

太阳邻域的小型及微型暗晕和中等质量黑洞*

赵红胜

(*Scottish University Physics Alliance, University of St Andrews, KY16 9SS, UK*)

毕效军[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 银河系中可能存在 10^3 — 10^4 个中等质量的黑洞 (10^2 — $10^3 M_{\odot}$) 和 10^3 个小型暗晕 (质量为 $10^6 M_{\odot}$) 或 10^{15} 个微型暗晕 (质量 $10^{-6} M_{\odot}$)。离我们最近的微小暗晕和黑洞可能只有 0.3—3000 光年。如果暗物质是可以自湮灭的中超子 (即最轻的中性超对称粒子, neutralino) 这些子结构所产生的高能 γ 射线就有希望被下一代 γ 射线探测器 (如 GLAST) 探测到。

关键词 小(微)型暗晕, 中等质量黑洞, 暗物质湮灭, γ 射线

Dark mini – halos, micro – halos and intermediate – mass black holes in the solar neighborhood

ZHAO Hong-Sheng

(*Scottish University Physics Alliance, University of St Andrews, KY16 9SS, UK*)

BI Xiao-Jun[†]

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

Abstract Galaxies like the Milky Way may each be host to 10^3 — 10^4 intermediate mass black holes ($10^2 M_{\odot}$ — $10^3 M_{\odot}$) and 10^3 minihalos of $10^6 M_{\odot}$ or 10^{15} microhalos of $10^{-6} M_{\odot}$. Our nearest micro/mini – halos or black holes might be only 0.3—3000 light years away. If dark matter is composed of self – annihilating neutralinos, then these substructures hold the promise of being detectable by next generation γ – ray detectors such as GLAST.

Keywords dark mini-halos (micro – halos), intermediate – mass black holes, dark matter annihilation, γ – ray

1 引言

现代宇宙学普遍假设宇宙中存在大量的暗或不发光的物质, 而且很可能就是超对称理论中预言的“新”粒子, 其中质量最低的超对称中性费米子 neutralino (此后称为中超子) 为最有希望的暗物质候选者。中超子是自身的反粒子, 质量 $m_{\tilde{\chi}}$ 在 10 GeV—1 TeV 之间。在最早期的宇宙里, 极端相对论运动的中超子通过碰撞和自湮灭, 与光子、正负电子和其他重子达到热力学平衡, 其数密度与光子数密度相当。当宇宙的温度下降到约 $m_{\tilde{\chi}}/20$ 时, 中超子已经是非相对论的, 其数密度随 $T^3 e^{-m/T}$ 指数衰减, 直到其碰撞自由程 ($\propto \frac{1}{\alpha}$) 大于宇宙的哈勃尺标 $cH^{-1} \propto T^{-1}$ 。

此后中超子与其他物质解耦, 其热运动速度随红移反比衰减, 现在几乎为零, 因此被称为冷物质。其丰度与其湮灭截面成反比,

$$\Omega = \frac{3 \times 10^{-37} \text{ cm}^2}{\sigma(\nu/c)} \approx (0.1 - 1),$$

所以中超子的弱相互作用截面能够解释宇宙中 $\Omega \approx 0.3$ 的暗物质。

解耦后的中超子有一定的原始功率谱, 使得它们的空间分布在不同尺度上有不同程度的不均匀性。由于中超子热运动速度不完全为零, 最小尺度上的不均匀性会被热运动抹平。在较大尺度上, 引力分布的不均匀性会导致坍缩和成团。坍缩的时标随团

* 国家自然科学基金(批准号 10575111)资助项目
2005-10-12 收到初稿 2006-01-17 修回

[†] 通讯联系人. Email: bixj@mail.ihep.ac.cn

的质量而延长,这就是所谓的等级坍缩.小质量的暗晕最早形成,星系质量的暗晕是由小暗晕后来合并而形成的.

热运动使得质量小于 $10^{-6} M_{\odot}$ 的暗晕不能形成,所以宇宙中的第一批暗晕是 $10^{-6} M_{\odot}$ (约为地球质量)的微型暗晕,是在 $z = 64$ 的时候开始形成的.数值和解析模型表明,宇宙中 1/1000 的暗物质至今仍处于地球质量的微暗晕当中,所以银河系可能含有 10^{15} 个这样的微暗晕^[1].离我们最近的微暗晕可能只有 $0.1 \text{ pc} = 0.3 \text{ 光年}$,这样高密度的近邻的结构给我们提供了间接探测暗物质的可能性.

显然宇宙中最早的一批恒星不可能在 $10^{-6} M_{\odot}$ 的暗晕中形成.恒星的形成要等待到 $z = 22$.此时 $10^6 M_{\odot}$ 的小暗晕半径大约为 60 pc ,里面可以包含 $10^4 M_{\odot}$ 的 H 和 He 混合物.由于内部热运动在 10 km s^{-1} 数量级,气体的温度在 1500 K ,所以分子氢可以形成.由于其中不含任何金属元素,气体冷却很缓慢,导致大质量的恒星($100\text{--}1000 M_{\odot}$)的形成.这些恒星极不稳定,变化很快,有一半到全部的质量以星风和超新星的形式很快($10^6\text{--}10^7$ 年)逃逸出来,有一半的质量($100 M_{\odot}\text{--}1000 M_{\odot}$)进到黑洞之中.所以新一批恒星的遗迹是 $10^2\text{--}10^3 M_{\odot}$.黑洞和 $10^6 M_{\odot}$ 小暗晕,它们在宇宙中占 1/1000.

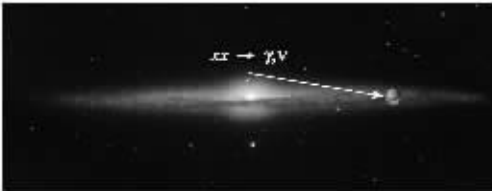


图1 间接探测示意图

这些小型或微型暗晕的存在对于暗物质粒子的间接探测是非常有利的.目前暗物质探测实验大致可以分为直接探测和间接探测两类:直接探测实验探测的是地球周围暗物质与探测器物质发生碰撞所产生的信号;间接探测实验探测暗物质粒子湮灭的产物,如高能 γ 射线、中微子、反质子和正电子等(图1是间接探测实验的示意图).直接探测实验只能探测到存在于地球周围的暗物质粒子,而间接探测和直接探测相互补充,可以探测银河系甚至河外星系暗物质的信号.由于暗物质湮灭的流强和暗物质的密度平方成正比,因此小(微)型暗晕的存在大大提高了湮灭产物的流强,有利于进行间接探测.正因为如此,间接探测实验也多是探测银河系中心,或

者银河系中小型暗物质晕中的湮灭信号.小暗晕对于湮灭信号的贡献我们在下一节中具体讨论.

2 模型

太阳邻域的暗物质密度因为许多小暗晕变得不均匀,有涨落.我们把每一个小暗晕或微暗晕近似为一个球状的密度分布.这个密度与太阳邻域的暗物质的平均密度的对比度可以用^[2]

$$\alpha(r) = C_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 \right]^{-1/2} \quad \rho \leq r \leq r_1$$

来描述,对小暗晕 $r_0 = 1.6 \text{ pc} = 5 \text{ 光年}$, $r_1 = 630 \text{ pc} = 1900 \text{ 光年}$, $C_0 = 62500$;对微暗晕 $r_0 = 0.005 \text{ pc} = 0.45 \text{ 光年}$, $r_1 = 0.063 \text{ pc} = 0.19 \text{ 光年}$, $C_0 = 75$.这里 C_0 是子暗晕在特征尺度 r_0 的对比度, r_1 是截断半径,大于此半径时不同的子暗晕会互相覆盖.

图2、图3和图4显示小暗晕和微暗晕的对比度的空间分布,球壳的对比度分别是 $C^2 = 1$ (最外边的球壳), 100 (中), 10000 (最内部).

湮灭信号与密度对比度的平方 C^2 成正比.

$$F = \text{增益因子} = \int_0^r C^2(r) \cdot d\left(\frac{4\pi}{3} r^3\right) \left(\frac{4\pi}{3} r_1^3\right)$$

- 1 (光滑分布,无子暗晕),
- = 30 (微暗晕),
- 900 (小暗晕).

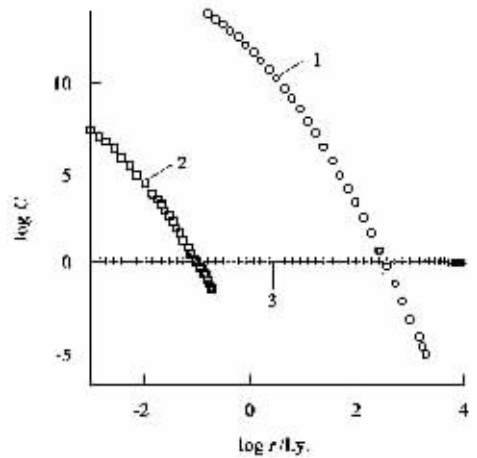


图2 小暗晕(图中曲线1)和微暗晕(图中曲线2)的对比度 $C^2(r)$ 随着暗晕半径 r (以光年为单位)的变化.图中横线3表示太阳附近的平均对比度($C^2 = 1$)

我们发现,微暗晕对于湮灭信号有相当影响.小暗晕会极大地增强湮灭信号^[3];尤其是当小暗晕的中心存在黑洞时,暗物质密度可能在黑洞周围被提高,从而大大提高湮灭产物的流量.

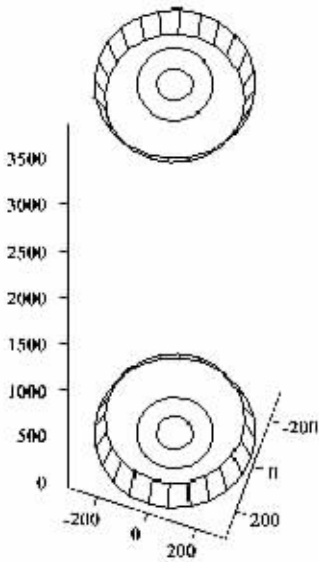


图3 小暗晕中暗物质相对自湮灭率(相对于太阳附近暗物质的平均自湮灭率)随半径变化的三维等曲面. 从外而内的曲面分别表示 $C^2 = 1, 10, 100, 1000$. 各轴的半径以光年为单位. 相邻的小暗晕在半径为 2000 光年的地方会相互碰触. 小暗晕总的自湮灭率, 即增益因子, 要对 C^2 在其体积内做积分, $C^2 > 1$ 的体积约 $(200 \text{ 光年})^3$

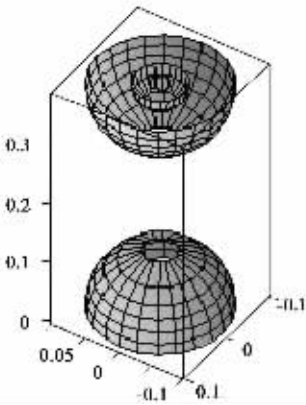


图4 与上图类似, 表示微暗晕的相对湮灭率等曲面, 自外而内分别指 $C^2 = 1, 10, 100, 1000$. 在 0.2 光年的地方, 相邻的微暗晕相互碰触. 同样, 微暗晕总的增益因子要对 C^2 在其体积内做积分, $C^2 > 1$ 的体积只有约 $(0.1 \text{ 光年})^3$

图5 给出了由于小暗晕存在而导致的增益因子. 角度 ψ 表示观测的方向相对于银河系中心所夹的角度. 当 $\psi = 60^\circ$ 时, 无子结构贡献取为 1. 我们看到, 由于子结构的存在导致一个很大的增益因子, 从几倍到几千倍. 这里最大的增益来自于质量很大的子结构的贡献.

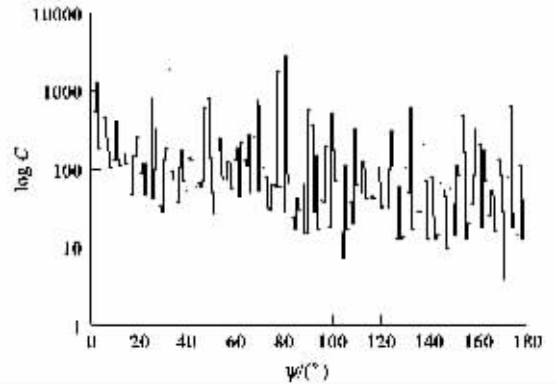


图5 相对于银河系中心不同角度暗物质湮灭所产生的 γ 射线的相对流强. 没有子结构时, 相对银河系中心 60° 方向的 γ 射线流强取为 1, 子结构的存在大大提高了 γ 射线的流强

3 实验观测现状

对于间接探测, 我们着重介绍对于暗物质湮灭所产生的 γ 射线的探测. 用于间接探测暗物质湮灭所产生的 γ 射线的实验大致可以分为三类: 卫星实验, 如 EGRET, GLAST, AMS 等; 大气切连科夫望远镜, 如 HESS, VERITAS, CANGROO 等; 地面广延簇射阵列, 如羊八井实验, MILAGRO, HAWC 等; 正在建设中的中国-意大利 ARGO 项目是目前地面阵列中最先进、灵敏度最高的实验. 这三类实验各有优缺点, 互为补充. 例如, 卫星实验能干净地排除本底, 能量分辨率和角分辨率都很高, 但受实验条件所限, 探测面积很小, 对于高能 (TeV 能标) 宇宙线的探测无能为力 (因为高能宇宙线的流量非常小); 大气切连科夫望远镜探测面积大, 本底排除能力强, 角分辨率高, 但对观测条件要求苛刻, 只能在晴朗无月的夜晚每次观测几个小时, 而且观测视场窄, 主要用于对已知点源的观测. 地面阵列的优点是大视场、大探测面积、风雨无阻、可全天候观测, 但其主要缺点是本底排除能力一般, 噪声高.

在间接探测实验中, 到目前为止已经有不止一个实验观测到了一些“奇异”事例, 可能就是暗物质湮灭的产物, 但目前的情形还不是很明朗, 对于这些观测到的事例的解释也不一致, 因而用更加灵敏的实验做进一步观测是非常有必要的. 如 EGRET 和 HESS 实验都在银河系中心探测到了远超出本底的高能的 γ 射线发射, 可能就是由暗物质湮灭所产生的, 但是两个实验探测到的 γ 射线能谱有着非常大的差异, 不可能由同一种暗物质粒子所产生. 这些都

