

# 太阳中微子及超新星中微子探测\*

## ——2002 年诺贝尔物理学奖成果评述

顾 以 藩

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)  
(北京大学物理学院 北京 100871)

**摘 要** 文章回顾了中微子天文学的诞生过程,着重介绍了2002年诺贝尔物理学奖获得者雷蒙特·戴维斯和小柴昌俊在观测太阳及超新星中微子方面的开创性贡献,扼要描述了这个领域的发展现状及前景,并简单探讨了历史给予人们的几点启发.

**关键词** 中微子天文学,放射化学实验,水切连科夫技术,太阳中微子问题,SN1987A,超新星

### DETECTION OF SOLAR AND SUPERNOVA NEUTRINOS ——THE 2002 NOBEL PRIZE FOR PHYSICS

GU Yi-Fan

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)  
(*School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract** We review the birth of neutrino astronomy, with special emphasis on the pioneering contributions to the detection of solar and supernova neutrinos of the 2002 Nobel Prize winners, Raymond Davis Jr and Masatoshi Koshiha. We describe briefly the recent developments in this rapidly growing field as well as the prospects for the near future, and conclude with a few thoughts that come from reflecting over the history.

**Key words** neutrino astronomy, radiochemical experiment, water Cherenkov technique, solar neutrino problem, supernovae SN1987A

## 1 引言

20世纪天文学的巨大进展在很大程度上归因于我们观察宇宙的视野得到空前拓展:从可见光的狭窄范围延伸到了电磁波的更短波段与更长波段.出现了天文学的许多分支领域,包括射电天文学、红外天文学、紫外(及远紫外)天文学、X射线天文学和 $\gamma$ 射线天文学等.这些新领域的兴起,导致了诸如类星体、脉冲星以及X射线源等一系列崭新宇宙现象的发现.

当然,人类观察宇宙视野的拓展并不止于全波段电磁辐射天文学的建立.物理学和宇宙学的研究

表明,从浩瀚太空来到地球表面的除了电磁波外还有各种微观粒子,它们各自以不同方式为我们带来丰富的天文信息.从20世纪60年代到80年代,太阳中微子与超新星中微子的成功探测,标志着中微子天文学的诞生,由此揭开了当代天文学的新篇章.

2002年的诺贝尔物理学奖授予在天体物理学方面作出重大贡献的三位科学家,他们是:美国宾夕法尼亚大学退休教授雷蒙特·戴维斯(Raymond Davis Jr)、日本东京大学退休教授小柴昌俊(英文译名为Masatoshi Koshiha)和美国联合大学公司董事李嘉图·贾科尼(Riccardo Giacconi).戴维斯和小柴

\* 2002-12-03收到

昌俊以他们“在天体物理方面具体地在宇宙中微子探测方面的开创性贡献”分别得到四分之一的奖金,贾科尼则以“在导致了一系列宇宙 X 射线源的发现的天体物理方面的开创性贡献”得到另外一半奖金<sup>[1]</sup>。本文回顾中微子天文学的诞生过程,着重介绍戴维斯和小柴昌俊的贡献,扼要展望这门学科的发展前景,并简单探讨历史给予我们的若干启发(关于 X 射线天文学以及贾科尼的有关情况将有另文介绍)。

## 2 戴维斯的放射化学实验

### 2.1 在反应堆上的初步测量

中微子是一种颇具传奇色彩的基本粒子。它是 1930 年泡利(Pauli)为了解决当时原子核物理研究中的一个疑难——原子核  $\beta$  衰变的连续电子能谱而“发明”的。根据泡利的假设,中微子是一种看来永远无法观测的粒子:没有内部结构,质量极小,不带电荷,与物质几乎不起作用。1934 年,贝特(Bethe)和派尔斯(Peierls)做了一个估算,给出这种粒子的核俘获截面小到只有  $10^{-44}\text{cm}^2$ 。因此,在很长一段时间里,人们对于探测自由状态下的中微子抱着消极、悲观的态度。只是在经过了四分之一世纪之后,才于 1955 年由 Reines 和 Cowan 在原子核反应堆上实现了中微子的“直接观察”(1995 年 Reines 获得诺贝尔物理学奖,而 Cowan 已经作古)<sup>[2]</sup>。

反应堆是那时知道的惟一可用的实验室强中微子源。差不多和 Reines 与 Cowan 的实验同时,戴维斯也开始在反应堆上从事中微子实验研究。戴维斯在耶鲁大学获得化学博士学位,作为 Brookhaven 国家实验室化学部的研究人员,却有志投身于物理学的前沿研究。他根据 Pontecorvo 和 Alvarez 早些时候的建议<sup>[3]</sup>,尝试应用反应  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$  来探测中微子。这个反应的阈能为 0.86 MeV,而产生的  ${}^{37}\text{Ar}$  是以 35 天的半衰期通过电子俘获而衰变。实验中使用一个盛满 1000ga(约合 3800L)  $\text{CCl}_4$  的容器作靶,通入形成气泡的氦,以便带走为数不多的氩原子。这个气体再经过一个充有液氮( $-196^\circ\text{C}$ )的炭阱,这时氦能通过,而氩被吸收。从氩中分离出来的放射性氩衰变生成俄歇电子,由正比计数管记录下来。这里采用的是典型的放射化学方法。实验展示了中微子和反中微子性质上的区别,还首次测定了裂变反中微子的截面上限和来自太阳的高能中微子通量上限<sup>[4]</sup>。在 1955 年发表的论文中,戴维斯第一次考虑

了探测太阳中微子的可能性<sup>[4]</sup>。

### 2.2 太阳中微子观测

天体物理学家开始认识到氢的燃烧是太阳的能量来源是 1920 年的事。20 世纪 30 年代末,贝特等人循着这个思路发展了太阳与恒星内部的核反应理论(1967 年,贝特因此获得诺贝尔物理学奖)。太阳中接连发生的原子核聚变过程,其集合效应可以表为  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ ,正电子  $e^+$  随即与电子相遇而湮没。人们由此认识到,太阳在释放出巨大能量的同时,发射出带有一定能量的中微子。观测来自太阳的中微子,可以验证贝特等人提出的理论。

但是在 20 世纪 50 年代末之前,探测太阳中微子的想法在大部分人看来是一个难以实现的梦想:考虑到太阳中微子的主要产生过程是  $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ (称 p-p 链),其最大中微子能量为 0.4 MeV,大大低于  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$  的反应阈值,因此戴维斯的测量方法是不可行的。

1958 年初的一项实验结果使太阳中微子的探测成为严肃的话题。测量核反应  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$  得到的  ${}^7\text{Be}$  产生截面比预期的高出了 1000 倍之多<sup>[5]</sup>。这个结果的重要意义立即被 Fowler 和 Cameron 注意到了。他们在写给戴维斯的信中指出:按照贝特的理论思路,太阳内部核聚变如果产生  ${}^7\text{Be}$ ,就可能接着发生  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$  的过程,而  ${}^8\text{B}$  的  $\beta$  衰变给出中微子能量最高可以达到 14 MeV,比戴维斯所用的氯的反应阈值高出很多。他们还相信  ${}^7\text{Be}$  俘获质子的截面是大的。因此两人认为采用戴维斯的 Cl-Ar 法来测量太阳的  ${}^8\text{B}$  中微子是可行的<sup>[6]</sup>。

1962 年,戴维斯和当时在印第安纳大学的理论工作者 Bahcall 建立了联系,并从此开始了两人之间的长期合作<sup>[7]</sup>。Bahcall 在 1963 年完成的一项计算使得太阳中微子实验变得更加现实可行。在估算  ${}^8\text{B}$  中微子在 Cl 上的俘获率时,由于考虑了从  ${}^{37}\text{Cl}$  基态到  ${}^{37}\text{Ar}$  激发态的跃迁,主要是从  ${}^{37}\text{Cl}$  的基态超允许跃迁到  ${}^{37}\text{Ar}$  的位于大约 5 MeV 激发能量的同位旋相似态,得出的结果增大了 20 倍<sup>[7]</sup>。1964 年,根据 Bahcall 给出的  ${}^{37}\text{Cl}$  实验的预期率  $40 \pm 20 \text{ SNU}$ (1 SNU 为 1 个太阳中微子单位,定义为每秒每  $10^{36}$  个靶原子俘获 1 次)戴维斯和 Bahcall 分别从实验和理论两个方面提出和论证了新的太阳中微子实验方案<sup>[8]</sup>。新方案沿用戴维斯的 Cl-Ar 放射化学方法,在规模上则大了 100 倍。

同年,方案获得 Brookhaven 实验室的批准。研究经费包括在矿下挖洞、建造容器以及购买  $\text{C}_2\text{Cl}_4$

液体,合计 60 万美元(按照戴维斯的风趣说法,相当于 10 分钟的商业电视费用)。实验装置安放在位于 South Dakota 州地下 1500m(相当于 4200m 等效水深)的 Homestake 金矿中,其主要部分是一个盛有  $10^5 \text{ ga}$ (约合  $3.8 \times 10^5 \text{ L}$ )  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ (一种常用的干洗剂)的容器(见图 1)。建立实验条件花了两年时间,到 1967 年开始采集数据。关键的实验操作是大约每两个月一次(约为  $^{37}\text{Ar}$  半衰期的 2 倍)用氦将氩提取出来。每次要从容器中的  $2 \times 10^{30}$  个氩原子中平均仅仅提取出 17 个氩原子,这确实是一项实验挑战,而戴维斯他们做到了。基于取数 150 天的首批测量结果发表于 1968 年,给出太阳中微子流量上限为  $3\text{SNU}^{[9]}$ 。稍后,Bahcall 等发表的论文给出修订的计算结果则为  $(7.5 \pm 3)\text{SNU}$ 。测得的太阳中微子流量明显地低于理论计算值,这就出现了“太阳中微子问题”。

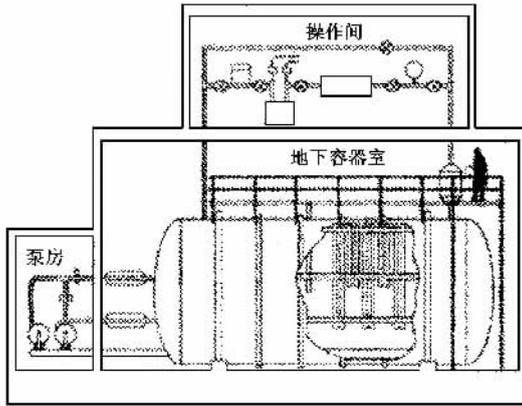


图 1 戴维斯的放射化学实验示意图

面对实验与理论之间的冲突,引出了各种各样的猜想。消息传到苏联,Gribov 和 Pontecorvo 在 1969 年的一篇论文<sup>[10]</sup>中指出,太阳中微子问题表明中微子可能具有一种新的性质。在基本粒子标准模型中,中微子原被假设为无质量的。如果中微子具有质量,则实际观察到的味道态——电子型中微子、 $\mu$ 子型中微子以及  $\tau$ 子型中微子可以是质量本征态的线性组合。这样,中微子就可能在不同的味道态之间振荡,从而导致自太阳发出的电子型中微子至 Homestake 矿地下探测器的漫长路程中消失了。但是,这个以后成为粒子物理界共识的解释在当时却几乎没有人相信。许多粒子物理学者根本不认为天体物理学家能够真正了解太阳内部的情况。

看来实验和理论两方面都需要继续努力来减小不确定性。限制戴维斯实验灵敏度的一个关键因素是本底问题。1968 年,在加州理工学院游泳池边的

一次交谈之间,Garmire 向戴维斯介绍了 X 射线天体实验中的经验,建议通过测量正比计数管脉冲上升时间来达到压低本底的目的<sup>[11]</sup>。来自  $^{37}\text{Ar}$  核的电子俘获衰变的俄歇电子具有 2.82keV 的总能量,其在正比计数管气体中的射程仅为 0.1mm 左右,是一个比计数管的 3—5mm 的直径要小的距离。因此,俄歇电子的上升时间和本底脉冲(来自定位不好的粒子)上升时间相比要短。戴维斯求助于 Brookhaven 实验室的电子学专家实现了这项建议<sup>[12]</sup>。这项重大改进的实施使本底计数率从每月 10 个降到了 1 个以下的水平。

戴维斯他们还十分细致地研究了氩的提取效率,因为这在很大程度上决定着实验结果的可靠性。向容器有规律地引入已知数量的  $^{36}\text{Ar}$ ,测得的提取效率为 95%;放射性  $^{37}\text{Ar}$  是在容器中产生的,测得的提取效率也高,氩原子结合成为分子状态会使提取变得困难,经过检验确认这种过程是很小的<sup>[13]</sup>。来自宇宙线的  $^{37}\text{Ar}$  的总本底估计为每天  $0.047 \pm 0.013$  个原子<sup>[13]</sup>;来自岩石的中子所导致的本底估计为每天  $0.03 \pm 0.03$  个原子;容器壁上的  $\alpha$  粒子对本底的贡献每天不大于 0.017 个原子;在大气中产生的中微子根据计算给出每天 0.0004 个本底。

从 1970 年起,戴维斯的实验重新开始,差不多不间断地运行到了 1994 年。1998 年发表了最终的结果<sup>[14]</sup>(见图 2)。在这期间,估计在容器中一共生成了 2200 个氩原子,其中 1997 个被提取了出来,875 个为正比计数管所记录。在 875 个计数中,766 个估计为太阳中微子事例,而 109 个则来自各种本底过程。因此,在容器中的  $^{37}\text{Ar}$  的产生率为每天  $0.48 \pm 0.03 \pm 0.03$  个(第二项为统计误差,第三项为系统误差,下同),相应于  $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$ 。戴维斯通过成功地掌握从  $10^{30}$  个原子中提取出少数原子的技术,开创了中微子物理的崭新领域。

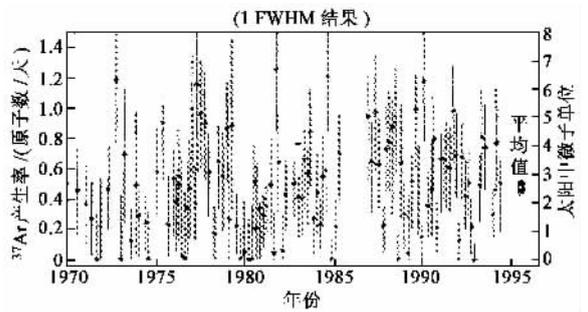


图 2 戴维斯 Cl 实验 1970—1994 年测量结果

与此同时,在经过 30 多年建立与完善标准太阳

模型的努力之后,太阳中微子产生率的细致计算也有了显著改进,不确定性进一步减小<sup>[7]</sup>。特别是1995年的日震测量以很高的精确度符合标准太阳模型的预言,从根本上改变了人们对理论计算的怀疑态度<sup>[7]</sup>。Bahcall 给出氯实验的最新理论预期值 8.6 SNU,误差估计为 1.2 SNU<sup>[15]</sup>。值得指出的是,无论实验观察的还是理论计算,新的结果和1968年以来发表的结果始终没有太大区别,观察到的太阳中微子流量始终小于理论计算值(见图3)。

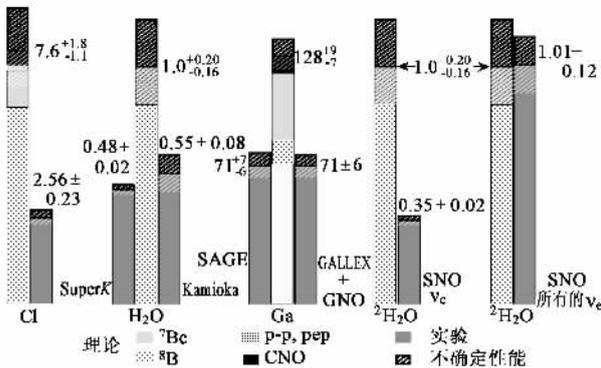


图3 太阳中微子总产生率 标准太阳模型预言(图中所用数值为Bahcall-Pinsonneaut2000年计算结果)与戴维斯Cl实验等多家实验结果的比较

戴维斯首先观测到了太阳中微子,又进一步发现了太阳中微子问题。为了确证中微子振荡的假设,目前许多实验正在世界范围内开展或在计划进行中。

### 3 小柴昌俊的水切连科夫实验

#### 3.1 太阳中微子观测

小柴昌俊是在20世纪80年代初开始从事质子衰变(例如 $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ )实验研究的。按照最小的SU(5)大统一理论,质子寿命预期可能达到 $10^{31}$ 年。因此,需要用大容积的实验装置,并且也要将实验装置安放在地下以便减小本底。小柴昌俊创建的神冈核子衰变实验(英文名为Kamioka Nucleon Decay Experiment,缩写为Kamiokande)应用一个盛有2140t水的容器作为探测装置,安放在神冈町的一个地下1000m(相当于2700m等效水深)处的矿井中。质子衰变释放的能量是相当高的,大约有940MeV,由大约1000只光电倍增管组成的探测装置测量衰变粒子在水中引发的切连科夫光。实验没有见到质子衰变的证据,测定了各特定衰变道的质子寿命下限<sup>[16]</sup>。

戴维斯实验以及太阳中微子问题吸引了小柴昌俊的兴趣。他考虑将这套纯水切连科夫技术应用到太阳中微子探测上来。这就需要降低探测系统的能阈,以便适合于太阳中微子的能量。于是他推动了大直径高灵敏的光电倍增管的研制。在他最初的中微子实验中,用了约1100只50cm直径的大光电倍增管围绕在水容器周围,能阈为30MeV左右。在采用水切连科夫技术探测宇宙中微子方面,小柴昌俊是公认的先行者。

为了进一步减低能阈以探测与中微子发生散射的电子,采取了一系列减低本底的措施,其中包括通过纯化水减低放射性本底达1000倍,采用反符合屏蔽甄别本底以及安装新的电子学线路等。改进的探测器称做Kamiokande II,于1986年准备就绪。此时探测器的能阈降至8MeV,而相应的效率为50%。和戴维斯实验相比,Kamiokande II只能探测<sup>8</sup>B衰变的中微子,而戴维斯实验也对低能的太阳中微子例如来自pep链(反应过程 $p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu$ )的中微子灵敏。但是,Kamiokande II实验的长处是实时运行,并能确定入射中微子的方向。

Kamiokande II实验借助于其方向灵敏度给出了太阳发射中微子的最终证据;同时也确认了戴维斯所得到的中微子通量低于太阳模型计算值的结果。观察到的与计算出来的中微子流量之比为 $0.46 \pm 0.13 \pm 0.08$ ,进一步支持了中微子振荡的可能性<sup>[17-19]</sup>。有趣的是,大气产生的中微子原来被当成是地外中微子的本底,实际上它们却成为新物理的一个外加线索。简单的计算给出:在大气中产生中微子的衰变过程( $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$  随之以 $\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu + e^-$ )中, $\mu$ 子型中微子与电子型中微子的比值为2。更加细致的计算只稍稍增加这个比值。Kamiokande II的观察结果是: $\mu$ 子型中微子与电子型中微子之比只有计算值的 $(46 \pm 12)\%$ <sup>[18]</sup>。这表明其中一种类型的中微子在到达探测器之前就消失了。这再一次提供了新物理的信号。

#### 3.2 1987A超新星中微子观测

按照恒星演化理论,一个大质量恒星临死之前是很不平静的。当核燃烧终止而其核心超出钱德拉塞卡质量约1.3倍时,就会出现引力坍缩,发生超新星爆发。这样一颗恒星的寿命稍大于 $3 \times 10^7$ 年,它在“秒”的时间尺度上变得不稳定,在“小时”到“天”的时间尺度上解体,在“月”到“年”的时间尺度上照亮宇宙,而以融入其周围星际气体层并辐射各种电磁波达万年之久而告终结。在超新星爆发过

程中,大量中微子通过反应  $e^- + p \rightarrow n + \nu$  在 20s 的时间内产生出来,其所携带的总能量比太阳在 45 亿年内发射的能量还要大 1000 倍,中微子的平均能量约为 10—20MeV.

在银河系内,此类蔚为壮观的事件大体上每隔 50 年出现一次.肉眼看到的超新星经我国史书记载在案的有过 4 次,先后发生于 1006、1054、1572 及 1604 年.其中最著名的是 1054 年即宋朝至和元年的“天关客星”.1572 与 1604 年的超新星爆发在欧洲也看到了,被分别命名为第谷超新星和开普勒超新星.

1987 年 2 月 23 日,南半球天文台的光学观测发现了  $17 \times 10^4$  l. y. (光年) 远处大麦哲伦星云 (LMC) 中的超新星 1987A. 消息传到日本, Kamiokande II 的研究人员查看了数据记录,发现了光学观测前 3 个小时记录下来的 SN1987A 爆发产生的中微子事例:在通过实验装置的数以  $10^{16}$  计的中微子中,一共探测到了 12 个事例(其中一个被认为是本底)<sup>[20]</sup>(见图 4). 随后,另外一个在美国的地下实验装置 IMB 探测器证实了 Kamiokande II 的观测,它在同一时间内记录到了 8 个瞬时中微子事例<sup>[21]</sup>.

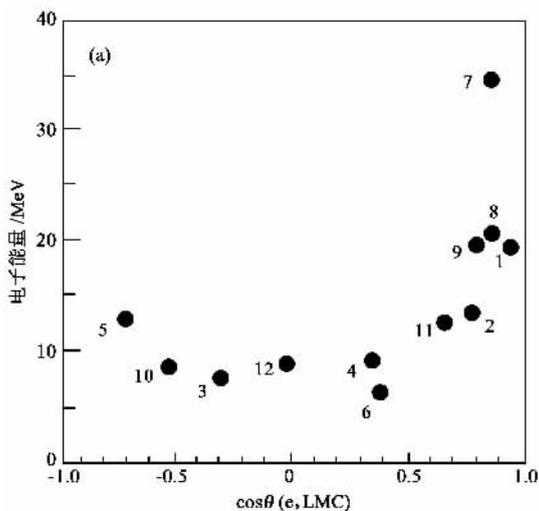


图 4 超新星 SN1987A 中微子产生的散射电子事例的散点图 [ 纵坐标为电子能量,横坐标为散射电子方向与大麦哲伦星云 ( LMC ) 方向之间的夹角. 图中每个点上的数字表示相关事例进入探测器的时间顺序 ]

Kamiokande II 实验之所以能够发现超新星中微子暴,实在得益于小柴昌俊发展了降低探测中微子能阈的新型光电倍增管. 成功观测中微子暴是一个历史性事件,它检验了恒星坍缩理论,证实了理论所预期的大量超新星中微子发射,同时宣告了星系中微子天文学的诞生.

从 SN1987A 极其有限的实验数据得出了有关超新星爆发的一系列信息,包括中微子的流量、平均能量、温度、时间衰减常数、总能量以及超新星爆发辐射总能量等,均与理论预言较好地一致. 根据这些数据,也推导出了以中微子性质为主的若干粒子物理结果,包括中微子质量、电荷、磁矩、 $|(v-c)/c|$ 、辐射衰变寿命、右手费米常数的限值以及轴子的质量范围等. 超新星观测给出的电子型中微子质量上限为 23eV. 这些结果生动地反映出超新星中微子观测的巨大潜力. 但是,这次观测毕竟事例数太少,并且缺乏中微子信号的能谱、时间结构以及不同味道中微子的温度差别等重要数据. 诚如 Pontecorvo 所说, SN1987A 是一次彩排. 它为以后的超新星观测作了准备.

#### 4 中微子天文学展望

戴维斯的放射化学实验和小柴昌俊的水切连科夫实验开启了粒子天体物理的一个新时代. 中微子天文学的诞生引发了许多应用宇宙中微子与加速器产生的中微子的实验研究工作,获得了一系列关于中微子基本性质和涉及天体物理内容的结果.

若干新的实验先后参加到太阳中微子观测中来,包括:超级 Kamiokande (升级了的 Kamiokande II)、GALLEX、GNO、SAGE 和 SNO 实验. 它们的结果都证明了观测到的太阳中微子流量和理论值之间的分歧(图 3). 其中超级 Kamiokande 实验,采用 50000t 水和 10000 多只光电倍增管,于 1996 年开始运行,1998 年报道了与 Kamiokande II 相一致的太阳中微子流量结果以及符合标准太阳模型的反冲电子能谱. 加拿大新建的大型重水地下实验装置 SNO (Sudbury Neutrino Observatory, 缩写为 SNO),采用 1000t 重水和近万只光电倍增管,于 1999 年投入运行. 借助于氘核的独特性质, SNO 不仅能够通过带电反应探测电子型中微子,而且能够通过中性流反应探测所有 3 种类型的中微子. 根据这个实验最近的报道,实际探测到的太阳中微子是由大约 1/3 的电子型中微子和 2/3 的其他两种味道中微子所组成的,而总的太阳中微子流量则与太阳标准模型的预言完全一致,这就在 99.999% 的置信水平上提供了第一个中微子味道转变的直接观察结果,确认了较早的太阳中微子实验给出的间接证据. 将 SNO 和超级 Kamiokande 的测量结果结合起来,可以推断中微子的混合角应当相当大,不同于夸克之间的混合.

这两个实验还分别对第一代与第二代中微子之间以及第二代与第三代中微子之间的混合角给以相当强的约束。

当前,一批研究中微子振荡的后续实验,包括反应堆、加速器和宇宙线中微子的实验正在开展或建造之中,它们将提供许多高统计精度的数据,以便对广泛的质量-混合参数空间作出更加严格的约束,并期望最终解决太阳中微子问题。

为了开展未来超新星研究,需要建立起全球性的中微子天文台观测网,实现中微子与红外线、射电、X射线、 $\gamma$ 射线以及引力辐射的协同监测。事实上,这样一个超新星观测计划正在国际范围内逐步实施中。预期未来银河系中心的一次超新星坍缩在新一代探测器中可以记录最高达到5000至10000个中微子事例数。在这种情况下,可望大大推进SN1987A已有测量限值并扩展研究范围。

宇宙之间存在许多可能的高能量中微子源,诸如 $\gamma$ 射线暴、活动星系核和超新星遗迹。在新的世纪里,中微子天文学将会越过我们的宇宙邻居探测遥远的发射源,而 $\gamma$ 射线暴看来是第一候选人。为了探索远达 $10^{10}$ 光年的区域以及能量高达 $10^{15}$ eV的弥漫中微子流量,需要 $\text{km}^3$ 量级的探测器,而西伯利亚贝加尔湖BAIKAL与南极AMANDA实验的经验已经表明,如此规模的高能中微子望远镜是完全可行的。利用大湖海洋的水或极地的冰作为体积庞大的中微子望远镜,高能中微子在这类探测器下面的岩石中发生相互作用,产生上行的 $\mu$ 子,然后在充作探测器介质的水层或冰层中引发切连科夫辐射而被记录下来。事实上,这种新一代探测器的建造已经开始,例如南极的ICECUBE,地中海的ANTARES和NESTOR的原型。毫无疑问,高能中微子天文学的迅速兴起已经在望,它提供了观察宇宙的一个独特窗口。鉴于TeV以上中微子能区只是刚刚开发,未来出现令人惊奇的重大发现是完全可以预期的。

中微子天文学现正处在当代科学研究的一个前沿。这是一个充满活力、正在蓬勃发展的研究领域。

## 5 后记

中微子天文学作为一个新的研究领域,它的开拓与建立的过程是一段颇为生动的历史,我们可以得到启发和教益。

在科学研究中,研究方向和课题的选择无疑是十分重要的,这反映了研究工作者对他所从事的研究领域的理解,更反映了他对于自己的要求。这种选择也常常决定了最后获得成果的科学意义。爱因斯坦曾经这样形容那些他所“不能忍受的”科学家们:“他们在一块木板上寻找最薄的地方,不费力气地,在上面钻了很多洞。他们为数众多的论文就是这么来的。”<sup>[22]</sup>戴维斯显然和这样一些科学家是格格不入的。作为化学家,他选择了物理学。不仅如此,他选择了中微子的研究方向,又进而致力于太阳中微子的观测。这些在当时都是具有极大挑战性而连许多物理学家都不敢或不愿轻易去尝试的非主流课题。戴维斯基于他对中微子研究潜在意义的认识,从一开始就选定了一条极其艰难的研究道路,勇敢地迎接各种挑战。这充分显示了他在学术上所具有的胆识,而这种胆识归根到底来自于他对人生的价值观以及对于科学的脱离了功利考虑的纯真态度。一些人理论上懂得选择研究方向需要有战略的眼光,但是在实际行动上却自觉或不自觉地满足于“在木板上最薄的地方钻洞”。戴维斯的例子在这方面是可以给我们以启发的。

从事原创性基础研究,常常伴随着许多风险和难以预测的不利因素。这就需要一种坚韧不拔的精神。戴维斯在朝着既定研究方向前进的道路上经受了许许多多的考验:他选择了前人没有用过的实验方法,他像在大海里捞针似地寻找中微子事例;当他观测到太阳中微子并发现了“丢失”现象时,许多粒子物理工作者却在很长时间内抱着无动于衷或者甚至怀疑的态度。当时粒子物理界一个代表性的看法是:“太阳中微子问题多半跟粒子物理没有什么关系。天体物理学家能够在相差两三倍的范围里预言 $^8\text{B}$ 中微子的数目就是一个重大胜利。”<sup>[23]</sup>为了弄清问题,戴维斯和在他的坚定信念激励下从事太阳模型研究的理论工作者们用了20多年的时间严格地检验各自的数据,最终达到令人信服的地步。事实上,从1968年一直到1987年间,全世界只有戴维斯一家从事太阳中微子实验;只是在1987年后,他才结束了孤军作战的状态。戴维斯忠于自己开始的选择,处身研究主流之外,埋头苦干,甘于寂寞,义无反顾地献出了一生,他的精神值得所有有志于献身科学的人学习。他以88岁的高龄(迄今诺贝尔物理奖获得者的最高年龄)获得诺贝尔奖确实是实至名归的。

我们还注意到,现代科学中重大的创造性实验

研究成果往往已经不是少数人单枪匹马所能得到的,需要各种条件的支持和多方面力量的通力协作。戴维斯和从事太阳模型理论研究人员密切配合,才得以发现实验与理论之间的分歧,揭示出太阳中微子问题。小柴昌俊有赖于日本先进的光电子工业的强大支持,才得以及时研制出高性能的大尺寸光电倍增管,成功地实现创新的实验构想。此外,像这种需要付出数十年心血的研究项目,如果没有国家(政府)层次的战略决策和及时支持,如果科学界缺乏一个宽松、民主、成熟的学术环境,那么在很多关键时刻都有可能因为感受压力、缺乏经费等等而中途夭折。我国过去研制“两弹一星”之所以取得成功,正是因为有效地把有关方面的力量组织到了一个目标底下。如何将这种“科技攻关”、“大力协同”的精神(而非形式)用到基础研究中去,看来仍然是值得认真探索的课题。

在科学研究中,机遇是存在的。但是,机遇并不总是可以预期和刻意追求的。对于机遇要及时抓住。在物理学的历史上,错失机遇、和机遇擦肩而过的教训是很多的。关于太阳中微子的探测,戴维斯原意是在验证恒星演化理论,但却意外地发现了中微子丢失的现象,新现象被穷追不舍,戴维斯靠着他的执着抓住了重大发现的机遇。至于超新星中微子的探测,则又是另外一种情况。小柴昌俊的 Kamiokande 探测器适时地从研究质子衰变转向了太阳中微子的观测,又恰好在 SN1987A 中微子暴发生的前一年完成升级,投入运行,次年就意外地观察到了中微子暴。小柴昌俊的幸运确实为不少人所羡慕,也值得庆贺。但是,科研成果毕竟不是单靠幸运得来的,而科学研究中的幸运通常降临到作好了准备的人身上,这种准备包括理论和实验的、精神和物质的,而最最关键的是始终要有不畏劳苦沿着崎岖小路攀登的精神准备。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Royal Swedish Academy of Sciences. The Nobel Prize in Physics 2002 : Press Release ; Advanced Information ; Information for the Public
- [ 2 ] 顾以藩. 物理, 2002, 25( 3 ) :129 [ Gu Y F. Wulx( Physics ), 2002, 25( 3 ) :129( in Chinese )]
- [ 3 ] Pontecorvo B. Chalk River Nat. Lab. Report PD-205 ; Alvarez L. Univ. of California Rad. Lab. Report UCRL-328
- [ 4 ] Davis R Jr. Phys. Rev. ,1955 ,97 :766
- [ 5 ] Holmgren H, Johnston R. Phys. Rev. ,1959 ,113 :1556
- [ 6 ] Fowler W A. Astrophys. J. ,1958 ,127 :551 ; Cameron A G W. Ann. Rev. Nucl. Sci. ,1958 ,8 :299
- [ 7 ] 关于标准太阳模型发展历史的叙述,参阅 Bahcall J N. Astro-ph/0209080 , to appear in Proc. of Neutrino 2002 , XXIIth International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics , Munich 2002
- [ 8 ] Davis R Jr. Phys. Rev. Lett. ,1964 ,12 :303 ; Bahcall J. Phys. Rev. Lett. ,1964 ,12 :300
- [ 9 ] Davis R Jr *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1968 ,20 :1205 ; Bahcall J. Phys. Rev. Lett. ,1968 ,20 :1209
- [ 10 ] Gribov V , Pontecorvo B. Phys. Lett. ,1969 ,28B :493
- [ 11 ] Bahcall J N , Davis R Jr. Essays in Nuclear Astrophysics. Barnes C A *et al.* ed. Cambridge : Cambridge University Press , 1982. 243—285
- [ 12 ] Davis R Jr *et al.* Bull. Amer. Phys. Soc. ,1971 , II 16 :631
- [ 13 ] Davis R Jr. *et al.* In :Frenkeloch A ,Marx G ed. Proc. of the Neutrino 72 Conference , Balatonfured , Hungary Vol. 1. Budapest ,1972. 3
- [ 14 ] Cleveland B *et al.* Astrophys. Journal ,1998 ,496 :505
- [ 15 ] Bahcall J N , Gonzalez - Garcia M C , Pena - Garay C. JHEP , 2002 ,04 :007
- [ 16 ] Arisaka K *et al.* JPSJ ,1985 ,524 :3213 ; Hirata K S *et al.* Phys. Lett. ,1989 ,B220 :308
- [ 17 ] Hirata K S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1989 ,63 :16
- [ 18 ] Hirata K S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1990 ,65 :1297
- [ 19 ] Hirata K S *et al.* Phys. Rev. D ,1991 ,44 :2241
- [ 20 ] Hirata K S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 ,58 :1490 ; Hirata K S *et al.* Phys. Rev. D ,1988 ,38 :448
- [ 21 ] Bionata R M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 ,58 :1491

## · 物理新闻与动态 ·

## 锂金属的超导电性

日本东京大学的 Shimizu 教授与他的同事在实验室中完成了对锂金属的超导电性研究,锂的超导转变温度是 20K,转变压强为 48 GPa,他们的成果显示了一个重要的结论,即越轻的元素将具有越高的转变温度。从这个原理外推,Shimizu 教授猜测,氢元素的超导电转变温度有可能达到室温,但却需要极高的转变压强,其数值将达到 400 GPa 的水平。

(云中客摘自 Nature ,10 October 2002)