

# 暗物质及暗物质粒子探测<sup>\*</sup>

毕效军<sup>1,†</sup> 秦波<sup>2</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

**摘要** 文章首先对暗物质的概念作了简单介绍,接着介绍了暗物质的发现过程和暗物质存在的证据等.随后,介绍了目前人们对暗物质粒子基本性质的理解和目前比较流行的暗物质模型,并解释了弱相互作用重粒子(WIMP)为什么获得人们最多的关注.文中还简单介绍了目前探测暗物质粒子的三种实验方法:对撞机探测法、直接探测法和间接探测法.最后,介绍了目前暗物质探测的最新进展,包括来自DAMA,CoGent,PAMELA,ATIC,Fermi等实验的最新结果.

**关键词** 暗物质,粒子物理,宇宙线

## Dark matter and its detection

BI Xiao-Jun<sup>1,†</sup> QIN Bo<sup>2</sup>

(1 *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(2 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

**Abstract** We first explain the concept of dark matter, then review the history of its discovery and the evidence of its existence. We describe our understanding of the nature of dark matter particles, the popular dark matter models, and why the weakly interacting massive particles (called WIMPs) are the most attractive candidates for dark matter. Then we introduce the three methods of dark matter detection: colliders, direct detection and indirect detection. Finally, we review the recent development of dark matter detection, including the new results from DAMA, CoGent, PAMELA, ATIC and Fermi.

**Keywords** dark matter, particle physics, cosmic ray

### 1 暗物质的发现

“什么是暗物质?”简单来讲,暗物质就是“在宇宙中还没有被我们‘看到’的物质”。

这个解释马上会引起两个疑问:何为“看到”?既然没有“看到”,那我们凭什么知道宇宙中存在这样的物质呢?在天文学上,技术发展最充分、设备最为先进、能力也最强大的“看”的办法就是探测来自太空不同物质发射的各种波段的电磁波,这包括从波长很长的射电波,到微波、红外、可见光、紫外,一直到近些年发展异常迅速的X射线和 $\gamma$ 射线的探测.没有“看到”的物质也就是指在全部的电磁波段,我们都没有看到这类物质的电磁辐射.它们对于我们来讲是“黑暗”的。

那我们如何理解第二个问题呢?这里我们可以

首先回顾一段有趣的历史.自从牛顿发现了万有引力定律以来,人们就尝试用万有引力理论来解释太阳系的行星运动规律.尽管万有引力的解释在开始是非常成功的,但在解释天王星运动时却无法得到令人满意的结果,天王星的运动规律和万有引力的预言有着明显的差异.法国天文学家U. Le Verrier和英国天文学家John Couch Adams猜测天王星的异常也许不是万有引力规律出了问题,而是在太阳系中还有一颗当时还没有发现的行星,这颗行星的引力使得天王星的运动偏离了原来预期的轨道.根据他们的预言,于1846年由Galle发现了这颗行星,即海王星.由行星运动异常从而猜测到另外一颗

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:11075169)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB833000)资助项目

2010-10-26 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: bixj@ihep.ac.cn

未发现的行星的存在非常类似今天我们关于暗物质的认识. 虽然我们从来没有直接“看到”宇宙中存在暗物质, 但我们却发现了由于暗物质的引力作用对其他可见的物质运动的影响, 这就是我们断定宇宙中存在暗物质的理由. 目前从星系到宇宙学尺度的观测都发现可观测物体运动的异常现象, 由此我们推断宇宙中可能存在我们还没有“看见”的物质, 即暗物质, 它们通过引力效应影响了可见物体的运动.

现代意义下的暗物质概念最早是由瑞士天文学家 Fritz Zwicky 提出的<sup>[1]</sup>. 1933 年, Fritz Zwicky 研究后发星系团(Coma Cluster)中星系运动的速度弥散, 他根据所测得的星系速度弥散并应用维里定理, 得到了后发星系团的质光比, 发现它比太阳的质光比要大 400 倍左右. 直观一点讲, Zwicky 的测量发现, 星系团中各个星系的运动速度太快了, 快到仅仅依靠后发星系团中的可见物质根本无法束缚这些星系. 而这个星系团却是稳定存在的, 这表明星系团中应该还有更多的物质, 它们贡献的引力束缚了这些飞奔的星系. 今天, 天文学家有许多办法可以测定星系团的质量, 如通过强、弱引力透镜效应, 通过对星系团中弥散分布的温度高达 1 亿度的 X 射线热气体的精确测量, 以及通过星系速度分布等. 这些观测无不证实了星系团中暗物质的存在.

到上个世纪 70 年代, 天文学家对旋涡星系进行了详细观测, 才使得“暗物质”的概念最终得到了科学界的普遍承认<sup>[2-5]</sup>. 漩涡星系旋转曲线的测量是暗物质存在最直接的证据. 所谓旋转曲线指的是星系中恒星绕星系中心旋转速度随着恒星到星系的中心距离而变化. 通常测量到的旋转曲线在距离星系中心很远的地方会变平, 并且一直延伸到可见的星系盘边缘以外的地方很远都不会下降. 图 1 是典型的漩涡星系的旋转曲线. 如果没有暗物质存在, 根据开普勒定律, 在距离很远的地方旋转速度会随距离下降, 而测量到的图 1 所示的旋转曲线明显和人们根据可见物质预期的结果不同. 因此, 平坦的旋转曲线就意味着星系中包含了更多的物质, 这些还没有被直接看到而只是通过引力效应表现出来的物质就是暗物质.

2006 年, 钱德拉 X 射线望远镜对子弹星系团(Bullet Cluster)的观测<sup>[6]</sup>, 是暗物质的天文研究在近年来取得的重要结果(如图 2 所示). 图中红色的部分(见《物理》网刊彩图, 下同)代表钱德拉卫星“看到”的重子物质的分布, 而绿色的轮廓是在此之前的弱引力透镜观测给出的引力场的空间分布. 钱德拉

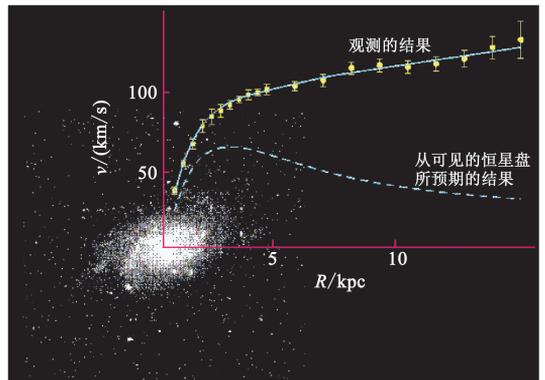


图 1 漩涡星系 M33 的旋转曲线

卫星发现, 子弹星系团的两个子星系团在垂直于视线方向上, 刚刚发生过一次高速碰撞, 高速碰撞产生的激波波前清晰可见(图中右部的三角形). 最重要的是, 结合弱引力透镜观测, 钱德拉发现子弹星系团中的普通发光物质或重子物质(由 X 射线确定其位置, 图 2 中的发光部分)和两个星系的质量中心(由引力透镜观测确定其位置, 图 2 中的曲线)并不重合. 这一现象被认为是暗物质存在的直接证据, 这是因为普通的重子物质间会发生很强的相互作用, 而暗物质粒子之间几乎没有相互作用. 因此, 普通物质之间由于存在碰撞而互相粘滞, 产生一定的减速效应, 从而造成子弹星系团在经历了这场大碰撞后, 暗物质和重子物质的空间分布出现了明显的分离.

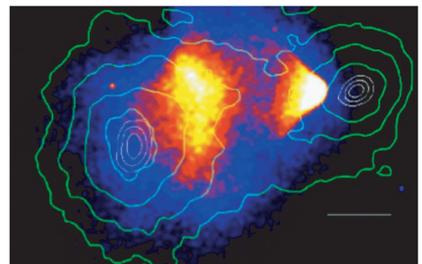


图 2 钱德拉 X 射线卫星观测到的子弹气团, 图中发光的是重子物质, 曲线代表用引力透镜观测到的引力等势能面

这个结果立即引起了学术界的广泛关注, 因为这可能排除通过修改引力理论来解释所观察到的异常现象. 而在子弹星系团中, 人们清晰地看到了普通发光物质(或重子物质)与引力场的明显的空间分离, 这用修改引力理论是不容易解释的, 而引入暗物质是最自然的解释. 所以子弹星系团为暗物质的存在提供了直接证据.

近年来, 由于 WMAP 卫星对微波背景(CMB)各向异性的精确测量, 我们可能通过拟合 WMAP 的数据, 精确确定宇宙中暗物质的总量<sup>[7]</sup>. 目前拟合的结果给出暗物质在整个宇宙中所占的组分大约是 22%. 总之, 自从暗物质的概念提出至今, 人们在各种

尺度的天文观测中都发现了暗物质存在的证据. 目前, 暗物质的存在已经被人们普遍接受, 并且成为研究宇宙中大尺度结构形成过程中必不可少的成分.

## 2 暗物质粒子和弱相互作用重粒子

尽管暗物质在宇宙中存在的事实得到大部分天文学家的承认, 但暗物质的本质是什么, 它是由什么基本粒子组成的, 这些基本问题却仍未得到解决. 在微观领域, 人类建立了关于基本粒子的标准物理模型. 这一理论告诉我们, 目前已知的基本粒子是由三代的夸克和轻子以及传递相互作用的规范玻色子构成. 这一理论能够精确描述目前对撞机上所有的实验现象. 然而, 暗物质粒子却不能被标准模型解释. 因此, 为了解释暗物质粒子, 必须要引入超出基本粒子标准模型的、更为基本的新物理理论.

为什么暗物质问题会让粒子物理学家如此关注呢? 这是因为, 人们猜测暗物质的产生可能是源于宇宙早期的高温过程. 在宇宙的早期, 宇宙要经历一个高温的阶段. 这个时候宇宙中的粒子能量要高于现在已有(甚至将来可能有)的一切对撞机的能量, 这个时候新物理可能会发生作用. 因此我们可以认为, 早期宇宙是一个能量超出人类所能够达到的超高能对撞机, 这个对撞机会撞出新的粒子并留下一些踪迹. 暗物质有可能就是来自这样的新物理在经历了宇宙大爆炸后遗留下来的产物. 因此, 正确认识暗物质, 对于人类认识物质的基本结构和基本相互作用可能起到关键的作用. 这就是为什么天文学家和粒子物理学家都在关心暗物质问题的原因.

目前我们已知的物质称为重子物质, 但根据天文观测, 暗物质应该由非重子的冷暗物质构成. 所谓冷暗物质是指暗物质粒子的运动速度非常慢, 远远小于光速<sup>[8]</sup>. 较为流行的暗物质候选者是所谓弱相互作用重粒子(WIMP), 如超对称理论粒子或额外维度空间粒子等. 弱相互作用重粒子(WIMP)被广泛关注的原因在于它可以在宇宙早期自然产生: 早期宇宙温度非常高, WIMP 可以和其他的粒子相互作用从而达到热平衡; 随着宇宙温度的降低, 当暗物质粒子的速度远低于光速时, WIMP 的粒子数密度随温度按指数降低, 这样其反应速率也大大下降; 当 WIMP 反应的特征尺度已经和宇宙的视界相当时, WIMP 粒子就很难再相互作用, 我们称其为从宇宙背景中解耦了. 如果 WIMP 的反应截面非常大, 它可以保持热平衡的状态到很低的温度时才解耦, 那么它保留下来到今天

的密度就非常低; 相反, 如果它的反应截面太小, 它保留到今天的密度就很高. WIMP 粒子之间是弱相互作用, 这样它们留到今天的密度和今天实际观测的结果大致相当. 正因为 WIMP 可以在宇宙早期自然地通过热反应产生, 其在今天的贡献如同宇宙微波背景一样只是宇宙温度下降的热遗迹, 所以 WIMP 暗物质模型得到广泛的关注.

此外, 从粒子物理出发, 许多设法理解电弱对称破缺机制的、所谓超出标准模型的新物理理论都提供了这样的 WIMP 粒子, 比如超对称理论中最轻的超对称粒子(neutralino). 如果在对撞机上发现了某种新物理所预言的粒子(长寿命、中性), 它很可能就是构成暗物质的粒子. 反过来, 如果暗物质粒子被探测到, 其性质也会限制新物理模型. 因此, 从某种意义上来说, 在暗物质问题上, 宇宙学、天文学和粒子物理是相通的.

目前理论物理学家提出了很多暗物质粒子的模型, 较为广泛研究的除了超对称粒子(neutralino)外, 还有轴子(axion)、KK 粒子、超对称引力子(gravitino)等. 轴子是在解决强相互作用中的电荷-空间(CP)破坏问题时引入的, 目前它的质量范围被实验和天文观测限制在  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  eV 之间, 它可以通过非热过程产生并作为冷暗物质存在. KK 粒子是额外维度空间理论所预言的, 其中最轻的粒子是稳定的并可以成为暗物质. 超对称引力子是指引力子的超对称伴子, 由于其和普通物质的相互作用非常弱, 也被称为超弱作用重粒子(super-WIMP), 也要通过非热产生.

总之, 目前人们对于暗物质的本质仍然很不了解, 而在理论上也提出了各种各样的模型. 尽管像超对称粒子、KK 粒子、轴子等粒子都有非常明确的物理意义, 都是暗物质粒子自然的候选者, 但最终暗物质的性质还要取决于实验结果.

## 3 暗物质粒子的探测方法

由于暗物质粒子不参与电磁相互作用, 通常的天文观测方法很难发现它的踪迹. 为了了解暗物质的本质, 目前的探测方法大致可以分为如下三种:

首先是在加速器上将暗物质粒子“创造”出来, 并研究其物理特性. 由于暗物质粒子即使被“创造”出来, 也不会被探测器发现, 所以只能通过其他可以看见的粒子来推测出是否有这样的粒子产生. 暗物质粒子在对撞机上产生的标志是能量丢失, 然而由

于暗物质粒子会带走一部分“能量”却不被探测器发现,因此我们只能从丢失的“能量”和分布来推测暗物质的性质。欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)被认为很有可能“创造”出暗物质粒子。

第二种方法称为直接探测法。该方法是探测暗物质粒子和探测器中物质的原子核碰撞所产生的信号。由于发生这种碰撞的概率很小,产生的信号非常“微弱”。为了降低噪声,探测到这种“微弱”的信号,通常要把探测器放置在很深的地下,以屏蔽地面上的各种干扰噪声。暗物质直接探测实验是目前寻找暗物质粒子最重要的探测方式之一。在目前的实验精度下,我们只可能探测到弱作用重粒子(WIMP)的信号,而更弱的信号,如轴子、超对称引力子是无法用这种方法探测的(例如,轴子的探测实验是用微波空腔,利用轴子和电磁场存在的极微弱的耦合来探测)。目前我国科学家正在讨论在四川雅砻江锦屏山下的一条隧道中建设一个大型的、用于暗物质粒子探测的地下实验室。锦屏山隧道全长17km,最大埋深2.4km,具有得天独厚的自然优势,在这里有望建成世界上最大埋深的地下实验室。

第三种办法称为暗物质的间接探测法。间接法是观测暗物质粒子衰变或相互作用后产生的稳定可见粒子,如 $\gamma$ 射线、正电子、反质子、中微子等的信号。如果我们能够精确测量这些暗物质产生的粒子能谱,就有可能发现暗物质粒子留下的蛛丝马迹。

由于暗物质的湮灭速率正比于暗物质密度的平方,因此暗物质湮灭主要发生在星系、星系团中心,或者星体内部等暗物质密度非常高的地方。暗物质的间接探测涉及到许多复杂的因素,如需要知道暗物质的分布情况、暗物质间的湮灭截面的大小以及来自非暗物质湮灭过程的背景的大小和性质,因此间接探测涉及到粒子物理、天文、宇宙学等多方面的知识。

由于高能 $\gamma$ 射线不受宇宙空间磁场等因素的影响,可以直线传播, $\gamma$ 射线信号可以追溯到暗物质的“源”,所以探测暗物质粒子湮灭产生的 $\gamma$ 射线是非常重要的探测暗物质粒子的手段。 $\gamma$ 射线实验可以分为卫星实验和地面实验两大类,其中卫星实验的优势是本底排除非常干净,阈能低,视场大,观测有效时间长等,但其劣势则是由于探测器体积所限,其有效面积较小。地面实验可以分为大气切连科夫光望远镜和大气簇射探测器。大气切连科夫光望远镜的优势在于,可有效地排除本底,有非常大的有效观测面积和高角分辨率;劣势在于其视场窄而且观测时间受限,只能在晴朗无月的晚上观测。大气簇射探

测器的优势包括大的有效面积、宽的视场和几乎100%的观测时间;劣势则是无法区分本底宇宙线和 $\gamma$ 射线信号,角分辨率一般。建于我国西藏羊八井地区的、中日合作的AS $\gamma$ 实验和中意合作的ARGO实验都属于大气簇射探测实验(见图3)。



图3 我国西藏羊八井宇宙线实验基地,图中左边蓝色大屋顶是中意合作的ARGO实验大厅,白色的探测器阵列是中日合作的AS $\gamma$ 实验

除了 $\gamma$ 射线信号外,目前科学家还通过探测中微子、正电子和反质子等粒子来探测暗物质粒子湮灭信号。

#### 4 暗物质研究现状与展望

2008年,中国和意大利合作课题组(DAMA/LIBRA)宣布,他们的地下实验发现了某种周期性变化的信号,可能就是人们长期以来寻找的暗物质信号<sup>[9]</sup>。

这个实验的原理如图4所示。太阳以232km/s的速度绕银河系的中心旋转,而地球绕太阳的速度大约为30km/s。这样,地球相对于银河系的速度就是两个速度的叠加。在夏天,地球的速度最大,到了冬天,速度最小。因此,我们预期,暗物质的直接探测信号也会有随着时间,以年为周期的变化规律。DAMA实验正是看到了这样的年调制的信号,如图5所示。这些信号有可能就是我们长期以来探寻的暗物质信号。但遗憾的是,暗物质的信号至今还未被其他实验所证实。

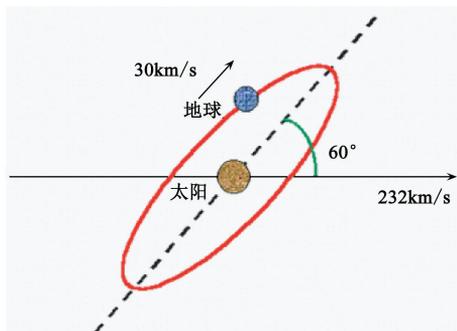


图4 DAMA暗物质探测的原理

CoGent实验组用高纯度的锗探测器探测暗物

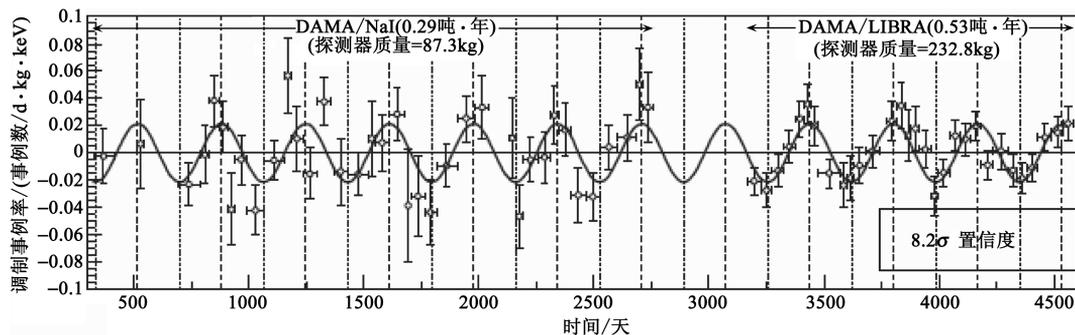


图5 DAMA 实验观测到的年调制信号. 这有可能是来自于暗物质碰撞的信号

质和探测器物质碰撞后的电离信号. 最近, 他们发现在低能电离能谱上有一些超出的事例无法解释<sup>[10]</sup>. 这些超出的事例有可能是比较轻的暗物质和探测器碰撞造成的. 目前有很多理论研究在探讨这些超出的可能原因, 但目前仍然无法给出定论.

目前世界上有大约 20 家的暗物质直接探测的实验, 实验的规模在不断扩大, 探测灵敏度不断提高. 现在世界上灵敏度最高的暗物质探测实验应该是美国 100kg 级液氙实验<sup>[11]</sup>, 但是到目前为止, 这个实验还没有发现暗物质的任何迹象.

2008 年, 暗物质的间接法实验取得了很大的进展. 首先是意大利的一颗卫星 PAMELA 探测到宇宙线中正电子的成分明显超出了宇宙线物理的预期<sup>[12]</sup>, 如图 6 所示. 如何理解这些多出来的正电子一时成为最为热门的一个话题. 人们从宇宙线在银河系的传播过程, 从附近脉冲星的辐射到暗物质湮灭等, 提出了许许多多的理论解释. 但到目前为止, 数据的精度还不高, 还不足以区分理论模型. 人们寄希望于将来更加灵敏的实验结果会给出一个明确的答案, 如将于 2011 年春发射到国际空间站的阿尔法磁谱仪 (AMS02).

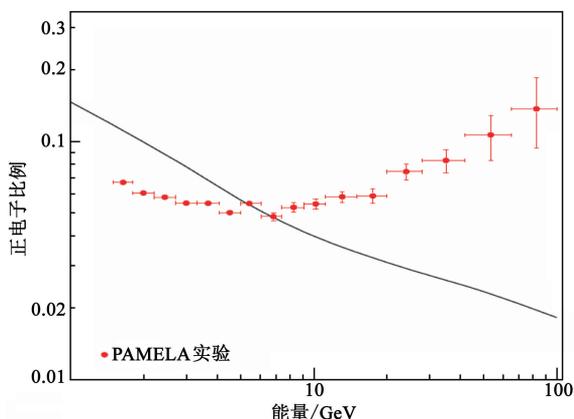


图6 PAMELA 实验观测到的宇宙线中正电子的比例(红色的点), 实线是宇宙线理论预期结果

此外, 以中美科学家为主的 ATIC 探测器在

2008 年发表了宇宙线高能电子能谱的观测结果<sup>[13]</sup>. ATIC 发现高能电子流量在 300—800GeV 能量区间与理论模型相比高了将近 3 倍. 美国的 Fermi  $\gamma$  射线卫星也测量了几乎同能段的电子能谱<sup>[14]</sup>. 虽然 Fermi 也观测到了电子能谱的超出, 但却没能证实 ATIC 的能谱的形式. 但无论如何, 这些结果似乎都意味着某种未知的源在贡献宇宙线中的正负电子流, 但究竟是什么样的源, 目前却仍然无法判别.

总之, 目前国际上暗物质探测的实验研究正处在蓬勃发展的阶段, 未来 10 年将是暗物质探测的黄金时代. 现在, 欧洲核子中心的大强子对撞机正在对撞获取数据, 这将大大推进暗物质问题的研究. 另外, 随着探测器灵敏度大大提高, 非加速器暗物质实验, 包括地下直接探测实验和空间间接观测实验, 也有可能很快产生新的突破. 一种乐观的预期是, 暗物质问题在不久的将来就能基本解决, 这对我们理解宇宙的演化, 理解物质的基本结构和基本相互作用, 都将是革命性的贡献.

### 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] Clowe D. *Astrophys. J.*, 2006, 648:L109
- [7] Komatsu E. 2010, arXiv:1001.4538v3 [astro-ph. CO]
- [8] Kolb E W, Turner M. *The Early Universe*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- [9] Bernabei R *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2008, 56:333
- [10] Aalseth C E *et al.* arXiv:1002.4703v2 [astro-ph. CO]
- [11] Aprile E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105:131302
- [12] Adriani O *et al.* *Nature*, 2009, 458:607
- [13] Chang J *et al.*, *Nature*, 2008, 456:362
- [14] Abdo A A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:181101