

无中微子双贝塔衰变

刘江来

(上海交通大学物理与天文系 上海市粒子物理宇宙学重点实验室 200240)

无中微子双贝塔衰变，好一个拗口的名词！还记得泡利 1930 年为了解释贝塔衰变连续能谱而纠结地发明了中微子么？原子核中一个中子变为质子的衰变叫贝塔衰变，如果有两个中子同时变为两个质子的衰变叫双贝塔衰变，这个好像并不难理解。可是泡利告诉我们每一个贝塔衰变都应该有一个中微子伴随而来，因此双贝塔衰变应当是双中微子伴随双贝塔衰变才对吧？那么无中微子双贝塔衰变是什么？好了，我们还是从琢磨不透的中微子说起吧。

我们知道狄拉克方程是描述费米子的场方程，正电子是狄拉克电子“海洋”中的带负能量的空穴。1937 年，意大利的天才青年物理学家马约拉纳 (E. Majorana) 因为不满意狄拉克方程中电子和正电子之间的非对称性，将正、反粒子的场组合成一个同时满足正、反粒子的对称性和狄拉克方程的场，对应的粒子就是所谓的马约拉纳费米子，它们是自己的反粒子。马约拉纳在文章中提出，中性的中微子可能就是这种新的马约拉纳费米子。在 1938 年，前途无量的马约拉纳神秘地失踪，从此没有人再见过他。中微子到底是狄拉克费米子还是马约拉纳费米子在此之后就成了公案。在普通的贝塔衰变中，不论是狄拉克还是马约

拉纳理论电子一定伴随着反中微子出现，在观测上没有区别。1939 年，哈佛大学的弗瑞 (W. Furry) 提出可以通过寻找无中微子双贝塔衰变来对中微子的本质做出判断，也就是说寻找双贝塔衰变中仅仅有两个电子而没有中微子的末态反应。这种反应的原理图如图 1 所示，普通双贝塔衰变中一个原子数 A 电荷数 Z 的原子核一次发生 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + e^- + e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e$ 的反应，由于要求一次性发生这种反应，需要确保中间态原子核 $(A, Z+1)$ 是一个虚态，也就是要求其核质量上比母核 (A, Z) 要大，第一次贝塔衰变不会发生。而无中微子双贝塔衰变要求第一个贝塔衰变放出一个虚的中微子在第二个贝塔衰变中被吸收，以至于形成没有中微子的双贝塔末态，这种反应只有中微子是马约拉纳粒子才可能发生。符合这样条件的天然原子核有三十多种。有趣的是，早期预言的无中微子双贝塔衰变比普通双贝塔衰变更容易发生，其半衰期在 10^{15} 年左右。

20 世纪 50 年代起，有多个实验寻找无中微子双贝塔衰变未果，将半衰期推到了大于 10^{17} 年，与马约拉纳理论不符，于是乎狄拉克中微子占了绝对上风。然而，1957 年李-杨发现的弱相互作用宇称（镜像对

场平均值与普通的冷暗物质不同，这导致中微子与暗物质间存在相对速度。而这种相对速度的存在，导致中微子密度相关函数或功率谱存在偶极矩。尽管中微子的密度本身无法直接观测，但中微子和暗物质密度会对不同类型的星系产生不同的影响，因此通过观测不同类型的星系互相关函数的偶极矩，可以测量上述中微子分布偶极矩。尽管这样测量的互相关函数也依赖偏袒因子，但偶极矩的大小对偏袒因子并不敏感，从而提供了一种鲁棒的中微子质量测量手段。此外，

非线性的结构如暗物质晕也产生中微子尾迹 (wake)，这种尾迹也存在偶极矩，未来可以通过弱引力透镜进行统计观测。

五、结束语

除了精密测量中微子的种类和质量外，宇宙学观测也可以对一些中微子的性质如中微子与暗物质、暗能量的相互作用等进行检验。未来，随着 DESI, LSST, Euclid, SKA 等更大的巡天仪器投入使用，我们将能够进行更精密的宇宙学测量，最终揭示中微子之谜。

称性) 最大化破缺揭示了中微子的手征性, 即中微子总是左旋的, 而反中微子总是右旋的, 在中微子质量为零的标准模型下, 左右手不能互相转变。因此即使中微子是自己的反粒子, 图 1 (b) 中的虚湮灭过程由于手征的不匹配而不能发生。换句话说, 如果中微子质量为零的话, 无中微子双贝塔衰变无论中微子是狄拉克还是马约拉纳都不可能发生, 更不能作为区分两者的判据!

到了 20 世纪末, 中微子的故事又发生了巨大转折! 中微子振荡的发现终于确切的证实了中微子并非质量为零, 而是有着极其微小的质量, 打开了标准模型的缺口。这个发现也使中微子的手征变换成为了可能, 重新点燃了人们测量无中微子双贝塔衰变的希望。这样的极其稀有事例一旦被发, 除了验证中微子是马约拉纳费米子外, 还对粒子物理有一系列革命性的影响。第一, 在图 1 (b) 里, 初态的轻子数为 0, 末态由于仅有两个电子而轻子数为 2, 因此在标准模型里严格守恒的轻子数在这个反应里被破坏。第二, 由于中微子的绝对质量联系手征变换几率, 而中微子质量的直接测量十分困难, 无中微子双贝塔衰变正是另一种独立的间接测量中微子质量的方法。第三, 中微子振荡的现象表明不同的中微子种类之间的质量差很小, 在 0.03 电子伏特以下。人们很自然地联想到产生这些微小质量的机制可能区别于产生其他费米子质量的希格斯机制。最被理论家青睐的机制是所谓的“跷跷板机制”, 这个机制要求中微子是马约拉纳费米子, 并且在极高质量(10^{15} 千兆电子伏特, 也叫大统一能量) 存在着右手马约拉纳中微子, 这种物理图像将可以非常自然地给出非常轻的常规中微子质量。这些重中微子衰变如果破坏电荷-宇称对称性 (CP), 也有望“一石二鸟”地解释宇宙演化过程中反物质的消失之谜。第四, 无中微子双贝塔衰变还有可能揭示除了马约拉纳机制之外的新的轻子数破缺机制, 打开新物理的大门。然而, 大自然在这里又同人类开了个玩笑, 中微子的微小质量使其手征翻转几率极其渺小, 以至于无中微子双贝塔衰变率远小于普通双贝塔衰变, 通常被认为半衰期在 10^{26} 年以上。尽管如此, 当前国际上多个无中微子双贝塔衰变的实验正如火如荼地开展着。

双贝塔衰变实验目前测得有双衰变的核有 11 种, 半衰期大致 10^{20} 年。理想的无中微子双贝塔衰变实验核素应是同位素中衰变能 (Q 值) 比较大的。 Q 值越大, 能量最低原理导致衰变率便越高, 也会使信号和环境放射性的本底分得更开。同时, 探测器越大, 双贝塔同位素含量越高, 测量衰变事例的统计量就越大。图 2 是双贝塔同位素的 Q 值和天然丰度的二维图, 可以看到没有 Q 值和天然丰度同时高的绝对赢家, 不同的同位素各有优缺点。

实验观测上无中微子双贝塔衰变最主要的观测量是总电子能量分布。图 3 是一个扣除环境本底后的示意图, 为了形象地表述, 无中微子事例的数目被人为地放大了。由于两个中微子的存在, 普通双贝塔事例形成一个连续的能谱, 而真正的无中微子双贝塔信号在核反应的 Q 值处会出现一个尖峰。为了和本底得以

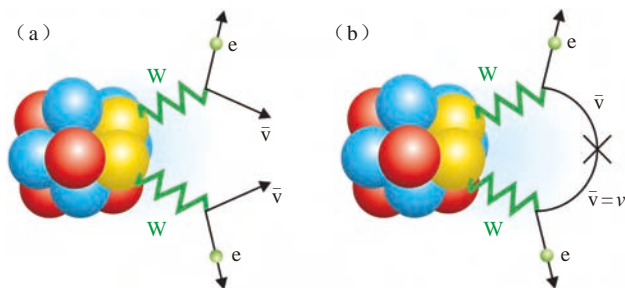


图 1 原子核双贝塔衰变: (a) 通常的两阶弱相互作用产生的双贝塔衰变; (b) 无中微子双贝塔衰变。如果后者能被证明存在, 那么中微子是马约拉纳粒子(粒子是自己的反粒子), 并导致轻子数不守恒, 其衰变的速率依赖于中微子的绝对质量

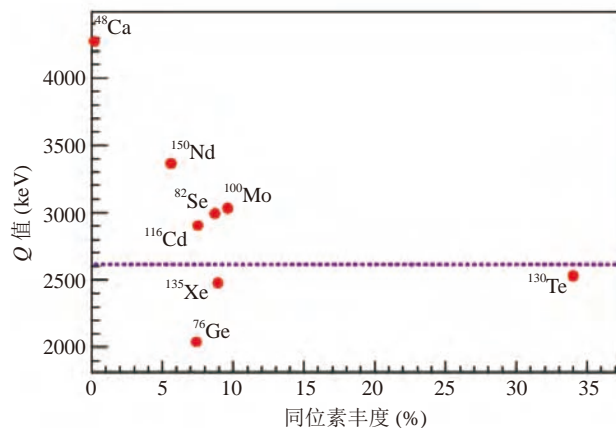


图 2 同位素的双贝塔衰变 Q 值和天然丰度分布

中微子研究与进展

足够的区分，除了统计量（大质量靶材，长时间曝光）以外，实验要求极低的本底和极高的能量分辨率。

^{76}Ge 是双贝塔衰变同位素的一种，高纯锗探测器技术的发展以及这种半导体探测器出色的能量分辨率使这类实验双贝塔衰变的灵敏度在很长的时间处于领先地位。海德堡-莫斯科（H-M）合作实验使用了 11 千克含 86% ^{76}Ge 的探测器开展了超过十年的实验，在 2001 年部分合作组成员宣称以很高置信度找到无中微子双贝塔事件（图 4），但却受到同一合作组其他成员的质疑。H-M 宣称的发现对应 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变半衰期在 10^{25} 年，对应着中微子绝对质量在 0.1 到 0.9 电子伏特之间（三种中微子的绝对质量几乎相

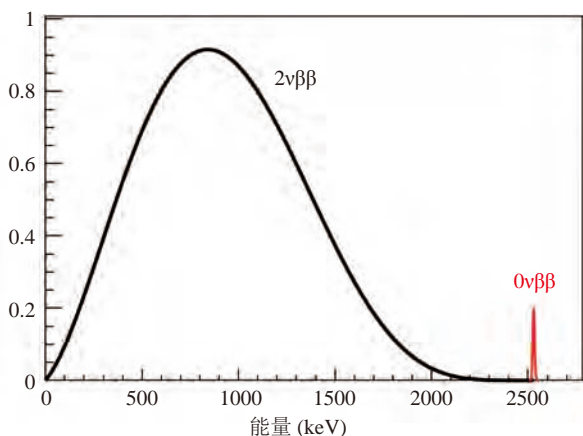


图 3 双贝塔衰变（黑）和无中微子双贝塔衰变（红）总电子能谱示意图

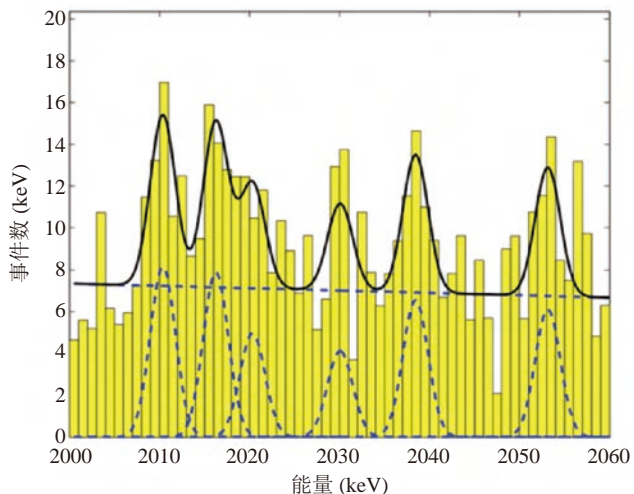


图 4 海德堡-莫斯科实验发表的 ^{76}Ge 能谱，2040 电子伏附近的峰是宣称的无中微子事件（图摘自 *Phys.Lett. B586* (2004) 198-212）

同，被称为质量简并）。有趣的是，宇宙学对微波背景辐射的精确测量却暗示中微子绝对质量低于 0.1 电子伏特。使用同样高纯锗探测器技术的位于意大利格兰萨索地下实验的 GERDA 实验组（图 5）在 2013 年公布了比 H-M 实验本底低近 10 倍的测量结果，没有找到候选事例，将 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔半衰期的下限提高至 10^{25} 年，以很高的置信度排除了 H-M 的结果。至此，中微子的粒子本性依然还是一桩悬案。

如果中微子是马约拉纳粒子而且绝对质量是非简并的，那么无中微子双贝塔衰变的数率将和所谓的中微子的质量顺序密切相关。这个可以通过一个简单的物理图像来理解。我们知道中微子振荡实验至今给出了三种中微子质量本征态“1”，“2”，“3”的质量平方差的绝对值，却没有给出谁最轻！通常说的质量序为正序指的是“1”最轻，“3”最重，而反序则是将两者对调。在贝塔衰变中的中微子是（反）电子中微子，而振荡实验又告诉我们，电子中微子有很大的成分由“1”态组成，因此正序和反序可以非常粗略地对应为电子中微子是最轻和最重的两种情况。电子中微子越重，根据量子力学的测不准原理图 1（b）里的正反中微子虚湮灭便越快地发生，反之则湮灭越慢。如果中微子的质量是反序，理论上预期的无中微子双贝塔衰变半衰期约在 10^{27} 年量级，假理想的本底情况，吨级的双贝塔衰变实验将可以用五到十年的曝光量发现它！但是如果中微子是正序，则需要两个数量级甚至更高的曝光量。

为了到达更大的曝光量，双贝塔衰变的代价和实验难度都是巨大的。其中，对天然丰度小的同位素的



图 5 GERDA 实验实景照片（摘自 GERDA 官方网页）

富集是一项巨额开支，全世界将多种同位素分离大规模产业化的国家只有俄罗斯。此外，由于要探测极稀有信号，所有的实验都在地下实验室里开展以躲避宇宙线带来的本底，并且用极其干净的材料建造探测器。未来的吨级实验对于实验室环境和探测器内部本底目标是小于1个本底事例/年/千电子伏/千克，这对任何一个实验都是一个挑战，建设和实验中稍有不慎将会前功尽弃！

对于当前国际上不同的实验，这里不能一一详述，只能选几个有代表性的实验简略介绍。同前面提到的 GERDA 实验同时推进 ^{76}Ge 实验的还有美国的 MAJORANA 合作组。MAJORANA 实验位于美国的 Sanford 深地实验室，也就是 2002 年获诺奖的戴维斯 (R. Davis) 测量太阳中微子的地方，合作组正在开展几十千克级的验证性实验，和 GERDA 实验竞争。两个实验在各自完成几十千克级实验后，预期将合并为同一个合作组，并根据实验结果确定吨级实验的技术路线。

另外一个很具竞争力的实验是位于意大利格兰萨索实验室的 CUREO 实验 (图 6)。这个实验使用的 100 千克的天然 TeO_2 晶体，其中双贝塔衰变的 ^{130}Te 的天然丰度高达 34%。CUREO 的设计理念和高纯锗实验相似，即追求最好的能量分辨率，使用了世界上最大的稀释制冷机将探测器冷却到 6 毫开尔文的号称“地球上最冷的地方”，测量 ^{130}Te 衰变后产生的微小的温度变化。由于热的量子态“声子”的激发能在毫电子伏的量级，低温量能器的能量分辨率甚至可以超出高纯锗探测器。当前 CUREO 百千克级的实验正在开展。

近年来国际上涌现出多个新型的液氙探测实验，已同时成为无中微子双贝塔衰变和暗物质直接探测后起之秀和夺标大热门！EXO200 是一个位于美国新墨西哥州的液体氙 136 的实验 (图 7)，使用了约 160 千克的含 81% 丰度 ^{136}Xe 的液氙靶，用了时间漂移室的技术，在液体中加上漂移电场将电离的电子从阴极漂移到阳极，通过电子的漂移时间和在阳极上的分布对事件的顶点进行三维的位置重建。为了提高能量分辨率，EXO200 实验同时读出闪烁光信号和电离信号，

采用极低本底的雪崩光二极管 (avalanche photodiode) 来测量光信号，用丝网状的阳极来搜集电离电子的信号。EXO200 在 2014 年发表的无中微子双贝塔衰变的半衰期到达了 10^{25} 年量级。另一个基于 ^{136}Xe 的 KamLAND-Zen 实验建立在日本成功发现反应堆中微子振荡的 KamLAND 实验之上 (图 8)，将 179 千克 ^{136}Xe 融入到一个 3 米直径盛满 13 吨液态闪烁体尼龙袋子里，整个袋子置于 KamLAND 含 1000 吨液态闪烁体的探测器中。该实验仅仅测量 ^{136}Xe 衰变后的闪烁光，能量分辨率比较低，但由于技术成熟，本底低，也比较容易做大，很具竞争力。在 2014 年 KamLAND-Zen 公布的无中微子双贝塔衰变的半衰期



图 6 CUREO 实验安装测试实景照片 (摘自 CUREO 官网)

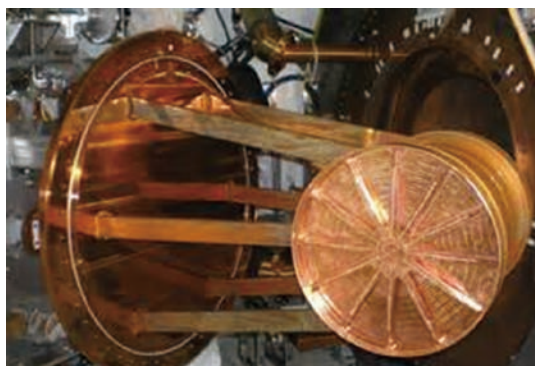


图 7 EXO200 实验实景照片 (摘自 EXO200 官网)



图 8 KamLAND-Zen 实验探测器内部照片 (摘自实验官网)

也到达了 10^{25} 年。利用核物理理论计算可以将 ^{136}Xe 和 ^{76}Ge 的结果联系在一起，这两个 ^{136}Xe 实验的结果也同海德堡-莫斯科实验 2001 年的宣称发现很不一致。目前 EXO200 实验正在筹划未来升级为 5 吨级的 nEXO 实验，KamLAND-Zen 实验正在开展向 1 吨实验的升级。另外 EXO 合作组长开展原子光学的手段来标记双贝塔的子核 ^{136}Ba 的研发工作，作为压低本底的最终王牌。

物理学家的想象力是非常丰富的，会想尽一切办法去压低本底。双贝塔衰变事例的重要特点是从同一个顶点有两个电子同时产生，而伽玛本底通过光电吸收或是康普顿散射产生的电子信号对应的是单电子信号。很显然，如果可以重建电子事件的径迹将大大提高对本底事件的甄别能力。然而电子在液氙中行驶的径迹很短，因此无论是 EXO 还是 KamLAND-Zen 都无法重建事件的径迹。西班牙的 NEXT 合作组是国际上首个提出使用高压气氙时间漂移室对 ^{136}Xe 的双贝塔衰变进行探测，在这样的探测器里电子的径迹长达 10 厘米量级，使重建双贝塔径迹变为可能。另外气体探测器的内禀能量分辨率比液体高一个数量级以上，也是气氙实验的一个优势。NEXT 实验现处于探测器研发阶段。在最近投入使用的国际埋深最深、容积最大的中国的锦屏极深地下实验室里，PandaX 实验合作

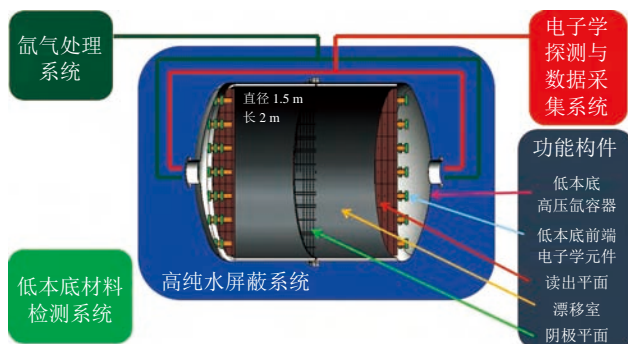


图 9 PandaX 三期实验示意图

组正在准备结合高压气氙漂移室和气体微网电子信号放大器 (MicroMegas) 技术开展一个 200 千克至吨级探测器的实验 (PandaX 三期实验，见图 9)，预期在五年内利用这种新颖的手段取得领先世界的成果。

综观科学发展历史，重大的科学发现和技术进步都是大胆的科学设想与创新的实验系统相结合的产物。从马约拉纳当年提出中微子是其自己的反粒子的大胆设想，到超过半个世纪实验学家对无中微子双贝塔衰变事件孜孜不倦的寻找，今天我们对中微子的属性的认识已经起了翻天覆地的变化。而探测技术和低本底技术的发展也使我们可能越来越接近探测到大自然中最为稀有的过程之一，从根本上更新和转变我们对基本粒子的认识。



科苑快讯

揭开六边形怪石之谜

在世界许多地方，比如美国怀俄明州魔鬼塔和北爱尔兰的巨人之路 (如图)，古老的熔岩冷却成六边形或圆柱形。这是很大的地质之谜：为什么它们是这种特殊的形状？

研究者使用与工程师分析桥梁和飞机零部件所受压力相同的计算机模拟技术，分析了一块岩

浆厚板在凝固时所承受的压力。他们发现在表面物质冷却时，收缩的速度比下面的热岩浆更快。这种收缩导致通常为 90° 角的随机裂缝图案。但是随着物质的进一步冷却收缩，裂缝也向下延伸至凝固的岩浆，小裂缝开始合并成大裂缝，其间的夹角也最终转变为 120° ，大部分能量在这个角度得以释放。

研究者在《物理评论快报》(Physical Review Letters) 网站上做了报告。他们解释说，每个六边



形两个相邻边之间的 120° 角一般维持到熔岩完全冷却，从而导致大自然中常见的这种石块的整体形状和图案。

(高凌云编译自 2015 年 10 月 9 日 www.sciencemag.org)