

利用超新星爆发测量电子中微子静止质量*

戴长江 盛祥东 何会林

(中国科学院高能物理研究所 宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)

摘要 综述了中微子静止质量 m_{ν_e} 的测量方法与结果,侧重介绍了超新星 SN87A 中微子测量的结果,即得到具有能量为 8 MeV 和 36 MeV 的中微子飞行时间差,对于 Kamiokande, IMB, Bakson 分别为 1.9s, 6s 和 9s,由此给出电子中微子静止质量上限为 14eV [95%置信水平(C.L.)],并且描述了计划建造的新型太阳中微子能谱仪,该谱仪在观测太阳中微子能谱的同时,将兼测超新星中微子,提供了在 $m_{\nu_e} < 1\text{eV}$ 范围内测量中微子静止质量的可能性.

关键词 超新星,太阳中微子能谱仪,中微子静止质量

MEASUREMENT OF ELECTRON NEUTRINO MASS BY SUPERNOVA NEUTRINO BURSTS

DAI Chang Jiang SHENG Xiang Dong HE Hui Lin

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The status of neutrino mass measurements is reviewed, with particular mention of measurements of the supernova 1987A neutrino bursts. From the data analyses of Kamiokande, IMB and Bakson the upper limit of the electron neutrino mass is found to be less than 14eV (95% C.L.). A description is given of the new solar neutrino spectrometer to be built which will detect solar neutrinos as well as measure the mass of supernova neutrinos. The possibility of detection of a neutrino mass $< 1\text{eV}$ is also discussed.

Key words supernova, solar neutrino spectrometer, neutrino mass

1 引言

超新星的爆发伴随着射电波、光、X射线、 γ 射线以及中微子的大量发射.利用这些辐射,人们能够对超新星进行多波段、多手段的观测研究.另一方面,超新星也为人们对中微子特性(特别是中微子静止质量)的研究提供了极佳的天然中微子源.中微子是一种难以捉摸的基本粒子,它不带电荷,和其他物质的作用很弱,它的静止质量 m_{ν_e} 非常小,至今无法测出.粒子物理标准模型认为中微子的质量为零,否则就会超出标准模型的框架,出现新的物理.基于弱电统一理论发展起来的大统一理论, $SU(5)$ 和 $SO(10)$ 或 E_6 ,前者预言 m_{ν_e} 的范围: $10^{-5} - 10^0\text{eV}$,后者允许 $m_{\nu_e}: 10^{-5} - 10^2\text{eV}$, m_{ν_e} 的测量可以检验哪种理论更正确.涉及天体物理,只要 $m_{\nu_e} = 10^{-2}\text{eV}$,就可以用中微子在物质中的振荡现象(MSW效应)来解释太阳中微子丢失问题.因为振荡,由太阳发射的电子型中微子在到达探测器之前,转变成其他类

型的中微子,从而造成“丢失”.对于宇宙学来说,最近的天文观测研究表明:宇宙学密度可能包括了暗能部分(约占70%)、重子组成的物质部分(包括发光和暗的约占5%)、热暗物质(约占5%)和冷暗物质(约占20%)的贡献.只要能测定已知三类中微子的质量和为若干电子伏(eV),就可以解释宇宙中的热暗物质的存在.近来,日本 Super Kamiokande 的大气中微子实验测出上行和下行的类似于 μ 子事例的不对称性,归因于两种类型中微子之间的振荡($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$),从而强烈地支持中微子质量不等于0^[1].显然,对于中微子质量直接的精密测量对于粒子物理、天体物理和宇宙学的发展具有十分重要的科学意义.

2 中微子质量测量的现状

1998年粒子数据组(PDG)公布的实测的三类

* 2000-04-14收到初稿,2000-05-16修回

中微子质量上限分别为:电子型中微子质量 $m_{\nu_e} < 15 \text{ eV}$, μ 中微子质量 $m_{\nu_\mu} < 0.17 \text{ MeV}$ (90%置信水平;以下简作 C.L.); τ 中微子质量 $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$ (90% C.L.)。这些数据都是通过分析产生中微子的衰变过程的运动学效应得到的。其中 m_{ν_e} 的测量,二十多年来已做了大量的实验,但由于测量难度大,长期以来未能得出肯定的结果,上面给出的上限是粒子数据组根据多家实验结果做出的估计。

测量 m_{ν_e} ,常用的一种方法是利用放射性同位素的 β 衰变,通过分析测得的 β 谱形来确定 m_{ν_e} 。最典型的是用高能量分辨的磁谱仪测量 ^3H 原子核 β 衰变的电子能谱。例如 Belesev 等报道了 $m_{\nu_e} < 4.35 \text{ eV}$ (95% C.L.)^[2],是目前最低的中微子质量上限值。但是进一步的分析显示此类测量中存在着尚未查明来源的系统误差。看来,此种方法企图测出 $m_{\nu_e} < 1 \text{ eV}$ 是很困难的。

另外的一种方法是测量同位素轨道电子俘获的内韧致辐射谱,进而确定 m_{ν_e} 。B. Jonson^[4]等人曾用锗、硅探测器测量 ^{193}Ht 和 ^{163}Ho 的电子俘获内韧致辐射谱,报道了 $m_{\nu_e} < 500 \text{ eV}$ (90% C.L.) 的结果。其主要问题是所用探测器能量分辨较差。若能开发出超高能量分辨的探测器[如超导探测器、低温测热辐射仪(Bolomete)等],这种方法还是有发展前途的。

还有一种方法是同位素的双 β 衰变法,间接测出 Majorana 中微子(意大利物理学家 Majorana 所预言的一种具有质量的、正反粒子相同的中微子)的质量,它主要测定其衰变寿命,再结合有关的模型参数,半定量地给出 m_{ν_e} 的上限。如 Baudis 等^[3]对 ^{76}Ge 半衰期的测量,给出 Majorana 中微子的有效质量上限为 0.46 eV (90% C.L.)。此法的主要困难是与模型相关的参数难以算准。

1987 年 SNI 987A 超新星的爆发提供了应用飞行时间法测量 m_{ν_e} 的可能性。爆发的超新星是一个瞬时的中微子源。如果 $m_{\nu_e} \neq 0$,则由超新星发出的具有不同能量的中微子在飞经同样距离后出现的时间差可以用来确定其质量。如今,测量两事例的时间间隔已是成熟可靠的技术,因此,利用超新星爆发的中微子飞行时间法对于测量 $m_{\nu_e} < 1 \text{ eV}$ 范围内的中微子质量,将是最有效的方法之一。由于超新星中微子脉冲有一定的宽度,目前所获得的事例数又不多,只能给出较高的上限。例如 Avignone 利用 SNI 987A 的观测数据,给出 $m_{\nu_e} < 14 \text{ eV}$ (95% C.L.)^[5]。

3 超新星中微子质量的测量

3.1 SN87A 中微子质量的测量

若具有静止质量 m_{ν} 的中微子同时由源发射,经过距离 R ,具有两种不同能量 E_1, E_2 的这种中微子到达同一探测器的飞行时间差 ΔT 为

$$\Delta T = 5.14 \times 10^{-2} R m_{\nu}^2 \left[\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right], \quad (1)$$

式中 $\Delta T, R, m_{\nu}, E$ 的单位分别为 s, kpc, eV 和 MeV。这样,通过测量中微子的能量 E_1, E_2 及其到达探测器的飞行时间差 ΔT ,由已知的飞行距离 R ,根据(1)式即可算得中微子的静止质量 m_{ν} 。

SN87A 爆发时,正在运行的地下的大型中微子探测器,如日本的 Kamiokande、美国的 IMB、前苏联的 Baksan 和西欧的 Mont Blanc 等,分别记录到 SN87A 发射的中微子事件,其到达的时间和中微子的能量见表 1。由表可见, Kamiokande 记录到的中

表 1 中微子事例到达的时间及其能量

探测器	事例序号	时间(UT)	能量(GeV)
Kamiokande	1	7:35:35.000	20 ± 2.9
	2	7:35:35.107	13.5 ± 3.2
	3	7:35:35.303	7.5 ± 2.0
	4	7:35:35.324	9.2 ± 2.7
	5	7:35:35.507	12.8 ± 2.9
	6	7:35:35.686	6.3 ± 1.7
	7	7:35:36.541	35.4 ± 8.0
	8	7:35:36.728	21.0 ± 4.2
	9	7:35:36.915	19.8 ± 3.2
	10	7:35:44.219	8.6 ± 2.7
	11	7:35:45.433	13.0 ± 2.6
	12	7:35:47.439	8.9 ± 1.9
IMB	1	7:35:41.37	38 ± 9.5
	2	7:35:41.79	37 ± 9.3
	3	7:35:42.02	40 ± 10.0
	4	7:35:42.52	35 ± 8.8
	5	7:35:42.94	29 ± 7.3
	6	7:35:44.06	37 ± 9.3
	7	7:35:46.38	20 ± 5.0
	8	7:35:46.96	24 ± 6.0
Baksan	1	7:36:11.818	32 ± 2.4
	2	7:36:12.253	18 ± 3.6
	3	7:36:13.528	23.3 ± 4.7
	4	7:36:19.505	17 ± 3.4
	5	7:36:20.917	20.1 ± 4.0
Mont Blanc	1	2:52:36.79	7 ± 1.4
	2	2:52:40.65	8 ± 1.6
	3	2:52:41.01	11 ± 2.2
	4	2:52:42.70	7 ± 1.4
	5	2:52:43.80	9 ± 1.8

微子事件的时间间隔多数约为 1.9s,而中微子的能量有两种:约 8 MeV 和约 36 MeV. I MB, Baksan 和 Mont Blanc 等记录到的中微子事例较少,其时间间隔分别约为 6s, 9s 和 7s.

如果这些中微子是同时发射的,则所得到的中微子飞行时间差 ΔT 与中微子静止质量 m_ν 的关系如图 1 所示.但实际上,从超新星发射的中微子并不是同时的,有一定的时间差,设为 α ,这时(1)式应作相应修正. α 与超新星的发射模型和中微子的种类有关.数据处理时,可用修正后的公式(1)拟合实验数据,进而确定中微子的质量.超新星爆发的中微子流强一般还是比较强的,图 2 给出各种来源的中微子能谱.可以看出 II 型 SN 的中微子流强接近于太阳中微子流强.因此,用于太阳中微子能谱观测的中微子能谱仪同样也可用来测量超新星的中微子能谱和飞行时间,进而测出中微子质量.目前给出的电子中微子质量上限为 1.4eV (95% C.L.)^[5].

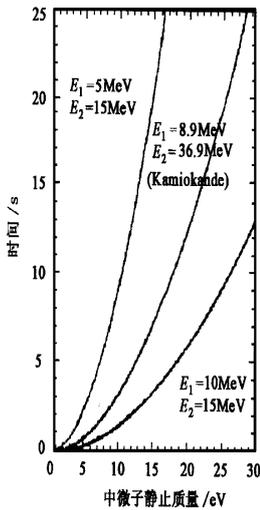


图 1 中微子飞行时间差与其静止质量的关系

3.2 利用新型太阳中微子能谱仪测量超新星中微子质量

在已经运行的太阳中微子探测器中, Homestake, GALLEX 和 SAGE 等都是放射化学法的,不能实时测量太阳中微子能谱; Kamiokande 和 Super Kamiokande 虽然是实时记录的太阳中微子能谱仪,但其能阈大于 5 MeV,不能测出低能段的太阳中微子能谱.为了以高的能量分辨,高的信噪比实时测量太阳中微子全能谱, R. S. Raghavan^[6]于 1997 年提出了载稀土元素 Yb(或 Gd)的液体探测太阳中微子的新方法.

中微子和 Yb(或 Gd)的作用过程如下:

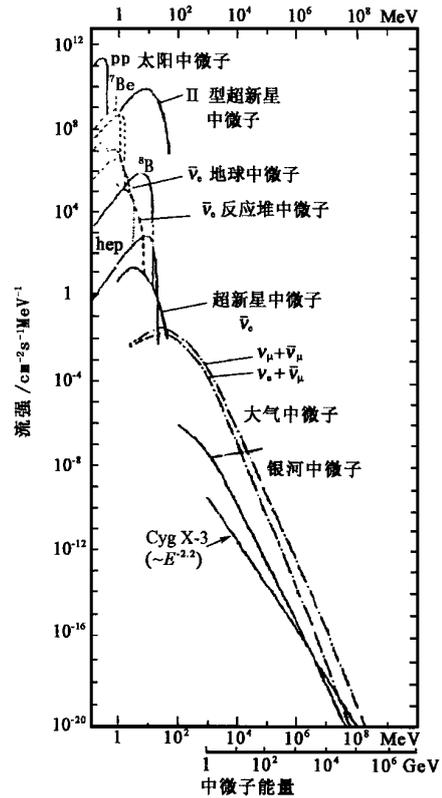
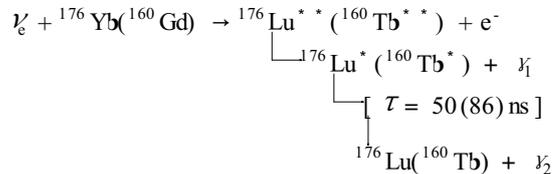


图 2 各种中微子能谱



Yb(Gd)俘获 ν_e ,反应阈能为 300(240) keV,通过测量反应产物 e^- 和 ν_1 的能量,即可测出 ν_e 的能量.我们计划研制载 Gd 液体闪烁体或 GSO 闪烁晶体的中微子能谱仪^[7,8].与 LENCSE(美、法、德、日合作的)计划的载 Yb 液闪相比,它具有更低的阈能.我国占有世界 90%以上的稀土资源, Gd 对太阳中微子的探测性能与 Yb 相当,而且 Gd 比 Yb 便宜 10 倍,又容易制成载 Gd 的闪烁体,特别是含 Gd 75%的 GSO 晶体($\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$).可构成较小的体积的探测器,便于配备反符合的主动屏蔽系统.

计划研制的谱仪预期具有以下一些特点:

(1) 高的信噪比:因为它具有低阈能($\sim 240\text{keV}$),高的作用截面: $\Sigma B \approx 0.25$, $e-\gamma$ 符合测量(100ns)和一定的空间分辨,可降低本底.

(2) 较好的时间分辨:探测器系统的时间分辨小于 30ns.

(3) 较高的能量分辨:FWHM $\approx 22\%$ (对

660keV γ 射线)。

谱仪的规模:设想为100t($\sim 100\text{m}^3$)的载Gd 10%浓度的液体闪烁体,或是13t($\sim 2\text{m}^3$)的GSO(Gd浓度达75%)晶体阵列,其放射性杂质浓度(U/Th,K等)小于 10^{-10}g/g ,此系统可满足太阳中微子的测量,特别是其高能量分辨、高时间分辨的特性,很适合超新星中微子质量的测量。

目前,我们在载Gd液体闪烁体的制作和GSO晶体生长方面均已取得了初步的成果:我们初步研制成功载Gd液体闪烁体,Gd的浓度达3%,测试所得性能为:对于60keV γ 射线,能量分辨(FWHM)约为53%;光的衰减长度 $\sim 150\text{cm}$ 。孙汉城等制成直径1cm、长3cm的GSO闪烁晶体:对660keV γ 射线,能量分辨(FWHM)约为22%;光的衰减时间约为80—100ns。与此同时,采用化学萃取法使原料中U/Th的含量小于 10^{-10}g/g 已被证明是可行的。

此新型的中微子能谱仪投入运行后,可以首先观测太阳中微子能谱,为解释太阳中微子问题提供重要的依据。在其运行期间,一旦出现II型超新星爆发,它将以高的能量分辨、高的时间分辨实时观测超新星中微子能谱。SNBO组^[9]对II型超新星爆发的中微子流强的计算表明:电子型的中微子强度主要

集中在爆发的40ms内,即 $\delta = 40\text{ms}$ 。这样利用新型太阳中微子能谱仪测量超新星中微子时,由 δ 引起的待测中微子质量最大的不确定性为: $\Delta m < 0.8\text{eV}$ 。因此,利用此新型的太阳中微子能谱仪,只要测到足够统计量的超新星中微子事例,在小于1eV范围内直接测出中微子静止质量是可能的。

致谢:感谢中国科学院高能物理研究所顾以藩研究员宝贵的意见和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81(8):2016
- [2] Belesev *et al.* Phys. Lett. B, 1995, 350:263
- [3] Baulis *et al.* Phys. Lett. B, 1997, 407:219
- [4] Jonson B *et al.* Nucl. Phys. A, 1983, 396:479c
- [5] Avignone. Phys. Rev. D, 1990, 41:682
- [6] Raghavan R S. Phys. Rev. Lett., 1997, 78(19):3618
- [7] Dai Changjiang, "Development of new detectors for measurement of PP and ^7Be solar neutrino", Talk at workshop "Toward A New Underground Experiment" '98 Finland
- [8] 戴长江.中微子振荡实验的进展.全国第八届粒子物理大会报告,1999,重庆[DAI Chang-Jiang. Experimental progress on the neutrino oscillation. Proceedings of 8th National Meeting of Particle Physics, 1999, Chongqing(in Chinese)]
- [9] SNBO Group Internal Report, University of California at Los Angeles(1993—1995)

中微子振荡与中微子的静止质量*

王 较 过

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

摘 要 简要回顾了中微子的发现过程,论述了中微子的基本性质及三种不同类型的中微子,讨论了中微子振荡的最新实验结果及其与中微子静止质量的关系,指出了中微子的静止质量在物理学与天文学中的重要性以及确定中微子的静止质量有待进一步解决的问题。

关键词 中微子,中微子振荡,中微子质量

NEUTRINO OSCILLATIONS AND THEIR REST MASSES

WANG Jiao Guo

(Department of Physics, Shanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract The discovery of neutrinos is reviewed. The main properties and the three types of neutrinos are discussed in some detail. In addition, the relationships between the latest experimental results from the studies of neutrino oscillations and their rest masses are discussed. The importance of the rest mass of neutrinos for the

* 国家自然科学基金资助项目

2000-04-24收到初稿,2000-06-08修回