

LHC 上的 ATLAS 实验

童国梁

1. CERN 的 LHC 计划

1989 年欧洲核子中心(CERN)的质心能量 100-200GeV 的正负电子对撞机 LEP(Large Electron-Positron Collider)正式运行。LEP 后建什么样的加速器, 国际社会早有共识, 即建造一台质心能量为几十 TeV 的质子对撞机。20 世纪 80 年代以来, 两个类似的强子对撞机, 即美国的 SSC(Super Superconductive Collider) 和 CERN 的大型强子对撞机 LHC(Large Hadron Collider)同时进行预研。由于种种的原因, 1993 年 10 月美国参众两院联席会议表决停建 SSC。这时, 欧洲科学家却以坚定的行动显示了对基础研究的决心, 1994 年圣诞节前的 12 月 16 日 CERN 理事会通过了建造 LHC 计划。今天, 十几年过去了, 这项轨道周长 27 千米、质心能量为 14TeV 的 LHC 即将运行。LHC 是一项令人神往的计划, 寄托了高能物理界的多年梦想。表 1 列出了 LHC 的主要设计指标。

表 1 LHC 的主要设计指标

物理运行开始时间	2008 年底前后	
粒子对撞模式	p-p	pb-pb
质心能量/TeV	$\sqrt{s}=14$	$\sqrt{s_m}=6$
亮度/cm ⁻² s ⁻¹	1.0×10^{34}	2×10^{27}
能散/10 ⁻³	0.1	0.1
束流长度/cm	7.5	7.5
束流半径/mm	16×10^{-3}	16×10^{-3}
亮度寿命/hr	10	6.7
加速周期/s	1200	
注入能量/GeV	450.0	177.4/n
每个束团粒子数	10.5×10^{10}	9.4×10^7
长/km	26.659	

LHC 的性能指标远比现有的强子对撞机要高。LHC 的 p-p 对撞的质心能量为 14TeV, 而美国费米实验室的 Tevatron 对撞机, 其强子对撞的质心能量只有 2 TeV; LHC 的设计亮度 $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 而 Tevatron 上的亮度为 $L = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

LHC 上质子束团时间相隔 25 ns (也即 7.5 m 的空间距离), 束团穿越率为 40 MHz。质子-质子总截面 $\sigma \sim 100 \text{ mb}$, 在 $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 亮度下, 相互作用

率 $R \sim 109 \text{ Hz}$, 每束团交叉的平均相互作用率 ~ 25 。

LHC 上计划开展的 4 个实验是: ATLAS, CMS, ALICE 和 LHCb, 其中, ATLAS 和 CMS 两大实验的主要物理目标是探索期待已久的希格斯 (Higgs) 机制, 该机制驱动了弱电标准模型中的自发对称性破缺。希格斯粒子的寻找是 LHC 建造的最重要动力。此外, 这两个实验还可开展在更高的能量下对新理论的探索。ALICE 是 CERN 专为 LHC 上的重离子物理研究设计的实验, 而 LHCb 实验的主要目的是研究中性 B 粒子系统中的 CP 破坏。

图 1 展示了 LHC 上 4 个实验在原 LEP 圈(即后来的 LHC 质子轨道)上的布局示意。LEP 隧道上有 8 个各长 528 米的直线段, 常称为 8 个点(point)。这些点是用来建造实验区和安置实验设备的。LHC 计划中, 两个高亮度的对撞点, 即第 1 和第 5 点上分别安置了 ATLAS 和 CMS 探测器。LHC 的另外两个实验 ALICE 和 LHCb 将建在第 2 和第 8 点上, 也即在原 LEP 上的 L3 和 DELPHI 实验的原址上建造。LHC 的两束质子流将在这 4 个实验区相交。

2. ATLAS 探测器

表 1 所列的 LHC 上 p-p 对撞机的特点自然会对 LHC 实验探测器的设计产生约束。例如: 探测器和电子学必须是强抗辐射的, 因为 p-p 对撞会产生强辐射; 探测器响应也必须足够快(对 p-p 对撞模式须达到 $\sim 25 \text{ ns}$), 否则的话, 有兴趣的事例会发生堆积; 由于反应产物具有很高的粒子多重性, 所以探测器的记录单元应足够小。举例说, 平均而言, 会有 25 个随机 p-p 相互作用与一个有兴趣的事例重迭在一起; 除此之外, 费用也是一个重要的考虑因素, 所以我们不能把探测器记录单元做得太小。

下面对 ATLAS 探测器的组成作一介绍, 由于篇幅所限, 这里的介绍只能是概貌性的、简单的。ATLAS 是英文 A Toroidal LHC ApparatuS 的缩写, 它是一个多用型探测器。为了实现实验的物理目标, 必须设计和建造探测器来对 p-p 对撞产生的终态事例进行重建。ATLAS 探测器的探测对象包括对光子、轻子和强子的识别以及对它们的能(动)量测量, 强子喷注的探测与重建、寿命测量(如 b

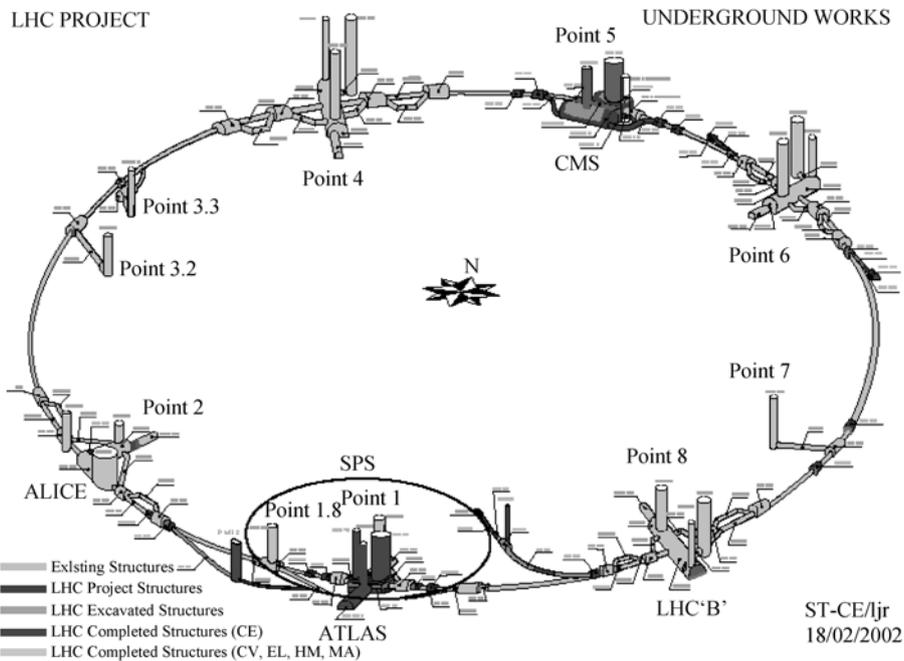


图1 LHC 质子对撞机上的4个实验布局

表2 ATLAS 各子探测器采用的探测技术及其主要性能

子系统	采用技术	性能
磁体	空气-芯环流型磁体(Air-core toroids) + 螺旋磁体	为内径迹室腔提供 $B=2\text{Tesla}$ (特斯拉) 的螺旋磁场; 为 μ 子室提供环流型磁场; 在量能器中没有磁场
内径迹探测器	在较小半径处采用像素(Pixel)和硅微条(Silicon strip)探测器; 在较大半径处采用稻草管(Straw-tube)用作穿越辐射径迹室 (TRT)	TRD 提供粒子识别; 内径迹室动量测量精度 $\sigma/p_T \sim 5 \times 10^{-4} p_T \oplus 0.01$ 能量分辨率:
电磁量能器	铅-液氩取样量能器	$\sigma/E \sim 10\% / \sqrt{E}$ (GeV) $\oplus 0.01$ 纵向分段 能量分辨率:
强子量能器	桶部采用铁-塑料闪烁体取样量能器, 端盖部采用铜-液氩取样量能器	$\sigma/E \sim 50\% / \sqrt{E}$ (GeV) $\oplus 0.03$ (桶部) $\sigma/E \sim 60\% / \sqrt{E}$ (GeV) $\oplus 0.03$ (端盖)
μ 子谱议	可监控漂移管室 MDT (Monitored draft Tube chamber) 和阴极条室 (Cathod Strip Chamber) 用作精密径迹和动量测量; 阻性板室 RPC (Resistive Plate Chambers) 和窄隙室 TGC (hin Gap Chamber); 提供快触发	空气-芯环流型磁体: 在 0.3-1.2Tesla 环流型磁场下对 μ 子进行动量测量。 动量分辨率: $\Delta p_T/p_T \sim 2\% - 8\%$ (在 50 - 1000 GeV/c 动量范围)

夸克、 τ 轻子)、丢失能(动)量测量等等。表2列出了 ATLAS 实验所采用的探测技术以及各探测器子系统的主要性能, 自然, 它们也都满足对 LHC 探测器的要求。图2展示了探测器的总体图。由于下面介绍的需要, 这里引入探测器的一个重要参量, 即赝快度 η , 其定义如下: $\eta \equiv -\ln(\tan(\theta/2))$, θ 表示终态粒子与束流轴之间的夹角。下面常用 η 表示探测器所覆盖的探测范围。

如图2所示, ATLAS 探测器由中心沿半径向外看去, 它由内径迹室、螺旋磁场、电磁量能器、强子量能器以及由 μ 子室和环流型磁场构成的 μ 子谱议组成。下面我们介绍这些部件构成特点及其性能。

内径迹室 内径迹室由对径迹精密测量的像素探测器 (Pixel)、硅微条探测器 (Strip) 以及用于 e/π 粒子分辨的穿越辐射探测器 (Transition Radiation) 等3种子系统组成, 如图3所示。桶部的像素探测器安置在 $r=5-25\text{ cm}$ 处, 硅微条探测器安置在 $r=25-50\text{ cm}$ 处, 而稻草管室穿越辐射探测器则安置 $r=55-105\text{ cm}$ 的地方。像素的尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$, 硅微条大小为 $50-120\ \mu\text{m} \times \sim 10\text{ cm}$, 测量的空间分辨率达到 $\sim 10\ \mu\text{m}$ 。因为内径迹探测器安置在径迹密集区域, 所以内径迹区各子探测系统的电子道数目很多, 像素 ($\sim 10^7$ 道), 硅微条 (6×10^6 道), 穿越辐射探测器 (4×10^5 道)。内径迹室的信号道占 ATLAS

探测器总信号道的绝大多数。内径迹室的半径为 1.1m, 长约 6m, 螺旋超导磁体为其提供 2Tesla(特

斯拉)场强的磁场。内径迹室的探测覆盖范围为 $|\eta| < 2.5$ 。

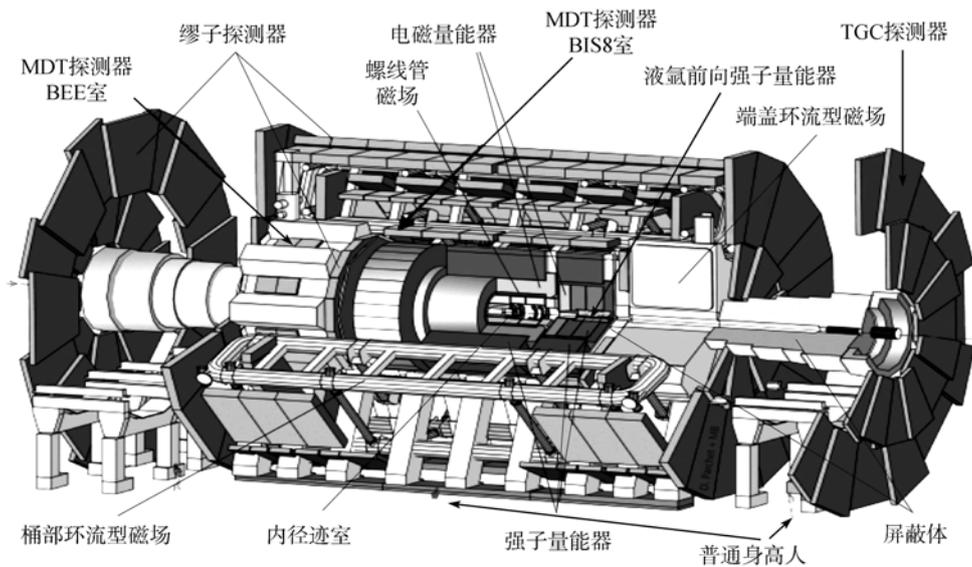


图 2 ATLAS 探测器总貌其中红字所指部分为中国组承担建造

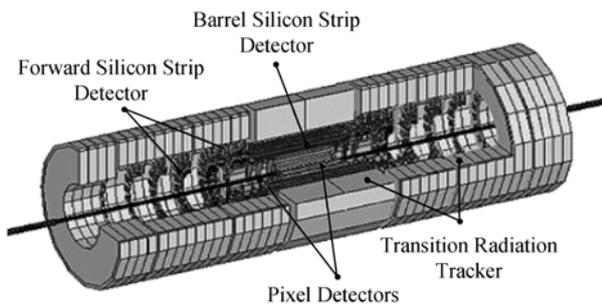


图 3 内径迹室结构示意图

量能器 ATLAS 内径迹室的外面是为内径迹室提供螺旋磁场的超导线圈。超导线圈外面安装了量能器, 这可从图 1 的总体图看到。ATLAS 量能器长~12 m, 半径 4.3 m。图 4 展示了 ATLAS 量能器构造图。量能器的构造比较复杂, 包括手风琴式的铅-液氩取样型的电磁量能器和强子量能器组成, 强子量能器的中心部分采用瓦片式的铁-闪烁体取样型结构, 端盖部则采用铜/钨-液氩取样型结构, 量能器的探测覆盖范围为 $|\eta| < 5$ 。

在介绍 LHC 对撞机对其探测器的约束时我们已经提到, 为了保证探测器的探测精度, 探测(或记录)单元(cell)不能太大, 但也不能做得太小, 因为记录单元一多, 探测器造价自然就上去了。这里我们简单介绍确定量能器探测单元大小的原则。大家知道, 量能器是通过电磁簇射或强子簇射来探测光子、电子或强子的, 所以簇射发展的横向大小

决定量能器记录单元的横向大小, 没有必要让记录单元比簇射的尺度小很多。但是如果记录单元设计得比簇射发展的尺度大很多, 就会增加高横动量(p_T)电子或光子沉积在同一区域能量堆积的几率, 这不仅会使能量测量变差, 同时还会恶化 π^0/γ 的粒子分辨, 因为, 这时对 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 过程的两个光子由于记录单元太大便不能分开。经过研究, ATLAS 考虑了量能器离束流线的半径的距离确定记录单元的大小, 在离束流 1.5m 的地方, 电磁量能器的记录单元(cell)大小设计为 $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0.025 \times 0.025 (4\text{cm} \times 4\text{cm})$; 而桶部强子(瓦式)量能器的记录单元大小设计为 $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0.10 \times 0.10$ 。ATLAS 量能器除了用作粒子的能量测量外, 还参与事例选择的一级触发。

μ 子系统 μ 子谱仪包括具有精密动量测量功能的精密室以及快触发功能的快触发室两部分。ATLAS 的精密室有两种, 即 MDT 室和阴极条室 CSC。为了达到所需要的测量高精度, MDT 采取了非常复杂的准直测量和监控体系。ATLAS 探测器在桶部和端盖部都安置了 MDT 室, CSC 室则安置在端盖站的最里面, 即快度 η 很大的地方, 它具有非常强的抗辐射性能。 μ 子谱仪的精密室在空气芯环流型磁体提供的 0.3-1.2Tesla 环流型磁场下对 μ 子进行动量测量。 μ 子谱仪的触发室则包括桶部的 RPC 和端盖部的 TGC, 主要用于事例选择的快触发。

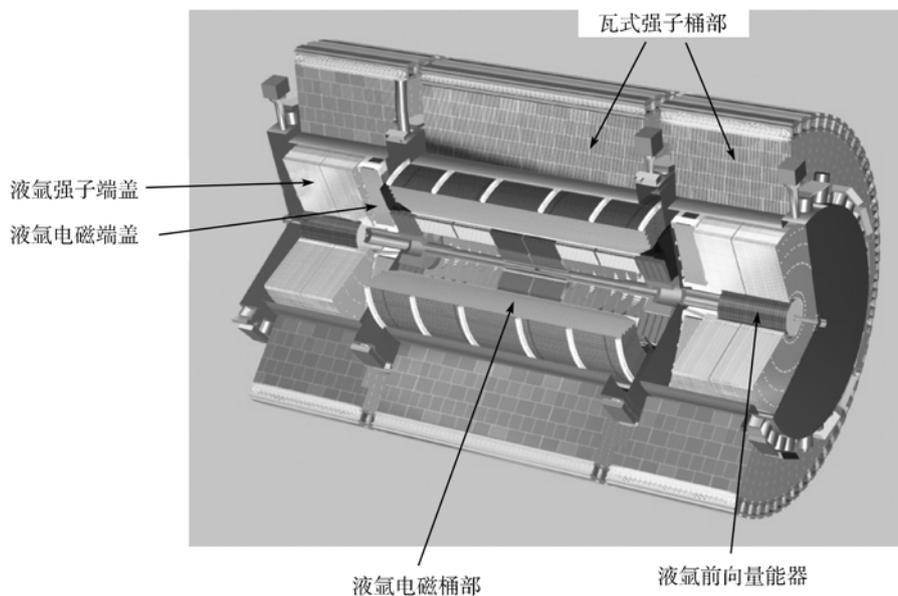


图4 ATLAS量能器构造图

表3给出各类 μ 子室数目及所用电子学道数。 μ 子室的总体安排见图5所示，它处在ATLAS探测器的最外部，长46m，直径23m。

表3 各类 μ 子室数目及所用电子学道数

MDT	1170 (354,000)
CSC	32 (31,000)
RPC	1112 (374,000)
TGC	1578 (322,000)

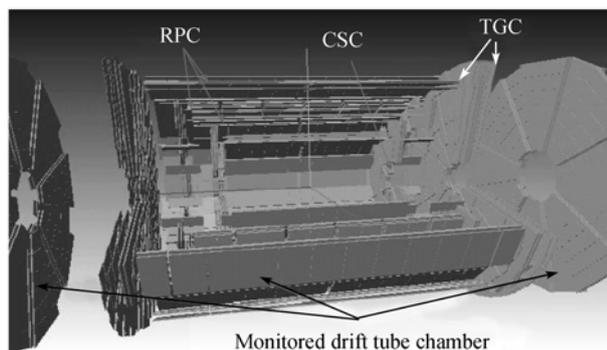


图5 ATLAS探测器的 μ 子室系统

ATLAS探测器的磁体系统 它包括内部的螺旋磁体和外部的环流型磁体两部分。螺旋超导磁铁为内径迹室提供螺旋磁场；而空气芯环流型（Toroids）超导磁铁为 μ 子室提供为环流型磁场。而夹在内径迹室和 μ 子室之间的量能器中是没有磁场的。螺旋磁体的线圈半径1.2m，长7m，提供2Tesla的螺旋磁场。空气芯环流型（air-core Toroids）磁体系统长26m，外直径20m，重1350吨，磁铁表面提供4Tesla的磁场，与 μ 子室一起组成 μ 子谱议，

用来测量进入 μ 子室粒子（主要是 μ 子）的动量。ATLAS μ 子谱议的覆盖范围 $|\eta| < 2.7$ 。ATLAS探测器的磁体系统如图6所示。

事例选择和数据获取 每个实验都有事例选择和数据获取系统。实验中选取对物理分析可能有兴趣事例的系统称为触发，而从探测器系统中收集相应数据，并把这些数据采用适当的格式存入永久存储的这个过程称为数据获取。实际上，在LHC的p-p对撞过程中有兴用于仔细分析的事例仅占总产生事例极小一部分，触发的重要任务就是尽可能排除本底，尽可能保留有兴趣的事例。在触发设计中，物理学家需要根据所感兴趣的物理过程的特点，对一些探测器记录到的物理量，例如丢失的横能（动）量、粒子类型（电子、光子或是 μ 子）、喷注特性（能量、是否是b jet）等等，进行选择，决定舍弃。ATLAS的触发和数据获取基于3级在线事例选择。第一级触发主要靠量能器和 μ 子室的信号，这级触发约在2 μ s时间内完成，通过这级触发，可以把事例率减到100kHz；然后，在有兴趣的领域内进行进一步选择，二级触发约在10ms时间内完成，并使事例率减到1kHz。三级触发则要动用很大的PC farm(500CPU)通用处理器采用离线的代数方法对候选事例作进一步过滤。通过这几级触发判选，使束团对撞率40MHz（在 $10^{34}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 亮度下，相互作用率高达 10^9 ）的数据量减少到实验要求的100Hz左右，并把每年的数据量控制在 10^9MB 量级。

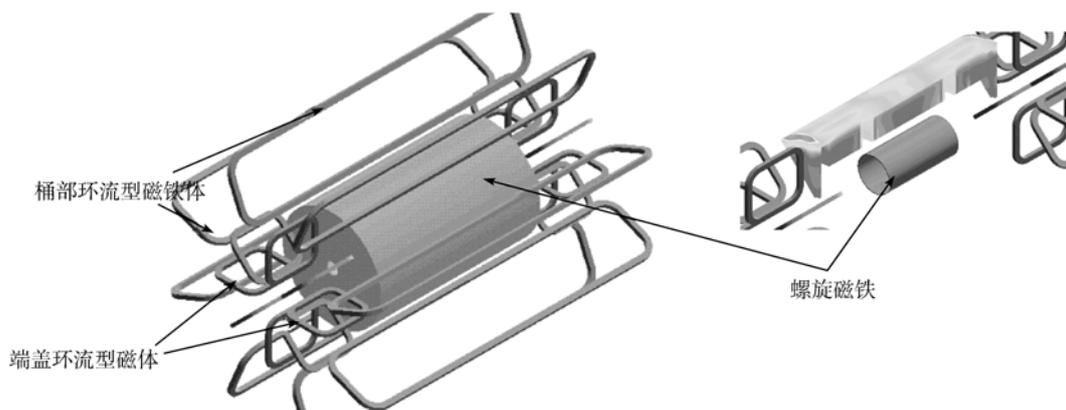


图6 ATLAS的磁体系统

ATLAS 实验数据离线分析环境 ATLAS 实验经过触发判选后的待分析的“好”事例率约为100Hz, 这样记录在磁盘或磁带上的数据量仍然达到每秒100-1,000MB, 一年的数据量将达到PB量级。分析这样的数据量, 以往那种集中在CERN进行分析的老方式已不能满足需要。LHC上的各个实验均采用网格计算(Grid)的概念。ATLAS合作组把各成员的计算能力组织起来, 形成不同级别的计算中心, 分头承担模拟或分析的任务, 共同完成ATLAS的物理分析工作。LHC数据分析环境是全新的尝试, 对今后国际的大科学合作具有非常深刻的意义。鉴于这部分内容过于专门, 这里就不展开介绍了。

由于ATLAS探测器大多采用了最先进的探测技术, 科学家为探测器建造做出了长期的艰苦努力。各子探测器系统都花费了8-10年的建造时间, 调试和安装也往往需要3年左右时间。目前, ATLAS探测器各部分的调试和安装工作都已结束, 正等待LHC的正式运行。

3. ATLAS 实验的物理目标及期待

LHC实验是在一个全新的能量和距离(即在TeV以及更高能量)下进行第一次直接的实验探索。主要的目标包括寻找希格斯(Higgs)玻色子以及探索是不是有新物理。LHC的4个实验中, ATLAS和CMS实验的主要物理目标是相同的。

寻找和研究新物理是ATLAS(也是CMS)实验的最主要目标, 具体包括以下研究内容:

(a) 电弱对称性破坏的根源(m_W 和 m_Z); 寻找希格斯玻色子(单个或多个希格斯粒子)或者其他的替代方案; (b) 超对称性模型(SUSY): 根据现有理论假设, 超对称性粒子Squark和gluinos具有较大产生截面; (c) Compositeness(基

本费米子的复合模型); (d) Leptoquarks(轻子型夸克); (e) Z', W' 寻找: ATLAS实验打算在轻子和强子衰变道中鉴别质量直到~6 TeV的新共振 Z' 和 W' ; (f) 超维(Extra dimensions): 寻找Kaluza-Klein激发, 黑洞; (g) 其他一些假说, 甚至一些尚未预言的新东西。

与今天现有的机器Tevatron相比, LHC的质心能量增加了一个量级, 亮度增加了两个量级, 所以LHC不仅可用作新物理的寻找、研究, 而且进一步开展对已发现现象的研究也可以加深对标准模型的了解。ATLAS实验组打算对下列标准模型过程开展精密研究: 例如 W, Z 的直接光产生; 喷注产生(包括多喷注产生)。这些过程都是新物理的本底, 搞清这些过程也是研究新物理的基础, 而且这些研究并不需要太高的积分亮度, 在LHC达到它的全亮度前即可进行。ATLAS实验还计划精密测量 W 和顶夸克(top)质量, 并对它们做一些相应的研究。这些测量在检验希格斯一致性研究中是很重要的。

在所列的新物理中, 超对称性和超维理论似乎更受关注。在超对称性理论中, 成对的虚费米子和玻色子彼此系统地相消, 于是一个低能希格斯玻色子的出现已属自然。超对称性理论预言的希格斯玻色子的质量低于130GeV, 这与已有的电弱数据的拟合符合。超对称性的另一种吸引力是它有利于推动基本力的统一。在低能处测得的强、弱和电磁相互作用强度在引入超对称性后, 可以在 10^{16} GeV附近达到一个公共值。此外, 超对称性理论中的既没有强作用、也没有电磁相互作用的最轻超对称性粒子(LSP)为冷暗物质提供一种自然的候选者, 而这是天体物理学和宇宙学解释宇宙的总物质以及诸如银河宇宙结构形成所需要的。另一种新物理假说,

即存在新的空间维理论，它可以帮助处理“等级(Hierarchy)”问题。最近几年由于弦理论预言了超维的存在，并且有一些超维大到足以在 LHC 实验上得以观察。现在已显现一种可能性，即可能当能量达到 1TeV 时，引力变得很强。在这种情况下，一些弦理论还预言在 LHC 碰撞时可以产生微黑洞，它们迅速通过霍金(Hawking)辐射衰变，而测量这种辐射将提供研究量子引力神秘的窗口。某些理论还认为，ATLAS 和 CMS 有可能看到标准模型粒子的 Kaluza-Klein 激发，甚至看到引力子。事实上，某些超弦理论给出谱就像超对称性那样丰富，也有些理论指出，最轻的 Kaluza-Klein 粒子可以是稳定的，很像超对称性理论中的最轻超对称性粒子 LSP。

ATLAS 实验组已对这些物理目标做了详细的模拟研究(有兴趣的读者可进一步寻找有关资料)，这里仅举几个研究结果以告读者。图 7 展示了 ATLAS 合作组给出的对不同质量假设下希格斯粒子的各种衰变道在 30fb^{-1} 积分亮度下的信号显著性。研究指出如果希格斯粒子存在，只要加以时日，随着积分亮度的积累，ATLAS 探测希格斯粒子的质量范围可以覆盖到 100GeV-1TeV 范围。这里附加说一句，在 LHC 达到设计的高亮度情况下，ATLAS 一个实验每年得到的积分亮度即可达到 100fb^{-1} 。图 8 则展示了 $H(130\text{GeV})\rightarrow ZZ^*\rightarrow 4e$ 过程在 ATLAS 探测器中事例显示模拟图，终态电子发生的簇射产物都集中在内径迹室和电磁量能器中。

通过对超对称性理论实验探索的模拟研究，ATLAS 实验组认为如果超对称性粒子在 TeV 标度下存在的话，ATLAS 实验应该容易地发现它们。此外，尽管最轻超对称性粒子没法直接探测，但间接精密测量 LSP 的质量也是可能的。

关于超维新物理，根据对引力子的预言，ATLAS 实验组也开始在几个方面寻找引力子 G。例如在 $gg(q\bar{q})\rightarrow G\rightarrow e^+e^-$ 道中，他们重建终态 e^+e^- 质量，同时探测终态粒子的角分布来确定重建出来的 G 粒子是否具有自旋 2，也即是否就是引力子。因为自旋为 2 的引力子衰变成费米子或矢量介子时的角分布具有其本身特点。

最后简单说几句 ATLAS 和 CMS 两大实验的比较。前面已经提到，LHC 上这两个实验的物理目标是一致的。应该指出，这两个探测器的设计理念有明显的不同。鉴于 CMS 实验已有专文介绍，这

里就不赘及了。大家已经看到，ATLAS 探测器的内径迹室具有中等的磁场强度(2Tesla 的螺旋磁场)，它的取样量能器具有较细的取样单元，而且还对 μ 子室配置了空气芯的环流型磁场实现对 μ 子很好的动量测量；而 CMS 探测器的内径迹室较大，并且配置了很高的螺旋磁场(4Tesla)，CMS 还采用具有很高能量分辨率的均匀的晶体量能器。正是它们不同的特色，这两个探测器各自对特定的反应道具有特殊的优势，也使得这两个探测器的测量结果更具互相检验、相互补充的作用。实际上，一些重要实验结果往往需要几个具有不同特点的实验彼此检查、相互确认。

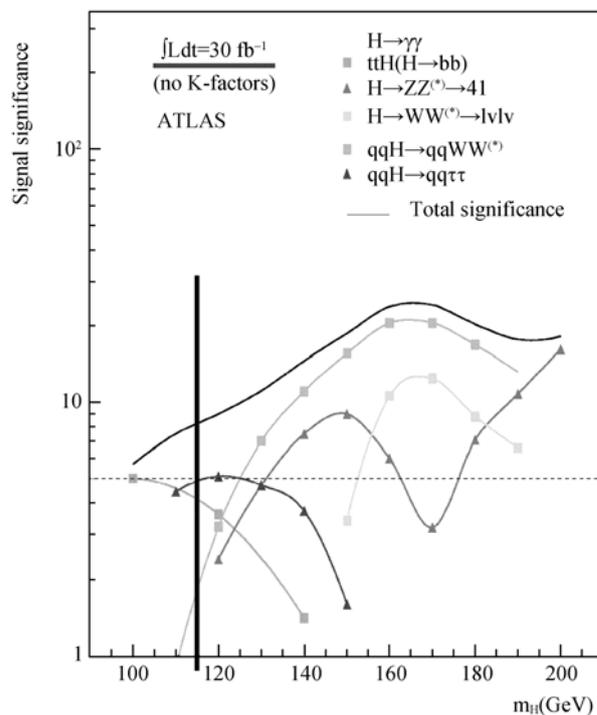


图 7 ATLAS 对希格斯粒子的各种衰变道在 30fb^{-1} 积分亮度下的信号显著性。

4. 有效的全球性国际合作成就了 ATLAS 实验

大家知道，高能物理研究常常需要国际合作，而 LHC 实验的国际合作在深度和广度上更具空前规模，达到了全球的范围。客观地说，成功执行国际合作方针是包括 ATLAS 实验在内的 LHC 整体计划取得成功的重要原因。

LHC 是一个超大型的基础研究项目，需要投入大量的财力、物力和人力，必须充分发展国际合作。否则，即使是美国这样的超级强国也不会成功，历史对此已经作了回答。CERN 在上 LHC 项目时，一

开始就十分重视国际合作。在 LHC 计划发展过程中, CERN 把越来越多的国家联合起来。例如, 1995 年 6 月, 日本文部省代表日本作为正式观察员首次出席了 CERN 理事会, 日本政府在会上就承诺将大大提高原先答应负担的 50 亿日元(当时折合 6800 万美元)的 LHC 建造费用, 并表示日本已原则上同意随着 LHC 的工程的进展, 逐步向 LHC 提供相当于原先答应数额 3-4 倍的款项。美国是 CERN 的非欧洲的另一个重要大国, 它同时参加了 ATLAS 和 CMS 合作实验。美国投入 LHC 计划的总款额为 5.31 亿美元, 其中投入 ATLAS 和 CMS 实验各 1.65 亿美元, 其余的 2.0 亿美元支援 LHC 的机器建造。由于美国所作出的贡献, 它也当然被 CERN 请进了观察员的行列。加拿大将通过 TRIUMF 实验室在 5 年内提供 3000 万加元, 主要是帮助改进 CERN 的增强器和 PS 同步加速器, 二者都将是 LHC 注入器的一部分。其实, 扩大合作的政策也绝不限于像美、日这样的强国、富国, 对其他国家也没有放松。俄国是 ATLAS 和 CMS 实验的重要参加国, 在这两个实验中都承担了非常重要的任务。LHC 与俄国的协议涉及的净金额为 6600 万瑞士法郎, 项目包括输运线磁体等许多专用设备。此外, 杜布纳联合核子所也承诺向 LHC 提供价值几百万瑞郎的横向减振系统。俄国还向 LHC 实验提供了许多高素质的研究人员, 他们在探测器研发、建造以及在物理研究中做出了积极贡献。俄国也当上了 CERN 的观察员。印度是个发展中国家, 它在 LHC 实验计划中参加了 CMS 合作。CERN 与印度一直保持了良好关系。在 LHC 建造中, 印度也贡献了 1250 万美元, 用于液氮罐、校正磁铁和其他项目, 包括向在 LHC 对撞机及其实验中工作的印度科学家提供支持。除欧美发达国家外, CERN 近年来明显加强了与中国、日本、韩国、俄国、印度、巴基斯坦、东欧、中亚和拉美等国家的合作、交流和联系。欧洲科学家从 SSC 的失败中吸取了教训, 他们扩大合作规模、精心设计、精心管理、精心施工, 使 LHC 的投资总额压缩至一个合理范围; 他们把合作扩大到全世界, 当然也就把实验的负担分摊到了全世界。

ATLAS 实验也体现了这种精神。图 9 在世界版图上展现 ATLAS 合作组的成员国。合作组由 37 个国家、174 个研究院所、2200 科学家组成(截止至 2008 年 4 月统计)。该图显示, 合作组包括了欧

洲、北美、俄国、日本、中国等世界上最重要的国家, 参加国中既有经济和科研的强国、富国, 但也有不少发展中国家, 合作范围扩大到世界五大洲。

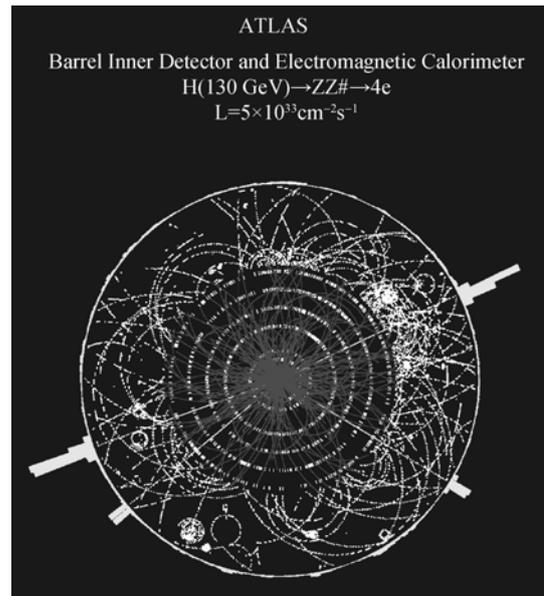


图 8 H(130GeV) \rightarrow ZZ* \rightarrow 4e 过程在 ATLAS 探测器上的模拟图。

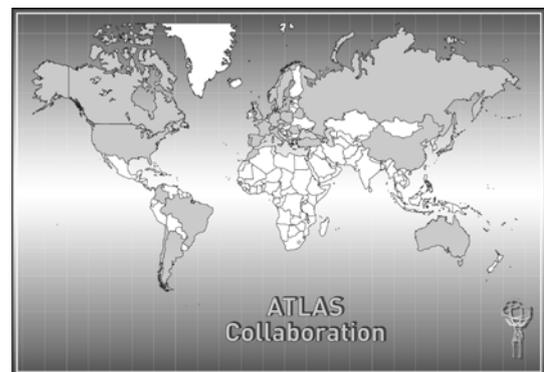


图 9 世界版图上的 ATLAS 合作组成员

ATLAS 合作组的每个成员(研究单位实体, 即 institution)都要参加探测器的建造, 承担具体的建造任务, 对实验的公共部分承诺经费贡献, 并在一定年限中向合作组交纳会费。这些都在各政府基金组织与 ATLAS 合作组之间签订的谅解备忘录(MoU)中明确规定的。对于那些在实验建造过程中希望加入合作组的新成员, 在签署 MoU 前, 必须在 ATLAS 合作组的全体大会上报告该组的工作经历, 介绍他们主要工作人员的工作经验以及他们参加合作组后可能承担的工作, 如果取得合作组多数成员的同意, 则可签署参加合作组的谅解备忘录从而成为正式成员并尽自己承诺的任务。在 LHC 正

式运行后，实验的各参加单位以及他们的政府除了完成 ATLAS 网络计算所承担的任务外，每年还应当向 ATLAS 交纳分摊到头的维护和运行费用(M&O, Maintain & Operation)。

在 ATLAS 合作组的管理中，全体会议、合作委员会和资源评议委员会是决定 ATLAS 政策的机构。由这些机构作出的决定通过合作组发言人执行。发言人下设技术协调人和资源协调人分别协调技术和资源方面的事情，并通过执行委员会把决定贯彻到各下属部门，下属部门包括各个子探测器：内探测器，瓦式量能器，液氩量能器， μ 子探测系统，磁体系统，触发和数据获取，计算和离线分析，物理课题研究，电子学等等。显然，那么大的合作组的管理绝不是一件容易的事，但通过大家的共同努力，合作组实行了有效管理，并保证了实验的顺利进行。

CERN 的 ATLAS 合作大组非常重视与中国的合作，对中国一直表示热情欢迎的态度。中科院高能物理所和南京大学、山东大学以及中国科技大学于 1998 年 9 月以中国联合组的名义参加了 ATLAS 国际合作实验。1999 年 9 月，国家自然科学基金委员会对 CERN 签署了中国联合组正式参加 ATLAS 探测器建造的谅解备忘录。该合作项目受基金委、科技部和中国科学院的联合支持。在探测器建造阶

段，高能所建造了 32 BEE 型和 16 个 BIS.8 型 MDT 探测器，山东大学完成了 400 个 TGC 室的建造。前面已经介绍，MDT 用于对 μ 子高精度动量测量，而 TGC 则用于快速触发。南京大学完成了端盖量能器前轮 330 块铜吸收体以及提供了 8,400 片钨棒(吸收体)的任务，中国科技大学完成了 400,000 道 TGC ASD(Amplifier Shaper Discriminator)板的检测以及 TGC 的部分电子学任务。这些任务大多是具有高技术含量的工作。中国联合组在 ATLAS 总体计划下不仅按时完成了任务，并且多次受到有关合作单位和同事的表扬。今天，中国组围绕 ATLAS 大组的物理目标，正在希格斯粒子耦合性质、顶夸克(Top)以及 B 物理方面开展了预先研究，争取在 LHC 正式运行时，及时收获物理成果。

LHC 将于 2008 年底前后运行，全世界高能物理学家正怀着极其兴奋的心情期待在希格斯粒子寻找以及新物理方面的新发现。尽管我们不能为 LHC 的实验结果打保票，如果 LHC 在人们已有预期方面得到证实，那很好，我们就可以朝着这个方向继续走下去；但万一得不到预期结果，那我们就会遇到更大的挑战，就有了更大的课题。所以我们说，不管 LHC 实验的结果如何，有一点是可以肯定的，即 LHC 必将引领今后高能物理的方向。

(中国科学院高能物理所 100049)