



大型强子对撞机上的 CMS 实验

杨 民

CMS 探测器是大型强子对撞机 (LHC) 上的四个实验之一, 位于日内瓦附近的欧洲核子中心(CERN)法国一侧地下 100 米处。它的全称是“紧凑 μ 子螺线管” (Compact Muon Solenoid)。不过, 这个探测器并不是仅仅为测量 μ 子而设计的, 实际上它是一个大型通用探测器。CMS 探测器 (图 1) 长 21.6 米, 直径 15 米, 总重量 12500 吨, 建造费用约 4.75 亿瑞士法郎。这是一个大型国际合作项目, 有 37 个国家或地区的 161 个研究单位约 2000 名科学家及工程师参与了 CMS 探测器的研制, 其中包括中国科学院高能物理研究所, 上海硅酸盐研究所, 北京大学, 中国科学技术大学。

CMS 实验的主要物理目标包括: 寻找 Higgs 粒子, 检验标准模型, 研究 B 物理及 CP 破坏, 检验超对称理论并寻找超对称粒子, 发现其它新粒子等等。需要注意的是, 并不能在探测器中“真正看到”

Higgs 粒子或超对称粒子, 因为它们是不稳定的, 会很快衰变为较轻的粒子。能够探测到的正是这些稳定的较轻的粒子。我们不能准确预言 Higgs 粒子的质量, 但是对于任何质量的 Higgs 粒子, 可以知道它将如何衰变。对于轻 Higgs 粒子 (质量小于 150 GeV), 发现它的最好机会是其衰变为两个光子; 对于较重的 Higgs 粒子, 有多种模式可以衰变到电子和 μ 子。对于超对称粒子, 最显著的特征是探测器中有丢失的 (即测不到的) 能量。因为质子对撞的总能量是已知的, 通过对每一个事例的总能量求和, 如果发现能量不守恒, 就可以测到这部分丢失的能量, 从而发现超对称粒子。

为了实现 LHC 的物理目标, CMS 探测器的设计要求可以归纳如下: 在很宽的动量及角度范围内, 有很好的 μ 子鉴别能力和动量分辨, 很好的双 μ 子不变质量分辨, 及 μ 子电荷识别能力; 有很好的带电粒子动量分辨和重建效率, 保证 τ 轻子和 b 夸克-喷注的有效触发及离线标定; 很好的电磁能量分辨, 很好的双光子, 双电子的不变质量分辨, 很宽的几何

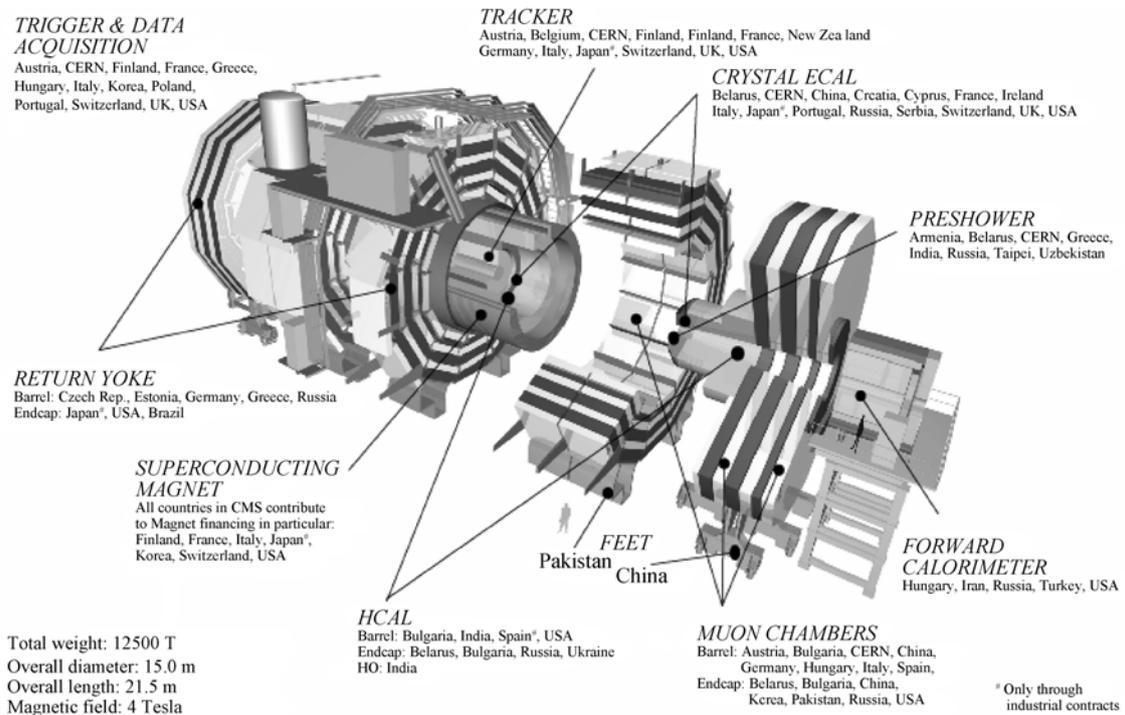


图 1

覆盖，好的 π^0 排斥以及在高亮度时有效的 photons 和轻子孤立化；很好的丢失横能量分辨和双喷注不变质量分辨。

根据设计要求，CMS 探测器包含的几个主要子探测器，由内向外分别为：径迹室，电磁量能器，强子量能器，超导线圈， μ 子室。图 2 是 CMS 探测器的剖面示意图，显示出几种不同的粒子如何通过各子探测器。

光子通过径迹室没有信号，在电磁量能器中发生电磁簇射产生信号，不能到达强子量能器和 μ 子室；电子通过径迹室会留下径迹，在电磁量能器中发生电磁簇射，不能到达强子量能器和 μ 子室；带电强子如 p^+ ， π^+ ， K^+ 等粒子通过径迹室会留下径迹，

在电磁量能器中有小部分能量沉积，在强子量能器中发生强子簇射，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没有信号，在 μ 子室产生信号。

径迹室 可以精确测量带电粒子径迹并重建质子-质子对撞的初级顶点及粒子衰变的次级顶点。CMS 探测器的超导线圈为径迹室提供了 4 特斯拉的均匀磁场。径迹室由多层硅微片和硅微条构成一个长 5.4 米，直径 2.4 米的圆筒（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，就可以确定粒子的径迹。而根据粒子径迹在磁场中的弯曲半径，可以测出粒子的动量。最内层的硅微条用于测

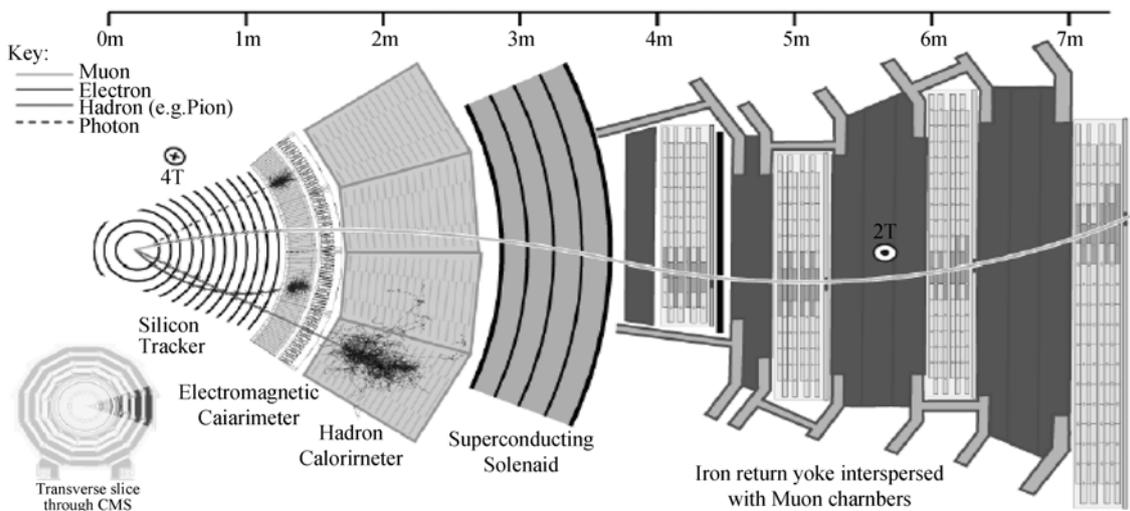


图 2

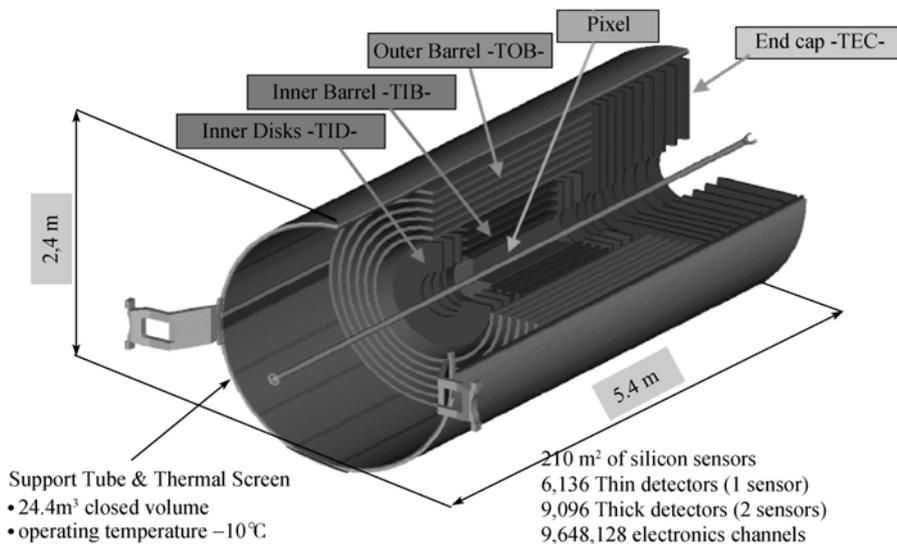


图 3

量初级顶点及次级顶点，其测量精度可达到 $150 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。径迹室总共有 1140 万个硅微条和 6590 万个硅微片。

电磁量能器 用来测量入射电子和光子的能量及位置，并鉴别光子和 π^0 。CMS 电磁量能器（图 4）使用钨酸铅晶体做为探测物质。晶体电磁量能器有很好的能量分辨，因为电子和光子的能量几乎全部沉积在晶体中。钨酸铅晶体中 98% 的成份是金属，但是却完全透明。晶体的密度很大—— $8.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，因此有较短的辐射长度—— 0.89cm ，这就使得晶体的长度相对较短，因而量能器很紧凑。晶体的形状是一端为 $22 \text{mm} \times 22 \text{mm}^2$ ，一端为 $26 \text{mm} \times 26 \text{mm}^2$ 的棱台，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。

强子量能器 强子量能器的重要作用是通过测量喷注的能量和方向，及丢失的横能量鉴别夸克，胶子和中微子。有丢失的横能量是新粒子——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能量分辨，要求量能器既紧凑又有很大的覆盖范围。图 5 显示了强子量能器的几个部分：桶部(HB)，端盖(HE)及外部(HO)。前向(HF)部分没表示出来。

桶部和端盖部分是由多层 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，再用混合型光电二极管接收。在桶部的磁铁线圈外，加了外层量能器（由一或两层闪烁体构成）以保证足够的取样深度。前向量能器位于 CMS 探测器的两端，由钢和石英纤维组成。用来测量喷注的能量。强子量能器总共约有 10000 道。

μ 子室 在 LHC 这样高亮度下， μ 子的探测在预期很大的本底中对于识别某些感兴趣的过程有特别的意义。比如，对于标准模型的 Higgs 衰变到 ZZ 或 ZZ^* 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。这除了 μ 子比较容易探测以外，4 个 μ 子的不变质量分辨率也比较好。CMS 对于 μ 子的探测做了特别的优化，在桶部的超导线圈外加了漂移室(DT)，在端盖部分加了阴极条室(CSC)（图 6）。

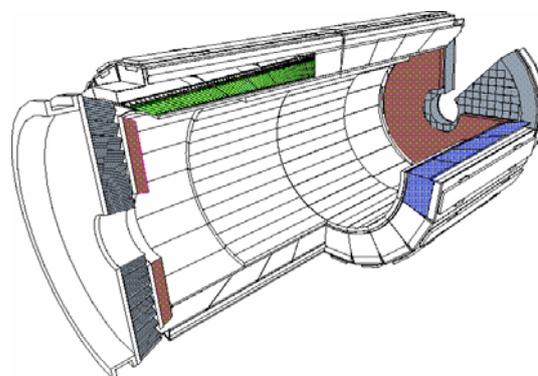


图 4

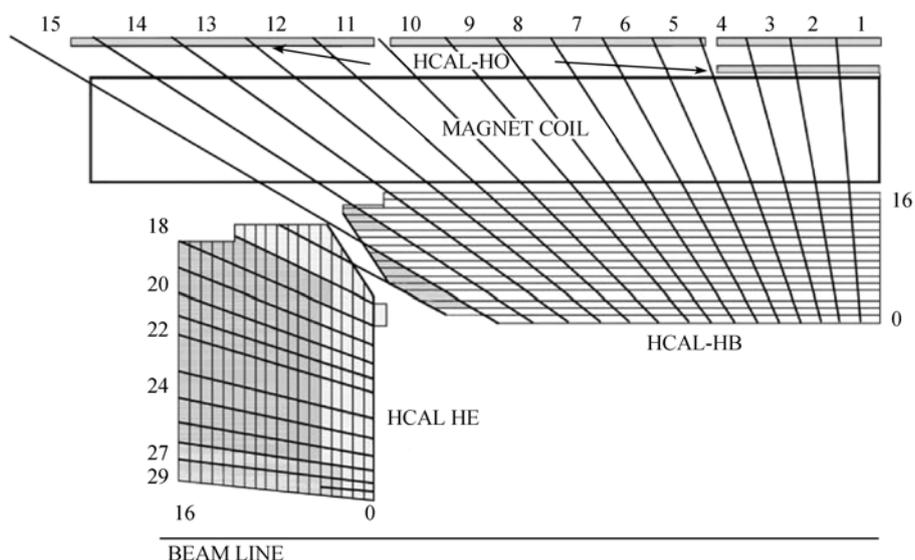


图 5

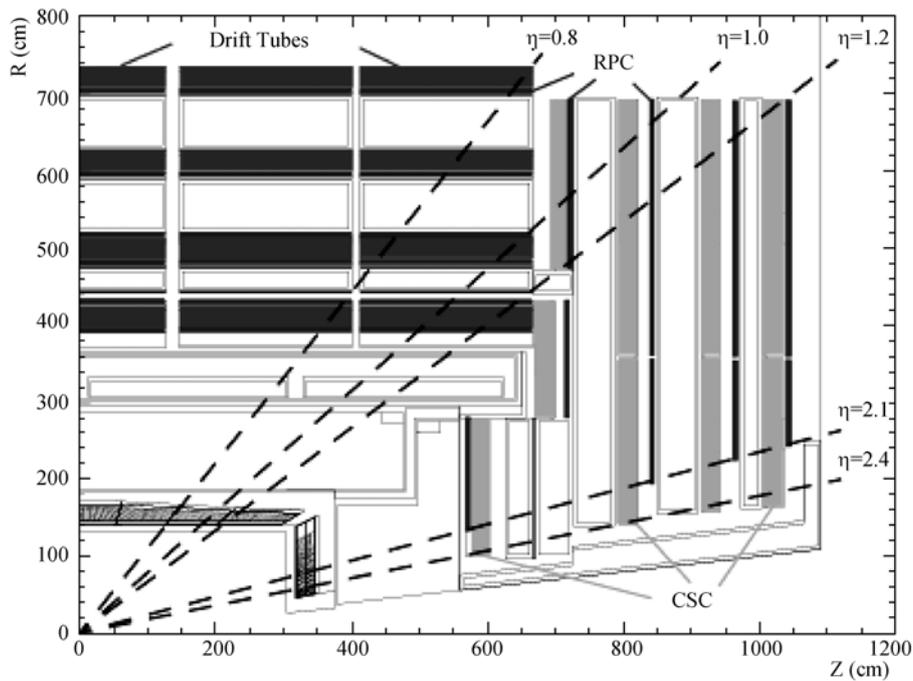


图 6

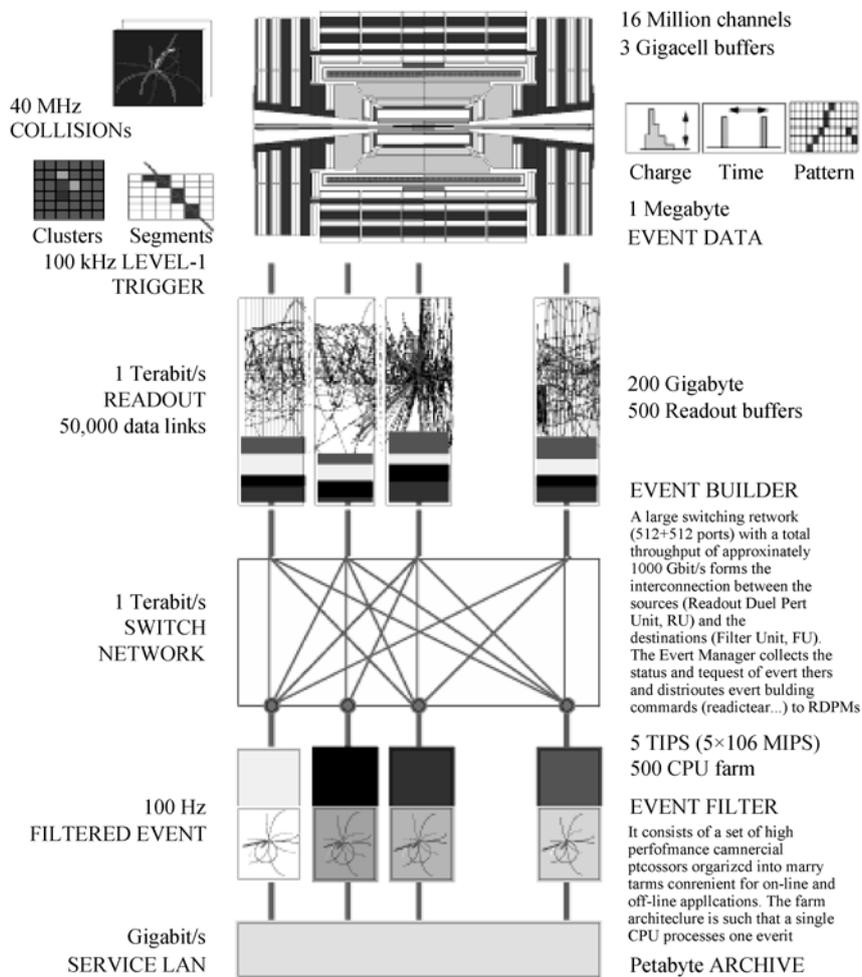


图 7

桶部共有 4 层, 每层包括一或两层 RPC 及一层漂移室。桶部漂移室对于着火点的测量精度为 100 微米。端盖部分由 RPC 及阴极条室构成, 每层测量的着火点精度范围为 80 到 450 微米。

CMS 的读出电子学系统总共有 7800 万道。在 LHC 运行于 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 亮度时, 束流的碰撞频率约为 40MHz。经过一级触发, 触发率减少到 100kHz。再经过事例选择, 触发率减少到 100Hz。最后这些

感兴趣的事例将被记录下来, 以便做进一步的离线分析。图 7 是数据获取的流程。

经过十多年的设计和建造, CMS 探测器已经完成, 随着 2008 年 9 月 LHC 的运行, CMS 的数据获取也将开始。我们期待在不远的将来, 重大的物理发现将展现在我们面前。

(中国科学院高能物理所 100049)