

强子对撞机实验的演化

(清华大学 王青 编译自 Paul Grannis, Peter Jenni. *Physics Today*, 2013, (6): 38, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

高能加速器束流对撞发现了粒子理论标准模型的所有基本粒子。新粒子的探索仍在持续。

在粒子物理实验中，不断地发现更重的粒子带来了物质基本组分及它们之间的基本作用力的深入了解。这些发现是由越来越高能的粒子构成的加速束流实现的。

以往这样的束流被导向固定靶。我们可以通过制造相向传播的粒子束流迎头对撞，使有限的束流粒子能量导致很大的质心能。在这篇文章中，我们聚焦于强子对撞机以及伴随它所演化的实验技术。今日的得意之作是在欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)。

起步

第一个强子对撞机是在欧洲核子中心1971年开始运行的1km环形质子-质子(pp)的交叉储存环(ISR)。它的束流能量范围从12—31GeV。实验家们在两个相向环形运行束流的8处交叉点建造了粒子探测器。在ISR上的实验揭示了pp散射截面随能量的对数上升行为。但是，探测器开始的设计不足以研究碰撞产生的那些具有大的横动量分量 p_T 的粒子。

十年后，欧洲核子中心的超级质子同步加速器(SPS)，变为一个质心能量为630GeV的质子反质子对撞机Sp̄pS。两个相向环形运行的束流被1.3T的弯曲磁铁阵列束缚在对撞机的7km环形隧道中。到1983年底，运行

位于对撞机束流交汇点处的UA1和UA2探测器的两个合作组发现了传递弱作用的重 W^+ 和 Z^0 玻色子。

世纪末之前，费米实验室的pp̄ Tevatron对撞机已将质心能量提高到1.8TeV；最后达到2TeV。在6km的圆环中容纳TeV的束流要求4.2T的超导磁铁。在CERN的LHC开始运行前20年里，Tevatron一直是世界上最高能量粒子加速器。LHC设计的质心能量是14TeV。约束7TeV的质子束在原有的27km隧道须要发展具有8.3T的超导转向磁铁。

亮度

除质心系对撞能量外，粒子碰撞的频率还必须高到足以产生足够的感兴趣事例数。在高能区，全部pp和pp̄截面是很大的——约100mb的量级(1mb=10⁻²⁷cm²)。但今天人们感兴趣的过程通常在fb量级(1fb=10⁻¹⁵mb)。

对在束流交叉点的碰撞率来说，一个关键的指标是亮度，它由单位散射截面的事例率给出。它依赖于束流的直径和流强，以及对撞束流相互对准程度。它随时间和经验的增长会得到改进。

亮度对时间的积分决定了一个持续运行的对撞机可以记录多少稀有事例。LHC的一个探测器几个月的运行可能产生10fb⁻¹的积分亮度。这只能

记录几百个具有可被区分衰变道的希格斯玻色子。

探测器

在强子对撞机探测器上的粒子探测器的规模和复杂度随着技术的进步和物理问题的变化也在演化。每一代探测器都在以前的经验之上建造。

早期ISR实验的探测器只提供有限立体角覆盖。人们现在需要研究像W和Z玻色子和顶夸克那样的远重于质子的粒子。它们的衰变粒子散布在大角度区间，通常有大的横动量。这要求探测器具有更宽的立体角覆盖。

因此，从Sp̄pS实验起，用整体设计做新的通用探测器，其中柱筒壳状子探测器几乎覆盖全4π立体角。最内“径迹”层记录在磁场中运动的带电粒子的电离尾迹；轨迹的曲率度量了它的动量。覆盖在径迹探测器上的是量能器，在其中，电子、光子和强子通过和物质相互作用显示出它们的能量。穿过量能器的缪子的测量需要最后的最外层探测器。

探测器的变化依赖于物理的重点和适用的技术。图1给出了对撞机上的各种探测器及进化。径迹探测器从测量精度为几百微米的电离轨迹的多丝和漂移室，到微米级精度的硅微条和像素化的探测器。

为优化特征的横动量测量，很多对撞机的探测器通过围绕在束流轴周边的线圈建立其磁场。场强从早期对撞机的1T到在LHC上的紧致缪子线圈(CMS)探测器的4T。

量能器是用来测量强子、电子和光子的能量。由于强子产生的簇射通常远大于由电子和光子产生的簇射，电磁和强子量能器要求相当不同的设计。

缪子作为穿过量能器唯一生存下来的带电粒子，通常由围绕的低成本电离探测器来鉴别。现代探测器中的量能器和缪子探测器的几乎全立体角覆盖使得人们可以去确定由高能中微子——或某些完全新的东西——带走的“丢失”横动量。

跟上碰撞率

随着亮度的增加，碰撞率从 Sp̄pS 的每秒 10^5 次增加到 Tevatron 的每秒 10^7 次，再到 LHC 的每秒 10^9 次。因此，必须要有触发系统从所有海量碰撞中选择相对少数感兴趣有潜力的事例。在 Sp̄pS 上，触发器多采用高能轻子 l^+ 的快硬件指示来标记感兴趣的事件。在 Tevatron 对撞机上引入了三级触发：第一级的判选是建筑在径迹探测器、量能器或缪子信息基础上的单片处理器；然后是结合来自几个子探测器数据的微处理器判选；最后是处理器“集团”运行离线分析的简化版。这样的多重触发在仅有 5% 的死亡区时间的情形下简化接受的事例数流到 50Hz。

尽管很高的亮度提出了挑战性的要求，LHC 的两个探测器 ATLAS 和 CMS 具有的多级触发在只有约 1% 死亡区时间下可以实现高效和每秒几百次事例记录率。

改变物理景观

强子间的高能碰撞可由组成它的一个部分子与组成另一个的部分子之间的相互作用来很好理解。作为这些强作用理论的量子色动力学(QCD)原则上可以预言各种可能的产物。在部分子—部分子对头碰撞中，夸克和胶子在探测器中散射成近同向喷射的强子“喷注”。Sp̄pS 给出了它们存在的特殊的直观验证。

寻找由电弱统一理论所预言的 W^+ 和 Z^0 玻色子是最初建造 Sp̄pS 的动

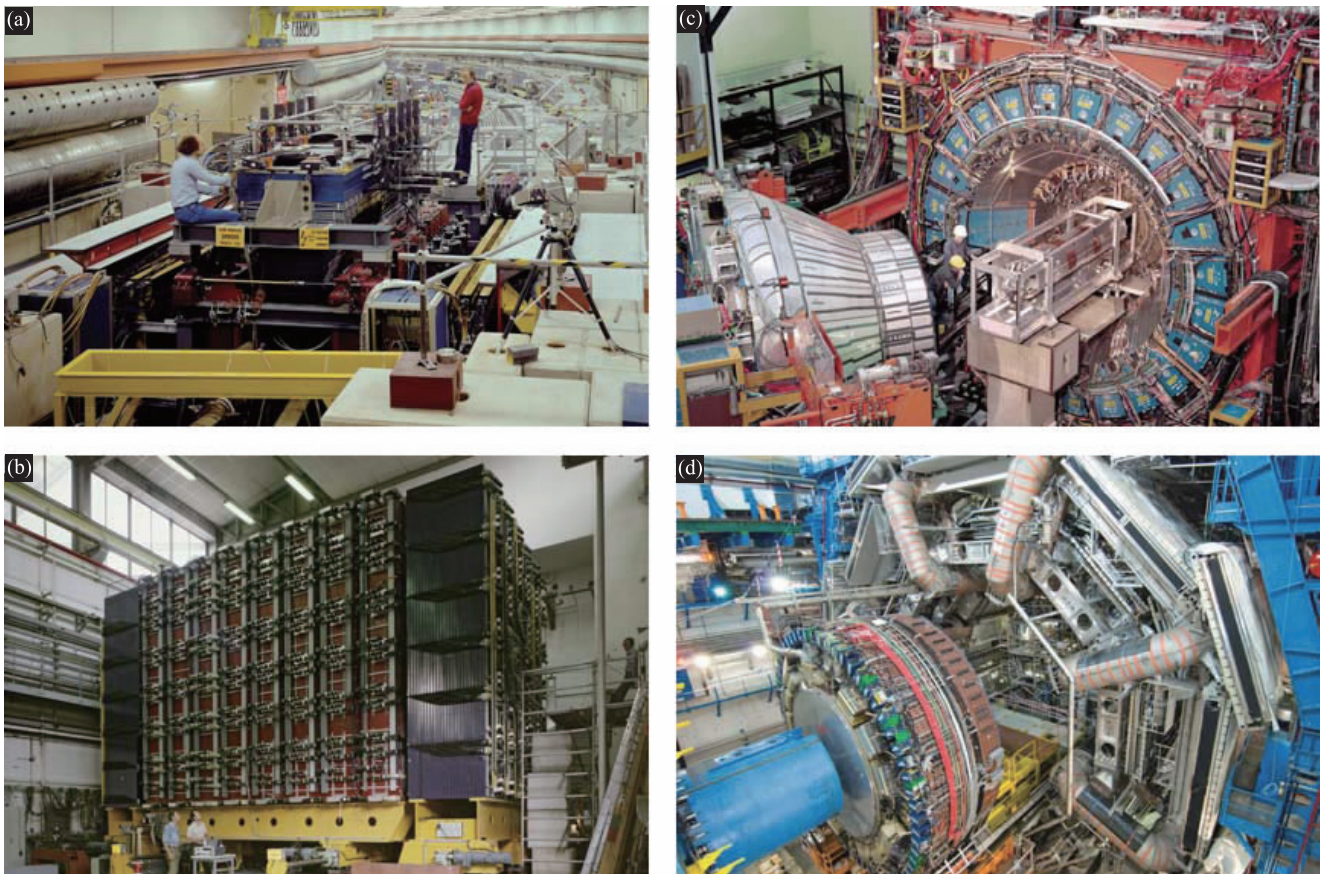


图1 强子对撞机上记录碰撞的探测器的演化 (a)上世纪70年代欧洲核子中心交叉储存环R702实验的6m直径探测器；(b)十年后欧洲核子中心超级质子—反质子同步加速器上的10m UA1探测器；(c)2000年美国费米实验室 Tevatron 上的12m对撞机探测器；(d)欧洲核子中心大型强子对撞机上2009年起开始获取数据的24m ATLAS探测器

机。在 80 年代早期，通过衰变过程 $W^+ \rightarrow l^+ \nu$ (其中 ν 代表中微子) 和 $Z \rightarrow l^+ l^-$ 发现了 W 和 Z 粒子。这些发现特别证明，丢失的横能量在间接测量逃逸中微子横动量中的价值。它同时也在 1995 年 Tevatron 对撞机上发现顶夸克起了主要作用，现在又是对撞机上探寻暗物质的主要手段。

90 年代早期，人们急切地寻找标准模型所要求的最后一个夸克——顶夸克。发现顶夸克是 Tevatron 项目的主要亮点，首先在 $t\bar{t}$ 对产生过程中发现，14 年后在更清晰的单顶夸克产生过程再现。CDF 和 D0 团队测量的顶夸克质量为 173.2 GeV。不像 5 个轻夸克那样，顶夸克在形成强子之前就要衰变。

b 夸克的产生截面测量是首先在 SpS 上完成的。UA1 团队还报道首先观察到了带 b 夸克的中性 B 介子夸克味态之间的振荡，类似于 60 年代起人们了解到的带奇异夸克的中性 K 介子的振荡。在 Tevatron 上，CDF 和 D0 团队搜集了大样本的由硅条顶角探测器准确确定衰变长度的中性 B 介子事例。因此团队能够测量出 B_s^0 的介子振荡。

在 LHC 上，不仅 ATLAS 和 CMS，还有小一点的 LHCb 探测器都研究 b 夸克物理，继续用大样本 B 介子进行味振荡研究。极大的丰度允许人们寻找那些对超出标准模型的新物理极其敏感的稀有 B 衰变道。例如，新物理可能解释我们宇宙中物质反物质不对称性。

几十年来，寻找希格斯玻色子一直是强子对撞机实验的首要目标。由 ATLAS 和 CMS 团队在去年 7 月 4 日宣布的 125 GeV 玻色子没有显示任何对标准模型希格斯玻色子的偏离。这个

发现是实验上朝着完备标准模型的巨大一步。

有大量的超出标准模型新物理的理论建议，每个都提出有其实验信号，突出的是超对称。超对称可以解决若干标准模型的问题，并提供合理的暗物质粒子。寻找超对称粒子的需求确立了 LHC 探测器设计的重要里程碑。

分析工具

在过去 40 年，计算和交流工具都取得了革命性的进步。ISR 实验是用大型计算机分析的。它的有限处理速度和存储盘容量限制了重建碰撞事例的算法只能十分简单。在 Tevatron 和 LHC 上，计算的进步带来了根本的改变。

可编程场门阵列、数字信号处理器和微处理器使得计算机的智慧可以转移到探测器身上。探测器现在可以实行事例判选和实时完全重建。

激光和位置监测使得我们可以将探测器的器件排列到微米的精度。替代了做离线分析的大型计算机的微处理器集团允许并行处理事例，这赶上了数据的洪流。大存储盘保存了大量刻度数据库，这极大地改进了探测器的分辨率。

在 Tevatron 的后期运行和 LHC 上，分布网格计算可以实现全球链接从而产生大量模拟蒙特卡罗事例。事例模拟程序变得极端复杂。

实验复杂性的增加需要新的分析工具。复杂的新算法通过从存在的噪声中辨认真实轨迹来改进粒子的轨迹探测。多变量模式认知算法现在依据存储于量能器中的能量的形状和关联可以区分电子和光子。新“粒子流”方法依据带电粒子动量的高精度轨迹测量，改进了喷注能量的测量。

随着物理目标朝着发现海量背景中更加稀有过程发展，依据一组基本动力学变量的简单判选事例的老方法显得太低效了。新的多变量技术，如神经网络和决策体系，已经开始流行。还有新的建筑于频率学派和贝叶斯方法的统计方法，逐渐为大家所熟知。

合作

强子对撞机合作在过去 40 年取得了引人注目的增长。在 70 年代早期的 ISR 的实验合作是来自几个单位十几位物理学家的联盟。到 80 年代早期，最大的 ISR 实验涉及了来自 16 个单位的 90 位科学家。在 SpS 上的 UA1 实验涉及了来自 19 个单位的 170 位科学家。

在 Tevatron 上 CDF 和 D0 合作组每个聚集大约 600 位科学家，它标志高能物理实验大规模全球化的开始。在 LHC 上 ATLAS 和 CMS 合作组每个有大约来自 40 个国家 200 个单位的 3000 名科学家。大约三分之一的科学家是学生，且很多是初入行的物理博士。

地理的分散导致对新的交流机制的需求。以前，物理学家必须到现场才能与同事进行有效交流。但到 80 年代早期，互联网革命引发了新的合作模式。电子信息使相距遥远的物理学家可以很快交换信息。虽然仍需周期性聚会，电子通讯使得远距离的实验室之间传递复杂、持续的分析成为可能。到千禧年之交，视频会议进一步支持了远距离的合作。典型的合作组讨论通过多天开展的几十个视频会议来进行。

不断增大并变复杂的强子对撞机实验带来很多挑战，但从连续几代实验学到的经验已经使我们对自然的了解大大进步。大科学因此而存在。