

大型强子对撞机上的 CMS 探测器^{*}

姜春华[†] 杨民 王征

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 CMS探测器是大型强子对撞机(LHC)上的4个实验之一,它的设计思想是在质心能量为14TeV及积分亮度为 $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的条件下对质子-质子对撞进行研究.它的特点是非常紧凑,其 μ 子室几乎覆盖了 4π 立体角.另外,CMS探测器还有可提供超强磁场的超导磁铁和由超导磁铁环绕的径迹室以及电磁量能器和强子量能器.CMS探测器对于末态为电子、光子、特别是 μ 子的物理过程有很好的测量精度.

关键词 CMS探测器,大型强子对撞机(LHC),Higgs粒子,标准模型,超对称

The compact muon solenoid (CMS) detector in the large hadron collider (LHC)

JIANG Chun-Hua[†] YANG Min WANG Zheng

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The compact muon solenoid detector is one of the four experiments on the Large Hadron Collider at CERN. It was conceived to study proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 14 TeV and at luminosities up to $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The detector is characterized by its high compactness, with the muon chamber encompassing almost the entire 4π solid angle. A high-field superconducting solenoid surrounds a silicon tracker, an electromagnetic calorimeter, and a hadron calorimeter. The resolution is excellent for detecting processes which involve electrons, photons and especially muons in the final state.

Keywords compact muon solenoid (CMS) detector, large hadron collider (LHC), Higgs boson, standard model, supersymmetry

CMS实验探测器^[1]是世界上最重的大型高能物理探测器,总重量12000多吨,长22m,直径15m,建造费用约6亿瑞士法郎.它是欧洲大型强子对撞机(LHC)上的4个实验之一,这个实验位于日内瓦附近欧洲核子中心(CERN)法国尤拉山脚下.它的全称是“紧凑的 μ 子螺线管实验(compact muon solenoid,CMS)”.CMS是一个大型通用高能物理探测器.CMS实验(图1)是一个大型国际合作项目,30多个国家和地区的近200个研究所和大学的数千名物理学家及工程师参加了这个巨大的探测器的研制、建造及安装调试,其中有我国的中国科学院高能物理研究所、北京大学、中国科学院上海硅酸盐研究所等单位参加.中国科学院高能物理研究所为这一实验建造了三分之一的端部 μ 子探测器共约150个大尺寸的阴极条室(cathode strip chamber),也是国内首次建造如此大规模的高能 μ 子探测器.目前

中国对这一实验的投入已经超过2000万元人民币,是我们参加国际高能物理实验史上前所未有的支持力度.

LHC/CMS实验的主要物理目标为:寻找Higgs粒子,检验标准模型;检验超对称理论并寻找超对称粒子;寻找其他新粒子;研究Top物理、B物理等^[2].在实验中,如何发现Higgs粒子呢?实际上,无论是Higgs粒子或超对称粒子,都不能在探测器中被直接测量到.它们是不稳定的短寿命粒子,在产生后极短的时间内(甚至还没有飞出束流管道)即衰变为较轻的粒子,甚至经多次衰变,最后变为稳定的常见粒子如电子、光子、 μ 子和强子.目前所有的高能物理实验装置,都是直接测量这些最常见的

^{*} 国家自然科学基金(批准号:09910140934;10421140085)资助项目
2009-02-03收到初稿,2009-02-11收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email:jiangch@ihep.ac.cn

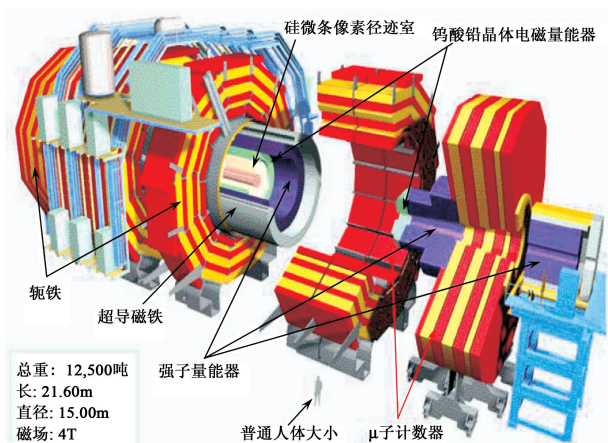


图1 CMS 实验装置

末态粒子,再由这些末态粒子重建出我们要找的新粒子.也可以说,新粒子的发现并不是“测出来”的,而是“算出来”的.目前我们还不能准确地预言 Higgs 粒子的质量,但是无论它的质量如何,我们都可以准确地预言它的衰变情况.如果 Higgs 粒子质量较轻(质量小于 150 GeV),最容易发现它的机会是其衰变为 2 个光子;如果 Higgs 粒子较重,大于 150 GeV,它可以通过多种模式衰变到电子和 μ 子.因此,在寻找 Higgs 粒子或其他新粒子时,我们都是从测量电子、光子、 μ 子和强子入手的.这里有一个重要的基本原理:当一个不稳定的较重的粒子衰变为几个稳定的较轻的粒子时,这几个较轻粒子的不变质量一定等于母粒子的质量.我们将挑选出的某一个事例中的特定的几个(不是全部)末态粒子的不变质量测出,当这一类事例达到一定的统计量时,就可以得到一个不变质量谱.如果在不变质量谱上看到一个峰,就表明有新粒子被发现了.从理论上说,同一种粒子的质量是相同的.如果把很多个相同粒子的质量画在一个图中,横坐标是粒子质量,纵坐标是粒子数,我们会看到一条垂直的细线.但在实验上,因为存在测量误差,这条线会展宽成一个峰.特别是,如果我们不能直接测量新粒子的质量,而是通过其衰变的几个末态粒子计算不变质量,那就更要求把每一个末态粒子的动量、能量和方向都测准.否则,不变质量谱上就看不到新粒子的峰了.对于超对称粒子而言,其衰变的末态产物——最小超对称粒子虽然是稳定的,但不与其他物质发生作用,在探测器中不留痕迹,但可以根据能量守恒,测到(算出)末态粒子在探测器中丢失的(即测不到的)横能量.这是因为质子对撞后在特定方向的能量(动量)是守恒的,通过对每一个事例的横能量求和,如果发现能量不守恒,就可以测到丢失部分的能量,从而发现超

对称粒子.另外一个很关键的问题是,我们所寻找的新粒子包括 Higgs 粒子和超对称粒子的产生都是很稀有的物理过程,而实验中的本底要大十几个数量级.因此,探测器必须有很好的本底排斥能力,才能使我们感兴趣的信号不被本底淹没.

为了实现 LHC 的物理目标,从两束质子对撞产生的大量的各种次级粒子中寻找 Higgs 粒子以及超对称粒子和其他新粒子的蛛丝马迹,CMS 探测器必须要有很高的测量精度,很大的覆盖面积,以及很强的数据记录处理能力.它的设计有如下几个特点:一是在很宽的动量及角度(从几个 GeV 到上接近 1 个 TeV, $|\eta| < 2.5$)范围内,有很好的 μ 子鉴别能力和动量分辨率 σ/p (在动量为 10 GeV/c 时, σ/p 约为 7%,在动量为 100 GeV/c 时, $\sigma/p < 1.0%$ (桶部))和很好的双 μ 子不变质量分辨率(对于质量为 100 GeV/ c^2 的粒子,约为 1%),以及很好的 μ 子电荷识别能力;二是有很好的带电粒子动量分辨和重建效率(对于动量为 100 GeV/c 的 μ 子,重建效率约为 99%,对于动量为 100 GeV/c 的 π 介子,重建效率约为 90%),能保证 τ 轻子和 b 夸克喷注的有效触发及离线标定;三是有很好的电磁能量分辨(对于 20 GeV 的电子, $\sigma(E)/E \approx 1.0%$,对于 200 GeV 的电子, $\sigma(E)/E \approx 0.4%$);四是有很好的双光子、双电子的不变质量分辨(100 GeV/ c^2 时约为 1%),宽的几何覆盖($|\eta| < 2.5$),好的 π^0 排斥以及在高亮度时光子和轻子有较好的孤立化;五是有很好的丢失横动量分辨和双喷注不变质量分辨.

组成 CMS 探测器的主要子探测器为(由中心向外):中心径迹室、电磁量能器、强子量能器、超导线圈、 μ 子探测器.图 2 是 CMS 探测器一个扇区的剖面示意图,显示出探测器的分布和不同的粒子通过和到达不同的子探测器的情况.

不同的粒子在各种探测器中发生不同的物理过程.例如,光子在穿过径迹室时不产生信号,但在电磁量能器中却能发生电磁簇射产生信号,能量基本全部沉积在电磁量能器中,因而光子不能到达强子量能器和 μ 子室;电子通过径迹室时会产生径迹,并在电磁量能器中发生电磁簇射,沉积它的全部能量而产生信号,它也不能到达强子量能器和 μ 子室;带电强子如 p^\pm, π^\pm, K^\pm 等粒子通过径迹室会留下径迹,在电磁量能器中只有小部分能量沉积,在强子量能器中发生强子簇射,基本沉积了它的全部能量,因此也不能到达 μ 子室; μ 子通过径迹室会留下径迹,在电磁量能器和强子量能器不产生相互作用,

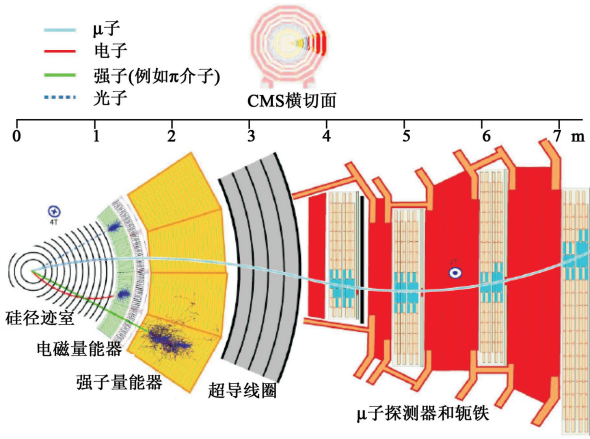


图2 CMS探测器剖面图

也没有留下任何信号,但在 μ 子探测器中产生很清楚的径迹. 不同的探测器对于不同的粒子探测结果也不同,例如,径迹室可以精确测量带电粒子的径迹并重建质子-质子对撞的初级顶点及粒子衰变的次级顶点. CMS 径迹室由多层硅微片和硅微条构成一个长 5.4m,直径 2.4m 的圆筒(图 3). 这些厚度只有几百微米的硅微条和硅微片可以测出入射的带电粒子的位置,将多层的位置信息连接起来,就可以确定这个带电粒子的径迹. 根据粒子径迹在磁场中的弯曲半径,可以测出粒子的动量, CMS 探测器采用了超导线圈,为径迹室提供了 4T 的均匀磁场. 最内层的硅微条用于测量初级顶点及次级顶点,测量精度可达到 $150\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$. 径迹室总共有 1140 万个硅微条和 6590 万个硅微片.

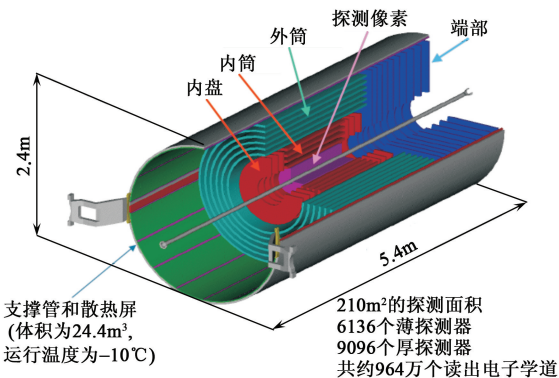


图3 微硅条像素径迹室

电磁量能器用于测量入射电子和光子的能量及位置,并能鉴别光子和 π^0 . CMS 电磁量能器(图 4)使用钨酸铅晶体,由于它的密度很高,电子和光子通过时它们的能量几乎全部沉积在晶体中,因此它的能量分辨也很好. 钨酸铅晶体中 98% 的成分是金属,但却是完全透明的,因此光的传输性能很好. 钨酸铅晶体的密度为 $8.3\text{g}/\text{cm}^3$,因此有较短的辐射长

度 0.89cm,从而使得晶体的长度相对较短,整体结构很紧凑,体积比较小. 它的形状是一端为 $22 \times 22\text{mm}^2$,另一端为 $26 \times 26\text{mm}^2$ 的棱形,桶部晶体长度为 23cm,端盖晶体长度为 22cm. 整个电磁量能器总共有 75848 根晶体. 桶部电磁量能器的读出元件是雪崩型光电二极管,端盖部分的读出元件是真空光敏三极管.

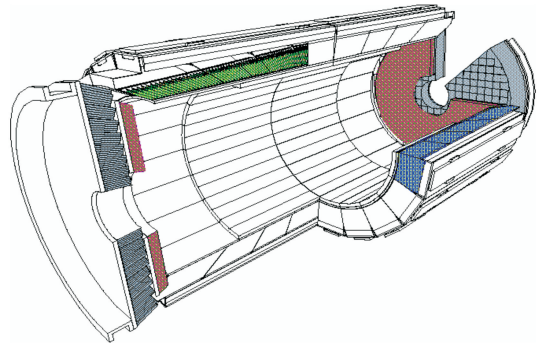


图4 电磁量能器

强子量能器的作用是通过测量喷注的能量和方向以及丢失的横动量来鉴别夸克、胶子和中微子. 有丢失的横动量是新粒子(例如夸克和轻子的超对称伴子)的一个显著特征. 为了得到好的丢失横动量分辨,要求量能器既紧凑又有大的角度覆盖范围, CMS 强子量能器是由闪烁体和铜板组成的取样夹层量能器. 图 5 显示了 CMS 强子量能器的几个部分:桶部(HB),端部(HE)及外部(HO).

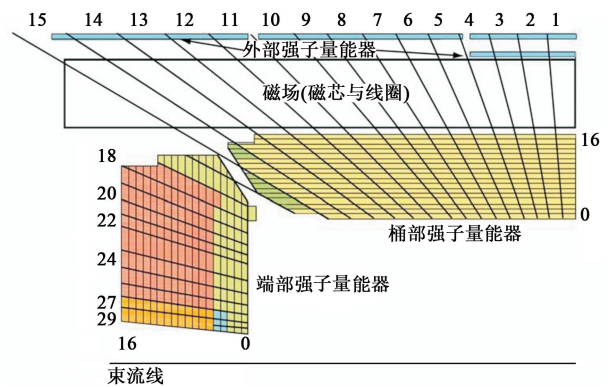


图5 强子量能器

桶部和端部均是由多层 50mm 厚的铜板和 4mm 厚的塑料闪烁体夹层构成的取样型量能器. 塑料闪烁体发出的蓝光经波长位移光纤转换成绿光,再由混合型光电二极管接收. 在桶部的磁铁线圈外,增加了外层量能器(由一或两层闪烁体构成)以保证强子量能器有足够的取样深度. 前向量能器位于 CMS 探测器的两端,由铁和石英纤维夹层组成,用来测量喷注的能量. 强子量能器总共有 10000 多道

读出信号。

μ 子室是 CMS 的重要组成部分. 在 LHC 这样高亮度($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)下,在很强的本底中识别某些感兴趣的过程时, μ 子的探测有着特别重要的意义. 比如,对于标准模型的 Higgs 粒子衰变到 ZZ 或 ZZ^* 粒子再衰变到 4 轻子的过程,当轻子都是 μ 子时,被称为“黄金”发现道. 这是因为除了 μ 子比较容易探测以外,4 个 μ 子的不变质量的分辨率也比较好. CMS 对于 μ 子的探测器做了特别的优化设计,在桶部的超导线圈外有漂移管室(DT),在端部有阴极条室(CSC),桶部和端部也都加有阻性板探测器(RPC)(图 6).

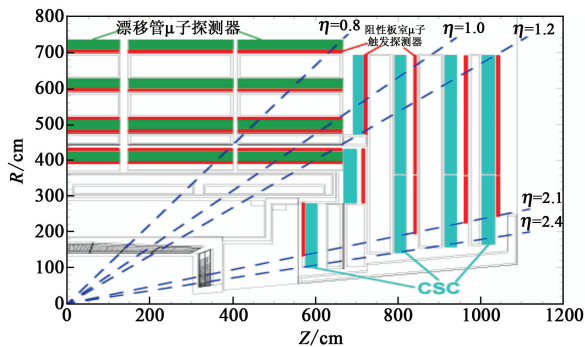


图 6 μ 子探测器

桶部 μ 子探测器漂移管有 4 层,每层包括一或两层 RPC 阻性板室及一层 DT 漂移管. 桶部漂移室的测量精度为 $100\mu\text{m}$. 端部由 RPC 阻性板室及 CSC 阴极条室构成, RPC 用于触发测量,每个阴极条室有 6 层灵敏丝,端部 μ 子将穿过 3 个阴极条室即 18 层灵敏丝留下径迹,因而端部 μ 子测量的精度可达 $80-450\mu\text{m}$.

图 7 给出了 CMS 数据获取的流程. CMS 的读出电子学系统共有约 8000 万道. 在 LHC 运行于 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 亮度时,束流的碰撞频率约为 40MHz. 一级触发后,事例率减少到 100kHz. 再经过几级筛选,触发率减到 100kHz. 最后将这些感兴趣的事例记录下来,以便做进一步的离线分析.

图 8 显示的是在 2008 年 10 月 CMS 探测器记录的一个宇宙线 μ 子穿过 CMS 探测器时的轨迹. 从图中可以清晰地看到 μ 子在 CMS 径迹室,量能器和桶部、端部 μ 子计数器中的信号响应和重建的径迹.

自 20 世纪 90 年代初开始,经过几十个国家的近万名物理学家、工程师和学生们十多年的共同努力,攻克了多项技术难题,目前 CMS 探测器已经建成. 2008

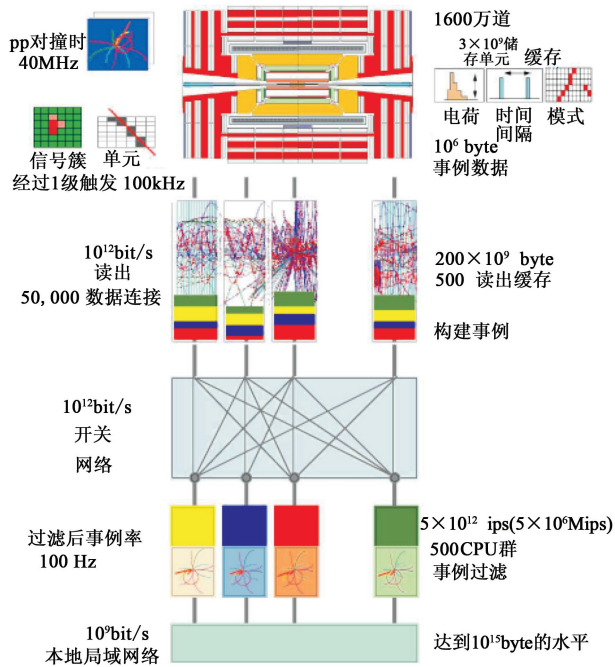


图 7 CMS 数据获取流程

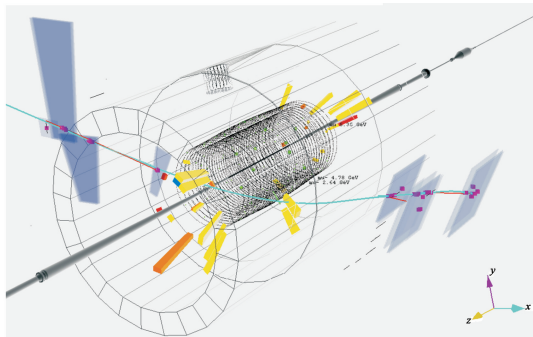


图 8 CMS 探测器记录的一个宇宙线事例

年 9 月 10 日, LHC 储存环迎来了第一束实验质子束流, CMS 探测器成功地记录下了这一经典时刻. 接下来的两个月里, CMS 探测器在全磁场 (3.8T) 下采集了大量的宇宙线事例. 随着 2009 年年底 LHC 的质子-质子对撞运行的启动, CMS 的物理数据获取已经开始. 我们热切地期待在不远的将来,重大的物理发现将展现在我们面前. 我们多年的心血将结出丰硕的果实.

参考文献

[1] Chatrchyan S *et al.* The CMS experiment at the CERN LHC, The CMS Collaboration. 2008, JINST, 3 S 08004
 [2] Krasnikov N V, Matveev V A. Physics at LHC, arXiv: hep-ph/9703204 v1 28 Feb 1997