的带窗球型正比计数器上。既然质子是经过一段直线运动后再被几乎为100%的效率探测到,所以源的有效体积的确定就是一个直接可以计算的问题。然而,在中子源和计数器灵敏区之间,质子必须通过几个栅极(不多于四个),要计算相应的传输系数却是很困难的。用这种装置测得的中

子半衰期值为 11.7 ± 0.3 分钟。还有一个值为 10.13 ± 0.09 分钟(Bondarenko等人1978),这个值由于太偏小已于最近被废弃了。新老结果之间的差别是因为在较早期的工作中,由于电荷交换碰撞引起的过大本底造成了质子丢失。在这些实验中,发生在源的有效体积中的衰变事件,只有很小一部分能够直接被记录到。由于收集的立体角很小,所以必须按源的真实体积刻度所测的结果。

在测定中子半衰期的一系列实验中,Christensen和他的同事们在丹麦 Risø 研究基地的 Danish 核实验室进行了一个实验。他们建立了一个8000高斯的磁场,磁力线垂直于中子束方向,从而使所有发生在给定区域内的衰变事件都能被记录下来。磁场迫使中子衰变产生的电子离开中子束绕磁力线作螺旋运动,以保证电子最终打在一块大的塑料闪烁体上,闪烁体中产生的光脉冲通过光导送入置于磁场之外的光电倍增管上。即使有电子从塑料闪烁体中反散射出来,它也不可能到达中子束对面的第二个塑料闪烁体上。正因为如此,衰变事件被记录下来。这种装置克服了确定源的有效体积所遇到的许多困难。值得注意的是,在这个实验中使用的是一个 ^3He 正比计数器监测中子,而不是采用传统的箔片中子探测器。这种计数器是基于 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反应的。虽然 ^3He 是,而且的确是慢中子的1/V吸收体。

Christensen 的这个实验的最后结果是,中子的半衰期 $t = 10.61 \pm 0.16$ 分钟,这个结果与苏联人的结果不相同。无论是 Christensen 的早期实验还是后来通过改进的实验,其误差都在3-4%之间。

中子半衰期的最新实验测定是 Byrne 等人(1980)在法国Grenoble研究中心的 Laue-Langevin 研究所高通量堆上进行的。冷中子束($\approx 10^{-4}\text{eV}$)按常规方法引入由超导磁铁产生的12000高斯的磁场中。在这个磁场中,电子和质子都将按最大半径不超过3.5mm的近似螺旋的轨道运动。中子束则通过一个平行

于磁场轴线，电位为零的空心圆柱形电极，在这个电极的两边，两个同轴电极保持1KV的电位。对中子衰变产生的低能质子(≤ 0.75 keV)来说，这种电场和磁场的组合就起一个势阱的作用。在一个适当的释放脉冲到来之前，质子可以在一个有效时间内(10^{-3} -10秒)被势阱捕获，并由一个偏压为-30kV的硅面垒探测器探测到。这个装置的主要特点是，如果质子被捕获的时间是 T_c ，那末，输出的质子谱则是在释放脉冲发出后的 T_c ($\ll T_c$)时间内进行取样的，所以本底将减小 T_c/T_c 倍。实验获得的这个比值约为 10^{-4} 。测得的质子谱基本上只含有自由本底。用该方法测得的中子半衰期为 10.82 ± 0.21 分钟。

四、结 论

对现有的实验数据分析表明，中子衰变的角关联系数 a 只有一个值(Stratowa等人1978)，自旋关联系数 A 有两个值(Krohn和Ringo 1975 Erozolimskii等人1979)，这是比较精确的。用这些关联系数，可以导出弱耦常数的比 $\alpha = 1.257 \pm 0.009$ 使用这个 α 值，结合 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁 ft 值，可以算出中子的半衰期为 $t = 10.45 \pm 0.13$ 分钟。这个估算值可以与三个较精确的测定值相比较。(参看图1)。这三个测量值分别为 $t = 10.61 \pm 0.61$ 分钟(Christensen等人1972)， $t = 10.13 \pm 0.09$ 分钟(Bondarenko等人1978)和 $t = 10.82 \pm 0.21$ 分钟(Byrne等人1980)。这些值在所给的误差范围内基本上是相符的。但 $t = 10.13$

± 0.09 分钟这个值太小了。因此，我们可以采用Wilkinson(1981)的观点，废弃这个值。将其余的两个值取平均，从而可以得到直接测量的最佳估计值为 $t = 10.69 \pm 0.13$ 分钟。

上面给出的估算值和实验测定值，在(而且只有在)一定的误差范围内是相符的。因此，看来可以采用一个加权平均值来作为真实的 t 值。加权平均的结果为 $t = 10.57 \pm 0.10$ 分钟。Wilkinson(1982)最近对所有的数据进行了分析，并给出推荐值 $t = 10.39 \pm 0.10$ 分钟。这个值稍小于前面所给的值，是因为在这个推荐值中包括了Bondarenko等人(1978)的实验测定值的贡献。

还可以采用一种相反的近似方法来估算中子的半衰期，这种方法是，用 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的 ft 值结合每一个实测的中子半衰期值，计算出 α 的值，并把它与用关联数据导出的 α 值相比较，来估算中子半衰期的大小。用这种方法得到的结果再一次表明Bondarenko等人的值确实太小了。排除这个值，其余的数据是基本相符的。

浅显的事实是，虽然中子的半衰期的真实值看来是倾向于 $t = 10.6 \pm 0.2$ 分钟(即Christensen等人的测定结果)，但仍然存在相当大的误差，它也可能含有很大的偶然性。这种情况是令人很不满意的，看来只有留待于新一代实验去解决。新一代实验已经开始起步了，它很可能不必采用“瓶装”超冷中子源。

(李业祥 译自Institute of Physics
Conference Series No. 64)