暗物质间接探测进展



中国科学院紫金山天文台

2025.06.25

WIMP暗物质长期以来是最受关注的候选体

DM+DM ↔ SM+SM



2

国际相关实验

PAMELA(意)



AMS-02(美欧中等)

OF(\$1,\$2)

Ran Side

Radiators

AMS



Fermi(美)



KSACADE(德)



HESS/MAGIC/VERITAS/CTA(美欧日)

















LHAASO (2021-)



一、伽马射线线谱探测

6

暗物质最具辨识度的信号: 伽马射线线谱



Fermi collaboration 2010

130 GeV疑似线谱 or 仪器误差?



Bringmann+ 2012; Weniger 2012

Fermi collaboration 2013

43 GeV疑似线谱?







Fermi星系团数据中发现43 GeV 线谱迹象(Liang et al. 2016)

置信度随时间演化有增有降 (Shen et al. 2021 ApJ) 置信度再度增加,超过4o (Fan et al. 2407.11737)

DAMPE伽马射线线谱搜寻

借助优异的能量分辨率 (~1%),DAMPE获得 对伽马射线线谱高灵敏 度搜寻结果,对暗物质 衰变产生单能伽马参数 给出最严格限制

局限于统计量, DAMPE尚无法有效检 验43 GeV线谱信号的 真假





二、银心伽马射线超出

11

Goodenough & Hooper (2009) Vitale & Morselli (2009) Hooper & Goodenough (2011) Boyarsky et al. (2011) Hooper & Linden (2011) Abazajian & Kaplinghat (2012) Gordon & Macias (2013) Huang et al. (2013) Abazajian et al. (2014) Daylan et al. (2014) Zhou et al. (2014)



Hooper & Linden 2011



Gorden & Macias 2013



暗物质解释

Daylan+ 2016

Yuan & Zhang 2014

Strong Support for the Millisecond Pulsar Origin of the Galactic Center GeV Excess

Richard Bartels, Suraj Krishnamurthy, and Christoph Weniger Phys. Rev. Lett. **116**, 051102 – Published 4 February 2016

Evidence for Unresolved γ -Ray Point Sources in the Inner Galaxy

Samuel K. Lee, Mariangela Lisanti, Benjamin R. Safdi, Tracy R. Slatyer, and Wei Xue Phys. Rev. Lett. **116**, 051103 – Published 4 February 2016

Dark Matter Strikes Back at the Galactic Center

Rebecca K. Leane, Tracy R. Slatyer

Statistical evidence has previously suggested that the Galactic Center GeV Excess (GCE) originates largely from point sources, and unmodeled source populations on identifying the true origin of the GCE using non-Poissonian template fitting (NPTF) methods. In a unmodeled sources in the Fermi Bubbles can lead to a dark matter signal being misattributed to point sources by the NPTF. We disc real Fermi data, finding that large artificial injected dark matter signals are completely misattributed to point sources. Consequently,

暗物质解释和已有限制自洽



PDG 2022



DAMPE卫星的结果独立证实银心伽马射线超的存在

三、正负电子超出

正负电子超出



多个实验观测到宇宙线正、负电子能谱在高能段存在超出背景模型预期的现象

正负电子超出



 脉冲星和暗物质模型均 可拟合观测数据

 二者能谱相似,在现有 精度下无法区分 电磁辐射对暗物质模型的限制



微波背景辐射和弥散伽马射线等观测<mark>排除</mark>拟合正负电子超出的简单暗物质模型区间; 需要引入速度依赖模型等相对复杂的模型

Yuan+ 2017

新传播模型下暗物质解释



考虑宇宙线传播模型的新进展——双区扩散模型,所需暗物质湮灭截面降低,某些情况 下可和电磁辐射限制相容

Lv+ 2307.07114

能谱精细测量有可能区分二者



脉冲星族群性质存在分布,因此其累加贡献可能出现wiggle状能谱结构,而且正、负 电子能谱结构可能存在关联的特征

各向异性测量



- 脉冲星模型通常会存在较大的各向异性
- 暗物质模型预期的各向异性较小,但如果存在邻近的暗物质子结构,也可预期存在 较为显著的各向异性

Fermi collaboration 2010 PRD

四、反质子超出

反质子超出



反质子观测数据和背景模型相比,在1-10 GeV存在微小的超出
可用暗物质湮灭模型解释,且模型参数和解释银心伽马射线超的参数高度一致

AMS-02 7-year数据



TABLE IV: DM parameters, χ^2 values, number of free fit parameters, and significance for the best fits. The total χ^2 values refer to the fits with (without) DM.

Parameter	L=7.17 kpc	L=3.44kpc
$m_{\chi}(\text{GeV})$	132	166
$\langle \sigma v \rangle (10^{-26} \mathrm{cm}^3 \mathrm{s}^{-1})$	0.98	1.71
$\chi^2_{\rm tot}(200 \text{ points})$	65.1(73.6)	59.9(65.1)
No. of fit param.	19(17)	19(17)
$\Delta \chi^2$	8.5	5.2
local sig.	2.7σ	2.1σ

根据AMS-02 7-year观测数据(背景宇宙线传播模型同时也更新),反质子超的置信 度降低

Lv+ 2304.00760

背景模型系统误差:相互作用截面



Ding+ 1808.03612

Lin+ 1614.04001

背景模型系统误差:太阳调制

Scrutinizing the impact of the solar modulation on AMS-02 antiproton excess

Kai-Kai Duan^a, Xiao Wang^{a,b}, Wen-Hao Li^{a,b}, Zhi-Hui Xu^c, Yue-Lin Sming Tsai^{a,b}, and Yi-Zhong Fan^{a,b}

- AMS-02 11-year随时间变化的观测数据,可限制不同时期的太阳 调制模型
- 力场近似模型中暗物质信号置信 度较高,更加复杂的调制模型中 置信度下降



Duan+ 2506.13352

五、其他相关进展

LHAASO拓展超重暗物质探测区间



KM3NeT探测到最高能量中微子





利用超重暗物质衰变可解释该观测事例

KM3NeT collaboration 2025

第二高能宇宙线事例: Amaterasu event





利用超重暗物质衰变解释该事例的参数 和极高能光子与中微子观测结果矛盾

TA collaboration 2023





10



正负电子超

10³



- 它们的天体物理解释、观测系统误差等效应还不能完全排除
- 更精确的实验测量和更深 入的背景模型将有助于更 好地理解这些超出的本质

展







HERD



VLAST