

# 欧洲大型强子对撞机 LHC 的物理

张肇西

对高能物理来说, 2008 年将是人们需要特别记住的一年。因为人们期待已久的在欧洲联合核子中心 (CERN) 建造的大型强子对撞机 (LHC) 及其配套的探测器终在这一年的 9 月 10 日开始试运行了。从开始酝酿到定下 LHC 和与其配套的探测器的方案再到建造地完成, 已有 20 多年的时间, 其间克服了种种困难和挫折, 终于在今年投入运行, 因此是今年国际高能物理的重大事件, 它标志了人类探测微观前沿的努力已进到了一个新的阶段。

为了探索高能物理最新前沿, LHC 及其配套的探测器的建造, 吸引了世界上优秀高能加速器专家和高能物理实验、理论家们, 充分发挥了他们的智慧, 许多部件在世界各地加工、制造, 最后拿到日内瓦欧洲联合核子中心 (CERN) 组装, 它是高能物理实验规模空前的国际合作项目。LHC 除了有原来欧洲联合核子中心 (CERN) 国家的科学家参加之外, 还有世界上众多国家的科学家在各自国家政府的正式批准后陆续参加了进来, 得到了世界各国人力和物力的大力支持。在 LHC 及其配套的物理探测器的设计和建造过程中, 特别注重发挥参加国的特长。我国的高能物理实验家在中国科学院、国家自然科学基金委、教育部和国家科学技术部的支持下, 参加了 LHC 上四个重要探测器 (ATLAS, CMS, ALICE 和 LHCb) 的建造和对未来数据的物理分析工作。探测器的一些部件是在我国加工、制造的。

LHC 和与其配套的探测器的各项指标的确定是在物理实验前沿研究的需要指导下, 一方面吸纳了国际最先进的技术成果, 使方案尽可能先进、可行, 另一方面尽可能地节省经费, 它综合了当前物理研究的需要和可以接受的经费及技术可行性三方面的因素, 还充分利用了 CERN 原来已有正负电子对撞机 LEP 现成的隧道, 节省了大笔隧道的建造费用。LHC 和与其配套的探测器包括了一台主体为质心系能量 14 万亿电子伏特 (TeV) 的, 高亮度 ( $10^{34}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup>) 的质子-质子对撞机, 它还可以运行在重离子对撞模式, 即令铅原子核-铅原子核进行对

撞, 对撞铅原子核时的束流可达到每个核子 2.76 TeV 的能量。对撞机本身的总费用, 包括人力和材料, 高达 60.3 亿瑞士法郎<sup>1)</sup>。与其配套的有: 两个巨大的探测器 ATLAS (其仅材料费用达 5.4 亿瑞士法郎) 和 CMS (其仅材料费用达 5.0 亿瑞士法郎); 两个中型探测器 ALICE (仅材料费用达 1.14 亿瑞士法郎) 和 LHCb (仅材料费用达 0.75 亿瑞士法郎); 新近还增加了两个为专门实验的相对小型的探测器 LHCf (新近采纳的实验建议, 尚无经费计算) 和 TOTEM (仅材料费用达 650 万瑞士法郎)。在此大家可以看到, 如果再考虑到今后可观的运行费用, LHC 的实验计划只能走国际合作的路子, 由国际大家庭来分担各项费用和共享所取得的研究成果。

LHC 做到了在人类控制下, 第一次实现了在两个对撞质子中的基础粒子 (部分子) ——夸克和/或胶子, 以高亮度, 质心系能量进到数亿万电子伏特 (6–7 TeV) 范围的高能碰撞。

LHC 的物理目标是为当前人们关心的物理学基本问题提供新的线索, 甚至会对其中的一些问题做出明确的答案, 它尽量覆盖了人类认识世界的前沿和重要的课题。同时, 其研究结果必将对决定高能物理实验以及天体宇宙学设备的今后具体发展道路产生重大影响。LHC 所瞄准的前沿性物理目标是凝聚国际合作的原动力, 这些目标吸引了众多国家和世界上优秀科学家的投入 (顺便指出: LHC 能够推动技术的发展, 并且参加合作的国家能够分享所取得的技术发展成果是这样多的国家愿意积极参加, 并‘乐于’分担建造费用的另一个重要原因)。另外, 由于 LHC 比现有的强子对撞机的质心系能量提高了 7 倍, 亮度约提高 60 倍, 与其配套的探测器性能也比现有的有质的提高, 因此 LHC 对高能物理已知的大多数具体问题, 在精度上, 在极限上将会有上一台阶的进展, 将会有或多或少的重要发现, 可能会对现有理论提出新的挑战, 提出新的原则问题等。历史的经验告诉人们, 一些高能实验装置不仅在实现预期实验目标上有出色表现, 而且常常有

<sup>1)</sup> 1 瑞士法郎大约合 6.5 人民币。

超出人们预料的发现。因此，在 *LHC* 上提出人们完全没有预料到的问题和做出没有预料到的发现，也是完全可以期盼的。

本文将从 *LHC* 的物理预定的主要目标，针对‘已知’物理做出可能的发现和/或一些理论预期的发现来介绍 *LHC* 上的物理。对于没有预料发现，根据目前的一些理论做点瞻望。

*LHC* 预计的主要物理目标是根据比较坚实的理论，结合了技术与经费的可行性而制定的探索高能物理微观世界的最前沿的物理课题，它们指导了 *LHC* 及其配套的探测器的设计和建造。归纳起来主要物理目标有四方面：1. 在粒子物理标准模型方面，在了解物质质量的起源，包括揭示所谓的电-弱破缺实际机制上，实现实验直接发现希格斯粒子，并进一步研究希格斯粒子的性质等；2. 针对宇宙学观测所提出的暗物质（不会发光和不会吸收且不会反射光的物质）和暗能量，用实验手段探讨标准模型之外的，对应它们的实体粒子。并将把现在所知的，包括引力在内的四种基本相互作用力的‘统一’，理论上提出的标准模型的超对称扩充和时间-空间可能存在额外的维数理论作为可能提供暗物质（甚至暗能量）的实体作为重点来加以研究；3. 对宇宙中正、反物质的不对称的解释所需要的要素，主要是 *CP* 不对称和轻子数/重子数的不守恒的实验研究；4. 极高温度和高密度下，全新物态的研究：主要指量子色动力学预言的‘夸克胶子等离子体’的研究等。

为了使当前高能物理微观世界的最前沿有所了解，必须对已经取得的成就做简单的概述。

高能物理是人类探索微观世界的最前沿的学科。20 世纪末里程碑性的研究成就是粒子物理的标准模型的提出和坚实的确立，尽管‘暂时’地把引力放在了一边。标准模型是上世纪人类在物质结构和自然界中基本力的流行观念认识方面的一场革命后，所取得的成果的总汇集。标准模型（不涉及引力）简要地概括起来其基本内容是所有物体基于强作用粒子，或者几百种强子（质子，中子， $\pi$ 介子等）之上，而它们又进一步地由自旋  $\frac{1}{2}\hbar$ ，电荷分别为  $\frac{2}{3}$  和  $-\frac{1}{3}$  的质子电荷的夸克组成；夸克与构成物体还

需要的轻子（电子、带电轻子及中性中微子）‘似乎’是基本粒子——不可分，即对于现代所能达到的分辨率下它们是无结构的；物体间的最基本的相互作用，长程的（力程可达宏观尺度）有引力和电磁力，短程的（力程在微观尺度）有强和弱作用，这些相互作用最终表现为夸克和轻子间和它们自己之间的作用，其中的强，弱，和电磁相互作用<sup>1)</sup>是在自然界中的定域规范对称性的结果，即描写三种相互作用的规范理论具有共同的数学结构，对应的量子理论是可重整的理论。规范理论都对应有自旋为  $1\hbar$ ，质量为零的（规范）玻色子传递作用力；其中传递强（色）作用力的规范玻色子粒子，被称为胶子，带有‘颜色’量子数<sup>2)</sup>，共有八种，传递电磁作用力的规范玻色子是熟知的光子，传递弱作用力的规范玻色子，由能引起电荷改变和不改变的三种，分别是  $W^+$ ， $W^-$  和  $Z^0$ ；由于理论是可重整的，因此，这些相互作用的量子理论原则上可以按人们的意志进行量子高阶修正；夸克也有‘颜色’量子数，也能直接有强（色）相互作用，轻子不具有‘颜色’量子数，无直接强（色）相互作用；夸克和胶子间的强（色）相互作用的规范结构是非对易的 *SU*(3) 群，在标准模型中的 *SU*(3) 颜色部分自己‘独立’构成量子色动力学 (*QCD*)，预言了强（色）相互作用有大动量传递下的渐进自由的特性；夸克和轻子分别有六种‘味道’量子数（夸克分为上，下，粲，奇异，顶，底六种。轻子分为电子，电中微子，缪轻子，缪中微子，韬轻子，韬中微子六种），它们按弱和电磁相互作用的特性，形成了三‘代’（每‘代’包括两种味道夸克和两种味道轻子）的结构；由于相互作用的夸克与它们的质量本征态不同，差了一个幺正矩阵 (*CKM* 矩阵)，代表夸克‘味道’间的混合；其中可能的复数相因子，引起 *CP* 破坏现象，*CKM* 矩阵不仅决定了‘味道’间的弱衰变，而且其中的复数相因子，可能完全解释目前实验所观测到的 *CP* 破坏；标准模型在弱相互作用和电磁作用之间建立了深刻联系，常常被称为‘电-弱统一理论’；弱作用实验观测要求相应的规范玻色子必须具有相当大的质量，为了保持电弱理论的可重整性，而又使相应的玻色子获得质量，规范对称性破缺必须是‘隐蔽’的，在标准模型中的‘电-

1) 引力作用相对很弱，所以标准模型可把引力‘暂时’搁置一边，予以忽略。

2) 在标准模型中强相互作用与‘颜色’量子数联系，所以在此把强作用记作强（色）作用。

弱统一理论’采用了引入黑格斯场，用所谓的黑格斯机制加以‘隐蔽’地破缺电-弱定域规范对称性，在给出弱玻色子质量的同时还使夸克、轻子获得了质量；……。

现在已经有大量的物理过程做到了实验上精确到千分之几，理论精确到单圈量子修正的程度，并且理论与实验的一致，表明了标准模型的成功；但是，标准模型也存在突出的‘软肋’。其一是它所采用的所谓的希格斯（Higgs）机制来‘解决’电-弱破缺，弱作用相应的弱规范玻色子具有相当大的质量，并使夸克、轻子获得质量。尽管这一机制保证了理论的可重整化性，但是并没有得到实验的证实：标准模型的希格斯机制的重要后果之一是要‘残留’一个中性的标量（自旋为零的）粒子——希格斯粒子。尽管许多测量量受到圈图中出现的希格斯粒子‘量子效应’的修正，然而，经过了几十年的努力，实验上一直没有发现自由形态的希格斯粒子。标准模型的第二个突出的‘软肋’是在强（色）作用方面。带‘颜色’的客体的孤立状态在地球自然环境下一直没有找到，孤立的状态只能以‘颜色’单态状态存在。这一现象显然是强（色）作用的特征，被称为‘色禁闭’。理论能够证明在高能动量下强（色）作用的强度变弱，并也已经得到了实验的证实。这也意味着强（色）作用在低能动量下强度变强，与强（色）作用具有‘色禁闭’性是一致的。但是，目前理论上未能做到真正证明‘色禁闭’，因此‘色禁闭’是标准模型有待解决的又一个基本问题。同时，许多低能动量的强（色）作用过程，不能进行微扰方法计算，有待理论方法的进展才能进行计算。*LHC*上的*ALICE*探测器是利用*LHC*在铅-铅核碰撞模式下运行和对撞，人为地制造高温（大能动量）和高密度状态，模拟早期宇宙*QCD*预言的打破‘色禁闭’的‘夸克-胶子等离子体’状态，本文将会在下面进一步介绍。

一旦发现希格斯粒子，将面临测量希格斯粒子的性质问题，即使测量表明其性质也适合标准模型的要求，人类探索微观世界的“长征”也不会结束。标准模型有众多的参数，它们不能从模型理论自身得到解决：标准模型的希格斯部分进行量子高阶修正时，高能（紫外）方面的行为是平方发散的，高阶的量子修正结果‘不稳定’，即对于希格斯量子场的高阶修正，从电弱能标  $M_{weak} \sim TeV$  到引力普朗克

能标  $M_p \sim 10^{19} GeV$  的重整化会出现所谓的能量标度‘层级（*hierarchy*）’问题；人们会问：强-电-弱三种相互作用独立吗？总能把引力搁置在一边？其中的夸克，轻子为何有三‘代’结构等？这些问题表明了标准模型只是阶段性的理论，另外一方面，现在已经有天体宇宙学提出的问题，显然需要粒子物理回答，探讨比标准模型更加深层次的理论，它们构成了高能物理或粒子物理的最前沿问题。为消除标准模型的‘软肋’和为回答深层次问题提供线索是*LHC*实验的主要任务。

1. 在*LHC*上揭示所谓的电-弱破缺机制，对于标准模型而言，实际上是实验直接发现自旋为零的黑格斯粒子和进一步研究它的性质，回答电-弱破缺机制是否可以用标准模型所采用的希格斯机制来实现

在*LHC*上经过认真寻找，即使不能发现希格斯粒子或者所发现的希格斯粒子的性质与标准模型的‘要求’不同，也明确表明了电-弱破缺机制不如标准模型所采用的希格斯机制那么简单，并将提供新线索来解决电-弱破缺机制，弱作用相应的弱规范玻色子和使夸克、轻子获得质量的问题。

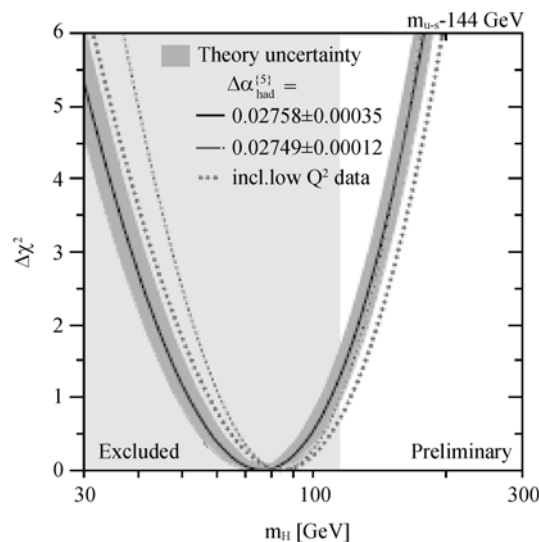


图 1

在标准模型中，模型自身不能预言希格斯粒子的质量。但是对实验精确测量值和理论考虑了希格斯粒子效应的量子修正值进行全面的拟合，能够给出标准模型的希格斯粒子质量值应当处在的范围。这种量子单圈修正效应给出的希格斯粒子的质量值并注明了误差（见图 1 的曲线，浅色阴影区域是以前 *LEP-II* 欧洲大的电子-正电子对撞机的实验所排

除):

$$m_H = 76_{-24}^{+33} \text{ GeV},$$

表明了标准模型的希格斯粒子不太重(质量在 200 GeV 以下)。图 1 的  $m_H \geq 114 \text{ GeV}$  黄色区域对应 LEP 直接寻找希格斯粒子实验给出的希格斯粒子的质量下限(尚在上述单圈修正限制值的两个标准偏差内,二者并不矛盾)。

LHC 上发现希格斯粒子主要依靠 ATLAS 和 CMS 两个大型探测器。LHC 产生希格斯粒子有多种机制,对于标准模型其产生截面理论和主要衰变分支比可以定量估计出来。图 2(a)是希格斯粒子产生截面对质量的依赖;图 2(b)是希格斯粒子主要衰变的分支比对质量的依赖。

ATLAS 和 CMS 寻找希格斯粒子(H)把产生与衰变结合起来,所依靠的主要过程有:(a)胶子-胶子融合产生希格斯粒子,然后通过一个实的中性玻色子(Z)和一个虚(实)的中性玻色子( $Z^*$ )衰变到两对带电轻子( $\bar{l}l$ ),或者通过一个实的中性玻色子(W)和一个虚(实)的中性玻色子( $W^*$ )衰变到两对轻子( $\bar{l}\nu l\nu$ ),或者衰变到两个光子等;(b)弱玻色子-弱玻色子融合产生希格斯粒子,然后通过一个实的中性玻色子(Z)和一个虚(实)的中性玻色子( $Z^*$ )衰变到两对带电轻子( $\bar{l}l$ ),或者通过一个实的弱玻色子(W)和一个虚(实)的弱玻色子( $W^*$ )衰变到两对轻子( $\bar{l}\nu l\nu$ ),或者衰变到一对轻子( $\tau\bar{\tau}$ ),其中的一个轻子进行轻子衰变( $l\nu$ )另一轻子进行包含强子的衰变( $\bar{l}\nu \text{ hadrons}$ ),或者衰变到两个光子等;(c)希格斯粒子伴随正反顶夸克对产生,然后希格斯粒子通过一个

实的弱玻色子(W)和一个虚(实)的弱玻色子( $W^*$ )衰变到两对轻子( $\bar{l}\nu l\nu$ ),或者衰变到一对底夸克( $b\bar{b}$ ),或者衰变到一对轻子( $\tau\bar{\tau}$ )等;(d)伴随弱玻色子W产生,然后希格斯粒子通过一个实的弱玻色子(W)和一个虚(实)的弱玻色子( $W^*$ )衰变到两对轻子( $\bar{l}\nu l\nu$ ),或者衰变到两个光子等;(e)伴随中性弱玻色子Z产生,然后衰变到两个光子等。(见表 1)

其中测定希格斯粒子的质量最好是利用希格斯粒子到双光子( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )和经过Z玻色子对到四个带电轻子( $H \rightarrow ZZ \rightarrow \bar{l}l \bar{l}l$ )的过程。当  $m_H \leq 300 \text{ GeV}$  时,对于 CMS 在第一个 3 年时间可取得积分亮度  $30 \text{ fb}^{-1}$  数据(不出意外)时,希格斯粒子的质量能测量到 0.3% 的精度。当  $m_H \leq 400 \text{ GeV}$  时,对于 ATLAS,若

表 1 LHC 上发现希格斯粒子的主要过程

Production	Decay	Mass range
Gluon Fusion	$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$	(110-200) GeV
	$H \rightarrow WW(*) \rightarrow l\nu l\nu$	(110-200) GeV
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	(110-150) GeV
Weak Boson Fusion	$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$	(110-200) GeV
	$H \rightarrow WW(*) \rightarrow l\nu l\nu$	(110-190) GeV
	$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\nu l\nu$	(110-150) GeV
	$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\nu \text{ had}\nu$	(110-150) GeV
$t\bar{t}H$	$H \rightarrow WW(*) \rightarrow l\nu l\nu$	(120-200) GeV
	$H \rightarrow b\bar{b}$	(110-140) GeV
	$H \rightarrow \tau\tau$	(110-120) GeV
WH	$H \rightarrow WW(*) \rightarrow l\nu l\nu$	(150-190) GeV
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	(110-120) GeV
ZH	$H \rightarrow \gamma\gamma$	(110-120) GeV

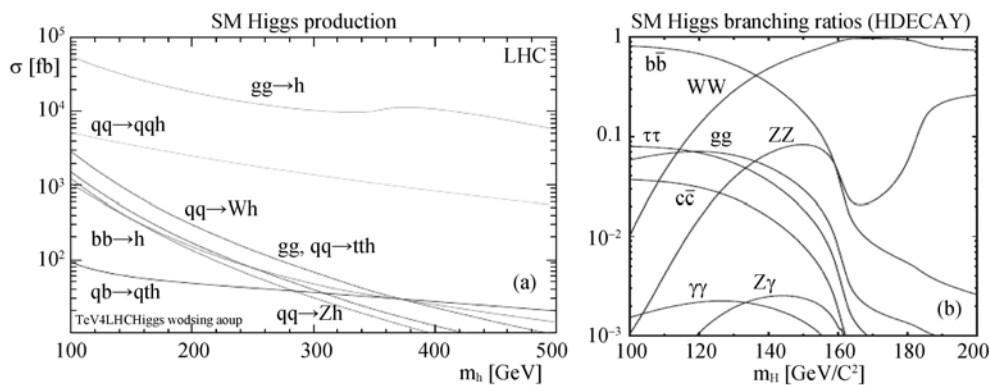


图 2

取得积分亮度达到  $300 \text{ fb}^{-1}$  的数据, 希格斯粒子的质量测量能到 0.1% 的精度<sup>1)</sup>, 当  $m_H \leq 600 \text{ GeV}$  时, 希格斯粒子的质量测量能到 1% 的精度。同时利用这些过程还能够测量希格斯粒子的宽度。只是对于轻希格斯粒子 ( $m_H \leq 200 \text{ GeV}$ ), 探测器的分辨率大于希格斯粒子的宽度, 表现不变质量的宽度实际是探测器造成的, 与真实宽度无关。

标准模型的希格斯粒子的自旋为零, 电荷共轭和时空反射宇称联合反射  $CP$  的性质是偶的。根据朗道-杨振宁定理, 如果观测到  $H \rightarrow \gamma\gamma$  过程立即排除了希格斯粒子自旋为  $1\hbar$  的可能。在事例数足够多时, 通过  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \bar{l}l$  测量四轻子的角分布, 可确定希格斯粒子的自旋为零, 亦可确定  $ZZ$  之间的轨道角动量为零或  $2\hbar$ , 即可确定出  $CP$  是偶的 (符合标准模型要求), 否则  $CP$  是奇的 (不可能是标准模型的希格斯粒子)。

实际上, 利用表 1 所列的过程, 在事例数够多的情况下 ( $300 \text{ fb}^{-1}$ ), 亦可用来确定希格斯粒子到顶夸克, 底夸克 (c) 过程, 规范玻色子  $Z, W$  (d)、(e) 过程的耦合值。只要发现的是标准模型的 ‘轻希格斯’,  $LHC$  实验是能够确定下来正是标准模型的机制解决了电-弱对称性破缺和给出夸克、轻子质量。

在此要特别指出, 在所有的费米子中间, 顶夸克  $t$  的质量  $m_t \geq 170 \text{ GeV}$  是最大的, 除去质量特小的中微子外, 顶夸克比其它一些带电的费米子质量大了 5 个数量级, 而且超过了弱中间玻色子  $W$  和  $Z$  的质量  $m_W$  和  $m_Z$ 。按照标准模型给出费米子质量的方案, 希格斯粒子与顶夸克的耦合很强 (接近  $O(1)$ ), 在进行微扰计算时, 要求精度高时, 常常不能简单地略去高阶修正。如此大的顶夸克质量, 使其直到 1995 年才在  $Tevatron$  上发现, 而且至今顶夸克的性质测定十分不完全。 $LHC$  比  $Tevatron$  的能量高约 7 倍, 在  $LHC$  上产生的顶夸克的截面比在  $Tevatron$  上产生的大得多, 运动速度也可以大得多。而运动速度大的顶夸克在探测器中留下的喷注状的径迹可以比较清楚地与事例的其它部分 (喷注) ‘切割’ 开来。实验上可以利用这一点, 把顶夸克衰变产物确定准, 把顶夸克的质量、各种衰变分支比测量得准, 能够

测量出产生与衰变的极化关联, 测量出新的衰变模式, 发现新物理的线索等。 $LHC$  在顶夸克的实验研究上将会大有作为。

现在有多种理论来扩充标准模型, 其中的超对称模型和多希格斯的模型都保持有  $CP$  偶的 ‘轻希格斯’ 粒子 ( $H_1^0$ )<sup>2)</sup> 之外, 还有一个相对重的中性  $CP$  偶的希格斯粒子 ( $H_2^0$ ), 一个中性  $CP$  奇的黑格斯粒子 ( $A^0$ ) 和两个带电的希格斯粒子  $H^+$  和  $H^-$ ,  $LHC$  亦能对它们进行有意义的定量测量。

在此需要指出的是上述发现黑格斯粒子和研究其性质的实验, 在  $LHC$  上从现在起, 尚需要约三年时间才能积累  $30 \text{ fb}^{-1}$  的数据完成上述的实验研究。然而, 现在正在运行的  $Tevatron$  (质心能量为  $1.98 \text{ TeV}$ , 亮度约为  $2 \times 10^{32}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup> 的质子-反质子对撞机), 已经运行多年, 对撞机和探测器调试、刻度了多年, 在三年内取得  $8.6 \text{ fb}^{-1}$  积分亮度的数据是可期待的。如果  $m_H \leq 160 \text{ GeV}$ , 在  $Tevatron$  上会发现发现希格斯粒子, 并可完成相当多的性质研究。这样  $LHC$  和  $Tevatron$  两者的实验结果可互相检验, 是相关理论研究非常欢迎看到的局面。

## 2. 暗物质和暗能量对应的实体粒子, 四种基本相互作用力的 ‘统一’, 超对称模型和时间-空间可能存在额外维数理论的实验证据

宇宙学对于宇宙背景辐射偏离黑体辐射的各向异性的观测, 通过观测高红移的超新星得知宇宙在加速膨胀, 对宇宙中元素氢, 氦, 锂, 铍, …… 的丰度的观测与分析 and 长年积累的各类天体的观测等, 指出宇宙质量中能由粒子标准模型的成分贡献的有: 弥散在宇宙中的氢和氦气 (约占宇宙总质量的 4%), 其它的化学元素成分 (约占宇宙总质量的 0.025%), 以天文星体形式存在的物质 (约占宇宙总质量的 0.5%), 另外还有标准模型扩充的质量不为零的中微子 (约占宇宙总质量不大于 0.47%), 而完全不能被粒子标准模型中的成分贡献的有: (冷) 暗物质 (只有弱作用和引力作用, 不发光, 也不反射光, 约占宇宙总质量的 25%) 和暗能量 (提供负的压强, 引起宇宙加速膨胀, 约要占到宇宙总质量的 70%)。显然回答宇宙中的暗物质和暗能量的问题一定是超出标准模型问题。回答这些问题, 高能实验

1)  $ATLAS$  对于轻子和光子的刻度精度可达 0.1%, 可大大好于  $CMS$ 。

2) 最小超对称标准模型的扩充, 对  $CP$  偶的相对轻的黑格斯粒子的质量有限制, 在树图阶它的质量小于  $Z$  玻色子质量, 进行了量子圈修正后, 仍然有限制性 (修正的具体值依赖顶夸克及其超对称伴粒子质量等)。

的直接线索是重要的。现代高能物理实验离不开理论的指导，在 *LHC* 上研究暗物质和暗能量更是如此。

当前能够提供暗物质的理论之一是标准模型的超对称的扩充。考虑到弦理论的要求，超对称模型受到理论和实验两方面的特别重视。

表 2 粒子与其对应的超对称‘伴’子

Field Content of the MSSM					
Super Multiplets	Boson Fields	Fermionic Partners	$SU(3)$	$SU(2)$	$U(1)$
gluon/gluino	$g$	$\tilde{g}$	8	0	0
gauge/gaugino	$W^\pm, W^0$	$\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$	1	3	0
	$B$	$\tilde{B}$	1	1	0
slepton/lepton	$(\tilde{\nu}, \tilde{e}^-)L$	$(\nu, e^-)L$	1	2	-1
	$\tilde{e}^-R$	$e^-R$	1	1	-2
squark/quark	$(\tilde{u}L, \tilde{d}L)$	$(uL, dL)$	3	2	1/3
	$\tilde{u}R$	$uR$	3	1	4/3
	$\tilde{d}R$	$dR$	3	1	-2/3
Higgs/higgsino	$(H_d^0, H_d^-)$	$(\tilde{H}_d^0, \tilde{H}_d^-)$	1	2	-1
	$(H_u^+, H_u^0)$	$(\tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0)$	1	2	1

超对称是费米子和玻色子间的对称性。由于这一对称性，扩充的超对称标准模型是将标准模型中的每一费米子‘配’一个具有相同的强-电-弱作用的玻色子的‘伴粒子’，其英文名称将在费米子名称加前缀‘s’来命名；同样地模型中每一传递力的玻色子‘配’一个具有相同的强-电-弱作用的费米子的‘伴粒子’，其英文名称将在玻色子名称加后缀‘ino’来命名（表 2）。假如超对称性是严格的，粒子与其超对称伴粒子将有完全相同的质量，然而这与实际情况不符合，因此即使自然界有超对称性，也是不严格的，是被破坏了。量子场论的规则，高阶修正的玻色子圈和费米子圈的贡献差符号，它们互相抵消。对于有超对称性的模型，即使是超对称性有所破坏的模型<sup>1)</sup>，也会大大改善由其量子高阶（圈）修正的高能（紫外）行为。例如，在超对称仅有‘软’破坏时，对希格斯量子场进行高阶修正不会再出现平方发散，而降至对数性发散，所谓的‘层级(hierarchy)’问题将得到解决。同一原因，强-电-弱作用的耦合强度（常数）随能量的演化也将发生变化，使三个耦合常数恰好在能量为  $10^{16}$  GeV 时，变得相等，为三种相互作用的‘统一’提供了前提，并与现有实验观测（主要是质子寿命的

观测值  $\tau_p \geq 5 \times 10^{32}$  年）不冲突。超对称模型引起人们兴趣的重要原因是只要模型中的重子数减轻子数（ $L-B$ ）守恒和粒子自旋（ $S$ ）确定，不会改变（这是一般模型都具有的性质），‘普通’的粒子和它们‘伴’粒子都有量子数  $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$  宇称，‘普通’的粒子的  $R$  为正，而‘伴’粒子  $R$  为负。模型中的所有反应过程有  $R$  宇称守恒，即超对称‘伴’粒子只能通过‘普通’粒子的碰撞或衰变成对地产生，单个‘伴’粒子只能自发地衰变到较轻的‘伴’粒子，这样模型中最轻的‘伴’粒子（ $LSP$ ），除非它能再碰到另外一个超对称‘伴’粒子湮没外，自己是稳定的。如果超对称模型‘伴’粒子谱中这个最轻的粒子（ $LSP$ ）且只有弱作用的，即可以作为宇宙学观测指出的暗物质的粒子。最后，超对称性能使内禀的对称性与时间-空间的对称性‘不平凡’地联系起来，超对称可以把爱因斯坦的时-空引力与‘内禀’的强-电-弱相互作用‘结合’起来，‘建造’包含强-电-弱相互作用的‘超引力’模型。由于上述原因，超对称的理论受到理论家的特别‘偏爱’，在 *LHC* 上寻找超对称，发现  $R$  宇称为负的，普通粒子的超对称‘伴’粒子，受到多方面理由的推动。

$R$  宇称守恒超对称模型不仅可能提供宇宙学观测暗物质粒子，而且能解决希格斯粒子场的‘层级(hierarchy)’问题，为强-电-弱相互作用统一起来提供前提，并能把引力结合进来成为‘超引力’等，包括了引力的超引力模型得到理论家的普遍重视，因此在 *LHC* 上发现超对称，和找到超对称的线索，成为 *LHC* 重要物理目标。

破坏了超对称的超对称性模型有许多待定的参数，它们需要实验来确定；而反过来实验发现超对称又需要理论的指导。由于超对称的破缺机制不清楚，使得这些参数变化很大，可以使超对称伴粒子的产生与衰变的‘面目(pattern)’截然不同，使实验的安排也就不同。突破这一‘怪圈’，理论上已经设想了多种超对称的破缺机制方案(scenario)，例如：超引力限制的方案(mSUGRA)，规范媒介方案，引力媒介方案等。因为希望  $LSP$  是宇宙中的暗物质粒子，各种方案都是安排  $LSP$  是只有弱作用的超对称伴粒子。这样，可作为宇宙中的暗物质粒子的  $LSP$  在不同的方案中可以是中性黑格斯粒子（ $H_1^0, H_2^0$ ），

1) 仅限于所谓的‘软’破坏，引入的破坏项的量纲低于 4，但是对于得到实验观测的粒子质量谱的需要已经足够了。

光子( $\gamma$ )和弱玻色子( $Z$ )四者的伴粒子的混合得到的 ( $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$ ) 中最轻的物理态 ( $\tilde{\chi}_1^0$ ) —  $mSUGRA$  方案; 可以是引力子的伴粒子 ( $\tilde{g}_{3/2}$ ) — 规范媒介方案等等。本文不可能介绍各种理论上的方案, 仅使读者有一个初步了解, 在此我们仅基于研究得比较多的、正常的 (*canonical*)  $mSUGRA$  方案为例, 介绍在  $LHC$  上展开超对称研究的特点、概貌和预期结果。

基于  $mSUGRA$  方案, 图 3 是超对称的一个典型的‘伴’粒子和希格斯粒子谱。其中, 用  $h^0, H^0$  分别代表前面所述的  $CP$  偶的两个中性黑格斯粒子 ( $H_1^0, H_2^0$ );  $\tilde{\chi}^\pm$  代表  $W^\pm$  的伴粒子;  $\tilde{l}_{L,R}$  为第 1, 2 代带电轻子的伴粒子;  $\tilde{\nu}_l$  为第 1, 2 代中微子的伴粒子;  $\tilde{q}_{L,R}$  为第 1, 2 代夸克的伴粒子;  $\tilde{t}_{1,2}$  和  $\tilde{b}_{1,2}$  为  $t$  夸克和  $b$  夸克伴粒子的物理态;  $\tilde{\tau}_{1,2}$  和  $\tilde{\nu}_\tau$  为  $\tau$  轻子和  $\nu_\tau$  中微子的伴粒子;  $\tilde{g}$  为胶子的伴粒子。

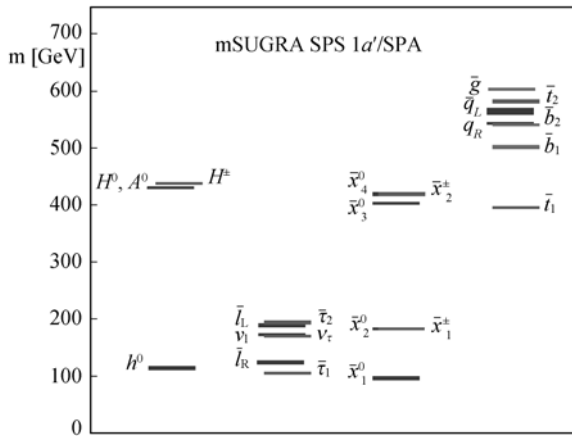


图 3

粒子的超对称模型至少限制了希格斯粒子的质量, 需要轻的希格斯粒子, 所以无论是  $LHC$  或者  $Tevatron$  上发现了轻希格斯粒子 ( $m_H \leq 160 \text{ GeV}$ ), 都是对存在超对称性的支持。超对称模型在希格斯粒子方面还要存在一个相对重的  $CP$  偶的 ( $H_2^0$ ), 一个  $CP$  奇的 ( $A^0$ ) 和带电的 ( $H^\pm$ ) 希格斯粒子。这些希格斯粒子的发现也将是对超对称的支持。然而, 发现超对称性归根到底是需要有直接的超对称伴粒子的发现。

在强子对撞机上直接发现超对称伴粒子的基本思想是,  $R$  宇称守恒的超对称模型的  $LSP$  可以作为宇宙中的不发光、不反射光和只有弱作用的暗物质

粒子, 它是稳定的, 这样一旦有超对称粒子产生 ( $R$  宇称守恒只能成对产生), 一定会通过快速级连衰变到  $LSP$ , 又因为  $LSP$  只有弱作用, 它将不留痕迹地逃出探测器, 而在探测器中仅留下衰变的其它产物的痕 (径) 迹。即类似于在标准模型中仅有弱作用的中微子从探测器逃逸, 整个事例表现为能-动量的‘丢失’; 但从‘丢失’的能-动量得到的不变质量可知它不同于中微子。

在强子对撞机中发现超对称粒子的难度相对大。这是因为强子对撞实际上是它们中间的部分子 (轻夸克和胶子) 的对撞, 对撞的部分子携带的能-动量随机地为对撞强子能-动量从 0.0 到 1.0 的份额, 因此对撞部分子的质心在对撞方向上的动量 (运动速度) 是很随机的, 是无法进行人为控制的。这样, 对于  $LHC$  质子-质子对撞, 其中的部分子对撞的总能量将落在 0.0  $TeV$  到 14.0  $TeV$  之间。由于部分子在质子内的分布的具体行为和探测器覆盖的立体角等原因, 只有部分子的对撞发生在总能量在 0.1 ~ 10.0  $TeV$  区域内的事例是足够多的, 又能被  $LHC$  上探测器所覆盖。这些事例才是实验最有兴趣的。由于事例质心沿对撞方向的动量和总的对撞能量确定不下来, 产生了超对称粒子的事例最后衰变到的  $LSP$  造成的能-动量的‘丢失’, 只能在垂直于对撞方向的动量 (横动量) 表现为出来, 即表现为横动量‘丢失’。仅有横能-动量的‘丢失’是无法区别  $LSP$  和已知的中微子。因此在  $LHC$  上发现超对称, 即发现作为暗物质的  $LSP$ , 一定需要从大量的事例中挑选出在级连衰变到  $LSP$  之前的超对称粒子在探测器中留下径迹, 或者有办法在探测器中将它分离出来, 清楚地测量出其能量和动量, 再从它的衰变模式完全确定出  $LSP$  的能-动量, 从而定出  $LSP$  的不变质量, 确定其不是中微子。事实上, 这样不仅观测到了  $LSP$ , 而且还观测到了衰变前的另一个超对称粒子。原则上另一种观测  $LSP$  并将它与中微子区别开来的方法是在强子对撞中由中微子引起的横能量 (动量) 丢失, 由于轻子数守恒, 事例中多伴有带电轻子, 因此只要有带电轻子的事例, 都不予选择, 这样被选择剩下的有大横能量 (动量) 事例, 多半是  $LSP$  的事例 (仍然有通过  $Z$  玻色子衰变到正反中微子对的事例混在其中, 但是理论上可以估算出这样混入的中微子事例的几率很小)。这第二种方法, 只能确定  $LSP$  的横能量, 不能确定  $LSP$  的质量,

因此只能做出支持‘存在  $LSP$ ’的结论，做到‘发现超对称’尚需要进一步的其他实验。不管是上述的那种方法，在实际操作作为第一步先在大量的

事例中挑选有‘丢失’横动量的事例，并将已知的可能是中微子造成的横动量‘丢失’事例作为本底尽可能地剔除出去。

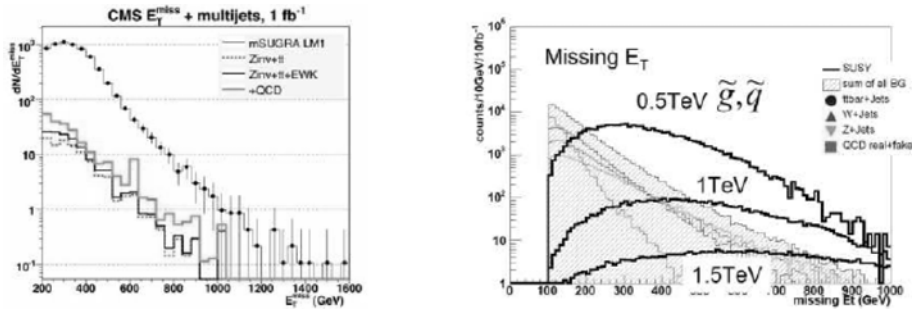


图 4  $LSP$  的多喷注加大横动量‘丢失’ ( $E_T^{miss} + multijets$ ) 事例和其它标准模型的多喷注加大横动量‘丢失’事例的蒙特卡罗模拟结果。(a)CMS, (b)ATLAS。

由于夸克的超对称伴子 ( $\tilde{q}$ ) 和胶子超对称伴子 ( $\tilde{g}$ ) 带有颜色，当  $\tilde{q}$  和  $\tilde{g}$  的质量大于  $0.5TeV$  小于  $1.5TeV$  时，在  $LHC$  中它们的正反粒子对产生截面大，所以  $ATLAS$  和  $CMS$  认真进行了关于  $mSUGRA$  的  $LSP$  的大横动量‘丢失’的蒙特卡罗模拟；并与其一起，分别考虑标准模型的  $QCD$  多喷注产生，又由于探测器对喷注的漏测或探测器的分辨缺陷造成的大横动量‘丢失’；直接和间接地产生弱玻色子  $W$  或  $Z$  加多个喷注的截面相对大，其中的  $W$  或  $Z$  衰变到中微子的几率比较大，再当与中微子相伴的带电的轻子被探测器漏掉，中微子不留痕迹地穿过探测器，造成大的横动量‘丢失’的各种情形。模拟的结果表明产生了超对称粒子，衰变到仅有弱作用的  $LSP$  造成的大横动量‘丢失’确实与上述最难区别的标准模型的大横动量‘丢失’有所不同（见图 4）。从而能够从大横动量‘丢失’确定实验中很可能有超对称粒子  $LSP$  的产生。

在强子对撞机的实验中从大横动量‘丢失’只能确定到实验中很可能有超对称粒子  $LSP$  的产生，至于能否进一步肯定  $LSP$ ，如前所述，若超对称粒子产生后，级连衰变到最终端的  $LSP$  之前的‘母’粒子在探测器中能留下径迹或者能找到适当办法在探测器中将它分离出来，并能从大横动量‘丢失’事例中能挑选出来，能清楚地测量出这‘母’粒子的能量和动量，再从能-动量守恒确定出最终衰变出的‘丢失’的能-动量，定出了‘丢失’的不变质量，肯定‘丢失’的不是中微子，这样不仅断定出‘丢失’的是  $LSP$ ，而且可同时确定这‘母’粒子也是

超对称粒子。这种情况太理想，实际上不是所有超对称模型和其中的参数取任何值时都能做得到的，只是在一些特定超对称模型所给出的超对称粒子谱下才有可能做到。对于做不到这一点的超对称模型，最终只能依靠发生碰撞的能量可以人为控制的正负电子对撞机上的实验去验证发现的是不是超对称粒子。我们不在此进一步介绍这种情形。

如果  $LHC$  上发现有上述造成大横动量‘丢失’的  $LSP$ ，则回答了宇宙学中的暗物质问题。如果观测到的  $LSP$  是受  $mSUGRA$  所限制的，表明实验事实支持  $mSUGRA$ ，而这一模型是包括了引力的超对称强-电-弱统一的理论模型，意味着建立包括了引力的超对称强-电-弱统一的理论得到了实验支持，前进了一大步。至于宇宙学中的暗能量等问题，没有公认成功的理论指导， $LHC$  上若发现不同于希格斯粒子的标量粒子（有效的粒子）或许与宇宙学中的暗能量问题有关系。因为引起电-弱破缺的希格斯粒子场的将给真空一负的值比暗能量需要的大 56 个数量级，强作用  $QCD$  中的手征破缺的真空也大 44 个数量级，这些都无助于解决暗能量的问题，显然我们离解决暗能量问题尚有时日和距离。

3. 针对解释宇宙中正、反重子物质不对称所需要的要素， $LHC$  上专门建造了探测器  $LHCb$  开展‘重味’ $b$  物理， $CP$  破坏和其它‘味’物理的实验研究

虽然，世界上两个  $B$ -工厂 ( $KEKB, PEP-II$ ) 对于‘重味’ $b$  物理的  $B$  介子已经进行了详细的研究，对于表述标准模型中夸克‘味道’间的混合  $CKM$  矩阵，及其中的复数相因子有了相当好的测量，但



是受到只能进行  $B(B^{\pm}, B^0, \bar{B}^0)$  介子的实验<sup>1)</sup>和最终的事例统计量的限制, 尚有许多‘重味’ $b$ 物理课题有待研究。例如, 在事例率上  $B$ -工厂上每年能够产生  $10^8$  个  $b\bar{b}$  对, 而仅在亮度为  $5 \times 10^{32}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup> 时  $LHC$  上每年能产生多于  $10^{12}$  个  $b\bar{b}$  对, 因此  $LHC$  能够比  $B$ -工厂观测到更加稀有的过程。再例如, 虽然在  $B$ -工厂上已经观测到了  $B^0 - \bar{B}^0$  的混合, 测量出了两者的震荡的频率, 得到了关于  $CP$  破坏的一项重要的测量的两个物理态的质量差  $\Delta m_d$  等。但是对于理论上同样重要的  $B_S - \bar{B}_S$  混合,  $B$ -工厂完全‘束手无策’, 因为在  $B$ -工厂难于产生足够数量的  $B_S$  和  $\bar{B}_S$  介子, 而且其混合的两个物理态的质量差  $\Delta m_s$  比  $\Delta m_d$  大得多,  $B_S - \bar{B}_S$  的震荡频率比  $B^0 - \bar{B}^0$  的大得多, 一般需要高速运动, 利用相对论洛伦兹延长效应才能把  $\Delta m_s$  测量得准。 $B$ -工厂的能量不够高, 产生出的  $B_S$  和  $\bar{B}_S$  速度不够大, 相对论洛伦兹延长效应不够大, 测量不到或者测量不准  $B_S - \bar{B}_S$  震荡的  $\Delta m_s$ 。在研究  $b$  夸克物理课题中, 双重味介子  $B_c$  和含有  $b$  夸克的重子的研究, 占有着不可缺的地位, 然而, 这样的介子和重子在  $B$ -工厂中完全不能产生, 它们的研究只能在强子对撞机上进行。

实际上, 目前所发表的关于  $B_S - \bar{B}_S$  震荡和包含  $b$  夸克的重子的结果都来自强子对撞机  $Tevatron$  上的实验。

$LHC$  上的  $ATLAS$  和  $CMS$  是大型综合性的探测器, 肩负着发现希格斯粒子, 测量顶夸克的各种性质和发现超对称粒子等的‘重大’任务, 在  $LHC$  调试的最初阶段, 尚未达到设计指标, 束流强度不太高(亮度小于  $2 \sim 5 \times 10^{32}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup>) 时, 主要出于‘刻度’探测器的目的,  $ATLAS$  和  $CMS$  会被用来研究量子色动力学和‘重味’ $b$ 物理的一些问题等。但是当对撞机完成调试后, 达到了各项设计指标, 在  $ATLAS$  和  $CMS$  的对撞点处对撞产生的量子色动力学和‘重味’ $b$ 夸克的事例率太高。 $ATLAS$  和  $CMS$  探测器承受不了这样高频率, 不得不放弃记录量子色动力学和‘重味’ $b$ 夸克的事例, 通过控制对探测器专门设置的‘触发’, 挑选记录  $ATLAS$  和  $CMS$  主要物理目标的事例, 不再能兼容进行量子色动力

学和‘重味’ $b$ 夸克物理的研究了。鉴于‘重味’ $b$ 物理的重要性, 为开展‘重味’ $b$ 物理实验研究,  $LHC$  在隧道中特意留出了一个对撞点, 专门设计了探测器  $LHCb$ , 并始终控制这一对撞点上的亮度在  $\sim 5 \times 10^{32}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup>, 使事例率在探测器的可容忍的程度, 进行各种‘重味’ $b$ 物理实验研究。在  $LHC$  这样高的对撞能量下, 对撞产生的  $b, \bar{b}$  正反夸克, 分别分布在束流的朝前和朝后两方向上。 $LHCb$  探测器利用这点, 它是一‘单臂’型探测器, 只记录‘朝前’的‘重味’ $b$ 的事例。在专门设计的  $LHCb$  上, 可以肯定在‘重味’ $b$ 物理( $B_S - \bar{B}_S$  混合,  $B_S, \bar{B}_S$  介子的重要衰变,  $B_c$  介子,  $\Lambda_b, \Xi_{bc}$  等含  $b$  夸克的重子,  $b$  的稀有衰变等),  $CP$  不对称和其它‘味’物理的实验上做出成绩和贡献, 能够测量到一些新的稀有事例或给出稀有过程更加严的上限, 必定比  $Tevatron$  上的实验有重要的前进。

#### 4. QCD 色禁闭的解除, 夸克胶子等离子体的研究

在现在平常温度下有‘色禁闭’, 然而  $QCD$  理论指出在高温<sup>2)</sup>( $\sim 10^2 MeV$ ) 和高重子密度下可以打破‘色禁闭’, 与早期宇宙状态对应, 物质进到所谓的夸克胶子等离子体状态(物质可能状态相图见图 5)。

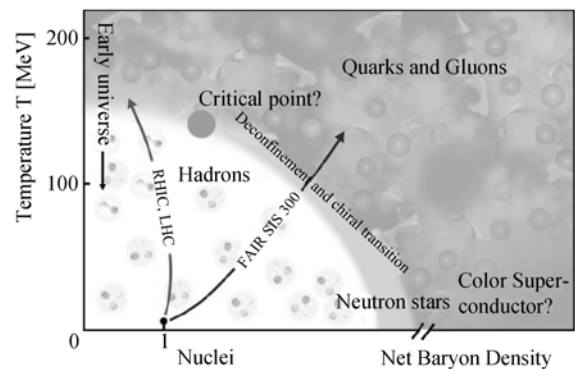


图 5 横坐标是核密度增加方向, 纵坐标是温度增加方向

$LHC$  的设计, 能令其可以加速两铅核 ( $Pb^{82}$ ) 等重离子束, 并令它们以高亮度 ( $10^{29}$  厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup>) 对撞, 目的是期望达到极高温和十分高的核物质密度, 尽管这种状态只能在对撞之后的瞬间做到。这样就能够在这很短的时间内模拟宇宙早期情况, 研究从通常状态到夸克胶子等离子体态发生相变需要

1) 虽然在  $B$ -工厂上也能够产生  $B_S, \bar{B}_S$  介子, 进行一些实验, 但是产生率比  $B^{\pm}, B^0, \bar{B}^0$  小很多, 实验受到很大限制。

2) 若以能量计算温度, 单位换算是 1 电子伏特 =  $1.16 \times 10^4$  度。

的条件和观测夸克胶子等离子体态的性质等。为了这一目标，在 *LHC* 隧道的四个对撞点中，留出了一个建造专门的探测器 *ALICE* 与 *LHC* 运行重离子模式配套。做这方面相变的实验，原则上，对撞的原子核中的核子（质子加中子）数越多越好，有利于在对撞后能够获得高的核物质密度。所以 *LHC* 将采用铅 ( $Z=82$ ) 原子核做束流。同时对撞的束流能量需要高，得以克服带电原子核的库仑壁垒和核子色禁闭的‘口袋壁’。但是对撞的动能要和束流原子核中包含的质子数配合，即核密度要达到一定的值，使对撞的动能能够在对撞后‘平均’地分配到全部核物质。如果对撞能量过高，而核物质的密度不够时，使对撞的动能停在核物质中的能力 (*stopping power*) 不够，也不能发生相变。根据其它实验和理论的估计，对于铅核的对撞，*LHC* 把铅离子加速到每核子具有 2.76TeV 能量是合适的。如图 5 所示，*LHC* 是让温度增加研究相变的发生。

*ALICE* 探测器与 *ATLAS*, *CMS* 和 *LHCb* 有很大的不同。它在于观测重离子对撞在两个对撞核融合为一体之后，其中是否发生了相变和所产生的状态的性质而专门设计的。它需要处理重离子对撞后发生了或未发生相变，最后再回到原来相的事例众多的能量相对低的粒子。对撞的频率不高，但要求每次对撞测量到大量低动量的粒子是 *ALICE* 探测器特点。经过了几次修改，现在 *ALICE* 探测器基本准备好了去完成 *QCD* 的相变研究。夸克胶子等离子体能否在 *LHC* 上产生，夸克胶子等离子体有什么特性？人们等待 *ALICE* 探测器上实验测量结果的分析。

## 5. 利用 *LHC* 高能质子束的两个新建议的实验

*LHC* 预计的主要物理目标大体上是上述四方面。近来，在发掘 *LHC* 的潜力上，取得重要进展，提出了两项新实验建议 *TOTEM* 和 *LHCf*，而且现在已经得到正式批准。

*TOTEM* 实验是利用 *LHC* 高能量的质子束流，进行测量质子的朝前弹性和衍射散射行为的实验，把人们关心的质子弹性和衍射朝前散射行为推至 *LHC* 能量。从量子理论的么正性（反映物理态的完备性）推导出的光学定理，使质子弹性朝前散射行为与质子的总截面联系在一起；根据 *QCD* 理论和现有的实验数据表明质子的朝前衍射散射行为反映两个质子间多个胶子和/或多胶子的结构的交换等。为测量质子的朝前弹性和衍射散射行为，在 *CMS*

的束流方向补充建造了 *TOTEM* 探测器（分别在在对撞点外 7.5 和 14 米的径迹望远镜 *T1*, *T2*；分别在 147, 180, 220 米外的测量散射角到微弧度的所谓的 *Roman Pot* 探测器等），而且还要在 *CMS* 中心探测器部分在对撞的两边各增加量能器 *CASTOR* 扩大朝前的赝快度测量到  $5.3 \leq |\eta| \leq 6.6$ ，和增加零度量能器 *ZDC*，达到测量质子的朝前弹性和衍射散射行为的实验目的。

*LHCf* 实验是与 *ATLAS* 结合，利用在 *LHC* 对撞中产生的朝前粒子作为源，在实验室条件下模拟宇宙线在大气中的级联簇射过程，研究在 *LHC* 内如何碰撞使粒子生成类似的级联簇射，从而来解释可以覆盖几千公里的大规模极高能宇宙线现象和刻度宇宙线初始能量等。这将对极高能宇宙线研究有重要意义。

实际上，在 *LHC* 上有可能发现或者观测到完全不在上述预期的主要物理目标之中粒子和/或现象。上述所列的预期的主要物理目标仅仅是一些代表，是作为评价 *LHC* 科学价值，指导决定 *LHC* 和与其配套的探测器的技术指标和经费预算用的。一般说来，这些被列入预期的主要物理目标的内容在理论上、实验上都尽量基础坚实，这样在今后的实际进程中，*LHC* 实验在所列的预期的主要物理目标外，有更加重要结果产生出来是不奇怪的。

为解释所观测到的宇宙中重子物质所占的比例，目前完全没有观测到反重子成分，需要粒子物理观测的 *CP* 破坏和重子数和/或轻子数不守恒等。宇宙学的估算已经明确 *CKM* 矩阵中的相因子的 *CP* 破坏不够强，而轻子数或重子数不守恒全然没有观测到。或许 *LHC* 上不仅发现了希格斯粒子，而且从希格斯粒子的性质中发现其中有新型 *CP* 破坏，对应宇宙学需要的 *CP* 破坏，或许 *LHC* 上将发现中性重轻子效应，能够提供宇宙学需要的轻子数不守恒等是可期盼的。

前面基于标准模型及其最小超对称扩充对实验发现轻希格斯粒子的叙述已经很多，但是都没表明这些轻希格斯粒子理论一定正确，而且实验一定会按这些理论发现希格斯粒子。已经有很多理论文献提出了替代模型，例如不需要超对称解决希格斯粒子‘层级 (*hierarchy*)’问题的‘小希格斯’理论；希格斯粒子不是‘基本’的，是束缚态，并引入了新的相互作用的‘五彩色 (*technicolor*)’理论及其

变种顶-色 (*topcolor*) 理论等。使强-电-弱相互作用‘统一’的理论,除了标量的黑格斯粒子方面,而且在规范矢量粒子方面要有所增加,其中质量最低的可能是类似中性弱玻色子的  $Z'$  等。另有理论认为我们平常生活的四维时间-空间并不完全,还存在‘额外’的维数。‘额外’维空间的理论主要是考虑引力提出来的,这‘额外’维空间或许是弯卷成半径很小的球(圆)或许只由引力在其中传播等。所有这些理论都能找到一些过程在  $TeV$  能量下可能有效应。因此  $LHC$  将会对这些理论给出限制或新的线索。

在上面发现超对称粒子的叙述中,我们已经指出单独从  $LHC$  的实验做出‘发现超对称粒子’的结论的困难。在强子对撞机上,不能控制参与反应的初态部分子纵向动量(是随机分布的),这样也就不能控制对撞的总能量,和控制反应的系统的质心在束流方向上的运动速度。结果是只要对末态不是进行完全的 (*exclusive*) 测量,反应的系统的质心在束流方向上的速度和进行反应的总能量都不能确定下来。这是强子对撞机实验不可避免的缺陷。在  $LHC$

这样的强子对撞机的探测器中,如果‘新物理’自己再不能留下径迹,这样,就如前面在发现超对称粒子的叙述,只能从横动量上去发现‘新物理’的线索,最终难于做出发现超对称粒子的结论,充分表现出强子对撞机实验的缺陷。

由于强子对撞机实验的缺陷,当前国际上正在蕴酿建造  $TeV$  能量的正负电子直线对撞机 ( $ILC$ ),其开始的质心能量为  $0.5TeV$ ,建造地点留有余地将来质心能量可提高到  $1.0TeV$ ,以此来弥补  $LHC$  的不足。这一正负电子直线对撞机及其配套的探测器造价高昂,只能通过国际合作完成。现在由于科学和政治的原因,尚未确定建造  $ILC$  的时间和地点。如果  $LHC$  实验顺利,得到重要的结果,为证实标准模型和发现标准模型之外的‘新物理’提供了线索,无疑对排除建造  $ILC$  的科学阻力有重大作用。可见, $LHC$  实验对高能物理的下一步发展道路将有直接影响。同样  $LHC$  实验可能对宇宙学现在提出的问题可以做出回答和/或限制,因此, $LHC$  实验将对天体、宇宙观测下一步的发展决策产生影响。

最后,让我们预祝  $LHC$  实验取得重大成功。