

# 中微子研究新进展

黄志洵

(北京广播学院, 北京 100024)

**[摘要]** 自从前苏联的 V. Lubimov (1980年) 和瑞士苏黎世大学的 W. Kundig (1986年) 发表了关于中微子质量的研究以来, 进一步的工作已在日本等国展开; 现在有一批实验室在进行中微子研究。文章论述了两个关键问题, 即光子与中微子的相似性和令人感兴趣的超光速中微子理论。

**[关键词]** 中微子; 超光速; 快子; 光子

**[中图分类号]** O572.32<sup>+1</sup> **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)10-0090-04

## 1 引言

1998年夏季, 一批日本、美国科学家宣布, 利用东京大学宇宙线研究所的设备(Super-KAMIOKANDE)对来自大气层的 $\mu$ 中微子所作的研究表明, 中微子是有静止质量的, 认为此结论发生错误的可能性小于万分之一。1999年7月, 日美韩科研小组宣布捕获由加速器发出的在地壳内穿行250 km的中微子(人工中微子)。2000年3月, 美国加紧建设藏在南极冰层之下1.5 km的中微子探测阵列(AMANDA), 并已记录到有关事件188件。2000年7月, 美国Fermi加速器国家实验室宣布, 在该实验室工作的多国科学家对几百万个印痕的长期分析终于得出结果——发现了4颗 $\tau$ 中微子。2001年6月18日, 加拿大Sadbury中微子观测站宣布, 获得了太阳中心核反应产生的中微子在前往地球的途中从一种变为另一种的证据; 这加强了“中微子有质量”的观点, 因为只用带质量的粒子才会改变形式。此外, 近年来俄罗斯科学院加紧在贝加尔湖水下建设中微子探测器; 中国科学家亦计划把日本的中微子束引到2100 km外的北京来, 以进行“长基线中微子振荡实验”。……关于中微子的研究出现了新的高潮。

## 2 早期研究工作

中微子是无处不在、但又难以捉摸的极微小的

亚原子粒子。据估计, 每秒有 $10^{12}$ 个中微子穿过人体。由于它与物质几乎完全不发生相互作用(或者说它只参与弱相互作用), 不仅人们感觉不到它的存在, 要对它作实验研究也很困难。先来看看, 早期是怎样发现它的。

如所周知,  $\beta$ 射线是带负电的电子射束。1919年J. Chadwick指出 $\beta$ 能谱由连续、不连续这样两部分组成; 但这时出现了“放射性能量是否守恒”这样的使人困惑的问题。1930年W. Pauli设想在 $\beta$ 衰变过程中除电子外还有一种质量极小的中性粒子被放射出来并带走部分能量。1932年, Chadwick发现中子(neutron)。1933年E. Fermi提出弱相互作用理论, 并命名Pauli设想的粒子为中微子(neutrino)。1942年, 美国物理学家J. S. Allen根据中国物理学家王淦昌的建议方案以实验证明中微子存在。1956年F. Reines以核反应堆为基础第一次在实验中捕捉到中微子; 39年后(1995年)他与另一位科学家(发现 $\tau$ 轻子的M. L. Perl)分享Nobel物理奖的奖励。

长久以来, 人们对中微子的认识停留在以下几个方面: 它以光速运动; 它不带电荷; 它非常微小, 可能没有质量; 它在宇宙中无处不在; 它与其他物质几乎不发生作用, 因而极难被发现。

1956年Reines发现的是中微子的头一个品种——电子中微子。1962年又发现了 $\mu$ 中微子。

1978 年 Perl 发现了  $\tau$  轻子, 由此知道可能存在  $\tau$  中微子。因此, 在理论上人们确定中微子至少有 3 个品种。

### 3 中微子质量问题 and 转化问题

20 世纪后半期, 科学家非常关心关于中微子的两个问题——中微子是否有静质量? 它是否会通过振荡从一个品种变成另一个品种? 由于弄清这些问题关系到人类对宇宙的认识和其他一些相关科学问题的解决, 他们吸引了许多人进行研究。

1980 年, 前苏联物理学家 V. Lubimov 公布了中微子有非零质量的首次报道, 得到的质量  $m = 17 \sim 40 \text{ eV}^{[1]}$ 。这个轰动一时的实验是进行氡的  $\beta$  谱测量, 即获取电子的能量分布(能谱)。测量  $\beta$  谱的端点能量的谱形可得待求粒子质量。所用仪器是磁谱仪, 是无铁的; 对环境也有严格的无铁要求。

1986 年, 瑞士苏黎世大学的 W. Kundig 用类似仪器和方法, 测出一个结果:  $m < 18 \text{ eV}$ ,  $m^2 = -11 \pm 63 \text{ (eV)}^2$ 。同年, 日本、美国、中国科学界也发表了自己的实验结果数据。20 世纪 90 年代初, 电子反中微子质量测量得到以下数据<sup>[1]</sup>:

日本(INS),  $m < 13 \text{ eV}$ ,  $m^2 = -65 \pm 85 \pm 65 \text{ (eV)}^2$ ; 美国(Los Alamos),  $m < 9.4 \text{ eV}$ ,  $m^2 = -147 \pm 55 \pm 58 \text{ (eV)}^2$ ; 中国(原子能研究院),  $m < 12.4 \text{ eV}$ ,  $m^2 = -31 \pm 75 \pm 48 \text{ (eV)}^2$ 。

在以上数据中, 前一个表示中微子质量测量上限, 后一个表示最可几值。误差的数据, 前一个表示计数起伏造成的统计误差, 后一个表示仪器和方法带来的系统误差。

1987 年, 日本岐阜县神冈町的东京大学地下实验室记录了超新星爆发造成的中微子的“来访”。时间是在 2 月 23 日早晨, 设备是用 2 150 t 水和上千个光电倍增管; 测到的品种是电子中微子, 数量是 11 个。分析结果认为质量测量上限  $m < 16 \text{ eV}$ ; 据此不能对中微子有无质量下结论。

在 20 世纪向 21 世纪过渡的几年里, 对中微子的研究有了重大的突破性进展。东京大学的研究小组(其中有日本、美国科学家共约 120 人)于 1998 年 6 月宣布, 针对  $\mu$  中微子的实验确认其有静止质量。在日本神冈的一个废弃矿坑内建有一个大水槽, 其中灌有 50 000 t 水(水槽约有 12 层楼高, 而水是纯净水)。水槽周围安排了许多光电管, 约 13 000 个。这个探测装置被称为超级

KAMIOKANDE。实验的原理如下: 当高能宇宙线进入大气层时, 与 20 km 高空处的各种粒子发生碰撞就产生了许多  $\mu$  中微子, 因而每秒均有数以 10 亿计的中微子通过这个装置。由于水中有非常多的氢原子核, 碰撞有时会发生闪光, 光电倍增管获得信号后就会放大和计数。美国著名刊物 Science 于 1998 年 6 月 12 日报道说, 研究人员在 535 天中捕获了来自大气层的 256 个  $\mu$  中微子, 约为理论值的 60 %。研究人员认为已能确认中微子有静质量, 但他们尚不能做定量分析的测量。

一年后, 即在 1999 年 6 月, 东京大学宇宙线研究所宣布, 已在进一步的实验中开展了对中微子质量问题的研究。实验方法如下: 从筑波市高能研究所(距 KAMIOKANDE 约 250 km)向该探测器作中微子发射(数量不详); 实验是 6 月 4 日开始的, 19 日 KAMIOKANDE 探测到一个中微子的闪光。这个粒子的两地渡越时间为  $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}$ , 由此算出  $v = 3.0120481 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; 但实际距离比 250 km 略小, 故真实速度略小于(但非常接近)光速。……总之, 该研究认为中微子有质量, 但不能完全确定。在 2002 年之前希望能对数百个中微子作检测, 以最后得出有无质量的结论。

现在来看看中微子转化问题。与 E. Fermi 同时代的意大利物理学家 B. Pontecorvo 曾提出中微子振荡假说, 在这个理论中一种中微子可以转变为另一种中微子。这个问题不仅关系到对中微子做数量分析, 而且影响人们对中微子质量的研究。目前, 科学家们的看法是, 中微子有质量是发生中微子振荡现象的前提。换句话说, 对中微子有无质量还可通过下述研究而做出判断: 有质量的中微子会改变性状、形式。2001 年 6 月 18 日, 加拿大 Sudbury 观测台宣布, 太阳核反应产生的中微子在来地球的途中从一种变为另一种的现象已被观测到。……可见, 中微子有质量(虽然很小)已成为近来国际上多数科学家的共识。

### 4 研究中微子质量的意义

中微子是宇宙中无所不在、数量极大的基本粒子。单个中微子的质量虽然微小(约为质子质量的  $10^{-9}$ 、即十亿分之一), 但把宇宙中总重量作为考虑的中心时, 却意义重大。所谓暗物质(据说它可能占宇宙物质总质量的  $1/3 \sim 2/3$ )究竟是些什么至今仍是科学上的谜; 目前出现的看法(认为暗物

质主要由中微子组成)令科学家们激动不已。

如所周知,在 A. Einstein 广义相对论的引力场方程中,有一个不确定因素,即宇宙常数  $\lambda$ 。若  $\lambda > 0$ ,有斥力存在,它与引力场相平衡,提供给人们的是一个静态稳定的宇宙。如取  $\lambda = 0$ ,就没有斥力场,则是一个膨胀的宇宙;这与 E. P. Hubble 的发现(星云光谱红移表示宇宙在膨胀)倒是符合一致,故 Einstein 倾向于取  $\lambda = 0$ 。1998 年 2 月,国际上的“高红移超新星搜录小组”公布了一项惊人发现:对来自遥远超新星的光的研究表明,宇宙正在加速膨胀。……然而,这并不是说宇宙学的研究已经没有问题了。宇宙的情况由它包含的物质和能量决定,如果这些东西多,总有一天引力作用会使宇宙膨胀停止,甚至转为收缩。反过来,如宇宙的物质和能量的总量太小,宇宙的膨胀便不会停止。有一个说法认为,宇宙的组成为:物质占 5%,暗物质占 35%,黑色能量占 60%。可见,弄清暗物质的本质和组成是当前宇宙学的一个关键问题;而这又取决于中微子的质量究竟如何。

总之,为了弄清楚宇宙是否永远膨胀下去,还是到一定程度时转而发生收缩,必须弄清楚宇宙的总质量。这就出现了“宇宙临界质量”的概念,事情也就取决于宇宙总质量与临界质量的比值。一个中微子的质量虽微小,但只要它确实存在,宇宙里中微子的总质量却很大(有人认为是超过迄今已知全部物质的总质量)。实际上,暗物质的大部分或许就由中微子组成。这就可以理解,为什么对中微子的研究成为世纪之交时的新热点。

另外,对中微子质量的研究直接关系到对粒子物理学中所谓标准模型的看法。在该模型中,粒子间的电弱作用常常要依靠无质量的亚原子粒子(包括中微子)来做阐述和解释。传统的理论认为,“变味”的粒子是无质量的。新观测结果或许要求原有理论作修正。

2000 年夏,美国 Fermi 加速器国家实验室宣布,发现了第三种中微子,即  $\tau$  中微子。虽然只有 4 颗,但是三年分析所得,仍然在科学界引起轰动。这些工作与中微子质量的搜索有密切的联系。

## 5 中微子是超光速粒子吗?

目前,国际上有些物理学家认为中微子就是超光速粒子(快子 tachyon),这很值得思考。当然,过去的看法一直处于下述两种情况下:或认为中微

子以光速运动,是与光子性质相似的粒子;或认为中微子以亚光速运动,但非常接近光速。认为中微子可能以超光速运动的想法,来自某些测量方法显示了其质量可能是虚数。按照 1967 年提出的 Feinberg 理论<sup>[2]</sup>,快子具有虚质量、速度大于光速;该理论与狭义相对论相冲突。

前已述及,许多关于中微子的实验结果其质量二次方( $m^2$ )的最可几值是负数,这是“中微子质量可能是虚数”这一说法的来源。不过,一些物理学家认为这是理论拟合公式、方法有问题而造成的,或者说是理论系统误差太大所致。但是,既然从未有人经由测量确定中微子的速度,各种猜测和估计也就会继续存在。2001 年 5 月,美国物理学家 Robert Erisch 说:“我是一名相信某些亚原子粒子的速度或许比光还快的物理学家;超光速粒子也许只是非常难于捕捉,就像中微子那样”。……他还认为,打破头脑中的各种框架、跳出常规思维对促进科学发展是很重要的,就如科学上每个伟大的新想法最初总被认为很荒唐一样。从 1991 年到 2000 年,美国著名刊物如 Phys. Lett., Phys. Rev. 等,不断刊登了中微子质量平方为负值的结果。不久前,复旦大学物理系教授倪光炯讨论了中微子的超光速理论(Superluminal theory for neutrino)<sup>[3]</sup>。他指出,2000 年公布的中微子质量平方为负值<sup>[4]</sup>:电子中微子  $m^2 = -0.25 \pm 3.3$  (eV)<sup>2</sup>;  $\mu$  中微子  $m^2 = (-0.016 \pm 0.023) \times 10^6$  (eV)<sup>2</sup>。这就强烈地暗示中微子可能是一种超光速粒子(superluminal particle tachyon)。他还说明,他和张操(T. Chang)已就此提出了一个 Dirac 型的方程来描写超光速中微子。这表明对中微子的研究又有了新的开始,并与超光速问题有密切的关系。2001 年,中国科学院上海原子核研究所艾小白教授也推测中微子就是快子<sup>[5]</sup>,并导出虚质量粒子的 2 分量的 Weyl 方程。这与张超、倪光炯的 4 分量方程不同;艾小白认为,20 世纪 60 年代以来许多描写快子的类 Dirac 方程错误地使用了力学量与算符的对应关系。

## 6 中微子与光子类比

光子、中微子是两类性质相似而又非常不同的粒子,对它们都提出了(有无静止质量)的问题。如能解决,其意义深远。与此同时,也提出了它们“有无体积”的疑问——从逻辑上讲,有静质量的

任何物质均不可能没有体积。2000 年 8 月 18 日出版的 Science 周刊曾刊载 M. Nakahata 写的文章“中微子地下探测器”, 其中说从 Super-KAMIOKANDE (SK) 实验中得到的数据表明中微子有体积! ……我们认为, 这一结论对于研究光子颇有启发; 正如笔者曾经指出的那样, 光子的结构仍是尚待解决的一个科学问题<sup>[6]</sup>。

狭义相对论 (SR) 的基础是 2 个公设和 1 个变换 (Lorentz 变换, LT)。其第二公设说, 光在真空中相对于一切惯性系都以不变的速度  $c$  传播。因此, SR 推论说不会有光子的静止系, 因而光子静质量必为零<sup>[7]</sup>。笔者认为这一结论尚不能令人信服。首先, 如把 SR 应用到光子, 当  $v = c$  时,  $(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 0$ , 按 SR 光子将尺缩到零 (即为无体积的质点), 其钟将减慢到停 (失去时间概念)。这些都令人无法接受。如果说 SR 不适用于光子, 那么为什么在考虑光子静质量问题时又使用 SR?! 就是说, 对于同一个光子为什么 SR 有时不适用?! ……其次, 按照 SR 实际上是说“只有静质量为零的粒子才能以光速运动”; 但中微子 (过去人们一直认为它是光子以外的仅有的以光速运动的粒子) 有静质量的宣布实际上已推翻了这一论断。显然, 这里存在着如何在新形势下认识光子及评价 SR 的局限性这样两大问题!

另一个问题是用波粒二象性的观点和理论来研究中微子。虽然现时还没有物理学家这样做, 但笔者认为它仍然是有待开拓的领域。对光子而言, 这

个方面研究得很早——1905 年 A. Einstein 根据光说电磁波有粒子性 (即光子); 1924 年 L. de Broglie 根据电子说粒子有波动性。这些分析论断都有实验作根据, 早已成为 20 世纪物理学的经典内容而写在几乎所有教科书中。……那么, 中微子作为一种与光子有许多相似点的粒子, 为什么人们却忽略它可能有的波动性?! 有人提出未来的中微子通信, (据说因中微子可以穿透一切物质因而大大优越于目前的电磁波通信) 亦表示将研究这个中微子的波动性问题!

#### 参考文献

- [1] 孙汉城. 中微子之谜 [M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1993
- [2] Feinberg G. Possibility of faster than light particles [J]. Physical Review, 1967, 159(5): 1089~1105
- [3] Ni G J (倪光炯). Let the new experiments tell the quantum theory [J]. 光子学报, 2000, 29(3): 282~288
- [4] Editorial. Review of particle physics [J]. Euro Phys Jour, 2000, C15: 350~353
- [5] Ai X B (艾小白). Unified understanding of neutrino oscillation and negative mass-square of neutrino [J]. Nuclear Science and Techniques, 2001, 12(4): 276~283
- [6] 黄志洵. 波粒二象性理论的若干问题 [J]. 中国工程科学, 2001, 4(1): 54~63
- [7] 张元仲. 狭义相对论实验基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979

## Modern Advances in Neutrino Researches

Huang Zhixun

(Beijing Broadcasting Institute, Beijing 100024, China)

[Abstract] Work on neutrino's mass has been going on in Japan and several other countries since the early work of V. Lubimov in USSR in 1980 and that of a work with W. Kundig at Zurich University in 1986. At the present time, there are several laboratories concerned with the research aspects of such particles. It among the advances of all sorts of neutrinos, two main cruxes should be considered for this subject. One is that the similarity between the photon and the neutrino, the other is that the very interesting superluminal theory for neutrinos.

[Key words] neutrino; faster than light (superluminal); tachyon; photon