

中 微 子

〔苏〕B. C. 别列津斯基 著

科 学 出 版 社

中 微 子

〔苏〕B. C. 别列津斯基 著

朱吉靖 李光遂 译

黄高年 校

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍中微子、中微子的发现过程及有关的当代理论：弱相互作用、高能和超高能时的相互作用以及弱相互作用的重正化理论。文字深入浅出。有高中以上文化水平并对物理学感兴趣的人均可阅读。

В.С.Березинский
НЕЙТРИНО
《Знание》，1973

中 微 子

〔苏〕В.С.别列津斯基 著
朱吉靖 李光遂 译
黄高年 校
责任编辑 蒋太培

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行。各地新华书店经售

1985年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年8月第一次印刷 印张：2 3/8

印数：0001—4,500 字数：49,000

统一书号：13031·2958

本社书号：4591·13-3

定价：0.48元

译者序

这是一本讲述中微子和其它基本粒子之间的弱相互作用的科普读物。它从发现中微子的过程入手，深入浅出地介绍了中微子的基本特性，并通过定性描述向读者介绍了弱相互作用。

本书也有明显的缺点。首先，历史的叙述不够全面。例如，我国物理学家王淦昌教授1941年（当时他在内迁贵州的浙江大学任教）曾提出用探测 Be^7K 层俘获核反冲的方法探测中微子*；次年，美国物理学家艾伦根据这一思想完成了首先发现这种反冲的实验**。这是物理学界公认的事实，但书中却没有提及。

其次，本书写于1973年以前，由于基本粒子物理学的迅速发展，某些材料今天看来显得“陈旧”了。当前，加速器中的中微子能量已超过千亿电子伏（100 GeV ），并且已经积累了百万个以上的中微子作用事例。书中提到的当时认为不存在的“中性流”，现在已经由实验证明了它的存在。此外，还发现了重轻子 τ 粒子，发现存在着第三类中微子 ν_τ 。瓦英别尔格-萨拉姆的弱相互作用与电磁相互作用统一理论，与现在已获得的大量实验事实都符合。对于这些问题，有兴趣的读者可以阅读有关的资料。

*王淦昌教授的论文发表在Phys. Rev. 61 (1942) 97上。

**艾伦的论文发表在Phys. Rev. 61 (1942) 692上。

况浩怀同志和宋焕同志校阅了译稿全文，汪容同志为我们解答了许多问题，他们对译稿提出了许多宝贵意见。谨向他们表示衷心感谢。

译者

1984年4月

目 录

一	代序.....	(1)
二	中微子还是中子?	(3)
三	β 衰变理论.....	(9)
四	发现中微子.....	(16)
五	宇称不守恒.....	(19)
六	两类中微子.....	(25)
七	关于弱相互作用的普适的四费米子理论.....	(30)
八	高能条件下的弱相互作用	(40)
	1. 理论的成就.....	(40)
	2. 高能条件下弱相互作用理论的困难	(49)
	3. 超高能的情况	(58)
九	结束语.....	(63)
	附录.....	(66)

一代序

……守恒定律是有效的，可是在辐射 β 粒子的同时，会伴随着飞出一种穿透能力很强的、至今尚未被发现的中性粒子。

——泡利，1933年

把它叫做中微子吧！

——费米（据庞捷科尔沃回忆）

像神话中的神那样，中微子被赋予的特点，总是比它本身直接表现出来的要优越得多。

——鲁杰尔曼，1965年

这种在多方面使人惊异的粒子——中微子的发现，在科学史上既未成为隆重庆祝的成就，也未成为一个激动人心的事件，甚至未成为一个有纪念日的事件。实际上可以说：中微子是在约四分之一世纪的长时间内陆续发现的。

——马尔科夫（《中微子》，1964年）

不幸的中微子！但是不会永远是这样。我确信，在不久的将来，中微子必将获得应有的荣誉，甚至进入人类的生活。

——庞捷科尔沃（《在探索的道路上》，1963年）

最终成功的可能性令人如此沮丧，以致我们都不想再研究它了。然而并不排除自然界存在着这种粒子的可能性。

——奥孔（《基本粒子的弱相互作用》，1963年）

自然界的真理不可能，也永远不会成为艺术的真理。

——巴尔扎克

虽然我们企图发现的规律也可能是完美的，但人类的智慧远远没有达到完美的境界：只要听其自然，人类就容易失误。过去无数的事例证明了这种可悲的情况。事实上，我们难免误入迷途。只有由观察和费力地从自然界获得的新资料才使我们回到了正确的道路上来。

——什瓦尔茨希尔特，1961年

二 中微子还是中子？

中微子不同于所有其他的基本粒子，它有确切的诞生日期。它是在1930年12月4日从理论上发现的。那一天，泡利给聚集在土宾根参加放射性工作会议的人们写下了他自己著名的和口气稍带戏谑的一封信：《致从事放射性工作的女士们和先生们》。在这封信之前曾有一系列使当时的物理学家几乎陷入绝境的实验发现。其中最要紧的一个实验是所谓“氮的危机”——美国物理学家克罗尼克通过光谱分析证明了氮核有整数的自旋*。

当时物理学界曾顽强地想得到半整数的氮核自旋值。事实上，大家都认为核是由当时所知道的粒子——质子和电子构成的。既然氮核的原子序数等于14，而它的电荷等于7，那么氮核中唯一可能存在的质子和电子数目的组合就应是14个质子和7个电子，所以自旋的总和应当是 $\frac{1}{2}$ 的奇数倍，即只能是半整数（电子和质子的自旋都等于 $\frac{1}{2}$ ）。

那时的第二个谜是核的 β 衰变。在 β 衰变中，A核变成了另一种B核，同时放射出电子。既然那时候认为核内有电子，那么这个过程似乎是完全理所当然的过程。然而奇怪的是，并非如此！

本来在这个衰变中应该产生具有确定能量的电子，其能

-
- 粒子的固有动量矩称为自旋。普通经典力学中认为这个动量矩是由于粒子绕轴旋转而产生的。粒子动量矩（自旋）矢量的方向就是旋转轴的方向。在量子力学中认为粒子的自旋只能有离散的值 $\pm n\hbar$ ，其中的 $\hbar$ 是普朗克常数，而 $n=0, 1, 2 \dots$ 是整数。

量是 $E_c = E_A - E_B$ ，式中 E_A 和 E_B 分别为A核和B核的全部内能。它们可根据这些核的质量按著名的爱因斯坦公式 $E = MC^2$ 求出。

事实不然，由A核飞出的电子具有各种不同的能量，或者像通常所说的，具有连续的能谱。这个明显的实验事实迫使物理学家们要怀疑能量守恒定律了。著名的丹麦物理学家玻尔曾推测：能量守恒定律只是在许多衰变过程中在平均的意义上才有效，而并非在每一次衰变中都遵守能量守恒定律。

在1930年年底，泡利有了一个想法，即“氮的危机”和 β 衰变只是一个谜的两种表现形式。而这两个困难也许能一箭双雕地得到解决。确实，如果允许核内除质子外还具有自旋为 $\frac{1}{2}$ 的中性粒子的话，那么，不管带电粒子数是不是奇数，氮核中全部粒子数就可以是偶数，这样就不难理解为什么氮核可以具有整数的自旋了。

另一方面，这些中性粒子还能拯救能量守恒定律。对此只要作如下假定就行：即在核的 β 衰变过程中，从核里同时飞出电子和这种中性粒子，而这种中性粒子在不知不觉中带走了核衰变时释放的部分能量。

于是，在1930年12月4日泡利向土宾根写了自己那封著名的信。当时那里正在举行着有关放射性问题的会议。泡利在信中叙述了他发现新粒子的想法，并给此新粒子取名为“中子”。但是泡利早已料到，他的关于“中子”的想法会遭到实验物理学家们的非议，并知道这种非议是属于什么样的性质。泡利预料到一般的怀疑论者会提出这样的问题：“为什么在 β 衰变的实验中直到现在还未发现中子呢？”所以他预先回答了这个问题，他提出：中子与物质的相互作用很弱，所以能不受阻碍地通过很厚的物质。

泡利这样的补充和不得已而做出的假定使得他的设想在争论中成为不可击破的了。然而这不可击破性的本身，却又成了他整个思想的致命弱点。这一点是很容易理解的。要知道，每当实验人员作出关于没有这种假设的粒子存在的报道之后，都能断言它的穿透能力比原先设想的还要大，照这样一直继续下去，最后导致从原理上根本不可能观测到这种粒子的结果。所以连泡利本人也不能相信有这种神秘的粒子了。难道它们比神仙还神秘吗？

因此泡利是很谨慎的。他写道：“然而我暂时还不想发表关于这种想法的任何东西，我仅以信任的心情向诸位——亲爱的从事放射性工作的女士们和先生们提出一个问题：如果中子具有和 γ 量子大致相同的或大10倍的穿透能力，能否用实验方法证明确实有中子存在？”

泡利的信大体上是以坦率和戏谑的口气写的。他用这种口气不是偶然的。泡利并不追求那种震撼世界的发现，他只是寻求解决问题的途径，只是要物理学家们注意到新的成功的可能性。

请大家注意泡利这封信的结束部分以及他对自己的假定的态度。

“我承认，我的结论乍看起来似乎不太可能，因为如果真有中子存在，也许它早就被发现了。可是不入虎穴，焉得虎子？我所尊敬的老前辈杰巴伊先生曾告诉我关于连续的 β 能谱的严重情况。不久前在布鲁塞尔他曾对我说过：“哦……关于它，最好完全不要去想，如同不要去想新的税收一样。”因此，必须认真讨论所有出路。总之，从事放射性研究的女士们和先生们，请检验和判断吧！可惜我自己不能来土宾根，因为苏黎世于12月6日夜間到7日将有舞会，使我没有可能来您们这里。谨向您们以及巴克先生问候。

您们最忠实的仆人泡利”

“那个时候，他毕竟很年青，”美籍中国物理学家吴健雄女士后来评论说。关于吴健雄女士我们在后面还要提到。

土宾根的物理学家们的反应对泡利来说是完全意外的。对泡利的中子设想十分感兴趣的盖依盖尔很快就写了封信寄到苏黎世。盖依盖尔在和很多物理学家，特别是和利扎·麦特涅尔进行了一系列的讨论后得出结论：“从实验的观点来看，泡利的新粒子是完全可能存在的。”

但是盖依盖尔的信并未使泡利产生所期望的印象。他越思考他提出的这种粒子的特性，心中的怀疑就越强烈。怀着这种心情，以及某些新的想法，泡利在1931年夏天来到美国。

泡利“在1931年6月于帕萨迪纳举行的美国物理学会上所作的报告中”回忆道，“我第一次当众报道了我自己的关于在 β 衰变中会出现一种穿透力很强的新的中性粒子的想法。我那时已经不把它当作核的组成部分，不称它为中子，而且根本不用任何独特的名称来称呼它*。然而我对这事好象总是觉得很可疑，因而我决定不刊印自己的报告。”

在到达帕萨迪纳以前好久，泡利就不再认为他的粒子是原子核的组成部分了。接到盖依盖尔的来信之后不久，他就得出了这个结论。而那个迫使他改变了自己早先的观点的原因是十分有趣的。

泡利研究了具有他所设想的中子的核以后，明白了他必须说“或许……或许……”

-
- 泡利的粒子正是在这次会议上得名的。尼·费米激动地打断泡利的报告高声嚷道：“就把它叫做中微子吧！”庞捷科尔沃在回忆这段历史时是用“中性的小不点”来翻译中微子的。

或许他的中子包含在核内，那么它应该有很大的质量并且与原子核强烈地相互吸引。如果泡利的中子真的是被束缚在核半径 R 的范围内，则根据海森伯的测不准原理^{*}，它的动量应该满足条件 $\Delta p \geq (h/R)$ 。这意味着泡利的中子在核内至少有 $p \approx h/R$ 的动量。在这样的动量下，为使该粒子的动能不足以使它从核中挣脱出来，它的质量就必然很大（对于非相对论性粒子， $E_{\text{动能}} = p^2/2M$ ）。但即使在这种情况下，为了把粒子束缚在核内也需要极大的相互作用的核力。粒子的这种特性能解决“氮的危机”，但仍解决不了能量守恒定律在 β 衰变时所遇到的困难。要知道，这样重的粒子，而且与核有很强的相互作用，在 β 衰变的实验中是不可能不被发现的。

泡利比较倾向于下面这种想法（即第二个“或许”）：暂且不管“氮的危机”而先解决能量守恒的问题。为此需要作如下的假定：在原子核发生衰变时，新的中性粒子与电子同时产生，并带走一部分能量。而在发生衰变以前，原子核内部并没有这种粒子，所以不需要去找出能使它与原子核紧密地吸引在一起的强力。这样就有可能假定这种新粒子具有极大的穿透能力，并且它的质量极小。因而在 β 衰变的实验中未能发现这种有“隐身术”的粒子也是很自然的了。

发现新粒子这种事是不能随便说说的。物理学家仅在万

-
- 海森伯的测不准原理规定，粒子所处的状态必须满足下列条件：它的空间位置的不确定性 Δx 和它的动量的不确定性 Δp 应该满足条件 $\Delta p \cdot \Delta x \geq h$ 。例如，如果我们为粒子“造就了”这样一种状态，使粒子的动量准确给定（ $\Delta p \rightarrow 0$ ），则粒子在空间的位置将是完全不确定的（ $\Delta x \rightarrow \infty$ ）；粒子将象一个无穷的波，没法说准粒子究竟位于什么地方。如果用某种巧计把粒子“钉死”在空间某个确定的点上（ $\Delta x \rightarrow 0$ ），则粒子的动量就是完全不确定的了（ $\Delta p \rightarrow \infty$ ）。这时只能说粒子可能具有在 $\Delta p \rightarrow \infty$ 这个大范围内的任何动量值。

不得已时才往这方面设想。但是泡利处在他的地位上需要下决心迈出加倍冒险的一步，只有那样才能证明他是完全正确的。他需要同时想出两种新粒子：用中子来解决“氮的危机”，用中微子来解决 β 衰变的问题。

可是在泡利反复考虑这个决定时，他很清楚地意识到，这种决定取决于物理学上的透彻的鉴别能力和对物质结构的精巧简单的结构的想法。但遗憾得很，在那种情况下要迈出有独创性的一步，需要的却往往是不怕丢脸和博览群书。

三 β 衰变理论

中子是在1932年发现的，而通过实验发现中微子却拖延了26年。苏联物理学家列依蓬斯基在1936年首先提出了用实验来记录中微子的设想。而这个实验的实现却是在1942年由艾伦在美国完成的¹⁾。

列依蓬斯基注意到某些原子核非但不放射电子，相反却俘获自己原子中的一个电子。这个过程在各方面都和 β 衰变十分类似，因而也应该同时放射出中微子。例如，铍核 Be^9_4 在从自己的K层俘获一个电子变成锂核 Li^9_3 的同时放射出中微子。这时核得到反冲动量，根据反冲动量可以记录到中微子。

如果在真空容器中把铍原子沉积到金属细丝上，则将有锂核从丝上不断地被抛下来，那时剩下的问题只是在真空容器里捞取这些核了。艾伦在1942年顺利完成的正是这个实验。

但是我们再仔细地想一下，艾伦的实验是不是已经令人信服地证明了中微子的存在呢？这些实验比众所周知的在 β 衰变时丢失能量的事实又更能说明什么呢？我们设想一下：如果艾伦在1931年完成了他的实验，并把他得到的结果交给那个不相信存在中微子和坚决主张在 β 衰变中能量不守恒的玻尔去判断，艾伦能不能说服那个固执的丹麦人呢？

1) 艾伦的论文发表在 *Phys. Rev.* 61 (1942) 692上。艾伦在文中指出，他的实验是根据中国物理学家王淦昌提出的方法而进行的。——译者注

当然不能。玻尔从艾伦的实验中只会认为动量守恒定律失效了，核在俘获电子时得到一次额外的震动。

艾伦的实验结果只能很谨慎地简述如下：如果有中微子存在，那么它的质量不大于电子质量的千分之一。

物理学家雷尼斯（他花了25年时间不断地探索中微子，最后成功地作出了决定性的贡献）这样写道：

“直到1956年，关于中微子存在的证据都是观察参予 β 衰变的其他粒子（电子和反冲核）得到的。这种间接的证据虽能给人的印象深刻，并和有关中微子的假定相一致，但是在逻辑上却不能令人信服，因为它们只是重复在 β 衰变中能量守恒和动量守恒这样一个前提而已。”

离奇的是，在五十年代到来以前，像在钢笔尖上建摩天大楼那样，已经在这种想像的中微子的基础上建立了完整而详细的 β 衰变中微子理论。这个理论的基本思想早在1933年就由费米提出来了。

费米认为， β 衰变是核内的一个中子转变成一个质子并放射出一个电子和一个中微子的过程。在能量有利的条件下，原子核内的质子也能转变成中子，这时放出的是正电子而不是电子。

费米仿照电动力学的理论而建立了自己的理论。在电动力学中，由受激原子放射电磁辐射光量子的现象被描述为原子和电磁场相互作用的结果。电动力学中的相互作用发生在三种粒子之间：一、受激原子的电子（在相互作用后被吸收），二、末态原子的电子（新产生的），三、光子。并假定这三种粒子只有处在空间的同一点时，才发生相互作用（这样的相互作用称为定域相互作用）。

在 β 衰变理论中只用核外的电子-中微子场来描述两种粒子；只有四种粒子（原先那个核内在相互作用中被吸收的

中子、新诞生的质子、电子和中微子)都位于空间同一点时才发生相互作用。这四种粒子都是费米子,即它们的自旋都等于 $\frac{1}{2}$,因此所描述的相互作用称为四费米子定域相互作用。

定域相互作用常数的量纲取决于在一个点相互作用的场数(粒子数)。对电磁相互作用来说,场数是3,因此它是以无量纲的相互作用常数为特征的,并记为 e (粒子的电荷)。受激原子放射光子的几率正比于 α , $\alpha=e^2/4\pi=1/137$ 。

一般说来,相互作用常数是不能进行理论计算的,只能借助于实验得到这个常数的数值。电磁相互作用常数决定两个距离为 r 的电子的库仑相互作用的能量: $W=a/r$ 。

在 β 衰变中起作用的弱相互作用与电磁相互作用比较起来增加了一个“多余”的场,所以弱相互作用常数 G 的量纲为长度的平方。(怎样得到 G 的量纲将在后面详细叙述)像在电磁相互作用中那样, β 衰变的几率正比于耦合常数 G 的平方。弱相互作用常数 $G=10^{-5}/m_p^2$ (精确度为1%),式中的 m_p 是质子的质量。

必须说明,前面刚刚说过 G 的量纲为长度的平方,那为什么在 G 的公式中出现了质量呢?这是因为在基本粒子物理学中采用了这样的单位制,其中普朗克常数 $\hbar$ 和光速 c 都等于1: $\hbar=c=1$ 。在这种单位制中,质量 $[M]$ 、动量 $[p]$ 和能量 $[E]$ 的量纲都是一样的,且都等于长度和时间量纲的倒数。例如,在这种单位制中,根据质子质量 m_p ,可以按照下面的关系式来确定能量、长度和时间: $1/m_p \approx 2 \times 10^{-14}$ 厘米 $= 7 \times 10^{-25}$ 秒。

今假设有一种核A,它在 β 衰变后变成另一种核B,同时放出能量 E_0 。 $E_0=m_A-m_B$,这些能量由电子和中微子带走。在一秒钟内核发生衰变的总几率是多少呢?

首先我们知道,按相互作用常数的定义,这个几率正比