

编者按 2008年9月10日,第一束质子注入周长27公里的大型强子对撞机(LHC),标志着这台迄今人类建造的最大科学研究装置正式启动.全世界为之轰动,人们用“质子的一小段行进,人类的一大步跳跃”评价它的意义.可是,人们高兴了还不到10天,就在9月19日,事故发生了.LHC中的两块超导磁铁间的连接导体短路引起低温管破裂,致使数以吨计的液氦喷流到隧道中,并造成十余块超导磁铁损坏,调试工作嘎然而止.有人称这一事故使LHC“从天堂坠入地狱”.挫折和失败并没有使科学家失去雄心壮志,他们认真地分析了事故的原因,采取了有效的技术措施,着手更换损坏的磁铁,并制订了新的工作计划:LHC将在2009年夏天重新启动.读者一定很关心,科学家为什么如此百折不挠地建造LHC?它涉及哪些重大科学问题?人们如何利用LHC开展实验研究?在LHC上将会获得什么样发现?在这个专栏里,我们邀请了五位参加LHC上实验的中国科学家来谈谈这些问题,分两期刊登,以飨读者.

## 在大型强子对撞机上的 CMS 实验\*

陈国明<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** LHC( large hadron collider )是目前世界上能量最高的强子对撞机. CMS( compact muon solenoid ,中文译名是紧凑型缪子螺线管探测器)是LHC上的主要实验计划之一,其目标就是要寻找Higgs粒子或者超出标准模型的其他新粒子,弄清自然界的电弱破缺机制,以及寻找暗物质. CMS实验位于高能量和高亮度的最前沿,是21世纪初人类认识微观世界最重要的物理实验之一.中国参加了这项国际合作,制作了部分 $\mu$ 子探测器、磁铁支架、电子学和地板等,目前转入物理研究工作,争取在物理研究中作出有显示度的贡献.文章简要介绍了CMS探测器以及CMS实验的目标和意义.

**关键词** 大型强子对撞机(LHC),紧凑型缪子螺线管探测器(CMS),希格斯粒子,暗物质

## Compact muon solenoid experiment on the Large Hadron Collider

CHEN Guo-Ming<sup>†</sup>

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

**Abstract** The Large Hadron Collider( LHC ) is the hadron collider with the highest colliding energy. One of its experiments , with the compact muon solenoid( CMS ) , aims to search for the Higgs or other new particles , to elucidate the nature of electroweak symmetry breaking , and to search for dark matter. In order to catch up with the cutting edge of high energy physics , China has decided to participate in the CMS collaboration , and has taken part in the development of the detectors such as the endcap muon detector( Cathode Strip Chamber ) , Resistive Plate Chamber , the magnetic yoke support structure , and so on. Now Chinese physicists are working on physics studies , where they hope to make noticeable contributions. The article gives a brief introduction to the CMS detector , its physics goals , and its importance.

**Keywords** Large Hadron Collider( LHC ) , compact muon solenoid( CMS ) , Higgs , dark matter

### 1 大型强子对撞机

在欧洲阿尔卑斯山脚下有一个美丽的日内瓦湖.湖的前面有一片开阔地,在地下100m深处有一

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10435070)、国家自然科学基金重大项目(批准号:10721140381)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB816101)和中国科学院(批准号:KJXC2-YW-N17)资助项目

2008-09-16收到

<sup>†</sup> Email: zhengm@ihep.ac.cn

条周长 27km 的隧道. 在这里目前世界上最大的质子-质子对撞机正在试运行. 这一对撞机称为 Large Hadron Collider, 简称 LHC, 中译名为大型强子对撞机. 在试运行期间, 每个质子的能量为 5 万亿电子伏特. 1 个电子伏特的能量为 1 个电子通过电势差为 1 伏特的电场所获得的能量, 标记为 eV, 5 万亿电子伏特标记为 5TeV, T 代表  $10^{12}$ . 这样对撞的总能量为 10TeV. 当满负荷运行时, 每隔 25ns( ns, 即纳秒,  $10^{-9}$ 秒)就有两个质子束团面对面相撞. 每个束团中有  $10^{11}$  个质子, 它们被压缩成一条直径 16 $\mu$ m、长度 7cm 的细丝, 每对撞一次平均有 23 对质子碰上, 那时每个质子的能量为 7TeV, 对撞总能量为 14TeV. 由于对撞能量如此之高, 质子与质子的对撞实际上变成构成质子的夸克和胶子, 胶子与胶子, 夸克与夸克之间的相互作用. 在对撞的刹那间, 夸克和胶子都是自由的, 这模拟了宇宙起始的情况, 那时大量的轻子、夸克和胶子等从大爆炸中产生出来, 但马上夸克和胶子碎裂成强子. 对撞的初态为胶子和夸克, 对撞以后的末态可能性最大的仍是胶子和夸克. 在高能物理这种可能性用截面来描述. 据计算, 末态为胶子和夸克, 最后碎裂为强子的总截面约为  $10^{-25}$ cm<sup>2</sup>. 由于对撞机的设计亮度为  $10^{34}$ cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. 在满负荷运行时, 这种强子末态的事例率为  $10^{34}$ cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>  $\times$   $10^{-25}$ cm<sup>2</sup> =  $10^9$ /s.

由于 LHC 的能量最高, 亮度也最高, 处于人类认识微观世界的最前沿, 它将开启物理学的黄金时代.

LHC 设有 4 个对撞点, 它们是 ATLAS 探测器, ALICE 探测器, CMS 探测器和 LHCb 探测器, 其中 ATLAS 探测器和 CMS 探测器是其主要实验, 这两个实验的目标是寻找 Higgs 粒子和其他新的物理现象. 本文主要介绍大型强子对撞机上的 CMS 实验.

## 2 标准模型

要理解 CMS 实验的物理目标及其意义, 可以从我们日常所见的物体谈起. 任何物体都是由分子构成, 分子由原子构成, 原子由原子核和绕核旋转的电子构成. 而原子核由质子和中子构成, 质子和中子都由夸克和胶子组成. 夸克、胶子和电子到现在为止没有发现有更深层次的结构, 因此被称为基本粒子. 已经知道有 6 种夸克, 它们是上( u ), 下( d ), 奇( s ), 粲( c ), 底( b )和顶( t )夸克. 有 6 种轻子, 它们是电子( e ), 缪子(  $\mu$  ), 陶子(  $\tau$  ), 电子中微子(  $\nu_e$  ), 缪子中微子(  $\nu_\mu$  )和陶子中微子(  $\nu_\tau$  ). 在我们周围的世界中

我们常见有两种相互作用力, 即万有引力和电磁力. 在微观世界中还存在力程很短的弱相互作用力和强相互作用力. 引力的起因是质量, 任何质量不为 0 的粒子都参加引力相互作用, 在基本粒子领域, 由于其引力作用力相对于其他三种是如此之小, 以致于可以被忽略. 这样轻子参加电磁相互作用和弱相互作用, 夸克则参加所有三种相互作用. 除轻子和夸克外还存在携带作用力的媒介粒子, 它们是传递电磁相互作用的光子  $\gamma$ , 传递弱相互作用的  $Z^0$ ,  $W^+$  和  $W^-$  以及传递强相互作用的胶子 g.

人们通过不停的探索形成了描述基本粒子及其相互作用的标准模型. 标准模型实际上由描写电磁力和弱力的电弱统一理论以及描写强力的量子色动力学组成. 标准模型可以解释以往所有的实验现象, 并预言存在  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ , H 和 g 等 5 个玻色子. 结果  $Z^0$  和  $W^+$  在欧洲核子中心的质子-反质子对撞机上被找到, 根据量子色动力学, 胶子是不自由的, 但可以被夸克辐射出来, 形成喷注. 这样的胶子( g )喷射也在丁肇中领导的 Mark-J 实验中被找到. 根据标准模型, 由  $Z^0$  衰变的两个轻子是前后不对称的, 并且极化也是不对称的. 比如我们用  $e^+$ ,  $e^-$  对撞产生  $Z^0$ , 然后由  $Z^0$  衰变到另外两个轻子  $\mu^+$ ,  $\mu^-$ , 由于动量守恒,  $\mu^+$  和  $\mu^-$  一定是背对背的. 现在用一个垂直于束流线的平面放在  $e^+$ ,  $e^-$  的对撞点上, 将  $e^+$  前进方向的一半空间称为前向, 另一半称为后向, 问  $\mu^+$  是往前飞的多还是往后飞的多. 如果令  $A_{FB} = (N_F - N_B) / (N_F + N_B)$ , 其中  $N_F$  是  $\mu^+$  往前飞的事例数,  $N_B$  则是向后飞的事例数. 标准模型预言  $A_{FB}$  不为 0, 并且与温伯格角  $\theta_w$  有关. 这一预言在欧洲核子中心的 LEP 实验得到检验, 并且由此测出  $\sin^2 \theta_w = 0.2302 \pm 0.0004$ . 标准模型预言由  $Z^0$  衰变的两个轻子, 其极化不对称度也与温伯格角有关. 实验上可以测量极化不对称度  $A_{pol} = (N_R - N_L) / (N_R + N_L)$ , 其中  $N_R$  表示由  $Z^0$  衰变的右旋轻子事例数,  $N_L$  表示左旋轻子的事例数, LEP 实验测得  $A_{pol} = -0.1540 \pm 0.007 \pm 0.0044$ , 0.0074 是统计误差, 0.0044 为系统误差. 特别神奇的是由此推断的  $\sin^2 \theta_w$  值为  $0.2306 \pm 0.0011$ , 与  $A_{FB}$  的结果非常一致. 因此在 LEP 实验中标准模型得到了精确检验. 实际上这样的精确检验还有多处, 不一一列举, 到目前为止世界上各个大型对撞实验都未发现与标准模型矛盾之处, 因此标准模型取得了巨大成功. 唯一的遗憾是标准模型预言的 Higgs 粒子至今没有被发现, LEP 给出其质量下限为  $114\text{GeV}/c^2$ . 在自然单位制里,  $c = 1$ , 质量单

位与能量单位相同,可直接记为  $114\text{GeV}$ . 美国费米实验室的 Tevatron 对撞机发现了顶夸克  $t$ ,但至今也未发现 Higgs 粒子.

根据标准模型,Higgs 粒子是质量之源,它使得规范玻色子  $Z^0, W^\pm$  获得质量,通过与费米子的相互作用,使轻子、夸克获得质量.因此这一粒子被称为“上帝”粒子.所以 Higgs 粒子是 LHC 也是 CMS 实验的首要物理目标.

在对宇宙的观测中发现了标准模型不能解释的事情.宇宙中存在大量像银河系这样的星系,对星际物质的运动速度的测量结果表明,星系中存在着大量的暗物质,至今已测量的 967 个星系无一例外,暗物质必须占整个星系物质的 90% 以上,否则这些星系早已瓦解,这是因为外围星系物质的速度太快.图 1 表示测量到的 NGC3198 星系的旋转线速度与离星系中心的距离的关系.从可见的物质分布可以推断出一条下降的曲线,如图 1 中的“盘”曲线.但我们看到的实测旋转线速度随着距离的增加并不下降,这意味存在 10 倍于可见物质的暗物质.

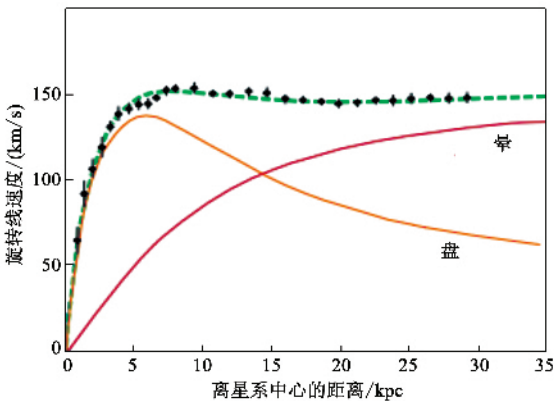


图 1 NGC3198 星系的旋转线速度与离星系中心的距离的关系

另外引力透镜实验和 WMAP 实验结果都得出同样的结论.暗物质到底是什么物质?行星和恒星,星级尘埃,电离气体,已死去的恒星,黑矮星,中子星,黑洞等都是暗物质,但这些是可测算的.90% 以上的暗物质是有别于通常的重子物质的其他物质,是标准模型所不能解释的.

超对称理论可以解释暗物质.超对称理论将电磁力、弱力和强力统一在一起.根据超对称理论,所有粒子都有超对称伴子,其中最轻的超对称粒子“neutralino”是稳定粒子,有可能就是暗物质.但在对撞机实验上至今还未找到任何超对称伴子.如果超对称理论是正确的话,这些超对称伴子以及“neutralino”可以在 CMS 实验找到.

另有一个超弦理论,它将四大作用力全部统一在一起,认为存在超过 4 维时空的超维空间.这一理论中的“KK”粒子也可以解释为暗物质.根据这个理论,两个质子相撞会产生迷你黑洞,然后马上蒸发,产生大量喷注.迷你黑洞蒸发出来的喷注有二个特点,一是数量大,二是  $4\pi$  立体角均匀分布.如果超弦理论是正确的话,这样的迷你黑洞可以在 CMS 实验中被找到.

在上世纪初,牛顿理论看似完美,几乎可以解释一切,只有迈克尔孙-莫雷实验和黑体辐射实验得不到解释.在当时这被称为是美丽天空中飘着的两朵乌云.正是这两朵乌云导致了相对论和量子力学的诞生,引起了一场科学革命.现在对宇宙的观测表明,物理学只能解释仅占宇宙成分 4% 的物质,其余 96% 由暗物质和暗能量构成,它们的本质我们全然不知.这是一朵更大的乌云,如果 CMS 实验能够找到暗物质,将引起科学的另一次革命,从而揭开物理学的新纪元.

### 3 CMS 探测器

加速器对撞产生的高能粒子非常微小,譬如电子,我们只知道它的直径小于  $10^{-18}\text{m}$ ,肉眼是无法看到的,必须建造高能粒子探测器来探测这些粒子,通过计算机采集数据,再重建物理过程.做实验时人不在对撞点,而是在安全的地方通过计算机监测和控制实验进程.

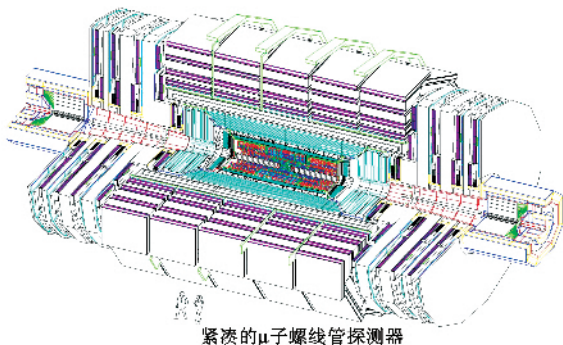
CMS 是一台大型通用型的粒子探测器,它是英文名称 Compact Muon Solenoid (紧凑型缪子螺线管探测器)的缩写.“紧凑”是由于相对于其巨大的重量而结构十分紧凑;“缪子”是因为缪子是它探测的粒子之一,而“螺线管”是指在其大型的超导磁铁内部安放了螺线管线圈,用以偏转对撞产生的带电粒子的径迹以确定它们所带的电荷和能量.

LHC 的质子-质子对撞实际上是部分子之间的对撞(我们将夸克和胶子统称为部分子),因为质子由多个部分子构成,而被撞上的是其中的一个,其余的都是旁观者.旁观者碎裂成强子,保持其母质子的运动方向,顺着束流管道跑掉了.两个对撞的部分子发生相互作用,其末态粒子将偏离出束流管,从而被探测器探测到.一般来说,偏离的角度越大,越容易探测.绝大多数的末态粒子仍旧是胶子和夸克,它们是不能自由的,在离开对撞点之前就碎裂成大量强子,形成喷注,有的末态是光子或者  $Z^0$  或者  $W^\pm$

或者  $W^-$  加上喷注, 还有的是轻子如电子,  $\mu$  子,  $\pi$  子加喷注. 在高能物理中, 像喷注中的  $\pi, k$  等强子, 还有光子、电子、 $\mu$  子都是长寿命粒子, 而像  $Z^0, W^\pm$  和  $\tau$  等都是短寿命粒子, 它们没出束流管道就衰变掉了, 是没法直接探测的. 短寿命粒子最后都衰变到长寿命粒子, 飞出束流管, 从而被探测器捕捉到. 这样对探测器的一个基本要求是能区分这些长寿命粒子: 电子,  $\mu$  子, 光子, 带电强子和中性强子. 末态中还有一种长寿命粒子是中微子, 但无法探测, 因为它们与物质几乎不相互作用. 但我们可以通过动量守恒原理来确定动量丢失. 要求  $x, y, z$  三个方向的动量相加为 0, 因为两质子对撞, 初始的总动量是 0. 不为 0 的部分就是动量丢失. 但由于顺着束流管跑掉的部分无法探测, 我们将这个方向设为  $z$ , 可以探测的是  $x, y$  两个方向的动量丢失, 这两个方向的矢量和叫做横动量丢失.

一个好的探测器还能够精确测量这些长寿命末态粒子的能量和动量, 具有好的空间分辨能力, 也就是能够精确测定粒子是从何处通过, 当两个粒子靠得很近时也能将它们分开, 还要具有好的时间分辨, 也就是能精确测定高能粒子是何时从某处通过的. 恢复时间要短, 测完一个粒子后, 马上能够恢复, 为下一个测量作好准备.

CMS 探测器如图 2 所示. 总体上看是一个圆柱体, 长 21.6m, 直径 14.6m. 束流管是圆柱体的轴, 其直径为 6cm, 对撞点位于圆柱体的中心.



紧凑的  $\mu$  子螺旋管探测器

图 2 CMS 探测器剖面图

这样对撞产生的粒子, 除顺着束流管跑掉的部分, 都能够被探测到. 围绕对撞点套嵌着各种子探测器, 由内到外, 它们是硅像素 (Si-pixel) 顶点探测器、硅微条 (Si-strip) 径迹探测器、钨酸铅晶体电磁量能器、黄铜闪烁体夹层强子量能器、超导螺线圈、轭铁和  $\mu$  子探测器. 由于是套嵌结构, 由对撞点飞出的粒子必须先通过内探测器才能到达外探测器. 强子

量能器以内是探测器的心脏, 但从外形尺寸来看, 超导线圈、轭铁和  $\mu$  子探测器是其主体.

硅像素和硅微条都是半导体探测器, 用于探测带电粒子的径迹. 带电粒子通过时在半导体产生电子空穴对, 在外场的作用下, 电子和空穴分别漂移到正负极, 从而产生讯号. 硅像素和硅微条探测器都是层状结构, 带电粒子每穿越一层都会产生一个讯号, 告诉我们粒子是从哪里通过的. 这样的讯号代表了一个击中点 (hit). 硅像素的空间分辨约是  $15\mu\text{m}$ , 而硅微条的空间分辨约为  $25\mu\text{m}$ . 这两个探测器在 4T 的磁场下工作. 磁场方向平行于束流管. 带电粒子在磁场中作螺旋线运动, 穿越 3 层硅像素和 10 层硅微条, 形成 13 个着火点. 将着火点连接起来就能重建带电粒子的运动轨迹. 螺旋线在  $x-y$  平面的投影是一个圆, 圆的半径与带电粒子的横动量成正比. 从测出的轨迹中可以确定圆的半径, 从而确定带电粒子的横动量, 也能测出轨迹与  $z$  方向的夹角, 从而确定带电粒子的总动量. CMS 实验的动量测量精度很高, 当带电粒子的动量为  $10\text{GeV}/c$  时, 其动量分辨  $\sigma/p$  为 5%, 当动量为  $100\text{GeV}/c$  时  $\sigma/p = 1.5\%$ , 这里  $p$  代表动量,  $\sigma$  为其测量误差.

包在径迹探测器外面的是由钨酸铅晶体构成的电磁量能器, 用以测量电子和光子的能量. 当电子和光子入射到致密的钨酸铅晶体后, 会发生电磁簇射. 就拿电子来说, 射入晶体后由于电离作用, 将使晶体原子激发到高能态, 在入射电子离开后又马上退回到基态并放出荧光, 荧光被与晶体连接的光电倍增管接收、放大, 形成讯号输出. 这个过程中入射电子也损失部分能量, 其电离损失的能量与放出的荧光数成正比. 另一方面, 入射电子又在原子核的作用下发生韧致辐射, 放出光子. 光子与晶体主要有 3 种相互作用, 其一是光电效应, 其二是康普顿散射, 其三是正负电子对产生. 当光子能量大于  $10\text{MeV}$  时, 正负电子对产生占主导地位. 而高能入射电子辐射出的光子能量远高于  $10\text{MeV}$ , 这样的光子又转换成正负电子. 不管是正电子还是负电子, 它们都一方面使晶体激发放出荧光, 另一方面通过韧致辐射放出高能光子. 这样就形成了由电子到光子, 由光子到正负电子对, 正负电子对到光子, 光子再到正负电子对的级联过程, 这一过程叫做电磁簇射. 当电子能量降到大约  $10\text{MeV}$  以后, 电子的能量损失以电离损失为主, 电磁簇射的过程结束. 簇射过程中产生大量的次级正负电子都能使晶体激发放出荧光, 而荧光光子总数与入射电子的能量成正比. 当入射的粒子是光

子时,首先发生的是正负电子对产生,接下来同样是电磁簇射. CMS 电磁量能器有能力将质子与质子对撞产生的电子和光子的能量全部吸收,并能精确测量其入射能量. 当入射能量为  $100\text{GeV}$  时,能量分辨  $\sigma/E = 4\%$ .

包在电磁量能器外面的是强子量能器,用以测量强子的能量. CMS 强子量能器由铜板加闪烁体夹层而成. 其中铜板称为吸收体,闪烁体为取样介质. 高能强子打在吸收体上与原子核相互作用会产生许多次级强子,如  $\pi, k, p, n$  等,如果这些次级强子的能量足够大,又会与原子核作用而产生新的次级强子,这样就形成了强子簇射. 其中的带电强子在通过取样介质时使其原子激发,并退激发放出荧光,被光电倍增管读出,这样的荧光数与入射强子的能量成正比. CMS 强子量能器可以将 LHC 对撞产生的强子能量全部吸收,并测量其能量. 但强子能量的测量精度比电子、光子的能量的测量精度要差. 在入射强子的能量为  $100\text{GeV}$  时,  $\sigma/E = 10\%$ , 主要原因是强子簇射的涨落较大,特别是其中的中性成分如  $k^0$  和中子等,不在取样介质中产生讯号,而  $\pi^0$  马上衰变成两个光子,展开电磁簇射,而这种次级中性强子的比例对于每个强子簇射并不一致.

包在最外面,规模最大的是  $\mu$  子探测器. CMS  $\mu$  子探测器是气体室.  $\mu$  子射入气体室以后使气体电离,电离的电子在外场作用下漂移至阳极产生讯号,与径迹探测器一样,这样的讯号代表一个着火点,将多个这样的着火点连在一起形成一条径迹,由于  $\mu$  子在磁场下拐弯,通过径迹重建可以确定  $\mu$  子的动量. CMS 使用了三种气体室来探测  $\mu$  子,一种是漂移管( drift tube ),一种是阴极条室( cathode strip chamber,简称 CSC ),另一种是阻性板室( resistive plate chamber,简称 RPC ). 第一种用在桶部,第二种用在端盖. RPC 在桶部和端盖都使用时,主要用于触发. CMS  $\mu$  子动量的测量精度,在  $100\text{GeV}$  是为  $1.5\%$ ,在  $1\text{TeV}$  时为  $5\%$ . 关于 CMS 探测器的详细描述可参阅文献 [ 1 ].

CMS 探测器可以将质子-质子对撞产生的各种长寿命的粒子区分开:

( 1 )光子:在对撞点产生以后穿过径迹室,不留讯号,在电磁量能器中产生电磁簇射,将所有能量都沉积在电磁量能器中. 因此光子的特点是只有电磁量能器有能量输出.

( 2 )电子:在径迹室留下径迹,在电磁量能器产生电磁簇射,停止在电磁量能器中.

( 3 )带电强子:径迹室有径迹,电磁量能器有部分能量沉积,主要能量沉积在强子量能器中,停止在强子量能器.

( 4 )中性强子:径迹室中无径迹,其他与带电强子相同.

( 5 ) $\mu$  子:穿过所有探测器,到达  $\mu$  子探测器,并在  $\mu$  子探测器中留下径迹后逃逸.  $\mu$  子在经过的地方都留下电离讯号. 探测器可以通过其轨迹精确测量它的动量.

## 4 CMS 实验

CMS 实验的首要物理目标是寻找 Higgs 粒子. Higgs 质量小于  $114\text{GeV}/c^2$  已经被 LEP 实验排除. 在 LHC, Higgs 主要由两个胶子融合产生,当 Higgs 质量为  $120\text{GeV}/c^2$  时,其产生截面约为  $10\text{pb} = 10^{-35}\text{cm}^2$ ,其次是由  $W^+, W^-$  或者  $Z Z$  融合产生,  $W$  和  $Z$  由夸克辐射出来,其截面比胶子融合产生要低一个量级. 在前面已经说过,强子的总截面为  $10^{-25}\text{cm}^2$ ,因此 Higgs 的产生截面比强子要小 10 个量级,问题还不止于此, Higgs 粒子还要衰变. 当质量在  $120\text{GeV}/c^2$  左右时, Higgs 粒子主要是衰变到  $b$  夸克对,  $b$  夸克对碎裂成强子喷注,与普通强子事例很难区分. 约有 7% 的几率衰变到  $\tau$  轻子对,但  $\tau$  轻子也不是稳定粒子,它衰变到轻子加中微子的几率是 35%,强子加中微子的几率是 65%. Higgs 粒子也可以直接衰变到两个稳定粒子:  $\gamma\gamma$ , 但衰变分支比只有 2%. 尽管如此,当 Higgs 粒子质量在  $120\text{GeV}/c^2$  左右, CMS 主要是通过  $\tau$  轻子对和两光子的衰变道来寻找 Higgs 粒子,其事例率比强子事例率要小 12 至 13 个量级. 这就是说,至少要在  $10^{12}$  个事例中找出一个 Higgs 粒子,就好比在一大堆沙子中,有一颗是金沙,需要找出来.

CMS 在设计的时候考虑到了这些困难,目前建造完成的探测器有能力将 Higgs 粒子找出来. 以两光子末态为例, Higgs 粒子衰变的两个高能光子,记为  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , 能量全部沉积在电磁量能器中,而强子的能量在电磁量能器中沉积较小,由此可以排除大部分强子事例. 但问题的复杂性在于胶子和夸克在碎裂时可以产生  $\pi^0, \pi^0$  在束流管道内就衰变成两个光子,与 Higgs 粒子衰变成的两个光子不同, Higgs 粒子衰变的两个光子张开角大,而  $\pi^0$  衰变的两个光子几乎靠在一起,而能量也全部沉积在电磁量能器中,容易被误判成一个光子. 如果在一个强子事例中

有两个这样的  $\pi^0$  , 就容易被误认为是 Higgs 粒子事例. 但是强子事例中的  $\pi^0$  是由胶子、夸克碎裂出来的, 必然伴随着同时碎裂出来的大量的其他强子, 形成喷注. 而 Higgs 粒子衰变的两个光子都是孤立的, 根据这一特点, 可以排除绝大部分含两个高能  $\pi^0$  的强子的事例.

对于  $H \rightarrow \gamma\gamma$  , 还有无法抑制的本底, 就是由正反夸克对直接湮灭为两个光子, 这两个光子也是孤立的. 我们可以用两个光子的不变质量来区分. 令:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2,$$

其中  $E_1$  和  $\mathbf{p}_1$  为第一个光子的能量和动量,  $E_2$  和  $\mathbf{p}_2$  则为另一个光子的能量和动量. 这里采用自然单位制. 根据相对论, 如果这两个光子是由 Higgs 粒子衰变而来, 则  $m_{\gamma\gamma}$  就是 Higgs 粒子的质量. 实际上光子的质量为 0,  $E_1 = P_1$ ,  $E_2 = P_2$ , 两光子的不变质量平方可写成:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2(P_1 P_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2).$$

这样在  $m_{\gamma\gamma}$  的分布图上, 由夸克对湮灭的双光子事例以及混入的强子事例形成连续谱, 而  $H \rightarrow \gamma\gamma$  的事例形成一个峰, 峰的位置就是 Higgs 粒子的质量. 如图 3 所示.

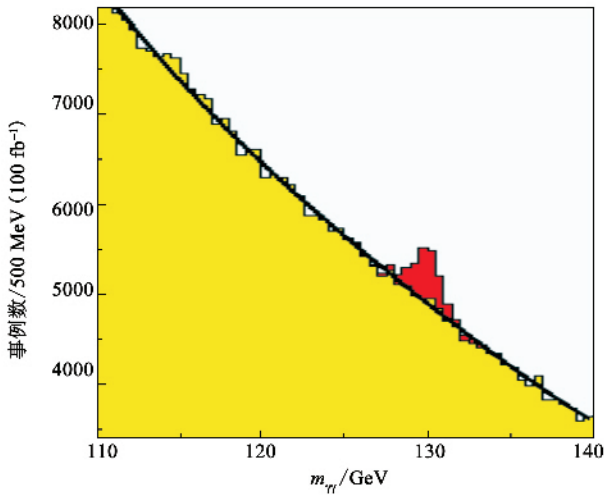


图 3 两光子不变质量分布

本底的  $m_{\gamma\gamma}$  分布是一个线性下降的连续谱, 而由 Higgs 粒子衰变的  $m_{\gamma\gamma}$  在  $130\text{GeV}/c^2$  处形成一个峰. 这是由蒙特卡罗模拟得到的, 模拟时假设 Higgs 粒子的质量为  $130\text{GeV}/c^2$ . 所以当我们发现了一个事例, 其中有两个高能光子, 并不能说发现了 Higgs 粒子, 只有当  $m_{\gamma\gamma}$  的分布图上出现了一个显著的峰, 才能说发现了 Higgs 粒子.

将图 3 中斜坡上面凸起部分的事例数记为  $S$ ,

而将凸起部分斜坡下面的事例数记为  $b$ . 当  $S/\sqrt{b} \geq 3$  时, 可以说发现了 Higgs 粒子迹象, 当  $S/\sqrt{b} \geq 5$  时可以说发现了 Higgs 粒子. 如果标准模型的 Higgs 粒子存在, 且质量在  $120\text{GeV}/c^2$  左右, LHC 的亮度能够顺利到达设计指标的话, 根据模拟结果, CMS 可以在前三年从该反应道发现 Higgs 粒子.

当 Higgs 粒子质量大于  $130\text{GeV}/c^2$  时, CMS 将主要地从  $H \rightarrow W^+ W^-$  或  $H \rightarrow Z Z$  寻找 Higgs 粒子. 以  $H \rightarrow Z Z$  为例, 每个 Z 玻色子可以衰变到正负  $\mu$  子对, 这样 Higgs 粒子最后衰变到两对  $\mu$  子. 如图 4 所示, 事例中共有 4 个  $\mu$  子, 并且两正两负. 在 CMS 实验中,  $\mu$  子是最清晰的, 因为其他粒子都被阻挡在强子量能器以内. 所以该反应道被称为发现 Higgs 粒子的黄金道. 即使如此, 该道也有不可抑制的本底, 那就是由正反夸克直接湮灭到两个 Z 玻色子. 我们可以用 4 个  $\mu$  子的不变质量区分, 由 Higgs 粒子衰变的 4 个  $\mu$  子的不变质量形成一个峰, 而本底的 4 个  $\mu$  子的不变质量则是连续分布. 如果 Higgs 粒子的质量在  $130\text{—}160\text{GeV}/c^2$  或大于  $190\text{GeV}/c^2$ , 从该道寻找 Higgs 是最容易的, 而当 Higgs 质量在  $160\text{—}190\text{GeV}/c^2$  时, 通过  $H \rightarrow W^+ W^-$  来寻找是最容易的.

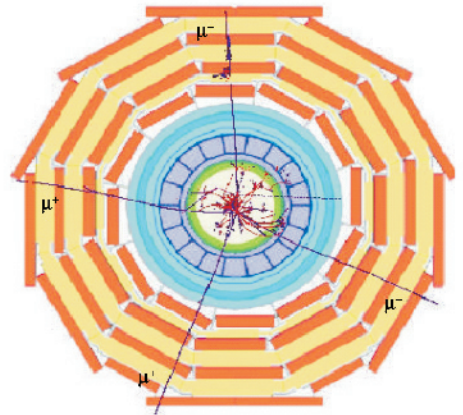


图 4  $H \rightarrow Z Z \rightarrow 4\mu$  事例

根据超对称理论, 超对称伴子在质子-质子对撞中可以通过强作用成对产生, 但这些超对称粒子都不稳定, 一个伴子衰变成一个普通粒子加另一个更轻的超对称粒子, 通过级联衰变最后衰变到最轻的超对称粒子 neutralino, 它是稳定粒子, 也是暗物质的候选者, 它将穿出整个探测器, 不留任何讯号. 因此超对称粒子的特征是大的横动量丢失, 一般伴随着多个轻子和多个强子喷注. 质量  $30\text{GeV}/c^2$  以下的 neutralino 已经在 LEP 被排除, 如果其质量在  $1\text{TeV}/c^2$  以下的话, 可以在 CMS 实验中被发现.

如果超弦理论正确的话,在 LHC 质子-质子对撞可以形成迷你黑洞,但它的寿命很短,马上就蒸发为大量的胶子与夸克,形成大量的强子喷注,喷发而出。这样的事例有明显的特点,其一是横动量大,其二是多重数高,其三是末态粒子  $4\pi$  立体角均匀分布,其四是没有横动量丢失。这样的迷你黑洞如果存在, CMS 能够发现它。

顶夸克  $t$  已经在美国费米实验室 Tevatron 对撞机上被发现,它是 6 个夸克中质量最大的夸克,约为  $171\text{GeV}/c^2$ ,与其他夸克不一样,顶夸克在产生以后马上衰变为  $W$  玻色子和底夸克。在 LHC 满负荷运行以后,每秒钟可以产生 10 对顶夸克,所以 LHC 是顶夸克“工厂”。CMS 探测器可以利用这些顶夸克精确测量顶夸克的质量。另外 CMS 还将收集大量的含  $W$  玻色子的事例,精确测量  $W$  的质量。根据标准模型, Higgs 粒子的质量与顶夸克质量和  $W$  质量是有关联的,如图 5 所示,其中横轴为顶夸克质量,纵轴为  $W$  质量。比如说,测到的 Higgs 粒子质量为  $114\text{GeV}/c^2$ ,则可以在此图上画一条斜线。测定了顶夸克质量和  $W$  质量则可以在此图中画一个点,如果该点在斜线上,则说明标准模型是自洽的。目前测到的  $W$  质量为  $80.4\text{GeV}/c^2$ ,顶夸克质量约为  $171\text{GeV}/c^2$ ,落在 Higgs  $114\text{GeV}/c^2$  斜线的上方,说明 Higgs 粒子质量应该小于  $114\text{GeV}/c^2$ ,但小于该值的 Higgs 粒子已被排除。这里出现了一个标准模型的危机。当然目前测量的误差较大,实心椭圆代表了  $1$  倍  $\sigma$  的误差范围,在  $2$  倍  $\sigma$  的误差范围内,标准模型还能符合。CMS 可以将顶夸克质量的测量精度提高一倍,将  $W$  质量的测量精度提高 5 倍,到时会标准模型进行严格的检验。

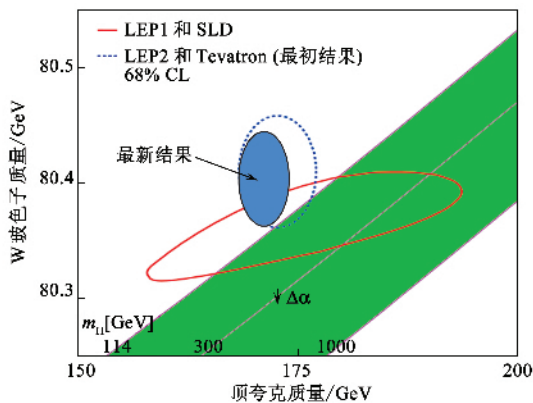


图 5 Higgs 粒子质量与顶夸克质量和  $W$  玻色子质量的关系

关于 CMS 更加详细的物理目标以及新物理的发现潜力可参考《CMS Physics Technical Design Re-

port Vol. II》<sup>[2]</sup>。

## 5 CMS 实验中的中国组

在我国科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院的联合支持下,由中国科学院高能物理研究所和北京大学代表我国参加了 CMS 实验,为 CMS 实验研制了磁铁支架,实验大厅的地板,三分之一的端盖  $\mu$  子探测器和部分阻性板室。前面已经介绍了端盖  $\mu$  子探测器为阴极条室,我国研制的阴极条室各项性能指标达到或超过设计要求,获得国际同行的好评。图 6 为安装在探测器上的由中国组研制的阴极条室。现阶段已转入物理研究工作,已经着手从两光子和  $\tau$  轻子对来寻找 Higgs 粒子,将在粒子识别方面做出独特贡献。同时还要寻找新的物理现象,如从  $\mu$  子对寻找新的共振峰,从  $WZ$  末态寻找新的玻色子,等等。希望中国组能够在物理研究中发挥有显示度的作用,提高我国的科学研究在国际上的影响力,为人类深入认识物质微观世界的结构做出我们应有的贡献。

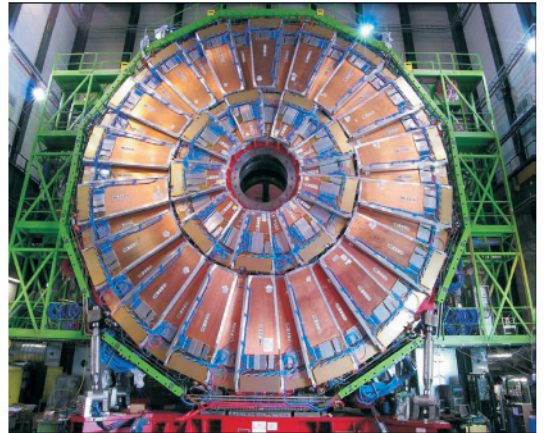


图 6 安装在探测器上的由中国组研制的阴极条室

致谢 文中所用图片由欧洲核子中心提供。

### 参考文献

- [1] The CMS collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC. <http://www.iop.org/EJ/jamal/-page=extra.lhc/jinst>
- [2] The CMS collaboration. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2007, 34: 1189