

寻找宇宙中的暗物质

Detecting Dark Matter in the Universe

毕效军/BI Xiao- Jun

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

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

[摘要] 宇宙中存在暗物质已经得到大量天文观测的证实, 但关于暗物质粒子的本质我们仍旧一无所知。为了理解暗物质的性质, 许多暗物质探测实验正在展开。直接探测实验探测的是暗物质粒子与探测器物质碰撞所留下的信号, 而间接探测实验则寻找暗物质湮灭的产物, 如高能伽马射线、高能中微子、正电子和反质子等。理解暗物质所产生的这些信号需要我们对暗物质的微观粒子的性质, 同时也需要了解暗物质在星系或星系团中的分布形式等宏观性质。随着更大规模、更高灵敏度的实验不断投入运行, 暗物质之谜有可能在不久的将来得以破解。

[关键词] 暗物质; 直接探测; 间接探测

[中图分类号] O572.2, P159

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2006)09- 0008- 05

Abstract: The existence of dark matter in the universe has been confirmed by a lot of astronomy observations. However, we do not know the properties of dark matter yet. In order to learn the nature of dark matter, many experiments searching for dark matter are taking data or are under construction. By direct detection the experiments look for the signal when the dark matter particles scatter off the nuclei of the detector material; by indirect detection the experiments look for the annihilation products of dark matter, such as the high energy gamma rays,

收稿日期: 2006- 08- 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575111)

作者简介: 毕效军, 男, 北京市玉泉路 19 号中科院高能物理研究所, 副研究员, 主要从事粒子物理和宇宙学、天文学的研究;

E- mail: bixj@mail.ihep.ac.cn

子外流能损率(E_{out})。因为这两部分的能损率对转动角频率 Ω 的依赖程度不同, 理论上就会得到在 1 至 3 之间变化的制动指数 n (定义为 $\Omega \propto \Omega^n$)。因为观测上的困难, 至今只有 6 颗脉冲星有可靠的制动指数观测值。这 6 个值在 1.4~2.9 之间。

脉冲星是否带有单极电荷? 这是一个非常基本的问题。遗憾的是在脉冲星研究的近 40 年来, 人们似乎并没有意识到这一重要而又基本的问题及其隐含的深远意义。通过对脉冲星磁层及整体电路的研究, 我们得到这样一个结论: 为了使得临界磁力线电势与无穷远星际介质电势相等以闭合整体磁层电路, 脉冲星很可能携带单极电荷 $Q_c \sim 10^{-3} R_6^3 B_{12} / P^2$ 库仑 (R_6 为以 10^6 cm 为单位的脉冲星半径, B_{12} 为以 10^{12} G 为单位的脉冲星极区磁场, 自转周期 P 以 s 为单位); 若实际带电荷多于或少于 Q_c , 则环间隙加速区的大小将有所改变。脉冲星单极电荷必然提供额外的与半径平方成反比的加速电场, 这对于脉冲星磁层中粒子的加速可能有重要意义。

5 总结

以笔者所在研究小组的工作为主, 我们综述了夸克星的研究进展状况。关于观测到的脉冲星的本质, 目前主要存在两种看法: 中子星和夸克星。遗憾的是至今尚不能完全排除其中任何一种观点。中子星和夸克星具有不同的性质, 也许通过对脉冲星类天体更多的观测特征的研究、分析, 人们终将有望对这两种看法作出选择。如果能观测证认夸克星的存在, 对于我们深入理解粒子的基本强相互作用和进一步认识相关天体物理过程都将具有深远意义。关于这方面研究的更多内容, 可参阅引文。

有关脉冲星组成认识上的不确定性, 根本原因是 QCD 低能

的高度非微扰特性。指望通过 QCD 计算来明确地给出超核密度物质的组成和性质也许是不现实的。因此, 强调和倡导在脉冲星结构研究方面重视观测表现和唯象研究是很有必要的。然而, 如果 QCD 处在低能情形则很难得到确切的结论。是否会影响人类对于自然界的审美观? 如果真的不能根据 QCD 算出众多的低能现象, 我们觉得也不必奇怪, 如同人们算不清湍流和混沌运动, 但它们确实在自然界中普遍发生着, 并且是符合美学标准的。

最后值得一提的是, 天体物理过程往往是异常复杂的, 从观测现象中提取所需要的反映物理本质的信息常常不是一个容易达到的目标。这就要求相关学者具有正确的科学观和严谨求实的学风, 切忌捕风捉影式地片面追求科学目标(这样的反面例子还不算少)。

参考文献(References)

- [1] FOWLER R H. On dense matter[J]. MNRAS, 1926,87: 114- 122.
- [2] 徐仁新. 天体物理导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [3] XU R X. 1E 1207.4- 5209: a low- mass bare strange star?[J]. MNRAS, 2005, 356: 359- 370.
- [4] QIAO G J, LEE K J, WANG H G, et al. The inner annular gap for pulsar radiation: gamma- ray and radio emission [J]. ApJ, 2004, 606: L49- L52.
- [5] QIAO G J, LEE K J, ZHANG B, et al. A Model for the Challenging 'Bi- drifting ' Phenomenon in PSR J0815+09 [J]. ApJ, 2004, 616: L127- L130.
- [6] WEBER F. Strange quark matter and compact stars[J]. Prog Part Nucl Phys, 2005, 54: 193- 288.

(责任编辑 胡春华)

neutrinos, positrons or anti-protons. To study the signals, not only the particle nature of the dark matter should be well known, but the astrophysical nature of dark matter should also be well known, such as the profile of dark matter in the galaxies or in the clusters of the galaxies. As more experiments are going to take data we expect the nature of dark matter will be solved in the near future.

Key Words: dark matter; direct detection; indirect detection

CLC Numbers: O572.2, P159

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)09-0008-05

1 引言

自从牛顿发现了万有引力定律以来,人们就一直尝试用引力理论来解释各种天体的运动规律,在这个过程中,“暗物质”的概念很早就已经形成了。比如,对于天王星运动异常的解释导致法国天文学家 U. Le Verrier 和英国天文学家 John Couch Adams 猜测到海王星的存在,并最终于 1846 年由 Galle 发现海王星。由行星运动异常从而猜测到另外一颗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。目前,从星系到宇宙学尺度的观测都发现了暗物质存在的迹象,即它通过引力作用对可观测物质所造成的影响。

现代意义下的暗物质概念是瑞士天文学家 Fritz Zwicky 早在 1933 年研究后发星系团中星系运动的速度弥散时就提出来的^[1]。他根据所测得的星系速度弥散并应用维理定理得到了后发星系团的质光比,发现其比太阳的质光比要大 400 倍左右^[1]。今天,有许多办法可以测定星系团的质量,如通过弱引力透镜效应,通过观测团内热气体的 X 射线发射轮廓图以及通过测量径向速度分布等。比如,目前的 X 射线观测卫星可以准确测定来自星系团的 X 射线轮廓图,从而推断出约束这些热气体的引力势的分布,进而得到星系团中物质的分布。精确的 X 射线数据表明星系团中存在大量的暗物质,否则这些发射 X 射线的热气体就无法被约束在星系团内部。

暗物质存在最直接的证据来自于漩涡星系旋转曲线的测量。通常测量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很远的地方都不会下降。如果没有暗物质存在,很容易得到在距离很远的地方旋转速度会随距离下降: $v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \frac{1}{\sqrt{r}}$ 。因此,平坦的旋转曲线就意味着星系中包含了更多的物质。

宇宙中暗物质总量的确定来自于微波背景(CMB)各向异性的测量。通过拟合 WMAP 实验数据^[2]可以得到宇宙学参数的值,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%^[2]。

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

虽然暗物质的存在已经得到了天文实验观测的证实,但暗物质粒子的性质仍然不为人们所了解。大爆炸宇宙学的一个成功之处在于它可以准确预言轻元素在宇宙中的丰度。当宇宙的温度下降到核反应的温度时,我们可以应用成熟的核物理理论来计算轻元素的合成过程。计算中一个关键的参量是核合成时重子数和光子数的比,通过实验观测确定某种轻核的丰度,就可以限制重子和光子比。观测轻元素的丰度表明,宇宙中的重子所占的比例只有全部质量的 5% 左右,因此,我们推断大部分的暗物质应该是非重子的。

由不带电、稳定、没有强的相互作用的要求,人们最初想到的暗物质候选者是中微子,中微子满足所有这些限制,如果它有质量就可以构成暗物质。由于中微子参与弱相互作用,其解耦温度

在 MeV 量级(除非它非常重,远重于 MeV,但这已经被实验排除),远高于它的质量,因此它解耦时是相对论运动的,这样的暗物质被称为热暗物质。研究表明,由于热暗物质运动速度非常快,像今天的星系这样的结构在这样的暗物质模型中根本无法形成,因此中微子作为暗物质已经被排除,它在宇宙中只可能占很小的比例。与中微子相对,观测和理论计算表明,暗物质应该是“冷”的,即当它解耦时其速度应当非常低,是非相对论运动。非重子的冷暗物质目前较为认可的是所谓弱相互作用重粒子(WIMP),如超对称粒子或额外维空间粒子等。

弱相互作用重粒子(WIMP)被广泛关注的原因在于它可以自然地热产生:早期宇宙温度非常高,WIMP 可以和其他的粒子达到热平衡;随着温度的降低,特别是低于其本身的质量时,WIMP 的粒子数密度是指数压低的,这样其反应速率也大大下降;当反应速率下降到可以忽略不计时(此时 WIMP 反应的特征尺度已经和宇宙的视界相当了),我们称 WIMP 粒子就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才解耦,那么它保留下来的密度就非常低;相反,如果它的反应截面太小,它今天的密度就很高。计算表明,今天宇宙中暗物质的密度和反应截面大致成反比的关系^[3]:

$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \times 10^{-27} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma v \rangle} \quad (1)$$

这里 $\Omega_{\chi} = \rho_{\chi} / \rho_c$ 是暗物质密度和临界密度之比, $h = H_0 / 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 是归一的哈勃常数, $\langle \sigma v \rangle$ 是暗物质反应截面与相对运动速度之积的热平均。对于弱相互作用重粒子,其解耦温度大约在 $T \approx m/22$, 这时典型的弱作用截面与其解耦时的速度之积大约是 $\langle \sigma v \rangle \approx 2 \times 10^{-26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 正好给出现在观测到的暗物质丰度。正因为 WIMP 可以自然地热产生,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 暗物质模型得到很大的关注。

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(且稳定、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的形式。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。

文献中人们研究的暗物质粒子候选者还有许多,较为广泛研究的有轴子(axion)、KK 粒子、超对称引力子(gravitino)、超对称精质场(quintessino)等。轴子是在解决强 CP 破坏问题时引入的,目前它的质量范围被限制在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ eV}$ 之间,它可以通过非热产生并作为冷暗物质存在^[4]。KK 粒子是额外维空间理论所预言的,其中最轻的粒子是稳定的并可以成为暗物质^[5]。超对称引力子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(SuperWIMP)^[6-7],其产生也要通过非热产生。超对称精质场(quintessino)是一个统一描述暗物质和暗能量的模型,它通过把暗能量标量场超对称化,并用暗能量场的超对称伴子来做暗物质,它的产生过程也需要通过非热产生^[8-9]。

总之,目前人们对于暗物质的本质仍然一无所知,而在理论上也提出了各种各样的模型,有些模型只是针对天文观测唯象地提出的,而有些则是研究粒子物理问题时独立提出的,有非常好

的物理意义,但最终暗物质的性质还要取决于实验的结果。目前,世界上有许多实验用来进行暗物质探测,随着灵敏度的不断提高,我们相信暗物质之谜有可能在不久的将来被揭开。

3 暗物质的直接探测

暗物质直接探测实验是目前最重要的探测方式,其基本原理非常简单。由于银河系中充满了暗物质粒子并且不断地穿过地球,因此我们可以用一个探测器来捕捉暗物质的信号。为了屏蔽掉来自宇宙线的背景信号,通常要把探测器放置在很深的地下。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 axion、gravitino 是无法用这种方法探测的。

直接探测信号可以分为弹性散射、非弹性散射以及自旋无关、自旋相关作用等不同的类型。弹性散射中暗物质粒子与探测器物质的核发生弹性散射,通过测量散射造成的能量沉积探测暗物质信号。而非弹性散射会造成探测器物质核的激发或者激发核外电子,因此非弹性散射不但有能量沉积,还会有光子发射。但这样的信号很难与自然的辐射过程区分开。自旋无关的散射过程正比于核子质量的平方甚至更高,因此应用重核物质可以大大提高散射截面。而自旋相关的散射 WIMP 耦合到核的自旋上,其截面正比于 $J(J+1)$, J 为核的自旋,因此采用重核不能提高截面。目前直接探测实验中多是探测自旋相关的弹性散射中的能量沉积。

直接探测信号的强度是由 WIMP 的密度、速度分布以及 WIMP 和相互作用的强度所决定的,单位探测器质量的事例率为^[3](可估算为 $R \approx n\sigma\langle v \rangle/m_\chi$):

$$\frac{dR}{dE} = N_{\text{target}} \int \frac{d\sigma}{dE} n v f(v) d^3v = \frac{n\sigma_0 F^2(Q)}{2m_\chi^2} \int_{v > \sqrt{ME/2m_\chi}} \frac{f(v)}{v} dv \quad (2)$$

其中 $\frac{dR}{dE}$ 是能量微分沉积率, $\frac{d\sigma}{dE}$ 是 WIMP 与核的微分截面, n 是 WIMP 的数密度, v 和 $f(v)$ 分别是 WIMP 的速度和速度分布函数, $\sigma_0 = \frac{4m_\chi^2}{\pi} [Zf_p + (A-Z)f_n]^2 \approx \frac{4m_\chi^2}{\pi} f_{p,n}^2 A^2$, 正比于核的质量的平方, m_χ 为 WIMP 与核的约化质量, $F(Q)$ 是核的形状因子。从这个公式我们可以清楚地看到信号所依赖的因素,尤其需注意的积分下限与核的质量有关,因此不同的实验可能会对 WIMP 不同的速度区间敏感。

目前,世界上有 20 几家直接探测实验正在运行或即将投入运行,探测技术也在不断发展更新中,然而直到现在,仍然没有确切的暗物质信号被探测到,因此对 WIMP 与核的反应截面给予了很强的限制。目前最灵敏的直接探测实验是位于美国苏丹地下实验室的 CDMSII (Cryogenic Dark Matter Search) 实验^[10-11],其目前给出 WIMP 与每个核子的作用截面的上限为 $10^{-43} \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$ 。

4 暗物质的间接探测

暗物质粒子之间会湮灭而产生高能辐射,如高能的伽马射线、高能正电子、反质子以及高能中微子,探测这些信号可以间接确定暗物质的存在,这样的实验称为暗物质间接探测实验。暗物质的湮灭率正比于暗物质密度的平方, $\Gamma_{\text{ann}} = \frac{\langle\sigma v\rangle n^2}{2} = \frac{\langle\sigma v\rangle \rho^2}{2m_\chi^2}$, 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成分,如需要知道暗物质的分布情况、暗物质间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。

首先,我们来看中微子望远镜实验。太阳和地球所造成的引力势会吸引周围的暗物质落入其内部,暗物质粒子和普通物质散

射会不断损失能量,如果其能量低到无法逃出太阳或地球的引力势场就被束缚在其内部。因此,可以算出在太阳和地球内部有远高于周围平均密度的暗物质存在。这些暗物质会以较快的速度湮灭,但是除了中微子,其他粒子都无法穿出太阳或地球。目前可用于探测这些高能中微子的实验包括 AMANDA^[12]、ANTARES^[13]以及 IceCube^[14]等。AMANDA 和 IceCube 实验在南极的冰中进行,可以探测到 μ 轻子在冰中运动所产生的契伦可夫光,并重建出原初粒子的方向。如果暗物质粒子是超对称的 neutralino,其质量有几十至几百 GeV,因此可以产生很高能的中微子,探测到这些中微子将是很强的暗物质湮灭的信号。到目前为止,AMANDA 还没有探测到任何这样的信号^[12]。而 IceCube 将是第一个 km^3 量级的中微子探测器,其灵敏度将大大高于 AMANDA。IceCube 将于 2010 年完成,届时我们期待它将有重要的新发现。

探测暗物质湮灭到伽马射线的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、视场宽、观测有效时间长等;但其劣势在于探测器体积所限,其有效面积较小,如 EGRET 实验和将于 2007 年发射的 GLAST 卫星实验。地面实验可以分为大气契伦可夫光望远镜和大气簇射探测器,前者的优势在于可有效排除本底、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,只能在晴朗无云的晚上观测。大气契伦可夫光望远镜有 MAGIC、CAN-GAROOIII、HESS、VERITAS 等。大气簇射探测器的优势包括大的有效面积、宽视场、几乎 100% 的观测时间;劣势则是无法区分本底宇宙线和伽马射线信号,角分辨率一般,这类实验包括 Milagro、我国西藏羊八井的 ASy 和 ARGO 实验等。各种实验对于伽马射线的灵敏度可由图 1 得到。

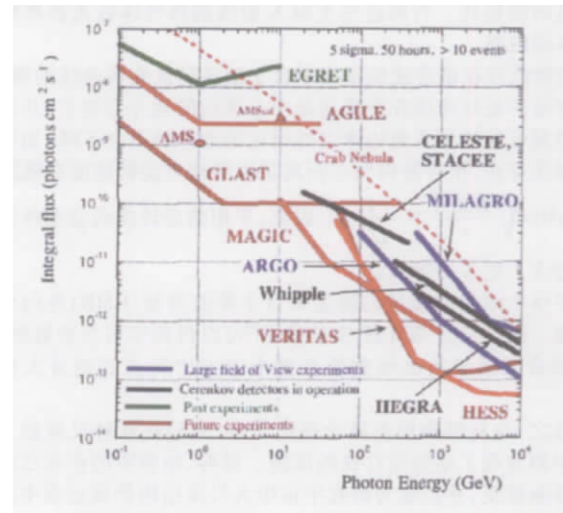


图 1 各种实验对于伽马射线的灵敏度^[16]

Fig. 1 Sensitivities of different gamma ray experiments^[16]

由于伽马射线传播不受到磁场、星际介质等的影响,观测伽马射线可以回溯到它的起源,因此暗物质湮灭到伽马射线的过程也是研究最多的过程。暗物质湮灭到伽马射线的流量由下式决定:

$$\frac{d\Phi}{dE} = \frac{d\Phi_{\text{int}}}{dE} (E) \times \Phi^{\text{CR}}(\theta) \quad (3)$$

其中

$$\frac{d\Phi_{\text{int}}}{dE} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_\chi^2} \frac{dN_\gamma}{dE} \quad (4)$$

它是完全由暗物质的粒子物理性质所决定的,如暗物质的湮灭截面、质量,以及湮灭的伽马射线能谱等。

$$\Phi^{\text{astro}} = \frac{1}{d^2} \int_{\Delta\Omega(\psi)} \rho^2(r) dv = \int_{\Delta\Omega(\psi)} d\Omega \int_{l,0.5} \rho^2(r) dl \quad (5)$$

其完全是由暗物质的空间分布决定的, d 代表源到观测者的距离, $\rho(r)$ 是暗物质的分布函数, $\Delta\Omega(\psi)$ 代表观测的方向上仪器的角分辨。可以看到, 暗物质湮灭的强度由它的粒子物理性质和空间分布共同决定, 而且两者直接相乘没有相互影响, 因此我们可以分别讨论这两部分的性质。

以超对称 neutralino 为例, 我们先来自粒子物理的影响。为了简单起见, 我们直接应用低能超对称做计算, 并根据简单的假定把超对称的破缺参数限制为 7 个, 由此我们得到图 2 所示的伽马射线积分流量, $I_E = \int_E \frac{dN^{\gamma}}{dE} dE$, 随 neutralino 质量而变化^[17]。

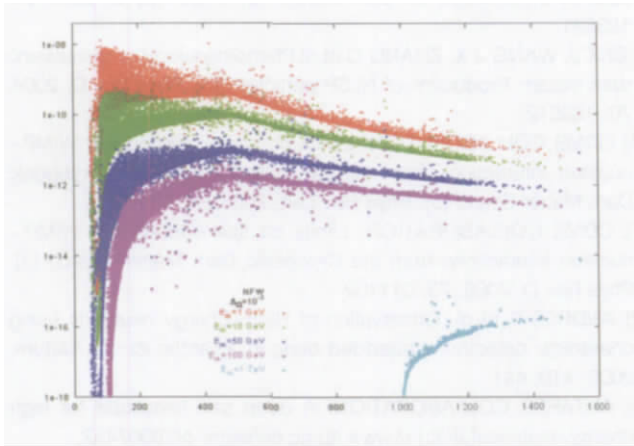


图 2 暗物质湮灭伽马射线的积分流量随 neutralino 质量变化的散点图

Fig. 2 Integrated flux of gamma rays from neutralino annihilation as function of the neutralino mass

由上至下代表取不同的积分流量的下限, 依次为 1、10、50、100 GeV 和 1 TeV。图中每个点代表一组超对称参数。因此, 图 2 表明, 由于超对称参数所具有的不确定性所带来的理论预言的不确定性的不确定性的大小, 相对于我们在七维参数空间自由取点, 这里的不确定性是非常小的。其原因在于我们对于参数空间所加的来自于对撞机和宇宙学观测的限制, 尤其是暗物质丰度给参数空间非常强的限制, 因此这里所预言的伽马流量的不确定性限制在一个量级左右。

暗物质的空间分布的信息主要来自于计算机模拟的结果。暗物质在银河系中心的密度最大, 因此银心也被当做研究暗物质湮灭理想的区域。此外, 计算机模拟发现, 在暗物质晕中, 还存在大量的自束缚的结团, 成为银河系的子结构。这些子结构的中心同样有很高的暗物质密度, 同样是探测暗物质湮灭的理想区域。与银河系中心相比, 子结构还有如下的优越之处。银河系中心是非常复杂的区域, 有超大质量黑洞和超新星遗迹存在, 因此可以产生伽马射线形成暗物质信号的背景; 而子结构中没有这样的问题, 其信号很干净。由冷暗物质的结构形成理论, 越小的子结构成团的时间越早, 当时的物质密度越高, 因此其中心的密度可能就越高。目前还不清楚银心的大质量黑洞如何影响暗物质在中心的分布, 因此有很大的不确定性, 而子结构中可以避免类似的问题。目前计算机模拟给出暗物质分布在团的中心还有较大的不确定性, 如图 3 所示。不同的暗物质分布 M99、M04、N03、NFW 等, 在半径较大时相互一致, 但在小半径处有很大的不同, 这会造成暗物质湮灭流量的不确定性。这种不确定性在研究来自银心的伽马信号时可造成 2-3 个量级的差异, 而对于子结构不确定性要小得多^[17], 这也是研究来自子结构湮灭的一个好处。

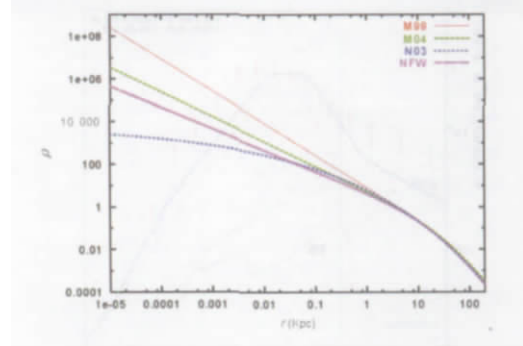


图 3 暗物质密度随半径变化的曲线

Fig. 3 Density of dark matter as function of the radius

计算机模拟的结果表明子结构随质量和空间分布, 可以用如下形式来拟合:

$$n(r) = 2n_0 \left(\frac{m}{M_{\text{vir}}} \right)^{-1.9} (1 + (r/r_{\text{vir}})^2)^{-1} \quad (6)$$

这里 $r_{\text{vir}} = 0.14 r_{\text{vir}}$ 约为星系维理半径的 14%, M_{vir} 是星系的维理质量, 而 n_0 是归一化常数, 要求来自子结构中暗物质的总量占星系维理质量的 10% 左右。最小的子结构的质量由暗物质解耦时的动力学所决定, 如 neutralino 做暗物质, 其最小的子结构可以小到 $10^{-6} M_{\odot}$, 即大约是地球的质量。而对于轴子做暗物质, 由于其为非热产生, 动量非常小, 最小的子结构甚至可以小到 $10^{-13} M_{\odot}$ ^[18]。对于来自子结构的暗物质湮灭可以通过 GLAST 卫星^[19]或者通过地面阵列探测。从图 1 我们看到, 卫星实验的阈值低, 但由于有效面积所限灵敏度远低于地面实验。而图 2 显示, 随着暗物质质量的增加其湮灭信号会慢慢变弱, 这时地面实验就显示出其相比卫星实验的优势了。虽然公式 (6) 给出了子结构随位置和质量变化的情况, 但无法预言子结构具体所在的位置, 因此探索来自暗物质子结构的湮灭信号需要大视场、高灵敏度的仪器进行全天的搜索。对于这一任务, 目前的契伦科夫望远镜由于其窄视场并不合适, 相反, 如我国西藏羊八井的 ARGO, 由于其所具有的宽视场正好具有这样的优势^[17]。

银河系子结构的存在可以大大提高暗物质湮灭到伽马射线的流量, 从而有可能解释 EGRET 实验所观测到的银河系弥散伽马射线的 GeV 超出问题。一般认为, 银河系的伽马射线来自于高能宇宙线和星际介质相互作用所产生的辐射, 人们用地球上测量到的宇宙线能谱计算了弥散伽马射线的能谱, 在 30-500 MeV 区间符合得很好, 但高于 1 GeV 观测值明显高于理论结果, 如图 4 所示, 被称为 GeV 超出问题^[20]。GeV 的超出有可能预示着来自于暗物质湮灭的贡献, 但有研究表明, 要解释弥散伽马射线的 GeV 超出, 需要暗物质的湮灭流量比一般计算的结果大 2 个量级^[21]。如果考虑到来自子结构的贡献, 则我们计算的结果可以很好地解释 EGRET 的 GeV 超出问题, 如图 5 所示。

除了伽马射线, 还可以通过探测正电子和反质子等带电粒子来探测暗物质湮灭信号, 但由于带电粒子受到银河系磁场的散射, 其传播的效应非常复杂。但带电粒子的优势在于星系中心暗物质分布的不确定性对于带电粒子的影响较小。对于反质子测量的结果, 到现在所得到的结果与宇宙线理论所计算的结果基本上是一致的^[22]。HEAT 气球实验测量了宇宙线中正电子的成分, 其结果表明正电子能谱在 10 GeV 附近有一个超出, 这也可能是来自暗物质湮灭的贡献^[23]。

总之, 暗物质间接探测是非常有希望探测到来自暗物质湮灭的信号的手段, 特别是随着新的实验的展开, 如 IceCube、GLAST、VERITAS、PAMELA、AMS02 等, 我们预期一定会有令人激动的新结果出现。

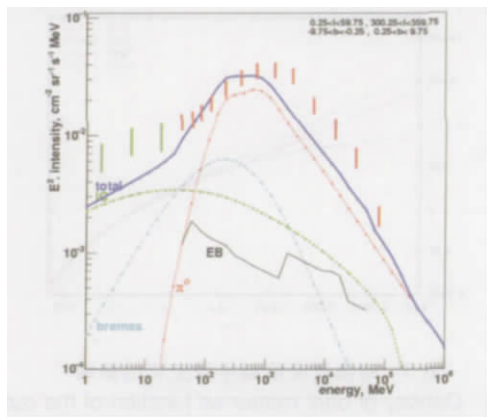


图 4 用地球上测量的宇宙线能谱计算的银河系弥散伽马射线能谱及 EGRET 实验值

Fig. 4 Spectrum of the Galactic diffuse gamma rays calculated according to the local spectrum and the measured spectrum by EGRET

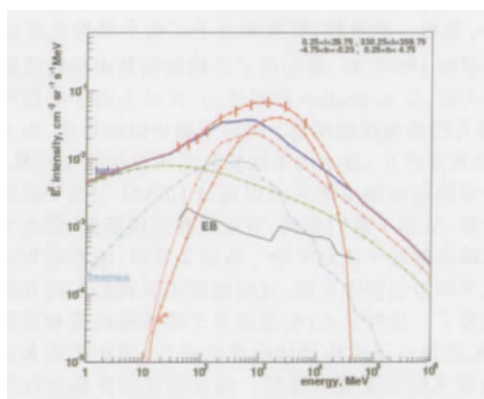


图 5 考虑了来自暗物质湮灭的贡献后所得到的弥散伽马射线的能谱

Fig. 5 Spectrum of the diffuse gamma rays taken the contribution from dark matter annihilation into account

5 结论

天文观测表明,在宇宙中存在大量的暗物质,这一结论已经得到了大量实验的证实。但宇宙中结构的形成需要非重子的冷暗物质,这一结论要求超出标准模型的新的粒子物理理论。文献中给出了许多可能的暗物质粒子的候选者,其中较为流行的是弱作用重粒子(WIMP),典型的WIMP是超对称理论所预言的neutralino粒子。人们设计了大量的实验来探测WIMP,直接探测实验所探测的是暗物质粒子与探测器弹性散射所留下的信号,而间接探测所探测的则是暗物质湮灭的产物,如高能的伽马射线、正电子、反质子和高能中微子等。在将来的几年时间里,随着新的实验不断投入运行以及大型强子对撞机(LHC)开始读取数据,我们期望暗物质之谜很快会得到解释。

参考文献(References)

- [1] ZWICKY F, Spectral displacement of extra galactic nebulae [J]. *Helv Phys Acta*, 1933, 6: 110.
- [2] SPERGEL D N. Three - Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology [J/OL]//

www.itp.ac.cn/astro- ph/0603449.

- [3] JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M, GRIEST K. Supersymmetric Dark Matter [J]. *Phys Rept*, 1996, 267: 195- 373.
- [4] SIKIVIE P. Axion Searches [J]. *Nucl Phys Proc Suppl*, 2000, 87: 41- 52.
- [5] KOLB E W, SLANSKY R. Dimensional reduction in the early universe: where have the massive particles gone?[J]. *Phys Lett B*, 1984, 135: 378.
- [6] FENG J, RAJARAMAN A, TAKAYAMA F. Superweakly interacting massive particles[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 011302.
- [7] FENG J, RAJARAMAN A, TAKAYAMA F. SuperWIMP dark matter signals from the early universe[J]. *Phys Rev D*, 2003, 68: 063504.
- [8] BI X J, LI M, ZHANG X. Fermionic partner of the quintessence field as a candidate for dark matter [J]. *Phys Rev D*, 2004, 69: 123521.
- [9] BI X J, WANG J X, ZHANG C, et al. Phenomenology of quintessino dark matter: Production of NLSP particles [J]. *Phys Rev D*, 2004, 70: 123512.
- [10] CDMS COLLABORATION. Limits on spin- independent WIMP- nucleon interactions from the two - tower run of the Cryogenic Dark Matter Search[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 011302.
- [11] CDMS COLLABORATION. Limits on spin- dependent WIMP- nucleon interactions from the Cryogenic Dark Matter Search [J]. *Phys Rev D*, 2006, 73: 011102.
- [12] ANDRES E, et al, Observation of High- Energy neutrinos using cherenkov detectors embedded deep in antarctic ice [J]. *Nature*, 2000, 410: 441.
- [13] ANTARES COLLABORATION. A deep sea telescope for high energy neutrinos[J/OL] // www.itp.ac.cn/astro- ph/9907432.
- [14] AHRENS J, et al, Sensitivity of the icecube detector to astrophysical sources of high energy muon neutrinos [J]. *Astropart Phys*, 2004, 20: 507- 532.
- [15] ACKERMANN M. et al, Limits to the muon flux from neutralino annihilations in the sun with the AMANDA detector [J]. *Astropart Phys*, 2006, 24: 459- 466.
- [16] MORSELLI A, LIONETTO A, CESARINI A, et al. Search for Dark Matter with GLAST [J]. *Nucl Phys Proc Suppl*, 2002, 113: 213- 220.
- [17] BI X J. Gamma rays from the neutralino dark matter annihilations in the milky way substructures [J]. *Nucl Phys B*, 2006, 741: 83- 107.
- [18] DIEMAND J, MOORE B, STADEL J. Earth- mass dark- matter haloes as the first structures in the early Universe [J]. *Nature*, 2005, 433: 389- 391.
- [19] KOUSHIAPPAS A M, ZENTNER A R, WALKER T P. The observability of gamma- rays from neutralino annihilations in Milky Way substructure [J]. *Phys Rev D*, 2004, 69: 043501.
- [20] STRONG A W, MOSKALENKO I V, REIMER O. Diffuse continuum gamma- rays from the galaxy [J]. *Astrophys J*, 2000, 537: 763- 784; Erratum- ibid, 2000, 541: 1109.
- [21] DE BOER W, SANDER C, ZHUKOV V, et al. EGRET excess of diffuse galactic gamma rays as tracer of dark matter [J]. *AstronAstrophys*, 2005, 444: 51.
- [22] MAENO T, ORITO S, MATSUNAGA H, et al. Successive measurements of cosmic - ray antiproton spectrum in a positive phase of the solar cyc[J]. *Astropart Phys*, 2001, 16: 121- 128.
- [23] BALTZ E A, EDSJO J. Positron propagation and fluxes from neutralino annihilation in the halo [J]. *Phys Rev D*, 1999, 59: 023511.

(责任编辑 胡春华)