

2002 年诺贝尔物理奖与中国人擦肩而过

The Nobel Prize for Physics in 2002 Brushed past Chinese

何景棠

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2002 年诺贝尔物理奖的一半授予美国的 Raymond Davis 和日本的 Masatoshi Koshiba, 以表彰他们分别在探测太阳中微子和大气 μ 中微子时, 获得的超出粒子物理标准模型的结果; 另一半奖金则授予美国的 Ricardo Giacconi, 以表彰他领导研制成世界上第一个宇宙 X 射线探测器, 开辟了 X 射线天文学的研究领域, 以及随后获得的许多重要成果。然而, 人们可能不会想到: 这项诺贝尔物理奖原本很可能大陆科学家是有份的。

一、R. Davis 的成就

人们知道, 核聚变是太阳能的源泉。在总结多年对太阳观测的基础上, 理论上发展了一个标准的太阳模型 (Standard Solar Model, SSM)。核聚变会放出电子中微子, 标准的太阳模型可以预言每秒穿过地球上某一面积 $\cdot$ 立体角的不同能量的中微子数目。20 世纪 60 年代初, R. Davis 建造了一个大型探测器, 把它放在南达科他州的地下矿井中。Davis 等人在大容器内放入 390 000 升的四氯化碳 (C_2Cl_4), 太阳中微子 ν_e 与 ^{37}Cl (氯-37) 作用, 产生具有放射性的氩-37 ($^{37}\text{Ar}^*$)。即 $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar}^* + e^-$ 。

这个反应的阈能是 814 KeV。让大容器里的 390 000 升的 C_2Cl_4 被太阳中微子照射一段时间之后, 用化学提纯的办法把 $^{37}\text{Ar}^*$ 提取出来, 然后测量 $^{37}\text{Ar}^*$ 的放射性, 就可测得太阳中微子的通量。理论上定义一个太阳中微子单位是每秒钟太阳中微子与 10^{36} 个靶原子相互作用产生一个事例, 即:

1 SNU (Solar Neutrino Unit) = 1 事例 (秒 $\cdot 10^{36}$ 靶原子)

理论预言, Davis 等人的探测装置可以探测到的能量大于 814 KeV 的太阳中微子的通量。即:

$$N = (7.9 \pm 2.6) \text{ SNU}.$$

Davis 等人从 20 世纪 60 年代中起一直测量到 90 年代中。实验测量到的太阳中微子流强的结果 20 年来的平均值是:

$$N = (2.1 \pm 0.3) \text{ SNU}.$$

可以看到, Davis 的实验首先测量到太阳中微子

丢失, 其通量约为理论预言值的 $1/3$, $2/3$ 太阳中微子丢失了。这就是著名的太阳中微子丢失之谜。

随后采用不同技术建造的日本的 Kamiokande、美国的 IMB、英美合作的 SAGE、欧洲合作的 GALLEX 实验, 都证实存在太阳中微子丢失。

由不同国家, 在不同地点, 采用对不同能量中微子灵敏的不同技术, 都测量到太阳中微子丢失。因此, 太阳中微子丢失是一个被物理学界公认的实验事实。而 R. Davis 则是在 60 年代中在世界上首先测量到太阳中微子丢失的人。

太阳中微子丢失的最直观的解释是因为中微子有质量, 存在中微子振荡。如果在理论推导时作一点简化, 则电子中微子变成 μ 中微子几率是:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 \theta * \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 \cdot L}{E\nu} \right)$$

式中 θ 是混合角; Δm^2 是不同质量中微子质量本征态质量平方之差, 即 $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$; L 是中微子从中微子源出发到达探测器经过的距离; $E\nu$ 是中微子的能量。如果中微子没有质量, 中微子的质量为零, 即 $m_1 = 0, m_2 = 0, \Delta m^2 = 0, \sin \theta = 0$, 就不存在中微子振荡。太阳中微子从太阳产生点向地球长距离的传播中, 有一部份太阳中微子变成了其他类型的中微子。但 R. Davis 的探测装置只对太阳中微子灵敏, 对其他类型的中微子不灵敏, 因此, 实际测量到的是太阳中微子经振荡效应后剩下的那部份太阳中微子。因此, 实验测量值就比不存在中微子振荡的理论预言值要小。

总结多年实验事实而发展起来的粒子物理的标准模型认为中微子没有质量, 中微子的质量为零, 在相互作用中轻子数守恒, 中微子不会从一种类型变成另一种类型。R. Davis 的实验结果表明, 可能存在中微子振荡, 即中微子有质量, 中微子的质量不为零。这是多年来第一个超出粒子物理标准模型的实验证据。说明粒子物理标准模型需要完善与发展。R. Davis 的实验结果是粒子物理发展史上一个新时代开始的标志。

宇宙学的实验研究表明, 90% 以上的宇宙质量

是暗物质。由于中微子充满整个宇宙,有质量的中微子是宇宙暗物质的候选者之一,对宇宙演化理论研究具有重要意义。

二、M. Koshiba 的贡献

20 世纪 70 年代中期,随着中性流的发现,弱相互作用和电磁相互作用统一的理论得到了越来越多的实验证实。由于弱电统一理论的成功,人们希望把强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用统一起来,从而创立了大统一理论。大统一理论一个最重要的预言是质子会衰变。

M. Koshiba 为了研究质子衰变,于 80 年代初在日本神冈建造了 Kamiokande 大型水切仑柯夫探测器。它是一个大的圆型水桶,直径 15.6 米,高 16 米,内装 3 000 吨纯水,用 948 个光电倍增管读出信号,放于离京都约 300 公里的神冈町的废弃砷矿井中,离地面约 825 米。

经过几年的实验记录,没有探测到质子衰变事例, M. Koshiba 质子衰变实验没有达到预期的结果。但是, M. Koshiba 建造的 Kamiokande 大型水切仑柯夫探测装置都可以用来探测太阳中微子。太阳中微子与水分子的外层电子相互作用,把能量传递给电子,高能电子穿过水时,可以产生切仑柯夫辐射光,在 Kamiokande 外层的光电倍增管的墙上形成一个切仑柯夫光环,测量光环的半径即可知道切仑柯夫光的发射角,从而确定电子的能量。利用水切仑柯夫探测器探测太阳中微子还有一个好处,因为切仑柯夫光具有方向性,白天太阳中微子从一个方向射向探测器,晚上太阳中微子则从另一个方向射向探测器,因此,可以判断探测的事例确实是太阳中微子事例。

M. Koshiba 大型水切仑柯夫探测器的第一个副产品是证实了存在太阳中微子丢失的现象。M. Koshiba 大型水切仑柯夫探测器的第二个副产品是人类历史上第一次测量到了超新星爆发产生的中微子。

超新星爆发是质量大于 8 倍太阳质量的晚期恒星,由于内部核聚变过程停止了,没有核聚变能去抵抗强大的引力,产生了引力坍缩;强大的引力把这颗晚期恒星的主要由铁核组成的物质压缩,结果产生 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ 反应,即原子外层电子与原子核的质子复合组成中子,同时放出电子中微子。这颗晚期恒星便成了密度极高的中子星。超新星爆发释放的巨大能量主要由中微子带走。超新星爆发使这颗晚期恒星的亮度瞬间增加几百万倍。因此,人的肉眼可以看到爆发的超新星。

值得中华民族自豪的是世界第一次记录到超新星爆发的是中国人,时间是 1054 年中国的宋朝,

记录到的超新星是蟹状星云。此后,地球平均约 100 年记录到一次超新星爆发(地球上看不到宇宙中离地球太远的超新星爆发。)因此,记录超新星爆发是百年一遇的机会。有句名言:机遇只青睐有准备的人。M. Koshiba 就碰上了这百年一遇的机会。

1987 年 2 月 23 日,世界时 7 时 35 分 35 秒,日本的 Kamiokande、美国的 IMB 和苏联高加索的 Baksan 探测器同时探测到来自大麦哲伦星云的超新星爆发的中微子信号。这颗超新星被命名为 SN1987a。它离地球约 10 万光年的距离。如果中微子有质量,某些在超新星爆发时同时出发的不同能量的中微子,由于飞行速度不同,经过 10 万光年长距离的马拉松赛跑式的飞行之后,到达地球的时间就不同,因此,准确测量超新星中微子的能量及到达地球的时间,就可推算出中微子质量的绝对值。

日本的 Kamiokande 记录到 12 个超新星中微子事例,美国的 IMB 记录到 8 个事例,苏联的 Baksan 记录到 7 个事例。日本的 Kamiokande 和美国的 IMB 公布了他们记录到的超新星中微子事例的全部数据。Kamiokande 探测器记录到的中微子事例数最多,对超新星中微子事例的能量分辨率和时间分辨率最好,所以数据最有用。

世界上许多科学家根据 Kamiokande 和 IMB 公布的数据,推算中微子质量的绝对值。按照不同的模型,有人推算出 $m\nu_e = (3.6 \pm 1.3) \text{ eV}$,有人给出 $m\nu_e < 5 \text{ eV}$,有人给出 $m\nu_e < 20 \text{ eV}$ 。这主要是由于探测器质量还不够大,记录到的超新星中微子事例数还不够多,统计性不够好,不能从少量的超新星中微子事例推算出中微子质量准确的绝对值。

存在中微子振荡效应,只是表明不同类型的中微子有质量差。有质量差就是中微子有质量的证据。这次,记录到超新星爆发的中微子表明,中微子确实是有质量的,而且,由超新星爆发的中微子测量中微子质量绝对值是最佳的途径。

虽然超新星爆发是百年一遇的机会。可是从 1987 年起至今,世界已有若干个国家计划建造质量为万吨级甚至百万吨级的探测器,守株待兔,等它 100 年,准备记录下一次超新星爆发的中微子信号,期望通过超新星中微子准确推算出电子中微子的质量值。当然,在等待超新星中微子的期间,这类巨型探测器还可以作其他项目的大量研究工作。

M. Koshiba 是人类历史上第一次记录到超新星爆发中微子的人之一。中国由于没有建造大型水切仑柯夫探测装置,在 1987 年失去了探测超新星中微子的机会。M. Koshiba 的第三个贡献是测量到大气中 μ 中微子丢失现象,证明存在 μ 中微子振荡。

为了收集到更多的太阳中微子事例和大气中微子事例, M. Koshiba 领导 Kamiokande 合作组建造了更大的水切仑柯夫探测装置,名叫 Sur

per Kamiokande 或简称 Super-K 或超神冈探测器。它是一个直径为 39 米、高度为 40 米的圆柱型大水桶,放于神冈町地下约 1 公里深的废弃砷矿井中,总共装有 5 万吨纯水,分成两部份,外围约 2 米厚的水作屏蔽层,用 1 085 个光电倍增管读出信号,以便屏蔽宇宙线打击矿坑岩石射出的中子本底;内部为有效体积,总共约有 2.25 万吨纯水,用 11 146 个光电倍增管读出中微子作用事例的信号。超神冈探测装置投入运转以后,收集到更多的太阳中微子事例,进一步证实了存在太阳中微子丢失现象。

超神冈探测器的一个最重要的贡献是探测到大气 μ 中微子丢失现象。证实存在大气 μ 中微子振荡现象。

大气中的高能中微子是由于原初宇宙线中的高能质子在大气上部与大气中的原子核相互作用而产生 K 介子和 π 介子, K 介子和 π 介子随后衰变, μ 子接着衰变。因此,大气中高能中微子的成份中, μ 中微子的数量应该是电子中微子数量的两倍。 μ 中微子与物质相互作用会产生 μ 子;电子中微子与物质相互作用会产生电子。

由于 μ 子的质量约为电子质量的 200 倍,因此, μ 子穿过水切仑柯夫探测器时,会产生一个边界清楚的光环;而电子由于质量小,通过介质时,会产生电磁簇射,因此,在水切仑柯夫装置上探测到的是一个边界模糊的光环。超神冈合作组发展了一套图像重建和识别技术,可以识别是 μ 中微子作用事例还是电子中微子作用事例。他们发表的实验结果是:实际测量到的 $(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{data}}$ 与假设不存在中微子振荡时的蒙特卡罗模拟得到的 $(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{MC}}$ 的比值少于 1。这说明大气中的 ν_μ 中微子丢失了。如果存在中微子振荡,就可以解释大气中 μ 中微子丢失的现象。美国的 Soudan II 探测器也证实存在大气 μ 中微子丢失现象。

1998 年 6 月于日本的 Takayama 召开的 1998 年世界中微子大会上, M. Koshiha 公布了超神冈探测装置获得的更详细的实验结果。他们测量了:从地球天顶而下的中微子事例和从地球另一端穿过地球到达超神冈探测器的中微子事例;中微子事例随天顶角的变化;中微子事例随 L/E_ν 的变化,并对数据进行了拟合。结果表明 μ 中微子主要转变成 τ 中微子,振荡参数是:混合角 $\sin^2\theta = 1.0$, 质量平方差 $\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 。

从 1998 年世界中微子大会后,物理学界就感到 R. Ravis 和 M. Koshiha 将会获得诺贝尔物理学奖。2002 年诺贝尔奖委员会把 1/2 奖金授予 R. Ravis 和 M. Koshiha 共同分享,确实是众望所归。

三、2002 年诺贝尔物理学奖 与中国人擦肩而过

70 年代末,德国在汉堡 DESY 建造了束流能量约为 20 GeV 的电子——正电子对撞机 PETRA。有 5 台探测装置工作在 PETRA 上,它们是 CELLO、JADE、Mark - J、PLUTO 和 TASSO。唐孝威当时受丁肇中先生的邀请,带领一个中国小组参加丁肇中先生领导的 Mark - J 国际合作组工作。而 M. Koshiha 则参加 JADE 国际合作组工作。唐孝威在德国汉堡的 DESY 认识了 M. Koshiha。唐孝威对 Mark - J 探测装置提出过某些改进方案,在 高能电子—正电子对撞时产生三喷注而证明胶子存在的实验中作出了贡献,他还考虑从德国回国后要在中国建立粒子物理实验基地,开展粒子物理实验研究。经过大量的调查研究,他认为质子衰变实验是世界一流的重要实验。刚好 Koshiha 也对质子衰变实验十分感兴趣。两人就在德国汉堡的 DESY 讨论了实验方案。

质子衰变是粒子物理大统一理论(把强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用统一起来的理论)所预言的。大统一理论认为强子数不守恒,轻子数也不守恒,质子可以产生衰变。其理论预言:质子衰变的寿命为 10^{32-34} 年。

要探测质子衰变,必须满足以下两个条件。一是,探测器本身必须质量很大,以便包含足够数量的核子。例如 1 000 吨水含有 6×10^{32} 个核子,如果质子衰变寿命为 10^{32} 年,采用 1 000 吨水作为探测器,假设探测效率为 100%,那么 1 000 吨水的探测器每年可以探测到 6 个质子衰变事例。因为质子衰变最大的几率是产生 π^0 和 e^+ , π^0 随后衰变为 2γ ,所以质子衰变最终产物是两个高能 γ 射线加上 1 个高能正电子。正电子和 γ 射线穿过水时会产生切仑柯夫光。如果在探测器外层布置 1 层光电倍增管,光电倍增管会记录到 1 个切仑柯夫光的圆环。由测量圆环的半径就可知道切仑柯夫光发射的夹角,从而定出正电子或 γ 射线的能量。质子的质量约为 1 GeV,所以质子衰变产物的总能量应该等于质子的质量,约为 1 GeV。二是,为了减低宇宙线粒子穿过探测器时造成的本底,探测器必须放在地下,由探测器头顶上的岩石把宇宙线粒子吸收掉,使探测器在本底极低的条件下,寻找是否有质子衰变的稀有事例。

唐孝威于 1979 年 9 月回国,与此同时, Koshiha 也回到了日本。此后两人经过多次通信联系,建议中日两国共同建造大型水切仑柯夫探测装置,内装约 3 000 吨到 5 000 吨纯水。按乐观的理论预言,每年可以探测到 10 个到 30 个质子衰变事例。

由于日本是一个多地震的岛国,没有高山,日本人引以自豪的富士山只有 3 200 米高;而在中国西部,几千米高的群山到处都是。因此,共同建议唐孝威负责在中国西部寻找合适的山洞。中国负责深洞实验室的建设,配备水电运行条件,负责提供 3 000 吨到 5 000 吨纯水;而日本主要负责用于切仑

柯夫光信号读出的约 1 000 个光电倍增管及相关的电子学设备,实验在中国进行。中方经费由唐孝威向中国政府申请,日方经费由 M. Koshiha 向日本政府申请。Koshiha 还请唐孝威在他向日本文部省申请经费时写推荐信。

建造大型水切仑柯夫探测装置的实验方案初步确定之后,唐孝威便向当时的高能物理所张文裕所长作了汇报。张文裕所长是国际知名粒子物理学家和宇宙线实验物理学家。他认为建造大型水切仑柯夫探测装置进行质子衰变实验是当时世界一流的重要实验。如果探测到质子衰变事例,便是粒子物理发展史上的一个重大成果;如果探测不到质子衰变,这个大型水切仑柯夫探测器用于宇宙线研究,也肯定会有许多副产品,所以,张文裕所长对唐孝威和 Koshiha 初步商定的方案表示大力支持。

由于高能物理所没有足够的经费支持建造大型水切仑柯夫探测装置,于是唐孝威向中国科学院写了专门的报告,争取科学院的支持,进行立项。按当时中国的科研经费,科学院完全有能力支持这一中日合作建造大型水切仑柯夫探测装置的建议。

在张文裕所长的大力支持下,唐孝威带了两个年青人亲自到西部山区及四川铁路沿线寻找合适的山洞,初步找到了几个候选地点。唐孝威从四川找山洞回到北京后,得到的答复是科学院不支持。在得到科学院不支持的答复之后,唐孝威只好给 M. Koshiha 写信,表示遗憾与歉意,表明因为得不到经费支持,合作计划只好作罢。

由于当时中国科学院有关领导不支持中日合作在中国建造大型水切仑柯夫探测装置,中国科学家无法参加这一计划。这也给 M. Koshiha 增加了困难。首先,本来中日双方共同分担的经费现在要由日方自己单独承担,增加了 M. Koshiha 向日本文部省申请经费的难度;此外,日本没有高山,Koshiha 只好在神冈町找到 1 个废弃的砒(砒霜)矿井,

Kamiokande 实验就在废弃的砒霜矿井中进行。后来,有个美国科学家参观 Kamiokande 实验后私下说:像这样的废弃砒霜矿井,按美国的环保标准,被认为是污染严重超标,是不许人进入的。

如果从 1979 年 M. Koshiha 与唐孝威共同讨论实验方案开始到 1998 年他在世界中微子大会上宣布存在大气 μ 中微子振荡实验结果止,Koshiha 带领他的研究组经过 20 年的奋斗,虽然没有探测到大统一理论预言的质子衰变事例,可是他却得到三大成果——证实太阳中微子丢失,探测到超新星爆发的中微子,探测到大气 μ 中微子振荡现象;并给出了中微子振荡的相关参数的可能值,从而获得了 2002 年诺贝尔物理学奖。

我们可以从 2002 年诺贝尔物理学奖得到什么启示呢?如果当时的中国科学院的有关领导能有远见地支持中日合作在中国建造大型水切仑柯夫探测装置,实验在中国进行,并且,中国人能够从 1979 年奋斗到现在,那么中国人就有可能问鼎 2002 年诺贝尔物理学奖。这一事件表明中国人是有潜力在中国的土地上获得诺贝尔奖的。

诺贝尔奖是可遇不可求的。中国人有好的物理思想、好的实验方案、好的高山深洞地理条件,但由于得不到相应的领导支持,从而失去了一次获得诺贝尔奖的机会。机会已失,时不再来了。

最近几年,有一些科技部门的领导者和科学史学家提出并思考一个问题:从 1949 年新中国成立以来,50 多年过去了,为什么在中国的土地上没有人获得诺贝尔奖?笔者在此把 1979 年发生的唐孝威与 M. Koshiha 讨论中日合作在中国建造大型水切仑柯夫探测装置的故事写出来,是希望有关科技部门的领导者、决策者和科学史学家可以从中得到他们各自的启示,不要再决策失误,这样才可能争取 10 年到 20 年左右,有中国人在中国大陆的土地上获得诺贝尔奖。
(责任编辑 王宏章)

科技动态

美国研发治疗白血病的新技术

据英《新科学家》2002 年 10 月 26 日报道:美国圣迭戈加利福尼亚大学的一个科研小组宣布,血癌即白血病患者将来可能再也用不着反复经受折磨人的痛苦不堪的化疗过程,并且有高得多的完全治愈的可能性。

这个科研小组试验了一种利用人体自身的免疫细胞自动瞄准并杀死血癌细胞的新疗法,并宣称这种方法可能适于治疗所有类型的血癌;而不像许多其他类型的免疫疗法,只能治疗有特殊细胞表面蛋白质的癌症。

白血病是因白血细胞变成癌细胞并无法控制其分裂而引起的。治疗白血病的过程通常是利用化疗杀死癌细胞的反复折磨人的长期过程,随后往往还要进行骨髓移植。但是,即使只要有几个癌细胞存活下来,它们也会开始重新分裂,使旧病复发。因此必须进行更多的一连串化疗过程,而成年白血病人有 4/5 在 5 年内就会死亡。

圣迭戈加利福尼亚大学的科研小组发明的新方法可

以找到在第一次化疗中生存下来的任何癌细胞,并一次全部消除。为了试验这种方法的有效性,他们从 12 名患急性骨髓白血病的患者身上(这种血癌在成年人中发生得最普遍)抽取血样,从中提取血癌细胞和称为 T 细胞的免疫细胞。并用 6 个星期的时间,用不同的“生长因子鸡尾酒”培养它们。

首先,他们添加一种能把血癌细胞变成“抗原表达细胞”的生长因子。抗原表达细胞专门促进免疫反应,用以抵抗癌细胞的表面分子。然后,再添加能使 T 细胞辨别抗原表达细胞表面蛋白质为外来“敌人”的生长因子,最后添加使 T 细胞增殖成庞大的杀癌细胞部队群的生长因子,组成“生长因子鸡尾酒”。

圣迭戈加利福尼亚大学血液和骨髓移植小组负责人 Edward Ball 说,这种治疗方法可以对付任何类型的血癌。
(刘先曙)