

我们可以否定非标准太阳模型了吗？

龚 志 刚

(美国南加州大学物理与天文系 洛杉矶 CA90089)

摘 要

虽然标准太阳模型取得了比较引人注目的成功，但是无论是只由太阳中微子流量的观测资料进行直接分析，还是从太阳振荡的角度讨论问题，目前都还不能完全否定非标准太阳模型。由近期的 Super Kamiokande 实验结果还无法解释太阳中微子问题也说明由天体物理研究对太阳中微子问题进行解释的可能性依然存在，而满足观测结果的非标准太阳模型则可以对太阳中微子问题的解决提供很大帮助。

关键词 太阳模型 — 太阳中微子 — 太阳振荡

分类号： P182

1 概 况

作为距离地球最近的一颗恒星，太阳对于天体物理学以至整个物理学研究都具有特殊的意义。由于我们可以对太阳表面进行不间断的高精度观测，太阳已成为观察许多在地面上无法实现的物理过程的实验室。与此同时，为了解释观察得到的结果，就需要构造一个理论太阳模型来加以比较。由于太阳内部众多复杂的物理过程，现在人们普遍采用一种“标准”太阳模型，其基本出发点是构造处于流体静力学平衡条件下的球对称等离子体模型，使其在满足基本物理条件的基础上在演化到现今太阳年龄的时候具有与我们所观测到的太阳相同的质量、半径、表面光度、表面温度及表面化学丰度。标准太阳模型的构造是在一系列简化假设的基础上得到的，其简化与假设主要包括：太阳所释放出的能量由太阳内部元素通过核聚变产生、太阳处于球对称状态、可不考虑太阳的自转与磁场、太阳内部处于流体静力学与热力学平衡状态、初始化学元素均匀分布、辐射平衡区存在氦与重元素的扩散、满足标准弱电相互作用理论、对流过程采用唯象的简化方法加以描述等^[1]。

标准太阳模型最为成功之处在于其成功地拟合了观测得到的数百万个不同模式的太阳振荡 p 模频率，而且精度好于 10^{-4} ，同时标准太阳模型还比较准确地估计出太阳对流区深度和太阳表面氦元素丰度，因而许多学者都将其作为研究太阳构造的基本模型。

但是我们也应看到，标准太阳模型所预期的太阳中微子流量比实际观测结果高 2~3 倍，而且这一差别在考虑标准太阳模型范围内所有可能的输入物理参量误差之后仍然远无法加以

解释。由于标准太阳模型所取得的巨大成功, 有些人认为标准太阳模型已足够准确, 太阳中微子问题只能由对粒子物理理论加以修正来解决^[2]。

另一方面, 太阳物理理论研究当中也曾出现过一些“非标准”太阳模型, 其主要特征是在满足标准太阳模型所要求之观测事实的基础上还包括一些标准太阳模型所没有考虑的物理过程, 例如考虑太阳中心 ^3He 的混合^[3]、降低重元素丰度、降低太阳内部不透明度等^[4]。构造非标准太阳模型的目的是要找出一些在标准太阳模型当中被忽略了然而又很重要, 并且能够解释一些标准太阳模型所不能解释的观测现象的物理过程, 以便将其加入到标准太阳模型中去。

了解标准太阳模型发展过程的人都知道, 在 90 年代以前的标准太阳模型并不包括氦与重元素的扩散过程, 那时的扩散过程只属于非标准太阳模型研究的范围, 但由于反演研究发现太阳表面氦元素比标准模型所预期的低而证实了扩散过程的重要性, 扩散过程现已成为标准太阳模型中一个必备的过程, 这是非标准太阳模型影响标准太阳模型的一个极好的例证。

由于一些非标准太阳模型可能降低太阳中微子流量的理论预测值, 而标准太阳模型本身也存在许多不确定因素(不透明度^[5,6]、核反应^[7,8]、物态方程^[9]; 其综述见文献^[10]), 加上标准太阳模型还无法解释太阳表面锂丰度异常等一些观测现象, 同时太阳中微子观测研究近期也取得了不少新进展, 我们有必要重新探讨一下“标准太阳模型已经足够准确”之看法是否过分乐观, 看看在发展非标准弱电相互作用理论的同时是否有必要再深入研究一下非标准太阳模型。

2 太阳中微子的产生与检测

太阳中微子是由太阳内部如下几种核反应产生的: $p + p \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$; $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{H} + \nu_e$; $^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$; $^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$; $^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$; $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$; $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$; $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$ 。

标准弱电相互作用理论假设中微子稳定且无静止质量。通常通过下面一些实验来检测太阳中微子: (1) 采用 C_2Cl_4 , 通过 $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ 反应来检测, 其测量阈值为 814 keV, 得到的结果是 $\langle \text{Cl} \rangle = 2.56 \pm 0.16(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \text{ SNU}^{[11]}$ (SNU 表示 10^{36} 个靶原子每秒吸收的中微子数)。(2) 采用镓的 $\nu_e + ^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$ 反应来测量, 其测量阈值为 232.2keV, 得到的结果分别是 $\langle \text{Ga} \rangle = 76.4 \pm 6.3(\text{stat})_{-4.9}^{+4.5}(\text{syst}) \text{ SNU}^{[12]}$ 和 $\langle \text{Ga} \rangle = 70 \pm 6.3(\text{stat})_{-4.9}^{+4.5}(\text{syst}) \text{ SNU}^{[13]}$ 。(3) 采用轻水中中微子与电子弹性碰撞产生的 Cherenkov 辐射来测量, 其中 Kamiokande 得到 $\Phi_{\nu_e} = 2.80 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.33(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1[14]}$, 而 Super Kamiokande 则得到 $\Phi_{\nu_e} = 2.44_{-0.05}^{+0.06}(\text{stat})_{-0.07}^{+0.09}(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1[15]}$ 。

根据 Cl, Ga 及 Kamiokande 实验结果, Bahcall 提出^[16] 存在三种太阳中微子问题, 一是太阳中微子绝对流量的理论预期与观测结果不符, 二是 Kamiokande 实验只能探测 ^8B 中微子, 而 Cl 实验能同时探测 ^8B 及 ^7Be 、pep 中微子, 但前者结果比后者还大。三是 Ga 实验无法解释 ^7Be 中微子的存在。

由于标准太阳模型所预期之中微子远比观测发现的多, 就需一种理论来解释太阳中微子的缺失, 其中最为著名的就是中微子的 Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) 效应^[17,18] 或

中微子真空振荡理论^[19]。如果我们放弃标准弱电相互作用模型，而认为不同中微子之间存在质量差，则根据 MSW 效应，由于太阳和地球物质与中微子的相互作用而激发中微子振荡效应，或是中微子真空振荡理论所认为的中微子远距离传输时的振荡效应，使得中微子从一种本征态变为另一种本征态，其转变几率为：

$$P_{a \leftrightarrow b} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right)$$

其中 θ 为混合角， Δm^2 为中微子不同本征态质量差 (以 eV^2 为单位)， L 为中微子传输距离 (以 km 为单位)，而 E_ν 为中微子能量 (以 GeV 为单位)。

根据这些理论，如果电中微子会转变为其他中微子，则就可以解释为什么地面上观测到的中微子流量比标准太阳模型所预计的少。由于以上过程只有在很大尺度上才会产生明显效应，我们在地面实验室很难直接检验，因而上述公式中的两个自由参数 θ 和 Δm^2 还需要通过其它方法来加以确定，而太阳模型方法就是其中之一。

3 不依赖太阳模型的分析方法

最近有些文章指出^[20~22]，只要承认太阳能量由太阳中心核聚变产生，则由观测得到的中微子流量能谱分布可以发现，有 94% 以上的可能性太阳中微子无法由这些核反应的线性组合产生。他们主要是根据每个中微子观测实验得到的中微子流量及探测器阈值，为每种探测器建立一个中微子产能方程，然后设法找到其最佳线性组合。他们发现在 3σ 范围之内除非我们给予 ${}^7\text{Be}$ 产生率以负值，否则都无法得到任何合理的组合。换句话说，也就是他们认为所接收到的太阳中微子与太阳当初产生的中微子不一样。他们其实是证明了 Bahcall 提出的第二种太阳中微子问题的存在，即轻水实验与 Cl 实验的结果互相抵触。而根据最新的 Super Kamiokande 的结果，相应的 $\langle \text{Cl} \rangle = 2.68 \pm 0.15 \text{SNU}^{[8]}$ ，已与 Cl 实验在误差范围内一致。由于前述工作所采用的观测数据已为更准确的最新结果所取代，他们的结论也就不再成为否定非标准太阳模型的主要依据。如果考虑到 hep 反应速率还可能增大^[23] (前述工作皆假设此一反应之贡献可以忽略)，则问题尤为复杂，就远非这一方法所能解决的了。由这一方法我们只能证明：

$$\begin{aligned} \Phi_{\nu_e}(\text{pp} + \text{pep}) &\approx 6.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \\ \Phi_{\nu_e}({}^8\text{B} + \text{hep}) &\approx 2.44 \pm 0.11 \times 10^6 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \\ \Phi_{\nu_e}({}^7\text{Be}) &\ll \Phi_{\nu_e}^{\text{SSM}}({}^7\text{Be}), \\ \Phi_{\nu_e}(\text{CNO}) &\ll \Phi_{\nu_e}^{\text{SSM}}(\text{CNO}) \end{aligned}$$

其中 SSM 代表标准太阳模型，CNO 代表中微子产生的最后三个反应。由此可见，不排除非标准太阳模型能得到这样结果的可能性。

4 太阳振荡的限制

借助对太阳内部数百万计的振荡频率的研究我们可以对太阳内部有进一步的了解。由于从标准太阳模型所得到的相应理论太阳振荡频率与观测值的符合程度达 10^{-4} ，使得一般人

都相信标准太阳模型是正确的^[24]。

另一方面也应看到, 由太阳振荡频率我们只能得到太阳内部声速的分布情况, 而声速的变化满足以下关系:

$$\frac{\delta c}{c} \simeq \frac{1}{2} \left(\frac{\delta T}{T} - \frac{\delta \mu}{\mu} \right)$$

其中 c 为声速, T 为温度, μ 为平均分子量。由此可见, 只要对太阳模型中的温度分布和平均分子量分布同时加以改变则非标准太阳模型仍然可以满足太阳振荡要求而同时又产生完全不同的太阳中微子的情况, 太阳振荡对太阳模型的约束是必要的但并不充分。

由于只有很少几个振荡模式能到达太阳内部核心部分, 其所能提供的信息就极为有限, 而这些模式的观测误差迄今仍明显大于其它模式, 也说明在太阳中心核反应区域太阳振荡研究并不排斥非标准太阳模型, 而只能为其提供一定的限制。同时, 理论太阳模型所预期之太阳振荡 g 模也尚未被观测到, 其可能产生的影响也还不确定, 有待进一步研究。

5 最新的 Super Kamiokande 实验告诉我们什么?

1998 年 6 月 Super Kamiokande 实验首次介绍其研究成果, 发现有很强的证据证明中微子确实存在振荡的可能性, 因而说明标准弱电相互作用理论确实需要进行修正。然而他们的这一结果并未替太阳中微子问题找到答案。他们观测到的是由宇宙射线穿透大气层时碰撞所产生的中微子中的 μ 中微子与电中微子的数量比与理论研究有明显差别^[25], 而且 μ 中微子流量会随天顶距的不同而发生变化, 即直接穿透大气层的 μ 中微子与从地球背面到达的中微子不一样多, 而电中微子则没有这一性质^[26]。因此他们的发现证实了在 μ 中微子与 τ 中微子之间或者是 μ 中微子与一种不会和其它粒子发生相互作用的中微子之间存在振荡。而电中微子与此无关^[27]。

由于太阳内部的核反应只会产生电中微子, 因而 Super Kamiokande 实验这次的结果对现存的太阳中微子问题并无助益, 不过由于电中微子不随天顶距与季节而变化, 使我们至少可以排除 MSW 效应中的大混合角模型^[28,29]。同时, 由于这一实验首次为人类提供了太阳中微子辐射的能谱分布, 为研究提供了更多手段。如果按现有理论, 标准中微子模型无法解释所观测到的太阳中微子能谱, 而 MSW 效应中的小混合角模型与中微子真空振荡理论可能拟合这一结果的概率也小于 10%^[25]。为了解释观测得到的太阳中微子能谱, Bahcall^[20] 还提出应将现有 hep 反应速率提高 20 倍以上。如果果真如此, 则以上三种模型对能谱的拟合程度又相差无几。

由此看来, 最新中微子实验结果也还不能解决太阳中微子问题, 在更新的中微子观测结果出现之前, 非标准太阳模型的存在依然有其合理性。

6 结 论

通过以上讨论我们可以看到: (1) 不依赖太阳模型的研究方法并未彻底排除非标准太阳模型, 而 Super Kamiokande 实验的结果与 Cl 实验结果的一致又更加削弱了反对该模型的声

浪。(2) 太阳振荡研究可以为非标准太阳模型提供有用的约束,但并未否定非标准太阳模型。

(3) 最新的观测结果还尚未找到那些“丢失”的电中微子。

因此我们认为,尽管标准太阳模型取得了巨大成功,得到很多人的支持,一些特定的非标准太阳模型(即能够满足已观测得到的太阳表面约束和太阳内部声速分布等条件的太阳模型)还是有可能解释(或者是部分解释)太阳中微子缺失问题的。我们还需要对非标准太阳模型进一步加以研究。另外即使电中微子的振荡过程被观测证实,其中的自由参数 θ 和 Δm^2 也需要由太阳模型加以确定。因而太阳模型的进一步研究也就具有更为重要的意义。

作者附注:截至本文发表之时, Super Kamiokande 实验 1000 d 的观测结果得到更为精确的太阳微子能谱,然而电中微子振荡的证据依然没有找到,本文第 5 部分所指出的三种中微子模型对能谱的拟合问题仍然存在。

致谢: 作者感谢 Werner Däppen 对本文选题与内容的许多有益的建议。本工作得到美国国家自然科学基金 AST-9618549 资助。

参 考 文 献

- 1 龚志刚, 袁永泉, Däppen W *et al.* 天文学进展, 1998, 16(4): 287
- 2 Bahcall J. Nucl. Phys. B, Proc. Suppl., 1999, 77(1-3): 64
- 3 Cumming A, Haxton W C. Phys. Rev. Lett., 1996, 77: 4286
- 4 Hata N, Bludman S, Langacker P. Phys. Rev. D, 1994, 49: 3622
- 5 Gong Z G, Däppen W, Li Y. In: Bradley P A, Guzik J A eds. A half century of stellar pulsation interpretations: A Tribute to Arthur N. Cox, ASP Conf. Series, Vol.135, San Francisco: ASP, 1998: 266
- 6 Gong Z G, Däppen W, Li Y. In: Donahue R A, Bookbinder J A eds. The 10th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, ASP Conf. Series, Vol.154, San Francisco: ASP, 1998: 761
- 7 Dar A, Shaviv G. Ap. J., 1996, 468: 933
- 8 Dar A, Shaviv G. 1998, astro-ph/9808098
- 9 Guzik J A, Swenson F J. Ap. J., 1997, 491: 967
- 10 Gough D. Space Sci. Rev., 1998, 85(1/2): 141
- 11 Cleveland B T *et al.* Ap. J., 1998, 496: 505
- 12 Kirsten T A. Nucl. Phys. B, Proc. Suppl., 1999, 77(1~3): 26
- 13 SAGE Collaboration: Abdurashitov J N *et al.* Nucl. Phys. B, Proc. Suppl., 1999, 77(1~3): 20
- 14 Kamiokande Collaboration: Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 77: 1683
- 15 Super Kamiokande Collaboration: Fukuda Y *et al.* Phys. Lett. B, 1998, 433: 9
- 16 Bahcall J. Ap. J., 1996, 467: 475
- 17 Mikheyev S P, Smirnov A Y. Sov. J. Nucl. Phys., 1985, 42: 913
- 18 Wolfenstein L. Phys. Rev. D, 1978, 17: 2369
- 19 Gribov V N, Pontecorvo B M. Phys. Lett., 1969, 28B: 493
- 20 Parke S. Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 839
- 21 Heeger K M, Robertson R G H. Phys. Rev. Lett., 1996, 77: 3720
- 22 Hata N, Langacker P. Phys. Rev. D, 1995, 52: 420
- 23 Bahcall J, Krastev P I. Phys. Lett. B, 1998, 436: 243
- 24 龚志刚, 袁永泉, 李焱等. 天文学进展, 1998, 16(4): 305
- 25 Super Kamiokande Collaboration: Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 1158
- 26 Super Kamiokande Collaboration: Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 1562
- 27 Schwartzschild B. Physics Today, 1998, 51(8): 17
- 28 Bahcall J, Krastev P I, Smirnov A Yu. hep-ph/9807216, Phys. Rev. D, 1998, 58(9): 096016
- 29 Super Kamiokande Collaboration: Suzuki Y. Nucl. Phys. B, Proc. Suppl., 1999, 77(1-3): 35

Can We Rule out Non Standard Solar Models?

Gong Zhigang

(Department of Physics and Astronomy, University of Southern California, Los Angeles, CA90089, U.S.A.)

Abstract

Although standard solar models have achieved great success, non standard solar models can still not be totally ruled out. The model independent analysis, the helioseismological study, and the most recent Super Kamiokande neutrino experiment results have set very strong constraints on solar models, but the possibility of an astrophysical solution to the solar neutrino problem still exists. Solar models will also be critical in providing constraints on parameters in the neutrino oscillation theories.

Key words solar model—solar neutrino—sun: oscillations