

# LHC 实验中超对称粒子及 暗物质的寻找

庄胥爱

## 1. 引言

英国诗人艾略特 (T. S. Eliot) 在《四个四重奏》中写到:

“我们叫作开始的往往就是结束，而宣告结束也就是着手开始。终点是我们出发的地方。”这不禁让我们想到古希腊神话里的一个怪物 Uroboros——一条吞吃自己尾巴的蛇。其实，宇宙何尝不像一个 Uroboros 呢？——时空的起点和终点咬在了一起 (图 1)。格拉肖 (S. L. Glashow) 也早就借那条蛇来描述宇宙图景：它的头是爱因斯坦的大宇宙，尾巴是普朗克尺度的小宇宙，大宇宙在吞吃小宇宙 (图 1)。

“宇宙圈”上有不同的特征尺度，对应不同的物理过程。例如，在我们人类存在的尺度，引力和电磁力占主导地位。从我们所在的尺度出发沿着“宇宙圈”反时针方向走，尺度越来越大，引力效应越来越显著，到了星系尺度以上，就全然是引力主导的，其描述理论是爱因斯坦的广义相对论。如果沿着“宇宙圈”顺时针方向走，尺度越来越小，引力的角色会慢慢淡出，在粒子的“微观世界” ( $\sim 10^{-15}$  cm 尺度)，其主导变为强弱相互作用，对应

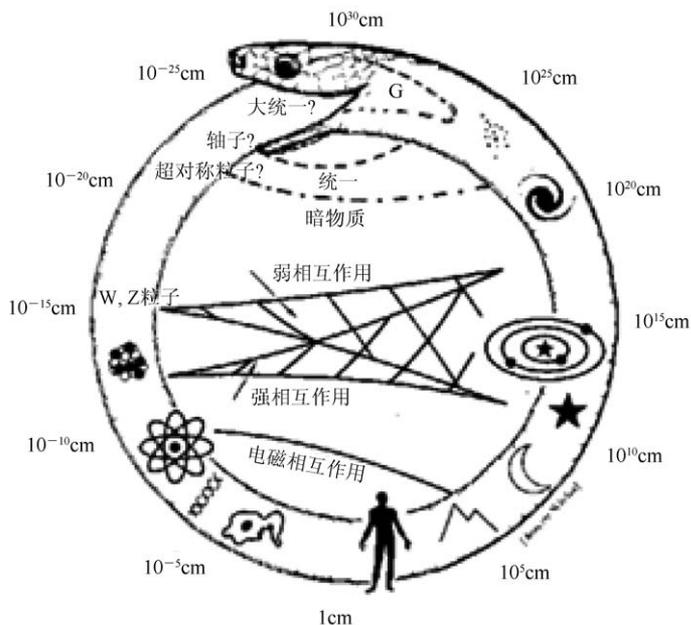


图 1 “宇宙圈”的 Uroboros 示意图

的理论模型是标准模型 (Standard Model)。尺度更小时，可能会出现超对称物理或其他新物理。然后，在大约  $10^{-30}$  cm，即 1000 个普朗克尺度附近，强、弱、电磁三种相互作用将统一在一起 (该能标称为大统一能标，也叫 GUT 能标)。再小下去，就是理论所考虑的最小尺度——普朗克尺度。而在更小的尺度  $R$ ，根据超弦理论的对偶性，物理图景相当于在  $1/R$  的尺度。这时候大与小分不清了，蛇的尾巴消融在了它的嘴巴里。而能把自然界中三种相互作用力 (电磁力、强相互作用力，弱相互作用力) 统一一起

来，并能给如何统一引力相互作用提供重要线索的只有我们文中要详细描述超对称理论模型。

## 2. 标准模型

前面提到，描述“微观世界”基本粒子及相互作用的最成功的模型是标准模型。它解释了人们最关心的一个基本问题：物质为什么有质量，其质量来源又是什么？

标准模型是一套描述强力、弱力及电磁力这三种基本力及组成所有物质的基本粒子的理论。根据标准模型，自然界由费米子 (是组

成物质的基本粒子，包括轻子和夸克，自旋为半整数）和玻色子（是负责传递各种相互作用力的粒子，自旋为整数）组成。这些基本粒子本来没有质量，由于引入希格斯机制使得规范玻色子 W 和 Z（是传递弱相互作用的玻色子）获得了质量，通过与希格斯的相互作用轻子和夸克也获得了质量。真空中希格斯场可以处于一个非常特殊的状态，理论上叫作凝聚态，打个比方就像稀糖浆或者蜜糖这样的状态。当别的粒子经过这个“稀糖浆”时，也就是经过希格斯场的这个凝聚态时，就获得了质量。夸克组成质子和中子，质子和中子组成原子核，进而组成了原子、分子和我们的物质世界。因而希格斯机制是物质质量的起源，人们把寻找这种机制所预言的希格斯粒子比喻为寻找粒子物理学中的“圣杯”，可见其重要性。希格斯粒子像一个幽灵一样神秘莫测，难以捕捉，然而又非常重要，是整个标准模型的奠基石，又被人们称为“上帝粒子”。在大型强子对撞机（LHC）之前已经有许多间接的实验证据表明希格斯粒子大约在 100 ~ 200 GeV 左右。大型强子对撞机就是为捕捉希格斯粒子而建的，当然也包括寻找超出标准模型的新物理。在标准模型中，描述电磁和弱相互作用的电弱统一理论与描述强相互作用的量子色动力学均为规范场论。到目前为止，几乎所有对以上三种力的实验结果都与标准模型的预测一致。

图 2 是标准模型中基本粒子的示意图。标准模型中负责传递相

互作用的玻色子（图 2 最右边一列）包括描述强相互作用的媒介子——胶子（g），描述电磁相互作用的媒介子——光子（ $\gamma$ ），描述弱相互作用的媒介子——W 及 Z 玻色子，还有所有粒子质量的源头——希格斯粒子（Higgs）。构成物质的费米子（图 2 紫色和绿色部分）可以分为三“代”（根据质量来划分的）：第一代包括电子、上夸克、下夸克、电子中微子。一般的物质都是由这一代的粒子组成；第二及第三代粒子只能在宇宙射线或是高能实验中制造出来，而且会在短时间内衰变成第一代粒子。

标准模型自提出以来可以解释几乎所有的实验现象，并预言了  $Z^0$ 、 $W^+$ 、 $W^-$ 、希格斯粒子和胶子

g 等 5 个玻色子的存在。结果  $W^\pm$  和  $Z^0$  于 1983 年相继在欧洲核子研究中心 CERN 的质子 - 反质子对撞机上被找到。意大利科学家鲁比亚（Carlo Rubbia）和荷兰科学家范德梅尔（Simon. Van. Der Meer）为此获 1984 年诺贝尔物理学奖。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。这样的胶子喷注也于 1979 年夏在德国的电子同步加速器（DESY）实验室被发现，著名华裔物理学家丁肇中和吴秀兰教授对此作出了主要贡献。2012 年位于 CERN 的目前世界最高能量的对撞机 LHC 上的两个探测器 ATLAS 和 CMS 同时发现了一种新粒子，与希格斯玻色子非常类似，但要最终确定其是

		三代费米子			
		I	II	III	
质量→		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
电荷→		2/3	2/3	2/3	0
自旋→		1/2	1/2	1/2	1
名字→		u 上夸克	c 粲夸克	t 顶夸克	$\gamma$ 光子
	夸克	4.8 MeV -1/3 1/2 d 下夸克	104 MeV -1/3 1/2 s 奇夸克	4.2 GeV -1/3 1/2 b 底夸克	0 0 1 g 胶子
		<2.2 eV 0 1/2 $\nu_e$ 电子中微子	<0.17 MeV 0 1/2 $\nu_\mu$ $\mu$ 子中微子	<15.5 MeV 0 1/2 $\nu_\tau$ $\tau$ 子中微子	91.2 GeV 0 1 $Z^0$ Z玻色子
	轻子	0.511 MeV -1 1/2 e 电子	105.7 MeV -1 1/2 $\mu$ $\mu$ 子	1.777 GeV -1 1/2 $\tau$ $\tau$ 子	80.4 GeV $\pm 1$ 1 $W^\pm$ W玻色子
					玻色子

图 2 标准模型示意图。其粒子有六种是夸克（图中用紫色表示），有六种是轻子和轻子中微子（绿色部分）。左边的三列中，每一列构成物质的一代。最右边一列是规范玻色子。另外还有希格斯玻色子未被表示在这里

否是希格斯粒子还需要进一步的研究。到目前为止，标准模型在电弱能区取得了空前的成功。然而，在 高能区（大统一能标  $10^{16}\text{GeV}$  和普朗克能标  $10^{19}\text{GeV}$ ）却存在很多的问题。比如：标准模型只把电磁相互作用和弱相互作用统一为电弱统一理论，然而却不能将强（描述理论为量子色动力学）、弱和电磁相互作用（描述理论为电弱统一理论）统一为一个宏大的统一场理论；标准模型也不能解释占宇宙 23% 的暗物质；不能解释为什么在电弱能标（100 GeV 量级，即  $10^{12}\text{eV}$ ）与大统一能标（ $10^{16}\text{GeV}$ ）或普朗克能标（ $10^{19}\text{GeV}$ ）之间存在高达十几个数量级的差别（这就是标准模型中著名的等级问题（Hierarchy Problem））。更为重要的是希格斯玻色子质量本身会有辐射修正，而这种修正是随着新物理能标平方发散的（这就是希格斯质量的二次发散问题）。假如新物理能标是大统一能标或者普朗克能标，要得到一个处于电弱能标的希格斯粒子质量，就一定存在一些微妙而精确的抵消过程，来消除这些发散。然而标准模型本身不能自然地做到这一点，因此人们相信标准模型之外还存在其他物理理论，超对称理论（supersymmetry，简称 SUSY）就是其中之一。它在电弱能区与标准模型兼容，在普朗克能区解决上述标准模型中存在的问题。因而许多人认为超对称理论是标准模型最好的扩展模型。超对称理论中玻色子与费米子在物理性质上是互补的，这种互补性可以被巧妙地用来解决

标准模型中的等级问题。超对称在理论上的另一个美妙性质是普通量子场论中大量的发散结果在超对称理论中可以被超对称伙伴的贡献所消去（可以解决希格斯质量的二次发散问题），因而超对称理论具有十分优越的重整化性质。由于 SUSY 和女孩常用的名字“Susie 苏茜”谐音，而且其理论又非常简单、完美，活像一位优美、典雅的少女，因而 SUSY 受到了物理学家们的偏爱。

### 3. 超对称理论

超对称是费米子和玻色子之间的一种对称性。我们知道，费米子和玻色子的基本性质截然不同，超对称便是将这两类粒子联系起来对称性——而且是能做到这一点的唯一的对称性。大型强子对撞机 LHC 将会检验粒子是否有相对应的超对称粒子。对超对称的研究起源于 20 世纪 70 年代初期，当时雷蒙德（P. Ramond）、内伟（A. Neveu）、施瓦茨（J. H. Schwarz）、格威斯（J. Gervais）、萨基塔（B. Sakita）等在弦模型（后来演化成超弦理论）

中、Y. A. Golfand 与利特曼（E. P. Likhtman）在数学物理中分别提出了带有超对称色彩的简单模型。1974 年，韦斯（J. Wess）和祖米诺（B. Zumino）将超对称运用到了四维时空中，这一年通常被视为是超对称诞生的年份。

在最简单的超对称理论模型中，每一种基本粒子都有一种被称为超对称伴子（supersymmetric partner）的粒子与之匹配，超对称伴子的自旋与原粒子相差  $1/2$ （因玻色子和费米子的自旋差别为  $1/2$ ，也就是说玻色子的超对称伴子是费米子，费米子的超对称伴子是玻色子）。图 3 是最简单的超对称模型中所有基本粒子的示意图，左边是所有标准模型中的粒子，右边是对应的超对称伴子，其中夸克（quark）和轻子（lepton）的超对称伴子分别是 squark（超对称性夸克，下面简称超夸克）和 slepton（超对称性轻子，下面简称超轻子），中微子的超对称伴子是 sneutrino（超对称性中微子，下面简称超中微子），规范玻色子的超对称伴子（gaugino）有：W 玻色子的超对称伴子 wino，Z 玻色子的超对称伴子 zino，光子的超

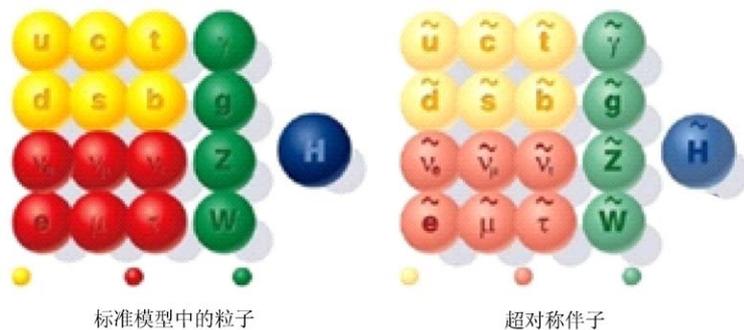


图 3 超对称理论示意图

对称伴子 photino, 胶子的超对称伴子 gluino 和引力子的超对称伴子 gravitino。Higgs 粒子的超对称伴子为 Higgsino。右边波浪线表示其为标准模型粒子的超对称伴子。实验上我们能探测的是 gaugino 与 Higgsino 混合之后形成的粒子, 我们根据其是否带电分为两类: 带电的称为 chargino (根据质量不同, 分为  $\tilde{\chi}_1^\pm$ ,  $\tilde{\chi}_2^\pm$ ), 中性的称为 neutralino (根据质量, 分为  $\tilde{\chi}_1^0$ ,  $\tilde{\chi}_2^0$ ,  $\tilde{\chi}_3^0$ ,  $\tilde{\chi}_4^0$ )。

超对称理论的最大魅力在于经由一次超对称变换, 粒子的自旋将改变 1/2。举例来说, 对玻色子(自旋为整数, 描述相互作用力)做一次超对称变换, 玻色子将变成自旋与之差 1/2 的费米子(自旋为半整数, 描述物质)。反之亦然。这样玻色子和费米子通过超对称变换联系在一起(物质和相互作用也联系在一起)。通过两次超对称变换, 自然界中四种相互作用力也联系在一起(引力子自旋是 2, 其他三种相互作用传播子的自旋为 1, 引力子通过一次超对称变换, 变为自旋为 3/2 的费米子, 再做一次超对称变换, 则变为自旋为 1 的玻色子)。

长期以来物理学家们一直相信, 在很高的能量(即大统一能标, 约为  $10^{16}$  GeV)下微观世界的基本相互作用——强相互作用及电弱相互作用可以被统一在一个单一的规范群下, 这样的一种理论被称为大统一理论。大统一理论若成立, 则强、电磁及弱相互作用的耦合常数将在大统一能标上彼此统一, 然而在标准模型框架内上述耦合常数在任何

能量下都不彼此相等, 也就是说在标准模型框架内是实现不了强、弱以及电磁相互作用大统一的, 这无疑是对大统一理论的沉重打击, 也是对物理学家们追求统一信念的沉重打击。超对称的引入给了大统一理论新的希望, 因为计算表明, 在对标准模型进行超对称化后, 所有这些耦合常数在高能下非常漂亮地汇聚到了一起。这一点大大增强了物理学家们对超对称的信心, 也增强了人们统一自然界中四种相互作用信心。虽然超对称理论本身并没有把引力和其他三种相互作用力统一在一起, 但它是大统一理论和超弦理论(统一自然界中四种相互作用力)的基础和核心。超对称自提出到现在已三十多年了, 在实验上却始终未能观测到任何一种已知粒子的超对称伴子, 甚至于连确凿的间接证据也没能找到。一个具体的理论观念, 在完全没有实验支持的情况下生存了三十多年, 而且在理论物理中的地位节节攀升, 这在理论物理中是不多见的, 可见其理论的非凡魅力。一旦它被实验证实, 将引起的轰动是不言而喻的。正如温伯格(S. Weinberg)(电弱统一理论的提出者之一)所说, 那将是“纯理论洞察力的震撼性成就”。

#### 4. 暗物质

暗物质(Dark Matter)是相对可见物质来说的。所谓可见物质, 除发射可见光的物质外, 还包括辐射红外线等其他电磁波的物质。虽然宇宙中的可见物质大部分

不能用肉眼直接看到, 但探测它们发出的各种电磁波就可以知道它们的存在。暗物质是既看不见又不发出辐射的物质。暗物质不辐射电磁波, 但有质量。它们不可见, 但通过它们对星系和银河星团的引力作用结果, 可以推断它们确实存在。我们知道, 太阳系的质量, 99.86%集中在太阳系的中心, 即太阳上, 因此, 离太阳近的行星受到太阳的引力, 比离太阳远的行星大。离太阳近的行星绕太阳运行的速度比离太阳远的行星要快, 以便产生更大的离心加速度(离心力)来平衡较大的太阳引力。但在星系中心, 虽然也集中了更多的恒星, 还有质量巨大的黑洞, 可是, 离星系中心近的恒星的运动速度, 并不比离得远的恒星的运动速度快。这说明星系的质量并不集中在星系中心, 在星系的外围区域一定有大量暗物质存在。现代天文学通过引力透镜、宇宙中大尺度结构形成、微波背景辐射等研究表明: 我们目前所认知的部分大概只占宇宙的 4%, 暗物质占了宇宙的 23%, 还有 73%, 是一种导致宇宙加速膨胀的暗能量。暗物质的存在, 可以解决大爆炸理论中的不自洽性, 对结构形成也非常关键。

宇宙学研究发现, 在宇宙大爆炸初期产生的各种基本粒子中, 有一种叫作“中微子”的粒子不参与形成物质的核反应, 也基本不与其他物质作用, 它们一直散布在太空中, 是暗物质的主要“嫌疑人”。但中微子的质量很小。这样, 即使太空是中微子的海洋, 与暗物质的质量和引力还差得很远。曾有人设

想存在一种“类中微子”，它的性质与中微子类似，但有质量。可是一直没有发现“类中微子”的存在。极轻的中微子运动速度极高，几乎可自由穿透任何物质，甚至整个地球，很难被捕捉到。然而在超对称理论中，如果 R 宇称（超对称理论中为保证重子数和轻子数守恒而引入的一个宇称）守恒，最轻的超对称粒子是稳定的而且是中性的，不参与电磁相互作用，只参与弱作用和引力作用，它的质量可以很大，是星系团之间广大宇宙空间中冷的暗物质的非常好的候选者。可见，通过大型强子对撞机 LHC 上超对称粒子的寻找，可首次在对撞机实验中搜寻谜一样的暗物质。

## 5. 大型强子对撞机

大型强子对撞机（LHC，图 4）是当今世界上能量最高的对撞机，其首要物理目标是寻找希格斯粒子和超出标准模型的新粒子和新物理现象，探索更完善的粒子物理理论，是人类深入认识微观世界规律最前沿的国际超大型物理实验。LHC 包含了一个圆周长为 27 千米的圆形隧道，隧道贯穿瑞士与法国边境，总投资 40 亿美元。加速器通道中，主要是放置两个质子束管。加速管由超导磁铁所包覆，以液态氦来冷却。管中的质子是以相反的方向，环绕着整个环型加速器运行。两个对撞加速管中的质子，各具有的能量为 7 TeV（兆兆电子伏特），总撞击能量达 14 TeV。现阶段总撞击能量为 8 TeV，碰撞周期为 50 ns，预计 2015 年提升到设计



图 4 LHC 和 4 个探测器的地理位置示意图

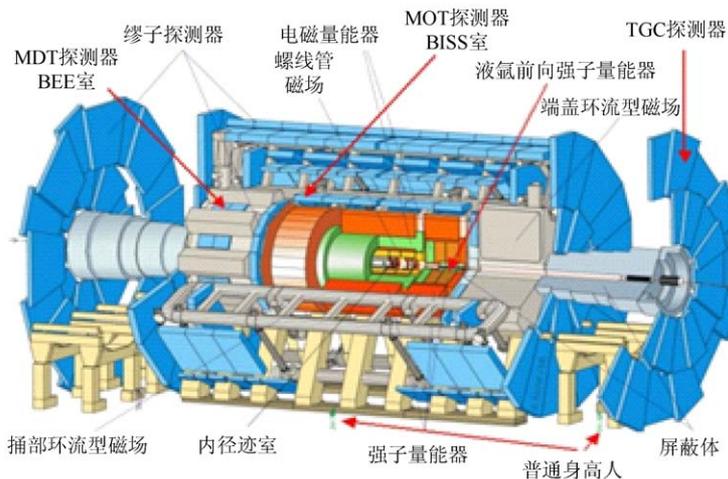


图 5 ATLAS 探测器的结构图

目标。CMS 和 ATLAS（图 5）是 LHC 的两个大型通用粒子探测器，是迄今为止最重（CMS）的和最大（ATLAS）的高能物理实验探测器。它们的设计、建造、运行和物理分析都是国际合作的结晶。每个实验都包含来自全球三十多个国家的超过三千名研究人员。

## 6. ATLAS 实验中超对称粒子的寻找

前面提到大型强子对撞机 LHC 是质子-质子对撞机，而质子是由夸克组成的，夸克之间的相

互作用是强相互作用，是由胶子来传递的。因而 LHC 的质子-质子对撞实际上是部分子之间的对撞（夸克和胶子统称为部分子），而且被撞上的只是其中的一些部分子，其他的部分子碎裂成强子，保持其母粒子的运动方向，顺着束流管道跑掉了。两个对撞的部分子发生相互作用，其末态粒子将偏离束流管方向，从而被探测器探测到。一般来说，偏离的越大越容易探测。绝大多数的末态粒子还是胶子和夸克，它们是不自由的，离开对撞点之前就碎裂成大量强子，形成喷

注，有的末态是轻子（如电子， $\mu$ 子或 $\tau$ ）加喷注，有的末态是光子，或者是 $Z^0$ ，或者 $W^+$ （ $W^-$ ）加喷注。在高能物理中，像喷注中的强子（ $\mu$ ， $k$ 等）、光子、电子、 $\mu$ 子都是长寿命粒子，而像 $Z^0$ 、 $W^\pm$ 和 $\tau$ 都是短寿命粒子，在没离开束流管就已经衰变掉了，在探测器中是探测不到的。短寿命粒子最后都衰变成长寿命粒子，飞出束流管，从而被探测器捕捉到。因而，我们对探测器的基本要求是能很好地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中微子，但由于是中性的，几乎不与物质发生相互作用，因而在探测器中无法被探测到。但我们可以用动量守恒原理来确定动量丢失，要求 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的动量之和为0，因为两质子对撞，初始的总动量为0，不为0的部分就是动量丢失。但由于沿着束流管方向跑掉的部分无法探测，我们将这个方向设为 $z$ ，我们可以探测的是 $x$ 和 $y$ 方向的动量丢失，这两个方向的矢量和叫作横动量丢失，在超对称粒子的寻找中是一个非常重要的物理变量。

在希腊神话中，ATLAS是希腊神话中的大力神，因支持巨人族首领泰坦反对主神宙斯，被罚作苦役，用头和肩将天撑起。对于LHC来说，ATLAS（A Toroidal LHC ApparatuS，超环面仪器）探测器承担着繁重的物理研究任务，期望它像巨人一样力大无比，并能给科学家带来好运。ATLAS探测器。总体上看是一个圆柱体，长46m，

高25m，宽25m，重7000t，是迄今为止最庞大的探测器。ATLAS安装了两种类型的磁体，即围绕内探测器的场强为2T的内超导螺旋磁体以及在量能器外设置的超导空气芯回旋磁体。内部超导螺线管配合内探测器作径迹测量，装在一个长6.8m、直径2.3m的圆筒中。外部磁体的长度达26m，外径将近20m。ATLAS采用了许多径迹探测新技术，如内部高分辨硅颗粒和硅微条探测器，还有离束流管远一点的具有探测穿越辐射能力的稻草管（straw-tubes）探测器。这样的组合保证了内径迹室在模式识别、动量和顶点测量以及提高电子识别方面的高水平。 $\mu$ 子谱仪在ATLAS的最外层，位于量能器外面的空气芯回旋磁体系统采用一个轻的开放式结构，该系统产生非常大的空间磁场和很强的弯曲力，并保持了最小的多次散射，对 $\mu$ 子有非常好的探测辨别能力。

图6是R宇称守恒下质子-质子对撞后超对称粒子成对产生（超夸克 $\tilde{q}$ 和gluino $\tilde{g}$ 对产生为例）然后经过一系列衰变的示意图。举例来说，gluino衰变为一个左手超夸克 $\tilde{q}_L$ 并放射出一个大横动量的

喷注，然后超夸克继续衰变为较轻的neutralino（ $\tilde{\chi}_2^0$ ）并发射出一个喷注， $\tilde{\chi}_2^0$ 不稳定，会继续衰变为右手的超轻子（ $\tilde{l}_R$ ）和一个轻子，然后右手超轻子继续衰变为最轻的neutralino（ $\tilde{\chi}_1^0$ ）和一个轻子。最轻的超对称粒子 $\tilde{\chi}_1^0$ 是中性的，特性类似中微子，无法用探测器捕捉它，不过不同的是neutralino有质量，在探测器中表现出来的是有大的横能量丢失（Missing Transverse Energy，简称MET），它是冷暗物质非常好的候选者。我们看到衰变的末态产物包含大量的高能量的喷注，有大的横能量丢失，可能会包含一个或多个轻子，所以超对称粒子和标准模型粒子最大的差别是超对称粒子衰变末态包含很大的横能量丢失MET，因而MET是寻找R宇称守恒下超对称粒子的非常有一个武器（物理变量）。另外一个与超对称粒子质量密切相关的变量是有效质量（Effective Mass，简称Meff），它是MET和衰变末态中包含的喷注及轻子的横动量的标量之和。MET和Meff是寻找超对称粒子的两把金钥匙，也是寻找暗物质的法宝。图7是

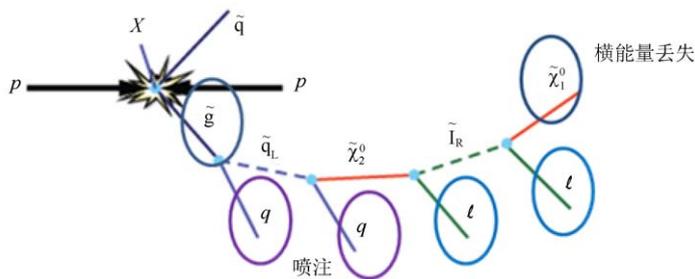


图6 LHC实验中质子-质子对撞后超对称粒子成对产生及衰变过程的示意图

$M_{\text{eff}}$  的分布图，其中黄绿色的是本底（本底是相对信号超对称粒子而言的，超对称粒子以外的所有贡献统称为本底）的  $M_{\text{eff}}$  分布，红色的是模拟的信号（超对称粒子）的  $M_{\text{eff}}$  的分布。我们看到在  $M_{\text{eff}}$  比较高的区域有非常好的信噪比（信号与本底之比）。信噪比越大，说明发现信号的可能性越大，如果统计显著性高于  $5\sigma$ （即可信概率为 99.99994%，说明信号与本底有 5 倍标准偏差的偏离），说明我们发现了新的物理。因而，如果在 ATLAS 探测器获取的数据中在 MET 或  $M_{\text{eff}}$  的分布中发现了超出标准模型本底的贡献，说明我们发现了超出标准模型的新的物理现象，很有可能就是超对称物理或其他新的物理。LHC 实验就是通过寻找与标准模型不一致的贡献来寻找超对称物理等新物理的。

## 7. 在 LHC 上寻找超对称粒子的进展

ATLAS 实验从 2010 年开始取数到 2012 年底已经获取了  $5 \text{ fb}^{-1}$  的 7 TeV 的数据和  $21 \text{ fb}^{-1}$  的 8 TeV 的数据，目前为止，我们已经分析了前  $2 \sim 13 \text{ fb}^{-1}$ （每个衰变道所用数据的统计量不同）的数据。所有数据的分析结果将于 2013 ~ 2014 年完成。我们尽可能地考虑了几乎所有的 R 宇称守恒下 SUSY 产生及衰变模式，根据末态轻子数的不同分为不同的衰变道，并根据 SUSY 衰变拓扑结构（topology）的不同，对每一衰变道都划分了不

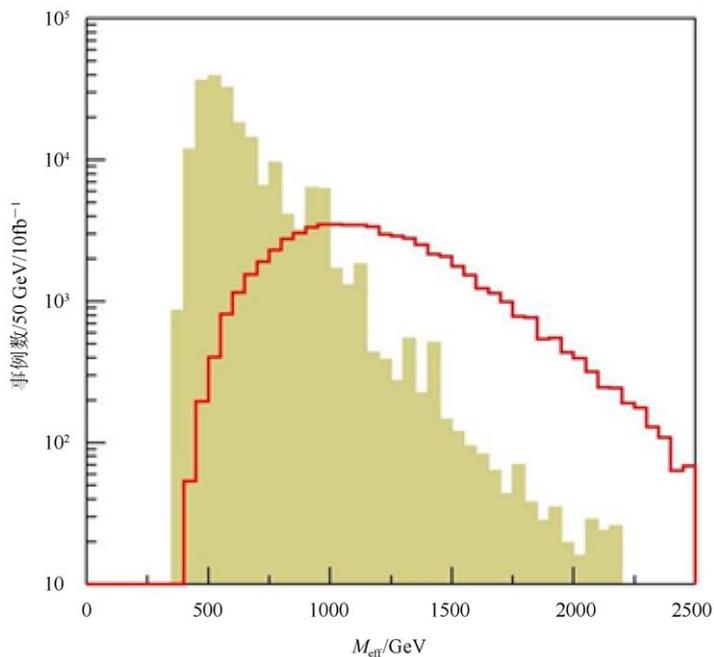


图 7 绿色部分是标准模型的本底过程，红色直方图是模拟的 SUSY 粒子的分布

同的信号区，并本着信号区的划分不依赖任何的理论模型，而且尽可能的覆盖绝大多数的 SUSY 质量参数空间的原则。而且，我们也研究了 R 宇称不守恒的情况。简单的说，LHC 的 SUSY 研究人员已撒了一张庞大的网，去捞 SUSY 这条大鱼。这张网已撒到了鱼儿能到的几乎所有的角落，不让鱼儿有机可乘。然而，就目前  $2 \sim 13 \text{ fb}^{-1}$  的数据研究结果来看，无论怎么看，我们都没有看到不同于标准模型的地方。我们给出了不同超对称粒子已排除的质量下限，见图 8。图中列出了 ATLAS 实验公开发表的所有衰变道的分析结果，左边列出了每一个分析的名称，图中列出了该分析给出的相应超对称粒子的质量下限，其中蓝色部分表示该分析只用了 2011 年取得的 7 TeV 的数据，绿色部分表示用的是 2012 年的 8 TeV 的数据，未来两年会全部完成所有

数据的分析。就目前研究来看，第一代和第二代的超夸克和 gluino 如果质量差不多的话，其质量不会低于 1.5 TeV，第三代超下夸克  $\tilde{b}$  的质量也不会低于  $400 \sim 600 \text{ GeV}$ ，第三代超上夸克  $\tilde{t}$  的质量不会低于  $200 \sim 500 \text{ GeV}$ 。第一代和第二代超轻子（ $\tilde{e}$  和  $\tilde{\mu}$ ）的质量不会低于  $100 \sim 700 \text{ GeV}$ ，第三代超轻子（ $\tilde{\tau}$ ）的质量不会低于  $300 \text{ GeV}$ 。最轻的 chargino（ $\tilde{\chi}_1^+$ ）的质量不会低于  $200 \sim 700 \text{ GeV}$ 。我们期待用所有的数据研究会有一些突破。

## 8. 结果与展望

2015 年对撞机的能量将升级到设计能量 14 TeV，那将是前所未有的高能量，我们或许将发现超对称粒子或其他新物理，或者排除掉更宽的可能质量范围。如果人类

ATLAS SUSY研究-95%置信水平下的质量下限 (2012年12月更新)

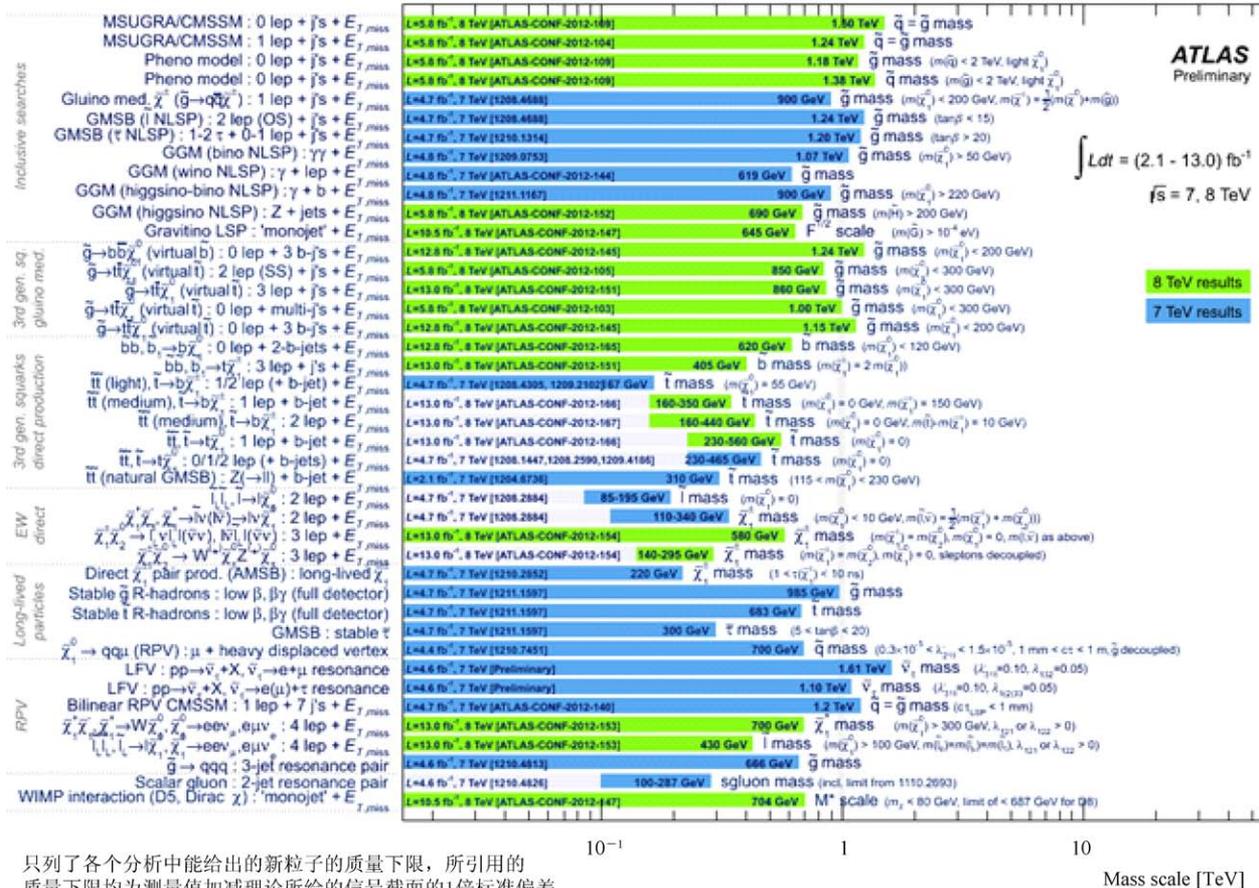


图 8 不同超对称粒子的质量下限

能够发现标准模型里没有的粒子，那将真正是具有改变自然科学世界观的重大突破。发现标准模型里没有的粒子，将完全改变理论物理学家看待自然世界的方式。但如果对撞机没能找到超对称粒子或其他新物理，那些完美的理论就会逐渐凋零，这不单是对超对称的打击，也是对更有野心的以超对称为基础的物理学统一理论的打击。这包括超弦理论，以及其他一些途径。然而LHC物理学者对这种不确定性泰然处之，他们希望对撞机找到激动

人心的新物理——不是理论学者期望的物理。对实验物理学者来说，最有趣的是我们也许会看到没人想

到过的可能性，那将是非常激动人心的。(中国科学院高能物理研究所100049)



### 作者简介

庄霄爱，副研究员。1977年4月出生，山东沂水人。2006年在中国科学院高能物理研究所获博士学位。2006至2012年在德国做超对称物理寻找的一线研究。现负责高能所ATLAS实验中超对称物理的研究。