

中微子振荡实验物理与国家地下实验室建设

杨 长 根

(中国科学院高能物理所 北京 100039)

在过去的—个世纪里,基础科学各方面都取得了非凡的进展,在物理科学中,研究的范围从小至 10^{-17} 厘米物质构成的基本单元,大至宇宙的尺寸,宇宙的过去直至宇宙将来的理论,包括了我们所能感知的一切,甚至超越了我们的感知。

在这最大和最小之间发展的解决不同尺度的各方面问题的基础科学和技术,包括了原子理论、固体理论、现代的化学分子理论等,有的理论发展为技术,有些新的物理和技术与我们的物质生活紧密联系,比如今天的纳米技术、基因的确立、超导的应用、量子计算机的发展等等。基础物理的研究并不因为这些成果而停止,它向更深的层次发展。今天,有越来越多的证据表明物理世界的两个极端,最小的粒子和最大的宇宙是联系起来的,我们正在追寻使它们紧密联系起来的理论,这个完整的理论主宰着最小和最大的世界的运转。

对基本粒子物理而言,有关夸克和轻子的电弱和强相互作用的—标准模型取得了巨大的成功,它可以非常精确地描述加速器能量至几百 GeV,或者说小至 10^{-17} 厘米的物理现象。但作为基本理论的框架,它是不完整的,它有 19 个参数需要各种各样的实验作测量,还有许多基本的问题不能回答,这包括:为什么费米子的质量延伸 11 个数量级? CP 破坏的起因是什么,怎么去理解夸克轻子族的结构?可以对标准模型作改进,如超对称性理论和大统一理论,但它们并没有被证实,它们的预言需要由实验来检验,有些检验是不能由加速器实验来进行的,比如说大统一理论的能量尺度比现在加速器所能达到的最高能量大几万亿倍。在更深的层次上,还存在物质与反物质的不对称和电荷量子化的基本问题。

今天,实验上有很强的证据证明标准模型之外有新的理论,当我们突破传统的强子和带电轻子高能物理界限的时候,我们发现—方面在小于 1 个电子伏的低能端,中微子振荡在向标准模型挑战,另—方面在宇宙尺度上,虽然我们不知道大爆炸遗迹中产生了什么,但极高能端的问题由于宇宙暗物质和暗能量的存在而慢慢浮现了出来。

在宇宙学方面,大爆炸理论标明宇宙从高温、高

密度的状态膨胀,而后冷却的演化过程,随着天文学观测精度的提高,提供了支持大爆炸理论的证据,建立了如下几条基本事实:(1) 由于宇宙膨胀的原因,从远处星系发出的光产生了红移,因此星系之间正在彼此远离;(2) 存在由于高压和高温形成的宇宙背景辐射,今天的宇宙中每立方厘米中约有 411 个热光子,它们的能量分布遵从平均温度为 2.7K 的黑体辐射规律;(3) 今天宇宙中存在大量的氦和氢可以追溯到早期的高温宇宙;(4) 离得越远的星系就越年轻并且越稀少,说明它们处于宇宙演化的较早状态;(5) 宇宙物质的多少决定了时空的弯曲度,这与广义相对论是相符的。

最新的威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)的数据确定了一些天体物理的基本参数,并且预言了宇宙的最终命运:宇宙的形成年龄为 137 亿年,误差为 1%。大爆炸两亿年后开始有星球形成,而且宇宙将永远膨胀下去,测量背景辐射温度极性提供了新的宇宙膨胀的证据,威尔金森微波各向异性探测器给出最新的宇宙质量能量组成比是:重子物质占 4%、暗物质占 23%、暗能量占 73%。

在粒子物理的早期,在宇宙线研究中得到的丰硕的成果,比如正电子、 μ 子、 π 等的发现,这些发现奠定了粒子物理发展的基础。从加速器用于粒子物理研究开始,粒子物理对天体物理和宇宙学的研究—直是处于帮助的地位。但今天经过了一个轮回,天体物理和宇宙学开始有了回馈。首先,标准模型只关心仅占 4% 的宇宙质量能量问题是不能令人满意的,标准模型必须要朝着包含新物理的方向发展,其次,膨胀自大爆炸后的 $10^{-35} \sim 10^{-33}$ 秒就开始了,这时的能量(温度)范围为 $10^{12}\text{GeV}(10^{25}\text{K}) \sim 10^{14}\text{GeV}(10^{27}\text{K})$,在这个能量范围还缺少一个可以被证实的理论模型,因此现在比以往任何时候都更迫切地需要建立一个超出标准模型能适合更高能量的基本粒子理论。在这样高能量下,理论模型的检验是不能完全依靠加速器物理实验的,它需要非加速器物理实验手段的帮助。与加速器相比,虽然说宇宙线不是一个很好的做详细研究的工具,但它却提供了多方面的工具,与加速器物理起到了互补的作用。(1)

可以产生并且加速多种粒子： γ 射线、中微子、带电轻子、质子、氦和重核，还可能有奇异事例；(2) 能谱很宽，从低能热辐射至 10^{20} GeV 的稀有事例；(3) 不同距离的研究，从地球尺度，河内到河外距离；(4) 极端状态的研究，从高温高密的中子星到黑洞；(5) 最有意义的物理在于宇宙线中包含了我们从未想到的东西，原因在于宇宙线中蕴含着基本规律所赋予的信息，这些信息需要物理学家去解读。

由于粒子物理和宇宙学的共生关系，为了实现它们的共同发展，美国的宇宙物理委员会 (Committee on the Physics of the Universe, 简称 CPU) 共列出这两个领域的 11 个问题，CPU 的报告中建议建立国家地下实验室作为手段对其中的一些问题进行研究，这其中至少有 5 个问题是与地下实验有关联的：(1) 暗物质是什么？(2) 暗能量是什么？(3) 中微子的质量是多少？它在宇宙演化中的作用是什么？(4) 高能宇宙线的起源和加速机制？(5) 质子是稳定的吗？

在这些问题中，发展最快的是中微子物理。中微子质量虽然小，和物质只有弱相互作用，但它却从宇宙形成之初就开始起很大作用，它和其他粒子共同产生于早期宇宙高温、高压的等离子体热平衡态中，中微子和微波背景辐射的光子数目相当，比质子多 10 亿倍，中微子质量即使只有几个 eV/c^2 ，它也可以成为暗物质的相当一部分，目前中微子质量测量的上限说明中微子不可能是暗物质的全部。中微子的性质还对早期宇宙中元素的形成起了重要作用，它参与质子与中子的相互转变，中微子的特性影响了中子的产生、俘获和衰变等性质，进而影响到元素氢、氦、锂核的产生丰度，这些轻元素丰度的计算值已被现在的测量所证实。我们还不知道中微子当中有没有 CP 破坏，如果中微子存在 CP 破坏，它将可能解决宇宙中的物质——反物质不对称性这个重要问题。

物质质量的多少是宇宙学的基本参数，暗物质的存在已经通过星系的引力效应得到证实，最新的证据来自光穿过星系时产生的引力透镜效应，逐渐累积的证据表明了大量暗物质的存在，它几乎是通常物质的 10 倍。但暗物质是由什么组成的仍然是个谜，中微子可以是一个候选者，但它不构成暗物质的全部，第二个可能候选者是超对称中性子 (Neutralino)，另外一个轴子，后两者都可以通过实验室的手段进行寻找。

我们还不知道暗能量是什么，但它一定存在，因为宇宙在加速膨胀。它有可能是和暗物质联系在一起，除了可以借助于天文工具，通过测量红移随距离的关系来推断暗能量和暗物质的多少和性质外，实验室作为互相补充的手段亦是不可缺少的，小至寻找亚毫米尺度偏离平方反比的实验，大至等效原理的检验，在任何尺度偏离牛顿引力定律的发现都将对物理世界产生革命。

到目前为止，大部分有关宇宙线加速的信息来自于 γ 光子的测量，但更多的信息将可能来自于原初加速的粒子，或由这些粒子产生的次级光子和中微子所携带的信息。最为不理解的是能量大于 3×10^{20} eV 的高能宇宙线，由于存在与背景辐射光子的作用，这些高能宇宙线粒子只能来自离我们较近的源，可能来自于近处的 AGN、 γ 暴、拓扑缺陷衰变或大爆炸产生的大质量遗迹。

宇宙学中一个重大的问题是为什么物质比反物质多得多，大爆炸刚开始时物质和反物质应该是一样多的，就像正电荷和负电荷同样多一样，但随后在非常高能端产生的非常微小的物质不对称性的相互作用可能导致了物质的不对称性，这个相互作用在今天也应该允许质子发生衰变，它可以在低能量下以很慢的速率发生，那么究竟有没有质子衰变呢？现在世界上正在建议建设百万吨的水切连柯夫探测器进行测量。

从这些宇宙当中最基本的问题开始，基础物理的研究扩展到各方面的部分细节。

由于非加速器物理领域研究的多样性，最近一个显著的倾向是向地下实验的方向发展，世界各国已经有多个地下实验室在工作，美国、西班牙、印度几个开展科学和技术研究的新的实验室也正在酝酿和建设中。美国很多大学物理系已经加强了天体物理和宇宙学研究的力量。开展地下实验主要有 3 方面的原因：(1) 由于对宇宙线起到了很强的过滤作用，因而它具有低本底的特性，适宜于弱信号的观测，具有发现新物理的潜力；(2) 由于对低能宇宙线的屏蔽，因而能够对高能宇宙线进行更好的测量，进行高于加速器能量的物理研究，与加速器研究起互补的作用；(3) 一个地下实验室对其他科学和技术领域也具有巨大的实用价值，除粒子物理和宇宙学天体物理外，包括核物理、材料技术、微生物和地球科学。

地下实验室作为研究新现象工具的价值在过去

几十年中被好几个地下实验室所证明, 建立于 1965 年美国霍姆斯塔克 (Homestake) 矿由戴维斯开始的太阳中微子实验, 由于发现太阳中微子的丢失而开始了今天世界范围的中微子振荡实验。由小柴昌俊开始的日本神冈大气和太阳中微子实验取得了一系列的成果。今天日本神冈、意大利的格兰萨索 (Gran Sasso)、加拿大的苏勃瑞 (SNO)、美国的苏丹地下实验室开始了一系列的地下实验, 这些实验室经过不断更新都已经运行了几十年。

在中国建立地下实验室也具有明显的优点, 大部分地下实验的研究项目都不需要加速器, 基本上可以完全依赖于自己的国家, 当然国际合作是重要的, 只要有了好的开头, 地下实验室可以分阶段进行建设。以长远、可更新、多学科综合为目标, 着眼于有重大物理意义的课题, 一个多学科研究的地下实验室也将发挥类似于羊八井在高海拔大阵列仪器测量方面的优点, 拓宽我们的研究领域。同时要建立和加强已有的粒子天体物理的理论研究, 对重大的理论问题提出看法, 用实验证实, 开展有原创性的研究。这些都需要国内高校和研究所的有效合作和参与。下面我们对地下实验可进行的重要物理研究作一个描述。

一、长基线中微子振荡实验

很长一段时间, 中微子都被认为是像光子一样没有质量的, 与其他物质的相互作用非常弱。20 世纪末 50 年代和 60 年代, 庞特科夫 (Pontecorvo) 及麦凯 (Maki) 等人提出了中微子振荡的概念。为简单起见假使有两种中微子, 或者说有两种味道的中微子, 中微子类型的味道本征态为 ν_e 和 ν_μ , 并且中微子有质量, 质量本征态为 ν_1 和 ν_2 。不考虑物质效应, 当中微子穿过距离 L 时, 由一种味道的中微子本征态 ν_i 转变为另一种味道的中微子本征态 ν_j 的几率是:

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2(1.27 \Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L (\text{km}) / E (\text{GeV}))$$

式中, E_ν 是中微子的能量, θ_{ij} 是中微子味道本征态与质量本征态之间的混合角, $\Delta m_{ij}^2 = \Delta m_i^2 - \Delta m_j^2$ 。我们总共发现了 3 种味道的中微子, ν_e, ν_μ, ν_τ , 还没有排除 ν_s , 上面的公式需要推广到 3 种中微子振荡的情形。在 3 种中微子振荡框架下, 描述中微子振荡的参数有: 3 个混合角 (θ_{12}, θ_{23} 和 θ_{13}), 3 个质量平方的差值 ($\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$ 和 Δm_{13}^2 , 这 3 个质量平方差中, 只有两个是独立的) 和一个 CP 相位角 (δ)。当给定中微子质量的顺序后, 3 个质量平方差可以近似为两个质量平方差。这时中微子振荡的长度将完

全取决于这两个 Δm^2 差值的大小。一个 Δm^2 (Δm_{12}^2) 与太阳中微子实验密切相关。另一个 Δm^2 (Δm_{23}^2) 与大气中微子振荡实验密切相关。

中微子可能有振荡的最早线索来自于太阳中微子的研究 (位于美国南达科他的霍姆斯塔克矿井), 测到的电子中微子大概是预期值的 1/3。后来欧文密执安布鲁海文实验 (IMB) 和神冈实验测量 μ 中微子与电子中微子的比值 (粗略地说, 这个比值为 2), 测得的比值比预期值低 40%, 比值的计算精度为 5%。最新的结果来自于日本的超级神冈实验, 观测到 μ 和电子中微子的比值随这些中微子自产生点走过的距离而变化, 原因可以解释为 μ 中微子流强从产生点随不同的天顶角而产生了调制, 探测器自下而上观测到的中微子由于穿过了地球, 这些中微子的数目比来自于探测器上方大气顶端的中微子约少了一半。这个观测值非常依赖于中微子穿行的距离, 清楚地说明了中微子存在振荡。因为实验结果中电子中微子的流强不随角度变化, 说明振荡的末态是另外一种中微子, 比如说 τ 中微子。来自加拿大 SNO 实验, 有关太阳中微子的测量进一步给出了存在电子中微子振荡的证据, 这个实验对不同种类的中微子有一定的灵敏度, 利用超级神冈比较高的统计数字, 相比较后给出太阳上产生的电子中微子在到达地球时包含了其他中微子的结论, 因此说明了中微子有质量, 有振荡。

最近卡姆兰德 (KAMLAND) 测量周围 20 多个核反应堆产生的反电子中微子事例, 观测到的事例只有预期值的 60%, 用人工中微子源的方式也证实了中微子的消失, 且其特征与太阳中微子消失相同, 确认太阳中微子发生了振荡。

目前得到的中微子存在质量的证据还不足够强, 或者说参数测量还不精确, 因此进一步的实验是必需的。建造地下实验室, 通过测量由实验室产生的中微子束流, 或者测量从地球上不同角度来的中微子流强是否存在丢失, 或者直接测量到中微子发生振荡的末态都可以达到这个目的, 通过中微子束流的方法作测量经历了反应堆、短距离、中距离到长距离的过程, 而且这些测量仍然还在继续, 原因是至少存在 3 代中微子的条件下, 它的混合矩阵中参数比较多, 由于实验统计性的问题, 中微子能量的问题, 实验距离的问题, 探测器优化的问题等等限制, 很难设计或者进行一个实验而能够同时对多个未知参数作测量。随着对中微子性质越来越多的认识,

现在国际上热门的课题或对未来规划的认识是建设中微子工厂,在未建成中微子工厂前通过增加质子加速器流强来增加中微子流强的办法进行长基线中微子振荡实验。如正在运行的日本高能加速器研究中心到超级神冈的实验(K2K)、在未来几年内将要运行的米诺斯(MINOS)、伊科诺依(ICANOE)、奥普拉(OPERA)、日本强流质子加速器中微子实验(JHFnu)。如果我们规划基于利用未来中微子工厂进行超长基线中微子振荡实验,在这个实验之前,我们可以预计未来几年内目前将要进行的长基线中微子振荡实验可能会得到的结果:

(1) $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau, \nu_s$ (ν_s 为假设的一种中微子,它不与物质发生相互作用): 超级神冈实验通过测量物质效应和测量中性流作用的事例数将能够更清楚地区分 $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$ 还是 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振荡模式,如果与大气中微子联系的质量差 Δm^2 在约 $2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 左右,现有的长基线中微子振荡实验,包括 K2K、MINOS、时间再晚一些的 OPERA 和 ICANOE 实验将对 Δm_{23}^2 和 $\sin^2 2\theta$ 的测量达到 10% 左右的精度,如果 $\Delta m_{23}^2 < 2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, 那么将需要新一代的探测器装置,如莫诺利斯(MONOLITH)或更大的水切连柯夫探测器(100万吨)。

(2) $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$: 如果液闪中微子探测器实验(LSND)结果被布尼(BooNE)实验所证实,那么对其 Δm^2 和 $\sin^2 2\theta$ 的测量精度预期约为 10%,但中微子代数的框架结构也将因此而更加复杂(ν_s ?),如果 LSND 的结果不能证明是对的并且 $\sin^2 2\theta > 10^{-2}$, 那么就需要对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 作精确测量, K2K、MINOS、ICANOE 都有一定的灵敏度,如果 $\sin^2 2\theta_{13} < 10^{-2}$, 那么普通束流产生的中微子将很难观测到 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 的振荡,测量的灵敏度将需要提高至少一个数量级以上,需留待以后作测量。

(3) $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_s$: 太阳中微子的实验或更精确的反应堆实验,测量 $\bar{\nu}_e$ 的丢失将给出太阳中微子的丢失是否发生了 $\nu_e \rightarrow \nu_s$ 。但即使排除了 $\nu_e \rightarrow \nu_s$, 我们仍不能区别是 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 还是 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$, 而且普通的长基线中微子束流实验不会测到 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ 。

(4) ν_s : 如果 LSND、太阳中微子和大气中微子的实验都被证实是对的,那么可以确切地说 ν_s 是存在的,这将是一个大发现,那么就需要更多更精确的实验工作。

如上所述,我们可以看到中微子振荡的测量是

一个很复杂的物理,它不可能通过一两个实验给出全部参数的测量,而且通过现有的实验作改进也不可能将测量的精度提高多少,留待更精确测量的工作还很多。需要强流的中微子源,如中微子工厂,或叫 μ 子贮存环,主要的物理目标包括:

建立中微子振荡的框架结构

这需要测量所有的振荡几率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_x)$ 和 $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_x)$ 随 L/E 的变化关系,或者对振荡几率给出严格限定,通过这些几率相加求和来建立: ① $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) + P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) + P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau)$, ② $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau)$; 在 3 种中微子混合的框架下, ① ② 两种测量的和随 L/E 的变化都为 1, 如果存在 ν_s , 那么它们的和小于 1。普通的中微子束流能够对情形 ② 给出测量,但受制于 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 的统计性和 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 信号中来自于束流的固有本底,精度不会太高,情形 ① 的测量,包括 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ 的测量将只能通过中微子工厂实现。

测量中微子质量的模式

现有的数据结果在 3 代中微子框架下有两代中微子质量本征态的差很小,第 3 代与前两者质量差大,但并不知道三代之间是一代比较小,另外两代大,还是两代比较小,另外一代大,这可以通过测量它们质量差 Δm_{23}^2 的符号来得到,这个符号只能通过测量 ν_e 穿过物质时振荡几率与 Δm_{23}^2 的符号有关而得到,这是超过 2000 千米的超长基线中微子振荡实验的独特物理。

证实 MSW 物质效应

与 Δm_{23}^2 符号的测量方法相同,足够的 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 事例统计性可以测量 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ 的变化,验证中微子通过物质的 MSW 效应,这对天文中微子的观测和计算是重要的。

对混合矩阵元给出测量和限定

原则上,通过振荡几率的测量可以给出混合角的大小,但如果其中有个别的混合角确定得不精确,那么它就会影响到与它相关的其他混合角的确定,中微子工厂将对所有的振荡几率给出测量,而且这些测量一致性的验证也是非常重要的, ν_e 束流就提供了独立于 ν_μ 束流的另一套测量结果。

对轻子家族的 CP 破坏给出测量值或限定

目前为止大部分振荡模式都给出小的 CP 破坏, LMA 的模式有可能通过中微子工厂比较 $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ 和 $\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_\mu$ 振荡的几率,给出一个 CP 破坏的测量值,这个精确的测量是现有普通中微子束流的精度所达不到的,因而 CP 破坏值只能通过中微子工厂给出。

着眼于未来中微子工厂的 μ 子能量为 $20\text{GeV} \sim 50\text{GeV}$, 每年产生大于 10^{19} 的 μ 衰变, 预期需要超过 2000 千米的振荡基线, 10 000—20 000 吨的探测器体积将可以给出较好的物理结果。

由于中微子工厂预期的流强比现有的普通加速器产生的中微子流强大 100 倍, 因此长距离测量中微子振荡, 即使用现在的眼光来看也已成为比较现实的事情。从已有的实验结果和现有的理论表述, $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$, 比较小, 但它又没有理由是一个非常小的数值, 如果我们期望测量 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$ 振荡的大小, 期望测量不同代之间中微子质量间的层次关系, 那么就必须在世界范围内建立一个中微子工厂和与其相应的探测器。

在过去的 3 年里, 我国与日本同行就有关长基线中微子振荡的实验进行了广泛的交流, 分别各自成立了研究组, 完成了两篇进行超长基线中微子振荡实验的报告, 由于地理位置的关系, 从日本到北京或者北京附近的地方直线距离约为 2000~3000 千米, 这是一个既有较小物质效应, 又能够得到好的物理结果的距离, 这时中微子工厂的倾角仍不太大(小于 10 度), 因而近点探测器的建设还不构成太大的困难。

再长距离的中微子振荡实验也不是没有可能, 因为中微子工厂的尺寸毕竟较小, 因此也可以设想 μ 子贮存环与地面有一定大小的倾角, 如果能够通过其他方法不依靠近点探测器减小测量的系统误差, 那么再长基线的中微子振荡实验也许可行。这增加了这样的可能, 即未来中微子工厂也许不是同时建立束流和探测器, 而是修建束流瞄准已有的探测器。这样的例子已经有了, 如修建欧洲核子中心中微子束流瞄准格兰萨索的探测器; 由于已经存在了超级神冈探测器, 因而 K2K 束线修建的方向就是已有的目标。因此与争取日本将中微子束流指向中国同样重要的是我们建立中微子的探测器, 这样也就加大了争取束流指向的可能性。

二、用反应堆产生的中微子测量 θ_{13}

基于中微子工厂考虑的超长基线中微子振荡实验也许在时间上还太远, 不确定性较大。目前国际上一个新的、正在热烈讨论的课题是利用反应堆产生的反中微子进行 θ_{13} 的测量, 到目前为止, 实验上测量的中微子混合角中都是大混合角, 只有 θ_{13} 的值很小, 仅给出其上限。这些测量值与 3 代夸克间的混合角测量结果是不同的, 它们之间为什么如此不

同? 有没有联系? 轻子有没有 CP 破坏、T 破坏或 CPT 破坏? 尽管实验上给出的 θ_{13} 上限值比较小, 但 θ_{13} 大小与 CP 破坏成正比, 实验仍有必要对 θ_{13} 作更精确的测量, 进而测量 CP 破坏的大小, 这对我们理解早期宇宙中中微子所起的作用至关重要, 它关系到能否解决物质与反物质世界不对称之谜。不同于一般的加速器产生 ν_μ 束流的情形, 反应堆产生的 $\bar{\nu}_e$ 的测量直接与 θ_{13} 的值有关, 不与其他参数相互简并, 相关性也很小, 因而我们可以直接测量 θ_{13} 。如果我们直接得到 θ_{13} , 那么利用 θ_{13} 的值可以结合加速器产生中微子束流的实验来确定混合角 θ_{23} 的大小。更重要的是 θ_{13} 的测量将有效地决定下一步长基线中微子振荡实验发展的方向, 为实验的规划提供依据。

在国内利用广东大亚湾反应堆也可以进行实验。在距大亚湾发电站约 1 千米的岭澳建有另一个发电站, 它们的总功率将近 12GW, 这是世界上靠得很近的两个反应堆功率之和中最大的, 比现有世界上大部分的地点具有明显的优越性。日本具有世界上功率最大的反应堆群, 也在考虑利用反应堆进行 θ_{13} 的测量, 但周围太多的反应堆也会带来本底的不确定性。我们还需要考察大亚湾周围山的高度和距离, 以利于建设地下实验室, 减小本底。

实验的要点是建立两三个几十吨至一百吨的完全相同的探测器, 放在离反应堆几百米至 2~3 千米远的位置进行 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ 的测量, 两三个完全相同的探测器将有效地减小由于反应堆元素成分不同、反应截面的不确定性、反应堆功率大小变化及反应堆产生的 $\bar{\nu}_e$ 能量变化、探测器有效体积和探测效率等因素带来的系统误差, 将系统误差的大小控制在 1%~2% 的范围, 将现有休斯(CHOOZ) 给出的 θ_{13} 测量精度提高一个数量级。当然这个误差的要求很小, 是一个高精度的实验, 具有很大的挑战性。

实验的下一步将把探测器移动至距反应堆约 100 千米的位置, 对应于混合角 θ_{12} 发生振荡的第一极大位置, 实现对 θ_{12} 的精确测量。反应堆实验与加速器束流有固定指向的实验相比较具有很大的优越性, 摆脱了对加速器束流的依赖, 将大大地节省实验费用。

鉴于大亚湾具有大功率反应堆和近距离有山, 可以实现低本底测量, 这给我们提供了一个近期开展非常有意义的中微子物理研究的机会。

三、其他的中微子物理

中微子天体物理开始于 1965 年戴维斯的太阳中微子实验, 是作为研究太阳中微子核心热核反应的副产品出现的, 太阳中微子提供了我们检验离我们最近的太阳内电弱和核反应物理的惟一机会, 用于中微子通量计算的是标准太阳模型。太阳距地球约 1 亿千米, 加之它产生低能量的中微子, 因此它对中微子质量平方差的灵敏度可到 $\Delta m^2 \approx 10^{-12} \text{eV}$, 这个数值比地球上中微子实验小好几个数量级, 而且, 中微子在从太阳中穿出来之前经过了 $\approx 10^{10} \text{g/cm}^2$ 的物质, 它与物质的相互作用可以增大振荡的几率 (MSW 物质效应), 因此低能太阳中微子的测量将给出大角度混合解的验证。测量的结果应该是低能中微子比 ^8B 中微子的存活几率要高; 未来实验累积足够的 pp 太阳中微子数据将给出最好的 θ_{12} 和 Δm_{21}^2 的测量值; 低能中微子 (pp 和 ^7Be) 流量的精确测量还将进一步限定 ν_e 到 ν_s 的耦合, 因为即使 ν_s 与其他中微子有很小的耦合也会在宇宙学中有很大的影响; 太阳中微子测量的探测器还是一个极好的超新星探测器, 对来自超新星爆发的中微子到达时间、能谱、时间谱、味道的测量都是极其重要的; 太阳中微子的测量还对太阳物理检验提供重要依据, 对了解太阳内部核反应链的周期活动非常重要, 未来太阳中微子的探测器期望能够测量弹性散射和带电流的相互作用, 测量精度为 1% ~ 3%, 要求能够区分到达的中微子的味道。

双 β 衰变

自然界遵从 CPT 对称性, 对夸克和轻子, 每个粒子有它的反粒子, 它们电荷相反, 但质量和自旋却相同。中微子没有电荷, 因此正反粒子的反演性质并不清楚。正反中微子可以不同 (狄拉克中微子) 也可能相同 (马约拉纳中微子)。

双 β 衰变可以探测正反中微子的性质, 由偶数质子和偶数中子组成的核具有超稳定的束缚态, 与它相邻的奇奇核由于不稳定具有较大的质量, 因此单 β 衰变的过程是禁戒的, 但偶偶核却有可能通过二级弱作用过程衰变到质子数改变为 2 的下一个偶偶核, 发生双 β 衰变。如果中微子是狄拉克型的, 那么双 β 的能量和呈连续分布, 轻子数是守恒的。如果中微子是马约拉纳型的, 那么末态可以没有中微子出现, 双 β 的能量和为固定值, 这时的轻子数守恒被破坏。

双 β 衰变将确定中微子是否是马约拉纳型, 是

否有轻子数破坏; 中微子振荡只能确定中微子间是否有质量差, 但不能确定中微子质量的标度, 双 β 衰变最有可能给出这个标度值; 轻子数破坏的双 β 衰变, 和 CP 破坏联合有可能帮助我们理解重子数的起源; 如果存在双 β 衰变, 那么将是一个很重要的核衰变模式, 影响到其他多达 50 个的稳定核, 双 β 衰变促进了核结构理论的发展。

在过去一些年双 β 衰变实验进展很快, 包括通过采用高纯度的富同位素材料, 减小本底, 改进能量分辨, 减小宇宙线本底。对双 β 衰变寿命的下限限定, 平均每两年提高 2 倍, 也有双 β 衰变的摩尔定理成立。

大气中微子实验

原初宇宙线的质子和核子在到达大气顶端时, 发生强相互作用产生次级宇宙线, 次级宇宙线中的 $\pi(K)$ 发生衰变, 产生一个电子中微子和两个 μ 子中微子, 因此一个地下探测器可以同时测量来自地球不同角度的中微子, 随角度的不同, 中微子穿过的距离可以从 10~ 13000 千米不等, 对 GeV 能量的中微子, L/E 测量的范围为 1~ 10^5 千米/GeV, 对 Δm^2 的测量灵敏度到 10^{-4}eV^2 , 而且从上到下和从下到上的中微子间可以做自洽检验, 因此通过大气中微子的测量可以测量中微子的振荡模式, 提高测量振荡参数的精确性; 可以测量 ν_τ 出现 (Super K 的结果支持 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振荡); 可以验证地球的物质效应; 可以测量几个 GeV 的中微子与核作用的响应函数和裂变产生, 这对核结构理论是有意义的, 作用截面的测量对超新星和太阳中微子问题是有意义的。探测器可以是现在所有用于中微子实验的液体和固体的探测器。

四、宇宙学和天体物理

暗物质

微波背景辐射和大尺度结构的精确测量使我们不得不接受宇宙中充满了暗能量和暗物质的事实, 地下实验最有希望确定暗物质的组成。物质成分的比例远远超过重子物质强烈地说明存在有非重子的物质成分, 这些物质产生于早期热宇宙中, 现在作为一个物质背景而存在, 对宇宙膨胀和大尺度结构产生影响, 除了中微子外, 另外最可能的候选者为轴子和超对称中性子, 越轻的轴子越容易产生质量为 10^{-5}eV , 速度为光速 1 髓的轴子玻色凝聚态, 可以成为暗物质候选者。一种测量方法是通过寻找放在强磁场中微波腔内 $a \rightarrow \gamma$ 的转换。这个实验不要求地

下实验室。但另外的候选者,最轻超对称粒子(LSP)的寻找却需要低本底的地下实验,寻找中性、弱作用、大质量(WIMP)的粒子,比如 DAMA 实验的验证,云南站事例的检验,LVD 事例的解释,目前至少有 20 个暗物质的实验在进行,几乎所有的地下实验室都有一个以上的实验。探测器除传统的锗外,还有液氙、测量反冲负离子的时间投影室等。

超新星中微子探测

从太阳中微子和质子衰变实验中意外记录到 1987A 超新星的爆发是一项惊人的成就。日本神冈和 IMB 合作组同时测量到的中微子事例表明重质量星发生坍缩,随后质子中子星(protonneutron)冷却这个粗略图像是对的,释放的中微子能量约为 3×10^{53} 尔格,冷却时间约 3 毫秒。这些数据还对许多粒子和天体物理给出许多重要的约束,包括对中微子质量和磁矩的约束,包括异常的冷却机制,比如轴子和大质量狄拉克中微子的约束,甚至包括超维理论。

超新星的理解对天体物理的很多方面都是很关键的,在星系的长时间演化中,超新星爆发提供了重要的能量来源。一般地认为一半的重核形成于质子中子星中的快速中子俘获,另一半与超新星形成的激波加热有关,或者说爆炸形成了核。

超新星可以产生各种味道的中微子。由于高密度,因此在核内部形成中微子陷阱,又由于温度和作用的不同,不同味道的中微子具有不同的能量,因此对中微子的测量可以研究中微子的振荡效应、物质效应、超新星机制;当质子中子星冷却时,有可能坍缩成为黑洞,对应的中微子光变曲线发生截断;同时对引力波、光学和中微子信号的测量可以对超新星的坍缩机制形成多方的约束。

银河系内的超新星爆发频率为每 30 年一个。探测器需要能够测量能谱、味道随时间的变化,能够测量带电流和中性流作用,方向的测量也是重要的,因为它可以很快地为光学观测提供帮助。除了水切连柯夫探测器、液闪和液氙探测器外,也可以有较便宜的采用铅基的探测器,通过 $^{208}\text{Pb}(\nu_e, e^-)^{208}\text{Bi}^*$ 发射一到两个中子测带电流作用,通过 $^{208}\text{Pb}(\nu_x, \nu_x)^{208}\text{Pb}^*$ 发射 $n, 2n$ 或者 γ 测中性流相互作用,也可以用放射化学的方法做类实时的测量,如 $^{127}\text{I}(\nu_e,$

$e^-)^{127}\text{Xe}$ 。

核天体物理

核天体物理研究和测量恒星系统演化不同阶段的静态核燃烧过程、时间跨度和爆炸的起始状态,研究的另外一方面是新星的核合成,X 射线爆和超新星。核天体物理模型精度的提高要求截面测量精度的提高。太阳标准模型对中微子流强的计算需要确定 pp 链的反应率,CNO 反应截面,特别是氦燃烧的反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 对 II 类超新星的起源和演化有重要的作用,这些测量对建立 SNIa 标准烛光的定量模型有帮助。由于极低的事例率,在地面测量有很大的本底。因此在地下建立一个加速器实验室进行反应截面的测量将具有极大的竞争能力。

五、质子衰变

现有的实验结果给出的质子寿命大于 10^{33} 年,但质子的稳定性从上世纪 70 年代起一直受到质疑,自那时起理论家就开始构想将夸克和轻子统一起来的强、电和弱相互作用的大统一理论。超对称的大统一理论在约 10^{16}GeV 附近能够将 3 种相互作用汇聚起来极大地鼓舞了大家。

最新测量的中微子质量模式隐含了存在约 $0.3 \times 10^{15}\text{GeV}$ 右手马约拉纳中微子的跷跷板(Seesaw)机制,能量标度与大统一能量相符。但大统一理论最直接的预言是核子衰变为轻子物质,如电子和介子,这显示夸克轻子的统一性和轻子起源的概念。

探测器将是百万吨的水契伦柯夫探测器或大规模的液氙探测器。百万吨的探测器同时可以进行长基线中微子振荡测量、测量 CP 破坏,可以进行大气、太阳和超新星中微子的实验。

六、其他学科

地球科学

地下岩洞的长期稳定性,时间与周围环境的影响以及与理论模型比较。这些研究对于长寿命核废料的储存和今后洞穴的设计都有意义。

微生物学

研究生物群在非原生和苛刻环境下的生存能力和活动能力;研究本地微生物群和周围环境对它们的影响;研究深层地下有液体的断层和岩石断层间生物群的差别,以此考察生物群在极端环境下的生存。



捕捉引力波

柯惟力

(江苏广播电视大学基础部 南京 210013)

一、足够精确的 牛顿引力理论

在宏观物理世界中,引力是一种主要的作用。太阳东升西坠,地球四季交替,海水潮涨潮落,众多自然现象都受到引力的支配。1687年,牛顿在前人的研究基础上,导出了万有引力定律。利用万有引力定律可以圆满地解释哥白尼的学说和开普勒的行星运动三定律。牛顿引力理论的精彩之处还有准确地预言了海王星和冥王星的存在,指导天文学家成功地发现了这两颗太阳系行星。

按牛顿的引力理论,两物体间的引力作用是瞬间完成的。但爱因斯坦认为,光速是任何作用的极限速度,因此引力作用不可能在瞬间实现。1905年,爱因斯坦发表著名的历史文献《论动体的电动力学》,建立了狭义相对论。在以后的十余年间,爱因斯坦进一步考虑引力作用,建立了广义相对论。爱因斯坦同时指出可以利用三个实验来验证广义相对论。第一个是水星近日点的进动,困扰了天文学家多年的难题,用广义相对论去讨论几乎是迎刃而解。第二个是光线在引力场的弯曲偏转,爱因斯坦建议观察日全食时的天文现象。1919年英国皇家科学学会派出的日全食观测队远征南半球,观测结果与广义相对论的预言吻合。虽然第三个引力红移的实

验由于测量手段的限制,多年后才实现。爱因斯坦已因日全食观测结果的公布而声名鹊起,誉满全球,由此奠定20世纪最伟大的自然科学家的基础。

不过在20世纪上半叶,对于人们研究的绝大多数天文现象,牛顿的引力理论已经可以给出足够精确的解释。广义相对论仅仅给出一个与 $2GM/c^2R$ 有关的无量纲的修正项,来表征引力场的强弱。表1给出典型星体的 $2GM/c^2R$ 的值,这里 G 是牛顿引力常数, M 是星体的质量, R 是星体的半径。很明显,对人们熟悉的月球、地球、太阳而言,在引力最强的星体表面,修正值 $2GM/c^2R$ 只有 $10^{-10} \sim 10^{-6}$,微不足道。对当时已知的密度高达 $10^9 \sim 10^{12} \text{kg/m}^3$ 的最稠密星体——白矮星,修正值也仅有 10^{-3} 左右,似乎不用广义相对论去讨论也行。

表1 典型星体的 $2GM/c^2R$ 值

星体	M (kg)	R (m)	$2GM/c^2R$
月球	7.35×10^{22}	1.74×10^6	10^{-10}
地球	5.98×10^{24}	6.38×10^6	10^{-9}
太阳	1.99×10^{30}	6.96×10^8	10^{-6}
白矮星	10^{30}	10^6	10^{-3}
中子星	10^{30}	10^4	10^{-1}

直到20世纪60年代之后发现脉冲星(后来人们证明脉冲星就是中子星),特别是1974年霍尔斯(R. A. Hulse)和泰勒(J. H. Taylor)发现中子星PSR1913+16,其密度数量级达 10^{18}kg/m^3 ,直径只有

精密核分析

低本底材料的开发和应用,用于下一代的双 β 衰变,暗物质寻找和太阳中微子实验。也有可能生产高放射性纯度的材料应用于商业。

当然,中国物理学家在中微子振荡实验这样的前沿课题中做出贡献无疑是重要的,但是通过这样的实验建立一支从事非加速器物理,进行多目标地下实验的队伍将更有意义,更为重要。一个好的地下实验室不是一成不变的,它会随物理的发展而不断调节、更新,如日本的神冈实验室,意大利的格兰萨索,美国的苏丹地下实验室等等,无一不与时俱进,继续发展,而且现在还在不断建设和建设新的多用途的地下实验

室,因为已有的实验室过去所取得的成绩是有目共睹的。一个成型的地下实验室将为下一步的非加速器物理发展提供平台、基础、空间,它的存在可以为新物理工作的开展节约时间,不至于因缺少基础一切从头开始而丢失机会。我们应该抓住粒子天体物理刚开始发展、还没有取得有突破性进展的时机,从现在开始努力做出有实质意义的贡献。

作者简介

杨长根,1962年7月出生于山西太原,1982年毕业于中国科学技术大学近代物理系。1985年起在中国科学院高能物理所工作。现为高能物理所研究员,博士生导师,从事高能粒子实验物理的研究。

现代物理知识