

中微子质量之探索

唐江凌

中微子是自旋为 $1/2$ 的轻子, 有电子中微子、 μ 子中微子、 τ 子中微子三种不同形态。由于中微子不带电, 仅参与弱相互作用, 不参与强相互作用和电磁相互作用, 反应截面极小, 所以很难在实验中观测到, 对其质量的研究更是困难重重。

探索中微子质量的意义

中微子质量的研究对最微观的粒子物理规律和最宏观的天体物理、宇宙起源及演化都有重大意义, 是探索粒子物理标准模型之外新物理的突破口与关键所在。

在传统的粒子物理标准模型中, 二分量中微子理论和轻子数守恒定律要求中微子静止质量为零。因为若中微子质量不为零, 则根据爱因斯坦相对论, 其速度必定低于光速, 这样就会出现速度超过中微子的观察者。速度超过中微子的观察者将看到中微子动量反号, 而自旋不变的现象。按照二分量中微子理论, 速度超过中微子的观察者, 将把中微子看成反中微子, 从而导致轻子数守恒定律遭到破坏。因此在粒子物理的标准模型中, 中微子必须以光速运动, 这就要求中微子静止质量为零。一旦证实中微

子静止质量不为零, 那么, 粒子物理的标准模型就必须进行重大改进。

然而, 绝大多数天体物理学家和宇宙学家认为中微子静止质量不为零。他们指出, 宇宙中可见物质占 $5\% \sim 10\%$, 其他 90% 以上是暗物质, 而中微子可能是这些暗物质的重要组成部分。尽管中微子本身很轻, 但由于它在宇宙中的数量极其巨大——每立方米大约有 10 亿个, 因此它对于研究宇宙总的质量构成有着重要意义。天体物理学家和宇宙学家认为, 如果中微子质量太小, 则宇宙总质量会小于某个临界值, 宇宙自身的引力就不够大, 宇宙将永远膨胀下去; 如果中微子质量太大, 则宇宙总质量会大于临界值, 宇宙膨胀到一定程度后, 会在自身引力作用下收缩。因此, 中微子的质量关系到宇宙将如何演变的问题。天体物理学家和宇宙学家还认为, 中微子质量问题是解释宇宙中正反物质不对称问题的关键。

由于对粒子物理、天体物理和宇宙学的重要意义, 中微子质量之探索一直是物理学界的研究热点。

对中微子质量的探索

早在 1980 年, 前苏联理论与实验物理研究所的

应各自相应的“中气”, 显然有 7 个月没有“中气”相对应。因此把 7 个没有“中气”的月份定为闰月也符合 19 年 7 闰的规定。

表 5

农历月份	节气
十一月	冬至(中气)、大寒(中气)
十二月	雨水(中气)
正月	惊蛰(节气)

④逢 19 年 7 闰。为了使平均历年和回归年的天数大致相同, 闰年在总年数中应占 $(365.2422 - 29.5306 \times 12) / 29.5306 = 36.83\%$ 。农历在 19 个历年中安排 7 个闰年, 闰年占 $7/19 = 36.84\%$, 是比较精确的。

⑤地球绕太阳公转的角速度 $\omega = 360^\circ / 365.2422 \text{ 天} = 0.9856^\circ / \text{天}$, 其轨道为椭圆。根据开普勒第二定律, 地球在近日点公转角速度较快, 在 1

个月的时间内公转超过 30° , 即两个“节气”或两个“中气”之间仅有 28 天。因此在极少的特殊情况下, 某月包含两个“中气”(两个“中气”相距 30° , 分别在月初和月末), 而使其后的某月份无“中气”, 或者说“中气”移到了前一个月, 即无“中气”的月份在 19 年里多于 7 个。因此有如下附加规定: 在前一个月或前两个月里包含有两个“中气”, 这样的月份虽然没有“中气”, 但也不能作为闰月。如表 5, 某年正月只有一个“节气”(惊蛰), 而在上一年十二月有一个“中气”(雨水), 十一月有两个“中气”(冬至、大寒)。如果每月对应各自相应的“中气”, 显然少了一个月序, 而多了一个无“中气”的闰月。所以无“中气”之月不能称为“闰十二月”, 而称为第二年的“正月”。

我国的农历具有阴历、阴阳历和阳历的优点, 而且设置得巧妙、科学、精确, 所以能一直沿用至今。

(河北省唐山开滦一中 063000)

柳比莫夫实验小组就利用磁谱仪测量衰变电子能谱来探索中微子的质量。他们历时多年,精确测量了氡衰变中发射出 β 能谱的情况,认为中微子的质量应在16~46电子伏特之间(电子伏特是很小的能量单位,相当于1个电子在1伏特电场中具有的能量)。这是人们第一次比较精确地测得中微子质量,因而在当时的世界粒子物理学界、天体物理学界和宇宙学界引起轰动。此后,全世界十几个实验室纷纷采用类似方法检验柳比莫夫小组结果的正确性。1986年,瑞士苏黎士大学物理所、日本东京大学原子核研究所、美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室等先后发表了自己的实验结果,都与柳比莫夫实验小组的结果接近。中国原子能科学研究院从80年代初开始也进行了此项研究,积累了3万多个实验数据,得出的结果是电子反中微子的静止质量在30电子伏特以下。

目前,中微子质量的测量主要根据中微子振荡理论进行。中微子振荡理论是日本物理学家 Z. Maki, M. Nakagawa 和 S. Sakata 于 1962 年提出的,其主要内容是不同中微子之间可以互相转化(例如电子中微子在穿越大气层时转化成 μ 子中微子)、不同中微子之间存在质量差。根据中微子振荡理论,只要观测到中微子的转化,就能证明中微子有质量;如果测出中微子转化比率,则可得到中微子质量。实验包括大气中微子振荡实验,太阳中微子振荡实验,反应堆和加速器中微子振荡实验等。

1995年初,美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室宣称,他们最新的实验表明中微子确有质量。洛斯阿拉莫斯研究班子所用的方法就是以中微子振荡理论为基础——监测一种中微子振荡成另一种中微子。洛斯阿拉莫斯的实验是让纯 μ 子中微子束通过盛有200吨特殊矿物油的容器。 μ 子中微子不能与矿物油相互作用,但电子中微子可以。如果一些 μ 子中微子变成了电子中微子,其中少数几个将与矿物油原子中的质子相互作用而产生闪光,这些闪光将被矿物油容器周围的探测器记录下来。结果,实验家们不单观测到 μ 子中微子振荡成电子中微子,还从发生率得出所涉及中微子的质量平方差。虽然这个消息令人高兴,但当时大多数科学家的态度却很谨慎,他们认为需要其他实验证实这一发现。

1998年6月,来自24个国家的350多名高能物理学家云集日本中部岐阜县的小镇神冈町,希望

亲眼目睹大气中微子振荡实验过程。科学家们在日本筑波科学城高能加速器研究所使用质子加速器向东京大学设在岐阜县的神冈宇宙射线研究所的地下检测装置——超级神冈探测器 SK 发射中微子束。超级神冈探测器位于神冈町地下约1000米深处,科学家在废弃的锌矿坑中设置了一个巨大的水池,内有5万吨水,周围放置1.3万个光电倍增管探测器。当中微子通过水池时,由于水中氢原子核的数量极其巨大,两者发生撞击的几率相当高。碰撞产生的光子被周围的光电倍增管捕获、放大,并通过转换器变成数字信号输入计算机,供科学家们分析。实验表明,中微子在大气中的确发生了振荡,中微子是有静止质量的。

2001年6月,加拿大萨德伯里中微子观测站宣称证实了太阳中微子存在振荡现象。萨德伯里中微子观测站位于地下2000米处,使用1000吨超纯净水,通过观察中微子与重水发生反应变成质子的过程,来探测抵达地球的太阳电子中微子数目。研究人员将新的数据与以往研究成果相结合,发现太阳释放出的电子中微子有一部分在途中转变成其他类型的中微子,中微子总数并未减少;即太阳中微子也发生了振荡现象,中微子静止质量不为零。

2002年12月,我国科学家与日本、美国同行同时宣布其在中微子实验方面的重大发现——核反应堆中产生的反电子中微子消失了,这意味着反应堆中产生的反电子中微子发生振荡,变成另一种没有被探测到的反中微子。这项由日、美、中三国科学家组成的kamLAND实验组完成的重要实验,探测了来自日本等国20多个核电站反应堆产生的中微子,这些核反应堆的总功率约占全世界核电站总功率的20%。实验首次用人工中微子源证实了太阳中微子存在振荡现象,首次定量给出了太阳中微子振荡参数的唯一解,进一步肯定了中微子静止质量不为零;我国中国科学院高能物理研究所的王贻芳研究员等中国科学家也参加了此项实验。而这一发现亦被美国《科学》杂志评为当年的“十大科技突破”之一。

2004年6月,来自10个国家的科学家组成的研究小组在日本宣称:通过实验证实中微子具有质量的概率为99.99%。该研究小组的实验包括中微子的发射,探测以及分析。茨城县筑波市的高能加速器研究机构研究人员利用120亿伏质子加速器产生中微子束,向外发射,距发射地点250千米远的东

京大学宇宙射线研究所则利用改造过的超级神冈探测器 SK, 观测到了发射出的中微子。根据理论值, 研究人员最终应捕获 150 个中微子, 而实际捕获的中微子数量只有 108 个。研究人员认为, 未能捕获的中微子在穿过大气和地球时发生了振荡现象, 变为探测不到的 τ 子中微子。实验数据显示, 中微子有静止质量的概率在 99.99% 以上。

此外, 一些物理学家还利用天文学方法测量中微子质量。2002 年, 由英国剑桥大学欧菲领衔的一组科学家用天文观测结果估计中微子的质量上限。他们观测、估计宇宙中 25 万个星系的质量, 并用这些数值估算中微子质量; 根据观测和计算, 给出结论: 三种中微子的质量和上限约在 2.2 电子伏特(相关文章发表在 2002 年 8 月的《物理评论》上)。2003 年, 美国航天局在华盛顿公布了 2001 年发射升空的威尔金森微波背景辐射各向异性探测器关于宇宙的一批观测成果。利用这些观测成果, 物理学家给出了中微子质量不会超过 0.23 电子伏的结论。

探索还在继续

虽然中微子有静止质量的结论已逐步为大多数人所接受, 质量范围也已经可以预测, 但是中微子质量的精确测量仍然困难重重, 探索还在继续。

位于瑞士日内瓦的欧洲粒子物理研究中心, 正在进行一项名为“格兰萨索计划”的大型科研项目。欧洲粒子物理研究中心计划向 730 千米外意大利境内的格兰萨索实验室发射 μ 子中微子束。格兰萨索实验室将利用安装在地下的中微子监测仪收集有关数据, 以确定有多少 μ 子中微子转变成了 τ 子中微子, 从而推算出相关中微子的质量平方差。2005 年 8 月, 欧洲粒子物理研究中心宣布, 他们已经完成“格兰萨索计划”中将要使用的主要仪器——“中微子集束仪”的研制与装配工作, 计划于 2006 年 5 月开始进行正式的实验测量。

我国物理学家也对测量中微子质量非常关注, 正在酝酿中国大亚湾核反应堆中微子振荡实验。根据中国科学院高能物理研究所的资料, 大亚湾核反应堆具有两个得天独厚的有利条件。一是功率高, 因而中微子事例率高; 到 2010 年岭澳二期工程竣工之后, 大亚湾反应堆总热功率将达 17.4 吉瓦(1 吉瓦 = 10^9 瓦, 即 1000 兆瓦), 仅次于日本柏崎(Kashiwazaki)的近距离反应堆群。二是反应堆周围有山, 可以较容易地建立地下实验室, 探测器将有较厚的

岩石覆盖层以减小本底的影响; 大亚湾反应堆中微子实验将在山腹内建设三个实验厅, 分别设置近端和远端实验站。两个近点探测器将分别对大亚湾和岭澳的反应堆进行测量, 一个远端探测器距反应堆约 2000 米。实验厅之间开挖隧道互相连接。利用中微子近端和远端距离的变化进行中微子振荡的相对测量, 抵消实验的系统误差, 大大提高实验的精度。探测器设计拟采用三层结构、多模块、二重反符合系统以降低本底及系统误差。

探测器将设计成可移动的, 能进一步减小探测器间差别带来的误差, 提高测量精度。正如中国科学院高能物理所陈和生研究员所说, 大亚湾核反应堆中微子振荡实验是我国高能物理学家认真分析已有反应堆中微子实验的经验和教训, 经大量深入研究和计算、多次实地考察后提出的, 是目前世界各国精度最高的实验方案。自 1930 年泡利提出中微子假说以来, 实现中微子物理研究领域几次重大突破的科学家都获得了诺贝尔物理学奖(最近一次是美国科学家雷蒙德·戴维斯和日本科学家小柴昌俊因“探测宇宙中微子”方面的重大成就而荣获 2002 年诺贝尔物理学奖), 大亚湾反应堆中微子实验有可能获得重大创新成果, 是中国基础科学研究难得的发展机遇。

中微子质量之探索已深刻地影响物理学的发展, 中微子质量的精确测量更是当前国际物理实验领域的热点, 中国物理人将充分发挥自己的聪明才智, 在中微子质量的研究中取得辉煌的成就。

(广西师范大学物理与电子工程学院 541002)

封底照片说明

虽然科学技术在不断进步, 但人类对地球内部的了解仍然非常有限。中国大陆科学钻探工程正在采集深达几千米的岩芯, 探知地球内部的秘密。这项被誉为“来自地球深部的信使”的工程于 2001 年 6 月正式开始, 2005 年 3 月钻井终孔深度达到 5158 米。钻探 5000 多米全孔定向连续取芯技术, 在当今世界只有极少数国家能够掌握。科学家们将利用深井建立观测站, 设置先进的技术设备监测地球内部的地质活动, 为地球科学、探矿、预防灾害及环境治理等研究领域, 提供科学数据。照片为中国大陆科学钻探工程模型演示。

(李博文)

现代物理知识