

在强子对撞机上“测量”最小暗物质模型的 遗迹密度

龚昶

(与曹庆宏老师、谢柯盼同学合作)

Measuring relic abundance of minimal dark matter at hadron colliders.

Sci. China-Phys. Mech. Astron., 62 (2019), 981011.

北京大学物理学院

第三届北师大暗物质研讨会

2019年12月9日 珠海



报告大纲

- 1 研究动机与思路
- 2 最小暗物质模型
- 3 对撞机模拟
- 4 遗迹密度限制
- 5 总结与展望

家喻户晓的“暗物质”

李连杰：我们学佛的人，其实就是学习从不了解宇宙、不了解自我，到逐步有所了解、最后更广泛地了解，是这么一个过程。现在西方的量子力学已经非常清楚，你查一些科学资料就知道，我们人类对宇宙的知识只从六个信息口接受，就是我们所谓的六根，眼、耳、鼻、舌、身、意，就是我看到什么了，我听到什么了，我闻到了什么，我吃到了什么，我摸到了什么，我感觉到了什么，综合之后我判断哪个是好的哪个是坏的，就是这样。但是这个只占宇宙的4%，现在数据已经非常清楚了，有人说4%有人说5%，不会超过这个数字。我们量子力学已经知道，有另外的将近百分之二十多叫暗物质。我们知道它存在，但是我们今日的科学水平还不能测到它。除了这百分之二十多的暗物质之外，还有百分之五十九六十几的是叫暗能量，而暗能量是怎么运作的，科学家就完全解决不了这个课题了。但是我们知道，2500年前的那位王子，他已经证悟了所有物质在宇宙中、在无量的银河系的之间的关系是什么，人的每一个细胞之间的关系是什么，时间是什么，空间是什么，他都有分析。我们用今天的科学知识简单地推理，就可以知道我们为什么只知道4%，你现在拿了个电脑在我面前，我们谈话结束，你可以储存，同时发给北京发给上海发给美国，大家都会收到，那中间的这个信号我们并没有看到和摸到，我们六个信息口都没触碰到，但是这不代表这个能量不存在，我们相信它存在，你也相信，是吧，只是我们肉体的感官碰触不到这种物质。以前我

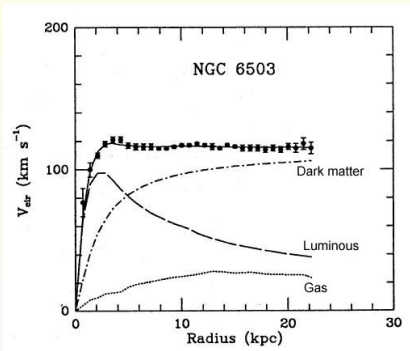
图片：2018年5月李连杰访谈。https://www.sohu.com/a/233282028_125537, 2008



暗物质的概念

- 所谓暗物质，指的是目前我们能够通过引力效应推知其存在，却未能通过其他相互作用探测到的，有别于目前已知普通物质的新物质形态。
- 已经有大量观测证据证实在星系，星系团，超星系团，直至宇宙学尺度上均广泛分布着暗物质。
- 当前暗物质问题的研究重点已从其存在性转向其组成和性质，尤其是粒子物理学家们更愿意相信暗物质的本质为未知粒子，从而专注于其粒子属性。

暗物质的存在证据



图片：漩涡星系 NGC 6503 的旋转曲线，误差棒表示实验数据，虚线、点线、点划线分别代表发光物质、气体、暗物质三种组分各自的贡献，实线为这三者之和的拟合值。
K. G. Begeman, A. H. Broeils, and R. H. Sanders. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 249 (1991), 523.



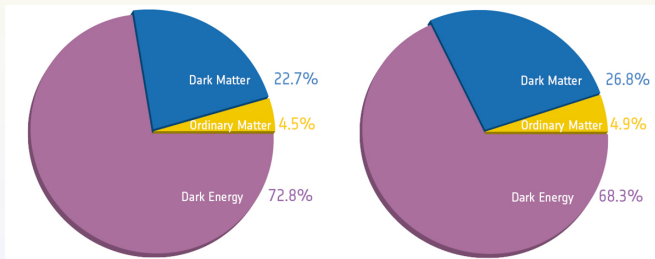
图片：子弹星系团 1E 0657-56 的合成图片，粉色区域代表 Chandra X-射线天文台的观测结果，蓝色区域代表引力透镜重建结果，橘色和白色亮点代表 Magellan 光学望远镜和 Hubble 空间望远镜观测到的星系。
NASA finds direct proof of dark matter.
<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/index.html>, 2006.

暗物质的存在证据

表格: 有关宇宙构成的宇宙学参数。

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98 (2018), 030001.

Quantity	Symbol	Value
dark energy density of the Universe	Ω_{Λ}	0.692 ± 0.012
pressureless matter density of the Universe	Ω_m	0.308 ± 0.012
baryon density of the Universe	Ω_b	0.0484(10)
cold dark matter density of the Universe	Ω_c	0.258(11)
CMB radiation of the Universe	Ω_{γ}	$5.38(15) \times 10^{-5}$
neutrino density of the Universe	Ω_{ν}	$< 0.016(\text{Planck CMB}); \geq 0.0012(\text{mixing})$



图片: 宇宙组成饼图。The Planck Collaboration, ESA. 2013.

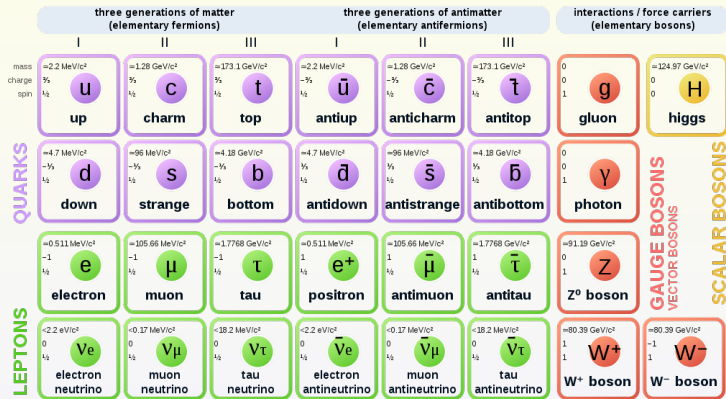


暗物质粒子的性质

- 在宇宙学时间尺度上是稳定的。
- 参与引力相互作用。
- 不参与或极其微弱地参与引力之外的相互作用。
- 具有一定的质量而满足遗迹密度的观测。
- 在热退耦的假设下，退耦时是非相对论的(冷暗物质)。

粒子物理标准模型

Standard Model of Elementary Particles



图片：粒子物理标准模型中的所有粒子。

Particle physics. https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics, 2019.

弱作用大质量粒子(WIMPs)

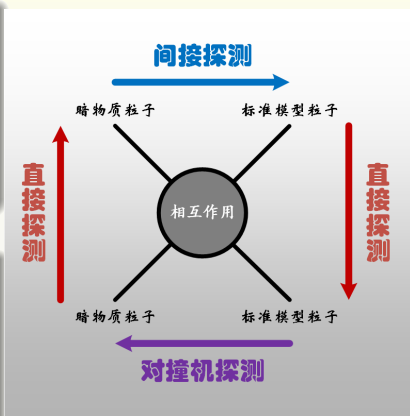
WIMPs 奇迹

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle \sigma v \rangle_{\text{ann}}}$$

$$\sim 0.1 \left(\frac{0.01}{\alpha_{\text{DM}}} \right)^2 \left(\frac{M_{\text{DM}}}{100 \text{ GeV}} \right)^2$$

理论模型中的 WIMPs

- SuperSymmetry 模型中最轻的 Neutralino。
- Universal Extra Dimension 模型中最轻的 K-K Excitation。
- Little Higgs 模型中最轻的 T-odd Particle。



图片: WIMPs 探测方法示意图, 改编自
 毕效军, 殷鹏飞, 周宁. 物理, 44 (2015), 11.

画鬼易

[编辑](#)[讨论](#)

宥有为齐王画者。齐王问曰：“画孰最难者？”曰：“犬马最难。”曰：“孰易者？”曰：“鬼魅最易。”曰：“何为？”曰：“夫犬马，人所共知，旦暮见之，不可类之；鬼魅无形也，故易也。”

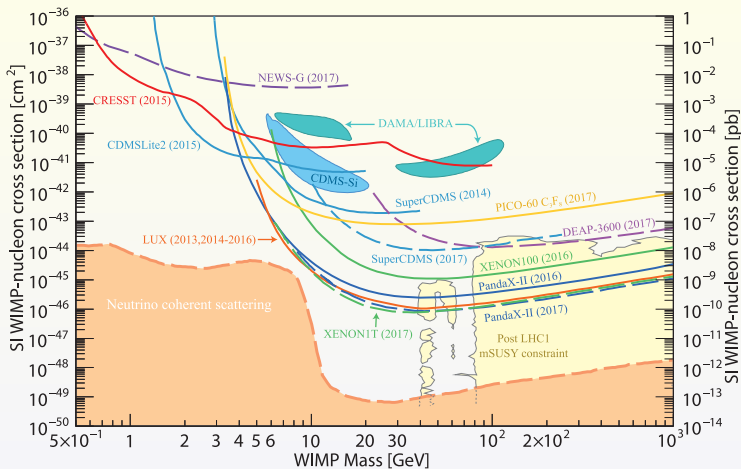
作品名称	画鬼易	创作年代	战国末期
外文名称	draw a ghost is easy	作品出处	《韩非子·外储说左上》
作品别名	画鬼容易，画犬马难	文学体裁	文言文
		作者	韩非子

图片：百度百科，画鬼易。<https://baike.baidu.com/item/画鬼易>, 2019.



图片：未名湖畔。常青. 2014.

直接探测实验所得排除限

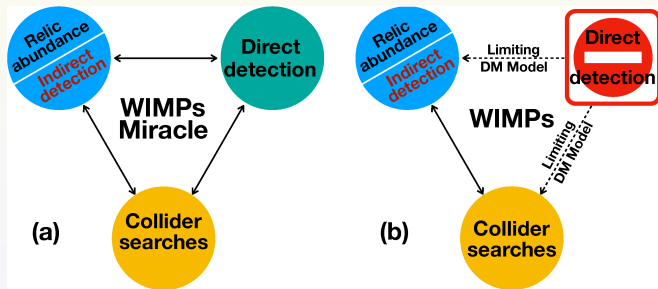


图片: 不同直接探测实验对 WIMP 与单个核子“自旋无关”散射截面的限制。
 M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* 98 (2018), 030001.

敢问路在何方

直接探测实验的零结果

- 地球周围没有暗物质?
- 实验材料对相互作用不敏感?
- 新物理模型的直接探测信号被圈图压低?



图片: 如果直接探测实验走不通, 结合对撞机探测和暗物质遗迹密度观测能得到什么?
 Qing-Hong Cao *et al.* *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 62 (2019), 981011.



总体思路

- 选择一种 WIMP 暗物质模型，可以是 UV 完整理论，也可以是有效模型；
- 通过对撞机实验蒙特卡洛模拟得到暗物质产生截面 $\sigma_{pp}(\text{SM}, \text{SM} \rightarrow \chi, \chi)$ 的上限(下限)；
- 而 σ_{pp} 与湮灭截面 $\sigma_{\text{ann}}(\chi, \chi \rightarrow \text{SM}, \text{SM})$ 存在较强正相关；
- 又因遗迹密度与湮灭截面近似成反比 $\Omega_\chi h^2 \sim 1/\langle\sigma v\rangle_{\text{ann}}$ ；
- 可以将对撞机的 σ_{pp} 上限(下限)转化为 $\Omega_\chi h^2$ 下限(上限)；
- 最后得到该模型遗迹密度占总观测值的百分比 $\mathcal{F} \equiv \Omega_\chi/\Omega_{\text{DM}}$ 下限(上限)；
- 根据这些限制对模型做相应的分析和讨论。



张宏浩老师的报告



最小暗物质模型

模型介绍

- 只增加一个电弱规范群 $SU(2)_L$ 的多重态 χ 。
- 电中性分量 χ_0 作为暗物质的候选者。
- 暗物质部分 χ 与标准模型粒子只通过电弱规范玻色子相互作用，没有其他中间媒介粒子。

M. Cirelli *et al.* Nucl. Phys., B753 (2006), 178-194.

模型选择

- 为避免目前直接探测的实验限制，禁止暗物质与 Z 玻色子在树图上有直接相互作用，需要 $Y_\chi = 0$ ，对于暗物质候选者有 $Q = T^3 = Y = 0$ 。
- 弱同位旋 j 为整数，我们选择 $j = 1, 2, 3$ ，对于 Dirac 和 Majorana 型 MDM 分别记为 D1, D2, D3 和 M1, M2, M3。

Dirac 情形

- χ 是一个弱同位旋为 j 的 $SU(2)_L$ 多重态

$$\chi = (\chi_j \quad \chi_{j-1} \quad \dots \quad \chi_{-j})^T.$$

- 定义 $g_{CG} = (j + m)(j - m + 1)$, 拉氏量为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_\chi^{\text{Dirac}} &= \bar{\chi} i \not{D} \chi - M_\chi \bar{\chi} \chi \\ &= \sum_{m=-j}^j \bar{\chi}_m (i \not{D} - M_\chi) \chi_m \\ &+ \sum_{m=-j}^j Q_m g (c_W Z_\mu + s_W A_\mu) \bar{\chi}_m \gamma^\mu \chi_m \\ &+ \left(\sum_{m=-j+1}^j \sqrt{g_{CG}} \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^- \bar{\chi}_{m-1} \gamma^\mu \chi_m + \text{h.c.} \right). \end{aligned}$$

Majorana 情形

- ξ 是一个弱同位旋为 j 的 2-分量 Weyl 旋量

$$\xi = (\xi_j \quad \xi_{j-1} \quad \dots \quad \xi_{-j})^T.$$

- 拉氏量为

$$\mathcal{L}_\xi^{\text{Majorana}} = \xi^\dagger i \bar{\sigma}^\mu D_\mu \xi - \frac{M_\chi}{2} (\xi U \xi + \text{h.c.}).$$

- 定义

$$\chi_0 = \begin{pmatrix} \xi_{0\alpha} \\ \xi_0^{\dagger\dot{\alpha}} \end{pmatrix},$$

$$\chi_m = \begin{pmatrix} \xi_{m\alpha} \\ (-1)^m \xi_{-m}^{\dagger\dot{\alpha}} \end{pmatrix},$$

$$g_{\text{CG}} = (j+m)(j-m+1).$$

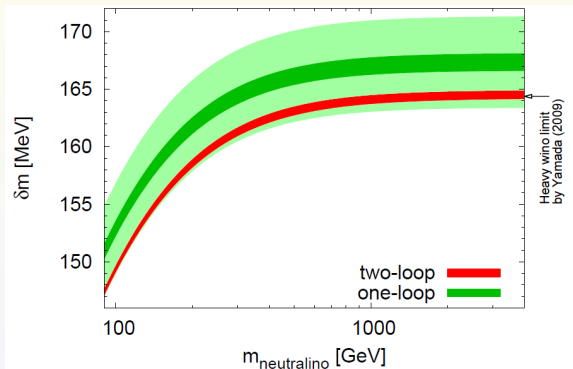
Majorana 情形

- 拉氏量为

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_\chi^{\text{Majorana}} &= \frac{1}{2} \chi_0 (i\not{\partial} - M_\chi) \chi_0 + \sum_{m=1}^j \bar{\chi}_m (i\not{\partial} - M_\chi) \chi_m \\
 &+ \sum_{m=1}^j Q_m g (c_W Z_\mu + s_W A_\mu) \bar{\chi}_m \gamma^\mu \chi_m \\
 &+ \left(\sum_{m=1}^j \sqrt{g_{\text{CG}}} \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^- \bar{\chi}_{m-1} \gamma^\mu \chi_m + \text{h.c.} \right).
 \end{aligned}$$

质量劈裂

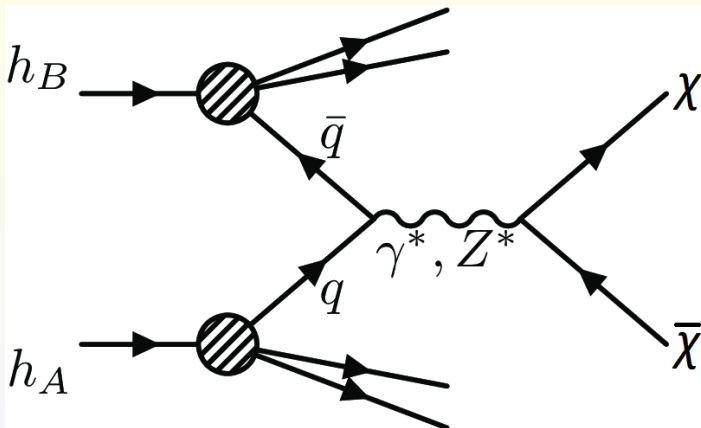
- 在树图水平上，暗物质部分的所有粒子质量简并。
- 电弱圈图修正产生质量劈裂，中性分量质量最轻，稳定。
- 带电分量不稳定，寿命 ~ 1 cm。



图片: Wino 质量劈裂变化曲线。

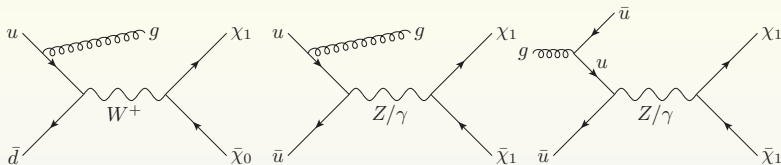
M. Ibe, S. Matsumoto and R. Sato, Phys. Lett., B721 (2013), 252-260.

主要产生过程



图片: Drell Yan 过程产生 MDM 粒子示意图, 可通过 disappearing tracks 方法探测。

Mono-jet 道探测



图片：Mono-jet 道探测 MDM 粒子典型费曼图。

主要背景： $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu}) + \text{jets}$ 和 $W^\pm(\rightarrow \ell^\pm\nu) + \text{jets}$ ($\ell = e, \mu, \tau$)。

Mono-jet 道探测

Selection cuts

$$\begin{aligned}
 p_T^{Lj} &> 20 \text{ GeV}, & |\eta^{Lj}| &< 2.4, \\
 E_T &> 30 \text{ GeV}, & \Delta\phi(\vec{p}_T^j, \vec{\cancel{p}}_T) &> 0.5.
 \end{aligned}$$

Veto cuts

$$\begin{aligned}
 e^\pm &: & p_T^e &> 10 \text{ GeV}, & |\eta^e| &< 2.5, \\
 \mu^\pm &: & p_T^\mu &> 10 \text{ GeV}, & |\eta^\mu| &< 2.4, \\
 \tau^\pm &: & p_T^\tau &> 18 \text{ GeV}, & |\eta^\tau| &< 2.3, \\
 \gamma &: & p_T^\gamma &> 15 \text{ GeV}, & |\eta^\gamma| &< 2.5, \\
 b\text{-jet} &: & p_T^b &> 20 \text{ GeV}, & |\eta^b| &< 2.4.
 \end{aligned}$$

A. M. Sirunyan *et al.* (The CMS Collaboration), Phys. Rev. D 97 (2018), 092005.

对 13 TeV LHC 的 Optimal cuts

- cut-1 : $p_T^{Lj} \geq 100 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 250 \text{ GeV},$
- cut-2 : $p_T^{Lj} \geq 100 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 500 \text{ GeV},$
- cut-3 : $p_T^{Lj} \geq 100 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 700 \text{ GeV}.$

对 100 TeV pp 对撞机的 Optimal cuts

- cut-I : $p_T^{Lj} \geq 400 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 200 \text{ GeV},$
- cut-II : $p_T^{Lj} \geq 400 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 500 \text{ GeV},$
- cut-III : $p_T^{Lj} \geq 400 \text{ GeV}, \cancel{E}_T \geq 1000 \text{ GeV}.$

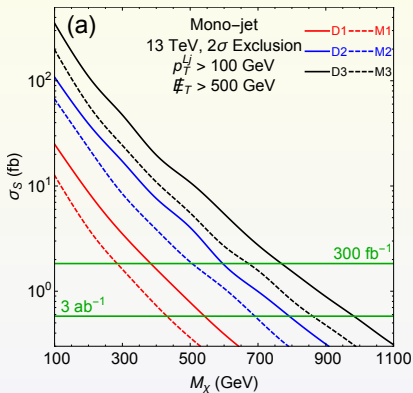
Mono-jet 道探测

Table 1 The number of signal and background events at the 13 TeV LHC with $m_{\chi_0} = 500$ GeV (top) and 100 TeV collider with $m_{\chi_0} = 1000$ GeV (bottom) with an integrated luminosity of 100 fb^{-1} . The statistical significance (S) of each individual scenario is also shown. Three cut scenarios are examined to optimize the significance of signal events; see eqs. (15) and (16)

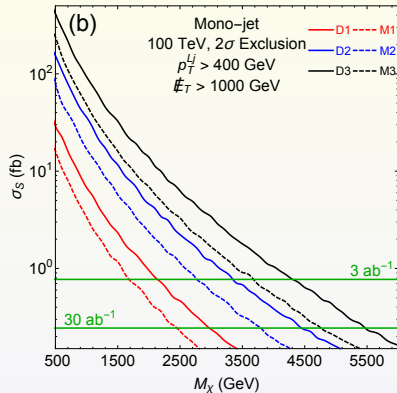
13 TeV LHC		Signal					Background		
$M_{\chi} = 500$ GeV	D1	D2	D3	M1	M2	M3	Z+jets	W^{\pm} +jets	All
Selection cut	7593	37904	105430	3813	18895	52878	376860500	1872116000	2248976500
Veto cut	7392	36256	100924	3644	18413	51482	359756000	1008355000	1368111000
Cut-1	443	2150	5767	207	1108	3187	423657	196429	620086
S	0.563	2.727	7.301	0.263	1.406	4.040	-	-	-
Cut-2	78	403	1082	36	190	555	12497	3354	15851
S	0.621	3.175	8.408	0.287	1.502	4.357	-	-	-
Cut-3	28	148	407	12	71	199	2814	709	3523
S	0.462	2.467	6.613	0.203	1.181	3.295	-	-	-
100 TeV		Signal					Background		
$M_{\chi} = 1000$ GeV	D1	D2	D3	M1	M2	M3	Z+jets	W^{\pm} +jets	All
Selection cut	29841	149110	417010	15073	74904	209110	3911173333	18976213142	22887386476
Veto cut	27713	138466	388068	14055	69655	194107	3690570000	12284410000	15974980000
Cut-I	2577	13041	36186	1310	6513	18451	2262530	1319165	3581695
S	1.361	6.882	19.056	0.692	3.439	9.733	-	-	-
Cut-II	2065	10650	29037	1056	5267	14893	849077	286632	1135709
S	1.936	9.962	27.018	0.990	4.935	13.914	-	-	-
Cut-III	678	3580	9325	337	1687	4828	41868	2817	44684
S	3.193	16.503	41.373	1.590	7.883	22.063	-	-	-

图片：经过不同 Cuts 后的信号和背景事例数。

Mono-jet 道探测



图片: 13 TeV LHC 上对应于 cut-2 的 2σ 排除限。



图片: 100 TeV pp 对撞机上对应于 cut-III 的 2σ 排除限。

Mono-jet 道探测

表格: 13 TeV LHC 上对应于不同 Optimal cuts 的 2σ 质量排除限。

13 TeV (3 ab^{-1})	D1	D2	D3	M1	M2	M3
Cut-1	531	767	935	434	668	832
Cut-2	544	794	983	432	691	864
Cut-3	522	781	989	391	682	853
The best	544	794	989	434	691	864

表格: 100 TeV pp 对撞机上对应于不同 Optimal cuts 的 2σ 质量排除限。

100 TeV (30 ab^{-1})	D1	D2	D3	M1	M2	M3
Cut-I	2161	3305	4203	1768	2778	3597
Cut-II	2419	3676	4630	1993	3070	3956
Cut-III	2970	4465	5479	2449	3797	4772
The best	2970	4465	5479	2449	3797	4772



暗物质湮灭截面的非相对论展开

展开方法

将 $s = 4M_\chi^2 + M_\chi^2 v^2$ 代入 σ 中, 得到

$$\langle\sigma v\rangle = a + b\langle v^2\rangle + \mathcal{O}(\langle v^4\rangle) \approx a + 6b \times \frac{T_F}{M_\chi}.$$

展开结果

D1 :	$a = \frac{111g^4}{32\pi M_\chi^2},$	$b = -\frac{9g^4}{256\pi M_\chi^2};$
D2 :	$a = \frac{1035g^4}{32\pi M_\chi^2},$	$b = \frac{1395g^4}{256\pi M_\chi^2};$
D3 :	$a = \frac{2457g^4}{16\pi M_\chi^2},$	$b = \frac{4977g^4}{128\pi M_\chi^2};$
M1 :	$a = \frac{111g^4}{64\pi M_\chi^2},$	$b = -\frac{9g^4}{512\pi M_\chi^2};$
M2 :	$a = \frac{1035g^4}{64\pi M_\chi^2},$	$b = \frac{1395g^4}{512\pi M_\chi^2};$
M3 :	$a = \frac{2457g^4}{32\pi M_\chi^2},$	$b = \frac{4977g^4}{256\pi M_\chi^2}.$

暗物质湮灭截面的非相对论展开

DM annihilation channel	D1		D2		D3		
	Coefficients	BR (%)	Coefficients	BR (%)	Coefficients	BR (%)	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow q\bar{q}$	a	$\frac{27g^4}{16\pi M_\chi^2}$	47.9	$\frac{135g^4}{16\pi M_\chi^2}$	25.4	$\frac{189g^4}{8\pi M_\chi^2}$	15.0
	b	$-\frac{45g^4}{128\pi M_\chi^2}$		$-\frac{225g^4}{128\pi M_\chi^2}$		$-\frac{315g^4}{64\pi M_\chi^2}$	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow \ell\bar{\ell}$	a	$\frac{9g^4}{16\pi M_\chi^2}$	16.0	$\frac{45g^4}{16\pi M_\chi^2}$	8.5	$\frac{63g^4}{8\pi M_\chi^2}$	5.0
	b	$-\frac{15g^4}{128\pi M_\chi^2}$		$-\frac{75g^4}{128\pi M_\chi^2}$		$-\frac{105g^4}{64\pi M_\chi^2}$	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow WW, W\gamma, WH$	a	$\frac{16e^2g^2 + 43g^4}{64\pi M_\chi^2}$	21.8	$\frac{336e^2g^2 + 727g^4}{64\pi M_\chi^2}$	40.1	$\frac{7(144e^2g^2 + 299g^4)}{32\pi M_\chi^2}$	49.0
	b	$\frac{176e^2g^2 + 361g^4}{1536\pi M_\chi^2}$		$\frac{3184e^2g^2 + 6413g^4}{1536\pi M_\chi^2}$		$\frac{7(1328e^2g^2 + 2665g^4)}{768\pi M_\chi^2}$	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow ZZ, Z\gamma, ZH$	a	$\frac{17g^4 - 16e^4}{64\pi M_\chi^2}$	7.4	$\frac{277g^4 - 272e^4}{64\pi M_\chi^2}$	12.4	$\frac{7(113g^4 - 112e^4)}{32\pi M_\chi^2}$	14.5
	b	$\frac{139g^4 - 144e^4}{1536\pi M_\chi^2}$		$\frac{2423g^4 - 2448e^4}{1536\pi M_\chi^2}$		$\frac{7(1003g^4 - 1008e^4)}{768\pi M_\chi^2}$	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow WZ$	a	$\frac{9g^4 - 8e^2g^2}{32\pi M_\chi^2}$	6.6	$\frac{173g^4 - 168e^2g^2}{32\pi M_\chi^2}$	13.0	$\frac{7(73g^4 - 72e^2g^2)}{16\pi M_\chi^2}$	15.8
	b	$\frac{83g^4 - 88e^2g^2}{768\pi M_\chi^2}$		$\frac{1567g^4 - 1592e^2g^2}{768\pi M_\chi^2}$		$\frac{7(659g^4 - 664e^2g^2)}{384\pi M_\chi^2}$	
$\chi\bar{\chi} \rightarrow \gamma\gamma$	a	$\frac{e^4}{4\pi M_\chi^2}$	0.4	$\frac{17e^4}{4\pi M_\chi^2}$	0.7	$\frac{49e^4}{2\pi M_\chi^2}$	0.8
	b	$\frac{3e^4}{32\pi M_\chi^2}$		$\frac{51e^4}{32\pi M_\chi^2}$		$\frac{147e^4}{16\pi M_\chi^2}$	

图片：不同湮灭道的展开系数和分支比。



从对撞机限制到遗迹密度限制

$$\sigma_{\text{ann}}(\chi\bar{\chi} \rightarrow \text{SM}, \text{SM}) \sim \frac{g^4}{M_\chi^2}. \quad (1)$$

$$\Omega_\chi h^2 \equiv \Omega h^2 \Big|_{M_\chi} \sim \frac{0.1 \text{ pb}}{\sum_i \langle \sigma v \rangle_{\text{ann}}^i} \sim \frac{M_\chi^2}{g^4}. \quad (2)$$

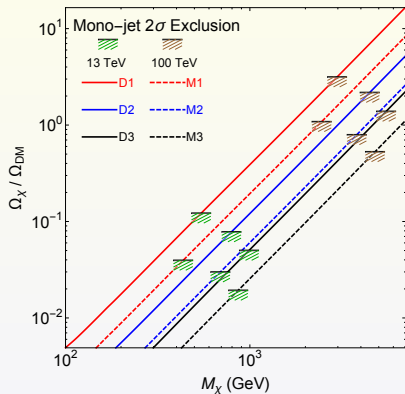
$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \equiv \Omega h^2 \Big|_{M_\chi^c} \simeq 0.12 \sim \frac{(M_\chi^c)^2}{g^4}. \quad (3)$$

D1: $M_\chi^c = 1.6 \text{ TeV};$	M1: $M_\chi^c = 2.3 \text{ TeV};$
D2: $M_\chi^c = 3.0 \text{ TeV};$	M2: $M_\chi^c = 4.3 \text{ TeV};$
D3: $M_\chi^c = 4.6 \text{ TeV};$	M3: $M_\chi^c = 6.6 \text{ TeV}.$

(4)

$$\mathcal{F} \equiv \frac{\Omega_\chi}{\Omega_{\text{DM}}} \simeq \left(\frac{M_\chi}{M_\chi^c} \right)^2. \quad (5)$$

Mono-jet 道限制结果



13 TeV 3 ab⁻¹ 结果

D1: $\mathcal{F} \geq 12.2\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 4.0\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 7.8\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 3.0\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 5.0\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.9\%$.

100 TeV 30 ab⁻¹ 结果

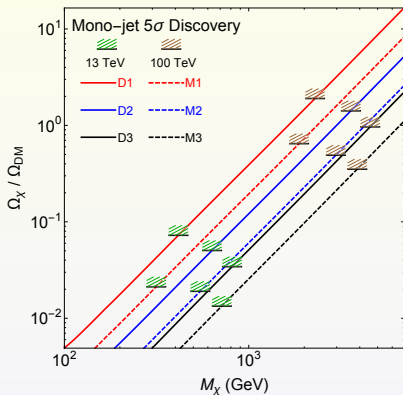
D1: $\mathcal{F} \geq 314.9\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 108.4\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 217.5\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 79.3\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 138.5\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 52.9\%$.

图片：通过 Mono-jet 道对 MDM 模型遗迹密度的 2 σ 排除限制。

Mono-jet 道限制结果



13 TeV 3 ab⁻¹ 结果

D1: $\mathcal{F} \leq 7.3\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 2.1\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 5.1\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 1.9\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 3.4\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.3\%$.

100 TeV 30 ab⁻¹ 结果

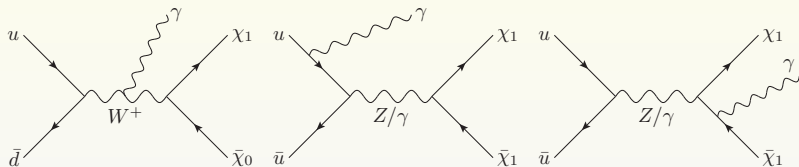
D1: $\mathcal{F} \leq 190.2\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 64.8\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 141.7\%$, M2: $\mathcal{F} \leq 49.2\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 96.7\%$, M3: $\mathcal{F} \leq 35.2\%$.

图片: 通过 Mono-jet 道对 MDM 模型遗迹密度的 5 σ 发现限制。

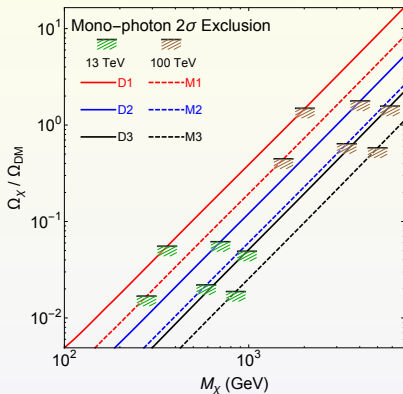
Mono-photon 道探测



图片：Mono-photon 道探测 MDM 粒子典型费曼图。

主要背景： $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu}) + \gamma$ 和 $W^\pm(\rightarrow \ell^\pm\nu) + \gamma$ ($\ell = e, \mu, \tau$)。

Mono-photon 道限制结果



13 TeV 3 ab^{-1} 结果

D1: $\mathcal{F} \geq 5.5\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 1.7\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 6.2\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 2.2\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 4.9\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.9\%$.

100 TeV 30 ab^{-1} 结果

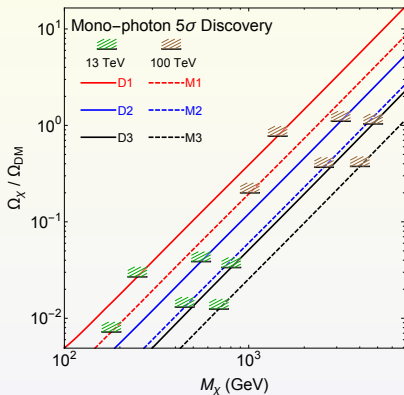
D1: $\mathcal{F} \geq 149.1\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 44.5\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 177.4\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 63.9\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 156.8\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 57.9\%$.

图片: 通过 Mono-photon 道对 MDM 模型遗迹密度的 2σ 排除限制。

Mono-photon 道限制结果



13 TeV 3 ab^{-1} 结果

D1: $\mathcal{F} \leq 2.7\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 0.7\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 3.9\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 1.3\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 3.4\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.2\%$.

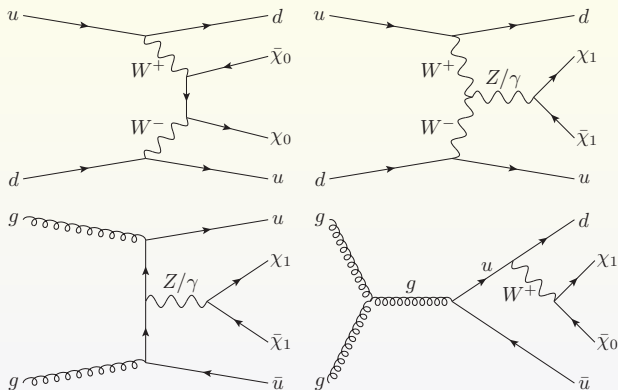
100 TeV 30 ab^{-1} 结果

D1: $\mathcal{F} \leq 77.5\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 20.0\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 110.6\%$, M2: $\mathcal{F} \leq 36.9\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 103.8\%$, M3: $\mathcal{F} \leq 37.6\%$.

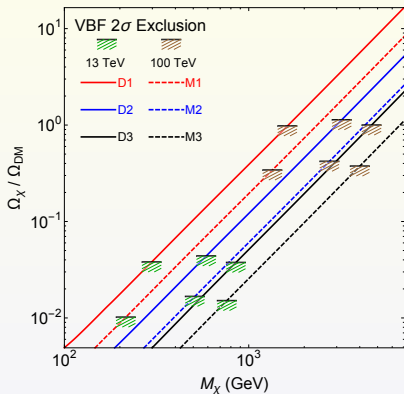
图片: 通过 Mono-photon 道对 MDM 模型遗迹密度的 5σ 发现限制。



图片：VBF 道探测 MDM 粒子典型费曼图。

主要背景： $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu}) + \text{jets}$ 和 $W^{\pm}(\rightarrow \ell^{\pm}\nu) + \text{jets}$ ($\ell = e, \mu, \tau$)。

VBF 道限制结果



13 TeV 3 ab^{-1} 结果

D1: $\mathcal{F} \geq 3.8\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 1.0\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 4.4\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 1.7\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 3.8\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.5\%$.

100 TeV 30 ab^{-1} 结果

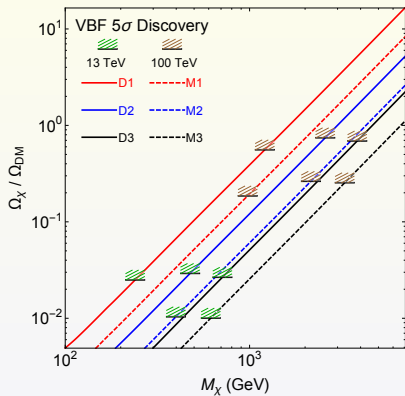
D1: $\mathcal{F} \geq 97.7\%$, M1: $\mathcal{F} \geq 34.1\%$,

D2: $\mathcal{F} \geq 113.3\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 42.0\%$,

D3: $\mathcal{F} \geq 99.8\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 37.5\%$.

图片: 通过 VBF 道对 MDM 模型遗迹密度的 2σ 排除限制。

VBF 道限制结果



13 TeV 3 ab⁻¹ 结果

D1: $\mathcal{F} \leq 2.5\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 0.3\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 2.9\%$, M2: $\mathcal{F} \geq 1.0\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 2.7\%$, M3: $\mathcal{F} \geq 1.0\%$.

100 TeV 30 ab⁻¹ 结果

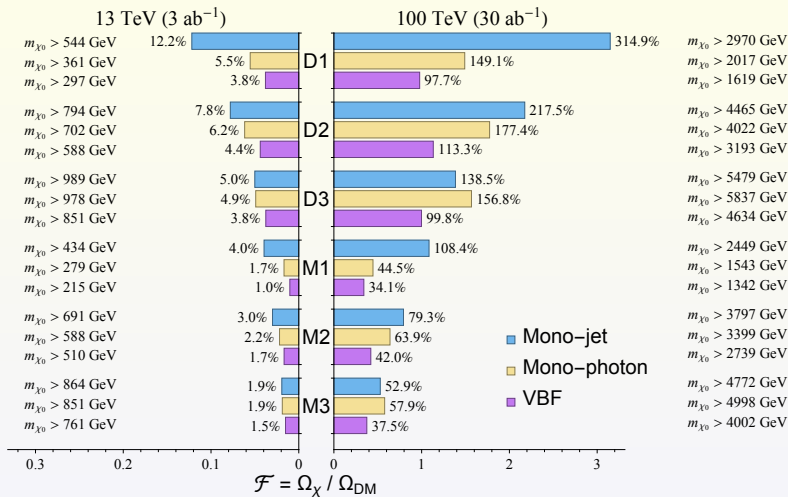
D1: $\mathcal{F} \leq 55.9\%$, M1: $\mathcal{F} \leq 18.6\%$,

D2: $\mathcal{F} \leq 74.5\%$, M2: $\mathcal{F} \leq 26.3\%$,

D3: $\mathcal{F} \leq 69.0\%$, M3: $\mathcal{F} \leq 25.5\%$.

图片: 通过 VBF 道对 MDM 模型遗迹密度的 5 σ 发现限制。

综合结果



图片: 6种MDM模型在13 TeV HL-LHC和未来100 TeV对撞机上通过Mono-jet, Mono-photon以及VBF道所得到的质量和遗迹密度百分比 2σ 排除限。



总结

- 我们考虑未来的直接探测实验在达到中微子背景时仍没有可靠的暗物质粒子信号，若假设一部分暗物质为 WIMPs，那么对撞机实验能对这部分暗物质产生的遗迹密度给出限制。
- 我们分别考虑了弱同位旋为三重态、五重态和七重态的 Dirac 和 Majorana 型 MDM 模型，并通过 Mono-jet, Mono-photon 以及 VBF 三个道分析了积分亮度分别为 3 ab^{-1} 和 30 ab^{-1} 的 13 TeV HL-LHC 以及 100 TeV pp 对撞机上对这些模型的探寻能力。
- 如果这样的暗物质模型在未来的 13 TeV HL-LHC 上被发现，那么需要有其他的暗物质才能解释观测到的遗迹密度。
- 如果没有发现，则可以得到 95% 置信度的遗迹密度百分比下限，如上张幻灯片所示。



总结

- 对于这三个道，总体而言，Mono-jet 所得限制最强，Mono-photon 次之，VBF 最弱。
- 对于同样的质量和弱同位旋，Dirac 模型的限制通常强于 Majorana 模型，因为 Dirac 模型旋量空间的自由度比 Majorana 模型大一倍，从而更容易在对撞机上被发现。
- 未来的 100 TeV 强子对撞机对 MDM 模型遗迹密度的限制会远远超过目前的 LHC 以及计划的 13 TeV HL-LHC，特别是，如果我们假设有且只有一种暗物质，而未来的 30 ab^{-1} 100 TeV 对撞机没有发现相应的实验信号，那么 D1, D2, D3 和 M1 模型会在 95% 置信度水平上被排除，因为它们会产生过多的遗迹密度。
- 这种分析方法也适用于除 MDM 之外的其他 WIMPs 模型，由此得到的对撞机探测与暗物质遗迹密度之间的关联性，会启发我们考虑粒子物理和宇宙学之间更深层次的联系。



展望

- 现代宇宙学一个最令人惊讶的发现是我们所能“看到”的宇宙只占整个宇宙能量密度的一小部分。
- 对暗物质本质的探索已成为天体物理学和粒子物理学的中心议题之一，因为它架起了连接宇观世界、宏观世界和微观世界的桥梁，也被认为是连接标准模型和新物理的纽带。
- 过去的几十年间，WIMPs 由于能够自然提供目前所测得的暗物质遗迹密度，并且存在于众多新物理模型之中，以及在多种实验中具有可观测效应，从而成为最受瞩目也是研究得最为深入的暗物质候选者。

- 虽然有来自于间接探测的某些超出信号，但在更为可靠的直接探测和对撞机探测实验中尚未发现 WIMPs 的存在信号。
- 物理学是一门实验科学，目前寻找暗物质的三类方法在实验原理，技术手段上有很大不同，对暗物质粒子质量的敏感区间也不太一样。因此，交叉应用这三类实验来研究暗物质的性质具有重要意义。与此同时，探索新的实验手段，发展新的实验技术，与构造新的理论模型一样甚至更为重要。
- 暗物质的理论和实验研究任重道远，但不管遇到任何艰难险阻，我们都应像伟大诗人屈原所述，“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”。

(感谢各个实验组以及诸位理论家们的精彩报告!)