

# $\beta$ 衰变能量连续谱发现的历史回顾\*

张民仓<sup>†</sup>

( 陕西师范大学物理学与信息技术学院 西安 710062 )

皇甫国庆

( 陕西渭南师范学院物理系 渭南 714000 )

**摘 要** 回顾了  $\beta$  衰变能量连续谱的发现过程,评价了这一过程中有关的重要工作,并分析了导致这一发现长达三十多年的原因.

**关键词**  $\beta$  衰变,放射性,连续能量,中微子

## Discovery of the continuous energy spectrum in $\beta$ decay

ZHANG Min-Cang<sup>†</sup>

( College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China )

HUANGPU Guo-Qing

( Department of Physics, Weinan Normal College, Weinan 714000, China )

**Abstract** The discovery of the continuous energy spectrum in  $\beta$  decay and other important related research results are reviewed. The reason why the discovery was delayed over three decades is analyzed.

**Key words**  $\beta$  decay, radioactivity, continuous energy, neutrino

众所周知,中微子的发现是和  $\beta$  衰变之谜紧密相联的.1930年,奥地利物理学家泡利为解释  $\beta$  衰变中电子射线能量谱的连续分布提出中微子假说,预言自然界中存在一种自旋与电子相同、静止质量极小的中性粒子.1934年,意大利物理学家费米根据这一假说建立起  $\beta$  衰变理论,完善了中微子存在的理论基础,人类从此开始了寻找中微子的漫长历程.1956年,美国物理学家莱因斯(Reines F)和考温(Cowan C)首次捕捉到中微子家族的成员之一电子型反中微子.1995年,莱因斯由于这一重要发现和由于在20世纪70年代发现  $\tau$  轻子的美国物理学家珀尔(Perl M)共享当年的诺贝尔物理学奖,而莱因斯的合作者考温则未能等到这一成果获奖就已作古了<sup>[1]</sup>.

回顾20世纪早期的物理学史不难发现<sup>[2]</sup>,为了确定  $\beta$  衰变中电子射线能量谱是否连续这一今天看起来还相对简单的问题,物理学家竟为之呕心沥血三十多年.置身其中的不但有当时一批才华横溢的年青物理工作者,也包括了众多的著名物理学家,整个过程相当曲折复杂.但是与中微子的发现过程及近年来由对中微子研究而引发的中微子物理学相比, $\beta$  衰变中电子能量连续谱的发现过程一般被看

作物理学史上相对独立的事件,介绍也比较简略.因此本文将对这段历史作一较为详细的回顾和分析.

1896年,法国物理学家贝克勒尔在研究硫酸铀酰钾的磷光问题时,发现了铀的天然放射性.1898年,卢瑟福为查明天然放射性的本性,发现铀的放射线中至少有  $\alpha$  和  $\beta$  射线两种成分,1900年,法国化学家维拉德(Villard P)又发现铀的放射线中还有第三种成分  $\gamma$  射线.此后不久,物理学家就清楚  $\alpha$  射线是带正电的氦核, $\beta$  射线是带负电的电子流,而  $\gamma$  射线是高能电磁波.

与此同时(1901—1902),德国物理学家考夫曼(Kaufmann W)对  $\beta$  射线进行了一系列研究<sup>[2,3]</sup>,他在实验中发现, $\beta$  射线电子的速度分布在一个很大的范围内,最大可达光速.1902年,考夫曼根据实验数据计算得出,在低速情况下, $\beta$  射线电子的质量与阴极射线电子的质量在误差范围内相同.这些发现引出了两个问题,一是电子的质量与其运动速度有

\* 2002-10-28 收到初稿,2003-01-17 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人 E-mail: mincangzhang@yahoo.com.cn

关;二是由于 $\beta$ 射线电子的速度分布在一个很大的范围内, $\beta$ 射线就不可能是由单能电子构成的.当时的物理学界尤其是理论物理学家对此极为重视,亚伯拉罕(Abraham M, 1903)和布克雷尔(Bucherer A, 1904—1905)都试图建立新的物理理论解释电子质量的本性,并说明电子质量和其运动速度之间的关系<sup>[4,5]</sup>.洛伦兹(1904)和爱因斯坦(1905)也根据相对性原理指出电子的质量具有相对论效应.但 $\beta$ 射线的能量问题却没有引起人们的重视.

其实在考夫曼之前,贝克勒尔1900年就已从实验中发现 $\beta$ 射线电子的速度有一个分布范围.但当时物理学界并没有从这些实验事实中认识到 $\beta$ 射线电子的能量可能是连续的,而是认为贝克勒尔和考夫曼使用的放射源不纯,含有能辐射多种能量的 $\beta$ 射线的成分;其次,即使他们使用的放射源核素单一,辐射的 $\beta$ 射线电子的能量开始相同,但电子在离开放射源时要损失一些能量,而每一个电子离开源之前所经历的过程互不相同,所以实验中观察到的电子能量也就不一样.事实上,这些解释并没有经过实验证明,但却得到物理学界的普遍认可,一个重要的原因是由于当时对 $\beta$ 射线和 $\alpha$ 射线做了错误的类比.

1904年,布拉格(Bragg W)在研究 $\alpha$ 射线时发现,从一确定的核素辐射的 $\alpha$ 粒子具有相同的能量和速度,它们通过物质时的射程也相同,其吸收曲线符合线性规律.由于当时对放射性的机理还知之甚少,人们认为与 $\alpha$ 射线一样,所有从同一核素辐射的 $\beta$ 射线电子,也应具有相同的能量和速度.尽管这时已有的实验结论指出, $\beta$ 射线电子通过物质时的射程并不确定,其吸收曲线也不符合线性规律,但物理学界似乎并不重视 $\beta$ 射线电子的能量是否单一,而是认为重要的是弄清 $\beta$ 射线电子通过物质时的吸收规律.因而在20世纪的头10年,有关 $\beta$ 射线的研究大多集中于此,而且主要是由德国科学家进行.迈特纳、哈恩等认为, $\beta$ 射线的吸收曲线符合指数规律.施密特(Schmidt H)研究了镭B( $^{214}\text{Pb}$ )和镭C( $^{214}\text{Bi}$ )辐射的 $\beta$ 射线的吸收规律,指出它们要么是单一的指数曲线,要么是不同指数曲线的叠加.总之,这个时期的实验研究使物理学界形成了这样的基本认识:相信 $\beta$ 射线电子是单能的,它们通过物质时的吸收曲线符合指数规律<sup>[2,6]</sup>.

## —

就在人们觉得不应再怀疑 $\beta$ 射线是由单能电

子组成时,威耳逊(Wilson W)的发现引起物理学界对这一问题的重新思考<sup>[2]</sup>.1909年,威耳逊正在进行电子的电离效应与电子速度关系的研究,他的工作包括了一系列实验,其中的一个是测量电子通过物质时的吸收率.威耳逊在审查研究方案时发现,虽然当时已有 $\beta$ 射线电子通过物质时的吸收曲线符合指数规律的结论,但他认为这个结论的前题,即 $\beta$ 射线是单能电子只是一个假设,并没有得到实验证明,他觉得有必要亲自验证.

威耳逊首先从 $\beta$ 衰变的电子射线中分离出一束动量完全相同的电子,测量它们通过物质时的吸收率,他发现其吸收曲线是线性的而非指数的.接着,威耳逊又通过计算得出,如果电子通过物质时吸收曲线是指数的,电子的能量就应是连续的而不会是单一的.为了验证这一结果,他让一束能量相同的 $\beta$ 射线通过特殊的吸收体而变成具有连续的能量,再测量这些具有连续能量的 $\beta$ 射线通过物质时的吸收率.结果表明,具有连续能量的 $\beta$ 射线通过物质时的吸收曲线正好符合指数规律.

威耳逊的工作为确定 $\beta$ 射线电子的能量问题迈出了重要的一步,但是他却没有根据自己的结论进一步说明 $\beta$ 射线电子的能量是连续的.他之所以没有这样做,很可能是他当时考虑的是电子的电离效应而非 $\beta$ 射线的能量问题,尽管如此,威耳逊的发现还是引起了物理学界对 $\beta$ 射线能量问题的重新认识.

1909年,迈特纳、哈恩等人改进了实验设备,用磁偏转谱仪再次研究 $\beta$ 射线电子的能量问题,其原理是从一放射源辐射的 $\beta$ 射线电子经过磁场时径迹被弯曲,然后通过一个狭缝被记录在感光板上,由于能量相同的电子在磁场中的径迹相同,所以在感光板上只能拍摄到一条谱线.迈特纳他们开始时用两种分别含有不同放射性核素的物质作为样品,对于每一种样品,感光板上只拍摄到了一条谱线,这个结果支持了当时人们关于一种放射性核素只能辐射一种能量的 $\beta$ 射线的观点,但是后来迈特纳在实验中发现单一核素辐射的 $\beta$ 射线有多条谱线,他们又觉得以前的结论有问题.与此同时,卢瑟福也用类似的照像方法拍摄到镭B( $^{214}\text{Pb}$ )和镭C( $^{214}\text{Bi}$ ) $\beta$ 衰变的29条谱线,这一时期,照像方法成为研究 $\beta$ 衰变能量问题的主要手段.

此后不久,查德威克也开始考虑 $\beta$ 衰变中电子能量的问题.查德威克认为,虽然卢瑟福曾指出照像方法能强化弱的电子能谱线相对于由 $\gamma$ 射线和散

射电子在感光板上形成的连续背景的显示,但在人们还不清楚对具有不同能量的电子的照像效果的前题下,这种方法很难成功。事实上,当时利用磁偏转谱仪发现的能谱线并不是从放射性原子核内辐射的,而是从原子的电子轨道上辐射的,是由于伴随着 $\beta$ 射线从原子核里辐射的 $\gamma$ 射线在轨道电子上的内转换引起的,它们实际上只占全部 $\beta$ 射线的一小部分,大多数真正来自原子核内的 $\beta$ 射线在感光板上难以看到<sup>[7]</sup>。

1913年,德国物理学家盖革(Geiger H)从英国回到德国的夏洛腾堡大学,同年查德威克也依靠奖学金到这所大学跟随盖革研究放射性探测技术。1914年,查德威克用盖革计数器测量 $\beta$ 射线的散射能谱,发现电子的能量是连续的。查德威克首先给卢瑟福写信告诉这一发现,接着又发表文章。然而查德威克的工作却难以得到物理学界的承认。其原因一是当时没有人重复他的实验,二是当时的物理学家包括查德威克本人都不能对 $\beta$ 射线电子具有连续能量做出令人信服的理论分析。

### 三

1914年,第一次世界大战爆发,包括查德威克在内的5位英国人被德国政府扣留,其中有正在德国学习炮兵技术的军人艾利斯(Ellis C),他们被长期关押在德国鲁赫本(Ruhleben)的囚犯营中一间仅能拴两匹马的马厩内,但在如此恶劣的环境下,查德威克仍坚持科学研究,而艾利斯则自愿担当他的助手。在此期间,艾利斯学到了不少有关放射性的知识,熟悉了查德威克正在进行的 $\beta$ 射线能谱研究,并对这一科学领域产生了极大的兴趣。1918年第一次世界大战结束,艾利斯回到英国,但他放弃了成为炮兵指挥员的打算,投身到卢瑟福门下研究放射性。从1919年起,艾利斯便开始探索 $\beta$ 射线电子的能量问题,他首先把核内和核外辐射的电子分开,测出了连续的 $\beta$ 衰变能谱,虽然这并不能说明 $\beta$ 衰变中电子的能量不同,但艾利斯认为,如果 $\beta$ 衰变电子的能量不同,那么衰变电子的平均能量就应等于能谱的平均能量。由此,他想到了测量 $\beta$ 衰变的热效应,如果测到的 $\beta$ 衰变热效应所对应的能量明显大于观察到的 $\beta$ 衰变连续能谱的平均能量,则说明所有的 $\beta$ 衰变电子是以同一能量发射出来;反之,如果两者相等,则说明衰变电子是以不同能量发射出来,而表现为连续谱。

1925年,艾利斯和伍斯特(Wooster W)在剑桥

大学的卡文迪什实验室用一台精细的微量热器测量 $\beta$ 射线的热效应<sup>[8]</sup>,这台量热器的壁相当厚,能够吸收放射源辐射的全部 $\beta$ 射线,艾利斯当时使用的放射源是镭E( $^{210}\text{Bi}$ )。但这台仪器的灵敏度极高,白天根本无法工作,即使在晚上也只能到深夜二三点后进行,因为实验室靠近街道,而前半夜街道上有警察巡逻,警靴上的铁钉踏到路面上会引起仪器的振动。1927年,他们的工作成功了,测量得出每次 $\beta$ 衰变的热效应为 $(344 \pm 40)\text{keV}$ ,与用电离法测出的镭E的 $\beta$ 衰变能谱的平均值 $(390 \pm 60)\text{keV}$ 符合相当好。但是迈特纳当时并不认同这个结果,她要重新去验证。1930年,迈特纳和奥斯曼(Orthmann W)发表了他们用改进后的仪器得到的测量值,每次 $\beta$ 衰变的平均能量为 $(337 \pm 20)\text{keV}$ ,与艾利斯他们的几乎相同。在他们的实验结果发表之前,迈特纳就曾写信给艾利斯:“我们的工作证实你的结果完全正确,虽然对此还不能理解,但看来已不能再怀疑你们的 $\beta$ 衰变电子能量不同的假设。”艾利斯的工作为泡利提出中微子假说和费米建立 $\beta$ 衰变理论创造了条件,得到了物理学界的高度评价。但据说艾利斯后来却因未能获得诺贝尔奖而一气之下当政府的燃料部长去了<sup>[9]</sup>。

### 四

$\beta$ 射线电子能量的确定之所以会困扰物理学界三十多年,除了研究过程的艰难之外,还有其他重要的原因存在。首先,在 $\beta$ 射线电子具有连续能量的看法不断被提及的同时,量子理论,特别是分立能级的观念也正在逐步深入人心。1922年迈特纳就指出:“现在是20世纪,已接受了量子理论,能级是确定的,从一个能级到另一个能级的能量差也是确定的,能谱不可能是连续的。”当时包括迈特纳在内的大多数物理学家都认为, $\beta$ 射线电子的能量开始时是相同的,但它们在离开核后因与其他电子相碰撞失去了一些能量,因而产生了连续的能谱。其次,如果当时承认 $\beta$ 射线电子的能量是连续的,就会危及物理学乃至客观世界最普遍的规律——能量守恒定律。当时大多数物理学家都认为,既然 $\beta$ 射线电子带有不同的能量,而衰变前后原子核的能量又是确定的,那么在衰变过程中能量如何守恒呢?1919年,达尔文提出 $\beta$ 衰变过程中能量不守恒,引起了物理学界的注意,后来玻尔根据当时观察到的 $\beta$ 射线能谱,也认为在 $\beta$ 衰变过程中,能量守恒只在统计意义上成立,但对于单个的 $\beta$ 衰变,能量守恒不

再适应. 即使到 1931 年, 玻尔仍在他的法拉第讲座中对  $\beta$  衰变过程中的能量守恒提出质疑, 他说: “在原子理论的现阶段, 我们可以说无论是从经验上还是从理论上都没有理由坚持在  $\beta$  衰变中能量一定守恒, 原子的稳定性迫使我们放弃的也许正是能量平衡的观念.”

在物理学界为  $\beta$  衰变中能量是否守恒的问题忧心忡忡时, 泡利对此做了更为深入的考虑, 他认为在  $\beta$  衰变中不仅能量看起来不守恒, 而且自旋和统计也不守恒. 但泡利认为, 只要假设在  $\beta$  衰变中原子核不仅辐射出电子, 而且同时还放出一个穿透力极强、且质量几乎为零的并服从费米 - 狄拉克统计的中性粒子, 所有问题便可迎刃而解. 1930 年 12 月, 泡利在写给蒂宾根物理会议的公开信中首次提出了这一观点, 但与与会代表认为这有点怪异<sup>[10]</sup>. 1931 年 6 月, 泡利在美国物理学会的帕萨狄纳会议上再次提出了这一假说, 与会的大多数物理学家仍持怀疑. 1933 年 10 月, 泡利在索尔维会议上第三次提出他的假说, 终于得到与会物理学家的讨论和接受, 参加会议的费米刚读过狄拉克的辐射理论, 非常清楚地理解了泡利的思想, 并提出把泡利假设的中性粒子命名为中微子. 索尔维会议结束后, 费米立即根据泡利的中微子假说着手构建  $\beta$  衰变理论. 费米先把文章寄给英国的 Nature, 但被认为太抽象而退

稿, 费米立即再次把文章的德文稿寄到德国的 Zeitschrift für Physik, 并于 1934 年发表(费米 1934 年的德文文章由 Wilson F L 译为英文, 刊登在 Amer. J. Phys., 1968 36 :1150).

至此,  $\beta$  衰变中电子能量的问题基本得到解决.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 顾以藩. 物理, 1996, 25(3) :133[ Gu Y F. Wuli( Physics ), 1996, 25(3) :133( in Chinese )]
- [ 2 ] Franklin A. Physics Today, 2000, 53(2) :22
- [ 3 ] Campbell J T. Dictionary of Scientific Biography VII. New York : Charles Scribner's Sons, 1970. 263
- [ 4 ] Stanley Goldberg. Dictionary of Scientific Biography I. New York : Charles Scribner's Sons, 1970. 23
- [ 5 ] Martin Levey. Dictionary of Scientific Biography II. New York : Charles Scribner's Sons, 1970. 559
- [ 6 ] Frisch O R. Dictionary of Scientific Biography IX. New York ; Charles Scribner's Sons, 1970. 260
- [ 7 ] 厉光烈. 现代物理知识, 1994, 6(6) :5[ Li G L. Modern Physics, 1994, 6(6) :5( in Chinese )]
- [ 8 ] 吴健雄. 世界科学, 1982(12) :1[ Wu J X. World Science, 1982(12) :1( in Chinese )]
- [ 9 ] 阎康年. 自然辩证法通讯, 1983, 5(6) :55[ Yan K N. Journal of Dialectics of Nature, 1983, 5(6) :55( in Chinese )]
- [ 10 ] Brown L M. Physics Today, 1978, 31(9) :23

### · 信息服务 ·



# Rensselaer

## 美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy, New York, U. S. A.

May, 2004

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy, Terascale Electronics and photonics, Nano-Particles Physics, Bio-physics, Origins of Life, Astronomy, Elementary Particles Physics. Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

**Application** : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information** : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**E-mail** : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)