

文章编号: 1007-4627(2002)01-0020-04

# 太阳中微子问题研究进展

柳卫平

中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413

**摘要:** 系统评述了国际上对太阳中微子研究的进展, 说明了核物理实验对研究太阳中微子问题作出的贡献, 对未来的中微子实验作了展望.

**关键词:** 太阳中微子问题; 中微子探测器; 中微子振荡

**中图分类号:** P182.8; P141.8 **文献标识码:** A

## 1 引言

太阳内部由聚变反应即 pp 链(详见表 1)产生的中微子, 对于我们了解太阳内部的物理过程以及中微子基本性质相关的弱相互作用理论, 提供了极其宝贵的信息<sup>[1]</sup>. 20 多年来, 实验观测(包括 Homestake, Kamiokande, Gallex 和 Sage 实验, 详见表 2)与标准太阳模型理论预言<sup>[2,3]</sup>的比较引发出了众所周知的太阳中微子丢失问题<sup>[3]</sup>, 即实验观测到的中微子通量显著低于太阳模型预言, 见图 1.

表 1 产生太阳中微子的主要反应

核反应	中微子能量范围/MeV	中微子能组的代号
$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	0.0 - 0.4	pp
$p + e^- \rightarrow p + \nu_e$	1.4	pep
${}^3\text{H} + p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$		
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$		
或		
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$		
然后		
$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	0.86 - 0.38	${}^7\text{Be}$
${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^8\text{Be} + \nu_e$		
或		
$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$		
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	0 - 15	${}^8\text{B}$

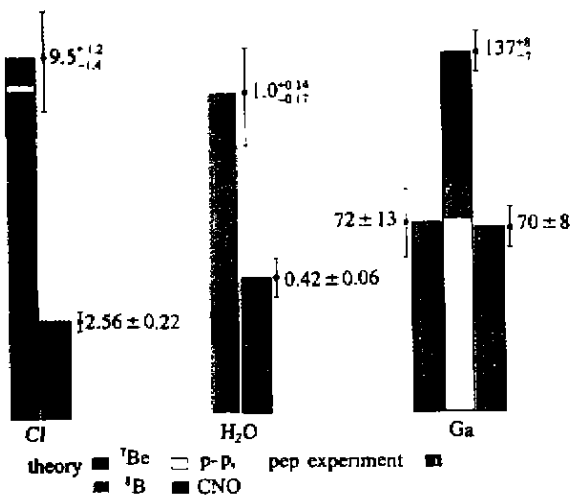


图 1 4 个太阳中微子测量的实验结果与太阳模型理论预言的比较<sup>[1]</sup>

中微子通量的单位为 SNU, 1 SNU 为每  $10^{25}$  个靶原子每秒产生一次反应.

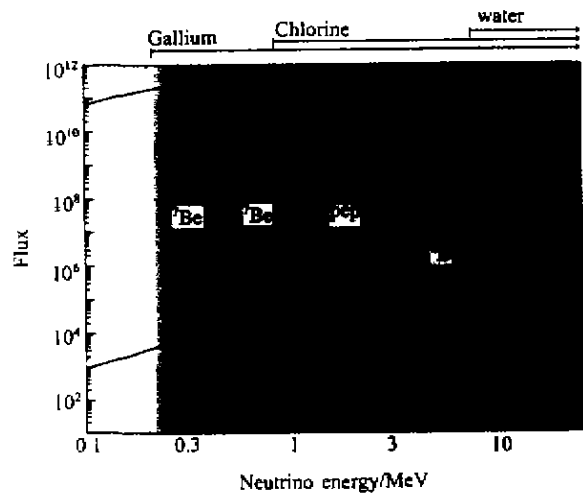


图 2 标准太阳模型预言的太阳中微子能谱<sup>[1]</sup>

不同的阴影表示对应探测器的中微子能量探测范围.

收稿日期: 2001-05-31; 修改日期: 2001-11-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(02200077400); 国家自然科学基金资助项目(19735001, 10045002, 19935030); 核工业科学基金资助项目(Y7197A0106); 国家杰出青年科学基金资助项目(19025524)

作者简介: 柳卫平(1962-), 男(汉族), 辽宁辽阳人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理实验研究.

表 2 现有的太阳中微子实验一览表<sup>\*</sup>

实验组	使用反应	测量下限 / MeV	中微子能组	探测介质	测量手段	计数率 / d	测量结果 / (SNU)
Homestake	$\nu_e + p \rightarrow \Delta^+$	0.814	${}^7\text{B}$ , ${}^7\text{Be}$	600 t Cl	放射化学	0.5	$2.55 \pm 0.25$
Kamokande	$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$	7.5	${}^7\text{B}$	2 kt H <sub>2</sub> O	$\nu_e$ 散射	8	$0.42 \pm 0.06$
Gadolin	$\nu_e + p \rightarrow \nu_e + p$	0.235	${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$	30 t Ga	放射化学	1	$70 \pm 8$
Sage	$\nu_e + p \rightarrow \nu_e + p$	0.235	${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$	60 t Ga	放射化学	2	$72 \pm 13$
Super-Kamokande	$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$	6.5	${}^7\text{B}$	22.7 kt H <sub>2</sub> O	$\nu_e$ 散射	23	$0.38 \pm 0.03$

\*  $\nu_e$  代表电子中微子,  $\nu_\mu$  为电子,  $\mu$  和  $\tau$  中微子的总称.

## 2 太阳中微子丢失问题的解决方案

近年来, 国际天体物理学和核物理学界的科学家为解决这个问题做出了巨大努力<sup>[4]</sup>. 总结目前所获得的实验和理论的研究成果, 引入新的物理机制似乎成了解决问题的唯一途径<sup>[5]</sup>. 在现有的解释中微子丢失, 特别是 ${}^7\text{Be}$  中微子的丢失的物理假设中, 通过仔细分析现有的实验结果(见图 1 和图 2), 太阳中微子振荡的猜想最令人信服, 见表 3. 其基本思想是太阳内部中微子反应产生的电子中微子在由

太阳内部向地球发射过程中, 与太阳和星际物质相互作用, 一部分振荡(衰变)为  $\mu$  或  $\tau$  中微子, 而地球上现有的中微子探测器只对电子中微子灵敏, 因而产生中微子丢失现象. 这种振荡既可能发生在真空中, 也可能发生在物质中. 日本的 Super-Kamokande 研究组(Y. Fukuda et al.)发表大气中微子振荡的实验结果, 这是第一次从实验上观测到中微子存在质量并且振荡的证据. 最近, 加拿大的 SNO 中微子探测组发表太阳中微子振荡的实验结果<sup>[3]</sup>, 其中结合了 Super-Kamokande 的实验数据.

表 3 在 90% 置信度下允许的 ${}^7\text{Be}$  中微子的通量与太阳模型预言的中微子通量的比值范围<sup>\*</sup>

通量范围	标准模型	真空振荡	大混合角	小混合角
	0.7-0.14	0.38-0.98	0.50-0.71	0.20-0.50

\* 表中: 种假说使用的通量是 BP95 太阳模型(1)预言的中微子通量.

表 4 各种模型计算的太阳中微子通量的比较<sup>\*</sup>

输入参量	ND	D	采用 BP95 的输入参量	ND
BP95	4.85	6.62		4.85
DS95	2.54	2.49		5.07

\* D 和 ND 分别代表考虑和不考虑扩散效应

为了令人信服地给出问题的最后结论, 仔细地检查地球上的中微子实验和太阳中微子模型计算的不确定性显得非常重要<sup>[6-9]</sup>. 例如, 对于太阳模型计算中对扩散效应的不同理论处理, Bahall-Pinsonneault (BP95) 和 Dar-Shaviv (DS95) 两种太阳模型得出的中微子通量相差 31%<sup>[10-11]</sup>. 又如, 对太阳和核物理输入量的不同选择可以导致最后计算结果相差 62%<sup>[12]</sup>. 这些结果详列于表 4 和表 5. 显然, 这些差别远远大于单一理论模型计算作者认为的误

差<sup>[13]</sup>, 见表 6. 因此, 除了大家公认的太阳中微子丢失问题, 看来还存在“太阳模型问题”. 在理论计算中对扩散效应的处理和天体以及核物理输入参量达成一致是非常必要的.

在这方面, 核物理理论和实验可以对解决太阳中微子问题做出重要贡献. 在太阳中微子通量模型计算中, 像诸如 ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$  反应<sup>[14]</sup>的误差, 如表 6 所列, 是太阳模型计算的中微子通量不确定性的重

表 5 在 BP95<sup>[1]</sup> 和 DS95<sup>[2]</sup> 中使用的核物理输入参量与最新测量和编评值的比较

	$S_{17}(0)^{+}/(\text{eV} \cdot \text{b})$	$S_{34}(0)^{+}/(\text{keV} \cdot \text{b})$	$S_{35}(0)^{+}/(\text{MeV} \cdot \text{b})$	$S_{11}(0)^{+}/(\text{keV} \cdot \text{b})$
DS95	17	0.51(2)	5.6	$4.67 \cdot 10^{-22}$
BP95	22.4	0.524	4.59	$3.896 \cdot 10^{-22}$
最新测量值			5.4(3) <sup>[7]</sup>	
最新编评值 <sup>[4]</sup>	19 <sup>[4]</sup>			$4.60(2) \cdot 10^{-22}$

\*  $S_{17}(0)^{+}$  的输入值取  $(22.4 \pm 2.4) \text{eV} \cdot \text{b}$ .

要来源, 精确的核物理实验无疑是十分重要的. 同时, 在比较中微子通量的理论计算和实验结果的过程中, 必须将中微子探测器的中微子吸收截面的误差考虑在内, 因此, 核物理实验对吸收截面的测量是对太阳中微子问题的另一贡献. 以下两个例子非常有说服力: <sup>37</sup>Cl 的  $\beta$  衰变数据被用于 Homestake 实验的探测器效率刻度; <sup>40</sup>Ti 的  $\beta$  衰变数据为计划

中的 ICARUS 实验使用的中微子探测器提供了效率刻度<sup>[9,10]</sup>. 核物理实验起的作用可以用以下公式表示出来:

理论预言的探测器反应率 = 中微子吸收截面 (核物理测量, 如 <sup>37</sup>Ca 或 <sup>40</sup>Ti  $\beta$  衰变)  $\times$  太阳中微子通量 (太阳模型 + 核物理测量, 如 <sup>7</sup>Be( $p, \gamma$ )<sup>8</sup>B 反应截面).

表 6 标准太阳模型中 <sup>8</sup>B 中微子通量、理论误差以及主要输入参量的分误差<sup>\*</sup>

通量/( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	p-p	<sup>3</sup> He- <sup>3</sup> He	<sup>3</sup> He- <sup>4</sup> He	$\mu$ - <sup>7</sup> Be	Z/X	$L_{\odot}$	$t_{\text{age}}$	透明度	扩散效应
$6.62 \cdot 10^6$ ( $1.00 \pm_{-0.11}^{+0.12}$ )	0.03	0.02	0.03	0.09	0.02	0.03	0.01	0.05	0.08

\* Z/X 为重元素和氢元素比,  $L_{\odot}$  为太阳亮度,  $t_{\text{age}}$  为太阳年龄<sup>[11]</sup>.

### 3 新型中微子探测器

近年来, 人们正致力于建立新一代的中微子探测器, 以进一步缩小中微子探测的误差<sup>[11]</sup>. 这些探测器不仅可以对单一中微子能量分支 (pp, pep, <sup>7</sup>Be 以及 <sup>8</sup>B) 进行测量, 而且可以测量中微子振荡. 通过以下途径可以对中微子振荡进行测量: (1) 测量的中微子能谱与太阳模型预言的差别 (Super Kamiokande 探测器); (2) 测量 <sup>7</sup>Be 中微子 (Borexino 探测器); (3) 各种中微子通量的同时探测 (SNO 探测器); (4) MSW 理论预言的日夜中微子

通量差别以及 VO 理论预言的不同季节中微子通量的差别 (Super-Kamiokande 探测器); (5) 电子中微子与其它中微子的比例 (ICARUS 探测器).

这些探测器的详细指标总结于表 7. 表 8 列举了另一类测量中微子振荡的实验即所谓的长基线实验, 此类实验通过高能加速器产生  $\mu$  中微子, 经过较长的传输管道后送到中微子探测器. 由于这些探测器通常只对电子中微子灵敏, 因而是测量中微子振荡的另一个有效的方法. 值得一提的是, 此类实验之一的日本 KEK 实验室的 K2K 合作组的实验已于 1999 年初开始, 截至到今年已发表了初步的

表 7 计划中的太阳中微子实验

实验组	探测反应	探测下阈/MeV	中微子能组	探测介质	测量手段	计数率/d	启用日期
SNO	$\nu_e d \rightarrow ppe$	5.0	<sup>8</sup> B	1 kt D <sub>2</sub> O	$\nu$ -d 散射	20	1999
	$\nu_e d \rightarrow \nu pn$					7	
GNU	$\nu_e \text{Na} \rightarrow \text{Ge}^+ e^-$	0.237	pp, <sup>7</sup> Be...	30-100 t Ga	放射化学	1	1999
BOREXINO	$\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$	0.25	<sup>7</sup> Be	100 t 液体闪烁体	$\nu$ -e 散射	55	1999
ICARUS	$\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$	5.0	<sup>8</sup> B	600 t 液态 Ar	$\nu$ 吸收, TPC	0.6	1999
	$\nu_e \text{Ar} \rightarrow \text{K}^+ e^-$					4	
Iodine	$\nu_e \text{I} \rightarrow \text{Xe}^+ e^-$	0.789	<sup>7</sup> Be, <sup>8</sup> B...	100 t iodine	放射化学		1999
HELLAZ	$\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$		pp, <sup>7</sup> Be	气态 He	$\nu$ -e 散射, TPC		待定
HERON	$\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$		pp, <sup>7</sup> Be	液态 He	$\nu$ -e 散射		待定