

太阳中微子：来龙去脉，何去何从

John N. Bahcall 著 徐仁新编译

(北京大学地球物理学系 100871)

世界上众多运行或筹建的大型实验设备从事着太阳中微子测量研究。本世纪产生的太阳中微子疑难这朵“乌云”，也许要飘到下个世纪去了。J.N. Bahcall 是国际知名天体中微子研究专家，本文源于他 1995 年 1 月在美国天文学会年会上获美国物理研究所和美国天文学会颁发的 Heineman 天体物理奖时的讲演，发表在 ApJ.1996 年 467 卷 475-484 页。有兴趣于这一疑难的同仁可参阅 Bahcall 的专著《Neutrion Astrophysics》以及他在 Rev. Mod. Phys. 等杂志上发表的论文。

摘要 这篇文章回答以下几个问题：为什么要研究太阳中微子？综合标准模型（太阳模型和弱电理论）对太阳中微子有什么预言？为什么中微子流量计算很可靠？有哪三个太阳中微子问题？在前 30 年的太阳中微子研究过程中我们学到了什么？今后十年，太阳中微子物理学上可解决的重大问题是什么？太阳中微子天体物理学上可解决的最重要的问题又是什么？

关键词： 基本粒子 · 核反应 · 核合成 · 丰度 · 太阳内部

一 为什么要研究太阳中微子？

天文学家和物理学家研究太阳中微子各有不同的出发点，对于天文学家，太阳中微子给了我们一个直接检验恒星演化及核能源理论的机会。我们可以利用中微子看看主序星的内部，观察导致恒星发光的如下核合成过程：



对于太阳，核反应产生的典型中微子光学深度约为 10^{-9} ，这比典型光子光学深度小了近 20 个数量级。下面将会看到，太阳中微子实验能够对恒星演化理论提供定量而又准确的检验。恒星演化理论已广泛地用来解释天文观测现象，因此，对天文学家而言，这种理论的直接检验是非常重要的。

通过质子-质子链完成方程 (1) 的主要反应过程列于表 1。以下我们要经常谈到这个表中列出的反应。

太阳中微子用作唯一的粒子物理实验，因而颇受物理学家的青睐。许多物理学家相信太阳中微子实验已经提供了第一个证据说明：(1) 至少有一种中微子是非零质量的。(2) 电子中微子（即电子中微子数目）可能不守恒。有质量中微子的存在可能与暗物质问题联系在一起。

在理论上感兴趣的质量和混合角范围内，太阳中微子实验比起地面实验室实验有更好的灵敏度去检验中微子在飞行过程中的转变。这个好的灵敏度来源于：(1) 加速器（位于太阳）与探测器（位于地球）间巨大的距离；(2) 太阳中微子能量 (MeV) 较低；(3) 中微子从太阳内部走出来要经过大量的物质 ($\approx 10^{11} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

表 1 pp 链的主要反应

单位: mg/l 反应代号	反应	中微子能量 (MeV)
1	$p+p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	0.0-0.4
2	$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	1.4
3	${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$...
4	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$...
5	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$...
6	$e + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	0.86, 0.38
7	${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$...
8	$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$...
9	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	0-14

通过考察中微子从源飞行到探测器衰变一定数量的固有时间，可以定量地看出太阳中微子实验比起实验室实验有更高的灵敏度。衰变固有时间用于度量中微子从一种状态转变为另一种状态的几率，它正比于 R:

$$\text{固有时间} \propto R = \frac{L}{E} \quad (2)$$

L、E 分别为路径长度和中微子能量。对于未来可产生几个 GeV 中微子的加速率实验 $R=10^2 \cdot \text{km} \cdot \text{GeV}^{-1}$ ，能产生 MeV 中微子的反应堆实验已经接近 $R=10^2 \cdot \text{km} \cdot \text{GeV}^{-1}$ 。对于太阳中微子实验，因其距离之大（从太阳内部到地球）能量之低（1-10MeV），固有时间是很长的，

$$R_{\text{solar}} = \frac{10^8}{10^{-3}} \left(\frac{\text{km}}{\text{GeV}} \right) \approx 10^{11} \left(\frac{\text{km}}{\text{GeV}} \right) \quad (3)$$

太阳中微子可能转变其状态的时间很长，因而这种实验对非常小质量的中微子真空振荡很敏感。定量地说，若假定衰变产生的电子中微子至少在两个不同的质量本征态上有一定的比例（即中微子混合角较大），

$$m_\nu (\text{所测太阳中微子质量的灵敏度}) \sim 10^{-6} - 10^{-5} \text{eV} (\text{真空振荡}) \quad (4)$$

而实验室已完成的实验对电子中微子质量测量的灵敏度才在 1eV 的量级。在今后几年，实验室测量灵敏度可望提高一到两个数量级。

太阳内部中微子与电子作用所致共振中微子振荡（即著名的 MSW 效应），即使电子中微子几乎完全处于一种质量本征态（即 e 与 μ 、 τ 之间的混合角很小），也能起作用。标准太阳模型指出，太阳中心的密度可高达 $1.5 \times 10^2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，这使得（至少原理上）即使很低能

的电子中微子 ($\sim \text{MeV}$). 由于 MSW 效应, 也能共振转变成较难探测到的 μ 、 τ 中微子。而且中微子通过的物质的柱密度是很大的: $\int \rho dr \approx 2 \times 10^{11} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。相应地, 地面中微子实验典型密度只有 $3 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 可获得的柱密度才 $\approx 2 \times 10^8 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

据以上这些太阳参数, 考虑到 MSW 效应, 计划或正运行的太阳中微子实验探测中微子质量所能敏感的范围为

$$10^{-4} \text{eV} < m_{\nu} < 10^{-2} \text{eV}. \quad (5)$$

(4)、(5) 式中给出的中微子质量范围, 包括在据粒子物理基本规律所建议的中微子质量范围之内。这些基本规律包括标准弱电模型, 左右对称性, 超统一及超对称。

无论是真空中中微子振荡还是物质增强的中微子振荡, 都能使得电子中微子转变成较难测得的 μ 、 τ 中微子。另外, 中微子改变其类型的几率与它的能量有关, 因而会影响到出射电子中微子能谱。未来中微子实验将会测量太阳电子中微子占中微子总数中的比例 (通过中性流反应), 并且也将测量电子中微子能谱 (通过带电流吸收和电子-中微子散射)。这些测量将会检验最简单的一种弱电模型 (该模型中微子无质量, 不振荡): 这些检验不依赖于太阳模型物理。

二 关于太阳中微子, 综合标准模型给出了什么?

在本节我将介绍综合标准模型 (标准太阳模型和标准弱电理论), 由该模型我们才能确定太阳中微子实验是否有所发现, 最后给出由综合标准模型计算出的太阳中微子谱。

2.1 综合标准模型

为解释太阳中微子实验, 必须有一个定量理论模型。很多天文领域是通过鉴别新的天体而有重大发现 (如类星体, X 射线源, γ 射线源), 而太阳中微子研究是要有一个方便的理论模型与观测对比才能确定是否有惊人发现。当看到有奥林匹克游泳池那么大的含氯水库中每天有 10^{-2} , 或 10^0 , 或 10^2 个中微子事件时, 物理直观还不能告诉我们是否有重大发现。除非有些模型已很好地描述了, 一般地我将用最保守的模型 (综合标准模型) 来与实验对比。综合标准模型由标准太阳结构与演化模型和粒子物理标准弱电模型组成。

为了得到单位时间给定能量范围内中微子产生的数目, 太阳模型是必须的。换句话说, 有必要根据太阳模型来预测 PP 链 (见表 1 及下面的讨论) 的核聚变和 CNO 循环 (最先由 Bethe 在 1939 年核聚变划时代的研究中提出) 的反应率。

在我们的讨论中, 正如所有现代太阳模型给出的结论一样, 我们认定 CNO 反应对太阳总光度的贡献是很小的。尽管在理论分析太阳中微子实验时普遍认为 PP 链为主, 但这还不是个很明晰的断论。在 5.1 中我们还会回到这个基本的假设, 那里我会谈到太阳中微子实验告诉我们的关于天文学方面知识。

需要一个精确的太阳模型来计算核反应率, 特别是 PP 链中那两个反应率很高的主要分支。注意表 1 中的两个分支点 (反应 4 和 5 处, 反应 6 和 8 处)。若 PP 链终止于反应 4 则只产生低能 ($< 0.4 \text{MeV}$) 的中微子; 若通过反应 5 而结束, 就会产生 Be 和 B 的较高能中

微子。反应 6 和 8 比值决定了产生 Be 中微子 (两个线谱：0.86 和 0.38MeV) 和 B 中微子 (最大能量~ 14MeV) 的多少。

在反应 4 和 5、6 和 8 之间的竞争，决定了太阳中微子发射能谱。预言的太阳中微子实验记数非常敏感地依赖于这些决定性反应的相对比例。幸运的是，预言中微子流量的理论不确定性是很小的，大约变动 1% 到 10%，与所论的中微子源有关。某个确定的中微子探测器中的记数率依赖于能谱、探测中微子类型、探测器反应截面。在 4 中我们将讨论，通过比较不同能谱响应的中微子探测器测量结果，可以大大避免对于太阳模型的依赖性，不同实验结果的对比主要用于检验弱电理论。

预言中微子产生以后的行为需要一个物理模型，这里我将采用最简单标准弱电模型，中微子从太阳内部产生后不作任何变化。这种理论的中微子是无质量的，并且电子中微子味守恒。在精确实验室检验中，标准弱电模型是很成功的；明确的实验证据若要求理论有所改变，标准模型的某些变种也是可接受的。

2.2 太阳中微子谱

图 1 给出了对主要太阳中微子源计算出的能谱，我将简要讨论 $p-p$ (和 pep) 中微子、Be 中微子和 B 中微子，集中说明计算的可信性，并指出每种中微子在不同实验中的作用。

主要太阳中微子源是表 1 中列出的第一个反应，即 $p-p$ 反应，产生能量低于 0.4MeV 的中微子。绝大部分导致太阳发光的核能始于此反应。 $p-p$ 中微子流量的理论不确定性低于 1%。在设计或正运行的太阳中微子实验中，只有 GALLEX 和 SAGE 的镓实验有足够低的能阈探测到 $p-p$ 中微

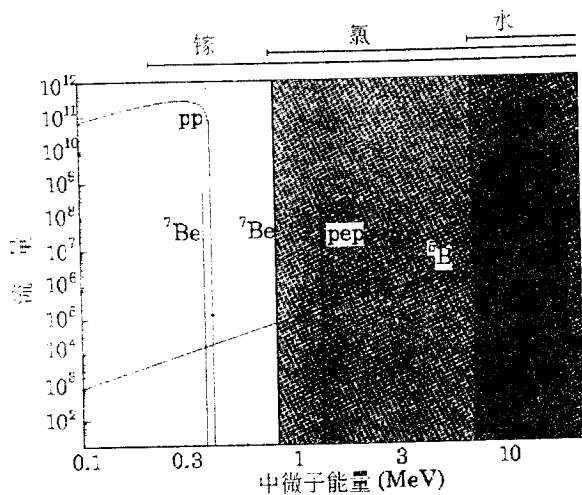


图 1 中微子能谱

子。(一般认为大约只有 0.2% 的 $p-p$ 聚变过程是表 1 中第二反应所致，这个反应产生单能中微子，对氯和镓实验贡献的事件很少)。

第二个主要的中微子源是单能

(0.86MeV)Be 中微子，由表 1 中反应 6 产生。大约 15% 的太阳光能源于这一反应道；中微子流量的不确定性约 7%。按标准模型的计算，Be 中微子在氯和镓实验中贡献较大，但因其能量太低，在 Kamiokande 实验中难探测到。在计划中的 BOREXINO 实验中，通过电子-中微子散射产生的特定闪烁信号可探测到 Be 中微子。

表 1 中反应 9 产生的 B 中微子流是非常小的，约为 $p-p$ 中微子流的 10^{-4} 倍。然而，B 中微子对于太阳中微子物理学和天文学来说是决定性的。因为 B 中微子能量高 (约 10MeV)，它们是氯实验的主要俘获对象 (B 中微子能使氯从基态超容许转变成氩的激发态)。B 中微子也是超过 Kamiokande 水中 Cerenkov 辐射实验阈值的重要中微子源。正在设计并可望在 1996 获得结果的 SNO 和超 Kamiokande 实验，也只能观测 B 中微子。不幸的是，B

中微子流量的理论不确定性较大, 约 17%。

三 为什么预言的中微子流量很可靠?

过去 25 年内不同中微子实验的理论预言值具有惊人的稳定性。在 1968 年 Davis 及其合作者氯实验的同时, 发表的理论估计值为 $7.5 \pm 1.0 \text{SNU}$ (太阳中微子单位); 最近 1995 年细致计算的结果是 $9.3 \pm 1.3 \text{SNU}$ 。理论计算尽可能在 1σ 误差范围之内, 它们是通过输入实验参数和理论计算误差分别在 1σ 、 3σ 内取值而得到的。

有三个理由表明中微子流量的理论计算值是可靠的: (1) 精确的实验以及输入参数精确计算的可能性; (2) 中微子流量与所测太阳光度之间的联系; (3) 日震压力模 (p 模) 本征频率的测量。

在过去三十年, 上百的研究者精确测量了那些重要的输入参数, 包括各种核反应截面和太阳表面化学元素丰度。许多研究精确计算了不透明度、状态方程和弱作用截面。目前, 这些输入参数是比较精确的。它们的不确定性可量化。

太阳中微子流量和太阳光度均依赖于太阳内部的核反应率。由观测我们可以知道太阳光度 (达 0.4% 精度)。为了使标准太阳模型准确地得到所测太阳光度, 计算的太阳中微子流量受到强烈限制。

上千的日震 p 模测量精度达 10^{-4} 。我们讨论的标准太阳模型能够产生所有这些 p 模振荡, 其精度好于 10^{-3} 。实际上, 无需特地调节参数, 太阳模型就能在很高的精度上与测得的日震频率吻合。

总之, 经过 30 年的研究, 太阳中微子流量的计算值是比较准确的, 这是因为: 1. 大量精确的测量和输入参数计算; 2. 通过所测太阳总光度对标准太阳模型的强烈限制; 3. 由日震测量提供的对太阳结构的检验。

四 三个太阳中微子问题是什么?

这里我将着手综合太阳模型的预言值与太阳中微子实验的对比。下面将会看到, 这种对比导致了计算与观察之间的三个不同的矛盾, 我把它们称作“三个太阳中微子问题”。

图 2 表示出了四个正运行的太阳中微子测量的观测值和计算值。这张图反映了实验结果与据综合标准模型而得预言值之间的三个矛盾, 我们将会看到, 只有三个矛盾当中的第一个敏感地依赖标准太阳模型。

4.1 氯反应率的计算值与观测值

第一个测量太阳中微子的实验是氯放化实验, 它测量能量大于 0.81MeV 的电子中微子。经过 25 年的观测, 这个测量给出的事件率为 $2.55 \pm 0.25 \text{SNU}$, 而最细致的理论计算值 ($9.3 \pm 1.3 \text{SNU}$), 约是它的 3.6 倍多。SNU 是描述太阳中微子实验测量事件率的方便单位, 它表示每秒一个靶原子上产生 10^{-36} 次相互作用。氯实验的绝大部分预言的事件率起源于

能量较高的 B 中微子，当然 Be 中微子也贡献相当的一部分。据标准模型计算， pep 中微子和 CNO 中微子 (为简单起见，这里没有讨论) 对总量的贡献小于 1SNU。

二十多年来，氯实验观测与计算之间的矛盾是唯一的太阳中微子问题。我将把这个不一致性，称为“第一”太阳中微子问题。

4.2 氯和水 (Kamiokande) 实验的不一致性

第二个太阳中微子问题来源于氯实验和日本 Kamiokande 纯水实验测量事件率之间的对比。通过电子 - 中微子散射，水实验探测到能量高于 7.5MeV 的中微子。据标准太阳模型 (表 1), B 的 β 衰变是这些较高能中微子的唯一重要来源。

Kamiokande 实验指出，观测到的中微子是从太阳方面来的，被入射中微子散射的电子主要集中于太阳 - 地球矢经上。这些相对论电子通过它们在水中的 Cerenkov 辐射而被观测到。

另外，Kamiokande 实验能够测量单个散射电子的能量，因而能提供入射中微子能谱方面的信息。测得的反弹电子能谱与据 B 中微子预言的能谱吻合。通过一个个事件的记录而得到中微子的能谱，进而很大程度上规定了入射中微子的特性。然而反弹电子的小角度，妨碍我们从角分布来测定单个事件。

与氯实验类似，Kamiokande 实验的事件率主要也是源于综合标准模型预言的高能 B 中微子。我已指出，太阳物理的变化对 B 中微子谱形状的改变不足 10^{-5} 。因此，我们可以计算 Kamiokande 实验 (阈值 7.5MeV) 观测到的 B 中微子在氯实验中的反应率。然而，单是这部分 B 中微子就能在氯实验中贡献 $3.2 \pm 0.45\text{SNU}$ ，超过了氯实验测得的总量 $2.55 \pm 0.25\text{SNU}$ 。

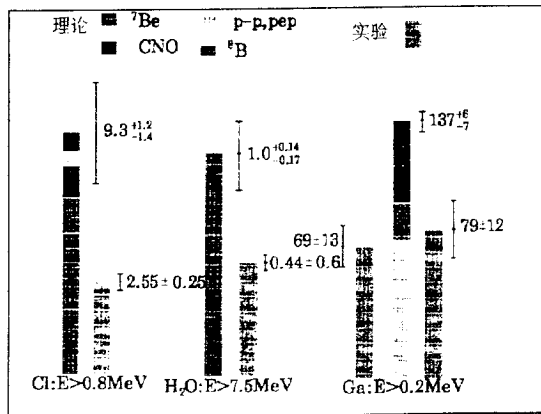


图 2 四个太阳中微子实验观测值与标准模型预言值的对比

比较 Kamiokande 与氯实验的反应率，我们发现， pep、Be 和 CNO 中微子源对氯实验的贡献是个负值： $-0.66 \pm 0.52\text{SNU}$ 。而标准模型对 pep、Be 和 CNO 的计算结果却是 1.9SNU 。氯和 Kamiokande 实验之间这个明显的不一致性，称为“第二”太阳中微子问题。从这里经常得到的推论是，由于不包含在最简单形式电弱模型中的物理因素，导致 B

中微子能谱发生了变化。

4.3 Ga 实验：无法容纳 Be 中微子

GALLEX 和 SAGE 二个小组完成的镓实验，导致了第三个太阳中微子问题。这二个实验的平均值为 74SNU，而由标准模型计算出的 $p-p$ 和 pep 中微子产生率正好是 73SNU(标准模型中流量不确定性只有 1%)。在 Kamiokande 实验(阈值为 7.3MeV)观测到的 B 中微子，对镓的事件率应该也有贡献。若在太阳内部产生的较低能中微子没有什么变化，根据 Kamiokande 的事件率，并采用标准模型的 B 中微子谱，可算出 B 中微子在镓实验中要贡献 7SNU。(完全用标准模型算得的值为 16SNU)。考虑到镓的实验值，就不能容纳 Be 中微预言的事件率 34 ± 4 SNU，而这个预言值是由不同研究小组的 13 个标准模型采用不同的输入参数和不同的恒星演化程序得到的。

镓实验似乎排除了其它任何中微子，只剩下 $p-p$ 中微子了，这就是“第三”太阳中微子问题。这个问题基本上是不依赖于先前讨论的太阳中微子问题，因为，只有镓实验才记录到 $p-p$ 中微子，而其计算流量几乎与模型无关(如果表 1 中 PP 链的基本框架是正确的)。

失踪的 Be 中微子不能解释为太阳物理的改变。Kamiokande 实验记录的 B 中微子与丢失的 Be 中微子是互相竞争着产生的(见表 1 的反应 6 和 8)。通过修改太阳模型减少中微子流量预言值，同样也减少了 B 中微子流量的预言值。

B 中微子流量，不依赖于反应截面测量的不确定性；这个质子俘获反应的截面是最不确定的，在太阳模型计算误差中作用很重要。B 中微子流量与如下比值有关：

$$\phi(^7\text{Be}) \propto \frac{R(\epsilon)}{R(\epsilon) + R(p)} \quad (6)$$

这里 $R(\epsilon)$ 是 Be 核电子俘获率， $R(p)$ 是 Be 核质子俘获率，采用标准参数，太阳模型给出 $R(p) \sim 0.001R(\epsilon)$ 。因此，为了明显地影响 Be 中微子流量，我们要对目前 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应截面(估计误差 $\sim 10\%$)提高二个多数量级。然而，如此的核物理截面的更改将使 Kamiokande 实验事件率预言值增加一百多倍，这完全与观测不符。(长期以来，很多文章通过人为地改变 Be 电子俘获截面声称解决太阳中微子问题。然而，从(6)式可见，Be 中微子流不依赖于电子俘获率的精度好于 1%)。

我认为只有两种可能性：(1) 四个太阳中微子实验至少有三个(二个镓实验和一个氯或 Kamiokande 实验)给出了使人误解的结果；(2) 中微子在太阳中心产生后，需要标准电弱理论以外的物理来改变中微子能谱和味含量。

五 我们学到了什么？

找不到哪个太阳模型来解释这四个太阳中微子实验。已设想了许多粒子物理模型能够解释观测到的数据。这一节，我将总结三十年来太阳中微子研究教训。我将首先综述在天体物理学方面的进展，然后简要勾划一下在物理学方面的发展。

5.1 关于天文学

1964 年建议氯太阳中微实验的一对文章是为了如实地检验太阳模型计算。那两篇文章要做氯实验的唯一动机就是“看看一颗恒星的内部，直接检验恒星内部核产能假设”。

通过对恒星核产能的直接实验，我们学到了什么？我们 1964 年的知识如何与太阳中微子实验结果对比？表 2 把 1964 年的 6 个主要理论预言（或隐含结论）与目前正运行的四个太阳中微子实验结果作了对比。

预言中微子是从太阳内部产生的：中微子来源的方向已被 Kamiokande 实验测到的电子-中微子散射（这在 1964 年一篇有远见的文章中建议）证实。四个正在运行的实验记数率与预言值在半定量的程度上是一致的，观测值与理论值的比率分别为：氯实验 0.3, Kamiokande 水实验 0.5, 平均镓实验 0.5。这种一致性比起 1964 年我们的担心要好多了，因为开始的两个实验主要中微子流量（源于 β 衰变）近似与太阳中心温度的 20 次方相相关。预言主要中微子的能量范围是 0 到 14MeV，这与 Kamiokande 实验观察结果吻合。这些实验没有得到有关入射中微子能谱方面的准确信息，但是它们指出了中微子确实分布在预料的能量范围之内（至少超过 7.5MeV），并且在阈值取 B 的 β 衰变最大中微子能量时没有观察事件。标准模型预言，除了微小的季节性变化，太阳中微子流量是常数。（太阳内部 Kelvin-Helmholtz 冷却标为 10^7 年）。根据四个开创性太阳中微子实验可获得的数据，基本上认同太阳中微子是时间的常数（不是指实验家观点下的认同）。标准太阳模型预言太阳几乎完全是通过 PP 链核聚变而发光的，而不是 Bethe 最先强调的 CNO 反应。若 CNO 反应为主，各太阳中微实验中的事件率也可精确计算。这些“完全 -CNO”事件率列于表 2，比观测值高一个数量级。最后，若我们粗略地认为 B 中微子流量近似依赖太阳模型中心温度，这样由实验的事件率得到的中心温度值与太阳模型计算结果在 2% 或更好的精度上是一致的。

表 2 核能产生：预言与观测

性质	预言	观测						
方向	从太阳来	好						
产生率	可靠的计算值	近似于预言值						
中微子能量	0-14MeV	<14MeV						
时间依赖性	常数（除了季节性）	好						
主要反应	若 CNO 循环 <table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td>Cl: 28SNU</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ga: 610SNU</td> </tr> <tr> <td></td> <td>水: 1.0</td> </tr> </table>	{	Cl: 28SNU		Ga: 610SNU		水: 1.0	2.6SNU 74SNU 0.44 倍标准模型
{	Cl: 28SNU							
	Ga: 610SNU							
	水: 1.0							
中心温度	$16 \times 10^6 \text{K}$	$T(^8\text{B})/T_{\text{model}} \gtrsim 0.98$						

四个正在运行的太阳中微子实验已向我们指明太阳是通过核聚变发光的，这就完成了 1964 年建议的原始目标。表 2 中给出检验的定量上的进展要等下代实验来完成。但是，最重要的定性上的结论已经确定了：已经观测到从太阳中心来的，跟预料的数目及能量差不多的中微子。

为得到更准确的太阳中微子流量，我们一直改进着太阳模型。在这三十年的奋斗中，我们对太阳结构有了更好的了解。随着输入参数值的改进，物理描述的更准确，数值方法

的更精巧, 这些理论模型也将作一步步的修改。也许最重要的是, 作为一个相关学科, 日震这已发展起来, 并能提供精确的数据以确定太阳内部大部分区域的声速。日震学测量可用于检验和改进标准太阳模型。进一步改进太阳模型是需要的, 也是重要的。但是, 在计算得的压力模本征频率与日震测量频率之间定量上的一致性 (普遍好于 10^3), 是标准太阳模型基本正确的强烈证据。

5.2 关于物理学

为了更精确地检验天体物理预言, 我们必须知道中微子在太阳内部产生以后的行为。理论物理学家具有丰富的想象力, 他们根据新的粒子物理学为我们提供了各式各样的解释, 其中包括真空中中微子振荡, 物质中共振中微子振荡 (MSW 效应), 共振磁矩翻转, 无作用中微子, 中微子衰变, 中微子对等效原理的破坏等。如果超出弱电模型的新物理学容纳二或三种中微子, 其中的大部分解释就能说明存在的实验数据。所有这些解释, 包括这里没列出的, 都能说明太阳中微子实验数据, 并且与已有的物理原理以及其它实验结果均不矛盾。

粒子物理解释的数目之大, 超过了目前太阳中微子实验鉴别能力。我相信下一代太阳中微子实验会遴选出唯一可能的好的粒子物理解释, 我希望一些有效的新的实验 (SNO, 超 Kamiokande 和 BOREXINO), 与正在运行的四个实验一起, 能为我们指明那个好的解释的方向。

那么, 关于粒子物理学我们学到了什么? 我们知道了大量粒子物理解释与那四个太阳中微子实验获得的数据是相容的。也许最重要的是我们知道了, 对标准电弱理论做精美推广而得的 MSW 效应能够描述所有太阳中微子实验信息, 只要电子中微子与有限质量的其它中微子混合,

$$m_i \approx 0.003\text{eV}. \quad (7)$$

MSW 理论还没有得到证明, 但这是个漂亮的思想, 我想, 如果大自然拒绝使用这一奇迹般的理论, 那将是很不给面子的。

六 今后如何?

在这一节, 我将总结一下在今后一二十年可望解决的物理和天文问题。

6.1 物理学上可解决的问题

太阳中微子物理研究的基本目标是测量中微子能谱和味含量随时间的变化。我们想知道多少给定能量和确定味 (中微子类型) 的中微子到达地球, 它们均为时间的函数。考虑到一些可能的其它粒子物理模型, 我们还想知道是否太阳中微子流中含有反中微子。

标准模型认为, 给定中微子源 (如 B 的 β 衰变) 的中微子能谱与地面实验测量推断的能谱是非常一致的。在标准电弱理论中, 只有无质量电子中微子在核衰变或核聚变反应中产生。标准电弱理论预言核聚变产生的太阳中微子是 ν_e , 而非 ν_μ 或 ν_τ 。(据 MSW 和真空振荡理论, 核 β 衰变或聚变产生的中微子是不同类中微子的线性组合, 并且至少有一类中

微子质量不为零)。最后，除了由地球轨道扁率而致的季节性变化，太阳内部的总能量保证了中微子流量在 10^7 年的时标内是常数。对于这些预言的任何出入都将是超出标准电弱模型

的信号。

我将列出在下一个十年左右太阳中微子研究可能解决的六个特殊的物理问题。

6.1.1 ν_e 和 ν_{total} 的比值

若标准电弱理论最简单的版本是正确的，在太阳内部产生的电子中微子将是不变的。若中微子有振荡，包括真空和物质感应 (MSW 效应) 情形，到达地球的总中微子数目 ν_{total} 要比仅仅观测到的电子中微子数目多。

通过测量两个不同反应的反应率可以确定 ν_e 和 ν_{total} 数目之比，一个反应只对电子中微子敏感，另一个反应不依赖于中微子种类而响应。这一比值将会首次在 SNO 太阳中微实验中测到，那里利用一千吨的重水中的 $\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + e$ (只有 ν_e) 和 $\nu_{\text{total}} + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + \nu_{\text{total}}$ 两个反应来测量 (若自然界中存在无作用中微子，它们也不会在此实验中测到。原则上，太阳中微问题的解决也应考虑中微子向无作用中微子的转变)。

6.1.2 中微子能谱

这个谱的形状在 10^{-5} 精度上不依赖于太阳模型物理。它的形状经验上由实验室核物理实验测量来定。

B 中微子能谱可以通过测量 $\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + e$ 反应中电子能谱而得到，这个反应可以在 SNO 实验中实现，有关能谱的重要信息也可通过超 Kamiokande 电子散射实验来获取。超 Kamiokande 可以精确测量纯水中中微子 - 电子散射产生的反弹电子能谱。

6.1.3 Be 中微子流量

对四个太阳中微子实验最简单的解释就是，相对于标准太阳模型而言，Be 中微子大大地减少了。我现在还不知道有哪个修正了的太阳物理能够大大减少 Be 中微子流的同时也能将 B 中微子流减少一倍 (正如 Kamiokande 实验观测到的)。因此，Be 中微子流的大大减少，应该是新弱作用物理存在的一个信号。

为解释氯和镓实验，需要测量 Be 中微子流。利用放化原理工作的氯和镓实验不能给出起反应的中微子能量 (阈值以上) 的信息。

在 Gran Sasso 地下实验室工作的 BOREXINO 小组，利用有机闪烁探测体中电子 - 中微子散射，将会第一次测到 Be 中微子流量。

6.1.4 中微子流量的时间依赖性

所有正有筹建的实验可望得到的记数率要比目前正在运行的太阳中微子实验中的事件率高 1 至 2 个数量级。利用得到的数据检查时间相关性，将会得到前无所有的结果。正在运行实验的事件率典型值为每年 25 到 50 个，然而，目前已计划好了的实验可望达到的记录率典型值为每年几千个。

有了这些未来的实验，我们将有可能在很高的精度上检验标准模型的预言：太阳中微子流量与时间无关。另外，有可能测出由地球轨道扁率所致的 7% 的中微子流量季节性波动。我们也可以在高精度上研究真空中微子振荡预言的强季节相关性。选择适当的参数，

MSW 效应预言了强的昼-夜效应。这是因为在夜晚,当地球另一边的中微子穿过地球来到探测器的途中,一些 μ 和 τ 中微子转变成了 e 中微子。

6.1.5 质子-质子中微子流量及能谱

在太阳内部产生的主要中微子是从简单的 $p-p$ 反应产生的低能中微子。因为它们能量低 (0.4MeV), 不能被氯、Kamiokane、超 SNO、BOREXINO、碘等实验观察到。在筹建或运行的实验中只有镓实验 (GALLEX 和 SAGE) 有足够低的能量阈来测量 $p-p$ 中微子。镓实验是通过放化方法来测中微子, 它们不能测使 Ga 转变成 Ge 的中微子的能量。因此, 目前还没有哪个实验能确定镓实验观测到的事件中, 有多少是 $p-p$ 中微子引起的, 有多少是由 Be、CNO 或 B 中微子引起的。

最近已建议的二个实验能有效地测量 $p-p$ 中微子的反应率及能谱, 这不光是技术上的挑战, 而且对物理学和天文学也有重要的基础理论意义。关于低能 $p-p$ 中微子的行为, 所有已建议的天体物理解都有明确的预言。

6.1.6 精炼核物理参数

在过去的二十年, 做了许多精确、困难而又漂亮的核物理实验来确定太阳聚变 (表 1) 反应率, 以满足太阳模型计算中微子流量的精度。利用目前可能的先进实验技术来检验核参数的测量, 这是很重要的。

与太阳中微研究有关的最重要的核物理实验, 是测量 ${}^7\text{Be}+p \rightarrow {}^8\text{B}^*+\gamma$ (见表 1 反应 8) 的反应截面。Kamiokane、超 Kamiokande 以及 SNO 等太阳中微子实验的预言值正比于这个反应的低能反应率, 氯实验标准模型预言值的主要贡献也正比于它的反应率。很多漂亮的实验利用一个放射性靶和一束质子测量了 $p({}^7\text{Be}, \gamma){}^8\text{B}$ 的反应率。修改常规的实验装置, 使用一个气态质子靶和一束 Be, 对于获取更多的信息是有益的。这种修改将会导致不同的系统误差, 是各种实验室误差的重要来源。

据我看来, 用 Be 束测 $p({}^7\text{Be}, \gamma){}^8\text{B}$ 反应截面是核天体物理学上最重要的实验。

太阳中微子物理实验的基本目标是测量 (或给出极大限制) 中微子的基本性质, 特别是中微子质量和混合角。很可能在下个十年内, 我们会向这个目标取得重大进展。

6.2 天文学上可解决的问题

太阳中微子天文学的基本目标是确定太阳内部各种核聚变的反应率。不同核来源的中微子流量表现了聚变反应的特征。为了从所测中微子能量推出所测产生的中微子能谱, 我们必须知道中微子产生以后的行为。

粒子物理学进展与太阳中微子天文学进展是密切相关的。正如 6.1 中讨论的, 在今后十年, 我们有可能了解足够的粒子物理知识, 以便从到达地球中微子的实验数据精确地反推在太阳内部中微子的产生率。在这一小节的讨论假定企图了解中微子性质应有的进展将会实现。

6.2.1 整体氢聚变

从表 1 可以看出完成太阳核聚变的两条途径: 反应 4 和 5, 即所谓的 ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ 和 ${}^3\text{He}$

^4He 反应。在低温下，由于 $^3\text{He}-^3\text{He}$ 的约化质量较小，这个反应的库化势垒穿透几率要高于 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 反应。按标准太阳模型， $^3\text{He}-^4\text{He}$ 反应在太阳最中心部位为主（那里它是 $^3\text{He}-^3\text{He}$ 反应速度的 1.5 倍），但对 (1) 描述的终产物总贡献只约占 19%。

标准太阳模型的这个预言正确吗？确定 $p-p$ 和 Be 中微子流量（它们在太阳产生以后已经被非标准粒子物理修正了），可以回答这一重要问题。单位时间太阳发生 $^3\text{He}-^3\text{He}$ 和 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 反应总数的平均比值为

$$\frac{\langle ^3\text{He}-^4\text{He} \rangle}{\langle ^3\text{He}-^3\text{He} \rangle} = \frac{2\sigma(^7\text{Be})}{[\Phi(p-p) - \Phi(^7\text{Be})]} \quad (8)$$

这里 $\Phi(p-p)$ 和 $\Phi(^7\text{Be})$ 分别为 pp 和 Be 中微子流量， $\sigma(^7\text{Be})$ 是 $^7\text{Be}(\epsilon, \nu_e)^7\text{Li}$ 反应截面。

(8) 式是我们从恒星能源理论知道的最精确的可检验预言。关于 $^3\text{He}-^3\text{He}$ 和 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 反应，已知的理论计算不确定性为 7%。

6.2.2 B 中微子流量

原则上讲，太阳内部 B 的 β 衰变（见表 1 中反应 9）产生的中微子流，对于测量而言，是最简单的。B 中微子能量较高，使得它易于被探测。由于这个原因，Kamiokande、超 Kamiokande 和 SNO 中微子实验都是盯着 B 中微子。

然而，应该能定出 B 中微子的总量，包括那些难测到的原始电子中微子转变成的 ν 和 $\bar{\nu}$ 中微子。在 SNO 实验中通过中性流分裂氦核，以及在超 Kamiokande 实验中通过电子-中微子散射，都能直接测出所有类型中微子的总数。（这里同样假定不存在无作用中微子）。

所有味 B 中微子流量是太阳中心温度的灵敏探针，它近似与太阳中心温度的 20 次方相关。因此，实验上测定总中微子流量是重要的。

6.2.3 太阳内部温度剖面

通过测量太阳内部电子俘获产生的中微子线谱与地面实验室相应的线状谱的能量平均差，可以精确检验恒星结构与演化理论。已计算出这个能量移动为 1.29keV，它近似等于太阳核心的平均温度。这个平均温度是通过对中微子产率加权来积分太阳模型内部温度而得到的。大量现代太阳模型计算出的那个能量移动值变化的范围只有 0.06keV。

测量能量移动就等效于测量了太阳中心温度分布。

类似于经典光学天文上线谱的展宽，计算出的中微子线谱形状（能量剖面）包含了太阳内部温度分布的信息。中微子线谱的理论形状是不对称的，在低能端为高斯型，半高半宽（half-width at half maximum）为 0.6keV；在高端为指数型，半高半宽为 1.1keV。

计算出的中微子线谱的形状不太受中微子真空振荡、MSW 效应、以及有关太阳中微子问题讨论较多的弱作用解释等模型影响。这是一个关键性的结论：意味着线谱的形状包含着天文信息，并且对中微子物理进展不会有帮助。

具有一定分辨率测量线谱形状的探测器是可能的。不幸的是，他们目前的尺寸都太小，不能构成一个完整的太阳中微子的实验。然而，文献中已建议把探测器发展得足够大，以便能测出太阳中微子线谱能量的平均移动。

6.2.4 淘汰一些“非标准”太阳模型

在起初宣布测量太阳中微子流量的氯实验值低于计算值后的十五年左右,许多作者发明了富有想象力的非标准太阳模型,企图“解决”太阳中微子问题。现在的情况不同了,有三个太阳中微子问题,不可能通过修正恒星物理调和这四个正在运行实验的结果。

我认为我们对太阳核聚变产生的中微子流和最好的地面实验中的中微子流都很了解。在太阳这方面,我们采用了与实验室加速器不一样的对理论计算的约束。然而,来自太阳的约束(特别是测得的太阳光度和日震频率)有效地限制了中微子流量的容许值。这些约束在3中已讨论。

但是,许多物理学家并不熟悉恒星物理学。他们对裁决那些似是而非太阳模型(甚至是一些很离奇的太阳模型,如中心小黑洞,核的非麦克斯韦能量分布等)感到不安。有些物理学家喜欢考虑一些荒唐的太阳模型,以致于几乎所有天体物理学家因不值得商讨而被解雇。

基于一些较常讨论的非标准太阳模型来精确计算太阳模型可能是有益的。(例如,低中心重元素丰度,铁的分化沉淀,很强的内部磁场,几乎完全的元素混合,湍流扩散,大的质量损失,以及弱作用粒子 WMPs 参与的传能等)。对于每一个非标准假设,为得到一个太阳标模必须使用尽可能好的物理(不透明度,状态方程,扩散率以及测量的输入参数),再加上那个特定设计的恒星结构假设。如此算出的非标准太阳模型还必须与上千的日震观测 p -模频率作对比。

我个人认为所有可能解决太阳中微子问题的非标准太阳模型,随着与更精确细致的日震数据的对比,都将会被淘汰。粗略地讲,部分这些模型主要失败的原因,我怀疑是由于错误地推测了对流带的深度或太阳内部声速对浓度的依赖关系。先前虚构的一些企图解决太阳中微子问题(当时仅有一个问题)的所有非标准太阳模型都不能解释日震学精确数据。对这一猜想的检验也将是一个重要贡献。

6.2.5 发现 g 模

在太阳光学天文上可料到的最重要的发现将是引力模(g 模)振荡。与已很好研究的压力模(p 模)振荡不一样, g 模最大振幅出现于太阳的核心,并且在太阳外部大大衰减。如果想要了解与中微子天体物理相关的太阳核部性质,测到集中于中心部位的 g 模是值得想往的。然而,因 g 模主要集中于核心,就非常难以探测与推测, g 模的振荡幅度在太阳表面(才可能测到)是很小的。目前在太阳上,它们还没有可信地观测到。

新的实验正着手从空间(SOHO卫星)和地面国际望远镜网(GONG)来探测 g 模。即使不能测到 g 模,这个新实验的结果对太阳物理也是很有意义的,原因是能提供更好的 p 模观测资料。若能观测到 g 模,这个发现将具有划时代的重要性。

6.2.6 太阳的完备模型

目前完成的包括扩散的一维(球对称)太阳模型物理描述的精度是很高的,能够得到与 p 模振荡率一致的定量结果。数值实验和理论探讨都认为未来模型的改进不可能太大地影响中微子流量计算值

但是,现行的太阳模型是不完整的。它们没有考虑太阳结构的二维(或三维)这一事实

它们对自转、磁场、质量损失以及其它可能的效应没有给出一个很自恰的动力学处理，而这些效应可能会破坏现行的球对称和准平衡近似。由观测我们知道，太阳（至少在表面附近）有磁场，具有质量损失，并且偏离球对称约 10^{-5} 。

对于下一代太阳模型，在一个更完备的物理描述中包含这些复杂的物理过程，将是对分析和数值计算的挑战。需要发展新的自恰方法来计算太阳（或恒星）模型，同时会采用一些新发明的数值技术。发展一个更完备的太阳模型，这一目标是今后十几年的一个挑战。幸运的是，这一挑战能导致重要进展，原因是计算能力比过去大大增加了，而要作仔细比较的数据精度是有限的。

太阳天体物理前途光明。

七 总结

太阳中微子研究的前 30 年已经从实验上证明了恒星核能源的基本预言。我个人认为，今后 10 到 20 年的研究集中于利用太阳中微子了解更多关于弱作用物理方面的知识。弱作用问题解决以后，有可能更精确地检验核能源和恒星结构理论。

回顾往昔，太阳中微子研究似乎有点讽刺性。开始是想利用中微子（它的性质已很熟悉）来研究最近的恒星内部。这个计划实行起来是不方便的，它要利用在微观物理发展起来的特定方法来研究大质量的宏观物体：太阳。现在看来，这一大群物理学家、化学家、天文学家和工程师在一起工作，也许碰巧观测到了标准弱电模型之外的物理学。

我们可能非常幸运。

为理解太阳中微子实验结果，下一代实验，将要告诉我们是否需要标准弱电模型以外的物理学。我不知道，但我敢肯定，从现有的太阳中微子实验我们已经知道了有关中微子物理的重要事实，并且我们还会从今后的实验中学到更多的东西。这项研究可能（也不一定）使人们达成共识，认为标准弱电模型之外的物理学隐含在太阳中微子实验中。我想，太阳中微子物理这个巨大的课题是一科学领域的前沿，它可导致在不同科学领域内重要的和完全出乎意料的进展。对于这一切，我既感到惭愧，又觉得和谐。