

刻度系统——江门中微子实验的能量标尺

王耀光

(山东大学 250100)

在地下 700 米的深处,江门中微子实验(JUNO)——这台世界上最大的液体闪烁体探测器,正以其卓越的性能,引领人类进入中微子振荡参数精确测量的新时代。中微子的能谱信息是确定中微子质量顺序和测量中微子振荡参数的关键。为了提高能量测量精度、深入理解探测器响应特性,JUNO 建立了一套完善的刻度系统,实现了对探测器全方位、多维度的标定。本文将结合实验数据,深入解读 JUNO 中心探测器的刻度策略及其关键性能参数。

一、中微子“照相机”

JUNO 探测器的结构如图 1 所示,它的核心是一个直径 35.4 米的有机玻璃球,内部灌满了 2 万吨液体闪烁体作为探测反应堆中微子的靶物质。有机玻璃球外部排布了 17612 只 20 英寸光电倍增管(PMT)和 25600 只 3 英寸 PMT,作为探测器的“眼睛”,负责捕捉液体闪烁体发出的微弱闪光。

如果把JUNO探测器比作一台巨型中微子“照相机”，那么液体闪烁体就相当于这台相机的“底片”，数万只PMT则构成了这台相机的高灵敏度“像素阵列”。核反应堆产生的中微子抵达探测器后，有极小的几率与液体闪烁体相互作用导致其发光，这些光会“点亮”四周的“像素阵列”(即光电倍增管系统)，拍摄出一幅巨大的“影像”。阵列中的每一个“像素”都是独立的光电转换与信号放大单元，能够精确测量光子的到达时间和电荷量。能量重建则好比一个冲洗照片的过程——通过对这些光子时间和电荷量进行分析，“还原”出中微子信号的能量。

然而,事情远不止这么简单。PMT 个体性能差异,中微子本身的能量区别,以及相互作用发生的

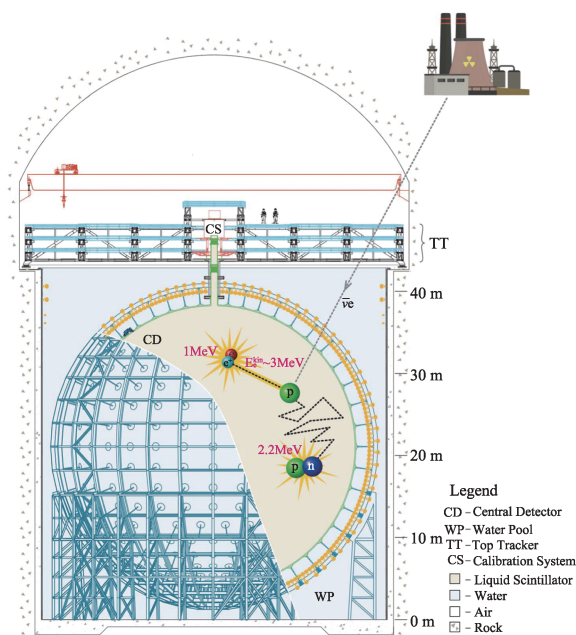


图1 JUNO探测器结构示意图

位置不同,都会导致事例“影像”的显著差别,主要体现在光子的击中时间、PMT测得的电荷量等方面。准确理解与修正上述效应,是重建中微子事例能量的关键步骤,也是确保中微子振荡分析结果可靠性的前提条件。为此,JUNO设计了一套完善的刻度系统,用以精确标定PMT的性能,并建立起PMT响应与中微子能量之间的联系。

二、“能量标尺”一刻度系统

想象在你的手中有一把光秃秃的、没有任何刻度的尺子,当你试图用它来测量物体时,会发现根本无法读取出确切的长度。同样,没有经过刻度的探测器也无法准确测得中微子的能量。为了给JUNO探测器“标上”刻度,我们为其专门设计了多套

刻度系统。这些刻度系统能够将已知能量的多种类型放射源放置于探测器的不同位置,帮助建立起探测器响应与粒子能量、位置之间的精确对应关系。

JUNO 刻度系统的结构如图 2 所示,它包含四套子系统:1)自动刻度装置(ACU):可以沿探测器中心轴进行一维扫描,可通过线缆长度判断刻度源位置,定位精度好于 1 厘米。2)绕线系统(CLS):利用有机玻璃球内部设置的锚点和两根与刻度源相连的线缆,控制刻度源在二维扇面内进行扫描;由于线缆自重且具有一定的弹性,无法通过其长度判断刻度源位置,需借助超声波定位系统,定位精度好于 3 厘米。然而,由于几何限制,绕线系统无法到达探测器边缘,为了实现探测器边缘区域刻度,设计了 3)导管刻度系统(GTCS):将一根导管沿经线环绕有机玻璃球外部,刻度源放置于导管内,其两端与钢丝绳相连,通过调节钢丝绳长度控制刻度源位置。4)潜水艇系统(ROV):通过远程控制潜水艇,实现刻度源在探测器内部的三维全局扫描。但由于该系统较为复杂,仅作为备选方案。

上述多个子系统能够将激光源或已知能量的放射源(如 ^{68}Ge , AmC , ^{60}Co , ^{137}Cs 等)放置于探测器的

不同位置执行刻度任务。能量更高的放射源会导致液体闪烁体发出更多的光,并最终体现在PMT探测到的光电子数目差异。图3展示了探测器中心的刻度源所产生的光电子数目分布,从中可以清晰地看到各源的特征峰,它们覆盖了反应堆中微子的主要能量区间。利用这些刻度源的峰位,我们便能为JUNO探测器“标记”上刻度,它反映了能量和光电子数目之间的一一对应关系。至此,我们才真正完成了对JUNO探测器中事例能量的定义。

然而,刻度系统的使命还没有结束。对于一个直径 35.4 米的探测器,液闪光抵达光电倍增管之前,会在探测器内发生复杂的散射、反射、吸收和重发射等光学过程,导致 PMT 接收到的光子数目和时间均有所差异,这些位置依赖的效应可以用非中心的刻度源数据进行标定。由于 JUNO 中心探测器为球形,利用 ACU 和 CLS 系统通常已经能够表征出全探测器的响应特征。但是在实际数据分析中,我们也会结合液体闪烁体中的天然放射性事例和宇宙线缪子在液闪中产生的散裂中子事例,对探测器做一套三维“体检”。最终,这些位置依赖会在能量重建中进行修正,使得对相同能量事例重建结果在全探测器内保持高度一致。

三、光电倍增管性能刻度

对于一台相机来说,我们希望它的每个像素的色彩表现都是一致的,这样才能确保拍摄出高质量的照片。对于JUNO这台中微子“照相机”来说亦是如此——“像素”级别的精准调教才能发挥出探测

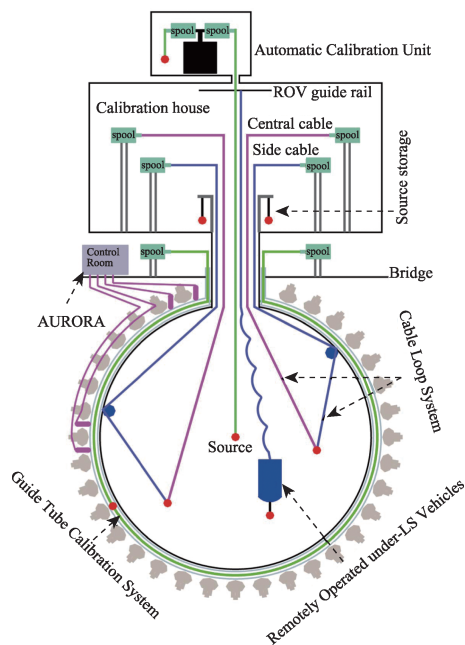


图2 JUNO刻度系统示意图

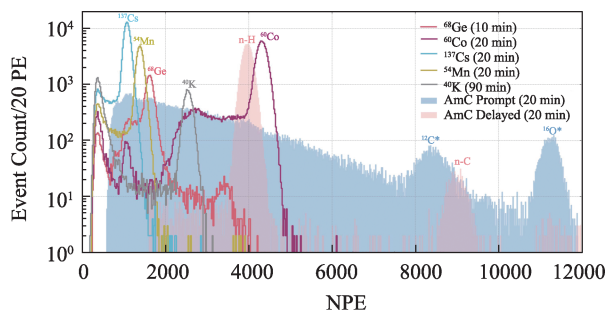


图3 探测器中心的不同刻度源产生的总光电子数目分布

器的全部潜力! 刻度系统为实现PMT的逐个校准提供了可能性。

JUNO中心探测器使用了两种类型的20英寸PMT, 包括~12000只中国北方夜视公司生产的微通道板类型PMT(MCP-PMT)和~5000只日本滨松公司生产的打拿极类型PMT(Dynode-PMT)。外观上看,PMT就像一个“大灯泡”, 即使一个成年人将它抱进怀里也并不轻松。但是, 这个“大灯泡”并不会发光; 相反, 它是一种光探测元件。

PMT具备优异的弱光探测能力, 即使是单个光子也能被它敏锐地捕捉到。光子击中PMT后, 有几率被PMT玻壳内表面的光阴极材料吸收并发生光电效应。光电效应产生的光电子在球壳内部经过电场的加速后, 会被打拿级或者微通道板收集。打拿级表面和微通道的内壁均镀有二次电子发射材料, 光电子会与之发生相互作用产生多个二次电子; 这些二次电子会进一步被电场加速, 击中下一个打拿级或微通道内壁产生更多的二次电子, 以此类推。最终, 单个光电子会被放大到 $10^6 \sim 10^7$ 倍从阴极输出, 并经由电子学和数据获取系统转换成一系列波形读出存盘。从这些波形中, 分析人员可以恢复出光子被探测到的时刻和电荷量(即放大倍数)。PMT刻度的主要目标, 一方面是将所有PMT的“时钟”对齐; 另一方面是刻度出每只PMT对光电子的放大倍数, 也即增益。PMT的刻度通常是利用ACU系统将激光光源放置于探测器中来实现的, 这是因为激光具有发光时间快、发光时刻已知、频率和光强可控等一系列优势。

对于时间刻度, 我们首先统计激光事例中每只PMT探测到的第一个光子的击中时间, 如图4上图分别展示了Dynode-PMT和MCP-PMT的典型时间分布。该分布的峰位所在位置可以表征PMT的时间偏移量, 通过对齐这些峰位可以将所有PMT的时间调至一致。时间分布图中右侧的尾巴是由于探测器中的光学过程, 例如光子吸收重发射、散射和反射等导致的——我们建立了模型能够准确描述该分布, 最终将探测器内约18000只PMT的时间对

齐至了1纳秒以内。

PMT的增益与其本身的结构设计、二次电子发射系数以及PMT的电压大小均有关。通过激光刻度, 我们可以获得每只PMT测得的电荷量分布, 如图4下图所示。可以看出, Dynode-PMT和MCP-PMT的电荷谱形状有明显差异, 这是两种PMT不同的放大倍增机制造成的。为此, 我们为二者分别建立了一套单光电子电荷响应模型。另外, 由于统计涨落原因, 每个事例中探测到的光子数目并不固定的, 而是服从泊松分布。通常, 多光电子的电荷分布无法由单光电子电荷响应模型解析计算获得。JUNO采用了一套基于傅里叶变换的计算方法, 实现了对PMT电荷谱的精确描述。长期监控表明, 20英寸PMT的增益稳定性在0.2%以内。

除了上述时间和增益刻度之外, 我们还进行了PMT的暗计数率和相对探测效率刻度。这些刻度共同实现了对整个探测器“像素”级别的调教, 使得所有PMT的表现“整齐划一”, 为后续的事例级别的物理分析奠定了基础。

四、中心探测器性能刻度

液闪探测器的整体性能可以从多个维度来表征, 例如光产额、稳定性、非均匀性、能量非线性和分辨率等。借助刻度源数据, 我们可以从上述多个角度来深入理解探测器。

光产额 探测器光产额表示液闪中单位MeV的沉积能量所能探测到的光电子数目, 更高的光产额意味着更小的光子数统计涨落和更高的能量测量精度。得益于JUNO液闪的高透明度、PMT的高覆盖率和高量子效率, 探测器中心的AmC刻度源结果显示, 其光产额达到了惊人的1 785 PE/MeV, 高于预期的1 665 PE/MeV, 且数倍于过去所有的中微子实验。作为对比, 意大利的Borexino实验光产额为500 PE/MeV, 日本的KamLAND实验光产额约为280 PE/MeV等。如此之高的光产额竟是在20倍以上的液闪体量下实现的, JUNO称得上是一台庞大且精密的“性能怪兽”!

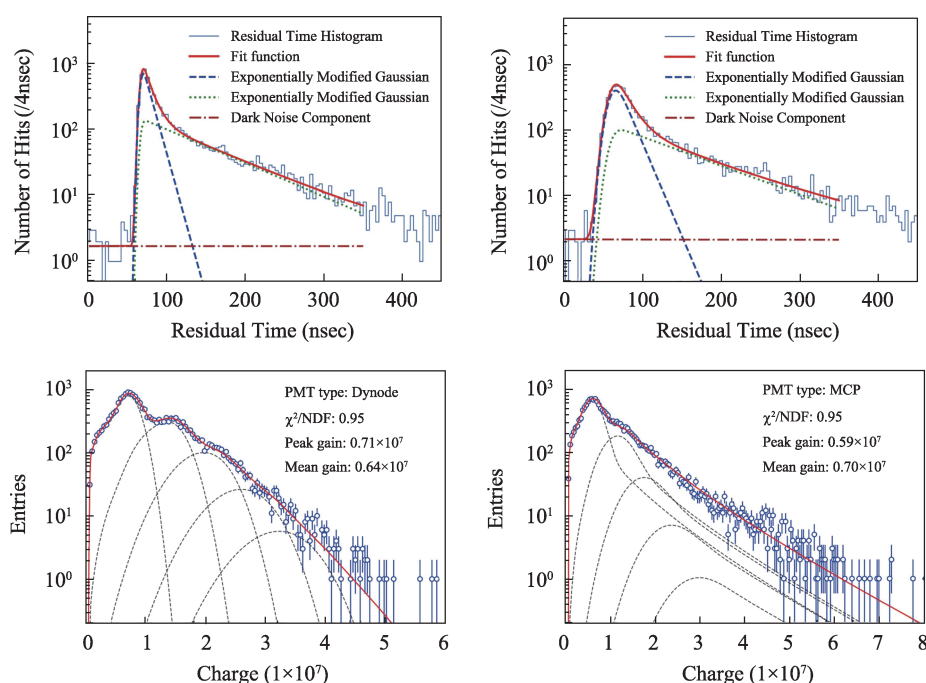


图4 Dynode-PMT(左)和MCP-PMT(右)的时间(上)和增益(下)刻度示例

稳定性和非均匀性 事例发生在探测器的不同位置,探测器响应是有差别的。除此之外,探测器响应随时间也会有细微的变化。结合刻度源数据、液闪中的天然放射性事例和宇宙线缪子产生的散裂中子事例,我们对这两项性能进行了刻度和修正。图5(a)显示了不同来源中子事例的重建能量与顶点位置的依赖关系,图5(b)为多种类型事例的全探测器平均重建能量与中心点重建能量的差异。可以看出,在超过30米直径范围内,全探测器的平均重建能量与中心点的差别小于0.5%,这表明JUNO探测器整体具有出色的一致性。

能量非线性 上文提到,利用 γ 放射源数据,我

们为JUNO探测器标上了能量“刻度”。然而,由于不同类型粒子在液闪中所发生的相互作用过程不同,该能量“刻度”仅适用于 γ 粒子本身,而不适用于其他类型粒子,例如反应堆中微子所产生的 e^+ 。此外,受液闪发光机制的影响,液闪探测器的重建能量和粒子真实沉积能量之间存在非线性关系,称为能量非线性。该非线性有两部分来源:闪烁光的电离淬灭效应和切伦科夫光的非线性贡献。幸运的是,不同类型粒子的非线性之间存在内禀关联,基于此JUNO建立了一套能够统一描述 e^+, e^-, γ 的能量非线性模型,并对刻度源数据、宇生 ^{12}B 和 ^{11}C 数据进行了联合分析,最终将 e^+ 能量非线性不确定度控

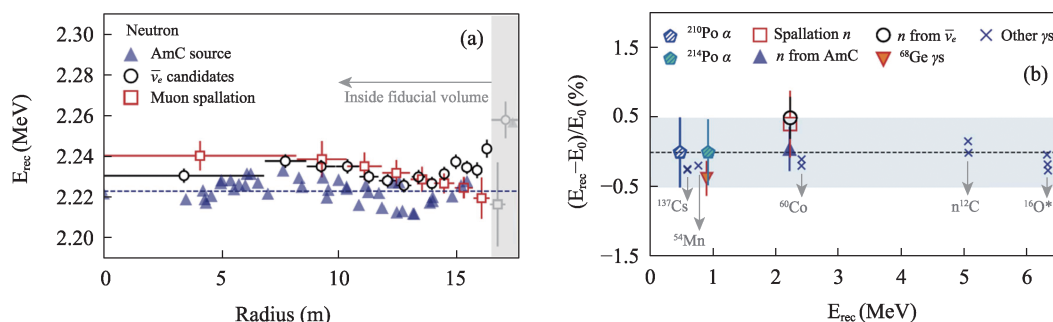


图5 探测器能标不确定度

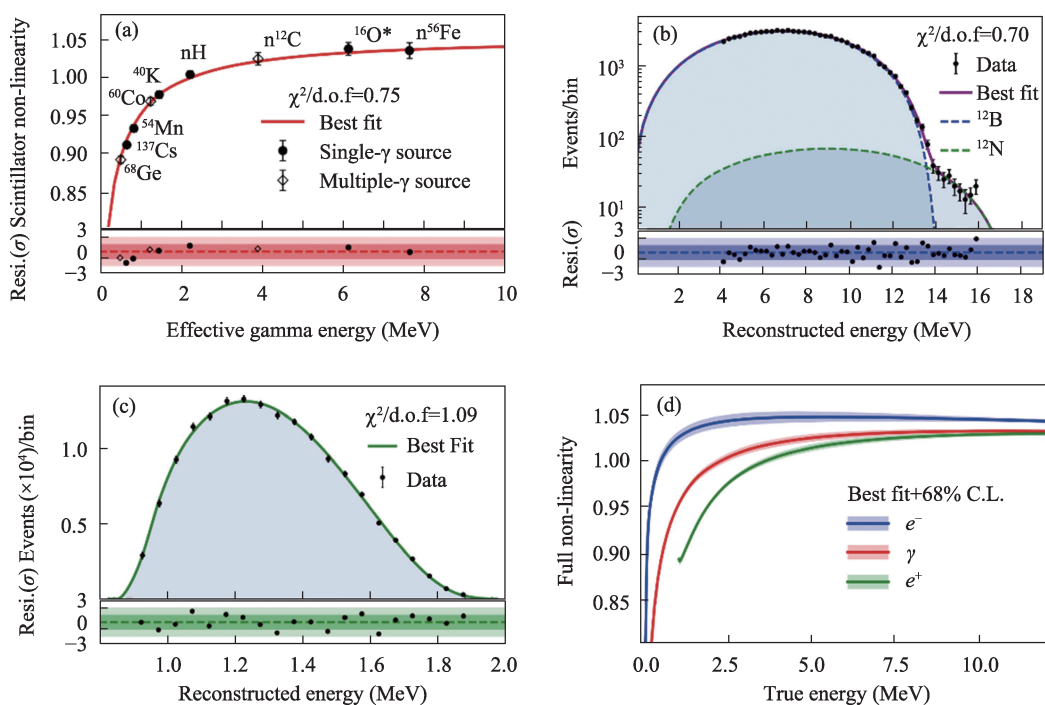
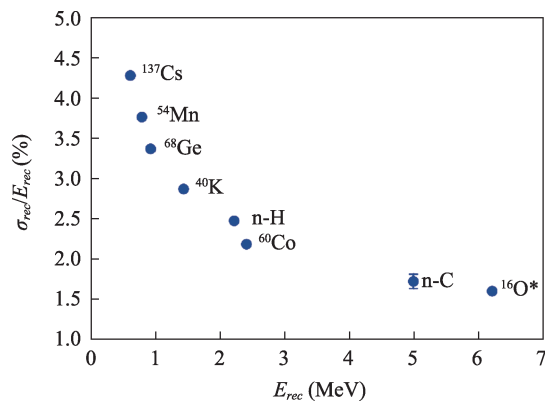


图6 能量非线性刻度结果

制在1%以内(如图6所示)。

能量分辨率 能量分辨率表征的是探测器对相同能量事例重建结果的涨落大小,它是JUNO测量中微子质量顺序的关键——足够高的分辨率才能使其分辨中微子能谱中的精细结构,进而确定中微子质量顺序。液闪探测器的能量分辨率受到多种因素影响,包括探测器光产额、粒子的能量沉积过程、次级电子的产生、能量非线性、PMT的电荷分辨率和残余非均匀性等,其中的多个效应与粒子类型密切相关。JUNO的实验数据显示,不同粒子的能量分辨率存在明显差异。例如,来自 ^{214}Po 衰变的 α 粒子,其重建能量约为0.93 MeV,分辨率最高可达2.8%;而来自 ^{68}Ge 刻度源的 γ 事例,其重建能量约0.91 MeV,能量分辨率则约为3.4%。图7所示为不同 γ 刻度源的能量分辨率结果。尽管JUNO的能量分辨率已大幅超越国际上其他液闪探测器,但在未来一段时间内,实验仍将重点致力于理解分辨率的物理来源、其与粒子类型依赖关系,并精准预期 e^+ 的能量分辨率。

综上所述,刻度系统是深入理解JUNO探测器

图7 探测器中的 γ 刻度源能量分辨率

的关键子系统,也是确保物理分析结果可靠性的重要保障。通过刻度数据,我们不仅完成了探测器内约18000只PMT的精准“像素”级别校准,而且对探测器的整体性能有了充分的认识。刻度结果显示,JUNO探测器性能已全面达到并部分超越了设计指标,在国际同类型实验中处于领先地位。同时表明,JUNO实验为未来揭开中微子的更多奥秘已经做好了充分的准备。刻度系统也将会贯穿始终,在某个清晨,日暮,或者悠闲的午后,继续重复着它的使命……