

暗物质间接探测和对撞机探测实验现状*

姚道新¹, 余钊焕^{1,2}, 蔡成丰¹, 王青³, 张宏浩¹, 方锡岩¹

(1. 中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 清华大学物理系, 北京 100084)

摘要: 综述了暗物质间接探测和对撞机探测实验的现状和最新进展, 并对现有主要实验的最新结果和限制进行了归纳总结。自 2008 年以来, 宇宙线正负电子谱的反常超出被多个实验组相继报道出来。尽管存在一些争议, 暗物质效应是这些超出现象的一种自然解释。另一方面, 反质子-质子比和 γ 射线观测结果均未呈现反常信号, 这为暗物质的性质给出很强的限制。此外, 也可以通过对撞机探测实验上的零信号来限制暗物质性质。在不久的将来, AMS-02 和 LHC 的新数据可能会为暗物质研究提供新的启示。

关键词: 暗物质; 间接探测; 对撞机探测; 弱相互作用大质量粒子

中图分类号: O572.2 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2012) 04-0001-07

Status of Dark Matter Indirect Detection and Collider Detection Experiments

YAO Daoxin¹, YU Zhaohuan^{1,2}, CAI Chengfeng¹, WANG Qing³, ZHANG Honghao¹, FANG Xiyan¹

(1. School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The current status and recent progress of dark matter indirect detection and collider detection experiments are briefly reviewed. The main results and constraints of new experiments are shown. Since 2008, anomalous excesses of cosmic-ray electron and positron spectra have been reported by several experiment collaborations. Despite of some arguments, these excesses can be explained naturally by dark matter effect. On the other hand, both antiproton to proton ratio and gamma-ray results show no anomalous signal and give strong constraints on dark matter. Additionally, constraints on dark matter can be derived from the zero signals from collider detection experiments. In the near future, new results of AMS-02 and LHC may give us some inspirations for dark matter researches.

Key words: dark matter; indirect detection; collider detection; weakly interacting massive particle

暗物质的概念最早由 Zwicky^[1]于 1933 年提出, 用以解释 Coma 星系团中“遗失的质量”。后来, 越来越多的观测证据, 如星系团中成员星系的速度弥散分布、旋涡星系的旋转曲线、引力透镜、宇宙

微波背景各向异性等, 都无可争议地表明了暗物质的存在^[2-4]。这些证据的共同点是, 单靠能观测到和推断出的发光物质的质量所提供的引力效应, 远不足以解释各种观测结果, 因而宇宙中必定存在着

* 收稿日期: 2012-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11005163, 11074310, 11075085); 教育部博士点专项基金资助项目 (200805581030, 20110002110010, 20110171110026); 高校基本科研业务费专项资助项目; 中山大学物理学基地资助项目; 中山大学教学改革资助项目

作者简介: 姚道新 (1973 年生), 男, 教授, 博士生导师; 通讯作者: 余钊焕, 张宏浩; E-mail: zhh98@mail.sysu.edu.cn

一些不发光的物质 (暗物质)。此外,宇宙的结构形成理论也从理论上要求有暗物质的存在。按标准宇宙学模型 Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter, 带宇宙学常数 Λ 的冷暗物质模型) 进行分析, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Wilkinson 微波各向异性探测器) 对宇宙微波背景 7 年的观测数据给出的各宇宙学密度参量为: 重子物质含量 $\Omega_{\text{baryon}} h^2 = 0.022 58^{+0.000 57}_{-0.000 56}$, 冷暗物质含量 $\Omega_{\text{CDM}} h^2 = 0.110 9 \pm 0.005 6$, 暗能量含量 $\Omega_{\Lambda} h^2 = 0.734 \pm 0.029$ [4]。暗物质的质量密度约为重子物质的 5 倍, 占总物质含量中的大多数。

迄今为止, 关于暗物质存在的有力证据均来自引力效应, 而对于它的粒子本质, 我们知道得比较少, 仅有如下几点。首先, 暗物质粒子必定具有质量, 否则就不会有这么大的引力效应; 其次, 不同于正常的发光物质, 它不会发光, 或者发出的光微弱到不能够被现有的仪器探测到, 因而通常认为它不能与别的粒子发生电磁相互作用; 再次, 从宇宙结构形成理论出发推知, 当暗物质脱耦时, 它应该是“冷”的 (非相对论性的), 即脱耦温度远小于暗物质粒子质量。

在目前理论研究中, 最有可能是暗物质粒子候选者的一类粒子被统称为 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle, 弱相互作用大质量粒子), 这类粒子很好地满足了上述几个要求, 并能得出符合 WMAP 观测结果的暗物质遗迹密度 [5-6]。在一些得到广泛讨论的新粒子物理模型中, 经常存在着能作为暗物质粒子候选者的 WIMP [5-6]。另一方面, 由于这些新物理模型通常是为了解决标准模型在弱作用能标上的疑难而提出的, 它们预言的新粒子的质量一般也比较接近弱作用能标, 正好处于目前正在运行的强子对撞机 LHC 的能力范围之内。经过 LHC 的稳定持续运行, 有可能在验证新物理模型的同时抓住暗物质粒子的线索。因此, 暗物质的对撞机探测问题在当前物理前沿研究中也是很值得讨论的。

除了对撞机探测之外, 暗物质的实验研究主要还包含两个方面, 直接探测和间接探测。直接探测实验的关键在于寻找 WIMP 与通常物质原子核散射事例的信号, 一般在地下实验室中进行。间接探测实验的关键在于寻找 WIMP 自湮灭 (或衰变) 过程中产生的产物粒子信号, 需要从这些产物粒子的分布状况反推出 WIMP 的物理性质。最有可能找到这类 WIMP 信号的区域是暗物质集中分布且与地球距离较近的各种天体, 包括银心、矮星系、银河系

暗物质晕及其子结构、近邻河外星系及星系团等。总的来说, 间接探测方法比较接近于天体物理研究方法, 是直接探测实验的一种重要的互补性研究方法。本文主要关注当前的暗物质间接探测和对撞机探测。近年来, 宇宙线和 γ 射线天文学的实验测量越来越精确, 有利于对反常信号的搜寻。另一方面, LHC 正在稳定运行之中, 积累的数据越来越多, 对新物理的研究有巨大的推动作用。

1 间接探测实验

如图 1 所示, 如果天体中的暗物质粒子湮灭或衰变, 很可能会产生一些粒子物理标准模型里面的粒子, 如正反夸克、正反轻子、 W^+ 和 Z^0 玻色子等等, 这些粒子中的不稳定粒子会很快衰变, 最终留下来的稳定粒子是正负电子、正反质子、光子、中微子等, 这些稳定粒子加入到宇宙线中, 可能会对宇宙线能谱产生可以察觉的影响。因此, 对宇宙线的探测, 特别是对在通常天体物理过程中产生较少的荷电反粒子、高能中微子和高能 γ 射线的探测, 可能让我们间接地找到暗物质的线索, 由此推断暗物质的粒子性质。

1.1 荷电宇宙线

在 2008 之前, 荷电宇宙线的实验观测精度不高 (特别是高能端的), 能谱误差很大, 致使宇宙线理论研究上的不确定度也很大。2008 年之后, 实验技术的发展极大地提高了观测数据的精度, 使宇宙线研究进入比较精确的阶段。卫星实验 PAMELA 测量了正电子分数 $e^+ / (e^+ + e^-)$ [7], 得出一个惊人的结果, 如图 2 所示, 图中实线为理论预期值 [8-10]。可以看到, PAMELA 的正电子分数在 10 到 100 GeV 能量范围内呈现出明显的反常超出现象, 不能为以前的理论所解释。在 2011 年发布的数据中, Fermi 卫星利用地磁场效应分别得出 20 至 200 GeV 能量区间内的正电子谱和电子谱, 从而第一次给出了能量在 100 GeV 以上的正电子分数能谱 (也标示在图 2 中), 结果与 PAMELA 观测到的数据基本一致, 并发现反常超出的能量范围至少可以延伸到 200 GeV [8]。此外, PAMELA 还测量了反质子与质子比例 \bar{p}/p 的能谱 [9], 该能谱却与理论预期符合得很好。

另外, ATIC、HESS 和 Fermi 相继发布了对正负电子总能谱 ($e^+ + e^-$) 的高精度测量数据 [11-14], 在能量 100 GeV 以上也都发现了明显的超出现象, 如图 3 所示, 实线是理论预期的能谱 [10]。ATIC 在 300 至 800 GeV 区间发现了一个明显的尖峰, 800

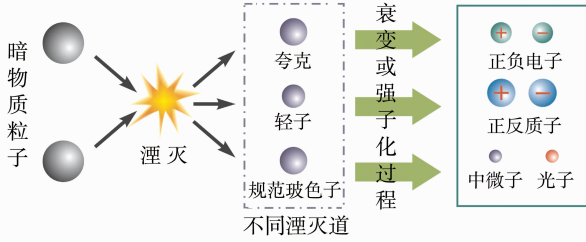


图 1 暗物质湮灭示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dark matter annihilation

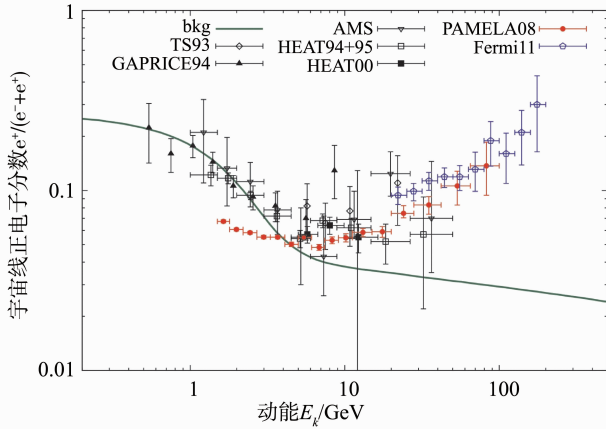


图 2 各实验组测得的宇宙线正电子分数 $e^+/(e^+ + e^-)$

Fig. 2 Cosmic ray positron fraction $e^+/(e^+ + e^-)$ measured by several experiments

GeV 之后能谱急速下降。Fermi 是空间探测器，实验误差比较小，它测得的能谱相对缺乏特征，在 20 至 1 000 GeV 的较宽能量范围内大致是一个 E^{-3} 幂律谱，在高端稍微变陡。在 ATIC 测到峰结构的地方，Fermi 的能谱与之出入较大。HESS 在 TeV 能量段观测到了与 ATIC 一样的能谱下降现象，而在 400 至 800 GeV 能量范围内的能谱介于 ATIC 和 Fermi 之间。

这些在宇宙线能谱上出现的反常超出现象引起了理论界的关注，出现了许多解释这些超出现象的理论，其中，就不乏以银河系晕中暗物质的湮灭或衰变来解释的理论（如文 [15 - 17]）。但以暗物质解释这些能谱也存在一些需要克服的问题。例如，若用暗物质湮灭来解释正负电子能谱上的超出，得出的湮灭截面将会是得出暗物质遗迹密度正确值相应截面的 10^2 至 10^4 倍，因而需要构造特殊的理论使得湮灭截面在宇宙演化过程中增大（如文 [18 - 19]）。再如，各实验在正负电子能谱上观测到了超出，但在反质子谱上却没有，如果要用暗物质湮灭来解释，需构建模型使得暗物质粒子在

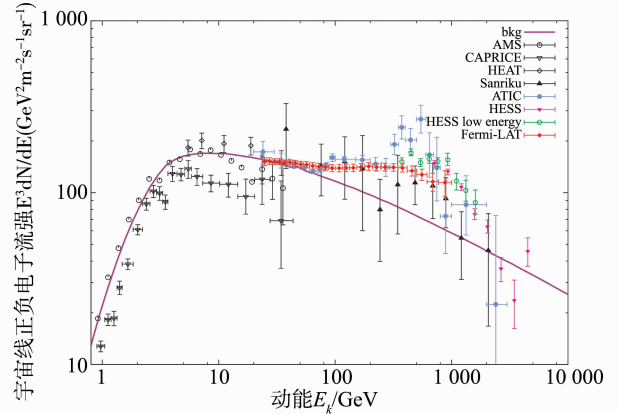


图 3 各实验组测得的宇宙线正负电子总流强 ($e^+ + e^-$)

Fig. 3 Cosmic ray electron/positron flux ($e^+ + e^-$) measured by several experiments

与轻子有耦合的同时不能与夸克有耦合^[20-21]。当然，暗物质并不是解释这些反常超出现象的唯一途径，比如，也可以用近邻脉冲星的效应来解释（如文 [22 - 23]）。

从另一个角度来看，可以用没有观测到超出信号的能谱来限制暗物质相互作用性质，这种做法会比用暗物质解释超出现象来得更可靠一些。例如，可以利用 PAMELA 测得的没有反常超出的反质子与质子比例 \bar{p}/p 能谱^[24]，来限制暗物质粒子的湮灭截面大小（如文 [25 - 26]）。图 4 展示用这一方法进行截面大小限制的原理^[25]。实线是未加暗物质的理论预期能谱，已经与实验数据符合得很好。虚线是暗物质湮灭的贡献，这里从模型无关的思路出发假设 WIMP 与标准模型费米子通过某些有效算符形式进行相互作用，图中所示的是 WIMP 质

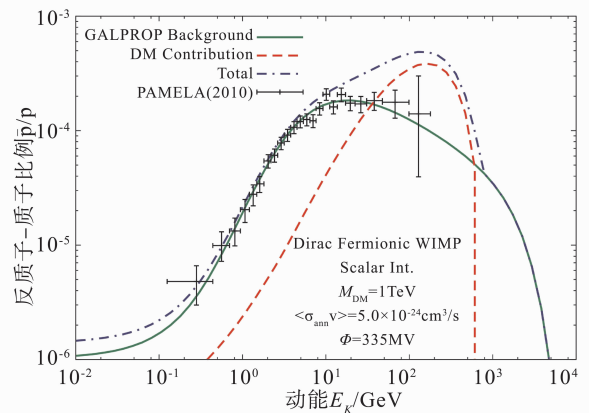


图 4 用 PAMELA 反质子与质子比例 \bar{p}/p 限制暗物质湮灭示意图

Fig. 4 Schematic diagram of constraining dark matter annihilation by PAMELA antiproton-proton ratio \bar{p}/p

量为 1 TeV、湮灭率为 $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = 5.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 时的结果。点划线是叠加出来的总能谱。可以看到, 在这些条件下总能谱与实验数据明显不符, 需要降低 $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle$ 的值, 也即把 $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle$ 限制到一定大小之下, 才不会违背实验结果。这样, 就可以对这些有效算符作用形式的耦合常数给出比较强的限制。一般说来, PAMELA 的 \bar{p}/p 能谱对质量小于 70 GeV 的 WIMP 粒子的限制可能会比直接探测实验强一些^[25-26]。

1.2 γ 射线

暗物质不能与光子有直接耦合, 但其湮灭或衰变所生成的带电粒子却能够有效地产生 γ 射线。由于在星际空间中广泛存在着电磁场, 带电宇宙线受电磁场影响, 运动轨迹变得很复杂, 因而在传播过程中丢失了来源信息。然而, γ 射线基本上是沿直线传播的, 更能完好地保留天体源的各种信息, 对暗物质间接探测研究更加具有意义。自 2008 年上天以来, Fermi γ 射线空间望远镜已经积累了 3 年多的数据, 对银心、矮星系、银河系弥散源、河外星系、星系团等天体都收集了 γ 射线信息, 为暗物质间接探测研究提供了广泛的空间。

1997 年, EGRET 探测器发现全天弥散 γ 射线在 GeV 能段存在超出现象^[27], 可以用暗物质湮灭来解释^[28]。但是, Fermi 的弥散 γ 射线观测结果否定了这一超出现象的存在^[29], 实验结果与理论预期基本上是相互吻合的。而且, 根据 Fermi (还有其它 γ 射线观测实验, 如 HESS) 对银心、一些银河系近邻矮星系、一些星系团、河外弥散背景等一系列 γ 射线观测结果, 适当考虑过背景源贡献及其不确定性之后, 基本上都没有发现超出现象, 反过来给暗物质性质给出很强的限制^[30-35], 其中银心的 γ 射线观测对质量为 10 至 1 000 GeV 暗物质粒子湮灭率 $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle$ 的限制 (某些湮灭道) 已达到 $10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 量级。然而, 用以解释正负电子超出的暗物质模型不能很好地满足 Fermi 的这些限制。

2 对撞机探测实验

暗物质粒子 WIMP 与通常物质的相互作用很弱, 类似于中微子的情況, 即使在对撞机上产生出来, 也不能在探测器中留下计数。然而在这种情况下, 若将探测器测得的粒子能动量累加起来, 可能会发现某个方向能动量的缺失。对于在对撞束流方向上产生的粒子, 探测器不能够完好地记录下来, 所以只能在垂直于对撞方向 (横向) 的平面上寻找这种能动量不平衡现象。结果, WIMP 在对撞机

上留下的线索是横向能量的丢失 (记为 E_T)。当然, 如果在一次碰撞中只产生了 WIMP, 就没有其它可测量产物来推断 E_T 的存在, 故而这种事例是探测不到的。真正具有测量意义的, 是在产生 WIMP 的同时还伴随产生一些其它粒子的事例。

对撞机上产生出来的高动量夸克或胶子, 强子化之后, 将变成一簇高动量的强子, 称为喷注 (jet)。在各种信号中, “单喷注 + E_T ”、“单光子 + E_T ”和“单 Z^0 + E_T ”等都有可能是容易探测到 WIMP 迹象的信号, 而且产物比较简单, 在探测器上容易分辨出来, 在理论模拟中也易于计算。图 5 中的左图展示了一个产生“单喷注 + E_T ”事例的可能过程 (如果将此过程中的末态胶子换成夸克, 也属于这类事例), 圆圈表示未知的夸克 - WIMP 耦合; 右图则展示了产生“单光子 + E_T ”或“单 Z^0 + E_T ”事例的可能过程。由于强作用顶点的耦合要比电弱作用顶点强得多, 左图的过程在强子对撞机上产生的概率也比右图大得多。除了这些信号, 其它存在 E_T 且包含若干个喷注、若干个轻子或若干个光子的信号, 也可以用来分析 WIMP 粒子的产生过程。但一般来说, 信号所包含的成份越复杂, 背景过程的影响就越大, 分析起来越困难。

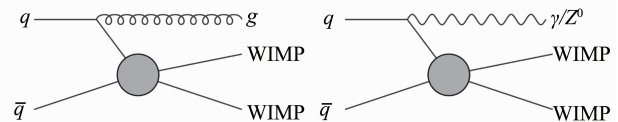


图 5 强子对撞机上产生 WIMP 对的同时伴随产生单喷注 (左) 或单光子/ Z^0 (右) 示意图

Fig. 5 Schematic diagram of WIMP pair production associating with monojet (left diagram) or mono-gamma/ Z^0 (right diagram) production at hadron collider

在对撞机上唯象研究这些含 WIMP 过程的方法大体上有一些步骤。第一步, 假设 WIMP 与标准模型粒子间的相互作用形式, 即图 5 中用圆圈表示的顶点的具体形式。第二步, 确定要在对撞机上寻找信号的过程, 用一些矩阵元计算工具 (如 CalcHEP/CompHEP, MadGraph/MadEvent) 生成部分子水平上的相关费曼图、计算矩阵元模方和截面大小, 再生成事例。第三步, 用强子化模拟工具 (如 PYTHIA) 将部分子水平上的产物强子化, 模拟探测器上可测的信号。第四步, 用探测器模拟工具 (如 PGS) 模拟探测器的探测效率, 从而得出最终的模拟探测事例。然后, 用类似方法模拟背景事例之后, 就可以与实验数据比较了。若有超出信

号, 则可拟合 WIMP 的质量和耦合常数等性质参数; 若无超出信号, 则可以对 WIMP 性质参数给出限制。

利用 Tevatron 和 LHC 关于“单喷注 + E_T ”和“单光子 + E_T ”的实验数据, 在假设 WIMP 与标准模型粒子通过有效耦合顶点进行弹性散射的前提下, 已有一些工作给出了对 WIMP 耦合强度的限制^[36-39], 并将这些限制与直接探测实验结果进行比较。这些工作表明, 当前强子对撞机数据给出较强限制的 WIMP 质量范围比直接探测实验给出的要宽一些。对于一些特定形式的自旋无关相互作用, 对撞机数据对参数空间的排除能力在低 WIMP 质量区域 (小于几个 GeV) 要比直接探测实验强得多。对于自旋相关相互作用, 有些对撞机排除线在 1 至 1 000 GeV 的 WIMP 质量范围内要比直接探测实验强 1 到 3 个量级。另外, 对于与原子核发生非弹性散射的 WIMP, 当其基态与激发态间的质量劈裂达到几百 MeV 以上时, 直接探测实验会缺乏对 WIMP 的探测能力, 但 LHC 上的暗物质探测实验仍然可以对这类 WIMP 进行广泛合理的研究^[40]。

3 结 语

本文对暗物质间接探测和对撞机探测实验的最新结果和进展进行了归纳总结。由于篇幅限制, 本文没有讨论暗物质的直接探测。对暗物质直接探测实验最新结果的讨论可参见文献 [41]。相比于暗物质直接探测实验, 暗物质间接探测与对撞机探测实验在原理、手段上都有很大不同, 对暗物质粒子质量的敏感区段也很不一样。因此, 交叉应用这三类实验的结果来研究暗物质是具有重要意义的。

在目前的间接实验结果上, 宇宙线正负电子能谱具有明显的反常超出现象, 有可能是暗物质所导致的。然而, 由于各实验组给出的能谱有些不一致, 并且天体物理背景还不能被完全确定下来, 这些超出还不足以视作暗物质效应所致。另一方面, 在宇宙线反质子能谱及一些 γ 射线观测中均未发现明显的超出现象, 这对暗物质的性质给出了强烈的限制。对撞机探测方面, 也没有明显 WIMP 信号的出现, 同样对暗物质性质给出一些很强的限制。

宇宙线探测器 AMS-02 已于 2011 年 5 月升空, 不久就会发布第一批数据。它具有良好的粒子鉴别能力, 对宇宙线各成份的测量将达到前所未有的精度, 有望为正负电子能谱的测量给出一个结论性的结果, 促进暗物质间接探测的发展。另一方面, 随着 LHC 未来几年的继续运行, 暗物质的对

撞机探测也将进入一个新的阶段。

参考文献:

- [1] ZWICKY F. Spectral displacement of extra galactic nebulae [J]. *Helvetica Physica Acta*, 1933, 6: 110 - 127.
- [2] TEGMARK M, EISENSTEIN D J, STRAUSS M A, et al. SDSS collaboration. Cosmological constraints from the SDSS luminous red galaxies [J]. *Physical Review D*, 2006, 74: 123507 [arXiv:astro-ph/0608632].
- [3] KOMATSU E, DUNKLEY J, NOLTA M R, et al. WMAP collaboration. Five-year wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: cosmological interpretation [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2009, 180: 330 - 376 [arXiv:0803.0547 [astro-ph]].
- [4] KOMATSU E, SMITH K M, DUNKLEY J, et al. WMAP collaboration. Seven-year wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: cosmological interpretation [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 192: 18 [arXiv:1001.4538 [astro-ph.CO]].
- [5] JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M, GRIEST K. Super-symmetric dark matter [J]. *Physics Reports*, 1996, 267: 195 - 373 [arXiv:hep-ph/9506380].
- [6] BERTONE G, HOOPER D, SILK J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints [J]. *Physics Reports*, 2005, 405: 279 - 390 [arXiv: hep-ph/0404175].
- [7] ADRIANI O, BARBARINO G C, BAZILEVSKAYA G A, et al. PAMELA collaboration. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5 - 100 GeV [J]. *Nature*, 2009, 458: 607 - 609 [arXiv:0810.4995 [astro-ph]].
- [8] ACKERMANN M, AJELLO M, ALLAFORT A, et al. Fermi-LAT collaboration. Measurement of separate cosmic-ray electron and positron spectra with the Fermi large area telescope [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108: 011103 [arXiv:1109.0521 [astro-ph.HE]].
- [9] ADRIANI O, BARBARINO G C, BAZILEVSKAYA G A, et al. PAMELA collaboration. A new measurement of the antiproton-to-proton flux ratio up to 100 GeV in the cosmic radiation [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 051101 [arXiv:0810.4994 [astro-ph]].
- [10] 袁强. 暗物质间接探测研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2010: 47.
- [11] CHANG J, ADAMS J H, AHN H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300 - 800 GeV [J]. *Nature*, 2008, 456: 362 - 365.
- [12] AHARONIAN F, AKHPERJANIAN A G, BARRES DE ALMEIDA U, et al. H E S S collaboration. The energy spectrum of cosmic-ray electrons at TeV energies [J].

- Physical Review Letters, 2008, 101: 261104 [arXiv:0811.3894 [astro-ph]].
- [13] AHARONIAN F, AKHPERJANIAN A G, ANTON G, et al. H E S S collaboration. Probing the ATIC peak in the cosmic-ray electron spectrum with H. E. S. S [J]. Astronomy and Astrophysics, 2009, 508: 561 – 564 [arXiv:0905.0105 [astro-ph. HE]].
- [14] ABDO A A, ACKERMANN M, AJELLO M, et al. Fermi-LAT collaboration. Measurement of the Cosmic Ray e^+ plus e^- spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi large area telescope [J]. Physical Review Letters, 2009, 102: 181101 [arXiv:0905.0025 [astro-ph. HE]].
- [15] BERGSTROM L, BRINGMANN T, EDSJO J. new positron spectral features from supersymmetric dark matter - a way to explain the PAMELA data? [J]. Physical Review D, 2008, 78: 103520 [arXiv:0808.3725 [astro-ph]].
- [16] CIRELLI M, STRUMIA A. Minimal dark matter predictions and the PAMELA positron excess [C]. Proceedings of Science, 2008, IDM 2008: 089 [arXiv:0808.3867 [astro-ph]].
- [17] BARGER V, KEUNG W Y, MARFATIA D, et al. PAMELA and dark matter [J]. Physics Letters B, 2009, 672: 141 [arXiv:0809.0162 [hep-ph]].
- [18] ARKANI-HAMED N, FINKBEINER D P, SLATYER T R, et al. A theory of dark matter [J]. Physical Review D, 2009, 79: 015014 [arXiv:0810.0713 [hep-ph]].
- [19] YUAN Qiang, BI Xiao-jun, LIU Jia, et al. Clumpiness enhancement of charged cosmic rays from dark matter annihilation with sommerfeld effect [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2009, 0912: 011 [arXiv:0905.2736 [astro-ph. HE]].
- [20] CIRELLI M, KADASTIK M, RAIDAL M, et al. Model-independent implications of the e^+ - , anti-proton cosmic ray spectra on properties of dark matter [J]. Nuclear Physics B, 2009, 813: 1 – 21 [arXiv:0809.2409 [hep-ph]].
- [21] YIN Pengfei, YUAN Qiang, LIU Jia, et al. PAMELA data and leptonicly decaying dark matter [J]. Physical Review D, 2009, 79: 023512 [arXiv:0811.0176 [hep-ph]].
- [22] HOOPER D, BLASI P, SERPICO P D. Pulsars as the sources of high energy cosmic ray positrons [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2009, 0901: 025 [arXiv:0810.1527 [astro-ph]].
- [23] ZHANG Juan, BI Xiaojun, LIU Jia, et al. Discriminating different scenarios to account for the cosmic $e^+/-$ excess by synchrotron and inverse compton radiation [J]. Physical Review D, 2009, 80: 023007 [arXiv:0812.0522 [astro-ph]].
- [24] ADRIANI O, BARBARINO G C, BAZILEVSKAYA G A, et al. PAMELA collaboration. PAMELA results on the cosmic-ray antiproton flux from 60 MeV to 180 GeV in kinetic energy [J]. Physical Review Letters, 2010, 105: 121101 [arXiv:1007.0821 [astro-ph. HE]].
- [25] ZHENG Jiaming, YU Zhaohuan, SHAO Junwen, et al. Constraining the interaction strength between dark matter and visible matter: I. fermionic dark matter [J]. Nuclear Physics B, 2012, 854: 350 – 374 [arXiv:1012.2022 [hep-ph]].
- [26] YU Zhaohuan, ZHENG Jiaming, BI Xiaojun, et al. Constraining the interaction strength between dark matter and visible matter: II. scalar, vector and spin - 3/2 dark matter [J]. Nuclear Physics B, 2012, 860: 115 – 151 [arXiv:1112.6052 [hep-ph]].
- [27] HUNTER S D, BERTSCH D L, CATELLI J R, et al. EGRET observations of the diffuse gamma-ray emission from the galactic plane [J]. The Astrophysical Journal, 1997, 481: 205 – 240.
- [28] DE BOER W, SANDER C, ZHUKOV V, et al. EGRET excess of diffuse galactic gamma rays as tracer of dark matter [J]. Astronomy and Astrophysics, 2005, 444 : 51 – 67 [arXiv:astro-ph/0508617].
- [29] ABDO A A, ACKERMANN M, AJELLO M, et al. Fermi-LAT collaboration. Fermi large area telescope measurements of the diffuse Gamma-ray emission at intermediate galactic latitudes [J]. Physical Review Letters, 2009, 103: 251101 [arXiv:0912.0973 [astro-ph. HE]].
- [30] VITALE V, MORSELLI A. For the Fermi-LAT collaboration. Indirect search for dark matter from the center of the Milky way with the Fermi-large area telescope [J/OL]. arXiv:0912.3828 [astro-ph. HE]. 2009 – 12 – 21 [2012 – 5 – 27]. <http://arxiv.org/abs/arXiv:0912.3828>.
- [31] ABDO A A, ACKERMANN M, AJELLO M, et al. Fermi-LAT collaboration. Observations of Milky way dwarf spheroidal galaxies with the Fermi-LAT detector and constraints on dark matter models [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 712: 147 – 158 [arXiv:1001.4531 [astro-ph. CO]].
- [32] ACKERMANN M, AJELLO M, ALLAFORT A, et al. Fermi-LAT collaboration. Constraints on dark matter annihilation in clusters of galaxies with the Fermi large area telescope [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2010, 1005: 025 [arXiv:1002.2239 [astro-ph. CO]].

- for Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate Solution [S]. Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [12] The American society for testing and materials. ASTM C1012 - 95 Standard Test Method for Length Change Of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to A Sulfate Solution [S]. Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [13] 建设部. GB/T50082 - 2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
-
- (上接第 6 页)
- [33] BI Xiaojun, BRANDENBERGER R, GONDOLO P, et al. Non-thermal production of WIMPs, cosmic $e^+ - e^-$ excesses and gamma-rays from the galactic center [J]. Physical Review D, 2009, 80: 103502 [arXiv:0905.1253 [hep-ph]].
- [34] ZHANG Juan, YUAN Qiang, BI Xiaojun. Galactic diffuse Gamma rays—recalculation based on the new measurements of cosmic electron spectrum [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 720: 9 - 19 [arXiv:0908.1236 [astro-ph. HE]].
- [35] YUAN Qiang, YIN Pengfei, BI Xiaojun, et al. Gamma rays and neutrinos from dark matter annihilation in galaxy clusters [J]. Physical Review D, 2010, 82: 023506 [arXiv:1002.0197 [astro-ph. HE]].
- [36] BAI Yang, FOX P J, HARNIK R. The tevatron at the frontier of dark matter direct detection [J]. Journal of High Energy Physics, 2010, 1012: 048 [arXiv:1005.3797 [hep-ph]].
- [37] GOODMAN J, IBE M, RAJARAMAN A, et al. Constraints on dark matter from colliders [J]. Physical Review D, 2010, 82: 116010 [arXiv:1008.1783 [hep-ph]].
- [38] RAJARAMAN A, SHEPHERD W, TAIT T M P, et al. LHC bounds on interactions of dark matter [J]. Physical Review D, 2011, 84: 095013 [arXiv:1108.1196 [hep-ph]].
- [39] FOX P J, HARNIK R, KOPP J, et al. Missing energy signatures of dark matter at the LHC [J]. Physical Review D, 2012, 85: 056011 [arXiv:1109.4398 [hep-ph]].
- [40] BAI Yang, TAIT T M P. Inelastic dark matter at the LHC [J]. Physics Letters B, 2012, 710: 335 - 338 [arXiv:1109.4144 [hep-ph]].
- [41] 余钊焕, 陈璟锟, 姚道新, 等. 暗物质直接探测实验现状[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2012, 51(3): 1 - 6.