



## $\beta$ 衰变之谜简史\*

张瑞云

(天津市耀华中学 天津 300040)

李维

(天津师范大学教师教育学院 天津 300387)

(收稿日期:2019-07-04)

**摘要:**有关中微子的研究是现在物理学界的一个重要课题,也曾多次获得过诺贝尔物理学奖,然而这一切的起源却应归功于 $\beta$ 衰变连续能谱的证实, $\beta$ 衰变连续能谱曾是困扰物理学界20多年的谜题,为了揭示这一谜题埃利斯和伍斯特做了大量的实验研究,然而他们的贡献却鲜为人知。

**关键词:** $\beta$ 衰变 连续能谱 中微子假说

### 1 $\beta$ 衰变之谜由来

关于 $\beta$ 衰变的研究最早可以追溯到19世纪90年代.1896年法国科学家贝克勒尔在研究硫酸铀钾的磷光问题时,偶然发现了铀的天然放射性,随后科学家们便开始了对放射线的性质、来源等的研究.1899年卢瑟福发现铀的放射线中有 $\alpha$ 和 $\beta$ 两种成分,1900年维拉德又发现了铀射线中的第三种成分 $\gamma$ 射线,很快科学家们便证实了 $\alpha$ 射线是氦核流, $\beta$ 是电子流, $\gamma$ 是高能电磁波<sup>[1]</sup>.

早在1899年贝克勒尔在研究 $\beta$ 射线的磁偏转问题时就发现 $\beta$ 射线在磁场中会发生偏转,性质与阴极射线相似,其后居里夫人证明了 $\beta$ 射线带负电.1900年,贝克勒尔通过实验算出了 $\beta$ 射线的比荷,同时贝克勒尔发现 $\beta$ 射线的电子速度分布在一个范围内.随后考夫曼也开始研究 $\beta$ 射线的比荷,并在研究过程发现,镭放射的 $\beta$ 射线速率分布范围较广,可通过镭衰变获得检验 $\beta$ 射线性质的不同速率的射线<sup>[2]</sup>.1902年考夫曼宣布 $\beta$ 射线的比荷与阴极射线相同,这更加确定了 $\beta$ 射线是电子流,但是却没有人注意到 $\beta$ 射线的速度分布问题,大家自然地认为是放射源不纯或电子离开放射源后经历了一系列不同

的过程导致了能量不同程度的损失.

1904年,澳大利亚物理学家布拉格因在一次会议上偶然读到了居里夫妇研究 $\alpha$ 射线的文章,从而激发了他对 $\alpha$ 射线的研究兴趣,随后便以镭为放射源开始了一系列研究.他发现同一纯净放射源辐射的 $\alpha$ 粒子具有相同的能量和初速度,这一发现让许多科学家都类化地认为 $\beta$ 衰变也具有同样的特性, $\beta$ 衰变的电子也是单能的,而更加忽略了之前研究 $\beta$ 衰变时所发现的关于能量分布的一系列复杂现象,使诸多物理学家“误入歧途”,也就导致了困惑物理学界20多年之久的 $\beta$ 衰变之谜<sup>[3]</sup>.

### 2 埃利斯和伍斯特的研究

正当物理学界接受了 $\beta$ 射线的电子具有单能性这一假说时,威尔逊的研究让人们对这一问题有了新的认识.1909年威尔逊试图通过 $\beta$ 射线磁分离探测实验来证明 $\beta$ 射线的单能性,他从 $\beta$ 射线中分离出一束动量完全相同的电子,测量其吸收曲线,结果却发现吸收曲线呈线性而非指数形式.

威尔逊的研究引起了哈恩、迈特纳以及卢瑟福等人的注意.1909年哈恩和迈特纳改进了实验设备,对威尔逊的实验进行了进一步研究,他们用两种

\* 天津市科技计划项目的研究成果之一,项目编号:17KPXMSF00090

不同的物质做样品,但每种物质却只在感光板上拍到一条谱线,这似乎又支持了 $\beta$ 衰变分立能谱的说法<sup>[4]</sup>.

1913年,卢瑟福的学生查德威克获得“1851年博览会奖学金”,到德国夏洛腾堡大学跟随盖革研究放射性的测量.1914年查德威克用盖革计数器研究了 $\beta$ 衰变的能量问题,发现 $\beta$ 射线的能谱是连续的,查德威克将自己的发现写信告诉了卢瑟福,并同时发表了文章,但是这一结论却没有得到物理学界的认可.不久后,第一次世界大战爆发,查德威克等一行在德国研究学习的科学家都被德国政府扣留关押.在此期间,查德威克结识了同被德国政府扣押的英国军人埃利斯,并说服埃利斯成为他的助手,一起研究放射性现象.战争结束后,埃利斯对放射性研究产生了浓厚兴趣,于是放弃做炮兵指挥官,去剑桥大学投身卢瑟福门下,继续学习和研究放射性.

1921年,埃利斯凭借自己的勤奋与智慧计算出了镭B和镭C的 $\gamma$ 辐射能量,其结果与实验测量值非常吻合,在此基础上他又提出了内转换机制,对 $\beta$ 衰变连续能谱做出了合理解释.但迈特纳仍然坚信 $\beta$ 衰变应该遵循量子力学的观点,因此迈特纳又提出了3个可能导致 $\beta$ 衰变产生连续能谱的假说:

(1) 康普顿散射——衰变电子具有不同能量是由于在原子核发生 $\beta$ 衰变时辐射 $\gamma$ 射线引起的;

(2) 发生 $\beta$ 衰变的电子离开原子核后会穿过原子内部的强电场,而经过强电场时会导致它们释放出具有不同能量的 $\gamma$ 射线;

(3) 衰变电子在放射过程中受到了其他初级电子的散射.

埃利斯的研究并没有将 $\beta$ 衰变能量问题的迷雾驱散,但总是在一步步接近着真相.所有的困难都没有使埃利斯止步.1925年埃利斯和伍斯特总结了关于 $\beta$ 衰变的实验,否定了迈特纳的所有假设.

(1) 镭E( $^{210}\text{Bi}$ )衰变时不会辐射 $\gamma$ 射线,因此康普顿效应对镭E衰变产生的连续能谱不适用;

(2) 镭E发生 $\beta$ 衰变不产生 $\gamma$ 射线这一事实同时也否定了第二种假设,但这也并不是说衰变电子经过原子核内的强电场时释放能量连续的 $\gamma$ 射线这

种现象一定不存在,而是说它不具有普遍性,因此它一定不是产生 $\beta$ 衰变连续能谱的主要原因;

(3) 实验已经证实每个原子核在发生衰变时,每次只放射出一个电子,因此不会发生电子散射的情况,这样第三种假设也被否定了.

消除了这一切似是而非的假设后,埃利斯和伍斯特大胆地认为“衰变电子是以不同的速度从原子核发射出来的”.虽然他们无法给出合理的解释,但他们认为这个问题非常具有研究意义.于是他们开始查阅资料设计实验进行进一步研究.

经过研究他们注意到,可以通过测量镭E的 $\beta$ 衰变热效应来测试电子在脱离原子核或整个系统时的平均能量.如果通过热辐射测得的能量平均值等于 $\beta$ 衰变能谱上看到的最大值(大约为1000kV),那么 $\beta$ 衰变就应该是单能,是一系列次级过程的影响导致了连续能谱的产生;若通过热辐射测得的能量平均值等于能谱上计算出来的平均值(大约为350kV),那么则可以断定 $\beta$ 衰变产生的电子能量是连续的.

说来似乎简单,但真正的实验却会遇到许多问题.首先,他们无法找到纯净的镭E来做放射源,其次他们没有准确的计量方法来统计发生 $\beta$ 衰变的镭E的数目,最后量热器的构造也是难题,因为他们很难保证没有热量的损失.诸多的困难让这个看似简单的实验成了理想模型,成为了无法完成的难题.但这些困难并没有吓倒执着的埃利斯和伍斯特,他们整天埋头实验室查阅资料、进行试验、冥思苦想.终于,他们发现镭E发生 $\beta$ 衰变后会变成钋,之后钋会发生 $\alpha$ 衰变,而 $\alpha$ 衰变产生的氦核能量是固定的,因此可以通过测量 $\alpha$ 衰变的热辐射能量来确定钋的数目进而确定镭E的数目.而之前所说的无法得到纯净的镭E源,但是镭E源的杂质也是钋元素,所以只需要运用上面的方法,先统计出第一次衰变过程中 $\alpha$ 衰变的热辐射能量便可知道最初钋的含量,这一下两个难题就都得到了解决.那么还有最后一个难题,就是量热器的热损失问题.经过不断的实验改进,他们发现热损失是不可以绝对避免的.他们用铅和铜做吸收体,将镭E源置于铅管内部很薄的黄铜

管中, 镭E衰变的电子被铅管吸收, 钋衰变的 $\alpha$ 粒子被黄铜管吸收. 为了减少热量损失, 量热器被放置在一个铜块的空腔内, 铜块又放置在衬有毛毡的木盒当中. 尽管这样, 热量损失仍是无法避免的. 对此, 埃利斯和伍斯特做了深入思考. 他们发现, 虽然热量损失不可避免, 但是把量热器做得尽量精密, 使每次实验的热量损失都保持恒定, 当量热器吸收的热量和放出的热量相等时, 系统温度就达到了恒定, 然后可以根据这个恒定的温度和量热器的热损失效率来计算出系统吸收的热量, 也即镭E源和钋发生衰变产生的能量. 为此, 他们做了无数次实验来对量热器的热损效率进行校正计算.

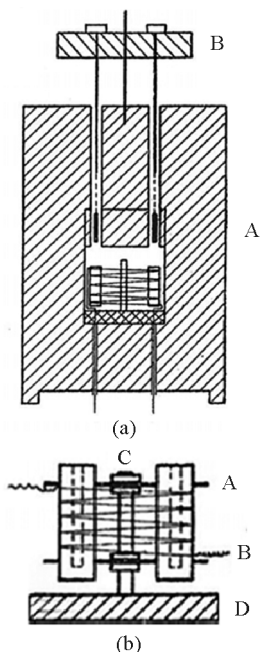


图1 埃利斯和伍斯特使用的量热器<sup>[5]</sup>

(A: 木盒, B: 黄铜管, C: 铅管, D: 毛毡)

所有的难题都找到了解决办法, 下一步就是进行正式实验了. 如上所述, 由于量热器的构造相当精密, 而且是经过了无数次的实验校正, 所以实验必须在比较理想的环境下进行, 很小的震动就可能造成实验的失败. 他们的实验室正好是紧邻街道的, 所以每天只能在半夜的两三点, 所有人都进入梦乡的时候, 埃利斯和伍斯特才能毫无顾虑地去进行他们的实验. 就这样忙碌了无数个夜晚, 终于功夫不负有心人, 他们成功测量出了 $\beta$ 衰变的热辐射能量.

### 3 揭秘 $\beta$ 衰变之谜

埃利斯和伍斯特的用量热器测量的实验结果如图2所示. 图中横坐标表示时间, 纵坐标表示能量, 即吸收热量. 图中底部的曲线表示镭E源中的杂质钋衰变的热量, 上部的曲线表示量热器测得的总热量, 则镭E衰变的热量就是“总热量减去钋衰变的热量”, 即为图中阴影部分. 通过计算, 埃利斯和伍斯特得出图中阴影部分(即纯镭E)是呈指数形式衰变的, 衰变的周期为5.1天, 从而很好地证明了他们实验的准确性. 如图3所示, 纯镭E发生 $\beta$ 衰变的热效应对于时间的函数是一条斜率为5.1天的直线, 这与他们的实验结果相当吻合.

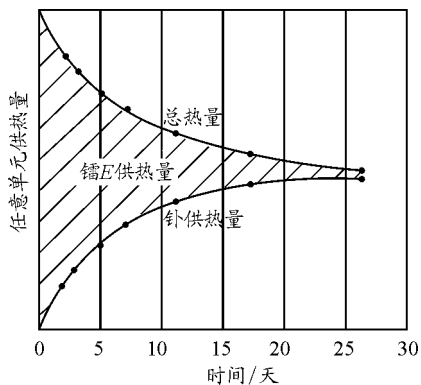


图2 热辐射吸收曲线<sup>[5]</sup>

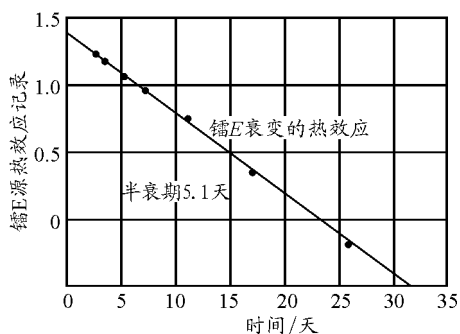


图3 纯镭E衰变的热效应曲线<sup>[5]</sup>

埃利斯和伍斯特对镭E衰变的热效应进行了推算, 具体过程如下: 设 $t=0$ 时镭E的数目为 $N_E$ , 经过时间 $t$ 后每秒发生衰变的镭E数量为 $N_E \lambda_E e^{-\lambda_E t}$ , 其中 $\lambda_E$ 表示镭E的衰变常数,  $\lambda_P$ 表示钋的衰变常数,  $t$ 表示时间. 每秒钟发生衰变的钋原子数可以表达为

$$\frac{N_E \lambda_E \lambda_P [e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda_E t}]}{\lambda_E - \lambda_P}.$$

令  $X = t$  时间钋衰变释放的能量 / 单位镭  $E$  原子衰变的平均能量. 则在时间  $t$  时, 镭  $E$  的热效应相对钋的热效应比值为  $\frac{e^{-\lambda E t} (\lambda_E - \lambda_P)}{X \lambda_P [e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda E t}]}$ .

埃利斯和伍斯特说:“利用上述表达式可以计算

图2中  $X$  的值, 然后再用这个值除以  $5.22 \times 10^6$  伏特就是钋衰变的能量, 继而可知镭  $E$  的热效应.” 计算结果如表1所示. 他们测得的镭  $E$  发生  $\beta$  衰变的能量与 350 kV 非常接近, 实验的平均值为 344 kV, 标准差为 10 kV.

表1 镭  $E$  热效应计算统计表

时间 / 天	总供热量	钋供热量	镭 $E$ 供热量	$X$	镭 $E$ 衰变的平均能量 / V
2.25	22.0	3.68	18.3	15.4	339 000
3.20	20.8	4.91	15.9	15.5	337 000
5.20	19.0	6.99	12.0	15.5	337 000
7.20	17.8	8.64	9.2	15.6	335 000
11.20	16.1	10.53	5.6	14.5	360 000
17.20	14.2	11.83	2.4	14.7	355 000
26.20	12.85	12.18	0.67	15.1	346 000

埃利斯和伍斯特还用强度不同的镭  $E$  源进行了另外 4 个实验, 结果如表 2 所示, 他们选择实验 4 作为最终结果. 埃利斯和伍斯特说:“我们估算了前 3 次实验的误差大约是 15%, 第 4 次实验的误差大

约是 5%, 我们认为应该将实验 4 的数据作为最终的实验结果, 因为实验 4 的误差在 10% 以内.” 他们还提到了一个可能引起误差的因素, 除了引用的统计数据误差之外, 还有系统误差的影响.

表2 镭平均衰变能

实验	第一次加热测量时的镭 $E$ 量 / mg	衰变时间 / 天	镭 $E$ 热效应与钋热效应比值	镭的平均衰变能
1	0.13	11.3	0.50	320 000
2	0.17	3.3	3.15	420 000
3	0.22	12	0.43	320 000
4	1.02	2.25	5.1	344 000

埃利斯和伍斯特对他们的实验结果做了非常详细的描述, 实验结果表明镭  $E$  发生  $\beta$  衰变的平均能量为 350 kV 左右. 他们认为, 没必要再重复说明已经被他们否定的迈特纳关于  $\beta$  衰变连续能谱产生原因的 3 个假设, 这样的实验结果已经说明镭  $E$  发生  $\beta$  衰变时释放的能量不是定值. 图 4 为镭  $E$  的  $\beta$  衰变能谱, 从图中可观察到镭  $E$  发生  $\beta$  衰变的能量谱是连续的, 能量为 300 kV 的电子数目最多, 衰变电子能量的最大值为 1 050 kV. 如果每次衰变释放的能量都是一个定值, 那么在热效应测量实验中得到的平均能量将是接近 1 000 kV, 大约为实验结果的 2.8 倍. 埃利斯和伍斯特说道:“由于实验本身具有一定的困难, 最终实验结果的误差约为 10%, 但这已经足够说明问题了. 因为两个假设的预测值相差

甚远, 一个是 350 kV, 一个是 1 000 kV, 所以在 10% 的误差范围内, 344 kV 的实验结果足以证明  $\beta$  衰变的电子能量是连续的.”

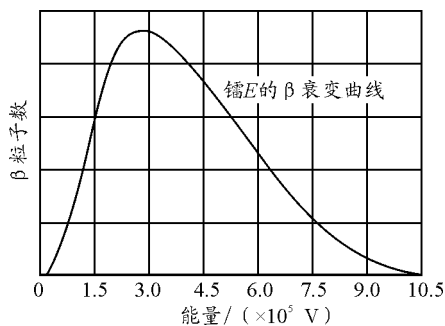


图4 镭  $E$  的  $\beta$  衰变能谱

他们还补充道, 他们相信这个实验结果可以推广到所有的  $\beta$  衰变, 并且关于  $\beta$  衰变连续能谱成因

的长期争论似乎也得到了解决,在 $\beta$ 衰变中原子核可以放射出能量在一定范围内变化的电子。

埃利斯和伍斯特的实验震惊了物理学界,许多物理学家都对实验结果抱有怀疑的态度,包括当时一直研究放射性的著名物理学家迈特纳。迈特纳和她的同伴重复了埃利斯和伍斯特的实验,得到每次 $\beta$ 衰变中放射性粒子的平均能量为 $337\text{ kV} \pm 20\text{ kV}$ ,结果在误差允许范围内他们的实验结果与埃利斯和伍斯特的完全相符。迈特纳写信给埃利斯说:“我们已经完全验证了你的结果,在我看来,毫无疑问, $\beta$ 衰变中电子的能量不是一个定值,你们的假设是完全正确的,但我还不明白这具体是为什么。”

困扰物理学界20多年的 $\beta$ 衰变之谜终于有了定论, $\beta$ 衰变的能量是连续的, $\beta$ 衰变中电子没有固定能量。但是,为什么会产生这样的结果呢? $\beta$ 衰变中为什么会产生能量不同的电子? $\beta$ 衰变之谜的解决也为另一项伟大发现打下了基础,那就是中微子假说的提出。

#### 4 中微子假说问世

当时量子理论深入人心,几乎所有人都知道能级是分立的,从一个能级到另一个能级的能量差也是一定的, $\beta$ 衰变产生的连续能谱很不能为人们所接受。就在物理学家们为 $\beta$ 衰变中的能量问题困惑不解时,泡利对此做了更加深入的思考。他发现 $\beta$ 衰变中似乎不仅仅是能量不守恒,自旋角动量似乎也不守恒。因此,泡利大胆地猜想,原子核在发生 $\beta$ 衰变的过程中,在放射出电子的同时还辐射出一个穿透力特别强而且质量近乎为零的粒子,该粒子服从费米-狄拉克统计,且不显电性。如果泡利的假设成立,那么一切问题便迎刃而解了。

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中微子假说,但与会的物理学家大都不太认同。1931年6月,泡利在美国物理学会举办的帕萨迪纳会议上再次向大家公开他的假说,与会代表仍大多持怀疑态度,但这次引起了如费米在列的一些物理学家的注意。1933年10月,泡利在索尔维会议上第三次提出中微子假说,终于得到了一

部分物理学家们的重视和接受。之后,费米经过认真的思考,终于接纳了泡利的假说。到1934年,费米提出了 $\beta$ 衰变理论。这一理论具有划时代的意义,它从理论上肯定了中微子的存在,并成功解释了 $\beta$ 衰变的能量分布问题<sup>[6]</sup>。

#### 5 结束语

2013年11月23日,科学家首次捕捉到了被称为“宇宙隐身人”的高能中微子,中微子假说的正确性终于得以证实。而这一切的开始,包括中微子假说的提出,一切都起源于 $\beta$ 衰变能量连续谱的证实。所以埃利斯和伍斯特在物理学发展上具有不可磨灭的功勋,他们的研究提出了一个令人错愕的问题,同时也为物理学发展指出了一条新的道路,他们的功勋是值得永载史册的,他们锲而不舍的精神也是值得后人敬仰和学习的。

加拿大物理学家阿瑟·麦克唐纳和日本物理学家梶田隆章发现中微子振荡,证实中微子有很小的质量,因而获得了2015年诺贝尔物理学奖。除此之外,自1988年以来,关于中微子的研究还曾几番获得过诺贝尔物理学奖。如今,许多世界前沿的物理学家仍在进行着有关中微子质量的研究,而且它仍有极大可能再获诺贝尔物理学奖。由此可见,关于中微子的研究课题在现代物理学中的重要地位,然而这一切都源自于20世纪20年代一群科学家们对 $\beta$ 衰变的不懈研究。

#### 参考文献

- 1 张民仓,皇甫国庆. $\beta$ 衰变能量连续谱发现的历史回顾[J].物理,2003,33(5):378~381
- 2 陈华. $\beta$ 衰变能量连续谱的发现历史及其启示[J].广西物理,2017,37(3~4):59~64
- 3 潘炜,张晓霞. $\beta$ 衰变理论的提出[J].大学物理,2009,15(3):37~39
- 4 孙龙周.宇宙射线及正电子的发现、研究简史[J].物理教师,2018,39(10):73~75
- 5 Allan Franklin, Physics Textbooks Don't Always Tell the Truth, Physics in Perspective, 2016, 18(1): 3~57
- 6 孙龙周.中子的发现简史[J].物理教师,2018,40(10):74~76