

对撞机上寻找暗物质

毕效军^{1,†} 殷鹏飞¹ 周宁²

(1 中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

(2 清华大学物理系 北京 100084)

2015-09-28收到

† email: bixj@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151102

Looking for dark matter in colliders

BI Xiao-Jun^{1,†} YIN Peng-Fei¹ ZHOU Ning²

(1 Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 大量的天文观测证实宇宙中存在暗物质。根据观测对暗物质性质的约束,目前最受关注的暗物质模型是弱作用重粒子模型。现在的暗物质探测实验也主要围绕这类暗物质粒子展开。文章介绍了探测弱作用重粒子的三种主要探测方法和各自的优缺点,特别介绍了在对撞机上探测暗物质的方法,并详细介绍了在大型强子对撞机(LHC)上寻找暗物质的最新结果及对暗物质粒子性质的最新限制。

关键词 暗物质, 实验探测, 对撞机, 大型强子对撞机(LHC)

Abstract Many astronomical observations have confirmed the existence of dark matter in the universe. According to the constraints on the properties of dark matter, the most attractive candidate is the "weakly interacting massive particles (WIMPs)", and most experiments looking for dark matter are trying to find the signals of WIMPs. In this paper we describe the three main methods to detect WIMPs and their respective merits and demerits; the emphasis is on colliders and in particular the Large Hadron Collider (LHC). The latest observations and most recently defined constraints on the properties of dark matter based on the LHC results are described in detail.

Keywords dark matter, detection, collider, large hadron collider(LHC)

早在上世纪30年代,瑞士天文学家Fritz Zwicky在观测后发星系团(coma cluster)的时候,发现其中的星系运行速度过大,仅靠发光物质的引力无法维持整个系统的稳定,因此他提出在星系团中应当还存在某种不发光的物质,即暗物质(dark matter, DM)^[1]。这一发现揭开了人类对暗物质认识和研究的序幕。今天,天文学家有更多、更精密的方法测量星系团的质量,都发现星系团的总质量远远大于发光物质的质量。上个世

纪70年代,天文学家对许多涡旋星系的旋转速度进行了精确测量,同样发现星系的旋转速度无法和发光物质的引力自洽,必须引入不发光的物质才能解释观测数据^[2-5]。

今天对宇宙中暗物质最精确的测量来自对宇宙微波背景的观测,最新的Planck卫星观测结果显示我们的宇宙中约5%的质量来自于可见物质(主要为重子物质),而约27%的质量来自于暗物质,剩下的来自于暗能量^[6]。

1 暗物质的性质

虽然已经有大量天文观测表明宇宙中存在暗物质，但是我们对暗物质粒子本身的属性仍然知之甚少。根据已有的观测，我们目前所知的暗物质主要性质有：(1)暗物质粒子必须在大尺度上体现为电中性和色中性，和通常重子物质的相互作用较弱；(2)暗物质粒子必须在宇宙年龄范围内是稳定粒子；(3)暗物质构成了大约27%的宇宙质量；(4)暗物质在大型天体结构形成中起着引力种子的作用，在这个过程中它们必须成团，而不能扩散开。

从微观的角度来看，上世纪中叶建立起来的粒子物理标准模型取得了巨大的成功，得到了大量实验观测的证实。在所有标准模型粒子中(包括我们已知的夸克、轻子、规范玻色子和希格斯粒子)，中微子看起来最像是暗物质粒子，因为它们是中性的粒子，和其他物质相互作用也很弱。然而中微子很轻，在宇宙中以光速运动，构成所谓的热暗物质，不能解释今天观测到的宇宙中的大尺度结构。要解释宇宙大尺度结构，要求暗物质的运行速度要远远小于光速，即所谓的冷暗物质。而且中微子的质量太小，远远不足以提供27%的宇宙质量。这表明标准模型无法解释宇宙暗物质的存在，一定存在着某种超出标准模型的新物理的粒子。正是因为这个原因，暗物质研究不仅在天文学领域备受关注，同样也是粒子物理研究中非常前沿和热门的领域。

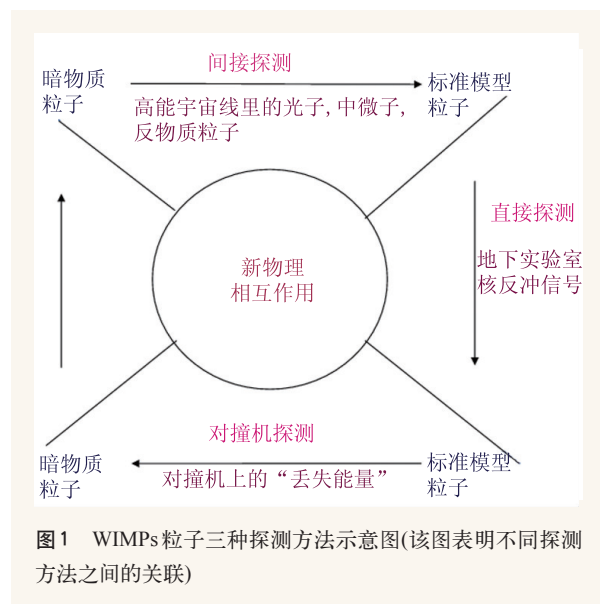
理论物理学家提出了大量的冷暗物质理论模型，其中最引人关注的是“弱作用重粒子”(weakly interacting massive particles, WIMPs)模型，这种暗物质粒子质量较大，与标准模型粒子之间存在弱作用量级的相互作用。由于暗物质粒子和标准模型粒子之间的相互作用，在宇宙的极早期的高温环境里，暗物质粒子和标准模型粒子可以相互转换从而达到热平衡的状态。当宇宙温度随着宇宙膨胀而不断降低的时候，热平衡最后被破坏，暗物质粒子从平衡态“解耦”出来，形成了今天的暗物质。这个过程可以用玻尔兹曼方程描述，并严格求解暗物质的“解耦”过程以得到暗物质的密度^[7]。如果暗物质粒子和标准模型粒子

间的作用在“弱作用”的量级，计算表明剩余的暗物质密度和今天的观测恰好是一致的，这正是为什么这个模型引人关注之处。理论上，许多新物理模型都预言了WIMPs粒子的存在，比如超对称模型里的最轻超对称伴子，额外维度模型里的最轻KK激发态粒子等等。

粒子物理的标准模型完美描述了今天的对撞机实验所描绘的物理现象，而暗物质则是在宇宙早期高温高密度的极端条件下产生的，由于今天的对撞机能量还不能达到这样的条件，因而我们还没有在实验室直接找到暗物质粒子。而宇宙中产生的暗物质粒子一般认为是新物理粒子中最轻的一个，因而可以稳定保留到今天。暗物质可以看作是连接新物理与标准模型的桥梁，也是连接微观世界和宇宙宏观世界的桥梁。对暗物质问题的研究是我们探索更深层次的基本粒子相互作用、寻找新物理信号的指路牌。

2 暗物质的探测方法

WIMPs粒子和标准模型粒子有弱作用量级的相互作用，当今的技术手段是可能探测到这样的粒子的，目前的大部分暗物质探测实验也是针对WIMPs暗物质的探测。通常可以把暗物质探测实验分为三大类：直接探测、间接探测和对撞机探测。这三类探测方式既互相独立，又互为补



充，它们之间的关系如图1所示。

图1中的箭头方向可以理解为时间方向。从左向右的箭头表示一对暗物质粒子湮灭到标准模型粒子的过程，形成宇宙线中的伽马射线、中微子、反物质等成分。今天这一过程仍然在各种大尺度天体结构(例如银河系中心、矮星系、星系团等)中发生。由于暗物质粒子很重，湮灭产生的伽马光子、中微子，以及反物质粒子可能具有很高的能量，因而这些粒子可能被各种高能宇宙线实验所探测，这类实验被称为暗物质的间接探测。

图1中箭头为上下方向时，表示暗物质粒子和标准模型粒子的散射过程。通过暗物质粒子和探测器散射所产生的信号探测暗物质的实验称为暗物质的直接探测实验。这类实验要设置在很深的地下或山体中，以屏蔽来自于宇宙线粒子撞击靶核的干扰。

图1中箭头从右向左表示标准模型粒子碰撞产生暗物质粒子的过程。在大型对撞机上通过加速质子或者正负电子，可使其达到很高的能量并发生对撞，从而可以模拟宇宙早期的状态，如果能量足够高，就可能产生出暗物质粒子。暗物质粒子的特别之处在于它和普通物质的相互作用很微弱，即使产生出来也将迅速逃离出探测器而不产生任何的信号，这一点和中微子非常相像。由于暗物质会带走一定的能量和动量，因而在一个对撞事例中表现为存在“丢失”的能动量。实验学家通过观测其他和暗物质一起产生的粒子，来推算被暗物质带走“丢失的”能动量，并进一步确定暗物质粒子的性质。

3 暗物质不同探测方法的关联

上节介绍的三种探测方式相互补充，相互验证，在任何一种探测方式上发现暗物质 WIMPs 粒子的信号，原则上我们就可以期待在其他探测方式实验上也能看到信号。比如说，如果直接探测实验观测到暗物质碰撞原子核的信号，则这种暗物质和夸克或胶子有一定的相互作用，从而 Tevatron 或 LHC 这样的质子对撞机就可以产生出来这种暗物质。同样的，这种暗物质也可以湮灭产生

出夸克，从而给出间接探测信号。三种暗物质探测方式各有自己的优势和劣势，结合不同探测手段以得到一个统一的暗物质图像是非常重要的。三个实验方法最新的观测结果见文献[8]。

直接探测实验结果不仅取决于暗物质的粒子性质(即暗物质的质量和它与核子的散射截面)，还依赖于暗物质的天文性质，例如暗物质在银河系中的密度分布和速度分布。如果由于某种偶然的因素使得暗物质在太阳系附近的密度和预期的不同，那么暗物质直接探测信号也会不同于理论预期。此外不同的暗物质直接探测实验也是针对特定的暗物质粒子与标准模型粒子的相互作用形式设计的，在暗物质低速运动的情况下，这些相互作用形式分为与靶核的自旋无关和相关的两种情形。诸如闪烁体、低温高纯锗、两相液态惰性气体实验对自旋无关的相互作用有很强的探测能力，而气泡室实验更易于探测自旋相关相互作用。目前的直接探测实验对暗物质的自旋无关相互作用有非常强的探测能力，在几十 GeV 的质量区间，这是三种探测方式中灵敏度最高的。

相比于直接探测，对撞机探测不依赖于尚未完全确定的局域暗物质分布。而且在对撞机高能对撞中，暗物质产生截面对相互作用形式的依赖大大降低。我们将会看到不同的相互作用形式，它们在 LHC 上有着非常相近的产生率。另一方面，由于直接探测实验里自旋相关相互作用没有相干增强，通常给出的限制较弱。对撞机探测的结果通常对这类相互作用有更好的探测能力。此外，直接探测实验通常很难探测轻于 10 GeV 的暗物质粒子。而在对撞机上，轻暗物质粒子更容易产生，从而弥补直接探测无法触及的参数区间。

间接探测的优点是能够探测来自于远处的某个暗物质结构所产生的信号，而不仅仅局限在太阳系附近的暗物质产生的信号。另外，间接探测有大量的实验可以同时多个能量段对不同的宇宙线粒子进行探测，因此它能覆盖很大的暗物质质量区间，并且不同的观测之间可以互为检验。一般来说，暗物质湮灭信号非常依赖探测目标的暗物质密度分布形式。在星系靠近中心的区域，暗物质密度变得很大，能够产生很强的暗物质信

号。暗物质产生的带电反物质粒子在银河系中传播的时候会受到星系介质、磁场和辐射场的作用，因此失去了事例的方向性。中微子和光子信号可以直线传播，因而可以直接寻找其起源地。中微子信号由于较弱的相互作用而较难探测，因此往往需要极大的探测器(例如立方公里级别的IceCube探测器)。而当今的伽马射线探测器灵敏度非常高，是探测暗物质湮灭信号的主要探测方式。暗物质间接探测面临最大的问题是，它比直接探测更加敏感地依赖于暗物质的密度分布，因而有很大的不确定性。

相比于间接探测，对撞机探测的优点同样是不依赖于暗物质的天文分布，可以纯粹地测量暗物质的粒子性质。这里需要强调的是，在某些情形下，对撞机探测对间接探测的补充作用。暗物质的湮灭截面可能依赖于暗物质的相对速度，这意味着今天暗物质的运行速度很低，暗物质湮灭变得很弱，间接探测不能有效地探测这类暗物质相互作用。这种情形下，高能对撞机实验依然可以有效检验这种暗物质的相互作用。另外一种情形下，暗物质粒子的湮灭同样非常微弱，但在宇宙早期“解耦”过程中，通过和它质量接近的某种粒子进行所谓的“共湮灭”。在这种图像下，间接探测同样无法探测到湮灭信号。而在对撞机上，那种较重的粒子可能直接产生然后衰变到暗物质粒子，并检验这种“共湮灭”图像。

综上所述，暗物质对撞机探测可以对很多直接探测和间接探测的空白区域进行填补。当然对撞机探测也有自己的缺陷，例如对撞机上能够产生的暗物质粒子质量受限于对撞机的质心能。对撞机探测的优势在于它不受天文学因素的干扰，可以较为纯粹地测量暗物质粒子和其他中介粒子或者共湮灭粒子的信息。

4 对撞机上的新物理与暗物质探测

4.1 对撞机暗物质探测介绍

我们通过高能粒子的碰撞探索物质的基本属

性及其相互作用。在过去的许多年里，我们建造了一系列大型粒子对撞机，不断提高对撞能量，扩大探索能区。探寻暗物质^[9]是大型粒子对撞机实验的重要物理研究方向之一^[10, 11]。

一般来说对撞机上的暗物质有两种产生方式。第一种方式是，入射粒子产生一些其他较重的新粒子，这些新粒子是不稳定粒子，它们会衰变到轻的、稳定的暗物质粒子。新粒子产生和衰变的过程中伴随大量标准模型粒子的产生，因此信号包括了多种粒子。第二种是，入射粒子直接碰撞产生一对暗物质粒子。由于暗物质粒子迅速逃离探测器，实验上要求必须还有另外一个来自于初态辐射的高能粒子被观测到，通过能动量守恒可以推算出“丢失能量”，其反应机制见图2。

对撞机实验具有相对固定的对撞能量，在对撞能量范围内的暗物质都有很强的灵敏性，尤其是小质量的暗物质。并且，由于对撞机能够直接产生出暗物质，这对我们理解暗物质的粒子性质及其产生机制有很大帮助。一旦对撞机上发现新粒子的迹象，利用直接和间接探测去确认产生出来的新粒子就是宇宙中占很大比重的暗物质，则显得至关重要。在这里，我们着重讨论LHC质子对撞机上探测暗物质的情况。

LHC是位于欧洲核子中心(CERN)的大型质子质子对撞机，其具有目前世界上最高的对撞能量，达到14 TeV(1 TeV=10¹² eV)，并将在以后的20年内保持这个纪录。在这个我们从未探索过的高能量区域内，我们期待新物理寻找的突破。在LHC上，我们放置了4个大型探测器(ALICE, ATLAS, CMS和LHCb)，其中ATLAS和CMS是专注于广泛寻找新物理的两个实验。在LHC一期数据(7 TeV和8 TeV对撞能量)上，ATLAS和CMS系统地进行了暗物质寻找工作，发布了数十个分析结果，但是并没有发现暗物质的显著信号。近期开始的LHC二期数据(13 TeV对撞能量)上的暗物质寻找工作正在紧锣密鼓地进行。

为了寻找暗物质，我们首先需要知道暗物质是怎样从对撞机上产生出来的，这也反映了暗物质本身的物理性质。一般来说，对于暗物质产生

理论，我们可以分成以下三类：

第一类，有效场模型^[10, 11]。如果连接暗物质粒子和标准模型粒子的一个或者数个中间传播子超出了对撞机能量达到的范围，我们就可以利用有效场理论去近似描述这种产生机制，传播子可以是标量场、矢量场等。对于一个有效场理论，自由参数仅仅是暗物质的质量和有效场的能量标度参数。有效场模型的优点在于它的参数很少，可以利用实验数据有效限制模型参数。但是需要强调的是，有效场模型有其适用范围，即要求对撞能量不超过有效算符的能量标度，这在使用中需要慎重对待。

第二类，简化模型^[12]。如果中间传播子质量

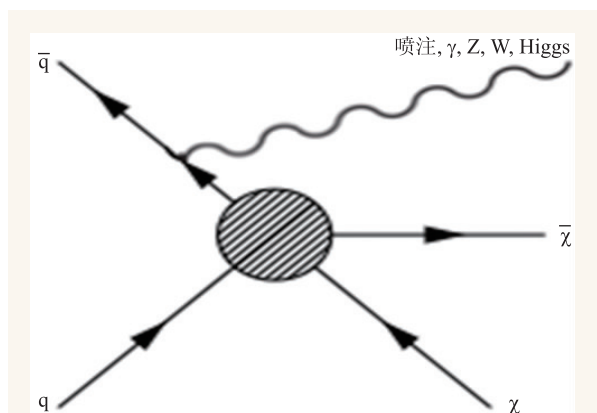


图2 对撞机上由夸克湮灭产生暗物质的费曼图(图中由初态夸克辐射出可见粒子有：喷注， γ 光子，Z玻色子，W玻色子，希格斯子(Higgs))

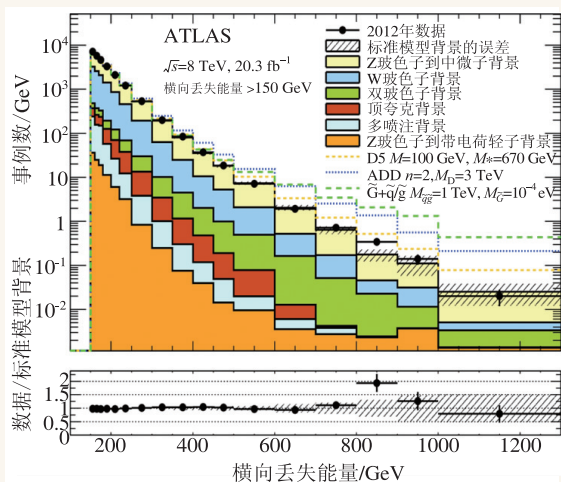


图3 ATLAS一期数据中单喷注反应道的横向丢失能量谱(实验数据(黑点)和标准模型背景没有显著偏差)

不是那么大，有效场理论就不是好的近似。于是，中间传播子的信息就不能忽略。相比于有效场模型，我们还需要考虑中间传播子的质量和标准模型以及暗物质耦合常数等参数。另外，中介粒子根据自旋可能是标量、矢量或者旋量，它们可能和光子、Z玻色子或者希格斯粒子相混合。

第三类，完备模型^[13]。完备模型的典型代表就是超对称理论模型。在超对称理论模型中，最轻的超对称粒子是很好的暗物质 WIMPs 粒子。这种暗物质粒子是对撞产生的超对称粒子级联衰变的最后产物。在暗物质产生的同时，一些标准模型粒子也同时被衰变产生出来。完备模型往往有很多自由参数，暗物质产生的情况因而更加复杂。

虽然简化模型和有效场模型可能忽略了深层次的物理规律，但是它们往往能够抓住事物的主要矛盾，“有效”描述暗物质在对撞机上的产生过程。这类唯象模型的好处在于它们的参数较少，易于从实验上对模型的参数区间进行较为详尽的探索。

在许多有效场模型和简化模型中，和暗物质粒子共同产生出来的标准模型粒子有可能来自于初始夸克或者胶子辐射，也有可能直接来自于中间传播子。一般来说，单个标准模型粒子由这样产生的几率很大。ATLAS的奇异物理组就重点寻找这种单个大动量标准模型粒子和暗物质粒子共同产生的过程。在超对称理论的完备模型中，由于暗物质是来自于超对称粒子的级联衰变，会有多个标准模型粒子同时产生。ATLAS的超对称物理组系统性地寻找各种超对称模型反应过程。由于超对称模型的复杂性和本文的篇幅限制，这里主要讨论单个大动量标准模型粒子和暗物质粒子的产生过程。

4.2 LHC探测暗物质的结果

LHC-ATLAS 实验组分别做了单喷注、单光子、单W玻色子、单Z玻色子，甚至是利用最近发现的希格斯子的单希格斯子等一系列最终态的

寻找工作。不同的最终态对于暗物质模型的寻找都有其独特的灵敏度，下面我们分别来展开讨论。

如果暗物质和夸克或者胶子有直接的耦合，在产生暗物质的同时，从初态辐射出来最多的成分就是胶子，从而形成单喷注最终态(见图2)。因此，在LHC上，从单喷注最终态寻找暗物质就是一个自然的选择^[14]。暗物质的信号反映在丢失横向能量谱上的反常超出^[15]。这个反应道对众多暗物质有效场模型和简化模型具有极强的灵敏度(见图3)。

为了压低本底并减少事例采集率，实验仅采集横向丢失能量超过80 GeV的事例。为了进一步降低本底，需要分析这些事例并作进一步筛选，只有那些拥有不超过两个喷注并不含有电子、缪子的事例才能保留。在这样的选择下，主要的标准模型背景来自于Z玻色子和喷注共同产生过程并且Z玻色子要衰变成中微子。这种背景事例和信号难以区分，实验可以通过测量Z玻色子衰变到电子或者缪子的事例数来估算Z玻色子衰变到中微子的贡献。

从目前发表的ATLAS单喷注的结果看，LHC一期数据上并没有发现显著的信号，于是对暗物质性质给出了限制(见图4)。比如对于矢量有效场模型，在暗物质质量小于几百GeV的情况下，实验基本上排除了有效场能量尺度低于1 TeV的参数空间。随着暗物质质量的增大，对撞机产生暗物质粒子则变得越来越困难，实验能够排除的参

数空间也相应变小。对撞机对暗物质性质的限制可以和直接探测对比并互相补充。

和直接探测实验相比，对撞机实验对于小质量暗物质有特别的灵敏度，和直接探测形成很好的互补(见图5)。在与核自旋无关的碰撞过程中，对撞机实验给出的限制达到了 10^{-40} cm^2 (夸克耦合矢量有效场模型)，甚至是 10^{-45} cm^2 (胶子耦合有效场模型)。由于质子对撞产生暗物质对核自旋不敏感，对撞机实验在整体上超越了直接探测实验对与自旋相关的暗物质和原子核碰撞截面的限制，基本上达到了 10^{-41} cm^2 (夸克耦合轴矢量有效场模型)和 10^{-42} cm^2 (夸克耦合张量有效

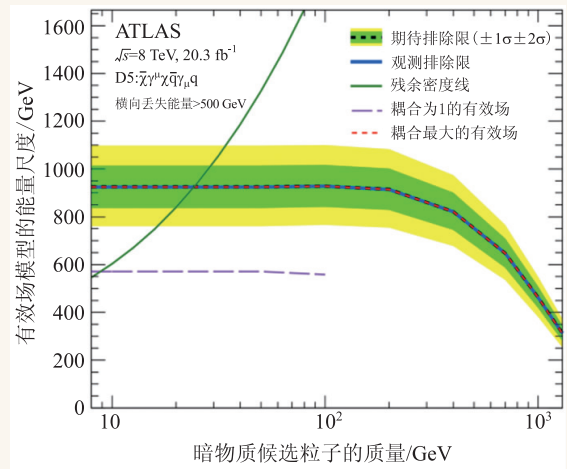


图4 从单喷注反应道分析结果给出的有效场模型的排除限(实验排除了能量尺度低的区域)

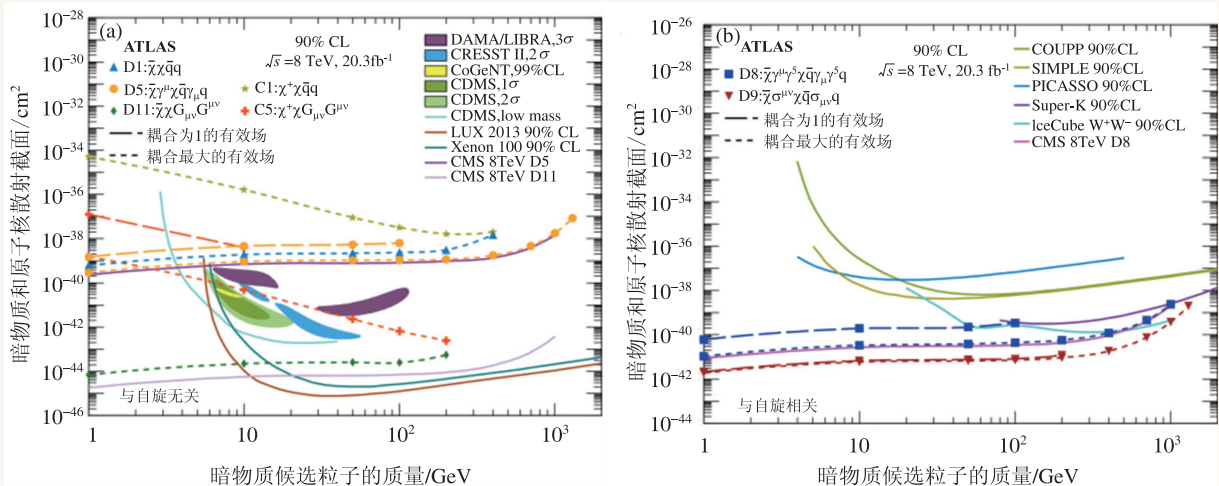


图5 单喷注反应道分析结果给出的暗物质和原子核散射截面的排除限(这里采用的是有效场暗物质模型) (a)与核自旋无关的散射模型; (b)与核自旋相关的散射模型

场模型)。

对撞机的结果同样可以和间接探测实验的结果对比并相互补充(见图6)。

LHC的初始夸克同样可以辐射出光子、W玻色子、Z玻色子等标准模型粒子,但是由于这些玻色子辐射是电弱相互作用过程,其产生截面相

比于单喷注反应道下降了一个数量级甚至更多。因此,这些反应道对于暗物质和夸克直接耦合的模型不如单喷注反应道敏感,可以起到补充验证的作用。比如人们在暗物质间接探测实验Fermi-LAT上发现银河系中心有130 GeV的伽马射线信号,可以用130 GeV的暗物质粒子湮灭成光子的模型解释。如果这个信号真实的话,我们在对撞机实验上也可以产生这样的暗物质和光子直接耦合过程(见图7)。通过单光子反应道,我们可以寻找这样的信号。经过对LHC上一期数据的单光子反应道的分析^[16],我们同样也没有找到显著的信号,最后给出暗物质和光子直接耦合的排除限。

在质子对撞机上,单W玻色子和暗物质共同产生的过程有一个特别的地方。由于W玻色子的产生过程涉及到夸克味道的改变,对于同一个初、末态,反应中既存在暗物质和上夸克耦合的过程也存在暗物质和下夸克耦合的过程,这两个过程存在干涉效应(见图8)。于是通过单W玻色子反应道的研究分析^[17],我们可以研究暗物质和夸克不同味之间耦合的差异^[18]。如果暗物质和上下夸克的耦合正好反号,这个干涉效应会对反应截面有很大的增强,并且大大提高出射W玻色子的动量,从而使得这个反应道具有更强的信号灵敏度。分析结果给出的矢量有效场模型下,暗物质和原子核碰撞截面的排除限接近了 10^{-42}cm^2 。而单W玻色子反应道同样可以对暗物质和W玻色子直接耦合的模型给出限制。希格斯子引导的暗物质模型就是这样一个模型,暗物质和标准模型粒子的相互作用是通过希格斯子传播的(见图9)。通过这个过程,我们可以给出希格斯子衰变到暗物质粒子的分支比的限制。但是由于背景控制的局限,单W玻色子过程对这个希格斯子引导的暗物质模型不是最灵敏的。

单Z玻色子分析^[19]利用了其双轻子衰变具有很好的能量分辨率和Z玻色子的重建效率,提高了对希格斯粒子衰变到暗物质分支比的排除限。这种希格斯子引导的暗物质模型同样可以给出暗物质直接探测信号,于是可以将这个实验结果转

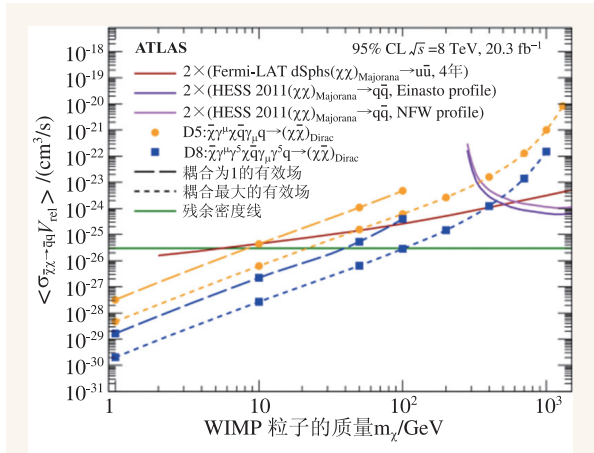


图6 单喷注反应道给出的暗物质湮灭产生夸克的排除限(横坐标是暗物质候选粒子的质量,纵坐标是暗物质湮灭界面,图中各线是各个实验室给出的排除线)

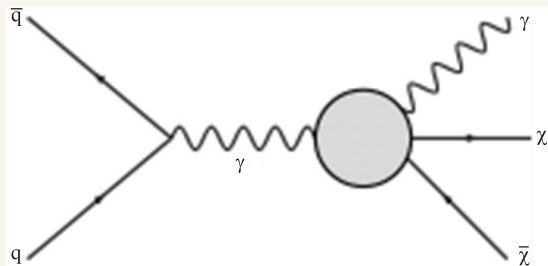


图7 暗物质和光子直接耦合给出的单光子反应道费曼图

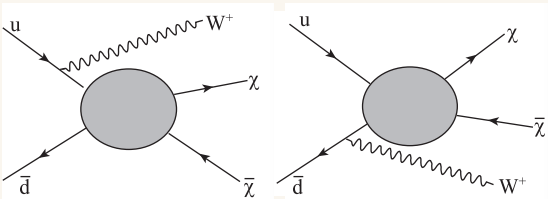


图8 暗物质和W玻色子共同产生的费曼图

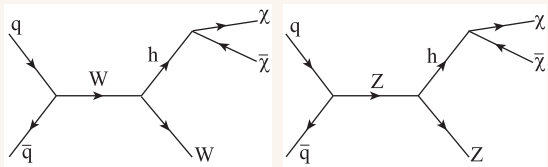


图9 希格斯子引导的暗物质模型给出的单W玻色子和单Z玻色子反应道费曼图

化为暗物质和原子核碰撞截面的限制(见图 10)。由于希格斯质量的限制,对撞机实验仅对暗物质质量低于希格斯质量的一半有灵敏度。而且碰撞截面的限制对暗物质的自旋有很强的依赖。对于矢量暗物质,碰撞截面的限制甚至可以达到 10^{-49}cm^2 。这对于我们探索暗物质的物理特性有重要意义。

希格斯粒子的发现,给我们探索新物理提供了一个新的窗口。除了上面提到的希格斯引导的暗物质,我们还可以寻找暗物质和希格斯粒子共同产生的过程^[20]。希格斯粒子的重建可以通过光子或者重味 b-喷注。目前 ATLAS 实验组发布了通过双光子态重建希格斯粒子寻找暗物质的信息,并对一系列暗物质模型给出了排除限。

以上是在对撞机实验上寻找暗物质的实验工作的介绍。在暗物质物理性质仍然不明的今天,我们通过一系列的反应道,全面地

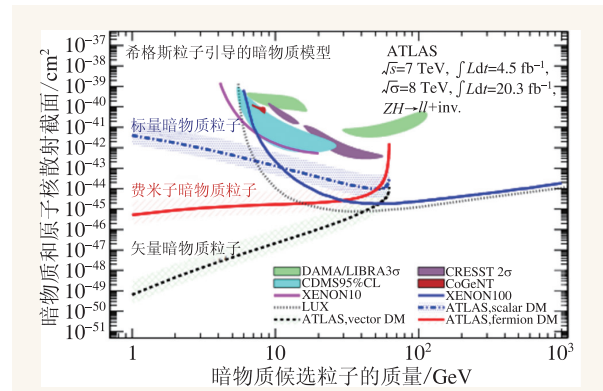


图 10 通过单 Z 玻色子反应道给出的暗物质和原子核散射截面的排除限(这里采用的是希格斯子引导的暗物质模型)

展开 LHC 上对暗物质的寻找工作。在 LHC 二期实验上,对撞机的质心能被提高到 13 TeV,对暗物质的搜寻范围会进一步扩大,暗物质寻找工作目前正在如火如荼地进行,让我们拭目以待新的发现。

参考文献

- [1] Zwicky F. *Helv. Phys. Acta.*, 1933, 6: 110
- [2] Roberts M S, Rots A H. *Astron. Astrophys.*, 1973, 26: 483
- [3] Ostriker J P, Peebles P J E, Yahil A. *Astrophys. J.*, 1974, 193: 1
- [4] Einasto J, Kaasik A, Saar E. *Nature*, 1974, 250: 309
- [5] Rubin V C, Ford W K Jr. *Astrophys. J.*, 1978, 225: 107
- [6] Planck Collaboration. *arXiv: 1502.01589*
- [7] Kolb E W, Turner M. *The Early Universe*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- [8] Bi X J, Yin P F, Yuan Q. *Front. Phys.*, 2013, 8(6): 794
- [9] Bertone G *et al.* *Phys. Rept.*, 2005, 405: 279
- [10] Goodman J, Ibe M, Rajaraman A *et al.* *Phys. Rev. D*, 2010, 82: 116010
- [11] Bai Y, Fox P J, Harnik R. *JHEP*, 2010, 1012: 048
- [12] Alwall J, Schuster P, Toro N. *Phys. Rev. D*, 2009: 79: 075020
- [13] Chung D J H, Everett L L, Kane G L *et al.* *Phys. Rept.*, 2005, 407: 1
- [14] ATLAS Collaboration. *EPJC*, 2015, 75: 299
- [15] Fox P J, Harnik R, Kopp J *et al.* *Phys. Rev. D*, 2012, 85: 056011
- [16] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2015, 91: 012008
- [17] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 041802
- [18] Feng J L, Kumar J, Marfatia D *et al.* *Phys. Lett. B*, 2011, 703: 124
- [19] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2014, 90: 012004
- [20] ATLAS Collaboration. Search for dark matter in events with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying to two photons in pp collisions at $\sqrt{s}=8\text{TeV}$ with the ATLAS detector, submitted to PRL, 1506.01081