



我国物理学家王淦昌与中微子的发现

陈世豪

(蓬安县蓬安中学 四川 南充 637800)

(收稿日期:2021-03-19)

摘要:梳理了中微子的发现历程和历史背景,重点介绍了王淦昌院士在发现中微子方面的研究工作与关键性突破,展现了中国科学家对人类文明的贡献,也展现了中国力量和中国智慧.

关键词:中微子 发现历程 王淦昌 中国智慧

1 历史背景

1896年,法国物理学家亨利·贝克勒尔发现铀化合物能放出某种射线,使密封完好的照相底片感光,此后,人们不断探索这些来自原子核的强烈辐射究竟是什么东西.

居里夫人认为贝克勒尔发现的现象具有普遍性,并首先使用“放射性”一词来描述物质的这种性质.她与丈夫皮埃尔·居里一起,经历了艰苦的提纯工作,在1898年从沥青铀矿盐中分离出一种放射性比铀强得多的新元素,居里夫人将这种新元素命名为钋,以纪念自己的祖国波兰.在1902年,居里夫妇又发现了另一种放射性更强的金属——镭^[1].

发现钋和镭后,科学家们又陆续在自然界中发现了多种放射性元素,人们发现,比铀元素(原子序数83)重的元素都具有放射性,较轻的元素许多也有放射性的同位素,例如 $^{14}_6\text{C}$ 就具有放射性.

1900年前后,汤姆孙建议卢瑟福研究这个课题.卢瑟福和他的学生们通过将镭元素产生的射线引入强磁场中,结果发现射线立即分成3股,其中两股左右分开,分别向两个方向偏转,另外一股不偏转,一直向前,卢瑟福将它们分别命名为 α 射线、 β 射线和 γ 射线,如图1所示.

进一步的研究表明: α 射线是氦原子核组成的粒子流, β 射线是高速电子流, γ 射线是高能光子流(即波长极短的电磁波).

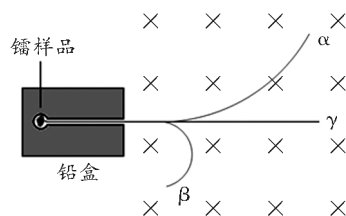
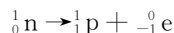


图1 3种放射线在磁场中的偏转

当时人们已经确知原子核中不可能存在电子,那么原子核放出 β 射线的电子,只能是临时产生的,比较可能的一种方案是:原子核中一个中子放出一个电子后,转变为一个质子,核反应方程为



后来,人们进一步的研究表明,这个假设的方案存在严重的问题:它虽然遵守电荷守恒定律,但却明显违反物理学上3个最基本的守恒定律.

首先是违反角动量守恒定律.打个比方,微观粒子都像一个个微型陀螺在转动,物理学上称之为“自旋”,参与反应的粒子自旋要守恒.然而,中子、质子、电子的自旋都是 $\frac{1}{2}$,一个质子和一个电子的自旋,无论怎样合成也不可能等于中子的自旋.

其次,违反动量守恒定律.原子核发生 β 衰变时,相当于一个炮竹一炸为二,按动量守恒定律:小碎片(电子)的运动方向,与大碎片(新原子核)的反冲方向应该正好相反,如图2所示.但实验观测发现,电子的飞行方向,与产生的新原子核的反冲方向,很难出现严格相反.

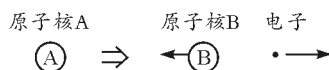


图2 β 衰变后粒子运动方向示意图

最严重的问题是,上述原子核的 β 衰变方案,似乎对能量守恒定律提出了挑战:人们在放射线的能量进行测定时,发现在 ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e}$ 过程中,反应前后的能量并不守恒.

2 泡利的假设

能量守恒定律是自然界的基本定律,到那时为止,尚未发现有哪个自然过程不遵守能量守恒定律.为了解释 β 衰变中的这些矛盾,科学家们发挥想象力,提出了种种方案.

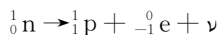
1930年,奥地利物理学家泡利提出了一个大胆的假设:如果在 β 衰变过程中,原子核在放出电子的同时,还伴随放出一种尚未被我们发现的未知粒子,那么,上述种种矛盾都可以立即化解.换言之,先承认有一种未知粒子悄悄参与了 β 衰变,再根据各种守恒定律的要求,来反推这种未知粒子的各种性质.

首先,根据电荷守恒定律,泡利假设的未知粒子必须不带电,是中性的.泡利假设提出后不久,意大利物理学家费米把这种尚未发现的中性粒子,命名为“中微子”,记作 ν .

其次,根据能量守恒定律,这种未知粒子的静止质量应当为零.这种粒子与物质的相互作用极弱,以至仪器很难探测得到.未知粒子、电子和反冲核的能量总和是一个确定值,能量守恒仍然成立,只是这种未知粒子与电子之间能量分配比例可以变化而已.

至于动量守恒方面,由于有第三个粒子参与,动量守恒应当容易满足.而角动量守恒方面,如果假设这种未知粒子的自旋为 $\frac{1}{2}$,角动量守恒也能够成立.

在泡利“中微子”假设的基础上,费米提出了新的 β 衰变理论,他认为在原子核的 β 衰变中,中子在转变成质子时,产生了电子和中微子,即



3 王淦昌方案

泡利的中微子假设和费米的 β 衰变理论,虽然在理论上成功地解决了所有矛盾,但是,毕竟实践是检验真理的唯一标准.由于谁也没有测到过中微子,因此,人们对这一新理论持怀疑态度,就连泡利本人

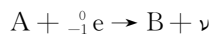
也曾对朋友说过,中微子恐怕永远也测不到.

的确,中微子非常难以测到,这是因为它是中性粒子,与其他粒子不存在电磁相互作用,另外它质量极小,身轻如燕,人们很难捕捉到它.有人估算,一个中微子要穿透1000光年厚的铁块,才可能与其他粒子碰到而发生相互作用,把7300亿个地球排成一排,也只能使1个中微子的前进步伐受阻.因此,证实中微子的存在,就成了一件极困难的事情.

泡利提出中微子假说的时候,德国柏林大学来自中国的年轻研究生王淦昌,也在研究 β 衰变和检验中微子的实验.寻找中微子的实验开始于1933年,到1940年的时候已经有6,7个实验能定性地支持中微子的存在,但没有一个能拿出定量的确凿的证据来.

1940年,已学成归国的王淦昌仔细研究了国际上有关的文献后发现,以前寻找中微子的实验太过复杂:原子核A变为原子核B后放出一个正电子和一个中微子,发生 β 衰变后的生成物有3个粒子——新原子核、正电子、中微子,即 $A \rightarrow B + {}^0_{+1}\text{e} + \nu$,这个过程难以准确地测量中微子的能量和动量.

怎样寻找一种比较简单的反应过程,或者说寻找一种只有2个粒子生成的 β 衰变呢?王淦昌注意到一种叫做“K俘获”的过程,这是原子核A俘获了离它最近的K层电子轨道上的一个负电子,而变为另一种原子核B,并放出一个中微子的过程^[2],即



在K俘获的过程中,末态只有2个粒子,王淦昌指出:“当一个放出正电子的 β 衰变,不放出正电子而是俘获一个K层负电子时,反应后新元素的反冲能量和动量,仅仅依赖于所放出的中微子,只要测量反应后元素的反冲能量和动量,就很容易找到放射的中微子的能量和动量.”

王淦昌根据这一思路,在论文中建议用 ${}^7_4\text{Be}$ 的K电子俘获过程去探测中微子的存在.他的论文完成于1941年,当时正值抗战的艰苦岁月,他任教的浙江大学已内迁至贵州遵义,那里条件很差,根本无法做如此复杂的核物理实验.于是,他把论文《关于探测中微子的一个建议》寄给国际权威杂志《物理评

论》，并发表在该刊1942年1月号上^[3]。王淦昌的论文全文如下：

A Suggestion on the Detection of the Neutrino

KAN CHANG WANG

It is known that the presence of the neutrino cannot be detected by its own ionization effect. It appears that the only hope of getting evidence of its existence is by measuring the recoil energy or momentum of the radioactive atom. Crane and Halpern¹ have, by measuring the momentum and energy of the emitted β -ray and the recoil atom with a cloud chamber, obtained evidence pointing toward the existence of the neutrino. However, owing to the smallness of the ionization effect of the recoil atom, it seems worth while to consider a different method of detecting it.

When a β^+ -radioactive atom captures a K electron instead of emitting a positron, the recoil energy and momentum of the resulting atom will depend solely upon the emitted neutrino, the effect of the extra-nuclear electron being negligible. It would then be relatively simple to find the mass and energy of the emitted neutrino, by measuring the recoil energy and momentum of the resulting atom alone. Moreover, this recoil is now of the same amount for all atoms, since no continuous β -rays are emitted. We take for example the element Be^7 which decays in 43 days with K capture in two different processes:²

$$\text{Be}^7 + e_K \rightarrow \text{Li}^7 + \eta + (1 \text{ Mev})$$

and

$$\text{Be}^7 + e_K \rightarrow (\text{Li}^7)^* + \eta + (0.55 \text{ Mev})$$

$$(\text{Li}^7)^* \rightarrow \text{Li}^7 + h\nu + 0.45 \text{ Mev}$$

The first process is relatively large, about 10 to 1 in comparison with the second process. The recoil energy of the first process is, by assuming the mass of neutrino to be zero, about 77 ev while that of the second process is about one-third of

that amount. This recoil energy would have to be detected and measured in some way, and a correction would have to be made for the disturbances due to the γ -rays and the soft x-rays (originating from the replacement of the K electrons by outer electrons). The recoil energy of certain K-capture atoms, particularly those having isomeric properties so that the K capture is followed by an α -decay, may also be possibly detected by chemical means. In this case, if the radioactive substance is prepared to form some suitable compound of non-polar type, the recoil energy of the resulting atom will break the bond and thus be detected.

¹ H. R. Crane and J. Halpern, Phys. Rev. 53, 789(1938); Phys. Rev. 56, 232(1939).

² R. B. Roberts, N. P. Heydenburg, and G. L. Locher, Phys. Rev. 53, 1016(1938); L. H. Rumbaugh, R. B. Roberts, and L. R. Hafstad, Phys. Rev. 54, 657(1938)^[4].

文章一发表就在国际上引起反响和同行响应，有些物理学家马上按他的方案进行实验。美国物理学家阿伦看到论文之后，立马进行了实验，同年6月，《物理评论》杂志发表了阿伦根据王淦昌的方案所做的实验《一个中微子存在的实验证据》，实验结果肯定了王淦昌的构想，取得了肯定的结果，这是1942年全球物理学界的一件大事。

1986年，中科院高能物理研究所李炳安和时任美国纽约州立大学石溪分校的杨振宁曾在文章中评价说：“其中一个中心问题是如何直接验证它的存在。关于这个问题，1934至1941年间文章很多，可是都没有抓住关键……1941年10月王淦昌先生在浙江大学（那时正值抗日战争，浙江大学避难在贵州遵义、湄潭）写了一篇短文，提出用K电子俘获的办法寻找中微子。这是一篇极有创造性的文章，在确认中微子存在的物理工作中，此文一语道破了问题的真谛。”“从1942年开始到五十年代初，实验物理学家按王淦昌先生的建议进行了一系列的工作，最终确

认了中微子的存在。”^[5]

王淦昌后来回忆说:利用这次养病的机会,我集中阅读了近几年有关中微子问题的论文,看到不少物理学家所做过的这方面的实验.其中有一个实验引起了我的注意,那就是1939年克兰和哈尔彭的核反冲效应的研究.他们用一个云雾室,测量 ^{38}Cl 放射出来的 β 射线和反冲原子核的动量和能量,获得中微子存在的证据.我认为他们的方法不是最好的,因为在这个核反应中,末态有三体,这3种东西分不清楚,就很难测出中微子,最好能够变三体为二体.我反复思考了一段时间,想到了K俘获的方法.在K俘获的过程中,末态只有二体,就是反冲核和中微子两种粒子,不放射 β 射线,所以反冲核的能量是单值能量,测量它的能量,就可以得到关于中微子的知识了.

继论文《关于探测中微子的一个建议》发表6年后的1947年,王淦昌又在美国《物理评论》杂志上发表了《建议探测中微子的几种方法》,在这篇论文里又提出了3种新的探测中微子的方法.第一种方法是用从 ^{13}C 或 ^{14}N 中得到的 ^{12}B ,或用从核反应 $^{16}\text{O}(n, p)$ 中产生的 ^{16}N 来进行反冲研究从而探测中微子,因为 ^{12}B 有很大的 β 辐射能量(12 MeV),而且质量比较小,所以用它探测原子核反冲动量,比克兰和哈尔彭用 ^{38}Cl (只有5 MeV的 β 辐射能量)要容易得多,而 ^{16}N 虽然不如 ^{12}B ,但却比 ^{38}Cl 有利.第二种方法是利用 ^{24}Na 在经过 β 辐射后能辐射 γ 射线,发生内部转换而放出 e^- 射线,通过云雾室或 e^- 辐射定向重合计算技术,来探测中微子.第三种方法是“应用具有K放射性质的某些物质,如 ^7Be , ^{41}Ca , ^{51}Cr 等,这些物质的原子核有一些会在较长寿命的 γ 辐射后捕获K电子,……由K俘获的反冲,两个同分异构体被分离开来而进行检验.这个分离的成功将清楚地证明中微子的存在”.

需要特别强调的是,在这篇论文中,王淦昌还提出了通过裂变探测中微子的全新思路,这是在之前科学界从未有人提出过的构想,这为中微子的研究打开了全新的思路,这一观点具有极强的创造性和科学预见性,指明了进一步研究中微子的道路和

方向^[6].

阿伦按王淦昌的建议所做的 ^7Be K电子俘获实验,由于用的样品较厚及孔径效应,没能观察到单能的 ^7Li 反冲,没能完全实现王淦昌的建议.以后又有许多人按照这一方向继续工作,直到1952年楼德拜克和阿伦用气体样品和飞行时间法做了 ^{37}A 的轨道电子俘获实验($^{37}\text{A} + e_K \rightarrow ^{37}\text{Cl} + \nu$ 占93%, $^{37}\text{A} + e_L \rightarrow ^{37}\text{Cl} + \nu$ 占7%),这个实验在世界上第一次发现单能的反冲核, ^{37}Cl 反冲能量的实验值与理论预言值完全符合[预言 ^{37}Cl 的飞行速度为 (0.711 ± 0.04) cm/ μs ,测到的速度峰值为 0.714 cm/ μs].就在楼德拜克和阿伦的实验发表了一个多月之后,戴维斯发表了他用 ^7Be 做的K电子俘获实验结果,他测到 ^7Li 的反冲能量为 (55.9 ± 1.0) eV[理论预言值为 (57.3 ± 0.5) eV],与王淦昌预期的完全吻合.从1941年王淦昌提出确认中微子存在的办法后,历经10年,到1952年实验确认中微子的存在.

在此基础上,1956年,美国物理学家莱因斯和柯万就是在王淦昌的构想上进行实验,通过裂变直接探测到中微子,莱因斯因此获得了1995年诺贝尔奖.后来美国戴维斯也根据王淦昌的构想发现太阳中微子失踪,获得2002年诺贝尔奖.

自然科学的发展道路是崎岖而漫长的,每一个重大发现都凝聚着科学家的智慧和艰辛.中微子的发现历程,展现了中国科学家对人类文明的贡献,也展现了中国力量和中国智慧.

参考文献

- 1 管寿沧.普通高中教科书物理选修3-5[M].北京:教育科学出版社,2006.39~42
- 2 褚圣麟.原子物理学[M].北京:高等教育出版社,1979.304~308
- 3 王淦昌.永无止境的探索:自然科学基本问题[M].上海:上海科技教育出版社,1997.57~62
- 4 王淦昌.关于探测中微子的一个建议[J].物理评论,1942(1)
- 5 李炳安,杨振宇.王淦昌先生与中微子的发现[J].物理,1986(2):758~761,738
- 6 刘宏葆,何亚平.王淦昌与中微子的早期研究[J].自然辩证法通讯,1994(6):44~49