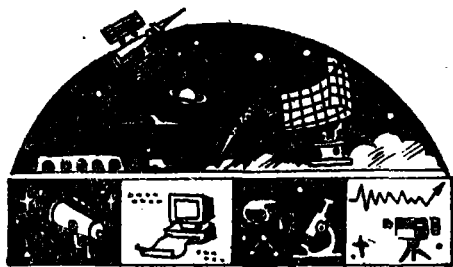


# 非加速器实验物理的复兴

马基茂

(中国科学院高能物理研究所)



非加速器实验,顾名思义,包括所有不使用加速器手段进行的粒子物理实验。如果从1912年发现宇宙线算起,它的历史已相当长久。加速器出现以前,宇宙线实验有过一段辉煌时期,在30年代发现了正电子和 $\mu$ 子,在40年代发现了 $\pi$ 介子和K介子,对粒子物理学的建立与发展作出了重大贡献。50年代出现加速器以后,使用高流强人工束流的加速器实验成为粒子物理实验研究的主流,有力地推动着粒子物理的迅速发展,而“靠天吃饭”、流强极低的宇宙线实验仅在加速器当时达不到的“超高”能区起补充作用。但应指出,70年代初著名的大型 $^{37}\text{Cl}$ 太阳中微子地下实验不仅获得重要物理发现,而且在实验方向与技术上作出了有意义的探索,堪称后来新一代非加速器实验的先驱。

## 一、80年代以来非加速器地下实验的勃兴

70年代中期提出的粒子物理大统一理论(GUT)激起人们寻求突破标准模型、检验GUT的强烈兴趣。由于加速器能量远远达不到大统一所要求的 $\sim 10^{16}\text{GeV}$ 能量标度,人们再次转向非加速器实验。因此,80年代陆续出现一批这类实验,特别是在极低宇宙线本底环境中进行的大型地下实验。它们多以寻找GUT预言的质子衰变为主要物理目标,研究范围扩展到探测各种天体过程产生的中微子和早期宇宙可能留下来的GUT粒子如磁单极子等。宇宙本身开始成为研究粒子物理的实验室。粒子物理实验复盖相关的天体物理和宇宙学课题成为这类研究的一大特点。此外,一些进行了四、五十年的核谱学实验如中微子质量测量、双 $\beta$ 衰变等也从GUT的提出得到新的动力。因此,新一代非加速器实验虽同宇宙线等实验一脉相承,但已经具有扩展了的内涵,并同相应的理论

发展一起逐渐形成物理学的新领域。

进入90年代以后,非加速器实验物理保持强劲的发展势头,一批规模更大、灵敏度更高的新实验设施投入运行或加紧建造。在粒子物理研究方面,非加速器实验同加速器实验的“高能量前沿”与“高精度前沿”形成互补的、鼎足而立的局面。这一形势在美国超级超导对撞机SSC计划下马的情况下尤显突出。一批在加速器实验上卓有成就的物理学家,包括几位诺贝尔奖得主也转入这一前沿。这样,又把加速器实验的精密测量技术引入传统上较为粗放的非加速器实验。人们预期,粒子物理、天体物理和宇宙学三个基本学科重大课题的结合研究,加之更先进的测量技术,可能使非加速器实验在本世纪末产生具有突破意义的物理结果。

图1给出世界上一些主要的地下实验的名称、地点、深度和宇宙线 $\mu$ 子的探测阈能。

## 二、广泛的多学科的研究课题

作为粒子物理实验研究的前沿之一,非加速器实验物理目前最活跃的研究课题有质子衰变,磁单极子,无中微子双 $\beta$ 衰变,大气中微子振荡等,相关的天体物理和宇宙学课题有太阳中微子,超新星爆发中微子,中微子点源,宇宙暗物质等。此外,地下实验宇宙线常规测量的 $\mu$ 子束研究可提供粒子物理相关的超高能作用和天体物理相关的超高能宇宙线成分的知识。

质子衰变(重子数不守恒)、原子核的无中微子双 $\beta$ 衰变(轻子数不守恒)与磁单极子是检验大统一理论(GUT)的主要实验内容。磁单极子为GUT预言的粒子,宇宙大爆炸理论的热宇宙标准模型曾预期早期宇宙大统一时期形成的磁单极子可能存在于宇宙线中,而后来的暴胀宇宙模型又可排除它们的存在。因此,从宇宙线中寻找磁单极子是粒子物理GUT和宇宙论二者的探针。

中微子是当代物理学最重要的问题之一，在粒子物理、天体物理和宇宙学的研究中都占有举足轻重的地位。W. Pauli 引入中微子概念已经 60 多年，实验上证实其存在也近 40 年，但中微子的一些性质如质量、味间振荡、磁矩等至今仍不清楚。在标准模型的弱电统一理论中，中微子质量为零，但宇宙学和天体物理似乎要求不为零。GUT 允许中微子具有小质量，来源于它们同其右手 Majorana 重中微子同伴的耦合，重中微子在 GUT 中自然出现。如果不同味道中微子具有非零质量，它们之间就会混合产生振荡。反之，如果实验上测到了中微子振荡，也可推出极小中微子质量的信息。对于两种味道中微子的混合，通常定义一个两维振

荡平面  $\Delta m^2$  (质量平方差)  $-\sin^2 2\theta$  ( $\theta$  为弱作用混合角) 描述实验结果。非加速器实验测量中微子质量的经典方法是用磁谱仪测量氚核  $\beta$  衰变能谱近端点处的详情，方法直接且与模型无关。经过 40 多年的发展，这一测量技术的精度已达几个电子伏特水平。直接研究中微子振荡的实验一般在反应堆与加速器上利用人工中微子束进行。非加速器实验方法主要是测量大气中  $\mu$  子中微子  $\nu_\mu$  同电子中微子  $\nu_e$  流强比的反常。这一问题的提出颇出人意料，因为当时的测量目的是为了确定大气中微子作为质子衰变本底的影响，结果却发现  $\nu_\mu$  与  $\nu_e$  作用产生的  $\mu$  子与电子事例率比仅为理论预期的 60%。这一结果的解释很自然地同中微子振荡

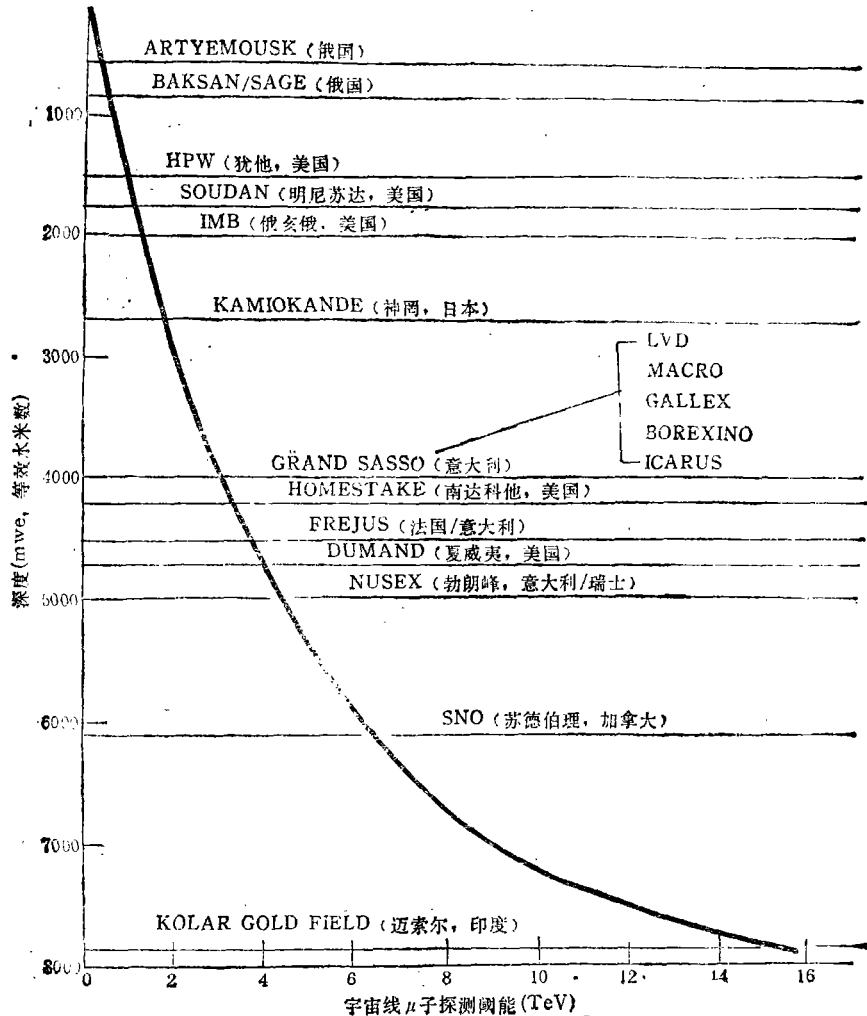


图 1 世界上主要的非加速器地下实验

联系起来,立即成为非加速器实验的热门课题。

在过去 10 多年中,尽管各有明显不同的目的,粒子物理、天体物理和宇宙学——宇宙中最大和最小结构的研究已经建立了公共的实验领地,它们之间成果的交流已经成为共同的特点,并促进各自的发展。自从 70 年代初 R. Davis 的  $^{37}\text{Cl}$  放化实验发现“太阳中微子失踪”问题以来,经近年实时探测器实验与低阈  $^{71}\text{Ga}$  放化实验的检验,太阳中微子通量的观测值始终小于标准太阳模型 (SSM) 的预期值。一方面仍不能完全排除天体物理的原因,另一方面似乎越来越要求用中微子振荡来作为解释,振荡的物质增强效应 (MSW 效应) 可以很好解释现有几个实验的数据。由于太阳是距地球最近的恒星,人们有理由期望通过现有探测器长期积累数据和新一代更大规模与多品种探测器的投入运行,把太阳中微子问题完全搞清楚,使其成为探索新物理的一条有效途径。超新星爆发中微子的研究是另一个学科交叉的课题。SN1987A 超新星中微子爆发的成功探测为解释恒星演化 II 型超新星爆发机制模型提供了很好的证明,标志了中微子天文学实验研究的开始。中微子流作为超新星爆发的第一个信号,通过它们经过以 10 万光年计的长距离传播后对光信号超前的时间信息,可以估算中微子质量的上限,供粒子物理与宇宙暗物质研究作为参考。由于中微子反应截面极小,SN1987A 爆发时 4 个实验总共只测到 27 个事例。因此,问题的深入研究要求更灵敏的新一代探测器提供超新星中微子能谱、时间分布等更完全的信息。可惜,我们能观测超新星爆发的机会太少了。

宇宙暗物质问题近年来特别引人注目。70 年代天文学观测证实银河系边缘恒星的转动速度比理论预期大,以后又发现许多星系与星系群的运动都不能用可见物质的作用解释,从实验事实方面预言了暗物质的存在。暴胀宇宙模型预言宇宙的物质密度非常接近临界值 (平宇宙),计算出宇宙质量约为现在观测值的 10 倍,即宇宙物质的 90% 为暗物质。最近根据宇宙背景辐射高精度观测结果和类星体中氘/氢物质

比的测量结果,理论上提出的新模型认为宇宙物质包括: 10% 重子物质, 30% 热暗物质(运动速度接近光速的有质量的中微子)和 60% 冷暗物质(运动速度较低的中性弱作用粒子)。由此可见粒子物理中中微子质量测量的宇宙学意义,但更重要的问题是: 冷暗物质到底是什么? 目前提出的主要候选者为中性弱作用重粒子 (WIMP) 如重 Majorana 中微子,磁单极子与各种超对称 (SUSY) 粒子和轻玻色子如轴子等。非加速器实验的一个严重任务就是在宇宙线中直接测量可能的冷暗物质粒子,特别是 WIMP。目前,这方面的实验探索还处于起始阶段,实验家同理论学家合作寻找有效的探测方法并发展相应的技术。

### 三、多样互补的探测技术和遍布世界的实验

除直接测量中微子质量的  $\beta$  谱仪方法是在地面实验室进行外,上述非加速器实验都是探测极为稀少的事例,一般选在极低宇宙线与天然放射性本底的深部地下进行。实验地点多为矿井和高山下的公路隧道之中。极少数专门开挖的地下实验室,如意大利罗马东北 130 公里处亚平宁山下的格兰萨索 (Gran Sasso) 实验室,则是看中它们特别适宜的岩层厚度、低的天然放射性本底环境、大型设备进出交通便利等优势而付出巨大代价,并设置多个实验形成中心。不同实验物理目标对探测器性能的要求不同,但一般都是测量中微子反应和高能  $\mu$  子,因此可大致归结为几个共同的方面: (1) 大质量/体积,大面积和高探测效率; (2) 中微子的低探测能阈; (3) 低实验本底与仪器噪声; (4) 精密测量与记录事例的能力,包括空间/角度分辨,时间/方向分辨,能量分辨,粒子识别以及有效的数据获取与显示等。在宇宙线实验和粒子探测技术多年发展的基础上,现有的与计划的非加速器实验形成以下几种探测类型,它们各自适于特定的物理目标,在同一课题的研究中可以互补。目前共有二、三十个实验点分布在世界各地。

#### 1. 水契仑科夫计数器

这类探测器具有大质量的突出特点,好的方向识别和低能电子能量分辨,响应均匀,阈值7-20MeV,但不能给出粒子径迹。目前运行的探测器有美国的IMBIII(8000吨)和日本的Kamiokande II(3000吨),二者前身都是第一批质子衰变探测器。计划中的探测器有日本的Superkamiokande II(50000吨,1996建成)和加拿大的SNO(1000吨重水,1995),后者利用重水增加中微子作用事例率。

既然水为工作介质,直接在具有纯净水质的天然水域布置水下实验可以获得更大的工作质量。目前有4个水下实验在建造中:美国夏威夷海域的DUMAND,希腊西南海域的NESTOR(二者在地球的东西两边形成互补的天空复盖),俄国贝加尔湖的NT-200和南极的AMANDA(冰下)。前3个实验可在1995年开始部分数据获取,第4个已开始模型实验。

## 2. 径迹量能器

这类探测器的组成是径迹室与吸收体(铁,铅等)交替叠加用以测量粒子径迹与能量,加上飞行时间(TOF)计数器测量方向与时间,在空间、时间、能量几方面都具较好的分辨能力。质量比水契仑科夫计数器类型要小,阈值则较高(100MeV或更大)。目前运行的探测器有位于阿尔卑斯山下法-德合作的FRÉJUS(900吨),位于勃朗峰下意-瑞士合作的NUSEX(150吨),美国的SOUDAN 2(1030吨)和印度的KOLAR(多个中小型实验,其一260吨),KOLAR、FRÉJUS和NUSEX为第一批质子衰变实验,SOUDAN 2后来居上,在质量与探测器性能上均有显著优势,成为同类探测器中潜力最大的一个。

## 3. 液体闪烁计数器

这类实验的工作介质对探测低能中微子反应有利,阈值较低(5-10 MeV),适合超新星爆发中微子等的测量。质量比水探测器小。缺点是液闪模块体积一般较大,对带电粒子给不出径迹,因此对作用中微子给不出确切方向。目前运行的探测器有美国的LASD(140吨),俄国的BAKSAN(330吨)和位于意大利Gran Sasso

实验室的LVD(1800吨,意-俄-中-美合作),后者在液闪层间加以径迹系统,大大提高了此类探测器的探测能力。计划中的有位于Gran Sasso的BOREXINO(600吨含硼液闪),液闪加硼是为了提高中微子反应的事例率。

## 4. 综合型和新型探测器

综合型探测器由几类探测器组合而成,因此具有全面优良的性能。新型探测器采用全新技术得到超越已有探测器的性能。为充分发挥它们的性能,这两类探测器一般也做得很大,可同水探测器相比。综合型探测器的代表是位于意大利Gran Sasso的MACRO(意-美合作),它由液体闪烁计数器(1000吨)、径迹量能器(~10000吨)和固体径迹探测器三部分组成,固体径迹探测器专门用来对磁单极子做补充测量。自从1990年部分投入运行后,MACRO已经获得大面积的成果。新型探测器的代表为同样位于Gran Sasso的ICARUS(意-美-中合作),它计划建造3个各5000吨的液氩TPC漂移室,对事例做高空间分辨与能量分辨的三维成像测量,连续灵敏,自触发,号称“电子学泡室”。一个3吨模型已经研制成功。到2000年建成后,ICARUS将是非加速器实验中最强有力的一个探测器。

## 5. 放射化学型实验

区别于以上所有类别的电子学计数器实时实验,放化实验独树一帜专门用来测量太阳中微子。放化实验利用化学处理手段,从经过照射后的工作介质中,把由中微子反应产生的放射性核素萃取出来,浓集后测出其计数率,由此推算出入射中微子的通量。这一方法的最大优点是可选择特定的低阈高截面中微子反应,例如 $^{37}\text{Cl}$ 反应阈为0.816MeV, $^{71}\text{Ga}$ 为0.236MeV,不受环境本底与电子学噪声的影响。但没有任何实时信息,事例不可见,中微子方向不知道。虽然一般认为化学处理过程可以做得非常可靠,但杜绝一切放射性污染也是一件极其复杂的事情。最早的放化实验——美国的Homestake(615吨过氯乙烯)利用 $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ 反应测量能量较高的 $^8\text{B}$ 太阳中微子,现仍

在服役。两个新的实验为俄国的 SAGE (60 吨金属 Ga) 和位于意大利 Gran Sasso 的 GALLEX (30 吨 Ga, 氯化物) 则利用能阈较低的  $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$  反应测量主要的来自 PP 聚变的太阳中微子, 又初步证实 Homestake 提出的“太阳中微子失踪”问题。人们在注视今后高统计的结果。

除上述大、中型地下实验外, 还有一批小型无  $\nu$  双  $\beta$  衰变实验遍布各国, 已测 9 种核素, 其中有中国组在北京门头沟煤矿做的  ${}^{48}\text{Ca}$  实验。

#### 四、引人注目的实验结果

近 10 年来非加速器实验获得了如下主要成果:

##### 1. 质子衰变

IMB、Kamiokande 等实验否定了最小 SU (5)GUT 对质子寿命的预言  $10^{31\pm 1}$  年 ( $p \rightarrow e^+ \pi^0$  道), 把寿命下限推到  $> 3 \times 10^{32}$  年。新一代实验 Superkamio 等可把寿命的测量限提高 1—2 个数量级, 将用来检验更高级 GUT 的预言, 例如 SUSY GUT 预言的  $10^{32} - 10^{36}$  年 ( $p \rightarrow \bar{\nu}_\mu K^+$  道)。

##### 2. 太阳中微子

4 个太阳中微子实验的最近结果如表 1 所示。比之 SSM 两个理论 (Bahcall 理论与 Turch-Chièze 理论) 预期的太阳中微子通量, 所有结果都偏小。除 SSM 本身可能的问题外, 最流行的解释是中微子振荡物质增强的 MSW 效应, 即一部分  $\nu_e$  在太阳内部转变成  $\nu_{\mu, \tau}$ 。在  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  振荡参数  $\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$  平面上, 实验数据拟合出两个允许区域:  $\Delta m^2 \sim 10^{-3} (\text{eV})^2$  与  $\sin^2 2\theta \sim 0.6$  和  $\Delta m^2 \sim 10^{-5} (\text{eV})^2$  与  $\sin^2 2\theta \sim 7 \times 10^{-3}$ 。太阳中微子问题的完全解决需要新一轮实验提供高统计、好的能量与方向分辨的

表 1 太阳中微子通量的实验结果

实验	探测技术	实验结果/SSM 预期值
Kamiokande II	水 Ce	0.46 (Bahcall 理论)
Homestake	放化 ${}^{39}\text{Cl}$	0.28 (Bahcall 理论); 0.34 (T-C 理论)
GALLEX	放化 ${}^{71}\text{Ga}$	0.63 (Bahcall 理论); 0.67 (T-C 理论)
SAGE	放化 ${}^{71}\text{Ga}$	0.44 (Bahcall 理论); 0.47 (T-C 理论)

实时数据, 以及同太阳模型无关的测量。

##### 3. 超新星爆发中微子

4 个实验对 SN1987A 超新星中微子爆发的测量结果综合在表 2。这些测量出色地证明了超新星爆发机制的理论模型, 实验结果同理论计算相符。由中微子爆发信号同光信号的时间关联推出中微子质量  $< 16 \text{eV}$ 。但也可看到, 实验的统计性很差, 在仅有的 27 事例中有 5 个在时间上同其它相差约 5 小时。更详细地了解超新星爆发过程要求高统计数据, 以及中微子事例的时间与能量分布。这是下次测量超新星的任務。

##### 4. 大气中微子

5 个实验对大气中微子测量的结果表明在表 3。表中的比率  $R$  定义为观测到的  $\mu$  子中微子  $\nu_\mu$  同电子中微子  $\nu_e$  事例率之比除以同一量的理论 Monte Carlo 模拟值,  $R = [(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) / (\nu_e + \bar{\nu}_e)]_{\text{exp}} / [(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) / (\nu_e + \bar{\nu}_e)]_{\text{MC}}$ 。预期  $R = 1$ , 但实验上  $R < 1$ 。两个水契仑科夫计数器 IMB 与 Kamio 和一个量能器 SOUDAN 的结果最为明显, 另两个量能器 FRÉJUS 与 NUSEX 则较不明显, 但后者的统计性差, 可信度低。数据的中微子振荡解释在振荡参数  $\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$  平面上给出的允许区域为:  $\Delta m^2 \sim 10^{-2} (\text{eV})^2$  与  $\sin^2 2\theta \sim 0.5$ 。这同太阳中微子的结果不符。为澄清这一问题, 新一轮实验必须提供更高的统计性, 更好的  $e/\mu$  识别和更好的能量与方向分辨。

5. 磁单极子: 流强上限的最近结果为  $< 10^{-14} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ ,  $0.001 < \beta < 0.5$  (MACRO 组)。

6. 电子中微子质量: 氚核  $\beta$  衰变谱测量给出的最新上限为  $< 4.5 \text{eV}$  (俄国组)。

7. 无  $\nu$  双  $\beta$  衰变:  ${}^{76}\text{Ge}$  与  ${}^{136}\text{Xe}$  核新近的实验结果罗列在表 4, 表中  $T_{1/2}(0\nu)$  为无  $\nu$  双  $\beta$  衰变的半衰期下限,  $\langle m_\nu \rangle$  为中微子的 Majorana 质量上限。

# “介观”物理中的量子弹道输运和相干输运

顾本源

(中国科学院物理研究所)

顾雷

(北京大学物理系)

随着分子束外延技术的进步以及光学和电子束微刻技术的日臻完善,目前人们已能制造具有高电子迁移率的亚微米尺度的微结构器件。在毫K的低温下,高迁移率材料中的电子,接连两次非弹性散射间所走过的平均距离,称作电子的相位相干长度,可达到微米以上,超过微结构的尺度。这种系统的物理性质完全受电子的量子力学相干性所支配。由此,物理学中又开辟了一个新的分支领域,即“介观”(mesoscopic)物理学。所谓“介观”系统,是指它的尺度与宏观系统相比显得足够小,但与原子-分子系统相比又足够大,是介于两者之间。“介观”系统中的电子输运过程,不能够用通常的求宏观系统的统计平均的方法来处理,而是表现为量子相干输运和量子弹道输运。电子在输运中保持“相位记忆”,因此导致种种不寻常的量子

干涉现象以及介观尺度范围内的量子化现象。

大家知道,电子具有粒子-波动二象性,应当十分类似于电磁波,会显示出干涉效应。那么,为什么电子波的量子干涉效应不是寻常可见的呢?追溯其缘由,至少有三点:第一,在固体材料中费米电子的波长只有50--100 Å,与通常能够制成的器件尺度相比,太短了。只有当器件或样品的尺度能够与电子波长相比较时,波动性才会表现出来;第二,电子在固体中运动时会不断与其它电子、杂质缺陷,声子等发生非弹性碰撞,使电子丧失“相位记忆”,进而破坏电子波的相位相干性。高迁移率的半导体中电子非弹性散射的平均自由程可达10微米,如果器件的尺度小于微米数量级,则几乎不发生非弹性散射,电子的输运过程是弹道式的;第三,固体中电子波通常不是单色的,费米电子的

## 结束语

本文介绍了以地下实验为重点的新一代非加速器实验的兴起与发展。如从广义定义出发,把地面的和空间的有关实验也包括进来,非加速器实验物理这块园地就显得更加繁荣。就目前已经获得的实验结果而言,与其说在基本课题上取得了成果,不如说发现了许多问题、矛盾和“疑难”。但在科学研究中,发现问题就是发现机会,解决非加速器实

表 2 SN1987A 的中微子信号

实验	基准质量 (吨)	能阈(MeV)	宇宙时间 (UT)	事例数/持续时间(秒)
LSD	90	5	2:52:36	5/7
Kamio II	2140	7.5	7:35:35	11/12
IMB III	5000	20	7:35:40	8/6
BAKSAN	330	12.5	7:36:06	3/6

验所提出问题的过程就是我们走向新物理的过程。

表 3 大气中微子实验结果

实验	探测技术	辐照时间 (千吨·年)	R
Kamiokande II	水 Ce	4.90	$0.60 \pm_{0.06}^{0.07} \pm 0.05$
IMB III	水 Ce	7.70	$0.54 \pm 0.02 \pm 0.07$
FRÉJUS	径迹量能器	1.56	$0.87 \pm 0.21$
NUSEX	径迹量能器	~0.40	$0.99 \pm 0.40$
SOUDAN 2	径迹量能器	1.01	$0.69 \pm 0.19 \pm 0.09$

表 4  $^{76}\text{Ge}$  与  $^{136}\text{Xe}$  的无 $\nu$ 双 $\beta$ 衰变实验结果

实验	$T_{1/2}(0\nu)$ ( $10^{24}$ 年)	$\langle m_{\nu} \rangle$ (eV)
CPN, $^{136}\text{Xe}$	$> 0.42$	$< 2.3$
Milano, $^{136}\text{Xe}$	$> 0.02$	$< 10.5$
ITEP, $^{76}\text{Ge}$	$> 1.0$	$< 1.5$
Heidelberg, $^{76}\text{Ge}$	$> 1.8$	$< 1.2$