

# 太阳中微子实验的三大疑问

郁 忠 强

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

## 一、太阳能源——聚变反应

19世纪末,开尔文-赫姆霍兹提出了一种解释太阳能源的理论.他们认为太阳产生的热和光来源于万有引力的转换.这种理论在当时为很多人所接受,因为它和天文学上恒星形成是由于星云状源的收缩相符合的.但是计算结果表明,太阳的亮度按这种机制只能保持大约2千万年左右,而大多数的地质学家认为要长得多.

1896年放射性发现以后,科学家对岩石中长寿命同位素的天然放射性进行了研究,确定火成岩的寿命达几十亿年,太阳应该比它的寿命更长.另外,科学家也认识到太阳的能量也可以从一些还不十分清楚的和原子核有关的反应过程产生.人们逐渐放弃了开尔文-赫姆霍兹的概念.

1925年培尼由太阳吸收谱计算了它的化学组成.他对18种元素进行计算后指出,太阳主要是由氢和氦组成,其他16种元素的成分小得多.这个结论震惊了大多数天体物理学家,太阳上元素的分布竟然和地球上元素的分布如此不同,人们难以接受.3年后,经其他实验的证实,培尼的结论才逐渐为人们接受,并且开始思考关于氢的核反应.1929年形成了太阳内部氢发生核聚变反应机制的基本概念,核物理学家从马克威尔-波尔兹曼热能分布和核位垒穿透几率的概念出发,发现可以由质子的聚变反应解释太阳的能源.1936—1937年形成了两个反应链,一个是质子-质子链,另一个是碳氮氧环.以后的很多年,碳氮氧环曾被考虑为太阳能量的主要来源.一直到50年代,加州理工学院的实验测量指出,碳氮氧环仅在比目前太阳内部温度还要高的情况下才能有效地运

作.从而得出结论,太阳的能量主要来自于质子-质子链.后来的计算表明,碳氮氧环产生的能量小于太阳总能量的4%.

最早被人们认识的质子-质子链是由质子-质子反应、质子-氘反应和 ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ 反应组成. ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ 反应是这个链的终了. $p+p\rightarrow d+e^++\nu_e$ 反应是中微子的源.发出的中微子的能量是从0到420KeV.在50年代初,物理学家想不出建造什么样的探测器才能探测到这么低能量的中微子.更没有想到要测量中微子的能谱,有些物理学家甚至认为中微子是无法探测到的.

一直到1959年,有人测量了 ${}^3\text{He}+{}^4\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\nu$ 反应的截面,测出的结果比早期的计算要大出2500倍.人们认识到质子-质子链还必须另外两个分支.表1中给出了质子-质子链的三个分支的反应过程,pp-1, pp-2和 pp-3.

从表1中可以看到,除pp-1链中pp, pep, 和 ${}^3\text{He}-p$ 反应产生中微子外,pp-2链中 ${}^7\text{Be}$ 衰变产生两种单能的中微子,0.860MeV(90%)和0.380MeV(10%),pp-3链中 ${}^8\text{B}$ 衰变产生的中微子,是一个连续谱,能量一直可扩展到14MeV.物理学家对 ${}^8\text{B}$ 产生的高能中微子特别感兴趣,因为中微子能量越高,中微子俘获和散射截面越大,就有可能设计探测器对太阳中微子进行观测.

对中微子的实验探测首先是由莱因斯和考恩在1956年完成的.他们的实验是在美国萨凡河反应堆上进行的.通过中微子俘获反应 $p+\bar{\nu}_e\rightarrow e^++n$ ,应用延迟符合技术测量裂变反应产生的反中微子.事实上莱因斯更感兴趣的是采用直接计数的方法观测太阳中微子.1958年他和他的同事开始进行一个宏大的计划,主

要的目标是在南非约翰内斯堡附近一个 3200 米深的矿井中建立一套装置,测量宇宙线中微子和  $\mu$  子通量。由于种种困难在 1958—1964 年期间,反之建立了三个试验性的太阳中微子探

表1 太阳中微子产生的反应

反 应	$E_r$ (MeV)	$\sigma$ (cm <sup>2</sup> )
质子-质子链 pp-1	$p+p \rightarrow d+e^+ + \nu_e$	$\leq 0.420$
	$p+e^- + p \rightarrow d + \nu_e$	1.442
	$p+d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	
	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$	
	${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	$\leq 18.8$
pp-2	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	0.860(90%)
	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	0.380(10%)
	${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	
pp-3	${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	
	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	$\leq 15$
	${}^8\text{B}^* \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + \gamma$	
CNO环	$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	
	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	$\leq 1.20$
	$p + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	
	$p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	
	${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	$\leq 1.73$
$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$		

测器:一个 4000 升的弹性散射闪烁探测器、一个锂(或硼)的方向探测器、和一个利用  $D(\nu_e, e^-)2\text{H}$  的 2000 升重水探测器。这几个试验性实验是今天正在运行和正在建造中的太阳中微子实验的先驱。

## 二、太阳标准模型

经过长期的研究,确定了上述太阳能量生成和太阳中微子产生的各种反应,包括 pp 链和 CNO 环。如果我们知道这些反应过程的各种参数,就可以计算出太阳中微子的产额和通量,通常被称为太阳标准模型。在具体计算太阳中微子的产额时,由于使用不同的核反应参数,考虑不同的影响因素,不同的作者可以给出不同的结果。如果要计算太阳中微子到达地球时的通量,以便和地球上的观测太阳中微子的实验作比较,还需要考虑中微子的性质。所以我们看到,太阳中微子的问题涉及到 3 个领域:中微子物理、太阳物理和核物理。下面我们在讨论

实验观测结果和理论计算比较时所指的标准太阳模型,实际上是中微子物理、太阳物理和核物理三个领域的一个综合模型。中微子理论是采用最小弱电理论,即中微子无质量、无振荡。核

物理是采用现有的实验测量的核反应参数,有些轻元素在低能时的核反应截面是采用现有的核理论作外推得到的。

太阳物理是采用上述太阳标准模型,太阳的能量生成和太阳中微子的产生是通过 pp 链和 CNO 环。为方便起见,在讨论中将上述综合模型简称为太阳标准模型。

## 三、四个太阳中微子实验

太阳中微子到达地球时的流强是很大的,但由于中微子和物质相互作用截面非常小,作用事例很少,探测很困难。同时探测装置的本底却很大,它们主要来自宇宙线中的  $\mu$  事件、周围环境的天然放射性本底、和探测器本身材料中的天然放射性成分。所以太阳中微子的实验观测

装置一般都建在很深的地下,并尽可能地减少周围环境的本底。为了增加太阳中微子与物质的作用事例,必须建造体积很大的探测器。目前已经有四个实验装置运行多年,观测到了太阳中微子的事例率,装置的原理和测量结果综合在表 2 中。其中三个实验是放射化学实验,美国的 Homestake 实验采用  ${}^{37}\text{Cl}$  俘获太阳中微子(简称氯实验),意大利 Gran Sasso 的 Gallex 实验和俄罗斯 Baksan 的 SAGE 实验是采用  ${}^{71}\text{Ga}$  俘获太阳中微子(简称镓实验)。它们的反应阈值分别为 814KeV 和 233KeV。产生的  ${}^{37}\text{Ar}$  和  ${}^{71}\text{Ge}$  都是放射性核,半衰期分别为 34.8 天和 11.43 天。实验过程是这样的:探测器运行和辐照上述半衰期的 2—3 倍长时间,然后提取反应产物,送到一个低本底正比计数器中进行测量。测量的时间足够长以后就可以从测量结果中得到指数衰减常数和本底,决定放射性核的产额,从而给出太阳中微子的事例率。第 4 个实验是

表2 四个太阳中微子实验的结果

实验	探测原理	阈能 (MeV)	观测结果 (SNU)	理论预期 (SNU)
Momestake 615吨C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$	0.814	$2.55 \pm 0.17 \pm 0.18$	$8.0 \pm 3.0$
GALLEX 30吨氯化镓	$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$	0.233	$79 \pm 10 \pm 6$	$131.5^{+21}_{-17}$
SAGE 60吨镓	$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$	0.233	$73^{+18+5}_{-16-7}$	$131.5^{+21}_{-17}$
Kamiokande 3000吨水	$\nu_e + e \rightarrow \gamma_e + e$	7.5	$2.89^{+0.22}_{-0.21} \pm 0.35$	$5.7 \pm 2.4$

日本的 Kamiokande 实验, 这是一个实时的计数器实验. 采用水-契可夫探测器探测中微子-电子散射事例, 简称水实验. 该实验和放射化学实验相比最大的优点是可以测量散射电子的反冲方向, 从而确认中微子确实来自于太阳. 这极有利于太阳中微子和本底的区分.

每一个实验都是测量俘获固定阈能以上的中微子的总数. 阈能的大小依赖于不同的探测器. 图 1 给出了由太阳标准模型预期的太阳中微子谱. 在该图的上方横轴上标有镓实验、氯实验和 Kamiokande 实验的阈能. 从图上可以清楚地看到, 在氯实验中, 主要的贡献来自<sup>8</sup>B 中微子, <sup>7</sup>Be、pep、<sup>13</sup>N 和 <sup>15</sup>O 中微子也有贡献. 而在镓实验中, 由于阈能较低, 就能测量到 pp 中微子, pp 中微子在太阳中微子中所占的比份最大. 由于水-契可夫探测器的阈能高达 7MeV, 所以测量到的几乎都是<sup>8</sup>B 太阳中微子, hep 中微子的通量很小, 所以我们常把 Kamiokande 观测到的中微子看作纯的 <sup>8</sup>B 中微子.

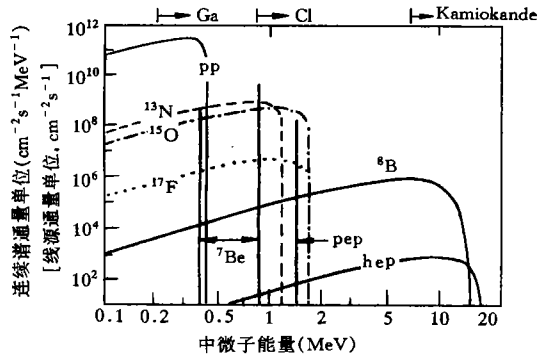


图1 太阳标准模型所预期的太阳中微子谱

#### 四、三个太阳中微子问题

将四个太阳中微子实验的观测结果和标准太阳模型的计算结果进行详细的比较, 发现有三个重要的矛盾, 被称为三个太阳中微子问题.

##### 1. 太阳中微子的丢失

氯实验从 1970 年最早投入运行以来, 已进行了廿余年的观测. 观测到的事例率一直比标准太阳模型的理论预期值小很多. 测量值为  $2.55 \pm 0.25$  SNU, 而最近详细的理论计算的预期值为观测值的 3.1 倍,  $8.0 \pm 3.0$  SNU. 这里 SUN 为测量太阳中微子计数率的通用单位, 表示每个靶原子每秒钟俘获  $10^{-36}$  个太阳中微子规定为一个 SNU, 称为太阳中微子单位. 在氯实验中, 预期的大部分事例率来自于高能<sup>8</sup>B 中微子, <sup>7</sup>Be 也有相当的贡献, pep 中微子和 CNO 中微子贡献很小. 氯实验的观测值和理论计算的预期值之间的不一致, 已经有廿余年的历史, 人们常称为太阳中微子丢失的问题. 现在被称为第一个太阳中微子问题.

##### 2. 氯实验和水实验之间的不相容

Kamiokande 水-契可夫实验通过中微子-电子散射探测能量高于 7MeV 的中微子. 实验中可以测出反冲电子的方向, 所以可以确认观测到的中微子是从太阳来的. 另外对反冲电子能量的测量, 可以给出太阳中微子能谱的信息. 实验上观察到的反冲电子的能谱和<sup>8</sup>B 中微子所预期的结果是相符合的. 上面已经讲到, <sup>8</sup>B 中微子是这些较高能量中微子的唯一来源. 所以我们可以从水实验中观察到的<sup>8</sup>B 中微子事例率计算出氯实验中来自于<sup>8</sup>B 中微子的事例率. 计算

的结果表明氯实验中来自于 ${}^8\text{B}$ 中微子的事例率应该有 $3.2 \pm 0.45\text{SNU}$ ,这超过了氯实验观察到的全部事例率 $2.55 \pm 0.25\text{SNU}$ .在氯实验中,还有来自 $\text{pep}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 和 $\text{CNO}$ 中微子的贡献,按太阳标准模型计算,这部分贡献应该是 $1.9\text{SNU}$ .氯实验和 $\text{Kamiokande}$ 的实验结果之间的矛盾称为第2个太阳中微子问题.

### 3. 镓实验

两个镓实验, $\text{GALLEX}$ 和 $\text{SAGE}$ 的测量结果比较一致,观察到的太阳中微子平均事例率为 $76\text{SNU}$ .而太阳标准模型理论预期来自于 $\text{p-p}$ 和 $\text{pep}$ 的中微子就有 $73\text{SNU}$ .这就已经和全部观察到的太阳中微子相当.那么其余的来自于 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^7\text{Be}$ 的中微子那里去了呢?按太阳标准模型计算, ${}^8\text{B}$ 中微子在镓实验中的贡献应有 $16\text{SNU}$ ,即使按 $\text{Kamiokande}$ 的实验结果推算,也应该有 $7\text{SNU}$ .基于太阳标准模型计算 ${}^7\text{Be}$ 中微子的事例率有 $34 \pm 4\text{SNU}$ ,在镓实验中测量到的事例率中,似乎已经没有了 ${}^7\text{Be}$ 中微子的空间.

在镓实验的测量结果中,似乎除了 $\text{p-p}$ 中微子外,就没有其他来源的中微子了,这就是第三个太阳中微子问题.这个问题在本质上是与前两个问题是独立的,这个问题主要讲的是镓实验和 $\text{p-p}$ 中微子的计算结果的比较,而前两个问题中几乎不涉及到 $\text{p-p}$ 中微子,在 $\text{Cl}$ 实验和 $\text{Kamiokande}$ 实验中都观察不到 $\text{p-p}$ 中微子.而更重要的是 $\text{p-p}$ 中微子通量的计算几乎和太阳标准模型的具体参数无关,不同的模型给出的 $\text{p-p}$ 中微子通量的计算值不确定性仅 $1\%$ .所以通常说 $\text{p-p}$ 中微子通量的计算几乎是和模型无关的.

### ● 五、渺茫的“希望”

对于太阳中微子丢失的问题已经被研究了许多年.曾经有不少的物理学家希望不用太阳标准模型,也不导入新的物理,解决太阳中微子丢失的问题.经过多年的探索,发现这个“最后的希望”似乎很渺茫.

首先,物理学家在解释四个太阳中微子实验结果时,对太阳中微子的通量假定为和模型

无关的自由参数处理.但是分析结果表明,四个实验的观测结果是不相容的.

实际上在第3个太阳中微子问题中已经清楚地看到,镓实验的观测结果和理论计算预期的不相容几乎是和模型无关的.采用任何非标准的太阳模型都无法解释第3个太阳中微子问题.

“最后的希望”也受到了最近太阳“星”震谱学观测结果的沉重打击.由太阳“星”震谱学测量到的太阳声速和太阳标准模型所预言的太阳声速以很高的精确度相符合.

### 六、讨论

从上述讨论中可以看出,假如太阳标准模型是正确的话,那么,四个太阳中微子实验中至少有三个实验给出了错误的实验观测(两个镓实验和一个氯实验,或者是两个镓实验和一个水实验),或者是中微子在太阳的核心产生后发生了些什么变化(譬如说,太阳中微子从太阳到达地球的路径上改变了它的能谱或者是改变了它的味,由电子中微子变成了 $\mu$ 子中微子或 $\tau$ 子中微子).两者必居其一.若是后者的话,这就需要最小弱电理论以外的新物理.

35年前,人们还不知道实验上能不能探测到太阳中微子,现在不仅用不同的实验方法探测到了太阳中微子,而且太阳中微子已被用于研究中微子的性质.太阳中以核聚变反应产生能量的理论也已被证实.从四个太阳中微子实验的观测结果提出了十分有趣的疑难问题,有可能揭示和引导我们走向新的中微子物理.

人们期待着新一代的已经开始运行和正在建造中的一系列太阳中微子实验,包括 $\text{Super-Kamiokande}$ 、 $\text{GNO}$ 、 $\text{SNO}$ 、 $\text{Borexino}$ 和 $\text{ICARUS}$ 实验尽快地给出有关太阳中微子的信息.

最近 $\text{R. S. Raghavan}$ 提出了采用 ${}^{176}\text{Yb}$ 和 ${}^{160}\text{Gd}$ 实时地高效地探测低能太阳中微子的新思想,引起了人们广泛的兴趣.

太阳中微子的观测和解释吸引着越来越多的粒子物理学家、天体物理学家和宇宙学家的关注,它将成为今后物理学发展的热点之一.