

# 中微子的静止质量及其在物理学和宇宙学上的意义<sup>\*</sup>

周 国 荣<sup>1)</sup>

(五邑大学数学物理系 广东 江门 529020)

**摘 要** 简要地介绍了中微子的发现历史及其基本特性,着重介绍了 Super - Kamiokande 中微子天文台大气中微子实验和太阳中微子实验的基本原理及其最新实验结果,对中微子的静止质量在太阳中微子失踪问题、粒子物理学和宇宙学上的意义作了讨论,指出了与中微子静止质量相关的 3 个有待解决的问题.

**关键词** 中微子,粒子物理,宇宙学,暗物质

## THE MASS OF THE NEUTRINO AND ITS SIGNIFICANCE IN PHYSICS AND COSMOLOGY

Zhou Guorong

(Department of Mathematics and Physics, Wu Yi University, Jiangmen, Guangdong 529020)

**Abstract** The history of the neutrino and its identity are presented. The principle and updated results of the Super - Kamiokande s atmospheric and solar neutrino experiments are described. The significance of the neutrino s mass for the missing solar neutrino puzzle ,particle physics and cosmology is discussed. Three questions about the neutrino s mass which remain to be solved are pointed out.

**Key words** neutrinos , particle physics , cosmology , dark matter

中微子的静止质量被物理学家列为 20 世纪末期物理学中一个有待解决的重要问题,它在理论物理学和天体物理学中占据着重要的地位<sup>[1]</sup>. 长期以来,物理学理论一直认为,中微子的静止质量为零. 不过,位于日本茂住(Mozumi)的超级神冈(Super - Kamiokande)中微子天文台最近却发现,中微子具有不为零的静止质量. Super - Kamiokande 的物理学家们对两年来的观测数据进行分析后得出了这一结论. 当 1998 年 6 月 5 日这一消息公布后,中微子问题再一次成为物理学界和天文学界的热门话题. 在过去的几十年中,人们已经多次发现中微子具有静止质量的证据. 由于这些证据数据量少,不能完全令人信服,因此,大多数理论物理学家依然保持审慎的态度. 不过,这一次获得的证据是如此强有力,以致许多著名的物理学家都表

示,他们绝对相信实验的结果.

### 1 中微子探索简史及其基本特性

中微子是一种神秘的粒子. 早在 1930 年,奥地利物理学家泡利(Pauli W)为了解释 衰变过程中电子射线能量的连续分布特性时提出,在原子核的 衰变中,每发射一个电子的同时还放出一个自旋与电子相同、静止质量极小的中性粒子. 这个中性粒子就是我们现在谈到的反中微子. 衰变实际上就是原子核内部的中子放出电子和反中微子而变成质子的过程: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ . 伴随着电子放出的这个反中微子

<sup>\*</sup> 1998 - 09 - 01 收到初稿,1998 - 10 - 08 修回

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究人员

的能量加上电子的能量应该是一个确定的值。这样,根据能量守恒定律和动量守恒定律就可以明确地解释电子能量的连续分布。由于假定中微子的自旋量子数为  $1/2$ ,这一假说还同时解决了 衰变过程中角动量守恒的疑难。1934年,费米进一步发展了泡利的这个假说,建立了 衰变理论,并正式将这种中性粒子命名为中微子。

中微子的存在在理论上是非常确定的,但是,由于中微子与普通物质的相互作用很弱,需要强有力的探测器才能检测到它们的存在。因此,预言的反中微子经过了长达 25 年的探索,才于 1956 年被美国物理学家科恩(Cohen C L)和莱因斯(Fred Reines)发现。

按照现行的粒子物理学理论,自然界中存在着三种不同类型的中微子,分别对应于轻子家庭的三个成员:电子中微子、 $\mu$  中微子和  $\tau$  中微子。人们把中微子这三种类型称为中微子具有三种不同的“味”。在标准的粒子物理学模型中,中微子是一种没有静止质量的粒子。在宇宙空间中,存在着大量产生于宇宙大爆炸时期和恒星内部核过程的中微子。

多年以来,物理学家们对产生于太阳内部核反应过程、大气层顶部、核反应堆以及粒子加速器中的中微子进行了广泛的研究,发现中微子的通量比理论预言值小。对这一现象的一种解释是:中微子在空间中运动时会在三种“味”之间互相转换。物理学家们把中微子的这种行为称为中微子振荡。但是,按照量子力学的规律,只有当中微子具有非零的静止质量时,这种现象才有可能发生。由于一般的中微子探测器对某些“味”的中微子是观测不到的,这些经历了振荡的中微子就逃过了探测器的监视。

## 2 超级神冈探测器

Super - Kamiokande 是一个由 120 名来自日本和美国 23 个研究单位的科学家组成的合作研究机构,他们发现中微子具有静止质量的事例是由能量极高的宇宙射线轰击地球大气层

而产生的,所使用的探测器称为 Super - Kamiokande 探测器。这是目前世界上规模最大的中微子探测器,它收集到的数据量也是世界上其他中微子探测器所望尘莫及的。

Super - Kamiokande 探测器的主体是一个直径和高度均为 40m 的圆柱形大水罐,可以装 50000t 纯净的水,放置在一个废弃的锌矿场地下 1000 多米的深处。由于中微子与其他粒子的相互作用很弱,能够顺利地穿越整个地球而几乎不受到任何吸收,因此,要探测到中微子的存在是极为困难的。人们必须把探测器安装在地下很深的地方,以尽可能屏蔽掉背景辐射的干扰。这个大水罐的四周还安装了 13400 个光电倍增管,用来捕获中微子飞过时可能会出现微弱辐射。在我们的周围,每时每刻都有成千上万的中微子飞过,但是,只有极少数中微子有机会与水罐中的水分子发生相互作用而被探测到。当高速飞入的中微子与水分子碰撞时,会产生出相应的带电的轻子。由于这些带电粒子在水中的运动速度比其中的光速大,因此当它们飞越水罐时就会发出所谓的切连科夫辐射。发出这种辐射的原因有点类似于超音速飞机飞过时产生的激波现象。当这种光学“激波”到达水罐的四周时,就会被周围的光电倍增管探测到。利用这样一台复杂的探测器, Super - Kamiokande 的科学家们就可以测量进入水罐并与其中的水分子发生相互作用的中微子的数目,并对它们进行分类。

根据宇宙线和中微子行为的知识,物理学家们预期探测到的  $\mu$  中微子通量将是电子中微子通量的 2 倍。但是,令他们惊奇的是,探测到的  $\mu$  中微子通量只有预期值的一半。物理学家们认为,预期中的这部分  $\mu$  中微子通过振荡过程转变为探测器探测不到的  $\tau$  中微子。Super - Kamiokande 探测器比其他探测器优越之处在于它可以探测来自不同方向的中微子。我们知道,来自地球大气层各个方向的中微子是各向同性的。如果中微子确实发生振荡,那么,它们所经历的旅途越长,就会有越多的机会转变为另一种“味”的中微子。这就意味着来自地球另

一边穿越整个地球到达探测器的 $\mu$ 中微子通量应该比直接来自天上的 $\mu$ 中微子通量小。在 Super - Kamiokande 中,人们确实发现了这一现象<sup>[2]</sup>:在 395 例 $\mu$ 中微子事件中,自天而降的事例数几乎是从地底下到达的事例数的两倍。这样的结果显然不可能出自统计上的原因。

继大气中微子实验的结果公布后两周,从 Super - Kamiokande 再次传来消息,他们的太阳中微子实验同样显示出电子中微子具有静止质量的重要证据<sup>[3]</sup>。由于在一年的不同时间里,地球与太阳的距离并不相同,从而使中微子发生振荡的机会有了差异。由此,物理学家们预期,探测到的电子中微子通量应该随季节有轻微的变化。从 1996 年 4 月开始, Super - Kamiokande 总共记录到 7000 多次电子中微子事件,是世界上其他中微子探测器探测到的同类事件总和的三倍多。在这 7000 多次电子中微子事件中,物理学家们确实发现,电子中微子的通量随季节周期性地做轻微的变化。

### 3 中微子静止质量的意义

事实上,中微子通量的上述这种观测与理论预言不相符的现象最先出现在对太阳中微子的探测中。在太阳内部的核反应中,中微子主要通过  $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$  以及  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \nu_e$  等途径产生。由这些途径产生的中微子可以用镓探测器或氯探测器和水探测器探测到<sup>[4]</sup>。当 60 年代末期第一代中微子探测器开始运行后,人们就发现,来自太阳核反应过程和电子中微子通量只有理论预言值的  $1/3 \sim 1/2$ 。这一现象就是人们常说的太阳中微子失踪问题。为了解释这一现象,物理学家们推测,如果中微子具有非零的静止质量,那么,在它们从太阳到达地球的旅途中,就有可能通过振荡过程转变为探测器探测不到的中微子“味”。不过,解释并不是唯一的。也可能是由于我们对太阳内部的了解并不完整,或者是轻核聚变过程中某些低能核反应截面不够准确,从而在估算太阳中微子通量的时候出现了错误。原因何在,人们一直

在争论。

1997 年 1 月, Super - Kamiokande 的物理学家们通过对 102 天的观测结果进行分析后完全证实,太阳中微子失踪问题确实存在<sup>[5]</sup>。由于 Super - Kamiokande 探测器强大的探测能力,这 102 天所探测到的太阳中微子事件超过了世界上所有其他探测器在以往的 30 年中探测到的相应事件的总和。现在 Super - Kamiokande 的大气中微子实验和太阳中微子实验的最新结果表明,中微子的静止质量不为零。这一结果有可能在太阳中微子失踪问题上给出一个明确的答案。

但是,中微子具有静止质量的结论却与标准的粒子物理学模型相矛盾。标准模型是物理学家们用来描述自然界各种相互作用以及粒子结构和运动规律的基本模型。这一模型认为,自然界存在三种基本的相互作用:强相互作用、电弱相互作用和引力相互作用。其中描述电弱相互作用的理论是 60 年代末期物理学家们为了统一地解释弱相互作用力和电磁相互作用力而提出的基本理论。按照电弱统一理论的预言,中微子的静止质量为零。现在, Super - Kamiokande 的实验发现,中微子的静止质量并不为零。这一发现显示出,现代粒子物理学理论可能只是另一个更为完备的理论的较好的近似。因此,如果这一发现最终被证实,人们将不得不对作为粒子物理学基础的标准模型作出修正,以容纳具有静止质量的中微子。这就意味着可能还有许多新的粒子有待发现,还需要引入一些新的基本物理概念。也许更有可能的是,人们需要一个新的理论来描述粒子的行为和相互作用的特性。

由于中微子具有静止质量是大统一理论的基石,因此, Super - Kamiokande 的结果将成为这一理论的重要实验证据。大统一理论是物理学家们试图统一地解释强相互作用力、弱相互作用力和电磁相互作用力时提出的基本理论。这一理论预言了质子的衰变和中微子具有非零的静止质量。多年以来,物理学家们一直在想方设法证实这两个预言。但是,由于质子衰变的半

物理

衰期长达  $10^{31}$  年以上,而中微子与普通物质的相互作用又很弱,要想证实这两个预言是极为困难的.到目前为止,人们还没有观测到质子衰变的强有力的证据.现在,Super - Kamiokande 的物理学家们终于找到了中微子具有静止质量的确凿证据.这一结果无疑是在大统一理论探索历程中的一个重要里程碑.可以确信,中微子静止质量的发现将成为粒子物理学史上最重要的发现之一,这一发现将给物理学带来巨大的影响.

在宇宙学方面,影响同样是重大的.如果中微子的静止质量不为零,那么即使其质量是电子质量的一个零头,由于宇宙中存在着大量的中微子,宇宙物质中的主要成分将有可能由中微子构成.这一结论对我们了解宇宙中物质的组成和宇宙的起源、演化以及最终命运将产生巨大的影响.

宇宙中物质的构成及其丰度是宇宙学中一个非常基本的问题,对于这个问题的回答直接影响着宇宙学中的若干重要课题:星系的形成和演化、宇宙的早期历史等.到目前为止,我们仍然没有找到这个问题的最终答案.在宇宙学中,宇宙物质的丰度常用其质量密度与临界密度之比来表示:  $\Omega = \rho / \rho_c$ . 对轻元素原初丰度的观测给出宇宙中重子物质的丰度为:  $\Omega_B < 0.15^{[6]}$ . 所谓的重子物质是指由质子、中子和电子共同构成的普通物质.另一方面,在大尺度上对星系样本的统计分析显示出  $\Omega \sim 1$ , 这一结果暗示,宇宙物质中的主要成分可能以非重子的形式存在着;在理论方面,过去 10 年,宇宙的暴胀模型及其预言已经被人们普遍接受.这一理论预言:宇宙的密度参数  $\Omega = 1$ . 这个预言与目前由天文观测推断出来的重子物质密度参数有着极大的差异.因此,宇宙中存在着大量的非重子暗物质就成了一种合理的假设.

不过,暗物质的特性到底如何,人们已经争论了很多年.一般认为,这些非重子形式的暗物质必须是稳定的或寿命极长的粒子.它们不参与电磁相互作用,因此不可能向我们发出电磁信息而显示它们的存在.不过,它们可以参与弱

相互作用和引力相互作用.因此,从宏观的效果来看,它们与普通物质除了引力相互作用之外,没有任何其他相互作用,从而很难用常规的方法探测到它们的存在.从暗物质的上述特性来看,在标准的粒子物理学模型所给出的几十种粒子中,有可能成为非重子暗物质候选者的只有中微子.由于中微子的速度接近光速,因此它们只可能是热暗物质的候选者.所谓的热暗物质是指在脱离热平衡时期运动速度仍然接近光速的粒子.对于中微子,这一时期大约在宇宙大爆炸发生后 1 秒;与此相对应,冷暗物质则是指那些在脱离热平衡时期运动速度缓慢的粒子.冷暗物质必须是一种质量极重的中性的稳定粒子.但是,标准的粒子物理学模型并没有预言这种粒子的存在,实验上也未曾发现符合冷暗物质条件的超重稳定粒子.

尽管如此,大多数宇宙学家还是比较倾向于冷暗物质模型.基于标准冷暗物质模型的结构形成理论在预言中小尺度结构的特性(如星系晕中的物质分布、星系的质量、星系数密度、星系分布的关联和星系的本动速度等)方面取得了令人满意的结果.按照标准的冷暗物质模型,宇宙结构的形成图像是由小到大的分级结团<sup>[7]</sup>.按照分级结团的图像,星系尺度的物质首先形成,随后,这些原星系云通过引力相互作用而结成尺度更大的结构.这一特性已经被天文观测所证实.不过,标准的冷暗物质模型预言星系尺度上的扰动幅度偏大,而且不能很好地解释宇宙在大尺度结构上的特性以及微波背景辐射的各向异性.作为对标准模型的补充,人们提出了冷、热混合暗物质模型和宇宙常数加混合暗物质模型.这些模型的提出,在一定程度上克服了标准模型的缺点.如果中微子确实具有非零的静止质量,它们就会自然地成为热暗物质的最佳候选者.

中微子的静止质量及其在宇宙物质中的丰度之间存在着如下简单的关系<sup>[8]</sup>:  $\Omega = m / (94 h^2 eV)$ , 其中  $\Omega = \rho / \rho_c$  是中微子质量密度与临界密度之比,  $h$  与哈勃(Hubble)常数的关系为  $H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . 上述公式表明,

根据目前对哈勃常数的观测约束,三类中微子只要有几十个电子伏的总质量,就足以使宇宙的质量密度达到临界密度.理论研究已经表明,

$\Omega = 0.2$  的宇宙常数加混合暗物质模型所预言的宇宙图景与观测结果更为吻合<sup>[9]</sup>.这就意味着宇宙物质中有相当一部分很可能是具有静止质量的中微子.由于中微子的运动速度极高,在宇宙演化的极早期,这些中微子就已经均匀地分布在宇宙中.当冷暗物质开始凝聚形成星系的原型时,这种均匀分布的自由中微子将会使冷暗物质密度涨落的生长速度变慢.结果,时至今日,星系尺度上的不均匀性幅度就会比纯粹的冷暗物质宇宙要小.这正好克服了冷暗物质模型中星系尺度上的扰动幅度偏大的缺点.

#### 4 有待解决的问题

中微子具有静止质量的结论虽然为解决某些悬而未决的难题提供了可行的途径,但是同时也向人们提出了另外一些新的问题.中微子的静止质量不能用普通的方法来测量.到目前为止,中微子具有静止质量的结论只能通过不同“味”的中微子互相转换来得到.利用中微子振荡实验只能得到不同“味”的中微子的质量之差,而不是它们的绝对质量.中微子的静止质量到底是多少,还有待实验给出最后的结果.

到目前为止,绝大多数中微子探测器只能探测到电子中微子和 $\mu$ 中微子.物理学家们相信,自然界中还应该存在第三种“味”的中微子,才能用振荡过程来解释大气中微子实验中 $\mu$ 中微子的失踪.人们从来就没有看到过这种中微子.这种中微子是否存在,还有待实验的证实.值得欣慰的是,1998年7月初,从费米国立加速器实验室传来消息说,他们至少看到3条可能是由 $\tau$ 中微子碰撞溴化银分子时产生的子所留下的径迹<sup>[10]</sup>.这一结果无疑为中微子的探索者们增添了信心.

在现行的粒子物理学理论中,人们认为有三种不同“味”的中微子,但是各种中微子实验

的结果与这一看法并不完全相符<sup>[8]</sup>.太阳中微子实验的结果显示,有一些电子中微子通过振荡过程转换成另一种“味”的中微子 $X$ .对实验结果的分析表明,这两种“味”的中微子的质量之差大约为: $m_{eX}^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2$ ;另一方面,Super-Kamiokande的大气中微子实验给出 $\mu$ - $e$ 中微子的质量差大约为: $m_{\mu e}^2 \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{eV}^2$ ;而在Los Alamos的LSND(liquid scintillator neutrino detector)实验则给出 $\mu$ - $e$ 中微子的质量差大约为: $m_{\mu e}^2 \sim 0.2 \sim 10 \text{eV}^2$ .从这些数据可以看出,如果上述振荡过程确实能够发生的话,太阳中微子实验中失踪的电子中微子不可能转换成 $\mu$ 中微子或 $\tau$ 中微子.因此,一些物理学家提出,自然界中有可能存在第四类中微子“贫”(sterile).“贫”中微子的质量与电子中微子的质量相近.

是否有够找到 $\tau$ 中微子,各种“味”的中微子的质量到底是多少,自然界是否存在第四种“味”的中微子,实验还不能给出肯定的答复.但是,不管怎样,中微子具有静止质量的证据是确凿无疑的.因此,太阳中微子失踪问题可望得到最终的解决;粒子物理学理论将面临重大的挑战;而宇宙结构形成和演化的图景必定与目前的预言大为不同.不过,由于中微子的静止质量还没有最终被确定,因此,宇宙的命运依然是不确定的.

#### 参 考 文 献

- [1] Ginzberg V L. 二十世纪物理学历史与展望. 湖南教育出版社,1992. 282
- [2] Normile D. Science, 1998, 280: 1689—1690
- [3] Normile D. Science, 1998, 280: 1839
- [4] 孙汉城. 物理, 1996, 26: 65—67
- [5] Glanz J. Science, 1997, 275: 159—160
- [6] Dodelson S, Gates E I, Turner M S. Science, 1996, 274: 69—75
- [7] Kolb E W, Turner M S. The Early Universe. Addison-Wesley Publishing Company, 1990. 375
- [8] Primack J R. Science, 1998, 280: 1398—1400
- [9] Gawiser E, Silk J. Science, 1998, 280: 1405—1410
- [10] Antia M. Science, 1998, 281: 155