

深水下 μ 子和中微子的探测

介绍DUMAND计划

喻 传 赞

杜曼德 (DUMAND) 计划的全名是深水下 μ 子和中微子探测 (Deep Underwater Muon And Neutrino Detection) 的缩写。它计划建成一个国际合作的实验基地, 主要参加国有美、日、苏……等国。选择在太平洋夏威夷附近 5000 米深处的海下, 用 10^9 吨海水作为探测介质, 使用大量的光电倍增管建立一个光学探测阵列, 并辅助以声学阵列来进行探测, 估计耗资将超过五千万美元。在经过五个夏天专题讨论会之后, 进行了充分的论证和准备, 现已做了许多局部实验、现场调查和理论计算工作, 提出了一套最佳施工方案, 论证了各种研究课题。这是各国高能物理界与天体物理界极为关心的项目, 现在简单介绍如下:

研究领域: 目前高能加速器已做出了 1—200 GeV 的中微子 ν_μ 和反中微子 $\bar{\nu}_\mu$ 的能谱, 可作数百 GeV 以内的 ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 中微子的弹性与非弹性散射的各种实验, 而杜曼德计划是研究能量 $E_\nu \geq 10^{12}$ GeV (=1000 GeV) 的宇宙线高能中微子实验。它可以在三个领域内做出开创性的工作:

- (一) 高能 μ 子物理学;
- (二) 高能中微子物理学;
- (三) 高能中微子天文学。

因此这一研究的科学价值是很大的。关于具体的研究课题, 在后面还要作具体的介绍。

探测原理: 高能中微子与物质的相互作用的截面虽然很小, 但当 $E_\nu = 10^{13}$ GeV 时, 与核子的作用截面

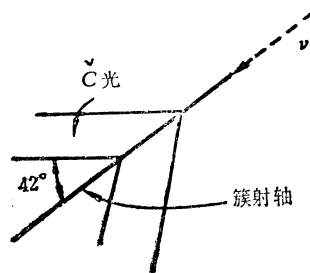


图 1

$\sigma \sim 10^{-34} \text{cm}^2$, 因此, 地球对于高能中微子来说并不是完全透明的。科学工作者很自然想到利用天然物质作为探测介质, 最廉价和最容易大量找到的就是水。当

宇宙线高能中微子与核子碰撞后, 产生带电的次级粒子, 引起核-电磁簇射, 在水中沿簇射方向运动的高能电子和 μ 子, 将产生契伦可夫光, 这种契伦可夫光在海水中沿着与簇射轴成 42° 角的锥体而传播, 见图 1。可以用光电倍增管组成的阵列来进行探测。一系列光电倍增管记录的信号通过电子计算机的数据处理后, 可以定出高能中微子事例发生的位置、入射方向和能量, 并被记录下来, 且可以再现其轨迹, 这叫做光学探测器阵列。

在 1976 年的杜曼德会议上, 建议用声学的方法在深水中探测超高能中微子。因为超高能中微子通过相

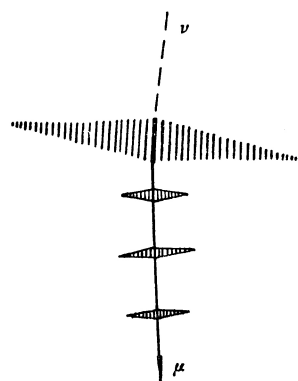


图 2

互作用引起核-电磁簇射, 在簇射的路径上引起“游离加热”, 导致水的膨胀, 于是产生了可以探测的声波。图 2 为产生声波的示意图。粗线为簇射路径, 可类比为“天线”。当中微子能量 $E_\nu = 2 \times 10^{13}$ GeV 时, 核-电磁簇射产生 π 或 K 介子, 然后衰变为 μ 子, 此时“天线”

长度 ~ 10 米, 直径 ~ 10 厘米。声波从“天线”向外扩展, 形成一个“圆盘”, 入射粒子和簇射路径都垂直于圆盘, 若簇射能量 $E = 10^{15}$ eV, 则剩余能量 (10^{15} eV) 为 μ 子所带走, 并在途中产生电磁簇射。

声在水中的吸收长度约 1000 米, 比光在水中的吸收长度 (~ 20 米) 大得多, 因此只需用较少的探测器布置成为一个声学探测器阵列, 同样可以探测入射粒子的方向、位置和发生事例的总能量。

场地的选择标准: 对于中微子的探测, 通常需要选择 4000 米以上的水当量深度的地方, 用以屏蔽掉大气中高能 μ 子的透入。因此杜曼德实验场地选择在太

表 1

参 数	对杜曼德实验的影响
光 学 清 洁 度	光学传感器的校正、间隔和数量。
生 物 发 光	1. 光学探测器的噪音电平、闪光信号、 以及萤光的数据处理。 2. (间接)对声探测器相同。
声 本 底 噪 音	噪音电平、闪光信号和数据处理。
生物干扰/沉淀	声噪音电平, 以及光学下降。
深 洋 流	阵列的方向性与支撑、间距。
雾 状 层	要求作“校正”或提高阵列的高度。
底 部 特 性	部署后的“清洁度”, 列阵底部固定。
近 海 斜 度	部署时的长度、航线、对电缆设备等的 保险性。

表 2

场 地	Maui 盆 地	Keahole 盆 地
最大深度(m)	5740	4900
盆墙深度(m)	5500	4500
盆地面积(km ²)	~1300	~1000
沉淀物厚度(m)	>750	>250
沉 淀 型	硅质 褐淤土	北·硅质 南·褐土
沉淀声特性	高声学反射	北·50—100米透过 层 南·反射声
沉淀剪应强度	5-20 g/cm ²	不 知
洋 流	不 知	4cm/sec
光 衰 减	小雾状层窗口效应 (~400m厚)	无雾层

平洋中夏威夷附近海下 5000 米深处的海底盆地中, 此处海水透明度较好, 具体选择标准如表 1 所示。在 1979

年以前, 经过实地测量, 找寻了两处地方以供选择。一处是夏威夷北面的 Maui 岛以北 55 公里处, 称为 Maui 盆地, 另一个是夏威夷岛上的 Keahole 点以西 40 公里处, 称为 Keahole 盆地。将这两处测量的结果列于表 2 中。

还测定了温度、透明度、密度和海水含盐度随深度的变化, 如

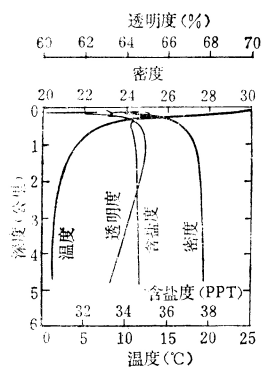


图 3

图 3 所示。

由于需要在海下 5000 米深处施工, 因而给这一工程带来了不少的困难。

标准阵列: 经过仔细周密的设计考虑之后, 1978 年提出的标准阵列已代替了原初每边为一公里的立方

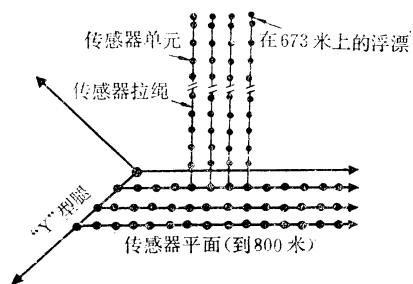


图 4

阵列的简单概念。新的阵列作用体积为 1.12 立方公里, 包含 10^{10} 吨水的探测介质。它的底平面是六边形的, 每边长 800 米, 面积为 1.66 (公里)²。在六边形中心, 以径向 120° 向三方伸出三条“腿”, 如图 4 所示。在每条腿上, 每隔 40 米系上一条 800 米长的一行探测器组件, 每行共 21 个。这样一个探测平面共包含了 1261 个探测组件, 这个平面与海底固定。每一个探测器又向上延伸 673 米, 共 18 阶光学探测器, 顶上以浮漂向上拉直, 这样整个阵列的探测器组件总数为 $1261 \times 18 = 22,698$ 个, 每一行每一列都以电缆相通, 进行供电与将信号输入大型数据处理计算机中, 便于寻址与事例的图象再现。

经过计算机的模拟实验, 这样一个位于太平洋 5 公里深的光学阵列, 能屏蔽掉来自大气宇宙线的 μ 子, 可以记录由于高能中微子诱发的强子级联的位置, μ 子的轨迹等, 从一立方公里体积中能很好分辨超过 5×10^{12} eV 的能量。目前, 声学探测器将限于研究能量 $E_\nu > 10^{16}$ eV 的超高能中微子, 其相互作用出现在 $\sim 10^3$ (公里)³ 体积中, 强子级联用声探测器的角分辨率 $\sim$ 几个毫弧度。因此为了研究超高能中微子, 必须在光学阵列上增加少量的一个声学探测器阵列, 是非常合算的和必要的。

局部实验: 为了获得海水对低能宇宙线中 μ 子和强子成份的屏蔽作用的极限, 曾用 8 个 11 cm $\times$ 12 cm 的乳胶叠 (NTB-3 型核乳胶, 每片厚 300 微米), 分别从表面逐步放至 305 米深度的海中, 放置一年后进行测量, 得出实验数据, 用以模拟深海中的情况。

每一个光学探测器组件的光电倍增管数到底是由 4 个、6 个还是 8 个组成最好? 经过实验, 以 6 个各相差 90° 的六个方向排列为最佳。这样整个阵列就需要 $22,698 \times 6 = 136,188$ 个性能一致的光电倍增管。在每个组件中, 还集中了计数器、定时器和短期数据贮存器, 以及某些控制函数等部件, 整个光学阵列具有“树”结构处理网络, 这样一个系统能产生快触发, 时间分辨在 0.5 毫秒的量级。事例触发器控制数据读出, 触

发器的逻辑是根据密封在组件中的光电倍增管来识别信号,标准受软件控制,完成一个典型事例在 0.02 至 0.1 秒。采用目前的技术,其它部份的费用,小于光电倍增管的费用。

由于在深 5000 米的海下工作,光电倍增管必须承受 600 个大气压的条件下工作。日本已试制了这样一种耐高压的光电倍增管,在 0—600 个大气压力下,相对脉冲高度和分辨率没有变化。使用 CsSb 光阴极,直径为 2 英寸,光灵敏度在 3000—5500 Å,电流放大为 8.5×10^5 倍 (1000 伏电压下),半极大全宽度为 9%,上升时间为 8 毫微秒,飞越时间为 87 毫微秒,因此完全达到了实验的要求。预计在 1000 个大气压下始不安全,保险系数仍是很大的。

对于宇宙线超高能中微子诱发的强子级联簇射的声学探测,亦作了各种类型的大量模拟实验,如在高能加速器上模拟簇射的阈能,用激光进行实验定标等。计算表明,频率低于 $f_0 = 20$ kHz 起源于表面的噪声强度几乎是指数上升的,所以只有 $f > 20$ kHz 的信号频率才易被探测到,在距离 1 公里的地方,估计可探测由中微子在水中相互作用产生的声信号阈能为 10^{16} eV,在能量 $E_s = 10^{19}$ eV 时,能探测到 16 公里的距离。由于

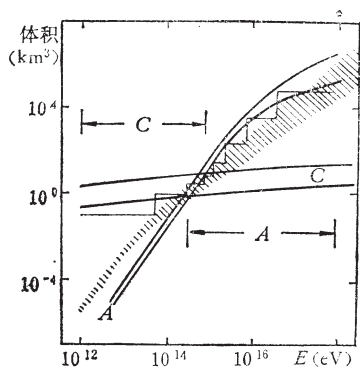


图 5 斜线面积表示每年产生 50 个事例的能量和体积的关系, C——光学阵列, A——声学阵列

表面噪音干扰太复杂,所以至今尚未能识别起源于超高能中微子事例的声学信号。根据电子计算机模拟实验,声学探测在 0.3 立方公里是最佳灵敏体积。因为声探测器是很廉价的,如果每一个单元阵列 (即以 0.3 立方公里为单元的体积) 包含 10^4 探测器,要求信噪比 ≥ 100 , 则最佳探测能域为 3×10^{17} eV。现将模拟杜曼德实验,在深海中每年产生 50 个簇射事例的体积随能量的变化关系绘于图 5 中。从图中可见,在能域为 $10^{12}—10^{15}$ eV 中以光学阵列探测为佳,而在 $10^{15}—10^{19}$ eV 的能域中,则以声学探测阵列为主,计算中声探测阵列由 120×10^3 个声探测器组成。

现场施工: 杜曼德阵列的施工必须达到三个标准,即最小危险、最少花费和最大使用年限。

为了使光学探测器组件在运输中安全可靠,将光学传感器组件装在一个特制的直径为 9 米高为 9 米的圆柱形筒中。全部探测器组件共重 1.3×10^9 米吨,为

了节省运输费用,全部浸入水下牵引运输,安装则用海下钻孔船的管道将圆柱筒组件送入海底,由遥控无人

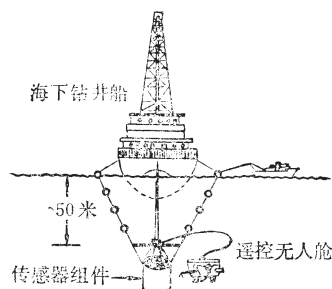


图 6

大的探测器阵列的花费,与建立一个高能加速器的费用相当,但是它的研究课题,却是迥然不同的方向。

研究课题与理论预示: 今天的高能物理和高能天体物理的研究,完全离不开理论模型逻辑推理的预示,因此在开展实验课题之先,必须有充分的理论估算,而

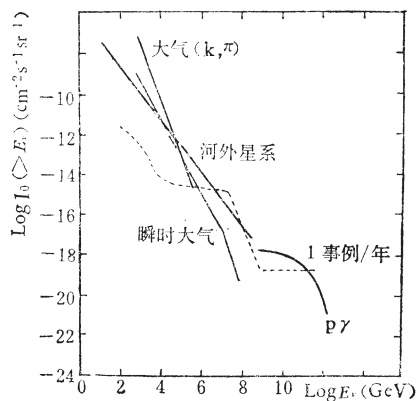


图 7

理论的预示是否正确,也越来越离不开实验的检验。

首先最关心的是,宇宙线高能中微子的起源和流量,大体可以分为

三部份: (一) 由于高能宇宙线与地球大气产生的核相互作用,产生的 π 和 K 介子衰变而来,称为大气中微子; (二) 由于高能宇宙线在宇宙空间传播时,与星际物质相互作用 (主要是 pp 和 $p\gamma$) 产生的 π 、 K 介子衰变而来。 (三) 各种高能天体直接产生的高能中微子,经过理论计算,它们的流量如图 7 所示。对于高能物理研究来说,这三种都构成它的源。而天体物理界最感兴趣的却是第(三)项,前两种都成为它研究的本底。

宇宙线高能中微子可以提供各种剧烈的天体物理过程的信息,按杜曼德阵列的探测体积,理论有如下预示:

(一) 在 10 KPC 距离内超新星爆发,在最初 4 个月内,可记录到 $10^3—10^5$ 个事例;

(二) 对活动星系核和赛弗特星系,爆发出极大的

能量,理论预示每天可有 200 个事例的记数;

(三)对第二类赛弗特星系,由于被大量的尘埃和气体所遮挡,通过高能中微子的观测,有助于弄清它们的辐射本质是否主要是非热的;

(四)对于银河系的核心,由于大量物质的遮挡,长期来对它的认识极少,理论预示银心方向的计数率比反银心方向超过 10 倍以上;

(五)有助于弄清天文学之谜——类星体、爆发射电星系、蝎虎 (BL Lac) 变星等的巨大能量来源,以及极遥远天体演化的一些信息。

由于杜曼德阵列能够再现高能中微子引起的核-电磁级联的径迹、方向、分辨能量等本领,因此它可以做许多高能物理方面的研究工作,例如高能 μ 子的各种物理性质,特别是对于高能下弱相互作用性质的研究。由于弱电统一理论的成功,从温伯格角严格限制了 $W^\pm$ 玻色子的质量 $m_w \simeq 85 \text{ GeV}$ 。利用杜曼德阵列,对于 $E_\nu > 10^{13} \text{ eV}$ 的中微子爆,理论计算预示,假如不存在中间玻色子,具有标度情况,每年的计数率为 613 个。对于存在标度,有中间玻色子时,每年记数为 157 个,加 QCD 校正后,为 225 个。还有人讨论了通过 μ

子相互作用产生 z^0 玻色子的可能性,理论预示 z^0 的质量为 90 GeV 。通过弱作用还可以研究 $\nu-N$ (或 $\bar{\nu}-N$) 的弹性和非弹性散射。另外还可对中微子本身的性质作充分的研究,如中微子是否有静质量,是否本身会发生衰变,是否有新的作用机制,是否会产生 $\nu_\mu \rightleftharpoons \nu_e$, $\bar{\nu}_\mu \rightleftharpoons \bar{\nu}_e$ 振荡等,都是很有意义极需研究的高能物理的课题。

总之,通过杜曼德阵列实验的研究,可以给人类揭示出高能物理、高能天体物理、宇宙线的起源和弱相互作用等多方面前所未有的知识。

1980 年夏天又在夏威夷召开了一年一度的杜曼德专题讨论会。我国也派了霍安祥和姜印琳参加。但因目前仅筹积到二百多万美元的经费 (还不足原计划经费的 1/20),国际合作亦未能实现。由于经费不足,此计划有面临流产的危险,但杜曼德计划的主持人仍在积极争取经费的同时,打算缩小探测阵列,故原订的施工计划亦要拖延。

因为我国有得天独厚的自然条件,如果我们扬长避短,搞一个稍小的探测阵列,只需花费较少的经费,有可能在这一学科领域捷足先登,做出世界先进水平的科学工作。