

原子核双 β 衰变和轻子数不守恒

吴 慧 芳

原子核双 β 衰变实质上是二个单 β 衰变同时发生的过程,是一个二级弱相互作用过程.原子核单 β 衰变的一个典型过程是中子衰变为质子,并放出电子和反中微子,即 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. 自从1914年查德威克测量 β 衰变的连续谱以来, β 衰变的研究一直是原子核物理和粒子物理的重要研究课题之一.我们知道,李政道和杨振宁提出的宇称不守恒定律,就是吴健雄通过原子核的 β 衰变研究而得到实验证实的.无独有偶的是原子核双 β 衰变的研究和自然界的另一重要守恒定律——轻子数守恒律是否破坏密切相关.

一、轻子数是绝对守恒的吗?

实验上发现在中子的单 β 衰变过程中放出的电子 e^- 总是和电子型反中微子 $\bar{\nu}_e$ 在一起,而荷电 π 介子衰变是

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

即与 μ^- 一起的是 μ^- 型反中微子,与 μ^+ 一起的是 μ^+ 型中微子.又如 μ^- 子衰变为一个电子和一个 e^- 型反中微子和一个 μ^- 型中微子

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

等等.这里显然存在着一个规律制约着衰变后的产物,这一规律就是自然界的轻子数守恒律.

电子、 μ^- 子、中微子都只参与弱相互作用是质量比较轻的粒子,人们称它们为轻子,如果赋予它们以轻子数:

	轻子 e^-	ν_e	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^-	ν_μ	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$
e^- 型轻子数	1	1	-1	-1	0	0	0	0
μ^- 型轻子数	0	0	0	0	1	1	-1	-1

你就可以发现自然界所有过程中的 e^- 型轻子数和 μ^- 型轻子数分别守恒.例如 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$, μ^- 和 ν_μ 的 μ^- 型轻子数都是-1,反应前后是守恒的,电子和电子型反中微子的 e^- 型轻子数分别为+1和-1,反应前后的 e^- 型电子数都是零.类似地可以考察所有的过程都是遵从轻子数守恒律,无一受到破坏.

1977年发现了重轻子 τ ,它的质量是电子的三千五百倍,但所有的性质都与电子和 μ^- 子很相近,它具有 τ^- 型轻子数

$$\tau^- \nu_\tau \tau^+ \bar{\nu}_\tau$$

$$\tau^- \text{型轻子数 } 1 \quad 1 \quad -1 \quad -1$$

同样,所有物理过程也满足 τ^- 型轻子数守恒律.在自

然界中也没有发现下述类型过程

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \gamma$$

.....

这表明 e^- 型、 μ^- 型、 τ^- 型轻子数是分别守恒的.

随着宇称不守恒,CP破坏的发现,人们自然要问:轻子数是绝对守恒的吗?从实验上已进行了多年的测量都没有发现破坏轻子数守恒的过程.近十多年来,规范理论研究的进展表明自然界中这个基本定律——轻子数守恒律——可能不是绝对守恒的.例如大统一理论曾预言质子是具有寿命的并不能长生不老,理论预言它可以衰变为介子和电子等过程:

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+ (K^0 + \mu^+, \dots)$$

显然这一类过程中轻子数是不守恒的,初态是质子,轻子数为零,终态有正电子,轻子数为-1.不仅轻子数不守恒,而且重子数也不守恒,初态重子数为1,终态重子数为零.然而十多年来,人们努力寻找质子衰变的事例就是找不到,因而也没有发现轻子数不守恒的过程.

尽管实验上还没有找到轻子数不守恒的过程,但轻子数绝对守恒的信念已在动摇.十多年来,无论是从理论上还是从实验上都在探讨轻子数破坏的问题.随之,五十多年前就开始了的双 β 衰变研究领域又重新活跃起来.

二、原子核双 β 衰变——检验轻子数是否守恒的探针

原子核的双 β 衰变是指原子核放出2个电子或2个正电子,或发射一个正电子同时又俘获一个轨道上的电子,或俘获2个轨道上的电子的过程,即

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2),$$

这是一个二级弱相互作用过程,或者说是2个单 β 衰变同时发生的过程.显然,它的几率要比单 β 衰变的几率小得多.在某些偶偶核它可能被观察到,因为在这些偶偶核中单 β 衰变或者被能量禁戒,或者由于角动量不匹配而被大大压低.

从理论上讲,原子核的双 β 衰变可以分为两类:一类是放中微子的双 β 衰变(记为 $2\nu\beta\beta$ 衰变),例如

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e;$$

另一类是不放中微子的双 β 衰变(记为 $0\nu\beta\beta$ 衰变),例如

$$(A, z) \rightarrow (A, z + 2) + 2e^-$$

这两类过程又与中微子的性质密切相关,即取决于中微子是狄拉克中微子还是马约那拉中微子。在 $2\nu\beta\beta$ 衰变中,中微子 ν_e 是狄拉克中微子或马约那拉中微子,对于狄拉克中微子,它的静止质量为零,中微子和反中微子是不同的;轻子流中只有左手流,轻子数是守恒的。在 $0\nu\beta\beta$ 衰变中,中微子 ν_e 是马约那拉中微子,它的质量不等于零,可以很大也可以很小;对于马约那拉中微子,中微子和反中微子是相同的;轻子流除了有左手流外,还有右手流,轻子数是不守恒的。所以从实验上寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变,是我们的重要研究课题之一。

回顾一下双 β 衰变研究的历史,对了解这两类双 β 衰变过程是有益的。1935 年戈珀-梅耶在维格纳的建议下首先提出 $2\nu\beta\beta$ 衰变存在的可能性,并利用费米 β 衰变理论估算了 $2\nu\beta\beta$ 衰变的几率。1950 年前后,原子核的双 β 衰变现象已为实验所揭示,并给出了双 β 衰变寿命的下限。其寿命值大于 $0\nu\beta\beta$ 衰变理论计算所给出的预料值,而与 $2\nu\beta\beta$ 衰变理论计算结果一致。这意味着 $2\nu\beta\beta$ 衰变过程有可能存在,而不利原来预测中的 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程。

1957 年,李政道、杨振宁提出的弱作用过程中宇称不守恒的理论得到了实验证实,这也最终地确立了 $V-A$ 型弱相互作用理论。对于无质量的狄拉克中微子(它是螺旋度的本征态),即使中微子和反中微子一样,也不可能存在 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程,因为 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程一定破坏轻子数守恒律和 γ , 不变性,这与 $V-A$ 型弱相互作用理论相矛盾。因此,1957 年以后双 β 衰变的理论研究和实验进展不大,研究兴趣下降。

然而到了七十年代,很多理论模型提出了轻子数不守恒以及带有质量的中微子等问题,引起了人们极大的兴趣。原子核的双 β 衰变正是研究这些问题的极为敏感的探针。如果实验上确认 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程存在,那末就证实了轻子数不守恒以及中微子具有质量。

三、怎样探测和研究原子核双 β 衰变

原子核的双 β 衰变仅仅在那些由于单 β 衰变被能量禁戒或被大大压低的偶偶核中才能发生。因此实验上将集中寻找那些可以发生双 β 衰变的母核同位素。到目前为止,可能发生双 β -衰变的母核同位素有 35 个,例如 ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{136}Xe , ^{238}U 等等。而能发生双 β^+ 衰变的核只有 6 个,它们是: ^{78}Kr , ^{90}Rn , ^{104}Cd , ^{124}Xe , ^{130}Ba 和 ^{136}Ce 。此外,正电子发射、电子俘获以及双电子俘获过程总是与双 β^+ 衰变过程相伴随的,但它们也会出现在双 β^+ 衰变被能量禁戒的时候。自然界中仅发生正电子发射、电子俘获和双电子俘获的同位素还有 ^{90}Cr , ^{98}Ni 等 16 个核,而仅发生双电子俘获的同位素还有 ^{36}Ar 等 12 个核。

双 β 衰变的实验探测有以下三种方法:

(1) 直接观察法。这是在实验室条件下进行的,在母核同位素样品中直接探测同时发射(或同一点发射)的电子或正电子对,从发射的电子或正电子的能谱中,可以给出双 β 衰变的直接证据,并且可以知道双 β 衰变的种类,即是 $2\nu\beta\beta$ 衰变,还是 $0\nu\beta\beta$ 衰变。主要实验方法是:源和探测器合一的计数器法,源和探测器合一的电离室法,径迹识别法和源与探测器分开的计数器法等等。直接测量法根据核的天然丰度、衰变能量释放、衰变相空间、源和探测器能否合一,以及降低本底的需要等,最感兴趣的双 β 衰变核为 ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe 和 ^{150}Nd 。

从 1948 年法赖马恩第一个进行了双 β 衰变的实验测量后,40 多年来,尤其是近 20 年,双 β 衰变的实验已在世界上许多国家的实验组内进行,实验观察所给出的只是寿命的下限,唯有 1987 年 8 月美国欧文实验组用时间投影室作探测器,采用径迹识别法,观察到 $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$ 的 $2\nu\beta\beta$ 衰变事例,测量其寿命为

$$\left(1.1^{+0.8}_{-0.3}\right) \times 10^{20} \text{ 年, 置信水平为 } 68\%, \text{ 这是双 } \beta \text{ 衰变研究的重大突破。}$$

另外特别值得一提的是高能所已进行了 ^{48}Ca 的 $0\nu\beta\beta$ 衰变寿命的测量,并获得了初步的结果,实验还在继续进行,可望得到更好的结果。

由于双 β 衰变的寿命很长,实验的关键问题是:如何增加实验中双 β 衰变母核的数量?如何把本底减少到对实验结果影响不大的程度?除了采用抑制本底的一些实验手段以外,为了减少本底,各实验组都将双 β 衰变实验放在地下很深的地方进行(如矿井,隧道,大坝下等等)。例如,高能所的双 β 衰变实验就是在门头沟煤矿井下进行的。

(2) 地质化学方法。在自然界中寻找含有双 β 衰变母核 (A, z) 的样品,在漫长的地质年代中,如果这种核发生双 β 衰变,子核 $(A, z \pm 2)$ 的相应含量或丰度会变大,若与不含母核的样品比较,如果子核的含量或丰度高出平均值,说明母核发生了双 β 衰变,即可得到双 β 衰变的实验证据。用这个方法测量了 ^{82}Se , ^{136}Xe 和 ^{130}Xe 的双 β 衰变寿命。

(3) 放射化学方法。其原理和地质化学方法相同,只是它是在实验室条件下进行的, ^{238}U 的双 β 衰变寿命就是用此法测得的。

在理论上给出双 β 衰变寿命以便和实验比较,并从中抽出有关中微子质量以及右手流混合参量大小的信息是很重要的。这些理论工作不仅依赖于原子核双 β 衰变的机制,而且依赖于原子核矩阵元的计算,原子核双 β 衰变理论是粒子物理和核物理的交叉课题。因此,无论从理论上还是从实验上原子核 β 衰变的研究是一个很有趣且有重要意义的课题,它的深入研究,将明确回答自然界的轻子数是否守恒性以及有关中微子质量的问题。