

两种中微子实验与1988年诺贝尔奖金物理学奖

吴为民

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

三位美国物理学家莱德曼、施瓦茨和斯坦博格因在26年前进行的一项导致发现两种中微子的实验而荣获了1988年的诺贝尔奖金物理学奖。本文回顾了人类对中微子的认识过程,详细地描写了这项实验的具体细节,分析了这个发现的重要意义,并展望了高能物理在这一领域的发展前景。

一

1988年10月19日,瑞典皇家科学院宣布, Leon M. Lederman (莱德曼), Melvin Schwartz (施瓦茨)和 Jack Steinberger (斯坦博格), 由于“用中微子束方法和通过发现 μ 子型中微子而验证了轻子的二重态结构”, 荣获1988年度诺贝尔奖金物理学奖。

这项二十六年前的实验, 由于它在高能物理发展史上的深远影响, 并没有被历史遗忘。

当这三位美国物理学家听到他们得到诺贝尔奖金的消息时, 都有一些感受。

对高能物理研究领域作出过许多重要贡献的莱德曼教授在听到这一消息时说: “我没有更早地得到诺贝尔奖, 是因为他们不能决定为了什么发现而授予我诺贝尔奖”。这位仍然活跃在高能物理研究领域前沿的美国费米实验室所长指出, 在他自己的众多贡献中, “这项特定的发现——找到了第二种中微子, 是把基本粒子组织到标准模型下的第一步。大统一理论将最终导致我们将自然界的所有的力统一起来。”

施瓦茨并不喜欢今天高能物理研究常有的局面, 三、四十个研究所, 三、四百位科学家, 工作数十年, 进行为数很少的几个大型实验。他说: “这使更多的人没有机会做他们想做的实验”, “我们当时的实验, 仅仅七个人参加, 工作

物理

了二年。”正由于这些原因, 促使施瓦茨在七十年代后期, 逐步地离开了高能物理领域, 转到发展微电子学的事业中去了。他是高能物理学家中少有的“富翁”, 是由科学家转为企业家的一个成功的例子。

形式上已经从西欧核子研究中心(以下简称西欧中心)“退休”但是仍然活跃在高能研究领域第一线的 ALEPH 国际协作组领导人斯坦博格教授, 在听到他得诺贝尔奖金的消息时说: “要得到诺贝尔奖金, 你必须做两件事: 第一, 当你年轻时, 一定要做出一个很好的实验; 第二, 你必须非常长寿。”

这三位科学家幽默的谈话, 给我们描绘了这项发现的概貌: 这是一个具有深远意义的, 虽然与今天的高能实验相比, 规模不算太大但却又十分精细而出色的实验。

二

为了理解这项获诺贝尔奖金的实验的意义与重要性, 让我们先来简单地回顾一下人类对中微子的认识过程。

1931年, 泡利从研究 β 衰变的能谱出发, 提出了“丢失能量”是被一个探测不到的粒子(即后来被费米命名为中微子的粒子)所带走的假设。

1934年, 费米根据泡利的假设, 提出了原

子核中的中子衰变成质子并同时放出一个电子与中微子的 β 衰变理论。费米的理论指出,原子核 β 衰变的相互作用,与电磁相互作用不同,是一种“弱作用”。他的理论计算与实验结果符合得很好,间接地证明了中微子的存在。

1952年,戴维斯(Davis)按照早在1941年我国学者王淦昌所提出的建议,用K俘获法证明了中微子的存在。

1953年,洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)科学实验室的雷尼斯(Reines)等人,首次利用



反应,精确地测量了反应堆中微子与质子相互作用截面,无可置疑地从实验上直接证明了中微子的存在。

1955年,布鲁克海文(Brookhaven)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,证明了中微子不仅存在,而且确实有正、反粒子之别。

1958年,哥德哈勃(Goldhaber)等人还精确地测出了中微子的螺旋性。

通过这一系列的努力,中微子的研究序幕终于拉开了。但是,直到1962年,即莱德曼、施瓦茨与斯坦博格的中微子实验做成以前,有关中微子的研究始终局限在低能范围内,实验也没有进一步的进展。原因是,中微子是一个最难以捉摸的粒子,它不带电,没有可以测量到的质量,几乎以光速运动,并且几乎可以自由地穿越地球,发生作用的几率小于 10^{10} 分之一。很显然,如果某个粒子,不与任何东西起作用,那么这个粒子就不可能被探测到。

到了1959年,有关中微子实验的办法有了革命性的变化。苏联杜布纳(Дубна)研究所的布鲁诺·蓬坦珂夫(Bruno Pontecorvo)与美国哥伦比亚大学的施瓦茨,各自独立地提出了用加速器来提供高通量、高能量中微子的可能性的设想。其基本原理是,用高能质子流去轰击合适的靶,从而产生大量的 π 介子,从这种 π 介子的衰变中,获取大量的中微子。

可惜的是,蓬坦珂夫未能实现这一想法,而1960年,施瓦茨、莱德曼与斯坦博格在哥伦比

亚作了计算,分析了在布鲁克海文的AGS加速器上用这种办法提供足够数量的高能中微子的可能性。这样,深入地进行中微子实验的技术条件便趋于成熟了。

三

再让我们回顾一下五十年代末期中国科学院高能物理研究所面临的状况。

1958年,由于李政道、杨振宁、费曼(Feynman)、盖尔曼(Gell-Mann)等人的努力,弱相互作用的理论有了长足的进展,不过当时人们并不清楚 μ 子与电子差别的真正涵义。 μ 子和电子有相同的量子数和自旋,有相似的电磁特性,除了 μ 子的质量比电子几乎重200倍以外,这二个粒子的差别是很小的。为什么它们的质量差别如此悬殊,却又并不影响到它们具有那么多类似的特性,这是当时物理学家感到十分困惑的问题。

中微子能不能帮助解决这个问题呢?在 β 衰变中,电子与中微子一起放射出来,而在 π 衰变中, μ 子与中微子一起放射出来。在中微子与核子的碰撞中,电子与 μ 子都能产生。但是,没有一个人能显示,在 β 衰变中出来的中微子与 π 衰变中出来的中微子是一样的。如果它们不一样,那么这种差别显然直接和 μ 子与电子之间的差别有关。

这就是当时这三位美国物理学家想做两中微子实验的主要动机。这个实验至少可以研究中微子的属性,以及在高能下弱作用的反应截面。如果能发现传递弱力的中间玻色子的证据,那自然更好了。

这个实验建议很快就被布鲁克海文实验室接受了。

在美国原子能委员会的支持下,施瓦茨、莱德曼、斯坦博格以及布鲁克海文加速器部的T. Danby,哥伦比亚大学助教K. Goulios和N. Mistry,以及法国Saclay的物理学家J. M. Gaillard共七人,组成了一个实验组。

布鲁克海文的AGS能产生大量高能 π 介

子,中微子是伴随着 π 衰变成 μ 子而产生的.所以,如果中微子真的有二种,那么这应该是 μ 子型的.也许会混有极少量的电子型中微子,这是由于 π 或K衰变成电子以及中微子造成的.中微子再与核子(例如质子)相撞,这时将有两种可能的情况:如果中微子只有一种类型,那么它们应产生等数量的电子与 μ^- 子;如果中微子有两种类型,那么在这个实验中,应该不产生电子,而仅仅观察到 μ 子.这就是这个实验的基本原理.

四

虽然实验的构想是很好的,但是具体实践时困难还很多.

首先,要设计和建造很好的屏蔽系统以减少本底,从而获得好的 π 束流.其次,要设计和建造一个好的中微子探测器.

布鲁克海文同步加速器,直径600ft,最高能量可达30GeV,考虑到屏蔽的困难,他们选择了15GeV的束流.当质子束流被引入打到铍靶时,便产生一束能量分布很宽的 π 介子,其峰值在3GeV.这些 π 介子的一部分,落入探测器方向 14° 的锥体内.3GeV的 π 介子大约在平均飞行150m后衰变.衰变产生的中微子将沿着原来的方向继续前进.简单的计算表明,如果提供150m的通道来让 π 衰变,则束流将继续发散,在探测器上收集到的中微子数反将减少,还不如将探测器更接近于靶.综合屏蔽等因素,他们发现,20m的飞行距离是最佳的.

在这个距离里,大约有10%的 π 介子衰变,同时将 μ 子与中微子送到前方.剩下的 π 介子被收集到13.5m厚的废弃的战列舰的钢制甲板上.这些钢板能把所有的粒子全部挡住,但是对中微子却无能为力.

图1是中微子产生的示意图,图2是两种中微子实验的示意图.

在实验的最初阶段,他们遇到了严重的本底污染,许多粒子,在钢装甲板的上方或下方通过,并反射到探测器中去.为了减少本底,他们再用几百吨的钢板,精确地布置在探测器的周围.

他们所用的探测器即是火花室,在当时这是一个很新的技术,也是当时唯一可以提供10t质子和中子,从而提供足够的中微子反应的探测器.这个火花室,包含有90个铝板,每一块铝板有1in厚,4ft²大,每九块组成一个模块,共有10个这样的模块.板与板之间,用透明的塑料做的隔件隔开,间距为3—8in.板与板之间,充满着氦气.当带电粒子通过火花室时,由于电离过程在粒子的路径上产生电子-正离子对,这时如果立即在阳极板上加上脉冲高压,则在粒子通过的地方,因电子-正离子雪崩式的倍增,在相邻的阳极和地极之间,形成由正离子组成的导电通道,产生火花放电.各个极板之间的火花,就组成了带电粒子的径迹.粒子径迹可以用普通照相机记录下来.在火花室外部与内部,都装有闪烁计数器,以探测带电粒子的通过.这些闪烁计数器的输出,提供了在火花室内发生的事例的信息.仅当那些感兴趣的事例

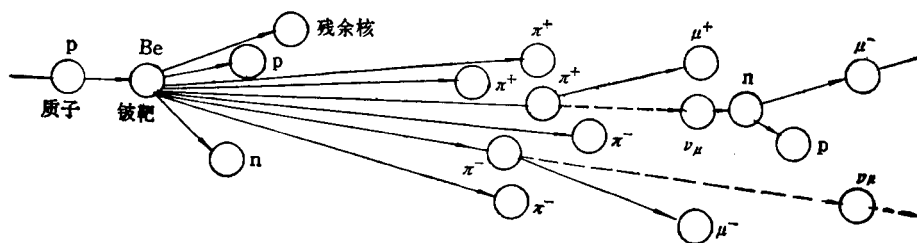


图1 中微子的产生

来自加速器的质子束流轰击铍靶,这些质子与靶中的质子和中子发生作用,产生 π^+ 和 π^- ,这些 π 介子,衰变成 μ 子与 μ 型的中微子与反中微子,其中少量的中微子(或反中微子)将与火花室中轰的中子(或质子)反应,产生 μ 子

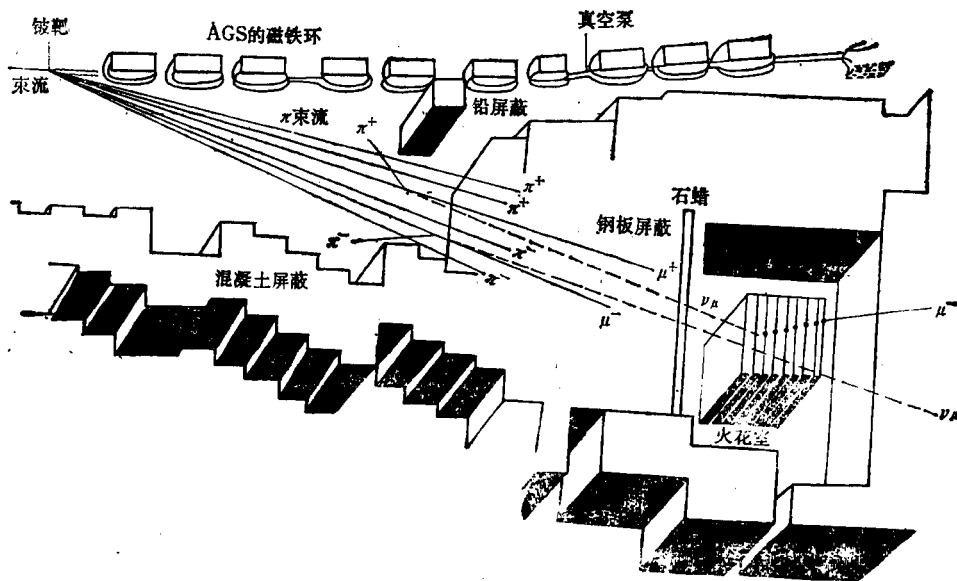


图2 两种中微子实验

实验利用布鲁克海文的 AGS 加速器所提供的 15GeV 的质子束流, 打击靶产生 π 束流, 大约 10% 的 π 在撞击到 13.5m 厚的装甲钢板前衰变成 μ 子与中微子, π 和 μ 被钢墙屏蔽住, 但中微子很容易地穿越钢板而进入火花室, 当有电子中微子或反中微子反应所产生的 μ 子出现时, 火花室即被触发而照相, 记录下有用的事例

出现时,才启动记录装置,也就是给火花室的阳极加上高压,同时启动照相机。

在这个实验中,他们仅对于大于 100MeV 的带电粒子所产生的事例感兴趣,而且这些事例是在火花室内产生的。

想把外部宇宙线中的 μ 全部屏蔽掉是不实际的,但是一个好的触发系统可以帮助排除一些宇宙线的事例。假定每秒钟有几百个宇宙线 μ 子进入火花室,因为在火花室的前、后与顶部,都安装了反符合计数器,所以如果这些反符合计数器记录到粒子通过,则立即发出停止点火的命令。但是,由于火花室边上与底部,不能用这办法来监督,所以每秒内仍然有大约 80 个宇宙线的 μ 事例无法靠这个办法排除。

这个问题的解决,在于使同步产生的辐射滞留时间尽量短,越短越好。在布鲁克海文加速器上能够产生仅仅 $3\mu\text{s}$ 宽的辐射脉冲,脉冲间隔为 1.2s。所以,大部分的宇宙线本底可以采用如下的办法轻易地抹去,即仅当探测粒子时,同步置于“开”的位置。在八个月的实验中,共有二百万个脉冲,同步置于“开”的时间仅为

$3\mu\text{s} \times 2 \times 10^5 = 6\text{s}$, 所以总计只有 $6 \times 80 = 480$ 个宇宙线事例。这些宇宙线事例,很容易从径迹的位置加以鉴别而予以剔除。

尽管如此,他们估计大约有五个宇宙线事例很难从径迹的位置加以剔除。为解决这一问题,他们利用周末进行采集宇宙线数据的实验。因为在周末,加速器是关闭的,所以采集到的是单纯的宇宙线事例,人们可以从中归纳出宇宙线事例的特征,从而当加速器运行时得到的真实数据混有宇宙线事例时,可以根据已知宇宙线事例特征,把它们剔除。

实验从 1961 年 9 月,进行到 1962 年 6 月。每个脉冲有 10^7 个中微子通过火花室的每块板,一个好的小时,有 3000 个脉冲,而一个好的日,有 20 个好的小时。实验共经历 25 个好的日,累计共有 10^{11} 高能中微子通过火花室。这些中微子数目,相当于从太阳来的低能中微子每秒通过我们身体的数目,在我们的一生中,也许可能发生一个中微子反应。计算表明,在 Brookhaven 实验室的探测器上, 10^{11} 个高能中微子大约产生 25 个反应。触发计数大约每小时是 10

次,共获取 5000 张照片。他们找到了大约 480 个宇宙线径迹,以及一些从加速器束流来的 μ 子的径迹。删去没有意义的事例,留下了 51 个事例,就是真正中微子碰撞的反应。其中 29 个只看见单个 μ 子的径迹,22 个是由一个 μ 子与另一个或几个由 π 介子或其它粒子造成的径迹。

他们是怎样肯定这些径迹是由 μ 子而不是一半 μ 子、一半电子所产生的呢?

他们将火花室的二个模块注入另一个加速器的电子束流,这样可以得到电子径迹的特点。他们发现 μ 子的径迹几乎是一条直线,而电子的径迹是漂然不定的。在他们的实验所获取的照片中,仅六张可以用电子簇射来解释。其中一部分也可以解释成混在 π 束流中的 K 介子衰变产生电子型的中微子。

尽管有那么多复杂的可能性,但是有一点是可以肯定的,那就是如果只有一种中微子,那么电子与 μ 子数哪怕近似地相等,也是绝对不可能的。所以结论很清楚:有二种中微子。在他们的实验中,由 π 衰变所产生的是 μ 中微子,它与核子作用,不可能产生电子。要产生电子,必须用电子型中微子的反应。

想通过这个实验发现中间玻色子存在的企图没有成功。现在很清楚,这是因为加速器能量太低了。

理论家们从这个二种中微子的实验中可以引导出许多有价值的结果。许多反应禁戒的原因被找到了。伴随 μ 子产生的中微子与伴随电子所产生的中微子是不同的。从这个不同之处,人们可以引入一个新的量子数,来描述不同的反应过程,并且可以引入一个新的守恒定律,即 μ 子型中微子数与电子型中微子数是两种不同的量子数,而相应的守恒定律也是分开的。科学的发展常常是一个问题的解决却又引起更多的但更深层次的问题。

自然界为什么需要什么都类同唯独质量不同的 μ 子与电子呢?又为什么自然界需要电子型与 μ 子型的中微子,它们甚至质量也没有多少差别?这二种中微子到底有没有质量呢?

五

二十多年过去了,物理学家在回答这些问题的道路上又迈过了漫长的路程。

1963 年,在西欧中心充满氟利昂的泡室里,证实了他们所做的存在二种中微子的预言。

中微子作为高能物理实验的有力武器,越来越广泛地得到了应用,一个又一个更大型的中微子实验设备建立起来了。

1968 年,斯坦博格来到西欧中心,由他领导的世界上最大的一个高能中微子实验(CDHS 组),于 1974 年被正式批准组建。

这个探测器,总长达 20m,直径 3.75m,总重量达 1400t,有 21 个模块组成,每个模块包括复杂的量能器、磁场、漂移室等设施,如图 3 所示。这个实验组,在近十年的时间里,积累了大量的数据,进行了高能中微子与核子的深度非弹性散射实验,精确地测量了费曼参量 x 以及结构函数,即核子内部夸克组分的动量分布,研究夸克在核子中的行为。这些实验结果,与量子色动力学(QCD)的理论预言十分符合,使理论家所面临的许多困惑的问题都迎刃而解了。人们实际上看到了标度的破坏,看到了在距离很小时在“夸克”之间的“色力”变得越来越弱,以及实际上发现了胶子存在的间接证据。高能物理学的史学家在评论这项工作时说:“这些辛苦的、不迷人的工作,虽然并没有使任何人获得诺贝尔奖金,但是它终究是标准模型最确信的奠基石”。

历史并没有忘记这些功勋卓著的人们。斯坦博格等人这次荣获 1988 年度的诺贝尔物理学奖,是与他们四分之一世纪以来不懈地努力为高能事业的发展做出了多方面的贡献分不开的。

现在,人们已经确信,轻子的种类至少有六种:电子与电子型中微子, μ 子与 μ 子型中微子, τ 与 τ 中微子,以及它们的反粒子。这六种粒子与六种夸克之间,似乎有一个一一对应的关系,它们的内部结构存在着某种联系。人们相信,对于标准模型中的基础费米子夸克和轻

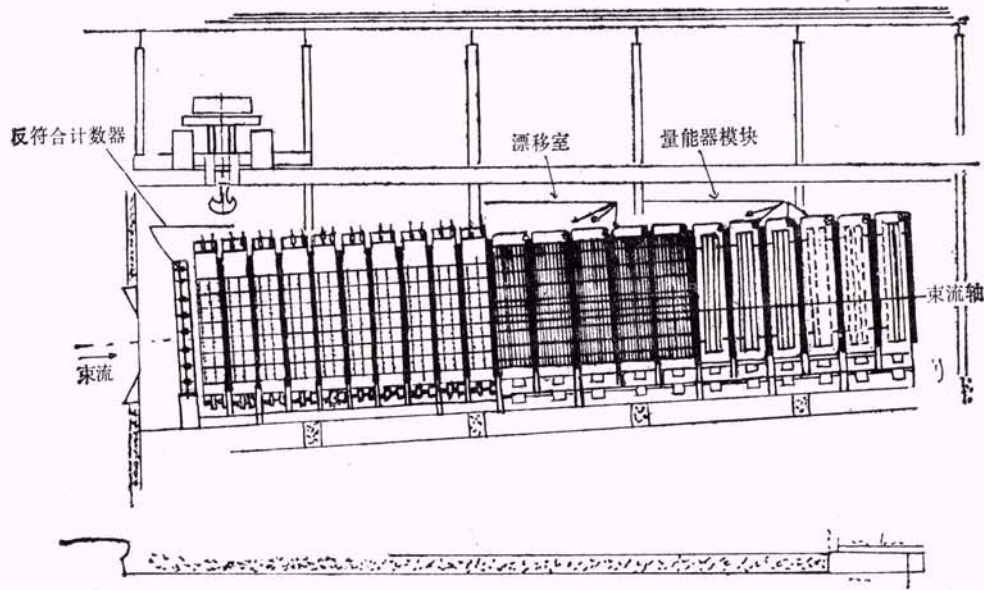


图3 CDHS 的中微子探测器

按它们的相互作用性质,可以表现为 I, II, III 代,即呈现出“代”(generation)的结构:

第 I 代	第 II 代	第 III 代
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, e_R$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \mu_R$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L, \tau_R$
$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L^i, u_R^i, d_R^i$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L^i, c_R^i, s_R^i$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L^i, t_R^i, b_R^i$

其中 R 代表右旋, L 代表左旋, i 表示颜色指标 ($i = 1, 2, 3$, 共三种), 在 I, II, III 代中, 认为中微子质量是零, 所以无右手中微子。其实中微子质量是否为零, 尚不清楚。在 I, II, III 代中左手的 d', s', b' , 不是物理上的 d, s, b 三种夸克, 而是 d, s, b 的线性组合。这一线性组合, 由称为 KM 矩阵的么正矩阵来表示。

尽管第 6 种夸克 t 夸克的存在还有待实验进一步证实, 尽管中微子质量是否为零还是一个谜, 尽管 KM 矩阵中的参量还有待改善它们的测量, 尽管人们对轻子与夸克有这种“代”的概念, 而且到底有多少“代”尚不清楚, 人们还是满怀信心地不断地在探索着。目前世界上正在建造和正在运行的高能加速器与高能探测器, 将在九十年代为人类向未知世界的进军提供有力的武器。

六

美国费米实验室的 Tevatron 超导质子-反质子对撞机, 可使其质子-反质子质心系能量达到 2TeV, 是目前世界上已经运行的能量最高的对撞机, 亮度达 $10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 主要探测器 CDF 正在采集数据。

日本 KEK 的 Tristan 正负电子对撞机的质心能量达 60GeV, 亮度为 $2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。它有 AMY, VENUS, TOPAZ 三个大型通用谱仪和四个 SHIP 重离子探测器, 现已取得了初步的研究成果。

美国 SLAC 的 SLC 正负电子对撞机的质心能量达 100GeV, 亮度为 $6 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 能产生大量 Z^0 粒子。因此, 利用它不仅严格定量地研究 Z^0 本身的性质, 还可以研究通过 Z^0 衰变得到的各种“次级”粒子的性质, 从而可进一步检验量子色动力学, 寻找超对称粒子等新的物理现象。

西欧中心 LEP 正、负电子对撞机第一阶段的质心能量可达 100GeV, 亮度可达 $1.6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 将于 1989 年建成, 第二阶段 (LEP II) 的质心能量可达 200GeV。共有四个实验

(下转第 278 页)