

探索微观世界的眼睛

——量能器

刘 勇^{1,2} 吕军光^{1,2} 苑超辰^{1,2} 张华桥^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院大学 100049)

人类的生存和活动离不开从环境中获取各种信息。在现代科技主导的信息社会中,各种传感器和探测器成为人类感官的延伸,其技术的进步不断推动人类对自然的认知、适应和发展。粒子物理与核物理的研究中有这样一类特殊的探测器,承担着测量微观粒子能量等性质的艰巨任务,它们就是量能器(calorimeter)。

量能器测量微观粒子的能量主要依赖于粒子与量能器的相互作用。从相似的原理出发,其实我们的眼睛类似一台小巧精密的量能器。我们周围环境的光,在微观世界是由数量庞大、能量各异的光量子组成的,这些光量子被称为“光子”。而视网膜上的感光细胞会对不同颜色敏感。颜色与光子的频率相关,后者与光子能量成正比。这些细胞会与这些光子发生“相互作用”,经过大脑复杂的运算可以“重建”光子的信息,使得我们可以看到这个五彩斑斓的世界。当然眼睛能探测到的能量范围和粒子种类是十分有限的,对于高能物理实验中能量

范围极大的微观粒子,我们需要研制更灵敏的量能器才能去完成精确测量。

根据微观粒子与量能器的相互作用类型不同,我们通常分为以测量电磁相互作用为主的“电磁量能器”,以及侧重于强子相互作用测量的强子量能器。对于电子和高能光子(即“伽玛射线”),它们在量能器中会引发一系列级联反应,包括电子在量能器中辐射出高能光子,高能光子产生正负电子,正负电子继续辐射出高能光子,这样的电子-光子-电子级联过程,是从入射的单粒子到最终的粒子簇团,通常命名为电磁簇射。我们通过将所有末态粒子簇团能量累加起来,就可以知道最初入射粒子的能量。

为将粒子簇射限制在比较小的空间范围内,量能器通常会选择由质量密度较高的物质组成。其中一个类别是无机闪烁晶体(例如碘化铯、碘化钠、锗酸铋、钨酸铅等)整体作为探测灵敏材料,它可以将绝大部分的入射粒子能量转换为光信号,这类量

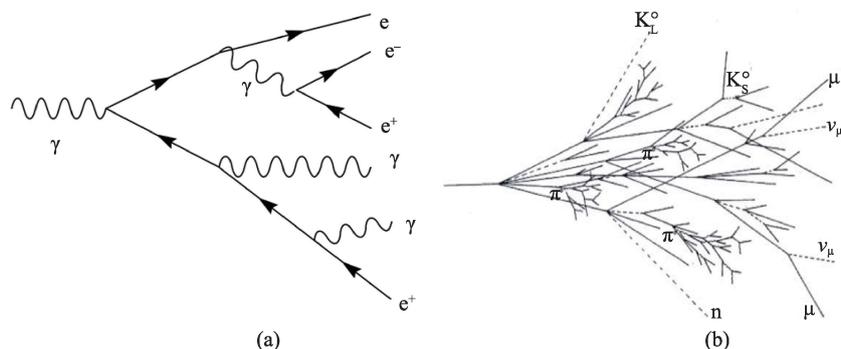


图1 电磁簇射示意图(a):光子可以产生一对正负电子,正负电子参与的相互作用反过来也可以产生光子;强子簇射示意图(b):强子簇射既有电磁簇射的成分(主要是光子和中性派介子),也有与原子核反应后的介子、重子等,后者也可以继续引发强子簇射的级联反应

能器称为全吸收型量能器。它在低能粒子能量的测量精度方面有无法取代的优势。另外一类别是探测灵敏层与吸收层相互交替的排布,这类量能器称为取样型量能器,它只能探测簇射中的部分能量,以此为线索“重建”出入射粒子的能量。正是由于只有部分信息,能量的测量精度不如全吸收型量能器,但其造价相对更经济,并且可以在探测器极其有限的空间中实现紧凑型设计。大型强子对撞机(LHC)实验上多采用取样型量能器设计,但其中CMS实验的电磁量能器则是全吸收型设计,以钨酸铅晶体为探测介质,它对于LHC实验发现粒子物理中最重要希格斯粒子起到了不可替代的作用。

除了电子和光子之外,还有一类参与强相互作用的粒子(即“强子”),分别称为介子(例如 π 介子、K介子)和重子(例如质子和中子),它们也是高能实验物理学家十分关心的。相比电子和光子,通常高能强子具有更强的穿透力,仅仅依靠电磁量能器并不能完全限制它们,泄漏出量能器后会导致无法准确测量强子的能量,这时就需要强子量能器出马了。高能强子在量能器中会发生更复杂的强子簇射,也是一系列产生次级低能粒子的级联反应过程,但强子簇射中既有电磁簇射的部分,也有强子与原子核的相互作用所引发的级联过程,会产生种类更加丰富的末态粒子,包括只参与弱相互作用的幽灵粒子——“中微子”。由于强子簇射涉及诸多物理过程均有显著的不确定性(也被称为“涨落”),提升强子量能器的能量测量精度是更为困难的。为有效地探测强子簇射,强子量能器在体量上会高于电磁量能器,其厚度通常可达到1米以上。强子量能器的结构通常选取高密度金属材料(铁、铜、铅、钨等)和灵敏探测材料交替排列,类似于三明治结构,对强子簇射的能量进行取样测量。

量能器测量粒子能量主要是依赖于粒子与物质发生相互作用,电磁量能器是以电磁相互作用为主,强子量能器是以强相互作用为主,但是自然界中存在的相互作用除此之外还存在另外两种相互作用,即弱相互作用和引力相互作用。对于某些粒

子物理实验来说,量能器通过弱相互作用测量微观粒子的能量,例如超级神冈中微子实验,在南极冰盖的“冰立方”超高能中微子实验,基于核电站的大亚湾中微子实验以及建设中的江门中微子实验等。其中我们可以看到,利用弱相互作用探测中微子的实验,其量能器系统体量巨大,这是因为通过弱相互作用发生反应的几率极小,需要用庞大的量能器体量补偿,这也是与粒子对撞机实验中量能器系统的不同之处。

除了四种基本相互作用,是否还存在其他相互作用,也是粒子物理研究的一个重点内容。比如在寻找暗物质的实验中,假设暗物质粒子可以与常规物质发生某种相互作用,然后利用量能器对相互作用产生的反冲核或者受激辐射出的光子进行测量,例如以液态惰性气体作为探测介质的直接寻找暗物质实验,包括以液氙Xenon, PandaX, LUX实验与ZEPLIN实验,或者是利用液氙作为探测介质的DarkSide实验等。

此外还有一类广义上的量能器,那就是用于高能宇宙线探测的量能器,与前述的量能器原理一样,聚焦于宇宙线测量的观测站,可以看作是体积巨大的单层取样的量能器,地球大气层是取样型量能器的簇射介质,地面上、水下或冰下的探测器阵列是取样型量能器的敏感层,宇宙线粒子在大气层发生簇射,末态粒子被地面上的量能器阵列探测到。比如2019年ASgamma实验观测到能量高达450TeV的伽玛射线,这曾经是人类观察到的最高的伽马射线能量。最近全新的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)基于不到一年的观测数据,探测到了最高能量1.4 PeV的伽马射线,标志着宇宙线观测进入到PeV量级的全新时代。^①

量能器技术的发展和运用大大促进了粒子物理的发展。以下我们将以LHC上CMS探测器为例详细介绍当今粒子对撞机上的量能器前沿技术。CMS探测器整体长约22米,直径约15米,重达14500吨,是目前人类制造出的最重的探测器谱仪。CMS探测器由内到外主要由径迹探测器、量能

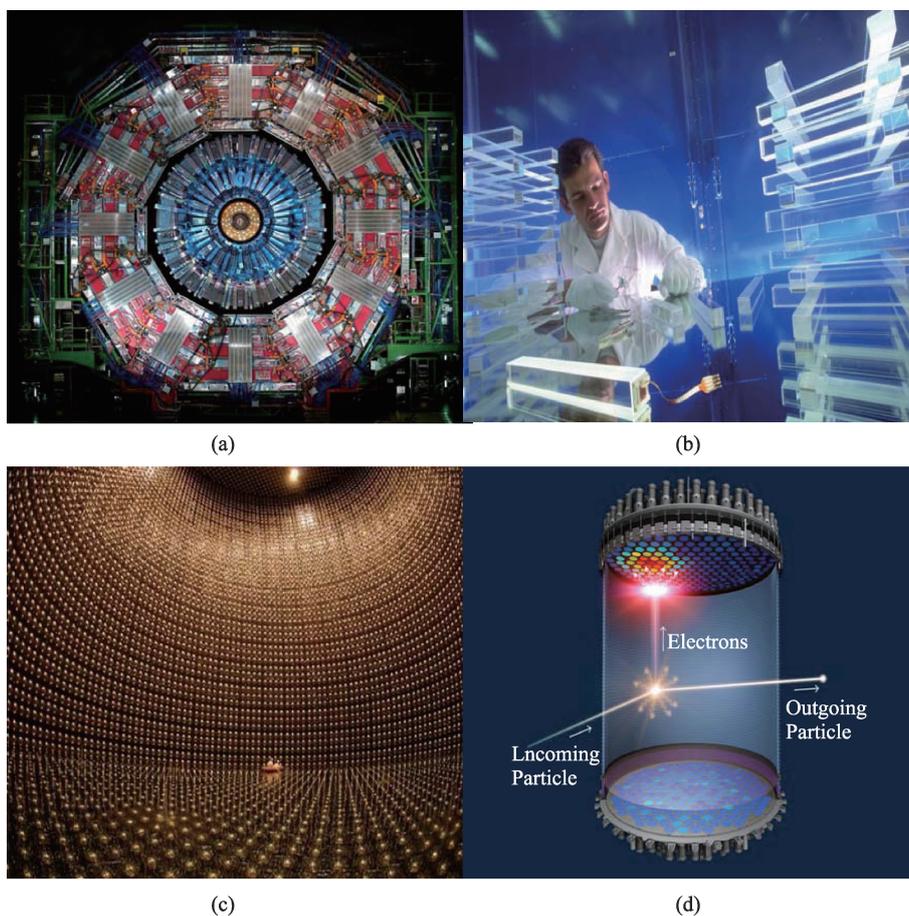


图2 CMS探测器截面图(a);中间黄色部分为电磁量能器和强子量能器;CMS探测器量能器使用的晶体(b);超级神冈中微子实验图(c);Xenon探测暗物质实验装置示意图(d)



图3 ASgamma实验探测器阵列图

器、超导磁铁线圈和缪子探测器四个部分组成,来探测LHC上高能质子-质子对撞产生的种类繁多的带电粒子和中性粒子等末态粒子^②。其中粒子物理

的高能量前沿研究最感兴趣的粒子包括电子、光子、缪子和喷注(来自于高能量的胶子或夸克)等,而这些粒子均会在量能器中留下他们的部分或者全

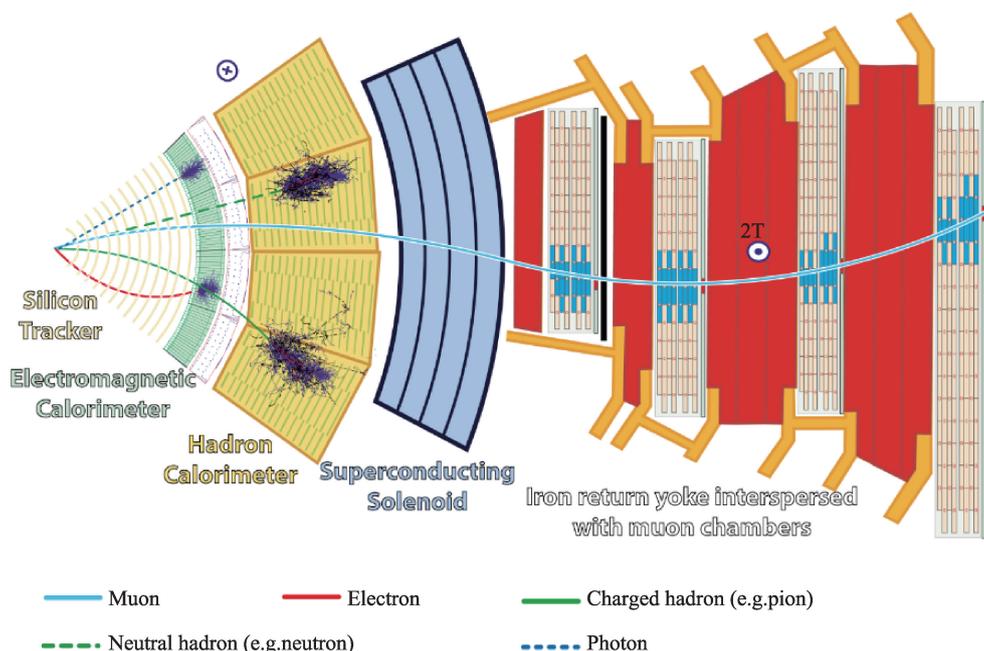


图4 CMS各子探测器示意图。其中绿色薄层为电磁量能器,黄色厚层是强子量能器

部信息,因此,量能器的性能对CMS实验上几乎所有的物理成果均有重要的影响。

为了获取更多的数据,欧洲核子中心(CERN)计划在2027年左右将大型强子对撞机升级为高亮度大型强子对撞机,其亮度将提高7倍,而这对于工作在高亮度大型强子对撞机上的量能器来说将是一个严峻的挑战^③。为了能够在升级后的高亮度LHC运行并实现其高能量前沿的物理目标,CMS实验正在设计和建造全新的高粒度量能器^④。其概念设计来自于21世纪初未来直线正负电子对撞机上的高精度量能器的研制^⑤,是此类全新量能器的首次大规模建造和运用。它是在不同区域分别采用硅像素传感器的取样型量能器,其中电磁量能器部分共有28层,均采用硅像素传感器作为灵敏层,以高密度金属(包括铜、钨、铅)作为吸收体;而强子量能器有22层,辐照强的部分区域采用硅像素传感器,辐照较弱的区域采用闪烁体与硅光电倍增器作为探测介质,不锈钢作为吸收体。端盖量能器整体半径为2.6米,厚度约2米,其中硅传感器的总面积高达640平米,闪烁体的灵敏面积也达到了370平方米,总重量约400吨,功耗为220千瓦,并需要在

最高辐照通量达 10^{16} 个等效MeV中子/平方厘米的CMS实验的端盖区域保持正常工作。为降低高强度辐照对探测器性能带来的影响,整个端盖量能器系统放置在零下30度的低温箱中。

硅传感器的像素单元大小为1平方厘米左右,闪烁体面积在10平方厘米量级,共600多万独立的探测器单元和电子学读出系统,每个传感器单元能够在25纳秒这个极短时间窗口中精确测量沉积能量和时间。其时间测量精度能够好于50皮秒,位置分辨好于1毫米^⑥。这一设计使得高粒度量能器能够对几个GeV到TeV量级的粒子簇射信息进行精确测量,包括带电粒子、中性粒子发生簇射的三维位置、能量和时间信息,相比传统量能器,增加了纵向位置和时间两个测量纬度,成为首个真正意义上的五维(5D)量能器。得益于高粒度量能器优异的性能,对希格斯粒子衰变到双光子过程的质量分辨率好于1.4%。

新增加的两个维度大大拓展了高粒度量能器的探测性能,除了增强了粒子簇射形状的探测能力,能更好地鉴别和刻度光子、电子、质子, π 介子等粒子外,还能够通过缪子通过探测器各层留下的最小电离信号,准确地鉴别 μ 粒子;通过50层取样获得

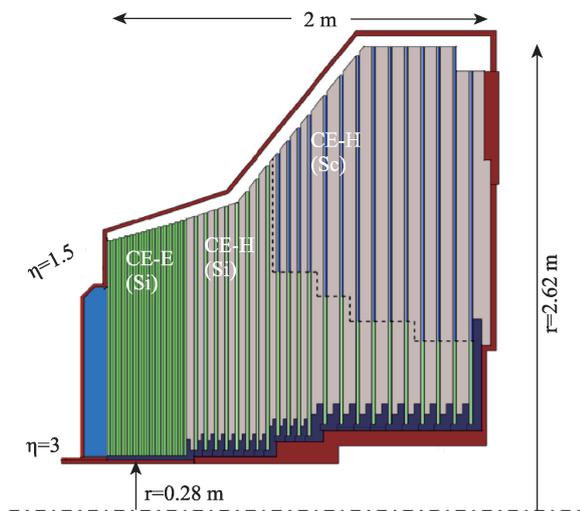


图5 CMS实验端盖量能器的高粒度量能器(侧视图)。

其中绿色部分对应硅像素传感器的量能器，
蓝色部分对应塑料闪烁体-硅光电倍增器的量能器

的簇射能量中心来重建带电和中性粒子的传播方向、辅助确定对撞顶点的位置；以及通过检查信号到达探测器的时间差，来确定信号对撞发生的位置，或者判断信号是否来自同一个对撞顶点，去除不是来自于同一个对撞点的堆积事例的影响等众多新的功能。对高亮度LHC下的希格斯物理特别是更加依赖端盖的矢量玻色子融合产生过程，新物理等重要研究课题，均能显著地提升其灵敏度。

国内外共有50余家科研单位参与CMS高粒度量能器的设计与建造，目前已经建立了原型机，先后在美国费米实验室，欧洲核子中心，德国DESY进行了十余次实验束测试，证明了该设计的可行性和良好的性能。明年将开展探测器的建造并最终在2027年建造、安装完毕，开始运行。中国主要集

中在硅传感器模块的研制，探测器性能的研究，部分电子学PCB的设计，并计划在北京和台北各建立一个硅模块中心，有望为高粒度量能器制作40%左右的硅传感器模块。

高粒度量能器是理想的粒子流量能器，结合粒子流算法，对喷注的测量精度能够达到很大的改善。而CMS实验中几乎所有的事例均包含喷注，因此有望显著改进我们通过CMS实验探测微观粒子高能前沿的精度。同时，高粒度量能器5维信息的传输、处理，对探测器的电子学设计，粒子流算法的重建等软件算法提出了全新的要求；LHC海量的数据和质子对撞机的特点，使得传统的数据处理方式所需要的CPU时间指数增加，从而为GPU、机器视觉、机器学习、带时间信息的粒子流算法等新工具的发展和运用提供了宽广的舞台。这一发展于未来正负电子对撞机，却首先运用于LHC质子对撞机的量能器技术，必将是未来高能前沿量能器的重要发展方向之一。

量能器技术的发展从来不是孤立的，它带动了各种新型探测材料的发展，包括高密度、强发光的闪烁晶体切伦科夫(Cherenkov)辐射体等的研制，以及光灵敏器件的广泛应用，例如微通道光电倍增管(MCP-PMT)、光电倍增器(SiPM)等；以及高度集成化的电子学发展，包括低功耗、高带宽、高速数据获取系统等。

应未来高能粒子对撞机实验上精确物理测量的要求，量能器从传统量能器升级到了可以测量能量位置时间的5D高粒度量能器，量能器的未来

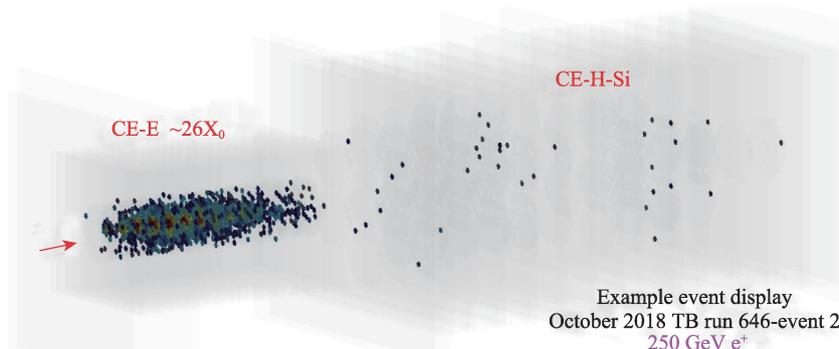


图6 高粒度量能器原型机中典型的电子事例展示

发展,一是在造价的许可下,探测单元尽量小颗粒化,二是增强量能器的抗辐照能力,三是降低量能器的功耗,如在降低光电器件及前端电子学的功耗,采用更先进的冷却技术等。除了量能器本身的性能,量能器的探测手段也有一定的创新发展空间,除了传统基本相互作用之外,原则上还有发热和超声波过程,在其他学科这类的探测已达到极高的灵敏度,如光学精密成像(纳米级);超声位移测量也触及到同一量级的精度。虽然发热和超声波过程由于传导速度的限制,目前应用于要求高响应速度的对撞机实验上还并不合适,但对于某些低事例率的探测来说,不失为一个可行的发展方向,相信随着量能器的不断发展,看似变化莫测的微观粒子世界将会对我们越来越清晰,在越来越强大的量能器帮助下,物理学家们也一定可以带给我们更多的惊喜。

参考文献

- ① Cao, Z., Aharonian, F.A., An, Q. et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources. *Nature* 594, 33-36 (2021)
- ② CMS Technical Design Report, CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-012 (2015)
- ③ High Luminosity Large Hadron Collider HL-LHC, G. Apollinari et al., arXiv:1705.08830 [physics.acc-ph]
- ④ M. Valentan et al. (2019) The CMS high granularity calorimeter for the high luminosity LHC, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* (936), 102-106
- ⑤ The International Linear Collider Technical Design Report-Volume 4: Detectors, T.Behnke et al., ILC-REPORT-2013-040,2013, arXiv:1306.6329
- ⑥ On the timing performance of thin planar silicon sensors, N. Akchurin et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* 859, 31, 2017

封底说明

让3000年前的木乃伊发声

前不久,在科技界发生了一件让人惊讶的事,来自英国伦敦大学和约克大学的科研人员让沉睡了3000多年的木乃伊发出了声音,一时间成为人们关注的焦点。事情要从二百多年前说起,那时这具木乃伊在埃及被发现后被运往了欧洲,安放在英国利兹市的博物馆里,虽历经多次战火而幸免。后经过多代考古学家的研究,包括后来X光、CT及内窥镜等现代科技的运用,这具木乃伊神秘的面纱才渐渐被掀开一角。这具木乃伊的主人名字叫内西塞姆,他生活在距今大约3000年的古埃及法老拉美西斯十一世统治时期,是古埃及卡尔纳克神庙负责诵诗和吟唱颂歌的祭司。他去世时大约50余岁,生前患有牙病,专家推测其可能死于蚊虫叮咬所致的过敏症。一天,参与此次项目的科研人员忽然有个一个想法:如果根据测量木乃伊声道的形状和尺寸,用现代3D打印技术复制出其声道和

人工喉,是否能够得到已逝去3000多年人的声音?于是他们请来在此领域颇有想法的英国伦敦大学的霍华德教授,因为他曾经使用这个方法,成功复制了自己的声音。于是科学家们对木乃伊的声道进行了扫描,得到数据后,用3D打印技术对其声道进行了重建,然后再结合用于语音的人工喉,最终获得了这位距今3000多年的古埃及祭司的声音。大家一定对这位古埃及祭司发出的声音感兴趣,告诉大家,他发出的声音是:“呃”,专家推测这也许就是其诵经时的声音。有意思的是这项研究也完成了这位祭司的遗愿,因为根据其石棺上的铭文,这位祭司希望在他死后人们还能够听到他的声音,并以此获得永生。目前该项研究还在继续,科学家们尝试运用计算机技术来对这位祭司的声音进行模仿,力图最终获取当年他的歌声,让我们期待这跨越3000年的歌声响起。(博文)