

Are neutrinos their own antiparticles?

中微子是其自身的反粒子吗?

周顺

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

E-mail: zhoush@ihep.ac.cn

2017-04-01 收稿, 2017-04-03 修回, 2017-04-03 接受, 2017-05-04 网络版发表

摘要 中微子振荡实验显示中微子有质量, 而有质量的中微子基本性质的研究是当前粒子物理学的前沿热点. 本文简要介绍反粒子的概念、马约拉纳费米子以及实验上如何检验中微子是否是其自身的反粒子. 这个重要问题的答案将帮助我们探寻中微子质量的起源和超出粒子物理学标准模型的新物理.

关键词 有质量的中微子, 反粒子, 马约拉纳费米子, 无中微子双贝塔衰变

2015年10月, 瑞典皇家科学院宣布将年度诺贝尔物理学奖授予日本东京大学的梶田隆章教授(Takaaki Kajita)和加拿大女王大学的阿瑟·麦克唐纳教授(Arthur McDonald), 以表彰他们分别领导超级神冈实验(Super-Kamiokande)和萨德伯里中微子观测站实验(Sudbury Neutrino Observatory)发现了大气和太阳中微子振荡现象, 该现象证明中微子有质量^[1,2]. 然而, 在粒子物理学标准模型中, 中微子是质量为零、自旋为1/2的电中性费米子. 中微子质量是迄今为止唯一具有确凿实验证据的超出标准模型的新物理, 围绕它展开的关于中微子基本性质的研究是当前粒子物理学前沿热点^[3]. 尽管如此, 中微子仍是最神秘的基本粒子, 有许多与它相关的重要问题还悬而未决, 其中最令人困惑也最有意思的一个问题是中微子是否是其自身的反粒子.

反粒子的概念最早是由英国理论物理学家保罗·狄拉克(Paul Dirac)引入的. 1928年, 狄拉克写出电子的相对论性波动方程, 即著名的狄拉克方程, 它将量子力学、狭义相对论和电子的自旋完美地结合在一起^[4]. 狄拉克方程的解显示电子波函数有四个分量, 其中两个分量对应能量为正的电子的两个自旋态, 而另外两个分量对应的能量却为负. 如果存在负

能量的量子态, 那么我们看到的所有具有正能量的电子就都会跃迁到负能量态. 为了解决这个问题, 狄拉克假设负能量态已全部被电子占满, 而泡利不相容原理保证系统中任意两个电子不能处于同一状态, 因此电子从正能量态到负能量态的跃迁被禁止. 接着, 狄拉克意识到, 处于负能态的电子能够吸收外界的能量而跃迁到正能态, 那么负能态的电子海洋中就留下一个空穴. 空穴就像带一个单位正电荷且质量与电子相等的基本粒子, 它就是电子的反粒子. 1932年, 美国实验物理学家卡尔·安德森(Carl Anderson)在宇宙线实验中清晰地观测到电子的反粒子, 即正电子^[5,6], 并因此获得1936年诺贝尔物理学奖. 值得一提的是, 我国著名的物理学家赵忠尧先生在1930年研究硬伽马射线与物质相互作用时发现伽马射线的吸收有反常的现象, 而且伴随着吸收还有额外的光辐射信号^[7]. 在安德森发现正电子之后, 人们才意识到额外的光辐射正是由电子与正电子湮灭产生的.

反粒子或反物质的发现对整个粒子物理学的发展以及我们对宇宙的认识都产生了深远的影响. 1947年, 英国实验物理学家塞西尔·鲍威尔(Cecil Powell)等人在宇宙线实验中发现日本理论物理学家汤川秀

引用格式: 周顺. 中微子是其自身的反粒子吗? 科学通报, 2017, 62: 1798–1801

Zhou S. Are neutrinos their own antiparticles (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 1798–1801, doi: 10.1360/N972017-00374

树(Hideki Yukawa)预言的传递核子间强相互作用的 π^+ 和 π^- 介子,它们是自旋为零的玻色子且互为反粒子.狄拉克的空穴理论显然不适用于玻色子,因为没有泡利不相容原理来禁止正能量态的粒子跃迁到负能态.当然,现在我们知道,正确理解反粒子需要相对论性量子场论,而负能态和狄拉克的空穴理论都是不必要的.狄拉克在1933年诺贝尔奖演讲中介绍电子和正电子的理论,并阐述他对宇宙中的物质和反物质的理解:“如果正电荷与负电荷之间的对称性是自然界的基本规律,那么我们就必须承认地球乃至整个太阳系都是由电子和质子组成的事实只是出于偶然.宇宙中很有可能存在某些恒星,它们是由正电子和反质子构成的.事实上,由物质和反物质组成的恒星也许各占一半.因为这两类恒星将呈现出完全相同的光谱,所以目前的天文学观测手段无法区分它们”.然而,天文和宇宙学观测表明今天的宇宙中确实只存在物质而没有反物质.直到今天,物理学家们仍然无法理解宇宙中的物质-反物质不对称,这个问题也被称作反物质消失之谜.

如前所述,电子的反粒子是正电子,它携带的电荷与电子的大小相等但符号相反.粒子物理标准模型告诉我们电荷守恒来自规范对称性,因此电荷是描述基本粒子属性的好量子数.然而,中微子是电中性的,那么它与自身的反粒子该如何区分呢?标准模型中还存在一种偶然的守恒律,比如说轻子数守恒,它不对应任何基本的对称性.简单来讲,如果规定电子和电子型中微子的轻子数为+1,那么正电子和电子型反中微子的轻子数就是-1,其他粒子的轻子数为零.至今,所有实验都满足轻子数守恒,即物理过程中初末态粒子的轻子数之和相等.自然界中存在轻子数破坏的过程吗?如果轻子数不守恒,我们就不能用它来区分中微子和反中微子,那么中微子是否可以就是它自己的反粒子呢?目前我们还没有答案.

粒子与其反粒子等同的费米子又被称作马约拉纳粒子,它是由意大利理论物理学家埃托雷·马约拉纳(Ettore Majorana)在1937年首先提出的^[8].马约拉纳是最具有传奇色彩的天才物理学家之一.他于1906年8月5日出生在意大利西西里岛的东部沿海城市卡塔尼亚,后来成为著名物理学家恩里科·费米(Enrico Fermi)领导的罗马学派的核心成员.据美国原子弹之父罗伯特·奥本海默(Robert Oppenheimer)

回忆^[9],有一次在曼哈顿计划中遇到一个关键问题一时难以解决,费米就向尤金·维格纳(Eugene Wigner)求助并感叹到“要是埃托雷在这儿就好了!”还有一次碰到类似的情况,费米说“我们需要埃托雷!”曼哈顿计划的军方负责人莱斯利·格罗夫斯(Leslie Groves)将军听说之后就问这个埃托雷到底是谁,费米告诉他是埃托雷·马约拉纳.格罗夫斯将军立即就问马约拉纳在哪里,并表示要把他请来参与曼哈顿计划.维格纳回答说“很不幸的是,他多年以前就失踪了.”这个神秘的马约拉纳与中微子有什么关系呢?

1937年,马约拉纳发表了一篇题为《电子和正电子的对称理论》的学术论文,而这时距他上次发表论文已有四年的时间.这一年,意大利正好有一个理论物理教授职位的空缺,费米敦促马约拉纳赶快申请并提供一篇最新发表的论文.据说,马约拉纳从他的办公桌抽屉里拿出一叠研究笔记交给费米,而费米则帮马约拉纳撰写了这篇论文.不出所料,马约拉纳很顺利地拿到那不勒斯大学的教授职位.然而,1938年3月25日晚上,他登上从巴勒莫开往那不勒斯的轮船,之后却永远地消失了,年仅32岁.关于马约拉纳的神秘失踪,有很多不尽相同的传言,比如说自杀、沦为乞丐、隐居和被纳粹分子谋杀等^[9].事情的真相究竟如何,我们不得而知.马约拉纳在这篇论文中仔细地研究了狄拉克方程,并有一个重大发现:对电中性的费米子而言,可以完全不需要负能量的量子态.这是因为马约拉纳推导出来的波动方程只适用于电中性费米子,而且它只有两个解,正好对应于正能量的费米子的两个自旋态.马约拉纳在文章中提到中微子就可能属于这种情况,尽管当时还没有任何实验证据显示自然界存在中微子.

如何证明中微子是马约拉纳粒子呢?在马约拉纳的论文发表两年之后,美国物理学家文德尔·弗里(Wendell Furry)注意到^[10]:如果中微子是自身的反粒子且其质量不为零,那么某一类特殊的原子核就不仅存在有中微子放出的双贝塔衰变 $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2\bar{\nu}_e + 2e^-$,还存在无中微子的双贝塔衰变 $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-$,其中 Z 和 N 分别为原子核 A 含有的质子数和中子数且均为偶数.显而易见,发生无中微子双贝塔衰变(Neutrinoless double-beta decays, 或称 $0\nu\beta\beta$ 衰变)的前提条件是存在破坏轻子数守恒的相互作用,而观测到 $0\nu\beta\beta$ 衰变就意味着中微子一定是马约拉纳粒子.即使实验上没有观

测到 $0\nu\beta\beta$ 衰变,中微子仍有可能是马约拉纳粒子,只是这种稀有衰变过程发生的可能性太小.目前国际上寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变的实验正在如火如荼地进行中^[11].来自日本的KamLAND-Zen实验的最新结果显示氙同位素 ^{136}Xe 的 $0\nu\beta\beta$ 衰变的半衰期大于 10^{26} 年,它具体的衰变过程是 $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba} + 2e^-$,而KamLAND-Zen实验利用液闪探测器来测量末态两个电子的总能量^[12].因为没有观测到明确的 $0\nu\beta\beta$ 衰变信号,所以实验观测只能给出 ^{136}Xe 的 $0\nu\beta\beta$ 衰变的半衰期的下限.下一代实验将采用吨量级的氙同位素 ^{136}Xe ,并且具有更好的能量分辨率和更低的背景噪声.如果中微子质量是倒序(即 $m_3 < m_1 < m_2$),那么我们就很有希望在不久的将来发现 $0\nu\beta\beta$ 衰变.由中国科学院高能物理研究所主持的江门中微子实验(JUNO)将使用两万吨的液体闪烁体作为靶物质来精确测量反应堆

中微子能谱,它的主要物理目标是确定中微子质量顺序,而且它还可以进一步通过掺入 ^{136}Xe 升级成吨量级的 $0\nu\beta\beta$ 实验^[13].另外,上海交通大学的PandaX实验团队正计划在四川锦屏山地下实验室进行高压气体氙的PandaX-III实验,它将有能力捕捉到 ^{136}Xe 的 $0\nu\beta\beta$ 衰变末态两个电子的径迹^[14].除了 ^{136}Xe 之外,基于 ^{76}Ge 、 ^{100}Mo 和 ^{130}Te 等不同的核同位素的 $0\nu\beta\beta$ 衰变也分别有,实验正在运行或将要启动^[11].

费米曾经这样评价马约拉纳^[8]:“世界上的科学家分为几个等级,第二或第三等的科学家竭尽全力却无法走得很远,第一等的科学家能做出重大发现,对科学的进展有基础性的贡献.不过,还有一类天才科学家,比如牛顿和伽利略,马约拉纳也属于其中的一个”.中微子是否正如天才的马约拉纳预言的那样是自己的反粒子呢?我们拭目以待.

参考文献

- 1 Kajita T. Nobel Lecture: Discovery of atmospheric neutrino oscillations. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 030501
- 2 McDonald A B. Nobel Lecture: The Sudbury Neutrino Observatory: Observation of flavor change for solar neutrinos. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 030502
- 3 Xing Z Z, Zhou S. *Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology*. New York: Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg; Hangzhou: Zhejiang University Press 2011
- 4 Dirac P A M. The quantum theory of the electron. *Proc Roy Soc Lond A*, 1928, 117: 610–624
- 5 Anderson C D. The apparent existence of easily deflectable positives. *Science*, 1932, 76: 238–239
- 6 Anderson C D. The positive electron. *Phys Rev*, 1933, 43: 491–494
- 7 Chao C Y. Scattering of hard γ -rays. *Phys Rev*, 1930, 36: 1519–1522
- 8 Majorana E. A symmetric theory of electrons and positrons. *Nuovo Cim*, 1937, 14: 171–184
- 9 Amaldi E. Ettore Majorana: Man and Scientist, in *Strong and Weak Interactions*. New York: Academic, 1966
- 10 Furry W H. On transition probabilities in double beta-disintegration. *Phys Rev*, 1939, 56: 1184–1193
- 11 Bilenky S M, Giunti C. Neutrinoless double-beta decay: A probe of physics beyond the Standard Model. *Int J Mod Phys A*, 2015, 30: 1530001
- 12 Gando A, Gando Y, Hachiya T, et al. (KamLAND-Zen Collaboration). Search for Majorana neutrinos near the inverted mass hierarchy region with KamLAND-Zen. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 082503
- 13 Zhao J, Wen L J, Wang Y F, et al. Physics potential of searching for $0\nu\beta\beta$ decays in JUNO. arXiv:1610.07143 [hep-ex], 2016
- 14 Chen X, Fu C, Galan J, et al. PandaX-III: Searching for neutrinoless double-beta decay with high pressure ^{136}Xe gas time projection chambers. arXiv:1610.08883 [physics.ins-det], 2016

Summary for “中微子是其自身的反粒子吗?”

Are neutrinos their own antiparticles?

ZHOU Shun

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

E-mail: zhoush@ihep.ac.cn

Neutrino oscillation experiments have provided robust evidence that neutrinos are indeed massive and lepton flavors are significantly mixed. Therefore, both theoretical and experimental investigations of intrinsic properties of massive neutrinos become one of the most important topics at the frontier of particle physics. Currently, it is still unknown whether neutrino mass ordering is normal (i.e., $m_1 < m_2 < m_3$) or inverted (i.e., $m_3 < m_1 < m_2$), how small the lightest neutrino mass is and if neutrinos are Majorana particles, namely, if they are their own antiparticles. In this article, we mainly concentrate on the last fundamental problem. As neutrinos are electrically neutral, their antiparticles are in principle allowed to be themselves. First of all, we briefly introduce the concepts of antiparticles and Majorana fermions by following their historical development. Then, we explain how to probe the Majorana nature of massive neutrinos. In reality, this can be achieved by observing the neutrinoless double-beta decays of some heavy nuclear isotopes, which consist of even numbers of protons and neutrons and their single beta decays are kinetically forbidden. Although neutrinoless double-beta decays are extremely rare (probably with a half-life longer than 10^{26} years), a clear experimental signal will unambiguously demonstrate that neutrinos are Majorana particles and there exist lepton-number-violating interactions in nature. In the case of an inverted neutrino mass ordering, a number of next-generation experiments will be able to successfully discover neutrinoless double-beta decays. For instance, the huge liquid-scintillator detector of JUNO experiment in China can be doped with a few tons of ^{136}Xe and upgraded to measure neutrinoless double-beta decays. Another idea is taken by the PandaX-III collaboration that a ton-scale high-pressure xenon gas time-projection chamber is built to catch the tracks of neutrinoless double-beta decays. The answer to whether neutrinos are their own antiparticles would finally help us explore the origin of neutrino masses, and the new physics beyond the Standard Model of elementary particles.

massive neutrinos, antiparticles, Majorana fermions, neutrinoless double-beta decays

doi: 10.1360/N972017-00374



周 顺

博士，中国科学院高能物理研究所研究员，主要从事粒子物理学理论和唯象学研究，特别是费米子质量起源、味混合动力学、中微子质量模型和宇宙物质-反物质不对称，已发表相关论文 60 余篇，被引用 2000 余次；2011 年，合作出版中微子物理学英文专著《Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology》，2015 年入选第十一批中组部“千人计划”青年项目。