

太阳中微子

——李业祥——

1931年,在美国加州理工学院的一次演讲会上就提出必须有中微子参与弱相互作用,才能解释放射性 β 衰变.但因受实验条件的限制,中微子的假说长期没有得到实验证明.直到1953年,洛斯阿拉莫斯科学实验室雷尼斯等人首次利用 $\nu_e + p \rightarrow e^- + n$ 反应,精确地测量了反应堆中微子与质子的相互作用截面,才无可置疑的从实验上直接证明了中微子的存在.1955年,布鲁克海文国家实验室戴维斯等人通过测量反应堆中微子与 ^{37}Cl 的相互作用截面,证明了中微子确实有正、反粒子之别.这样,中微子实验研究的序幕终于拉开了.此后,在开展反应堆中微子实验研究的同时,也展开了太阳中微子的实验研究.

太阳中微子的实验研究,其意义不仅仅在于它能为核物理学中弱相互作用理论和中微子自身的某些属性提供实验资料,而且还在于它为研究太阳内部提供了难得的机会.人们在过去得到的有关太阳的知识是来自太阳表面发出的光子,光子在太阳内部的平均自由程很小(不到1厘米).而中微子与物质的相互作用极弱,所以它在物质中的平均自由程很大,例如在普通物质中约为 10^6 公里.可见,太阳中微子完全可以畅通无阻地从太阳的中心区域跑出来,而且只需要花8分22秒3就能抵达地球.人们通过对太阳中微子通量和能谱的精确测量,就能得到有关太阳内部能量产生过程的某些参数,比如温度范围,离子密度,化学成份等等.

一、太阳中微子源

太阳中微子源是与太阳能量的产生过程紧密相关的.人们通过对太阳的观测,已经了解到太阳是一个直径为 1.392×10^6 公里的巨大的原始均匀的光球,其表面温度为 5500°C ,而中心温度大约为摄氏1300万度.在太阳的中心区域,高温使物质(主要是氢)完全离解为等离子体状态.强大的引力场把这些等离子体紧紧地束缚在一起.高温的膨胀作用与引力的聚缩

作用使太阳处于流体的静力学平衡状态.按照这样的模式,太阳的中心区域便成了发生热核反应的理想场所.那么,在太阳这座核熔炉中,到底进行着哪些核反应呢?早在三十年代末,奥地利物理学家威扎克和美国物理学家贝蒂、克里奇菲尔德等人就开始对这个问题进行了研究,先后提出太阳之所以经久不灭地发出巨大能量,是因为在太阳的中心区域存在着两个热核反应序列,它们分别被称为质子-质子反应链和碳-氮-氧反应链.就是这两个核反应链在释放出巨大能量(每完成一个核反应链各放出 26.7MeV)的同时,也制造出大量的中微子.

表1 太阳中微子源

核反应	中微子能量 (MeV)	标准模型 通量 10^{10} . (cm^{-2}) \cdot 秒 $^{-1}$	^{37}Cl 的吸收 截面 (cm^2)	^{37}Cl 的 俘获率 太阳中 微子单 位
$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	0—0.4	6.1	0	0
$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	1.4	0.015	1.7×10^{-45}	0.23
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	0.86(90%) 0.34(10%)	0.43	2.9×10^{-46}	1.02
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	0—14	0.00056	1.35×10^{-42}	6.05
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	0—1.2	0.05	2.1×10^{-46}	0.08
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	0—1.7	0.4	7.8×10^{-46}	0.26
			合计	7.6

表1列出了在两个核反应链中产生中微子的核反应及有关数据.表中前四个核反应属于质子-质子反应链,它们对应着四组中微子,后两个则属于碳-氮-氧反应链,对应着两组中微子.按照有关的理论,太阳里

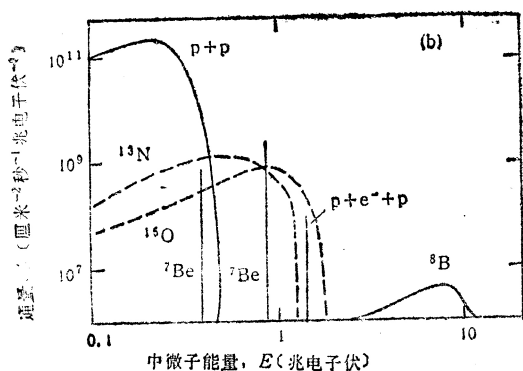


图1 太阳中微子的能谱

的核反应序列主要是质子-质子反应链。

图1给出了太阳中微子的能谱。从图中可以看出，除 ${}^7\text{Be}$ 中微子和 PeP 中微子是单能的分离谱外，其余四组中微子均为能区各异的连续谱。此外， PP 中微子与 PeP 中微子的分支比为400:1，这一特点在太阳中微子的实验测量中是很有用的。

二、 ${}^{37}\text{Cl}$ 的太阳中微子实验与“太阳中微子失踪案”

关于 ${}^{37}\text{Cl}$ 的太阳中微子实验，还得追溯到四十年代。1946年，意大利物理学家蓬蒂科尔沃提出了一种测量中微子的方法，他指出： ${}^{37}\text{Cl}$ 可以通过弱作用吸收一个高能中微子，经发射一个电子后衰变成 ${}^{37}\text{Ar}$ ，即可以发生 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 核反应，若探测到 ${}^{37}\text{Ar}$ ，就可以找到这个核反应。1948年，加利福尼亚大学阿尔瓦雷斯也独立地发现了这一方法并于1949年提出了一个测量太阳中微子俘获率的实验方案（太阳中微子俘获率=反应截面 \times 中微子通量，一个太阳中微子单位的俘获率= 10^{-36} 个太阳中微子吸收/靶原子 \cdot 秒）。戴维斯等人根据阿尔瓦雷斯的方案，于五十年代末着手于太阳中微子俘获率的实验测量。为了减少宇宙射线本底，他们把实验场地选在南达科他州利德的霍姆斯塔克金矿大约1500米深的矿井中。实验的主要装置——太阳中微子探测器是一个巨大的钢制容器，容器内装满了400,000立升的纯净过氯乙烯溶液，它相当于含有 2.2×10^{30} 个过氯乙烯分子，氯的天然丰度决定了每一个过氯乙烯分子中的四个氯原子有一个是 ${}^{37}\text{Cl}$ 。由于 ${}^{37}\text{Cl}$ 俘获中微子的反应有0.81 MeV的阈值，所以 ${}^{37}\text{Cl}$ 的太阳中微子实验探测到的主要是 ${}^8\text{B}$ 中微子。

${}^{37}\text{Cl}$ 俘获中微子后产生的 ${}^{37}\text{Ar}$ 是不稳定的，半衰期只有35天，当过氯乙烯探测器在太阳中微子场中放置一段时间（大约五十天）以后，溶液中生成的 ${}^{37}\text{Ar}$ 的数目就会达到平衡。理论上估计，在戴维斯的探测器中，平衡后 ${}^{37}\text{Ar}$ 原子的数目大约为50个。用什么方法把 ${}^{37}\text{Ar}$ 原子从众多的过氯乙烯分子中找出来呢？戴维斯的方法是把氦（ ${}^4\text{He}$ ）压入过氯乙烯溶液中，让它把

${}^{37}\text{Ar}$ 冲出来，不过，冲出来的 ${}^{37}\text{Ar}$ 还混在少量的过氯乙烯中，他再把含 ${}^{37}\text{Ar}$ 原子的过氯乙烯通过一个用液氮冷却的木炭吸附器把 ${}^{37}\text{Ar}$ 冻结下来，然后把它放入一个小型正比计数器中（长2.5cm，内径0.4cm）。由于 ${}^{37}\text{Ar}$ 要经过俄歇效应衰变成 ${}^{37}\text{Cl}$ ，戴维斯的正比计数器就能把每一个俄歇电子引起的电离记录下来，从而把 ${}^{37}\text{Ar}$ 原子一个一个地数出来。

从1964年以来，戴维斯等人一共进行了四十九次观测，每一次找到的 ${}^{37}\text{Ar}$ 原子的数目都没有超过10个，曾从 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 过程中测到 (2.1 ± 0.3) 太阳中微子单位。这只是太阳标准模型理论预言的1/3（太阳模型理论预言应有 (5.8 ± 2.2) 太阳中微子单位），还有2/3的中微子到哪里去了，人们为此困扰，因为实验技术十分完善，太阳模型理论的成功又无可置疑，这就产生了太阳中微子失踪案。

三、关于太阳中微子失踪的种种猜测

太阳中微子的失踪引起了物理学界和天文学界的极大关注，二十年来对其解释众说纷纭，曾经有过以下几种解释：

1. 太阳的中心温度可能低于标准模型给出的温度值，而 ${}^7\text{Be}$ 中微子和 ${}^8\text{B}$ 中微子的产生对温度十分敏感，只要太阳的温度比我们所预计的值低10%， ${}^7\text{Be}$ 中微子和 ${}^8\text{B}$ 中微子的产生率就会降低到足以解释 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验的结果。

2. 中微子可能有很小的磁矩，在它穿离太阳时，因受电磁相互作用损失了一部分能量，因而 ${}^{37}\text{Cl}$ 对它不起作用。

3. 中微子可能会发生“老化”作用，在传播途中按指数规律损失能量，从而降低了 ${}^{37}\text{Cl}$ 对它的吸收截面。

4. 可能有自由夸克存在，自由夸克会对 PP 反应起某种催化作用，从而减少了 ${}^7\text{Be}$ 中微子和 ${}^8\text{B}$ 中微子的通量。

5. 福勒教授认为，太阳的能量产生过程是按周期进行的。他说：如果太阳内部突然变得非常混乱，而新的氢燃料被卷入到燃料已经用完了的中心区域去，于是核燃料就会燃烧得更加旺盛，此后，中心区域将发生膨胀而冷却，这种冷却是很显著的，以致使核反应停止下来，这时太阳的亮度也会降低，经过一段很长的时间，太阳的中心将发生收缩，重新点燃核反应，使太阳恢复到原来的亮度，亮度的降低和复原大约需要1000万年的时间，而能量从太阳中心传到太阳表面也需要这样长的时间，在这一期间的大部分时间内，太阳发出的中微子应该比按标准模型理论计算的少得多。

6. 甚至还有人提出可能在太阳中心有一个黑洞，当黑洞俘获周围的物质而增加质量的时候，它就要辐射出能量。持这种观点的人认为，太阳以这种方式产生的能量超过了目前观测到的太阳亮度一半以上。

7. 苏联米克赫耶夫和斯米尔诺夫最近提出了解

表 2 十种物质对太阳中微子的俘获率

名称	反应阈值 (MeV)	PP	PeP	${}^7\text{Be}$	${}^8\text{B}$	${}^{13}\text{N}$	${}^{15}\text{O}$	总俘获率 太阳中微子 单位
${}^2\text{H}$	1.442	0	0	0	6.7	0	0	6.7
${}^7\text{Li}$	0.862	0	9.7	4.1	20.7	2.1	9.7	46.3
${}^{37}\text{Cl}$	0.814	0	0.23	1.02	6.05	0.08	0.26	7.6
${}^{51}\text{V}$	0.751	0	0.17	0.76	~3	0.04	0.09	4
${}^{55}\text{Mn}$	0.231	1.7	0.06	0.59	~2	0.04	0.05	4
${}^{71}\text{Ga}$	0.236	67.2	2.4	28.5	1.7	2.7	3.8	106
${}^{81}\text{Br}$	0.459	0	1.2	10.6	2.2	1.0	1.6	16.6
${}^{87}\text{Rb}$	0.115	140	2.7	27.5	~1	1.8	2.0	175
${}^{115}\text{In}$	0.120	532	9.6	125	5.0	12.5	16	700
${}^{203}\text{Tl}$	0.062	439	5.1	61	~1	4.2	4.1	510

决太阳中微子失踪问题的机制时指出: 太阳的电子型中微子 ν_e , 由于与太阳物质相互作用有可能转化成 μ 型中微子 ν_μ , 从而使得实验上观测到的中微子变少了. 根据这一机制和太阳的标准模型, Bethe 等人假定中微子的质量不精确地等于零 (实验测量中微子质量上限比 10^{-6}eV 大得多), 利用弱电统一模型理论计算结果表明, 只有 $E < E_0$ (临界能量) 的中微子 ν_e 才能被实验所观测到, 而 $E > E_0$ 的中微子 ν_e 因与太阳中物质作用转化为 μ 型中微子而观测不到.

8. 中微子混合角在太阳中共振放大的假说受到基本粒子学界的普遍重视, 因为它不仅能消除太阳中微子实验和中微子振荡实验结果的矛盾, 也为寻找标准模型以外的粒子物理现象增添了信心. 但到目前为止, 这一学说仍是科学的假说, 并未得到证实, 因为 ${}^{37}\text{Cl}$ 中微子观测结果也可以由一些非标准太阳模型加以解释, 加上 ${}^{37}\text{Cl}$ 探测器的阈能太高 (0.81MeV), 只能记录到相当于太阳中微子流强的 10^{-4} , 所以不少人对太阳中微子是否丢失还存怀疑. 所以更重要的, 是要有新的太阳中微子实验, 目前人们期待的是 ${}^{71}\text{Ga}$ 太阳中微子是否真因为共振振荡而丢了.

四、太阳中微子的新实验

如何正确解释 ${}^{37}\text{Cl}$ 的实验结果? 是天体演化理论错了呢, 还是对基本粒子的知识不完善? 二者必居其一, 它必须靠新的实验来裁决. 太阳中微子实验, 首先必须考虑用什么材料来做靶, 只有那些对太阳中微子的吸收截面能够精确知道的物质才有资格被选用. 表 2 给出了十种物质对太阳中微子的俘获率. 它们吸收中微子的阈值是各不相同的, 因而分别对太阳中微子的不同分支最灵敏. 由于靶物质对太阳中微子的吸收截面甚小 (约 10^{-44} — 10^{-46}), 做成一个太阳中微子探测器需要数以吨计的靶物质, 因此, 靶物质的来源和价格也必须考虑. 综合各种因素, 巴考尔等人认为, 能够选为太阳中微子新实验的靶物质是 ${}^{71}\text{Ga}$ 、 ${}^{115}\text{In}$ 和 ${}^7\text{Li}$. ${}^{71}\text{Ga}$ 的实验是一个相当重要的实验, 因为 ${}^{71}\text{Ga}$

俘获太阳中微子的阈能很低, 可以用来探测 PP 中微子, PP 中微子是太阳中微子的主要成分, 而且与天文学不确定因素无关. ${}^{71}\text{Ga}$ 是一种昂贵的半导体材料, 通常用来做发光二极管. 做成每天俘获一个太阳中微子的探测器, 差不多需要 50 吨 ${}^{71}\text{Ga}$. 由于生成的 ${}^{71}\text{Ge}$ 的半衰期是 11.8 天, 所以, 在每天俘获一个太阳中微子的探测器中, 最多只能有 17 个 ${}^{71}\text{Ge}$ 原子. 在实验中, 一般采用金属靶或 GaCl_3 靶. 若用金属靶, 须经过盐酸处理把 ${}^{71}\text{Ge}$ 转变成 GeCl_4 , 再用冲氦的方法把 GeCl_4 分离出来, 分离出来的 GeCl_4 与强碱作用可生成 GeH_4 , 将获得的 GeH_4 放入正比计数器中, 采用脉冲形状甄别技术, 就能测出 ${}^{71}\text{Ge}$ 原子的数目. 若采用 GaCl_3 靶, 则可在 60°C 的条件下直接冲氦.

${}^{115}\text{In}$ 的实验也是必要的. ${}^{115}\text{In}$ 不仅对 PP 中微子有相当大的俘获率, 而且对 PP 中微子、 ${}^7\text{Be}$ 中微子的俘获率有一确定的比例. ${}^{115}\text{In}$ 俘获太阳中微子后的终态核 ${}^{115}\text{Sn}$ 的半衰期只有 3.26 微秒, 可以采用 ${}^{115}\text{Sn}$ 的两条退激 γ (能量分别为 116keV 和 498keV) 与电子之间的三重符合来探测, 这就要求研制出一种适当的 ${}^{115}\text{In}$ 闪烁体. ${}^7\text{Li}$ 对 PeP、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^{15}\text{O}$ 四组中微子的俘获率有一确定的比例关系, 它的实验能为太阳中微子提供附加信息. 综合 ${}^{37}\text{Cl}$ 、 ${}^{71}\text{Ga}$ 、 ${}^{115}\text{In}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的实验结果, 就可以把太阳中微子的各个分支定量地确定出来. 英国的布西等人正在进行 ${}^{115}\text{In}$ 实验的有关准备工作. 在美国, 一个由布鲁克海文国家实验室、普朗克研究所、威兹曼研究所和普林斯顿高级研究所组成的协作组正在紧张地进行 ${}^{71}\text{Ga}$ 的太阳中微子实验.

人类在探索中不断地丰富知识宝库. 可以满怀信心地说: 科学家们的辛勤劳动一定会揭开太阳中微子“失踪”之谜.