

# 王淦昌先生与中微子的发现

李 炳 安

(中国科学院高能物理研究所)

杨 振 宁

(美国纽约州立大学石溪分校理论物理研究所)

在粒子物理的历史中,中微子是“基本”粒子家族中特别神奇的一员。自从1930年泡利<sup>[1]</sup>提出中微子可能存在的假说和1934年费米<sup>[2]</sup>提出划时代的 $\beta$ 衰变理论以后,环绕着中微子的理论和实验工作很多,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,从1934到1941年间文章很多,可是都没有找到问题的关键,这是因为中微子不带电荷,而且几乎完全不与物质碰撞<sup>[3]</sup>(譬如,可以自由地穿过地球),不易直接用探测器发现。1941年10月王淦昌先生在浙江大学(那时正值抗日战争,浙江大学搬迁到贵州省遵义市)写了一篇短文<sup>[4]</sup>,提出用 $K$ 电子俘获的办法寻找中微子。在确认中微子存在的物理工作中,是王淦昌先生一语道破了问题的关键。这是一篇极有创建性的文章,此后的十余年间,陆续有实验物理学者按照这一建议做了许多实验,终于在五十年代初成功地证实了中微子的存在。

## 一、中微子假设和费米理论 (1930—1934年)

卢瑟福于1898年在卡文迪什实验室研究放射性时,命名放射物质辐射出的两种射线分别为 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线。贝克莱(Bucherer)和纽曼(Neumann)分别于1909年和1914年用测量荷质比( $e/m$ )的办法证实 $\beta$ 射线是电子束。查德维克(Chadwick)在1914年发现 $\alpha$ 射线和 $\gamma$ 射线的谱是分立的,而 $\beta$ 射线的谱却是连续的。后者似乎与原子核处于分立的量子状态

的事实不一致,产生了所谓能量危机,即所谓能量不守恒问题。为了解释此问题,玻尔认为在放射 $\beta$ 射线时,能量仅在统计的意义下守恒,对于单个反应并不守恒。可是泡利持有另一种看法。他在1930年提出,在原子核内部除存在质子和电子外(当时认为原子核是由质子和电子构成的)还存在一种自旋为 $1/2$ 的电中性粒子(当时泡利称它为中子),它带有磁矩,在 $\beta$ 衰变过程中,它与电子同时被放射出来。由这一机制可以解释 $\beta$ 谱的连续性,而能量守恒依然保持。但是,泡利对于自己猜想的可靠性并不是信心十足。1931年泡利访问普林斯顿时,在纽约的一个中国饭馆吃饭,与莱比(Rebi)聊天谈到他的“中子”假说时说<sup>[5]</sup>:

“我认为我比狄喇克聪明,  
我不认为我将发表它。”

(当时,真正相信狄喇克理论的人很少。)在1931年的Pasadena会议上,泡利重申了他的新粒子假说,并指出,按照这一假设可以预言, $\beta$ 射线的能谱有一个尖锐的上限,但是按照玻尔的能量不守恒的看法, $\beta$ 谱将有一个强度逐渐衰减的长尾巴。

1934年,费米提出了划时代的 $\beta$ 衰变理论。他的理论依据有以下三点:

1. 泡利的中子假设(费米改称为中微子)。
2. 海森伯的原子核由质子和中子构成的结构模型<sup>[6]</sup>。
3. 与原子的光辐射理论相类似<sup>[7]</sup>,在 $\beta$ 衰变中电子和中微子被产生出来。

在费米理论中 $\beta$ 衰变的基本过程是

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

费米算出了 $\beta$ 衰变的连续谱,与1933年实验测到的ReE的 $\beta$ 谱比较十分吻合.据此,费米进一步推断中微子质量是零,或至少比电子质量小得多.费米理论推翻了在 $\beta$ 衰变中能量不守恒的观点,为一类新型的相互作用——弱相互作用的研究奠定了基础.不仅如此,在这一理论中费米第一次使用了费米子的产生、消灭算符,这在当时的理论界造成了极大的冲击,开始了现代场论研究的新时代<sup>[1,2]</sup>.塞克莱(Sege)回忆费米创建这一理论后说<sup>[6]</sup>:

“按照费米自己的估价,这是他在理论方面最重要的工作.他告诉我,由于这一发现,他将被人们所记住”.

在费米理论提出后不久,居里和约里奥<sup>[9]</sup>发现了放射正电子的反 $\beta$ 衰变.维克(Wick)指出<sup>[10]</sup>,在费米理论中存在

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

这种反 $\beta$ 衰变过程(当时,维克称这一过程中的中微子为反中微子).维克和稍后的贝特和派尔斯<sup>[11]</sup>根据费米理论又预言了轨道电子俘获过程

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

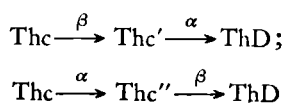
的存在.这一重要过程由阿瓦莱兹(Alvarez)<sup>[12]</sup>于1938年观察到了.

## 二、1941年前寻找中微子的实验

费米理论为中微子的存在奠定了坚实的理论基础.当时的重要问题是,如何从实验上确认中微子的存在.由于中微子不带电,这类实验在当时相当困难.1941年前已经有许多这方面的实验.

### 1. $\beta$ 衰变中的能量关系

埃里斯(Ellis)和莫特(Mott)<sup>[13]</sup>于1933年分析了下面两个过程:



他们指出,在考虑了放射 $\alpha$ 和 $\beta$ 粒子之后放射的 $\gamma$ 射线的能量修正,所得到的Thc和ThD的能量差恰恰是这两个过程中 $\alpha$ 粒子的能量和 $\beta$ 粒子能量最大值的和.

### 2. $\beta$ 谱的上限

海德逊(Henderson)<sup>[14]</sup>于1934年发现,Thc和Thc'的 $\beta$ 谱的上限确如泡利所预言的那样是急剧中断的,不是按玻尔的能量不守恒观点所预言的那样是一个强度逐渐衰减的长尾巴.实验支持了中微子假说.

哈克斯拜(Haxby),索普(Shoupp)和瓦尔斯(Wells)<sup>[15]</sup>于1940年研究了下面两个循环过程:

$$p + B^{11} \rightarrow C^{11} + n, C^{11} \rightarrow B^{11} + e^+ + \nu;$$

$$p + c^{13} \rightarrow N^{13} + n, N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu$$

他们测量了这两个 $\beta$ 衰变过程中反应前原子核质量( $m_i$ )和反应后原子核质量( $m_f$ )的差

$$m_i - m_f = \begin{cases} 0.95 \pm 0.02 \text{MeV} & C^{11} \rightarrow B^{11} e^+ \nu \\ 1.20 \pm 0.04 \text{MeV} & N^{13} \rightarrow C^{13} e^+ \nu \end{cases}$$

而这两个过程的 $\beta$ 衰变的上限分别由莱曼(Lyman)<sup>[16]</sup>和德尔西色(Delsasso)等<sup>[17]</sup>测得,其值为

$$0.95 \pm 0.05 \text{MeV} \quad (C^{11} \beta \text{谱上限});$$

$$1.198 \pm 0.006 \text{MeV} \quad (N^{13} \beta \text{谱上限}).$$

可以看到这些 $\beta$ 谱的上限与相应的衰变前后的原子核的质量差符合得很好.

这些实验证实,在 $\beta$ 衰变过程中,衰变前后的原子核的质量差等于 $\beta$ 谱的最大能量,从而用实验证明,在 $\beta$ 衰变过程中能量仅在统计意义下成立的观点是不正确的.

### 3. $\beta$ 衰变中的动量守恒

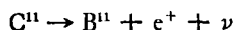
在1933年10月举行的第七届Solvay会议上,泡利报告了他的中微子假说,并指出对 $\beta$ 衰

1) 韦斯可夫(V. Weisskopf)说,费米理论是现代场论的第一个例子.见参考文献[1].

2) 维格纳(Wigner)曾告诉杨振宁说,1934年他看到费米的关于 $\beta$ 衰变的文章后,觉得费米使用了费米子的产生算符是很神奇的一步.杨说:“可是产生算符是你和约旦(Jordan)发现的.”维格纳说:“是的,是的,可是我们做梦也没有想到可以用它去解释物理现象”.

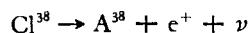
变中动量守恒的研究将对中微子假说提供一个重要的检验。按照 $\beta$ 衰变的费米理论,在 $\beta$ 衰变中存在动量守恒是很显然的。

雷帕恩斯基 (Leipunski)<sup>[18]</sup>于1936年做了第一个测量 $\beta$ 衰变中原子核反冲的实验。反应过程是



由于实验精度不高,这个实验不能构成对中微子假说的真正的检验。

在1938—1939年期间,克瑞恩 (Crane) 和海尔帕恩 (Halpan)<sup>[19]</sup>写了两篇关于中微子的论文,其中第一篇的题目是《对中微子存在的新实验证据》。他们做的是反冲实验,文章的题目说明,他们认为测量 $\beta$ 衰变中的反冲效应是可以证实中微子的存在的。他们测量反应



的原子核的反冲和正电子的动量。他们测量了正电子在磁场中的偏转和原子核在云雾室中的射程。结论是,如果这个反应系统仅由原子核和正电子构成,那么动量是不守恒的。从动量守恒的观点来看,要求中微子存在。

从以上这些实验可以看到,实验支持中微子存在的假说,但一直没有实验能毫无疑问地直接地证实中微子的存在。

### 三、王淦昌先生的建议 (1941年)

从以上的介绍可以看到,从1930年底到1941年这十多年间,围绕中微子问题的理论和实验工作十分活跃,许多物理学家对这一问题的研究作出了杰出的贡献。这一问题所以重要,是因为当时 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线中最神秘的是 $\beta$ 射线,而 $\beta$ 射线与中微子有不可分割的联系。

环绕中微子的工作虽然多,但是没有人能提出简单而又有决定性意义的实验证实中微子的存在。1941年,王淦昌先生自贵州给美国《物理评论》杂志寄去一篇文稿<sup>[4]</sup>,该文于1942年初在该杂志上发表。文章开始就说:

“众所周知,不能用中微子的电离效应探测它的存在。测

量放射元素的反冲能量和动量是能够获得中微子存在的证据的唯一希望。”

他在分析了克瑞恩和海尔帕恩的反冲实验后指出,在他们的实验中反冲元素的电离效应太小,很难测量,需要用不同的方法探测中微子。他建议用K电子俘获的办法探测中微子的存在。他指出:

“当一个 $\beta^+$ 类的放射元素不放射一个正电子,而是俘获一个K层电子时,反应后的元素的反冲能量和动量仅仅依赖于所放射的中微子……。”

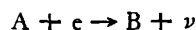
“只要测量反应后元素的反冲能量和动量,就很容易找到放射出的中微子的质量和能量。”

“由于没有连续的 $\beta$ 射线被放射出来,这种反冲效应对所有的元素来说是相同的。”

以上的三段引文是王淦昌先生建议的三个关键点。换句话说,他指出一般 $\beta$ 衰变是三体衰变,如



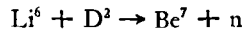
但在K俘获过程中



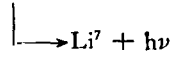
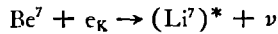
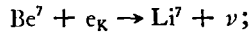
末态只有二体,所以元素B的反冲能量是单能的,而且测量B的能量即可得到关于中微子的知识。譬如测量元素B的反冲能量即可测量中微子质量。王淦昌先生同时指出,这种反冲能量的单能性质对于所有这类反应(不同的反应元素)都存在。

王淦昌先生在文中作为例子建议用 $Be^7$ 的K电子俘获过程去探测中微子的存在。 $Be^7$ 的K电子俘获过程由罗伯兹 (Roberts)、海登伯格 (Heydenburg)、劳其尔 (Locher)<sup>[20]</sup>和龙堡赫 (Rumbaugh),罗伯兹和霍夫斯塔德 (Hafstad)<sup>[21]</sup>分别于1938年进行了研究。 $Be^7$ 是在下面的反

应中形成的



它的寿命是 43 天。Be<sup>7</sup> 有下面两种 K 电子俘获过程:



第一种反应占 90%，第二种反应占 10%。上述两组人测得这两个反应的初末态原子核的质量差分别为

$$M_{\text{Be}^7} - M_{\text{Li}^7} = 1\text{MeV},$$

$$M_{\text{Be}^7} - M_{\text{Li}^7*} = 0.55\text{MeV},$$

$$M_{\text{Li}^7*} - M_{\text{Li}^7} = 0.45\text{MeV}.$$

王淦昌先生假定中微子质量为零,用 Be<sup>7</sup>和 Li<sup>7</sup> 的质量差算出第一个反应中 Li<sup>7</sup> 的反冲能量为 77eV,而第二个反应中的 Li<sup>7</sup> 的反冲能量为这个数值的三分之一。

大家知道,1941 年正值中国人民抗日战争的艰苦时期,王淦昌先生又在地处偏僻的贵州遵义,当时消息十分闭塞,闭塞的程度可从下面的事实推测出来。他显然不知道哈克斯拜(Haxby)<sup>[22]</sup> 于 1940 年就已得到 Be<sup>7</sup> 和 Li<sup>7</sup> 的质量差为 0.87MeV,比王淦昌先生采用的 1MeV 精确。

#### 四、王淦昌先生建议的实现 (1941—1952 年)

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。

##### 1. 阿仑 (Allen)<sup>[23]</sup> 的 Be<sup>7</sup>K 电子俘获实验

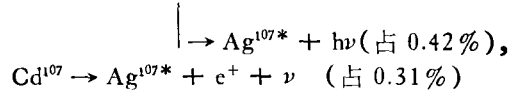
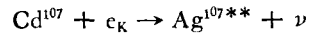
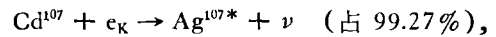
王淦昌先生的文章刚发表几个月,阿仑就按照这一建议做了 Be<sup>7</sup> 的 K 电子俘获实验。在这个实验中测量到 Li<sup>7</sup> 的反冲能量,但由于用的样品较厚及孔径效应,没能观察到单能的 Li<sup>7</sup> 反冲。

十分可惜,他的实验因为当时实验条件限制,没能测到单能反冲,没有能够完全实现王淦

昌先生的建议,战时实验条件不够理想,所以单能反冲至战后 1952 年才被实验证实。假如单能反冲在 1942 年观察到,一定会在物理学界中产生很大的冲击。

##### 2. 莱特 (Wright)<sup>[24]</sup> 的 Cd<sup>107</sup> 的 K 电子俘获实验

莱特在 1947 年做了 Cd<sup>107</sup> 的 K 电子俘获实验。这里共有三种反应:



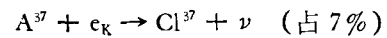
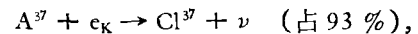
在这个实验中确实观测到由 K 电子俘获产生的 Ag<sup>107\*</sup> 的反冲,但也没有发现单能的 Ag<sup>107\*</sup>。另外,这个实验有一个较大的本底,即 K 电子俘获后,其它外层电子填充这个位置,放出的 X 射线有 24keV 的能量,由此也可以造成较大的 Ag<sup>107\*</sup> 的反冲。对于 Be<sup>7</sup> 的 K 电子俘获来说,这个能量只有 75eV,由此造成的反冲就小得多。

##### 3. 施密斯 (Smith) 和阿仑的 Be<sup>7</sup>K 电子俘获实验<sup>[25]</sup>

施密斯和阿仑在 1950 年重新做了 Be<sup>7</sup> 的 K 电子俘获实验,得到 Li<sup>7</sup> 的最大反冲能量为  $56.6 \pm 1.0\text{eV}$ ,与理论预言值相符合,但仍不是单能反冲。

##### 4. 楼德拜克 (Rodeback) 和阿仑的 A<sup>37</sup> 的 K 电子俘获实验<sup>[26]</sup>

楼德拜克和阿仑在 1952 年用气体样品和飞行时间法做了 A<sup>37</sup> 的轨道电子俘获实验



这个实验在世界上第一次发现单能的反冲核。Cl<sup>37</sup> 反冲能量的实验值与理论预言值完全符合。预言 Cl<sup>37</sup> 的飞行速度为  $0.711 \pm 0.04\text{cm/ns}$ ,测到的速度峰值为 0.714cm/ns。

##### 5. 戴维斯 (Davis) 的 Be<sup>7</sup>K 电子俘获实验<sup>[27]</sup>

在楼德拜克和阿仑的实验发表了一个多月之后,戴维斯发表了她的 K 电子俘获实验结果。他测到 Li<sup>7</sup> 的反冲能量为  $55.9 \pm 1.0\text{eV}$ ,理论预

(下转第 738 页)