

## 中微子的发现\*

季淑莉

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

**摘要** 中微子是基本粒子家族中重要且具有特色的成员之一,它不带电,只参加弱相互作用,与其他物质发生相互作用的几率很小.因此,人们不容易捕捉到中微子,用实验证实其存在十分困难.从中微子思想的提出到证实其存在经历了长达二十多个春秋,这一过程中凝结了许多科学家的智慧和心血.文章对此作了探讨.

**关键词** 中微子 衰变,弱相互作用

## 1 中微子思想的提出

中微子的发现和 衰变之谜紧紧联系在一起.1896年2月,法国物理学家发现了放射性.1899年,卢瑟福等人研究放射性时发现,天然放射性的射线由几种不同的射线组成:一种是带正电的 射线,一种是带负电的 射线.1900年法国化学家维拉德确认镭的射线还有不带电的第三种射线,1902年,卢瑟福将这种射线命名为 射线<sup>[1]</sup>.1914年,查德威克公布了关于这3种射线能谱的研究结果:放射性物质所发射的 射线和 射线的能谱是分立的, 射线的动能有一个连续变化的能谱范围,而且电子能量的最大值与原子核的末态能量加在一起才能满足能量守恒定律.

衰变放出的电子动能从零到最大值都有可能出现的事实,似乎与原子核处于分立的量子状态的事实相矛盾.根据原子核处于量子状态的理论,原子核初态和末态的能量都是非常稳定的.因此,对于那些电子动能不取最大值的 衰变,在衰变中似乎丢失了一部分能量,从而就产生了所谓的能量危机.本世纪20年代,能量危机已经是物理学家面对的严峻问题.如何解释 衰变的实验事实呢?当时出现一些不同的见解.例如迈特纳(Meitner)就设想, 射线通过原子核的强电场时辐射了一部分能量,从而造

成能量损失.不过这种解释很快被实验否定.

**解释** 衰变的实验事实有两种可能的选择:一种选择是承认 衰变是二体衰变,此时必须假设在 衰变中能量守恒定律不适用.另一种选择是承认能量和动量守恒定律正确,假定 衰变不是二体衰变,在衰变末态中还有未探测到的第三个粒子出现<sup>[2]</sup>.玻尔解释 衰变的实验事实时持前一种观点,他认为在 衰变中,能量守恒定律仅仅在统计的意义下适用,对于单个的 衰变,能量守恒定律不再成立.这种观点违背了客观事物最普遍的规律——能量守恒定律,所以人们不能接受.

奥地利物理学家泡利(W. Pauli 1900—1958)对 衰变实验事实的解释与玻尔不同,他坚持在每一次 衰变中能量和动量都守恒的观点,猜测 衰变是个三体衰变,在衰变中除放出电子外,还有一种质量接近于零、自旋为1/2的电中性粒子,泡利当时称此粒子为中子(即现在的中微子).泡利起初认为中微子是原子核的组成部分,在 衰变中,电子和中微子一起由原子核释放出来.1931年,他又提出,中微子原来在核中不存在,是衰变产生的.1934年,费米建立了 衰变理论,他指出: 粒子和中微子在原子核内不独立存在,而是核子通过弱相互作用在

\* 国家自然科学基金资助项目

1998-11-04收到初稿,1998-12-23修回

不同状态之间跃迁的产物,即:  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ . 这就是人们提出的中微子思想<sup>[3]</sup>.

## 2 寻找中微子的有关实验

费米的  $\beta$  衰变理论奠定了中微子存在的理论基础,可是如何从实验上证实中微子确实存在呢?中微子质量为零且不带电,因而它既不参加引力相互作用,也不参加电磁相互作用,从实验上证实它的存在相当困难.尽管如此,在中微子假设提出后,人们还是做了许多探索中微子的实验工作.

最初探索中微子存在的实验是对  $\beta$  衰变过程中的能量进行研究.根据中微子假说,在  $\beta$  衰变中,中微子带走了一部分能量,粒子所带能量就低于  $\beta$  衰变时放出的能量.埃里斯(Ellis)和伍斯特(W. Wooster)在 30 年代初就用热测量法研究了  $\beta$  衰变过程中的能量关系.他们用镭 E 核作为  $\beta$  衰变源,将其放入一个厚壁的量热器中,衰变后的  $\beta$  粒子能量被量热器吸收转化为热能,通过测量转化热能的多少确定  $\beta$  粒子所带的能量.研究表明,量热器所吸收的、由衰变产生的  $\beta$  粒子的平均能量等于电子能谱能量的平均值,这说明  $\beta$  衰变中确有一部分能量损失,从而间接地说明了中微子假说的正确性.

按照泡利的理论,在  $\beta$  衰变中能量是守恒的,出现  $\beta$  衰变中能量连续谱的原因是中微子带走了一部分能量.由于能量守恒,  $\beta$  谱的上限必然是急剧中断的.1934 年,海德逊(Henderson)对  $\beta$  谱进行了研究,实验结果表明,  $^{232}\text{Th}$  和  $^{234}\text{Th}$  的  $\beta$  谱的上限确实是急剧中断的.从能量守恒的观点看,实验事实说明了在  $\beta$  衰变中必然要求有中微子存在.

研究  $\beta$  衰变中各粒子的动量关系也能获得中微子存在的证据.泡利曾经指出了这一点.1933 年 10 月,泡利在第七届索尔未(Solvay)会议上报告中微子假说时阐明,对  $\beta$  衰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.1936 年,雷帕恩斯基就做了这方面的实验研究,他所用的衰变过程是  $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + e^+ + \bar{\nu}$ ,

但由于实验精度的影响而未能获得确切结果.1938—1939 年间,克瑞恩(Crane)和海尔帕恩(Halpern)报道了研究  $\beta$  衰变反冲实验的结果.他们所用衰变是  $^{38}\text{Cl} \rightarrow ^{38}\text{Ar} + e^- + \bar{\nu}$ .测量原子核的反冲和正电子的动量证实,如果这个衰变仅由原子核和正电子构成,则该过程中动量就不守恒.从动量守恒观点考虑,衰变中必须有中微子存在,从而也就证明中微子假说是正确的.

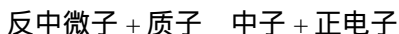
上述检验中微子存在的实验中,衰变的末态产物中有 3 个粒子,因而原子核反冲能量就不是单值的,研究起来比较复杂.我国著名物理学家王淦昌提出了证实中微子存在的简单方法——K 俘获法.1942 年,王淦昌先生在《物理评论》中发表文章建议,用 K 电子俘获的办法探测中微子的存在.他说,当  $\beta^+$  类放射性元素的原子核俘获一个 K 电子时,原子核的反冲能量和动量仅仅依赖于放射的中微子,测量该反冲能量和动量,就很容易找到放射出的中微子质量和能量.王淦昌先生的论文发表之后,引起了科学界的极大关注,许多物理学家先后进行 K 电子俘获实验.当年,阿仑(J. S. Allen)就按王淦昌建议作了  $^7\text{Be}$  的 K 电子俘获实验,初步证实了中微子的存在.由于当时他所用样品较厚等原因,实验还做得不很漂亮,还不能确定中微子是一个还是几个.1952 年,楼德拜克(Redeback)和阿仑所做  $^{37}\text{Ar}$  的 K 电子俘获实验,首次成功地观察到单能的反冲核,反冲核能量的实验测得值与理论值完全符合.接着戴维斯(R. Davis)用  $^7\text{Be}$  做了 K 电子俘获实验,仍然取得了令人完全满意的结果.以上各种实验结果都用确凿的事实展示了中微子假说的正确性,使人们确信中微子的存在<sup>[4]</sup>.但是,这些实验都是中微子存在的间接证据,至此还不能说已发现了中微子.科学论断在事实证明之后才能成为真理,只有捕捉到中微子,获得其存在的直接证据才能说明中微子的存在.

## 3 中微子的发现

如何捕捉中微子,并用实验提供它存在的

确切证据呢? 庞特科尔沃最早建议了一种方法,其原理是: 氦 37 吸收一个中微子就会变成氦 37, 并发射一个电子. 氦 37 具有放射性, 通过测定氦 37 的产量, 就能计算出有多少个中微子与氦 37 原子核发生了反应. 可是玻特和佩尔斯曾计算出截获放射性核在衰变中产生的中微子概率极小, 因此用放射性核很难捕获中微子, 要捕获中微子首先必须获得一个极强的中微子源. 本世纪 40 年代, 人类建成了第一座反应堆. 费米等物理学家认为, 反应堆可以充当强中微子源. 据估计, 反应堆有可能提供大约  $10^{12} - 10^{13}/s \text{ cm}^2$  的中微子流. 从 1943 年起, 后来成为中微子天文学创立者的戴维斯用纯净的四氯化碳, 探测反应堆所产生的中微子. 戴维斯起初在纽约长岛 Brookhaven 国家实验室进行实验, 1956 年又转到了佐治亚洲 Savannah 河工厂, 可是他的实验却一直未能成功<sup>[5]</sup>.

在戴维斯探测中微子期间, 赖因斯 (F. Reines) 和考恩 (C. Cowan) 于 1953 年提出了另一种探测中微子的方法. 他们要研究的反应是:



赖因斯和考恩先在 Hanford 反应堆上做了初步尝试, 然后转到佐治亚洲 Savannah 河工厂进行实验. 经过艰苦劳动和耐心等待, 1956 年终于获得成功. 他们的实验是: 用含有氯化镭的水作为捕获中微子的靶子, 当反中微子与水中质子相碰, 就会产生一个正电子和中子, 正电子几乎立即与电子相碰, 一起湮灭产生两个沿相反方向出射的光子, 镭核俘获中子后立即放出一个光子. 镭核俘获中子放出光子的时间比正负电子湮灭放出光子的时间要晚, 平均说来这个时间差大约在  $5\mu\text{s}$  之内. 赖因斯和考恩检测到光子到达探测器的时间差大约是  $1\mu\text{s}$ , 这说明他们捕获到反中微子, 从而证实反中微子是实际存在的基本粒子. 赖因斯因此荣获 1995 年诺贝尔物理奖.

戴维斯未能在 Savannah 河工厂探测到中微子, 是由于那里的原子反应堆只能产生反中

微子, 反中微子不会引起氦 37 的衰变. 也就是说原子反应堆是一个强大的反中微子源并非中微子源. 那么, 到那里去寻找强中微子源呢? 理论研究表明, 太阳内部, 其核心部分进行着热核聚变: 每 4 个氢核聚变为 1 个氦核. 这一过程中, 太阳每秒钟大约会产生  $1.8 \times 10^{38}$  个中微子. 于是戴维斯决定捕获太阳中微子.

经过戴维斯多方努力和许多科学家的支持, 在 1965 年—1967 年之间, 在美国著名的南达科他州 Homestake 金矿建成了世界上第一台“中微子望远镜”. 该系统是一个放在距地面 1600m 深处的大筒, 大筒直径约 6m, 长约 15m, 内装约 610t 四氯乙烯. 戴维斯就利用这一装置捕获来自太阳的中微子. 1968 年他在地下容器中检测到产生的氦 37 原子, 这说明它们捕获到太阳中微子. 无可辩驳的实验事实证明中微子是客观存在的基本粒子.

中微子的发现对物理学产生了极大影响, 由于中微子广泛存在于宇宙之中, 它能够给地球带来遥远天体的有关信息. 现在中微子观测已经成为人类获得天文学信息的重要渠道之一. 在地球上观测来自太阳的中微子就可以获得太阳中心的有关信息, 从而使人类了解太阳中心所发生的事情. 研究太阳中微子已经形成一门称为“太阳中微子物理”的学科, 这种研究涉及天体物理和恒星演化等根本问题, 它对人类了解宇宙结构、研究天体演化具有重要意义. 自从戴维斯发现中微子至今, 日本、前苏联、意大利等国先后建成了大型观测站对中微子进行探测. 几十年来对中微子的观测结果把人类对自然的认识不断引向深入<sup>[5]</sup>.

### 参 考 文 献

- [1] 阎康年. 卢瑟福与现代科学的发展. 北京: 科学技术文献出版社, 1987, 108—109
- [2] 章乃森. 粒子物理学(上册). 北京: 科学出版社, 1986, 133
- [3] 申先甲. 物理学史教程. 长沙: 湖南教育出版社, 1987, 454
- [4] 李炳安, 杨振宁. 物理, 1986, 15(12): 758—761
- [5] 王较过, 季淑莉. 物理, 1997, 26(9): 568—570