

探秘中微子：宇宙的隐形信使与JUNO的科学征程

王贻芳

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、中微子：宇宙中最神秘的基本粒子

中微子是构成物质世界的最基本的一种粒子，在粒子物理标准模型的12个基本粒子中占据3个席位(电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子，图1)，占比达1/4。这种微小粒子的独特之处在于其极强的穿透性——它们能以接近光速轻松穿过地球而几乎不与任何物质发生相互作用(每100亿个中微子穿过地球，仅有约1个会与物质发生反应)，因此被粒子物理学家形象地称为“宇宙的隐形信使”。中微子携带着关于宇宙诞生与演化的古老信息，是探索自然的关键探针之一。

我们的周围充斥着大量中微子：人体通过放射性同位素钾-40的衰变，每天平均产生约3.4亿个中微子(数量与体重呈正相关，体重每增加10公斤，日产生量约增加3 000万个)；太阳内部的核聚变反应每秒钟发射约 10^{17} 个中微子(相当于地球表面每秒每平方厘米接收650亿个太阳中微子)；宇宙大爆炸残留的原初中微子更是遍布整个宇宙空间，每立方

厘米约有300个，其温度仅比绝对零度高2开尔文(图2)。此外，地球内部铀、钍等放射性元素的衰变(地球中微子)、超新星爆发(超新星中微子)、反应堆和粒子加速器(人工中微子)等也是重要的中微子来源。

目前，中微子研究已成为粒子物理、天体物理与宇宙学交叉研究的热点领域。

二、中微子研究的辉煌

自1930年泡利为挽救 β 衰变中的能量守恒定律、预言了中微子的存在之后，中微子的探索便开启了充满挑战与惊喜的征程。1933年，费米正式将这种假想粒子命名为“中微子”，并构建了描述其与物质相互作用的费米理论。

1956年，美国科学家莱因斯和科万在核反应堆旁首次直接探测到电子反中微子(实验灵敏度达 10^{-30} cm^2 的相互作用截面)，证实了泡利的假说，人类首次“看见”了这种幽灵般的粒子，莱因斯斩获1995年诺贝尔物理学奖。

此后，中微子研究进入快速发展期。1962年，

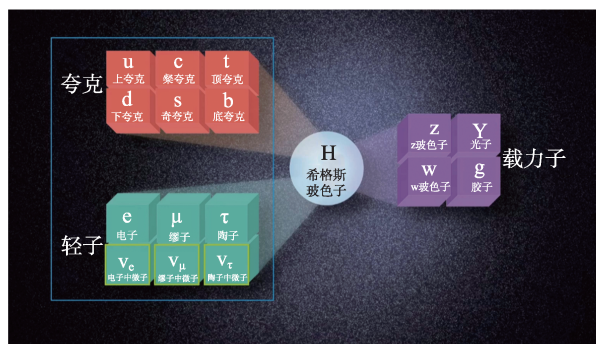


图1 粒子物理标准模型中有三种味道的中微子

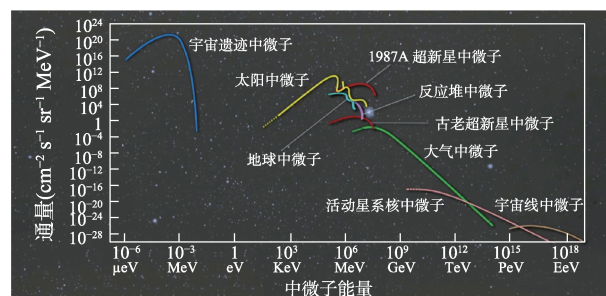


图2 已测量和预期的自然中微子与反应堆中微子通量(arXiv: 1 207.495 2)

美国布鲁克海文国家实验室在加速器上开展中微子束实验,首次发现了 μ 中微子,证实了中微子存在不同“味”。莱德曼、施瓦茨和斯坦伯格也凭借这一成果荣获1988年诺贝尔物理学奖。

1968年,美国雷蒙德·戴维斯领导的Homestake实验首次探测到太阳中微子,却意外发现其通量仅为理论预测的1/3,引发持续三十余年的“太阳中微子失踪之谜”。1987年,日本神冈实验与美国IMB实验同时探测到超新星1987A爆发释放的中微子,首次证实中微子与恒星爆炸的关联,为天体物理研究打开新窗口。小柴昌俊(神冈)和戴维斯(Homestake)因分别探测到超新星中微子和太阳中微子获得了2002年诺贝尔物理学奖。

1998年,日本超级神冈实验发现大气中微子振荡现象,首次证明中微子具有质量,彻底颠覆了粒子物理标准模型中“中微子无质量”的假设。2001年,加拿大萨德伯里中微子观测站(SNO)公布了第一阶段实验结果,发现太阳中微子中的电子中微子确实丢失了。2002年,SNO进一步测量了太阳中微子的三种“味”,完整验证了中微子振荡理论,其项目负责人麦克唐纳与日本超级神冈实验的梶田隆章共同获得2015年诺贝尔物理学奖。至此中微子研究已获得四次诺贝尔物理学奖(图3)。

三、中微子振荡

中微子研究的核心问题聚焦于其质量属性:中微子质量不仅决定了其自身振荡模式,更深刻影响

着宇宙演化的进程。宇宙学标准模型要求中微子具有非零质量,否则大尺度宇宙结构将无法形成。中微子振荡是探测中微子质量最为灵敏的手段。若中微子质量不为零,其质量本征态与弱作用本征态(味)可能不一致,进而发生振荡(在飞行过程中,一种味中微子会转化为另一种)。在振荡几率公式里(图4),当 Δm^2 (质量平方差)不为零时,振荡便会发生。因此,振荡现象直接证明了中微子质量不为零。

中微子振荡的概念由意大利物理学家布鲁诺·庞蒂科夫(费米的学生兼同事,1950年移居苏联)于1958年提出。三种中微子的振荡可以通过一个 3×3 矩阵描述,中微子味本征态和质量本征态之间的关系由PMNS(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)矩阵描述,该矩阵可分解为四个子矩阵的乘积,分别对应大气中微子振荡(θ_{23})、太阳中微子振荡(θ_{12})、反应堆中微子振荡(θ_{13})及CP对称性破坏相位(δ),加上马约纳相位(ρ, σ)。

现在一共有6个中微子振荡自由参数和2个马约拉纳相位参数,其中马约拉纳相位不影响中微子振荡,仅出现在轻子数破坏过程(如无中微子双贝塔衰变)中,与中微子是否为自身反粒子直接相关。如果中微子是马约拉纳粒子,即它自身就是自己的反粒子,那么这两个相位将在无中微子双 β 衰变等过程中发挥重要作用。对马约拉纳相位的研究,有望解决中微子的本质问题提供关键线索。



图3 中微子发展历程,已获得四次诺贝尔物理学奖

$$\text{中微子振荡几率}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \frac{\sin^2(2\theta)}{\text{振幅}} \frac{\sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)}{\text{振荡频率}}$$

图4 中微子振荡几率

$$\text{振荡矩阵}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & e^{-i\delta} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\rho} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

大气中微子振荡 反应堆中微子振荡 太阳中微子振荡 马约纳拉相位

θ_{23} θ_{13} θ_{12} ρ, σ

图5 中微子振荡矩阵

中微子振荡概率公式中的质量平方差参数 Δm_{21}^2 和 Δm_{31}^2 (或 Δm_{32}^2) 是中微子振荡的核心参数, 它们控制中微子振荡的周期和频率, 就像不同音高的琴弦振动频率不同。PMNS 矩阵参数则控制振荡幅度: 三个混合角 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) 像调节旋钮, 决定中微子“变味”的概率上限。CP 相角 δ 决定正反中微子振荡概率差异, 与宇宙正反物质不对称性相关。

中微子振荡理论自 20 世纪 50 年代末提出后, 直至 70 年代才出现实验迹象: 戴维斯为验证太阳模型测量太阳中微子通量, 发现结果仅为标准太阳模型预期的 1/3 (即“太阳中微子失踪之谜”); 80 年代多个实验观测到大气中微子反常 (如小柴昌俊领导的神冈实验仅测得预期通量的 2/3), 但彼时学界对振荡现象仍存争议。

1998 年超级神冈实验 (5 万吨探测器, 1 万支 20 英寸光电倍增管, 图 6) 观测到天顶与地底中微子通量的差异, 首次明确支持振荡理论; 2002 年加拿大 SNO 实验 (1000 吨重水有机玻璃球探测器) 通过区分不同中微子通量, 验证总通量与太阳模型一致, 最终确认振荡现象。该实验由华裔物理学家陈华生于 1985 年发起 (1987 年去世), 1988 年由阿瑟·麦克唐纳接任负责人。超级神冈的梶田隆章和麦克唐纳因该成果获 2015 年诺贝尔奖。诺贝尔奖的归属有时存在一定偶然性, 但实验的科学价值始终是核心。

四、大亚湾中微子实验: 打开下一代中微子研究的大门

大亚湾中微子实验是中国主持的一项具有重

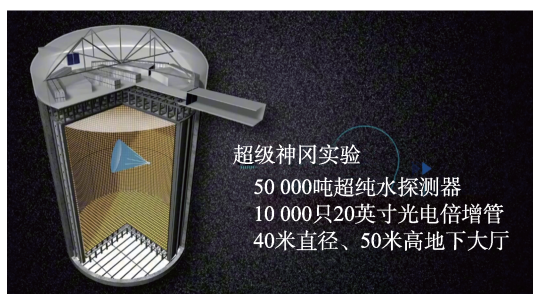


图 6 超级神冈(SuperKamiokande)探测器规模

大国际影响力的大型国际基础物理实验, 旨在精确测量中微子混合角 θ_{13} 。这也是中美两国在基础科学研究里面规模最大的合作, 也是美国能源部在海外投资仅次于大型强子对撞机的粒子物理项目, 在国内也是首次有国家地方和企业共同支持的基础科学研究。该实验位于中国广东省深圳市大亚湾核电基地, 利用大亚湾核电站群产生的强大、稳定的反应堆中微子源, 通过远近点之间的相对测量, 精确捕捉中微子在传播过程中的振荡现象。2012 年, 实验团队成功发现了中微子第三种振荡模式, 并精确测量了其振荡幅度 $\sin^2 2\theta_{13}$, 这一成果开启了未来中微子物理发展的大门。

大亚湾中微子实验于 2003 年提出科学构想, 2006 年获国家批准并组建国际合作团队, 2007 年正式启动隧道与地下实验室建设工程 (图 7)。作为我国粒子物理领域首个重大国际合作项目, 其建设过程凝聚了中美等多国科研力量——开工典礼上, 8 位领导代表各单位支持经费与资源投入, 为实验奠定了坚实基础。2011 年探测器完成安装并启动试运行, 2012 年即取得重大突破, 精确测量出中微子混合角 θ_{13} , 填补了粒子物理标准模型的关键空白, 2020 年底实验完成使命关停。

大亚湾中微子实验能跑赢国际竞赛很快并精确测得 θ_{13} , 得益于它的创新实验方案。方案首先通过远近点之间的相对测量消除关联系统误差, 采用 8 个全同探测器模块化布局, 通过远近点对比测量显著降低系统误差, 精度达到 0.2% 的国际领先水



图 7 2007 年大亚湾中微子实验开工典礼

平。同时我们的多重宇宙线反符合探测器,将当时国际上一般大约在 95% 的探测器效率提高到 99.5%。独创的多模块探测器设计方案以及关键材料突破、工艺创新共同构成了大亚湾中微子实验探测器方案的核心优势。

我们在三个月之后,就非常清楚地看到了从反应堆出来的电子反中微子,在到达我们的远点探测器 1.6 千米的位置之前有 6% 左右消失了,即有 6% 的电子反中微子变成了其他的中微子,转换成中微子振荡幅度就是 $\sin^2 2\theta_{13}$ 约为 0.092,误差约为 20%,对应于 5.2 倍的统计显著性, θ_{13} 只有千万分之一的几率为 0(图 8)。该结果于 2012 年发表后,获得广泛关注及一些国际国内奖项。

大亚湾实验的意义非常重要,首先它是粒子物理标准模型的 28 个最基本的参数之一,也是测定 CP 破坏相角和质量顺序的必要条件。2012 年至 2020 年,大亚湾实验测量 θ_{13} 的精度从 20% 左右提高至 2.8%,我们相信这个误差还会略有减小,且未来二三十年内很难被超越。 θ_{13} 这个参数比我们原来的猜想大了 10 倍,这是一个非常好的消息,我们可以用现有的技术建造下一代中微子实验,包括中国的江门中微子实验,美国的 DUNE 实验和日本的 Hyper-K 实验,其目标就是测量剩下的中微子振荡参数:CP 破坏相角和质量顺序(图 9)。

五、江门中微子实验:地下 700 米的中微子捕手

我们在 2007 年大亚湾中微子实验项目开工建

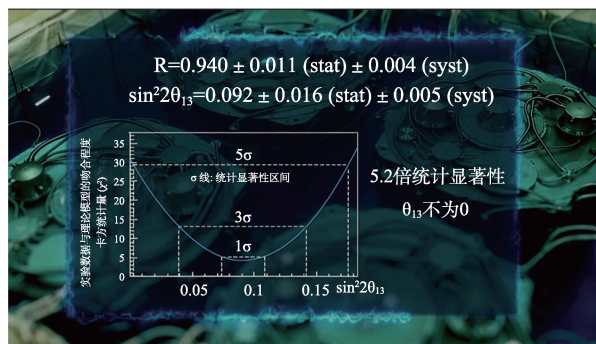


图 8 大亚湾中微子实验的结果



图 9 三大下一代中微子实验拟解决中微子振荡参数中的 CP 破坏的相角和质量顺序

设后,就开始考虑下一步实验,经过一年多的讨论,在 2008 年基本确定了实验方案,就是江门中微子实验,主要目标是测量中微子振荡的下一个参数——质量顺序,还可以精确测量中微子的其他振荡参数,研究超新星、地球、太阳中微子,寻找质子衰变等等,同时这样一个实验也可以在 2030 年之后升级为一个世界最灵敏的双 β 衰变实验,测量中微子的绝对质量,判断它是不是马约拉纳粒子等等,所以它的科学寿命应该至少有 30 年。

2008 年提出的江门中微子实验方案,在 2012 年大亚湾成果发布后迅速获批。2015 年开工,经过十年建设,2025 年完成探测器调试并正式运行。实验选址于距阳江、台山核电站等距 53 千米处(偏差不得超过 200 米,以确保灵敏度),并利用方圆三四十千米内唯一的一块花岗岩(直径约 2 千米)(图 10),建设地下实验大厅。中微子通量与距离的平方成反比,当两个核电站产生的中微子都到达探测器时,相当于中微子源增加了一倍,提高了实验精度,



图 10 JUNO 实验利用核电站的选址示意图

或者在同等精度下,可以将探测器造价降低一半。非常幸运的是,我们能有这样一个最佳场所来开展此项实验。

通过精准测量反应堆中微子能谱,我们能够确定中微子的质量顺序。如图蓝线和红线分别对应中微子质量的正序与反序,只有探测器具备足够的能量分辨率,才能够测量出这些细微结构,并判断其相对位置,测定中微子的质量顺序(图11)。

鉴于该探测器距离反应堆53千米,其质量必须足够大,才能有效捕捉信号。2万吨液体闪烁体可

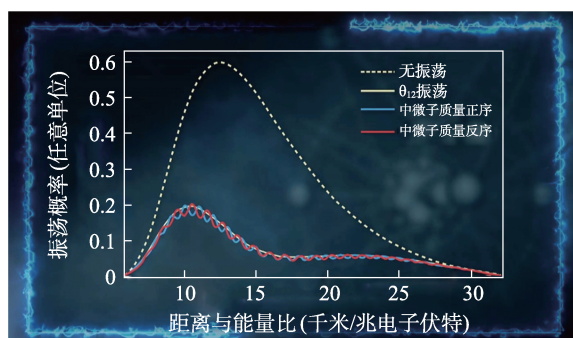


图11 中微子能谱,红蓝线小结构对应中微子质量顺序

获得日均约60个中微子事例,这既是满足实验要求的最小规模,也是经综合评估后确定的最大可行的探测器,比此前国际最大的液体闪烁探测器大20倍。同时,该探测器需具备超高的能量分辨率,至少要比国际最优水平高出1倍,方能分辨细微的能谱结构。此外,还需要将放射性本底降至国际领先水平。

经过7年的不懈努力,JUNO建成了跨度近50米的地下实验大厅,成为世界上跨度最大的人工地下实验室(图12)。

JUNO的中心探测器运用创新的两层结构设计,核心是一个直径35.4米的有机玻璃球,球内装载2万吨液体闪烁体,用于捕捉中微子信号。该球体由外层直径41.1米的不锈钢网壳支撑,网壳上安装了4.3万只光电倍增管及读出电子学设备,这些设备负责将中微子与液闪作用产生的微弱闪光转化为电信号(图13)。整个结构被安置在地下44米深的圆柱形水池中,水池内充满超纯水既作为屏蔽层以减少宇宙射线和伽马射线的干扰,又为有机玻璃球及其内部液体提供浮力支撑。

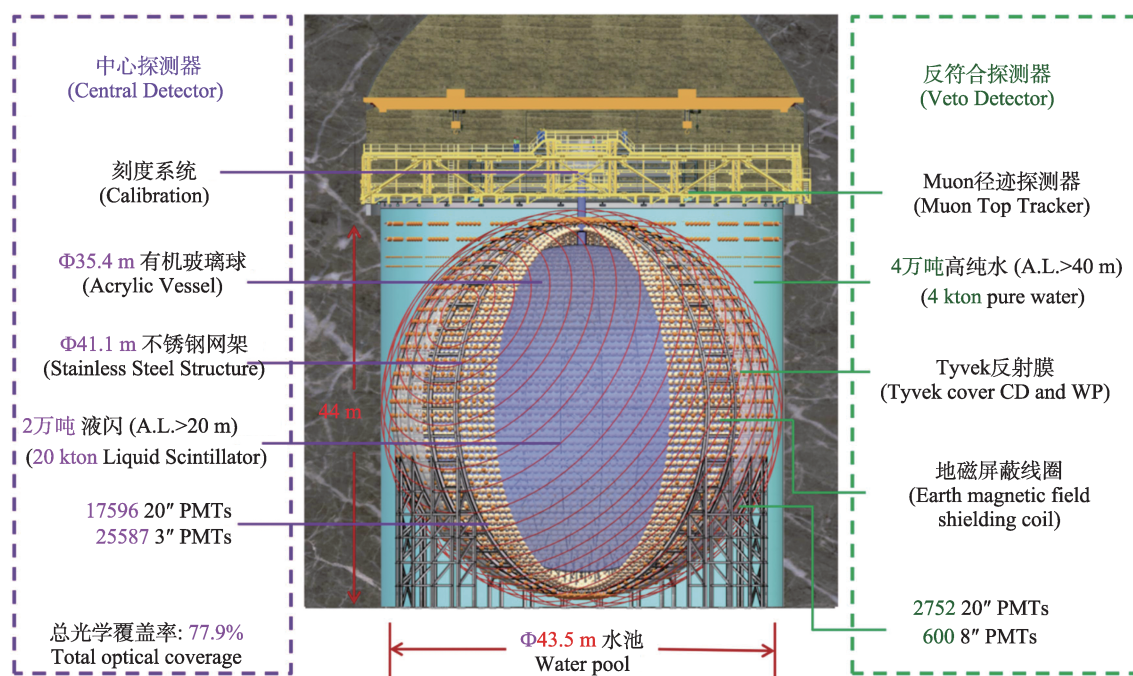


图12 JUNO探测器关键参数

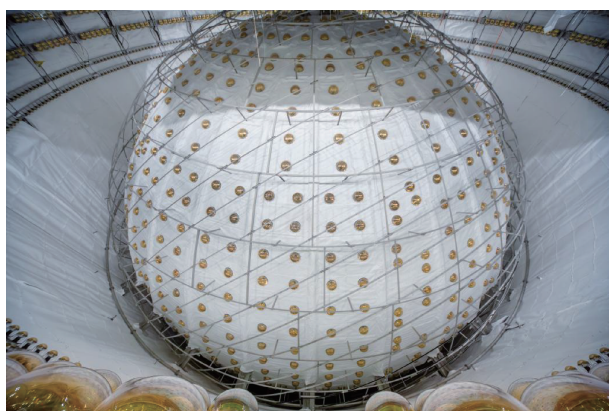


图13 完成安装后灌注液体前的JUNO中心探测器

历时三年,有机玻璃球建造完成。该球直径35米、壁厚12毫米,为全球同类容器最大。

JUNO的有机玻璃球内填满了液体闪烁体,其纯净度与放射性本底控制是核心难题。实验要求2万吨液闪中杂质总量需 ≤ 8 毫克,每克液闪中铀、钍含量 $\leq 10^{-17}$ 克,衰减长度 ≥ 20 米。为此,项目组建造了5000吨烷基苯存储罐,并通过一系列工序来处理液闪(图14)。

为什么我们如此强调中心探测器液闪的纯净度呢? JUNO探测器的液闪规模宏大,循环过滤清洁一次需要6个月以上,而1000吨的探测器,循环一次最多只需一个月,它可以停止取数一年来达到实验要求。而JUNO必须一次性达到指标,之后无

法再进行纯化。因此,在研制期间,我们要控制原材料的放射性本底,通过各种清洗、筛选等手段,对本底进行分配和控制。我们为有机玻璃打造了全新的特殊生产线,并驻场监督指导,最终使有机玻璃达到了我们所需的放射性本底要求。在安装期间,我们要做好气密封,清洁所有管道,大厅也需达到万级洁净间的标准。同时,有机玻璃表面还需进行打磨、贴膜保护等操作,以去除氦和氩。这也是为什么我们要先给有机玻璃球贴膜,贴完后再用高压水枪把膜洗掉。

在有机玻璃球和钢结构之外设有水池,这个水池实际上就是我们的反符合探测器(图15)。水池中存有4万吨超纯水,用于屏蔽岩石放射性本底。同时,池中安装了2000只20英寸的光电倍增管,在水池顶部还设有径迹探测器,用以标记宇宙线事例。水池内衬采用5毫米厚的高密度聚乙烯,可屏蔽氦气并保持水的洁净。此外,还有地磁屏蔽线圈。其中,最关键的超纯水需达到衰减长度40米、温度21摄氏度的标准,放射性本底要求为 10^{-14} g/g(有机玻璃球内 $<10^{-15}$ g/g),这比半导体用水的要求还要高出1-2个量级。实际的液闪灌注于2024年12月18日启动,过程中要严格控制水温、洁净度及流量,使放射性杂质含量较自然环境降低1万倍以上。有机玻璃球内部采用氮气呼吸方式隔离空气,通过持续

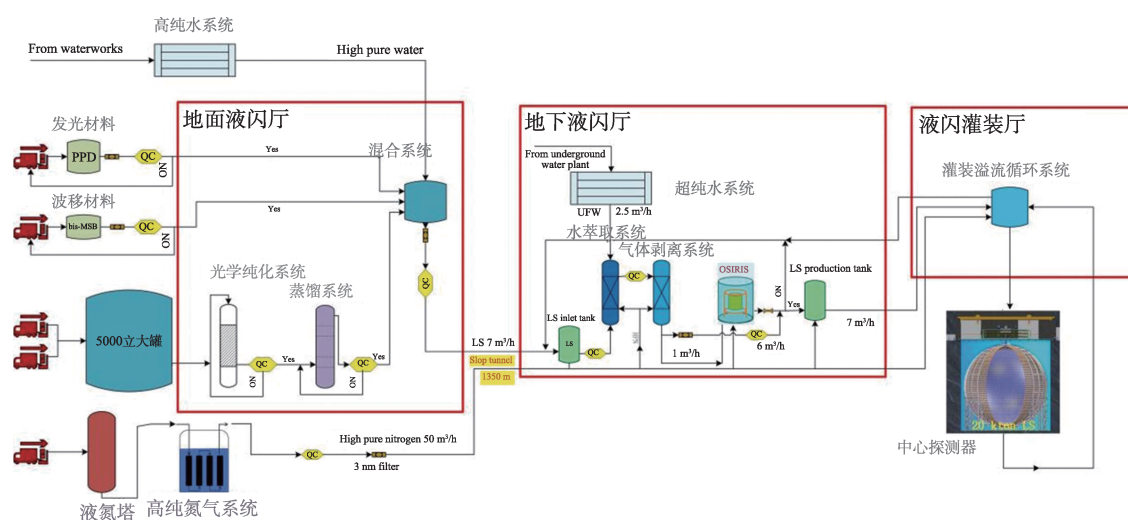


图14 JUNO液闪生产流程示意图



图 15 反符合探测顶部安装完成后现场人员合影

补气排气,维持压力与大气压偏差 $\leq 1\%$,以确保有机玻璃球的结构安全与洁净度。

JUNO 中心探测器共安装 2 万支 20 英寸光电倍增管及 2.5 万支 3 英寸光电倍增管,其中 20 英寸光电倍增管首次实现国产化,性能也是国际领先。光电倍增管将中微子被俘获时产生的光信号转换为电信号并放大 1 000 万倍,水下运行防漏水漏气要求为 6 年失效率 $\leq 1\%$,好于国际水平的 10 倍。过去,大尺寸光电倍增管完全依赖进口,在江门中微子实验的推动下,我们成功研发了一款微通道板型的光电倍增管,在设计、技术和产品方面实现了重大突破并完全国产化,性能国际领先。

2025 年 11 月, JUNO 合作组召开发布会,公布首批重要成果。在探测器性能方面,超纯水衰减长度达 42 米,液闪衰减长度达 20 米,放射性本底好于 10^{-17} g/g(铀钍含量)全面达到设计预期。同时公布了物理成果,通过分析 59 天有效数据(并捕获 2 300 多个中微子事件),将混合角 θ_{12} 和质量平方差 Δm^2_{12} 的测量精度提升 1.5~1.8 倍,这一精度超越了过去几

十年国际上所有中微子实验的总和。

六、JUNO 的国际合作与未来展望

江门中微子实验吸引了来自 17 个国家和地区(包括美国、德国、法国、意大利、俄罗斯等)、75 个科研单位的 700 多名科学家参与,国际贡献占探测器建设总经费的 15%~20%。2023 年 10 月,探测器的内部结构照片被《自然》杂志选为当月最佳图片。国内外媒体包括《新闻联播》、路透社、CNN、等都做了报道。JUNO 国际合作组机构委员会主席马科斯·德拉科斯评价:“JUNO 的成功反映了整个国际团队的投入和创造力。”(图 16)

中微子的未来大概是这样一幅图像,10 年后中微子振荡的问题会基本解决,下一代中微子实验(JUNO、DUNE、Hyper-K)会把中微子的质量顺序测出来,同时 DUNE、Hyper-K 两个实验也会测出中微子振荡的 CP 相角。这些问题解决之后,大家会问下一个关键问题是什么?显然第一个是中微子绝对质量,中微子振荡只测出了相对质量,但我们不

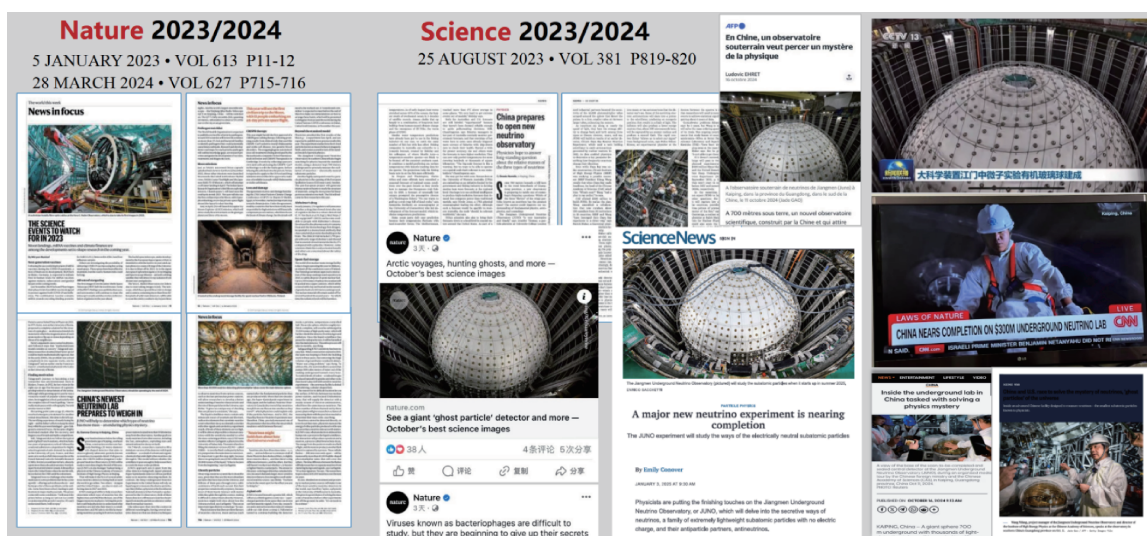


图 16 JUNO 得到了国内外的广泛关注

知道它的绝对质量是多少。第二个是中微子是否是马约拉纳粒子,或者说中微子是不是它自身的反粒子?如果它是,无中微子双 β 衰变可能存在,我们希望能够看到它。

从宇宙学角度来看,中微子质量总和约小于100毫电子伏。中微子振荡显示其绝对质量约大于几个毫电子伏, β 衰变能给出的极限是小于200毫电子伏,即使能做到20毫电子伏,但这与几个毫电子伏仍有较大差距。无中微子双 β 衰变很快就能达到10毫电子伏,未来有望达到1个毫电子伏。它不仅能给出中微子的绝对质量,还可以判断中微子是否为马约拉纳粒子。

因此,江门中微子实验计划未来升级为世界上最出色的双 β 实验探测器。JUNO无需改动原有的探测器,只需在液闪中填充双 β 衰变核素即可。这些核素可放置在气球里或整个球中,具体使用哪种核素尚未确定。预计在2030~2035年可实施这一升

级方案。我们的优势十分显著:探测器质量最大且现成,本底低,在液体闪烁探测器中能量分辨率最好。江门中微子实验比所有规划中的双 β 实验的灵敏度高将近一个量级,未来前景光明。

江门中微子实验不仅是我国基础科学研究的重大的设施,更是人类探索宇宙奥秘的新窗口——其探测能力相当于在1000千米外探测到一个灯泡的闪烁。JUNO的成功标志着中微子探测进入“中国精度”时代,大亚湾中微子实验是我们中微子研究的一个开端,江门中微子实验将会有重要的成果,我们相信10年之内中微子振荡,20年之内中微子质量,30年之内中微子双 β 衰变问题是有可能得到解决的。我们的技术能力已经走入了国际第一方阵,有望率先取得突破。

注:本文由2025年1月10日王贻芳院士题为《中微子与JUNO》科普讲座整理而成。