

# 在高能对撞机上研究暗物质粒子产生信号

余钊煥

中国科学院高能物理研究所



中山大学，2015 年 6 月 26 日

中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics  
Chinese Academy of Sciences

宇宙中的暗物质

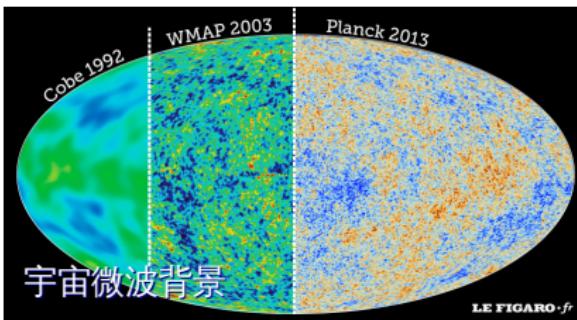
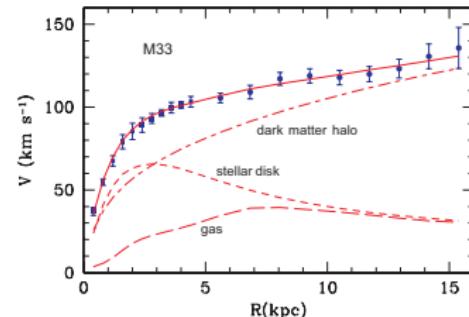
在矮星系、星系、星系团、大尺度结构乃至可观测宇宙尺度上，均有确切的暗物质 (Dark Matter, DM) 存在证据 (通过引力效应推断出来)



Bullet 星系团



旋涡星系 M33



冷暗物质 (25.8%)

$$\Omega_c h^2 = 0.1186 \pm 0.0020$$

重子物质 (4.8%)

$$\Omega_b h^2 = 0.02226 \pm 0.00023$$

暗能量 (69.3%)

$$\Omega_\Lambda = 0.692 \pm 0.012$$

## 暗物质的宇宙学遗留密度

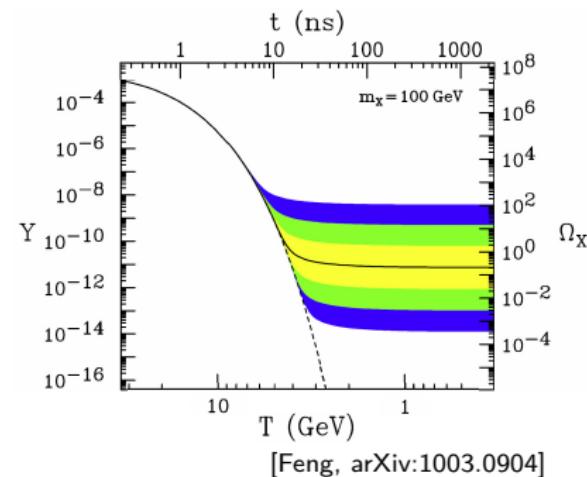
一般认为，暗物质粒子( $\chi$ )在宇宙早期经由热平衡过程产生，退耦之后丰度固定下来，遗留密度由湮灭截面决定：

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}}{\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle}$$

观测值  $\Omega_\chi h^2 \simeq 0.1$

$$\Rightarrow \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

(退耦时期湮灭截面标准值)



## 暗物质的宇宙学遗留密度

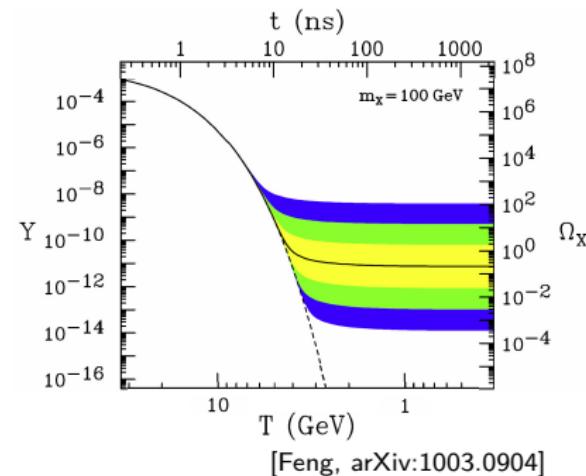
一般认为，暗物质粒子( $\chi$ )在宇宙早期经由热平衡过程产生，退耦之后丰度固定下来，遗留密度由湮灭截面决定：

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}}{\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle}$$

观测值  $\Omega_\chi h^2 \simeq 0.1$

$$\Rightarrow \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

(退耦时期湮灭截面标准值)



假设暗物质湮灭过程由两个弱作用顶点构成， $SU(2)_L$  弱耦合常数  $g \simeq 0.64$ ，

对于  $m_\chi \sim \mathcal{O}(\text{TeV})$ ，有  $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim \frac{g^4}{16\pi^2 m_\chi^2} \sim \mathcal{O}(10^{-26}) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

⇒ 中性的弱相互作用大质量粒子 (WIMP) 是良好的暗物质候选粒子

WIMP 在各类扩充标准模型的新物理模型中普遍存在 → “WIMP miracle”

## 暗物质候选粒子

暗物质粒子基本性质：电中性、不带色荷、稳定或长寿命、冷暗物质为主

暗物质候选粒子

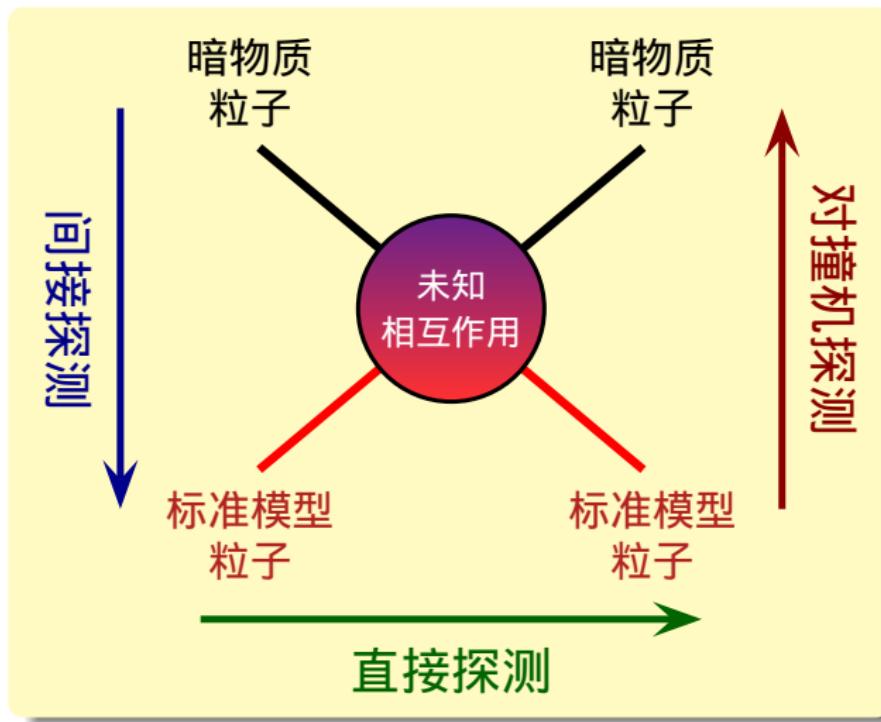
暗物质粒子基本性质：电中性、不带色荷、稳定或长寿命、冷暗物质为主

	WIMP	SuperWIMP	惰性中微子	轴子
提出动机	规范等级	规范等级等	中微子质量	强 $CP$
自然给出 $\Omega_\chi$	能	能	否	否
产生机制	退耦	衰变	多种	多种
质量范围	GeV – TeV	GeV – TeV	keV	$\mu\text{eV} – \text{meV}$
温度	冷	冷/温	温	冷
直接探测	✓			✓
间接探测	✓	✓	✓	
对撞机探测	✓	✓		

**WIMP:** 超对称模型 neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$ , 额外维模型  $B^{(1)}$ 、 $W^{3(1)}$  和  $\nu^{(1)}$ , 等等

**SuperWIMP:** 超对称模型 gravitino  $\tilde{G}$  和 axino，额外维模型 KK 引力子和 KK 轴子，等等

暗物质探测手段



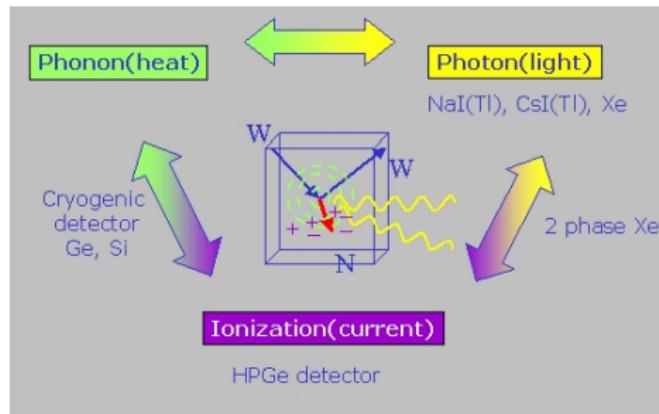
### 直接探测

暗物质粒子 + 原子核 → 暗物质粒子 + 原子核

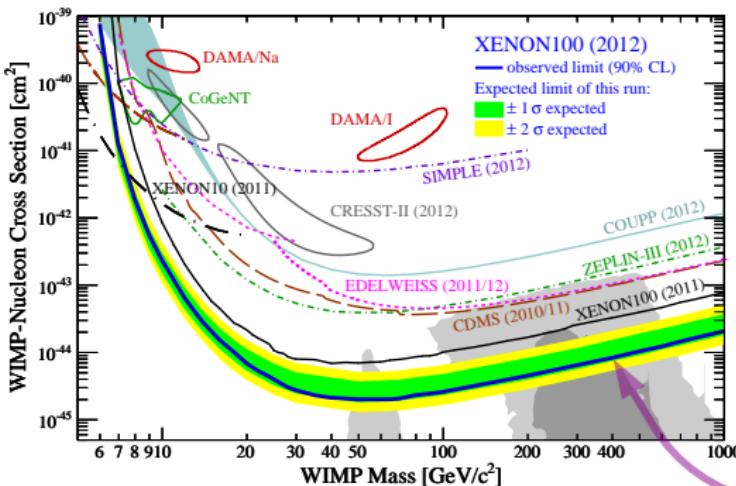
测量原子核被暗物质粒子散射后导致的反冲信号(光、热、电)

实验: DAMA, CoGeNT, XENON, CDMS, LUX, CDEX, PANDAX, .....

为屏蔽宇宙线背景，一般在深层地下实验室进行实验。

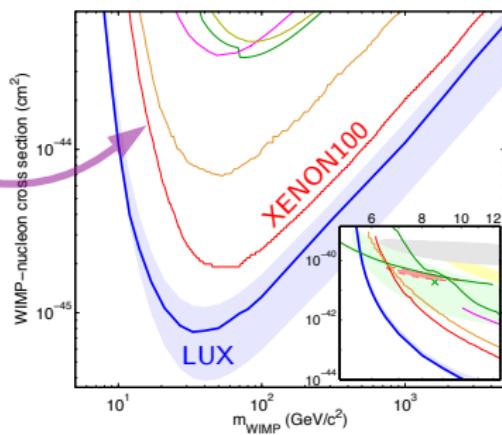


# 直接探测实验结果 (自旋无关)



⇐ XENON100, arXiv:1207.5988

LUX, arXiv:1310.8214 ⇒

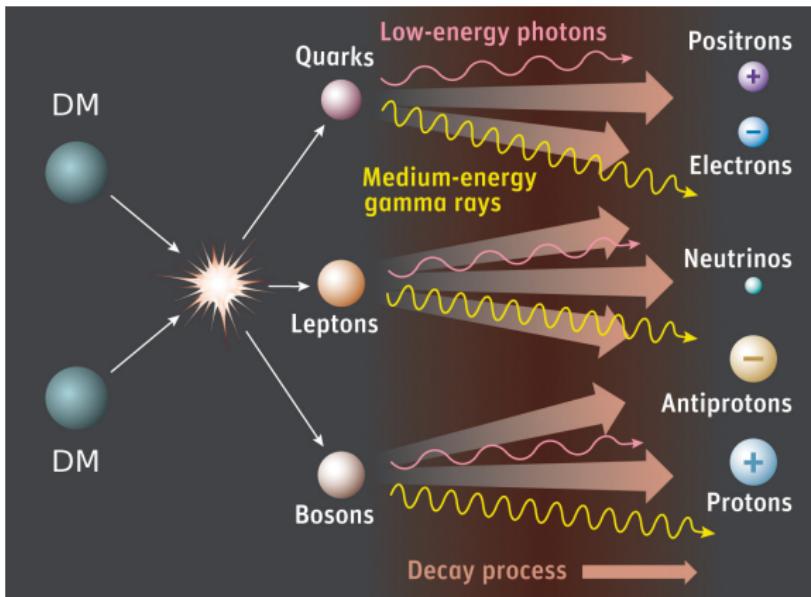


## 间接探测

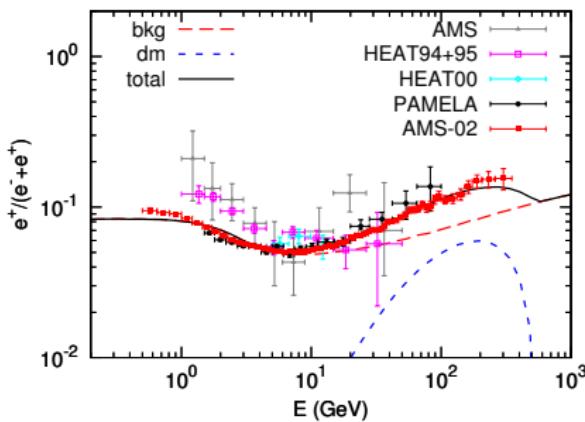
暗物质粒子 (+暗物质粒子) → 荷电宇宙线,  $\gamma$  射线, 中微子

暗物质粒子的湮灭或衰变过程额外贡献到这些粒子当中

相关实验: **PAMELA, ATIC, Fermi, IceCube, AMS-02, DAMPE**, .....



## 宇宙线正电子比例反常超出

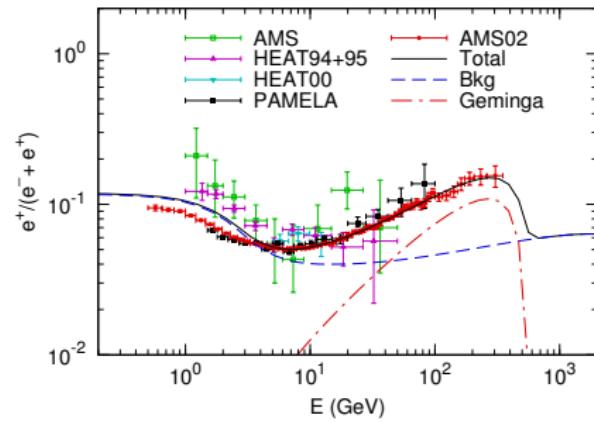


## 用暗物质湮灭到 $\tau^+\tau^-$ 解释 AMS-02 正电子比例测量数据

[Yuan, Bi, et al., arXiv:1304.1482]

## 用近邻脉冲星 Geminga 解释 AMS-02 正电子比例测量数据

[Yin, ZHY, Yuan, Bi, arXiv:1304.4128]

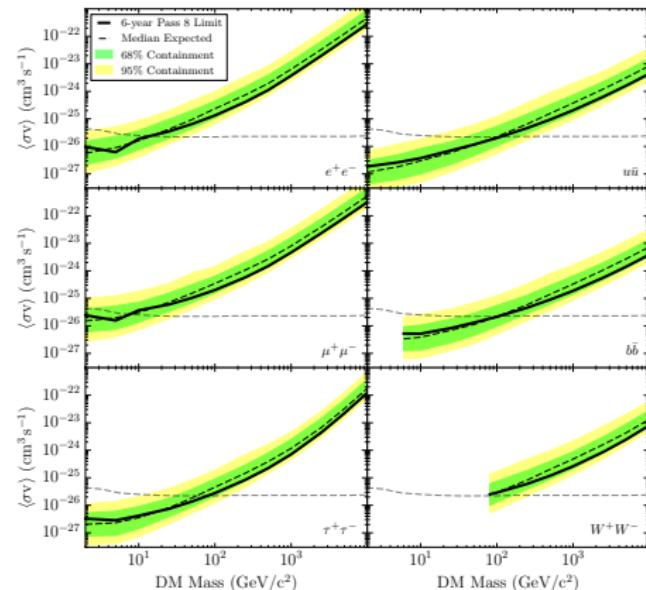


## 伽马射线观测

银河系周围有一些绕之旋转的卫星矮星系，其暗物质含量远高于发光物质

Fermi-LAT 卫星实验对 15 个矮星系进行了 6 年观测，没有发现暗物质湮灭信号，为暗物质各湮灭道截面  $\langle\sigma v\rangle$  设置了 95% 置信度上限

灰色虚线对应于能够给出正确遗漏  
密度的截面值



[Fermi-LAT, arXiv:1503.02641]

# 高能对撞机

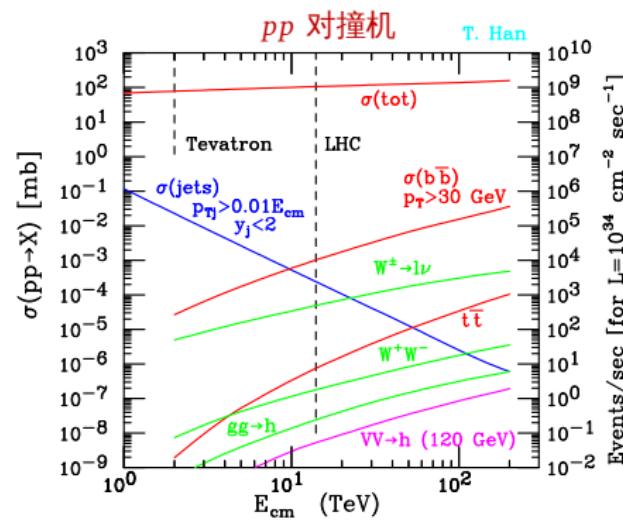
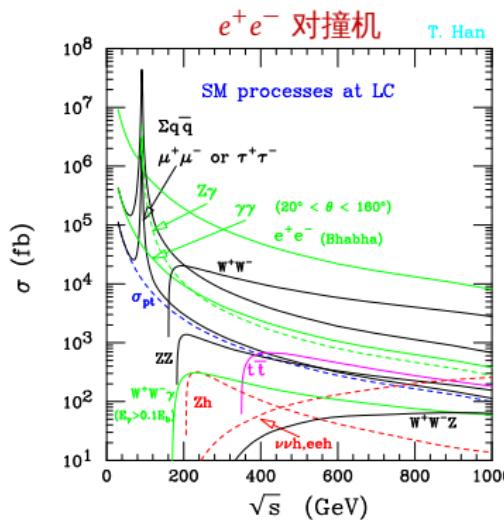
名称	类型	对撞能量 $\sqrt{s}$	亮度 ( $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	探测器
LEP	$e^+ e^-$	91 – 209 GeV	$(2 - 10) \times 10^{31}$	ALEPH, DELPHI OPAL, L3
Tevatron	$p\bar{p}$	1.96 TeV	$4.31 \times 10^{32}$	CDF, DØ
LHC	$pp$	7 – 14 TeV	$(1 - 5) \times 10^{34}$	ATLAS, CMS, ALICE, LHCb
ILC	$e^+ e^-$	250 GeV – 1 TeV	$1.5 \times 10^{34}$	SiD, ILD
CEPC	$e^+ e^-$	240 – 250 GeV	$1.8 \times 10^{34}$	
SppC	$pp$	50 – 70 TeV	$2.15 \times 10^{35}$	
FCC-ee (TLEP)	$e^+ e^-$	90 – 350 GeV	$5 \times 10^{34}$	
FCC-hh (VHE-LHC)	$pp$	100 TeV	$5 \times 10^{34}$	
CLIC	$e^+ e^-$	1 – 3 TeV	$6 \times 10^{34}$	

# 过程与截面

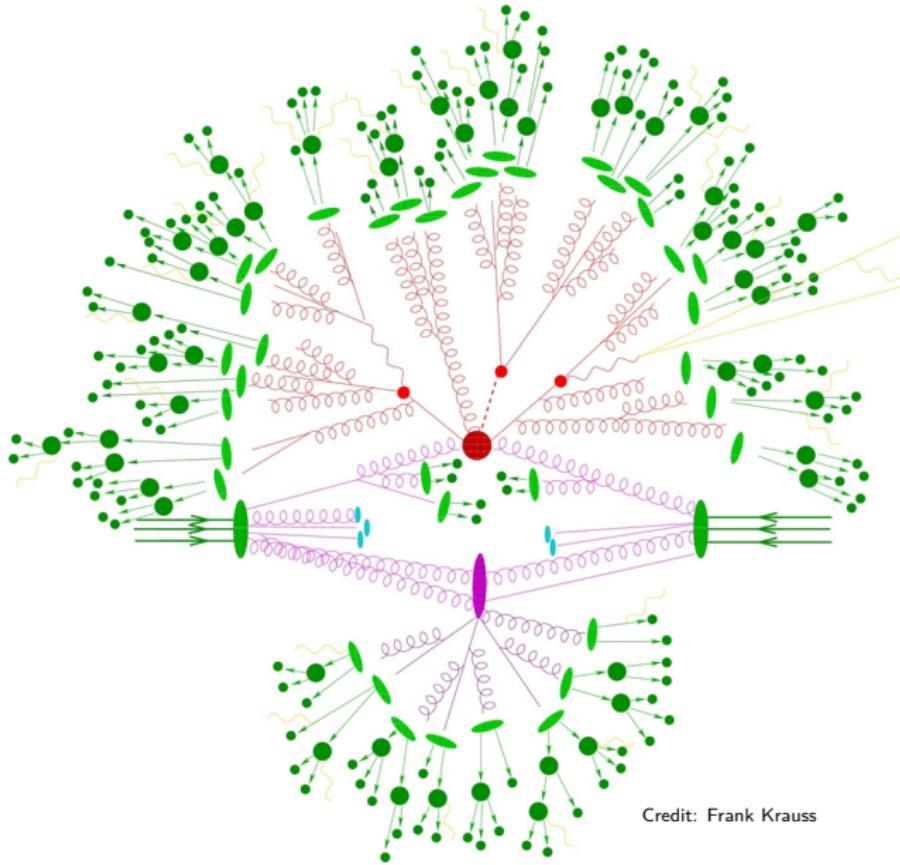
对撞机上某过程的事例数  $N$  是产生截面与积分亮度之积:  $N = \sigma \int \mathcal{L}(t) dt$

截面  $\sigma$  单位:  $1 \text{ cm}^2 = 10^{24} \text{ barn} = 10^{36} \text{ pb} = 10^{39} \text{ fb} = 10^{42} \text{ ab}$

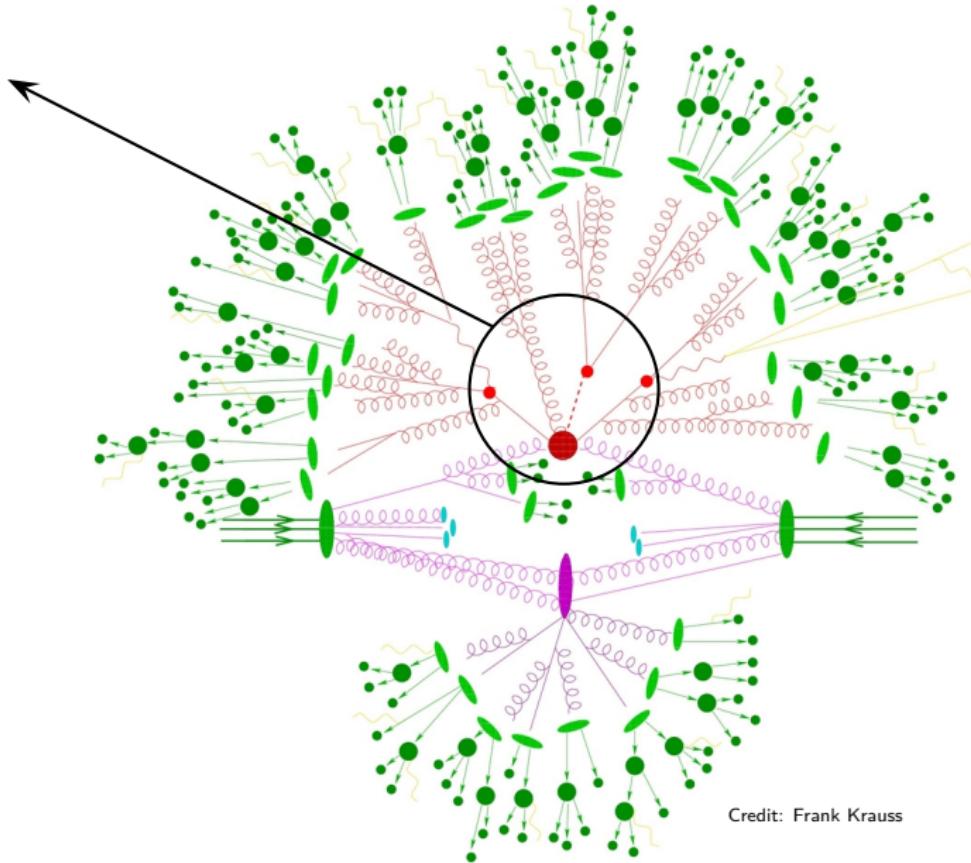
瞬时亮度  $\mathcal{L}$  单位:  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \simeq 315 \text{ fb}^{-1} \text{ year}^{-1}$



[Han, arXiv:hep-ph/0508097]

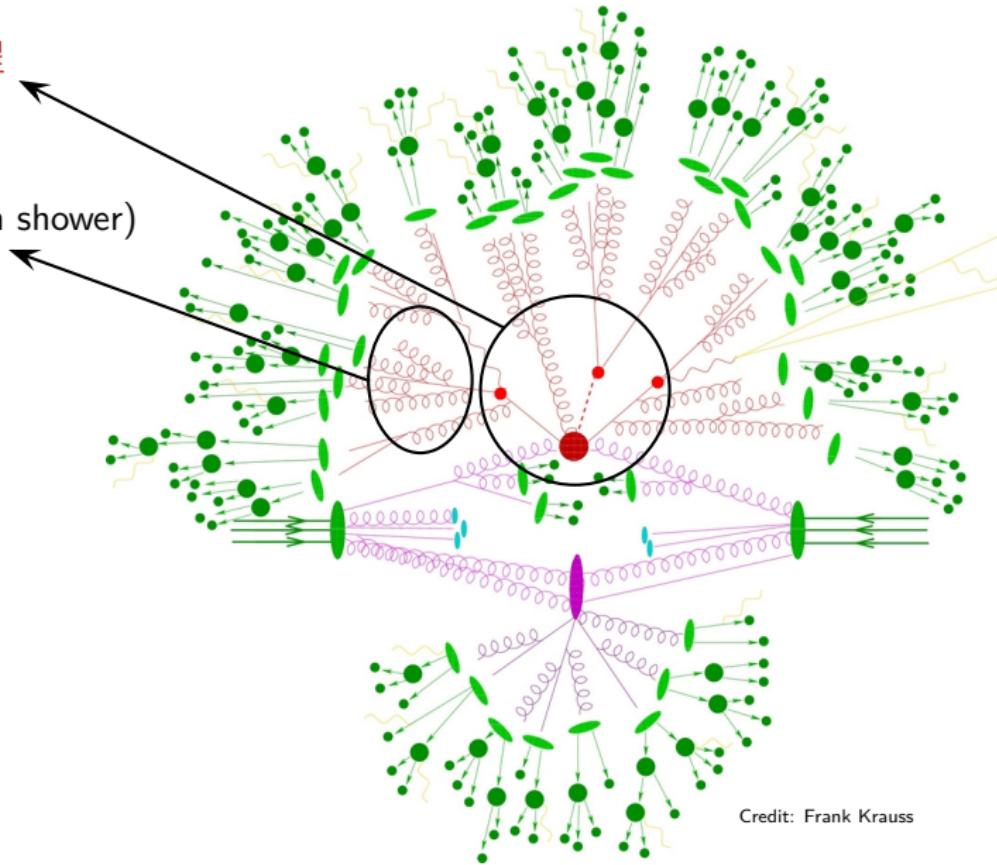


硬散射过程



硬散射过程

部分子簇射 (parton shower)

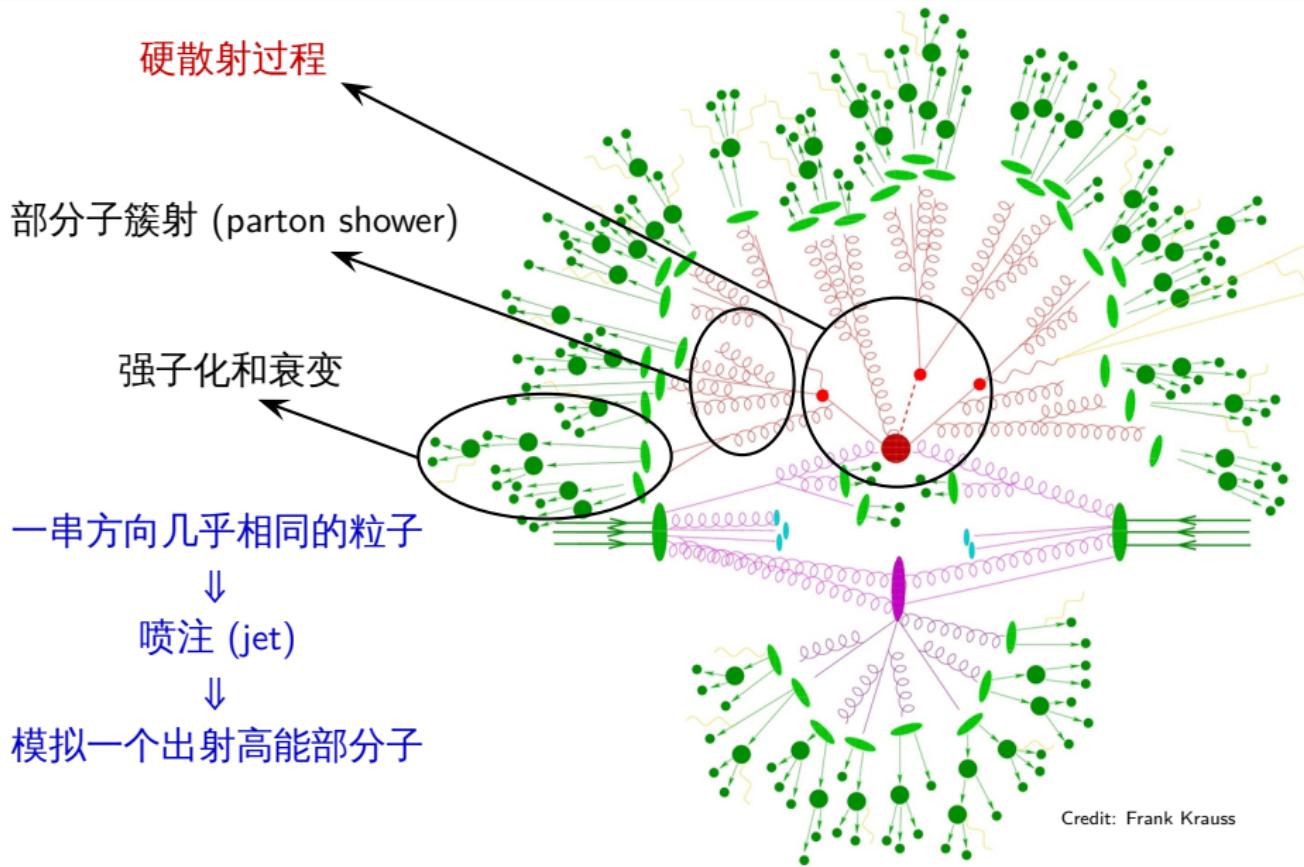


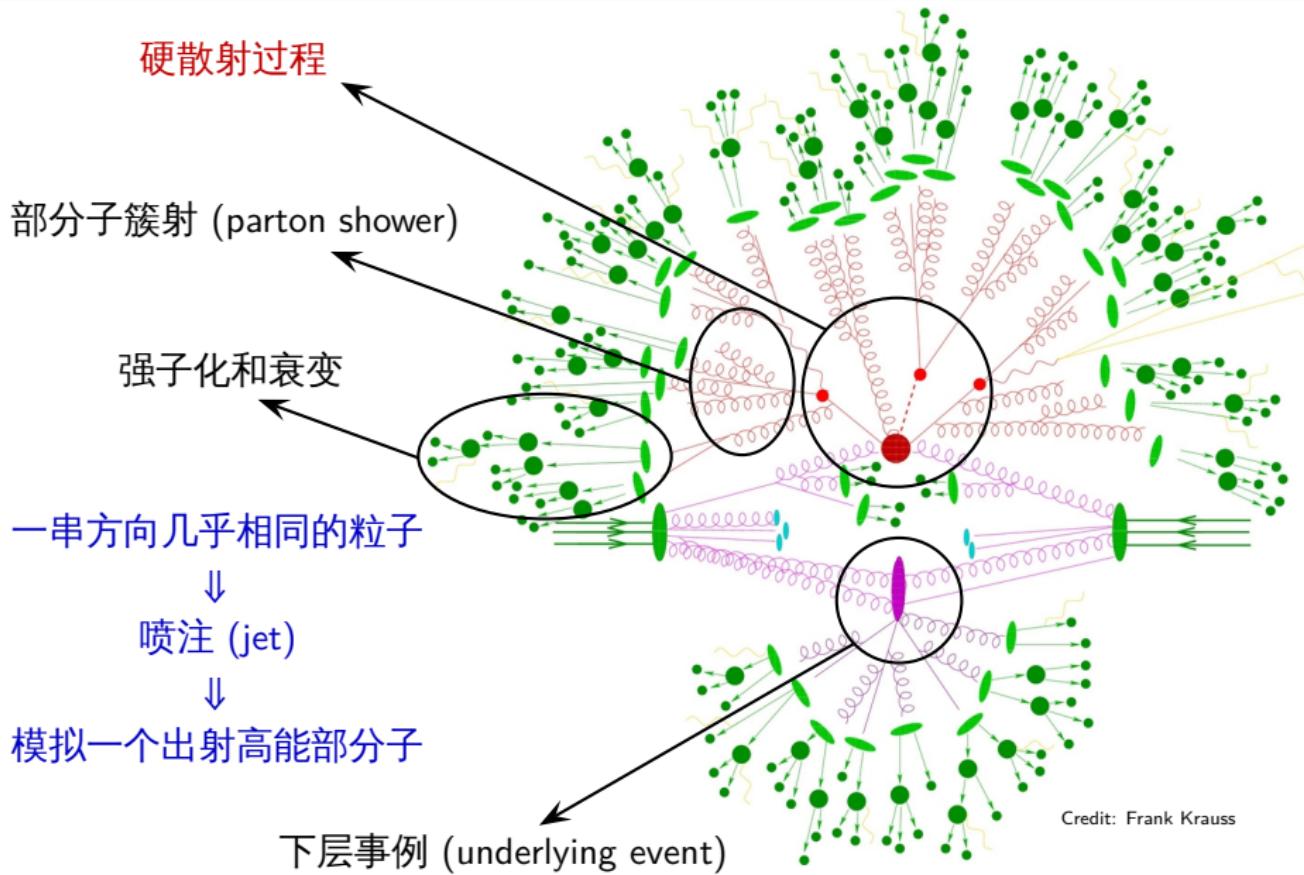
硬散射过程

部分子簇射 (parton shower)

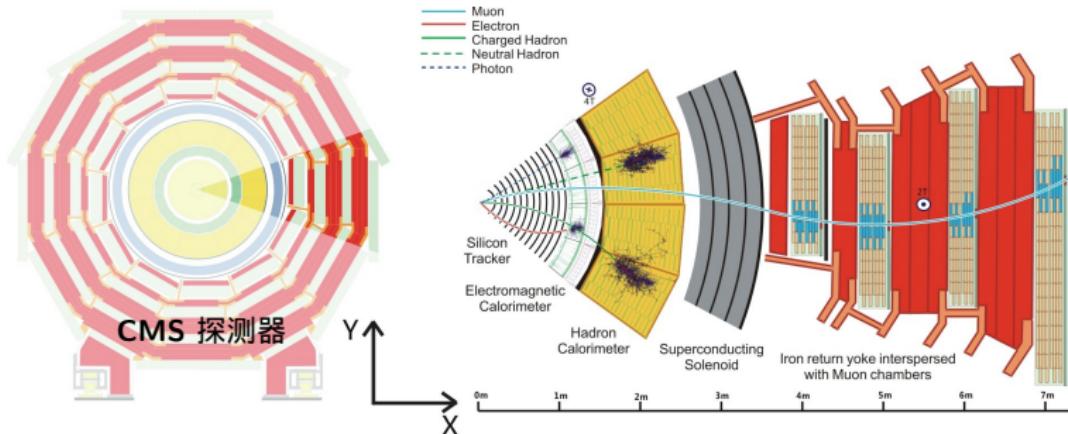
强子化和衰变

Credit: Frank Krauss



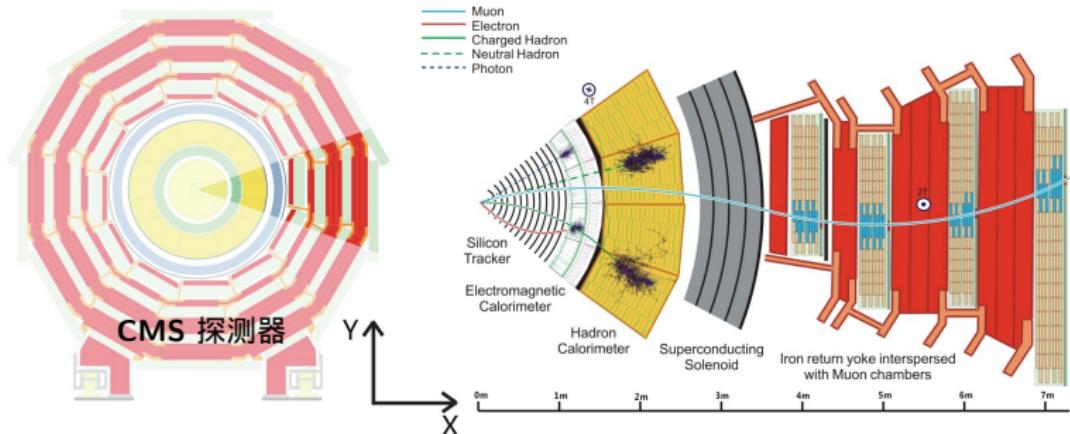


# 探测器与粒子重建



	$\gamma$	$e^\pm$	$\mu^\pm$	带电强子	中性强子	中微子和暗物质粒子
径迹探测器	×	✓	✓	✓	×	×
电磁量能器	✓	✓	✗	✗	✗	✗
强子量能器	✗	✗	✗	✓	✓	✗
$\mu$ 子探测器	✗	✗	✓	✗	✗	✗

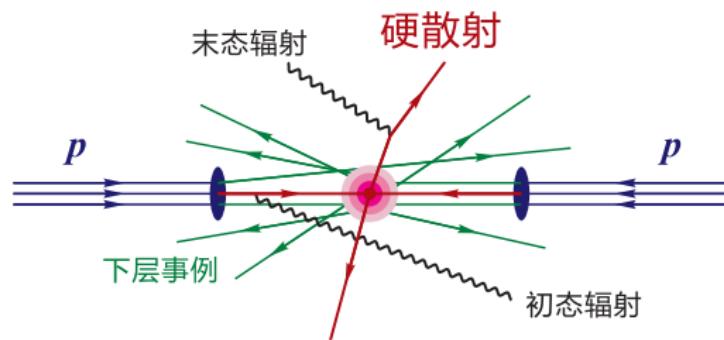
# 探测器与粒子重建



	$\gamma$	$e^\pm$	$\mu^\pm$	带电强子	中性强子	中微子和暗物质粒子	
径迹探测器	×	✓	✓	✓	×		×
电磁量能器	✓	✓	✗	✗	✗		✗
强子量能器	✗	✗	✗	✓	✓		✗
$\mu$ 子探测器	✗	✗	✓	✗	✗		✗

丢失能量  
 $E$  或  $E_T$

# 蒙特卡洛模拟

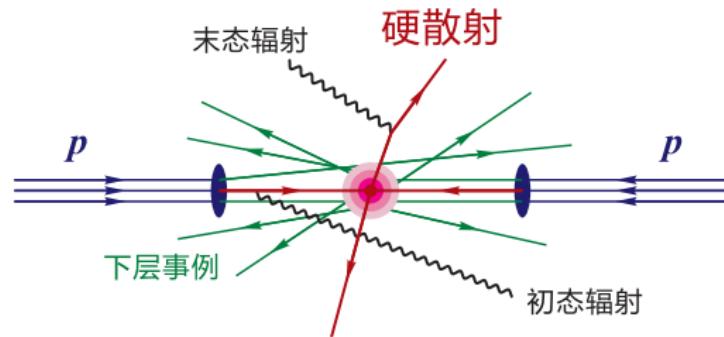


# 蒙特卡洛模拟

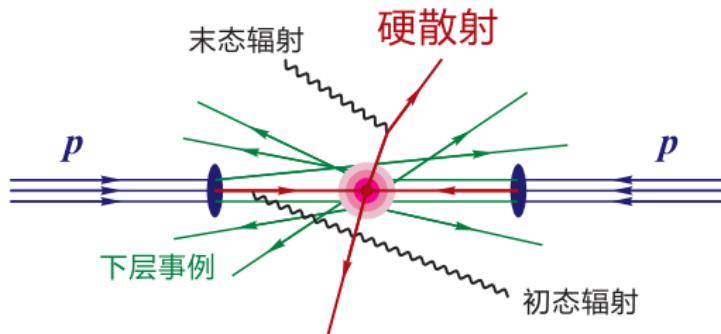
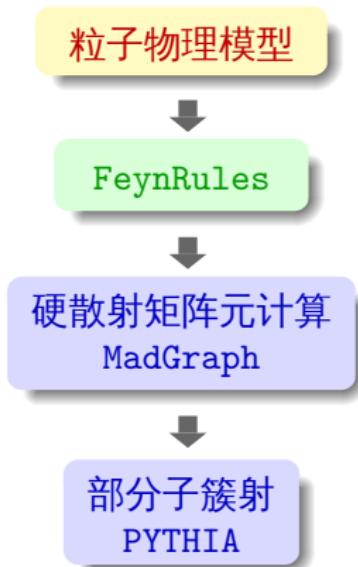
粒子物理模型



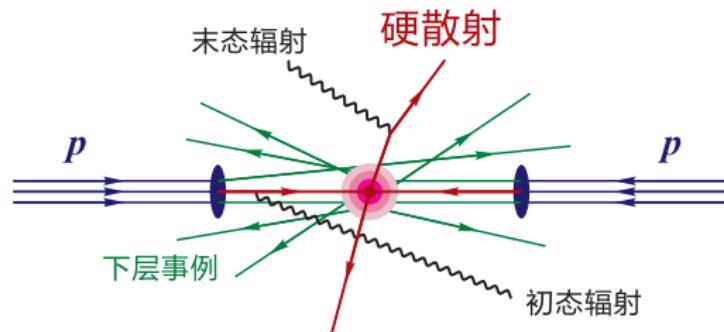
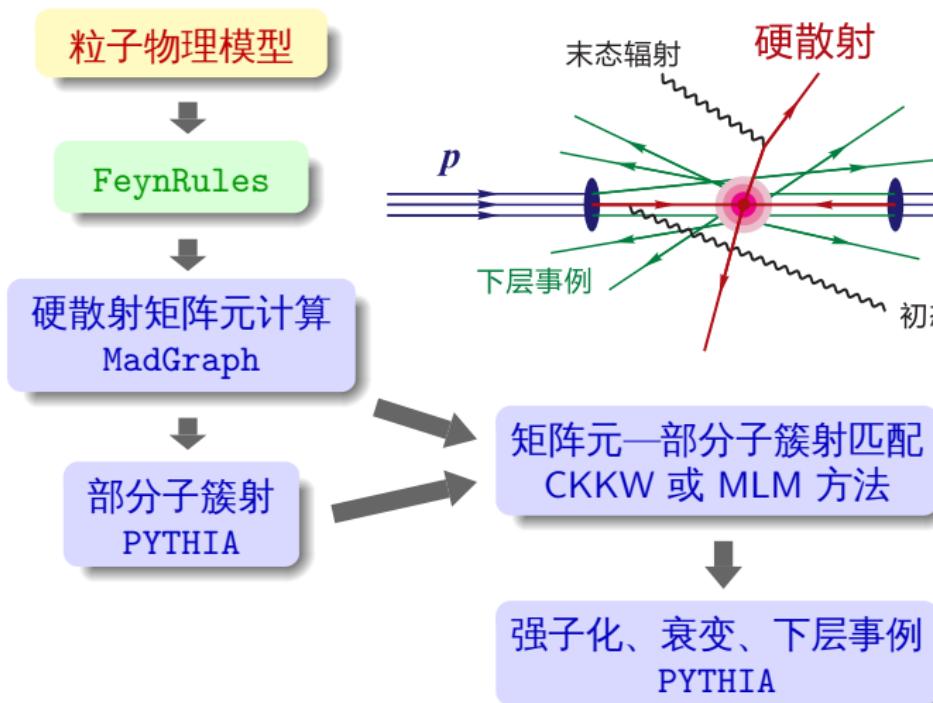
FeynRules



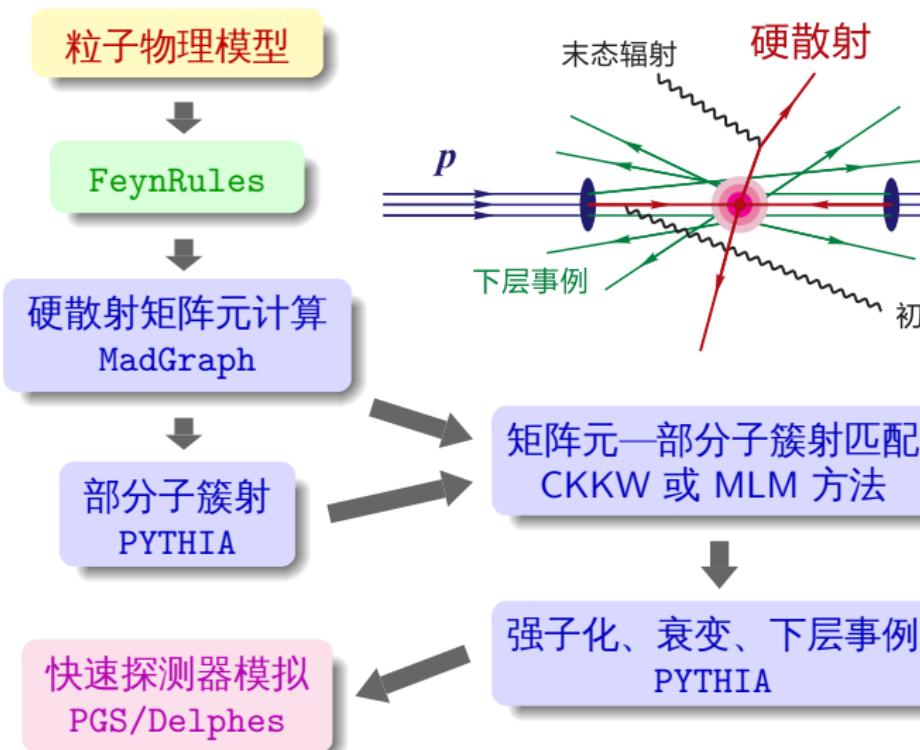
# 蒙特卡洛模拟



# 蒙特卡洛模拟



# 蒙特卡洛模拟



# 正负电子对撞机上的暗物质有效相互作用研究

- 相比于强子对撞机， $e^+e^-$  对撞机不会受到大量强作用过程的影响，标准模型背景比较干净，适合对物理过程进行**精确测量**。
- 不过，对撞能量相对较低，探测质量较大的粒子会比较困难。
- 设想中的未来高能  $e^+e^-$  对撞机实验有 CEPC, TLEP, ILC 和 CLIC，对撞能量从 240 GeV 到 3 TeV。通过丢失能量信号，可以在这些对撞机上研究暗物质粒子产生过程。

# 正负电子对撞机上的暗物质有效相互作用研究

- 相比于强子对撞机， $e^+e^-$  对撞机不会受到大量强作用过程的影响，标准模型背景比较干净，适合对物理过程进行**精确测量**。
- 不过，对撞能量相对较低，探测质量较大的粒子会比较困难。
- 设想中的未来高能  $e^+e^-$  对撞机实验有 CEPC, TLEP, ILC 和 CLIC，对撞能量从 240 GeV 到 3 TeV。通过丢失能量信号，可以在这些对撞机上研究暗物质粒子产生过程。
- $e^+e^-$  对撞机对**暗物质与  $e^\pm$  的相互作用**和**暗物质与电弱规范玻色子的相互作用**比较灵敏。
- 我们用**有效算符**描述这些相互作用，通过**单光子 (monophoton)** 和**单 Z (mono-Z)** 两个**搜寻道**研究  $e^+e^-$  对撞机对暗物质粒子的探测能力。

相关文章 : ZHY, Yan, Yin, *Phys. Rev.* **D88**, 075015 [arXiv:1307.5740]

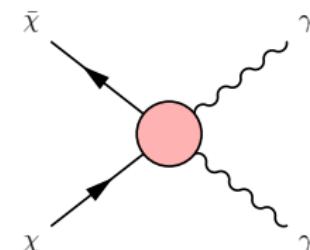
ZHY, Bi, Yan, Yin, *Phys. Rev.* **D90**, 055010 [arXiv:1404.6990]

# 暗物质湮灭到双光子：线谱信号

在树图水平上，暗物质粒子不带电荷，与光子没有耦合

在圈图水平上，暗物质粒子对有可能湮灭到光子对，但

截面可能只有其它树图阶过程的  $\sim 10^{-4} - 10^{-1}$



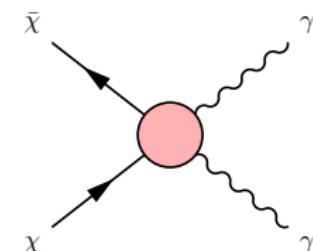
# 暗物质湮灭到双光子：线谱信号

在树图水平上，暗物质粒子不带电荷，与光子没有耦合

在圈图水平上，暗物质粒子对有可能湮灭到光子对，但截面可能只有其它树图阶过程的  $\sim 10^{-4} - 10^{-1}$

当今星系中非相对论性暗物质通过  $\chi\bar{\chi} \rightarrow \gamma\gamma$  过程湮灭会产生单能光子，引起能量  $\sim m_\chi$  的伽马射线线谱信号

$\Rightarrow$  暗物质湮灭的决定性证据



# 暗物质湮灭到双光子：线谱信号

在树图水平上，暗物质粒子不带电荷，与光子没有耦合

在圈图水平上，暗物质粒子对有可能湮灭到光子对，但截面可能只有其它树图阶过程的  $\sim 10^{-4} - 10^{-1}$

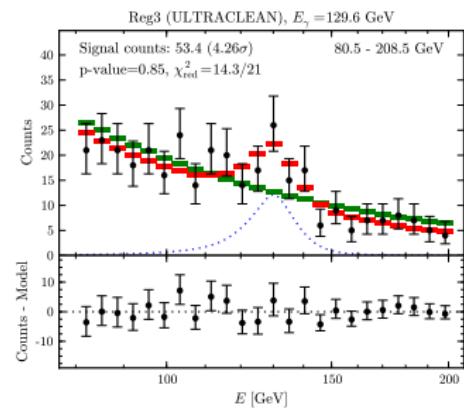
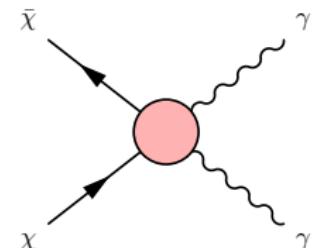
当今星系中非相对论性暗物质通过  $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$  过程湮灭会产生单能光子，引起能量  $\sim m_\chi$  的伽马射线线谱信号

$\Rightarrow$  暗物质湮灭的决定性证据

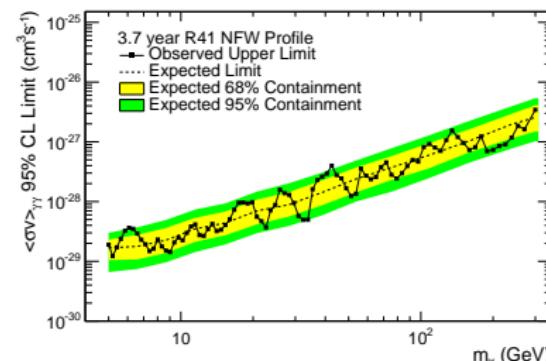
2012 年，一些研究小组在分析 Fermi-LAT 伽马射线数据时发现，银心附近区域可能存在能量  $\sim 130$  GeV 的线谱信号，局域显著性约  $3 - 4\sigma$

如果用暗物质湮灭到双光子来解释，湮灭截面为

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$



2013 年，Fermi-LAT 合作组本身分析积累了 3.7 年的数据，他们发现，虽然线谱信号的局域显著性在 133 GeV 处达到  $3.3\sigma$ ，转换为全局显著性却只有  $1.6\sigma$ . 他们认为不能 **确认** 这个信号，因而为暗物质湮灭设置了截面上限。



[Fermi-LAT Collaboration, arXiv:1305.5597]

2013 年，Fermi-LAT 合作组本身分析积累了 3.7 年的数据，他们发现，虽然线谱信号的局域显著性在 133 GeV 处达到  $3.3\sigma$ ，转换为全局显著性却只有  $1.6\sigma$ . 他们认为不能 **确证** 这个信号，因而为暗物质湮灭设置了截面上限。

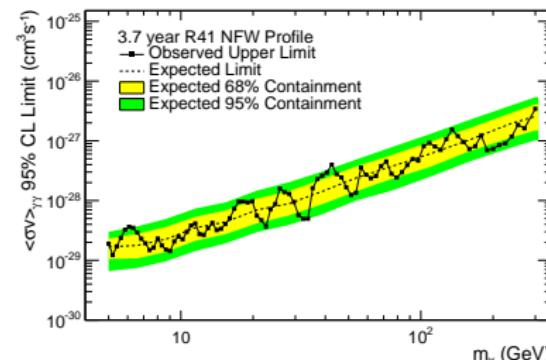
另一方面，如果暗物质能够通过  $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$  过程造成线谱信号，在  $e^+e^-$  对撞机上就会引起  $e^+e^- \rightarrow \chi\chi\gamma$  过程

↓

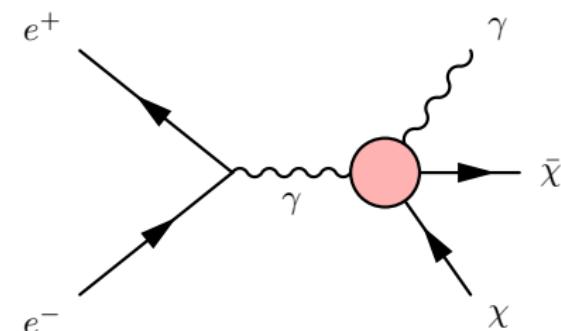
## Monophoton 信号 ( $\gamma + E$ )

↓

可在 TeV 量级的未来  $e^+e^-$  对撞机上检验



[Fermi-LAT Collaboration, arXiv:1305.5597]



我们分别用下列**有效算符**描述暗物质粒子与光子的相互作用：

假设暗物质粒子是 Dirac 费米子，考虑算符  $\mathcal{O}_F = \frac{1}{\Lambda^3} \bar{\chi} i\gamma_5 \chi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

$$\langle \sigma v \rangle_{\chi \bar{\chi} \rightarrow 2\gamma} \simeq \frac{4m_\chi^4}{\pi \Lambda^6} = 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{130 \text{ GeV}} \right)^4 \left( \frac{1272 \text{ GeV}}{\Lambda} \right)^6, \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi \bar{\chi} \gamma) \sim \frac{s^2}{\Lambda^6}$$

假设暗物质粒子是复标量粒子，考虑算符  $\mathcal{O}_S = \frac{1}{\Lambda^2} \chi^* \chi F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

$$\langle \sigma v \rangle_{\chi \chi^* \rightarrow 2\gamma} \simeq \frac{2m_\chi^2}{\pi \Lambda^4} = 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{130 \text{ GeV}} \right)^2 \left( \frac{3348 \text{ GeV}}{\Lambda} \right)^4, \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi \chi^* \gamma) \sim \frac{s}{\Lambda^4}$$

我们分别用下列**有效算符**描述暗物质粒子与光子的相互作用：

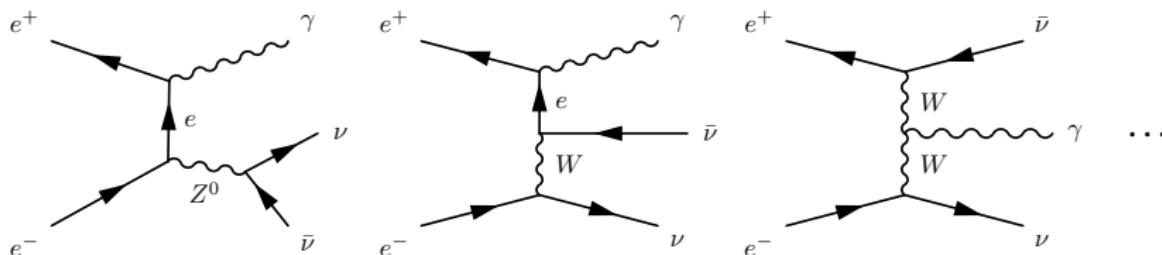
假设暗物质粒子是 Dirac 费米子，考虑算符  $\mathcal{O}_F = \frac{1}{\Lambda^3} \bar{\chi} i \gamma_5 \chi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle_{\chi \bar{\chi} \rightarrow 2\gamma} \simeq \frac{4m_\chi^4}{\pi \Lambda^6} = 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{130 \text{ GeV}} \right)^4 \left( \frac{1272 \text{ GeV}}{\Lambda} \right)^6, \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi \bar{\chi} \gamma) \sim \frac{s^2}{\Lambda^6}$$

假设暗物质粒子是复标量粒子，考虑算符  $\mathcal{O}_S = \frac{1}{\Lambda^2} \chi^* \chi F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

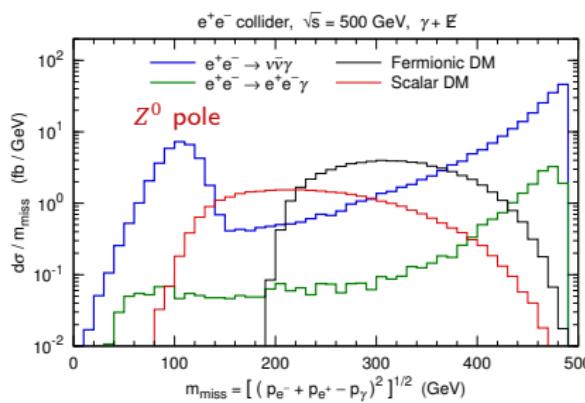
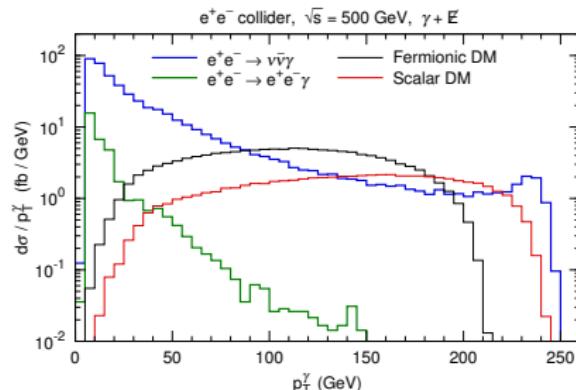
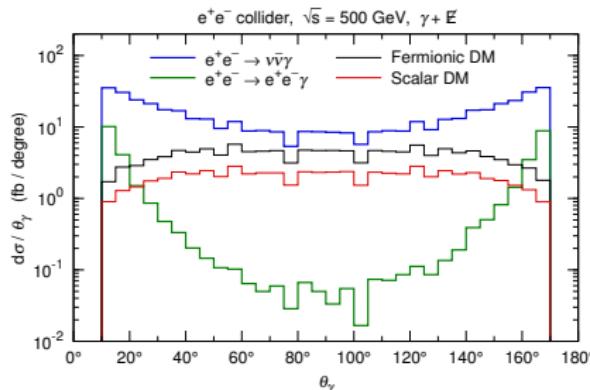
$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle_{\chi \chi^* \rightarrow 2\gamma} \simeq \frac{2m_\chi^2}{\pi \Lambda^4} = 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{130 \text{ GeV}} \right)^2 \left( \frac{3348 \text{ GeV}}{\Lambda} \right)^4, \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi \chi^* \gamma) \sim \frac{s}{\Lambda^4}$$

$\gamma + E$  搜寻道主要背景是  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$



次要背景包括  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-\gamma$

Monophoton 搜尋道

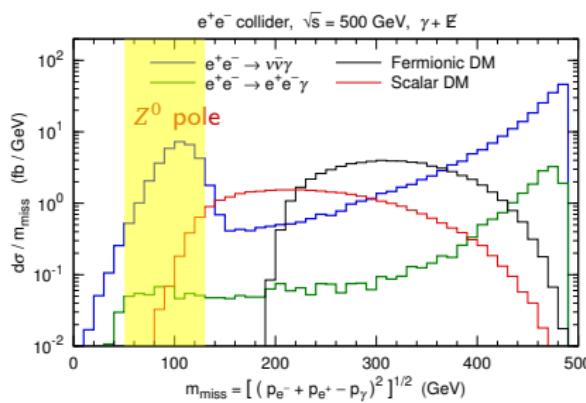
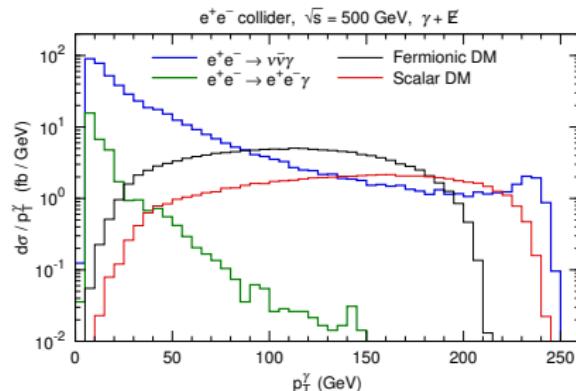
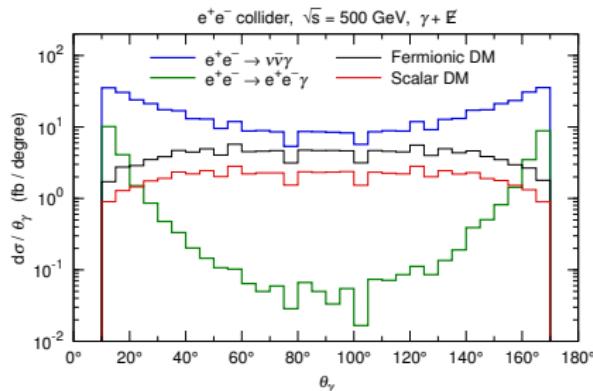


$\sqrt{s} = 500$  GeV 时, 采用如下筛选条件

**Cut 1:** 要求末态包含 1 个光子, 且满足  $E_\gamma > 10 \text{ GeV}$  和  $10^\circ < \theta_\gamma < 170^\circ$ . 不能有其它粒子

**信号基准点:** 对于费米子 (标量) 暗物质,  $\Lambda = 200$  GeV,  $m_\chi = 100$  (50) GeV

### Monophoton 搜尋道



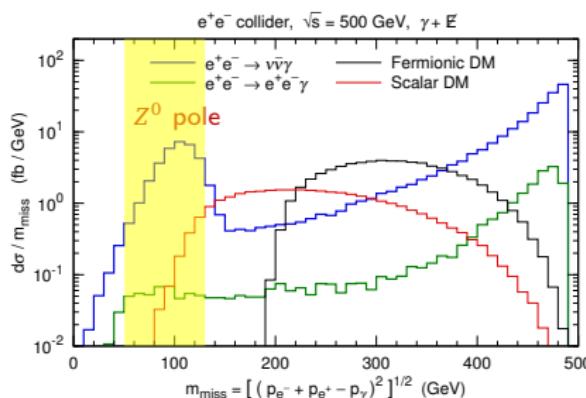
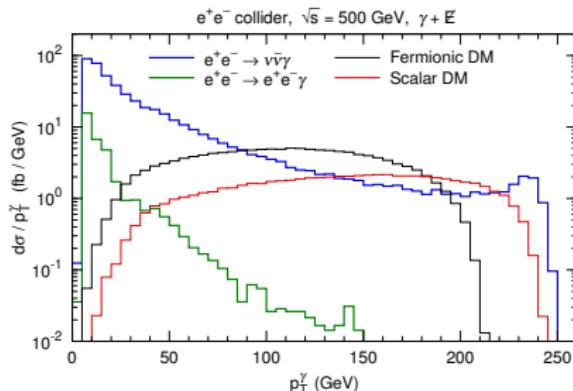
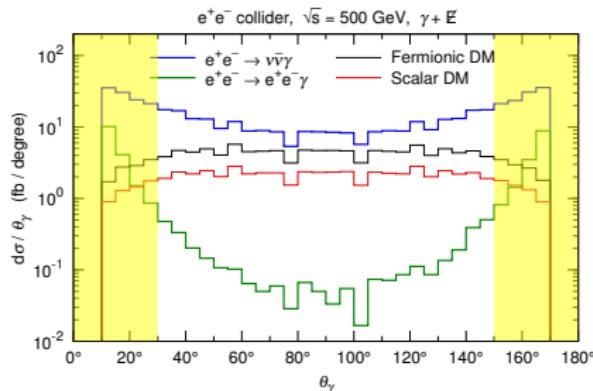
$\sqrt{s} = 500$  GeV 时, 采用如下筛选条件

**Cut 1:** 要求末态包含 1 个光子, 且满足  $E_\gamma > 10 \text{ GeV}$  和  $10^\circ < \theta_\gamma < 170^\circ$ . 不能有其它粒子

**Cut 2:** 剔除  $50 \text{ GeV} < m_{\text{miss}} < 130 \text{ GeV}$

**信号基准点:** 对于费米子 (标量) 暗物质,  $\Lambda = 200$  GeV,  $m_\chi = 100$  (50) GeV

### Monophoton 搜尋道



$\sqrt{s} = 500$  GeV 时, 采用如下筛选条件

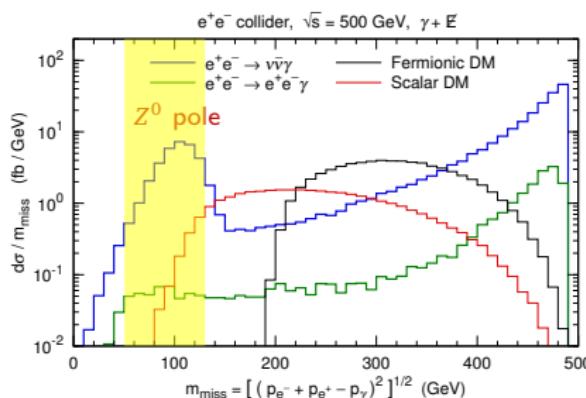
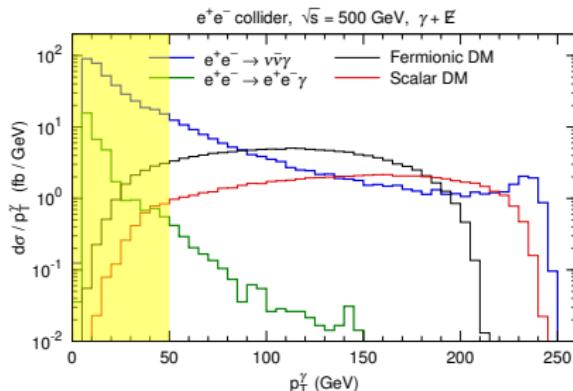
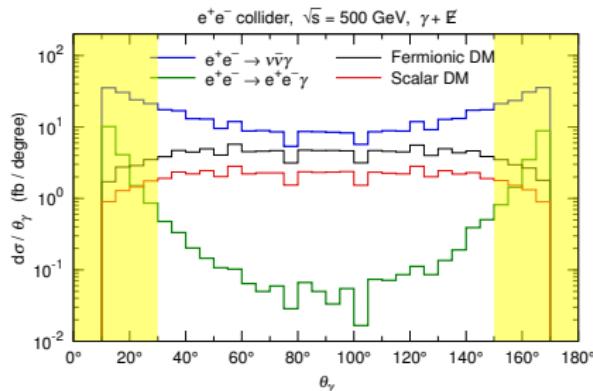
**Cut 1:** 要求末态包含 1 个光子, 且满足  $E_\gamma > 10 \text{ GeV}$  和  $10^\circ < \theta_\gamma < 170^\circ$ . 不能有其它粒子

**Cut 2:** 剔除  $50 \text{ GeV} < m_{\text{miss}} < 130 \text{ GeV}$

**Cut 3:** 要求  $30^\circ < \theta_\gamma < 150^\circ$

**信号基准点:** 对于费米子 (标量) 暗物质,  $\Lambda = 200$  GeV,  $m_\chi = 100$  (50) GeV

### Monophoton 搜尋道



$\sqrt{s} = 500$  GeV 时, 采用如下筛选条件

**Cut 1:** 要求末态包含 1 个光子, 且满足  $E_\gamma > 10 \text{ GeV}$  和  $10^\circ < \theta_\gamma < 170^\circ$ . 不能有其它粒子

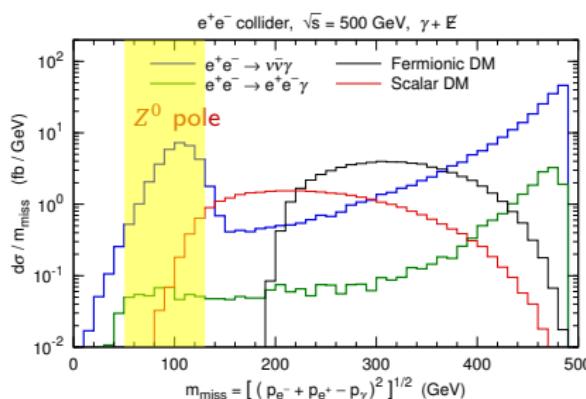
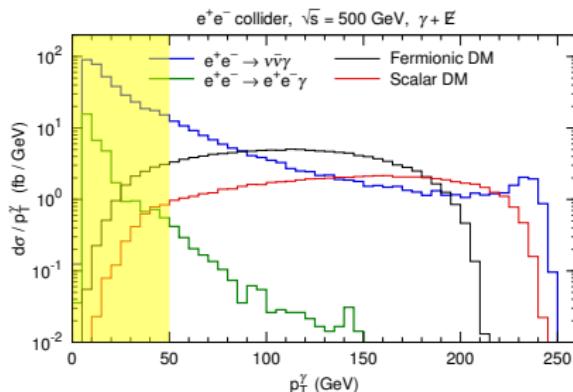
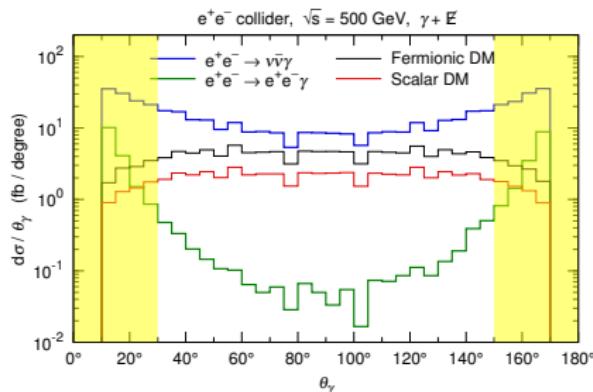
**Cut 2:** 剔除  $50 \text{ GeV} < m_{\text{miss}} < 130 \text{ GeV}$

**Cut 3:** 要求  $30^\circ < \theta_\gamma < 150^\circ$

**Cut 4:** 要求  $p_T^\gamma > \sqrt{s}/10$

**信号基准点:** 对于费米子 (标量) 暗物质,  $\Lambda = 200$  GeV,  $m_\chi = 100$  (50) GeV

Monophoton 搜尋道

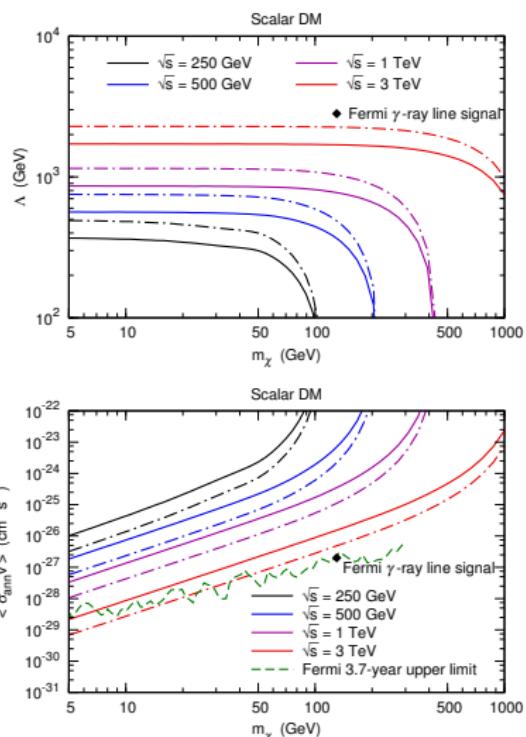
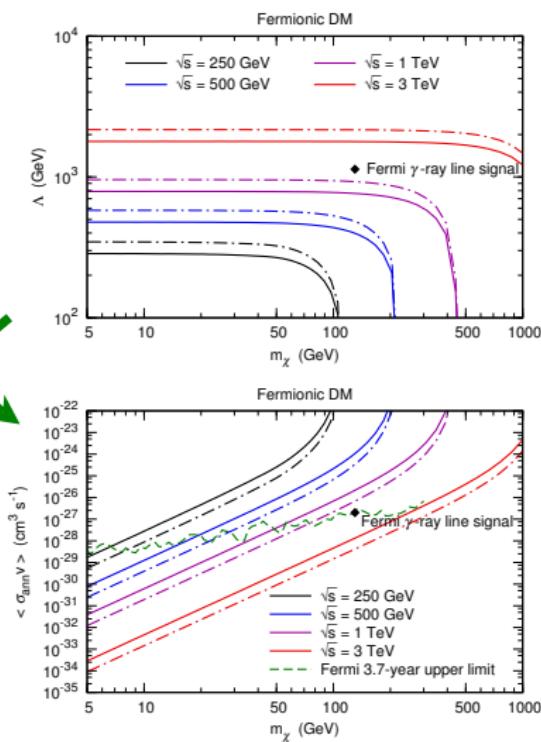


应用这些筛选条件之后  
 $\nu\bar{\nu}\gamma$  背景降低了 1 个量级  
 $e^+e^-\gamma$  背景降低了 2 个量级  
信号损失比较少, 显著性明显提升

**信号基准点:** 对于费米子 (标量) 暗物质,  $\Lambda = 200$  GeV,  $m_\chi = 100$  (50) GeV

Monophoton 捷易通

### $3\sigma$ 灵敏度曲线

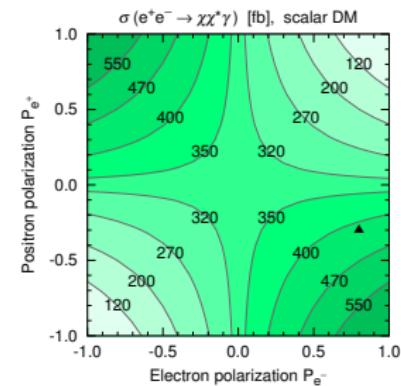
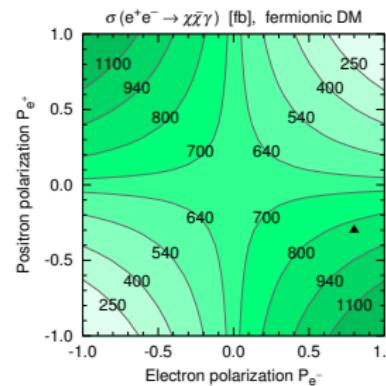
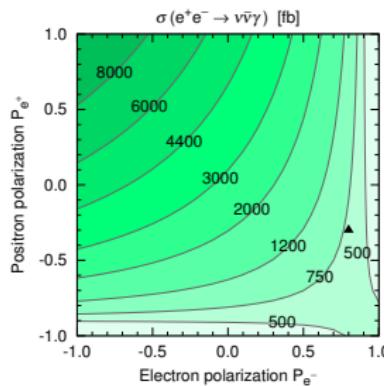


实线对应于  $100 \text{ fb}^{-1}$ , 虚线对应于  $1000 \text{ fb}^{-1}$  ( $S/\sqrt{B} = 3$ )

# 极化束流

采用极化束流时， $e^+e^-$  对撞机上某个过程的截面为

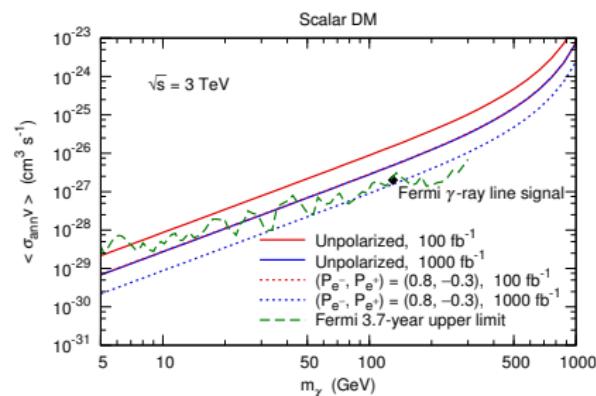
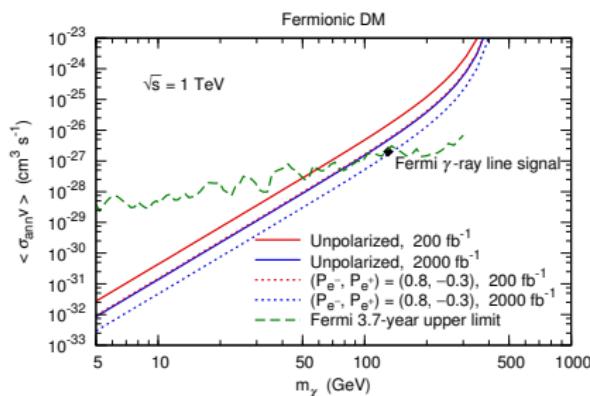
$$\sigma(P_{e^-}, P_{e^+}) = \frac{1}{4} \left[ (1 + P_{e^-})(1 + P_{e^+})\sigma_{RR} + (1 - P_{e^-})(1 - P_{e^+})\sigma_{LL} \right. \\ \left. + (1 + P_{e^-})(1 - P_{e^+})\sigma_{RL} + (1 - P_{e^-})(1 + P_{e^+})\sigma_{LR} \right]$$



▲  $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (0.8, -0.3)$ : ILC 设计中可以达到的极化度

[ILC technical design report, Vol. 1, arXiv:1306.6327]

# 采用极化束流前后的 $3\sigma$ 灵敏度曲线



$$(S/\sqrt{B} = 3)$$

使用极化束流大约相当于积分亮度提高 1 个量级

若采用极化束流，对于费米子（标量）暗物质，当  $\sqrt{s} = 1$  (3) TeV 时，采集  $2000$  ( $1000$ )  $\text{fb}^{-1}$  数据就足以在  $e^+e^-$  对撞机上检验 Fermi 疑似线谱信号

## Mono-Z 搜寻道：暗物质与 $ZZ/Z\gamma$ 的相互作用

在前面讨论的 monophoton 信号末态中，除了  $\cancel{E}$ ，只有 1 个光子，现在将它替换成  $Z$  玻色子，讨论未来高能  $e^+e^-$  对撞机上的 **mono-Z +  $\cancel{E}$  搜寻道**。

# Mono-Z 搜寻道：暗物质与 $ZZ/Z\gamma$ 的相互作用

在前面讨论的 monophoton 信号末态中，除了  $\not{E}$ ，只有 1 个光子，现在将它替换成  $Z$  玻色子，讨论未来高能  $e^+e^-$  对撞机上的 **mono-Z +  $\not{E}$**  搜寻道。

通过这个搜寻道，可以研究**暗物质与  $ZZ/Z\gamma$  的相互作用**。假设暗物质粒子是 Dirac 费米子，考虑如下有效算符：

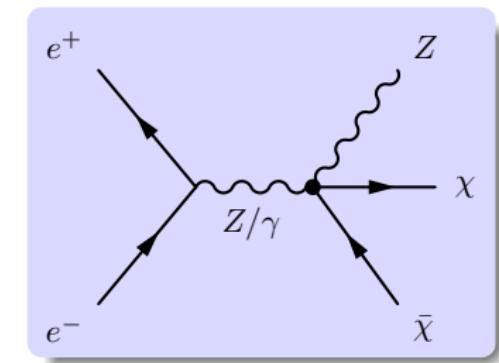
$$\mathcal{O}_{F1} = \frac{1}{\Lambda_1^3} \bar{\chi} \chi B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{1}{\Lambda_2^3} \bar{\chi} \chi W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu}$$

$$\supset \bar{\chi} \chi (G_{ZZ} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + G_{AZ} A_{\mu\nu} Z^{\mu\nu})$$

$$\mathcal{O}_{F2} = \frac{1}{\Lambda_1^3} \bar{\chi} i \gamma_5 \chi B_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu} + \frac{1}{\Lambda_2^3} \bar{\chi} i \gamma_5 \chi W_{\mu\nu}^a \tilde{W}^{a\mu\nu}$$

$$\supset \bar{\chi} i \gamma_5 \chi (G_{ZZ} Z_{\mu\nu} \tilde{Z}^{\mu\nu} + G_{AZ} A_{\mu\nu} \tilde{Z}^{\mu\nu})$$

$$\mathcal{O}_{FH} = \frac{1}{\Lambda^3} \bar{\chi} \chi (D_\mu H)^\dagger D_\mu H \rightarrow \frac{m_Z^2}{2\Lambda^3} \bar{\chi} \chi Z_\mu Z^\mu$$

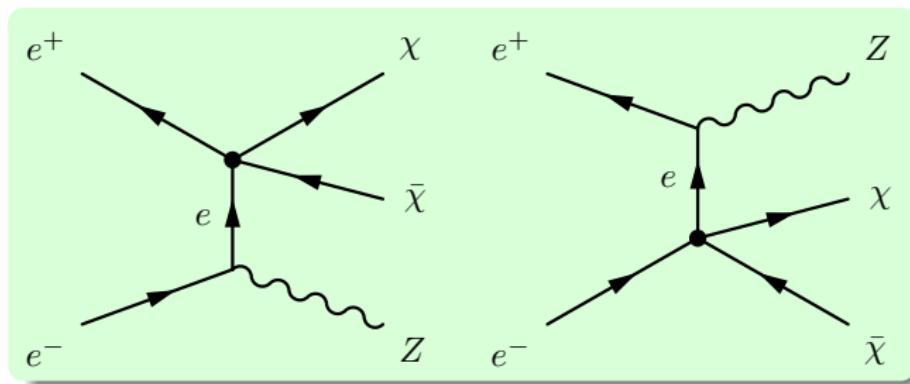


$$G_{ZZ} \equiv \frac{\sin^2 \theta_W}{\Lambda_1^3} + \frac{\cos^2 \theta_W}{\Lambda_2^3}$$

$$G_{AZ} \equiv 2 \sin \theta_W \cos \theta_W \left( \frac{1}{\Lambda_2^3} - \frac{1}{\Lambda_1^3} \right)$$

# Mono-Z 搜寻道：暗物质与 $e^\pm$ 的相互作用

通过这个搜寻道，也可以研究暗物质与  $e^+e^-$  的相互作用。此时，Z 玻色子来自正负电子的初末辐射。



考虑如下有效算符：

$$\mathcal{O}_{\text{FP}} = \frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma_5 \chi \bar{e} \gamma_5 e, \quad \mathcal{O}_{\text{FA}} = \frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma_5 \chi \bar{e} \gamma_\mu \gamma_5 e$$

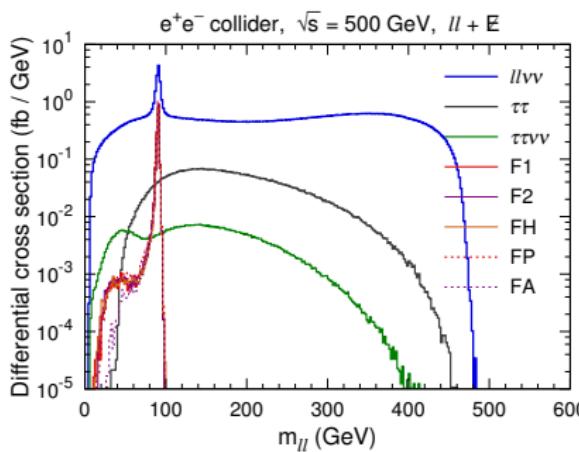
# 带电轻子道: $Z \rightarrow \ell^+ \ell^- (\ell = e, \mu)$

标准模型背景:  $e^+ e^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu} \nu$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \bar{\nu} \nu$

# 带电轻子道: $Z \rightarrow \ell^+ \ell^- (\ell = e, \mu)$

**标准模型背景:**  $e^+ e^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu} \nu$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \bar{\nu} \nu$

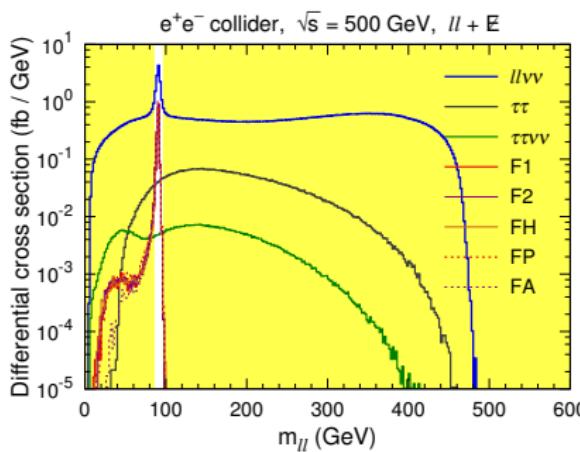
**重建 Z 玻色子:** 要求只有 2 个带电轻子 ( $e^\pm$  或  $\mu^\pm$ ), 满足  $p_T > 10 \text{ GeV}$  和  $|\eta| < 3$ , 它们同味异号 ; 没有其它粒子 ;



# 带电轻子道: $Z \rightarrow \ell^+ \ell^- (\ell = e, \mu)$

**标准模型背景:**  $e^+ e^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu} \nu$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \bar{\nu} \nu$

**重建 Z 玻色子:** 要求只有 2 个带电轻子 ( $e^\pm$  或  $\mu^\pm$ ), 满足  $p_T > 10 \text{ GeV}$  和  $|\eta| < 3$ , 它们同味异号; 没有其它粒子; **要求这两个轻子的不变质量满足**  $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 5 \text{ GeV}$

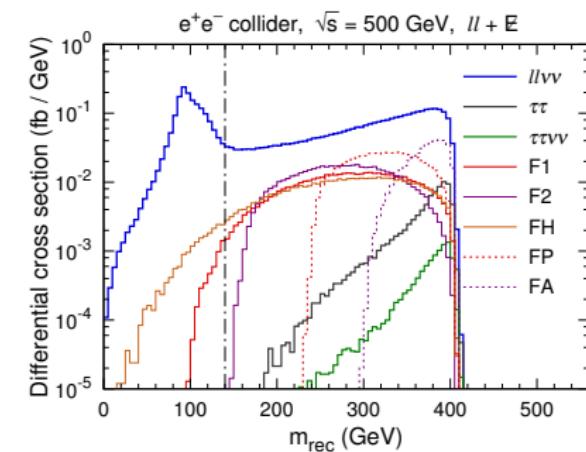
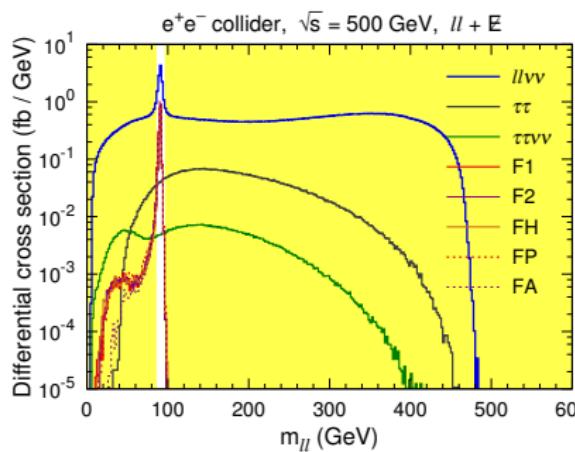


# 带电轻子道: $Z \rightarrow \ell^+ \ell^- (\ell = e, \mu)$

**标准模型背景:**  $e^+ e^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu} \nu$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \bar{\nu} \nu$

**重建 Z 玻色子:** 要求只有 2 个带电轻子 ( $e^\pm$  或  $\mu^\pm$ ), 满足  $p_T > 10 \text{ GeV}$  和  $|\eta| < 3$ , 它们同味异号; 没有其它粒子; **要求这两个轻子的不变质量满足**  $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 5 \text{ GeV}$

**重建反冲质量:**  $m_{\text{rec}} = \sqrt{(p_{e^+} + p_{e^-} - p_{\ell_1} - p_{\ell_2})^2}$ ;

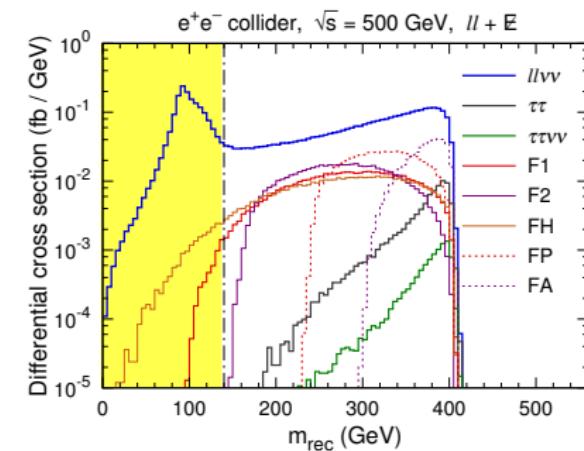
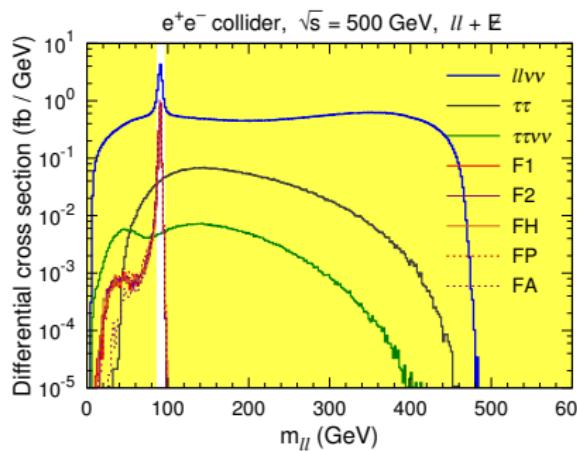


# 带电轻子道: $Z \rightarrow \ell^+ \ell^- (\ell = e, \mu)$

**标准模型背景:**  $e^+ e^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu} \nu$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \bar{\nu} \nu$

**重建 Z 玻色子:** 要求只有 2 个带电轻子 ( $e^\pm$  或  $\mu^\pm$ ), 满足  $p_T > 10 \text{ GeV}$  和  $|\eta| < 3$ , 它们同味异号; 没有其它粒子; **要求这两个轻子的不变质量满足**  $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 5 \text{ GeV}$

**重建反冲质量:**  $m_{\text{rec}} = \sqrt{(p_{e^+} + p_{e^-} - p_{\ell_1} - p_{\ell_2})^2}$ ; **剔除**  $m_{\text{rec}} < 140 \text{ GeV}$  的事例



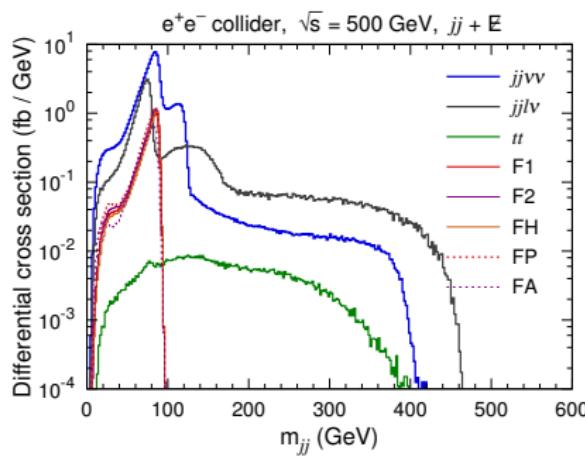
# 强子道: $Z \rightarrow jj$

**标准模型背景:**  $e^+e^- \rightarrow jj\bar{\nu}\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow jj\ell\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$

### 强子道: $Z \rightarrow jj$

**标准模型背景:**  $e^+e^- \rightarrow jj\bar{v}v$ ,  $e^+e^- \rightarrow jj\ell\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$

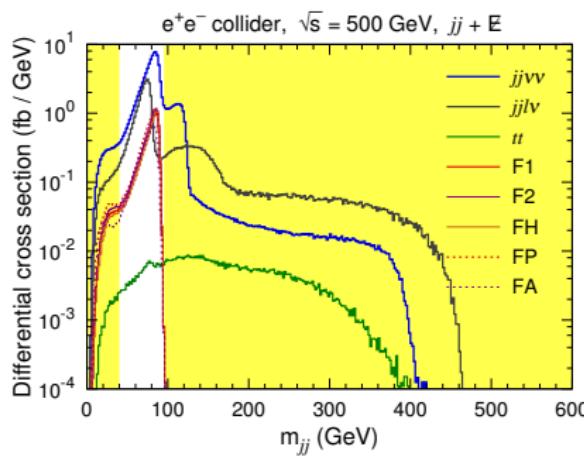
**重建 Z 玻色子**: 要求只有 2 个 jet , 满足  $p_T > 10 \text{ GeV}$  和  $|\eta| < 3$  ; 没有其它粒子 ;



# 强子道: $Z \rightarrow jj$

**标准模型背景:**  $e^+e^- \rightarrow jj\bar{\nu}\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow jjl\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$

**重建  $Z$  玻色子:** 要求只有 2 个 jet , 满足  $p_T > 10$  GeV 和  $|\eta| < 3$  ; 没有其它粒子 ; **要求这两个 jet 的不变质量满足  $40$  GeV  $< m_{jj} < 95$  GeV**

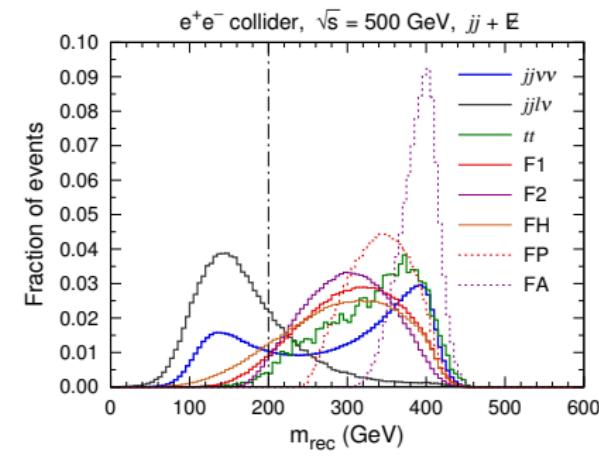
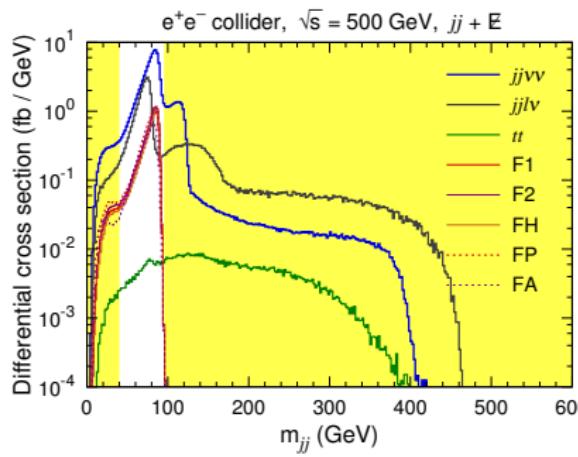


# 强子道: $Z \rightarrow jj$

**标准模型背景:**  $e^+e^- \rightarrow jj\bar{\nu}\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow jjl\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$

**重建  $Z$  玻色子:** 要求只有 2 个 jet , 满足  $p_T > 10$  GeV 和  $|\eta| < 3$  ; 没有其它粒子 ; **要求这两个 jet 的不变质量满足  $40$  GeV  $< m_{jj} < 95$  GeV**

**重建反冲质量:**  $m_{\text{rec}} = \sqrt{(p_{e^+} + p_{e^-} - p_{j_1} - p_{j_2})^2}$  ;

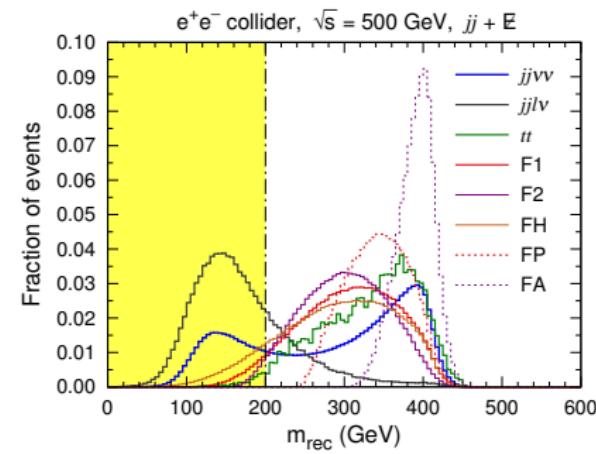
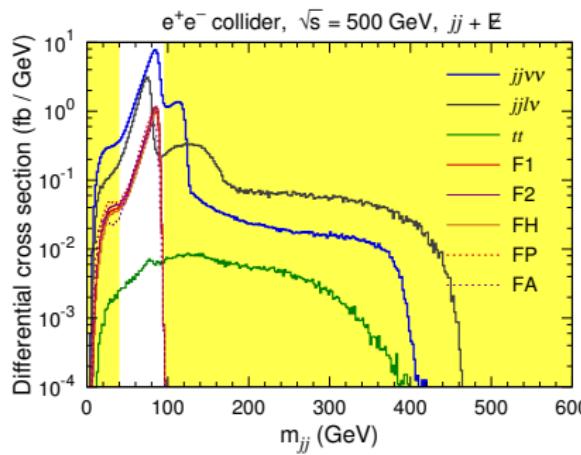


# 强子道: $Z \rightarrow jj$

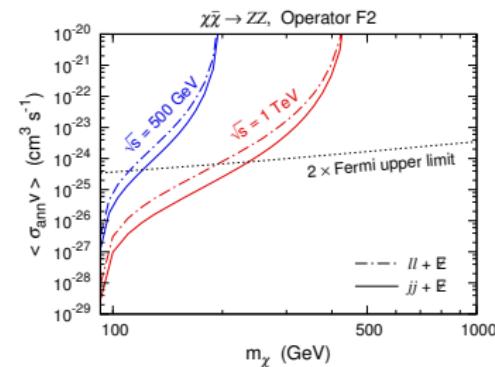
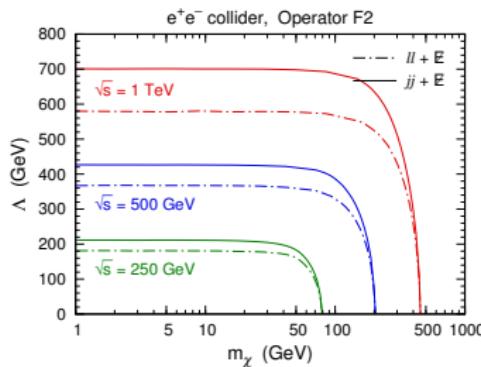
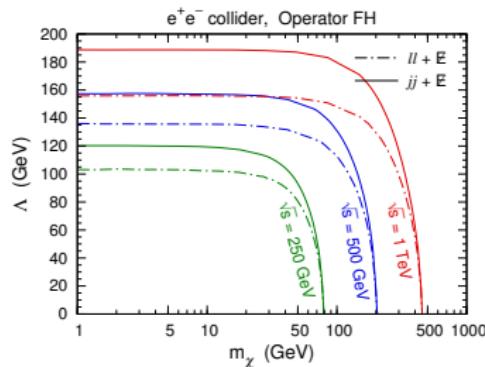
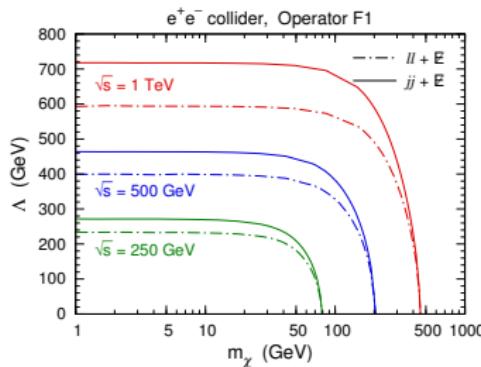
**标准模型背景:**  $e^+e^- \rightarrow jj\bar{\nu}\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow jjl\nu$ ,  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$

**重建  $Z$  玻色子:** 要求只有 2 个 jet , 满足  $p_T > 10$  GeV 和  $|\eta| < 3$  ; 没有其它粒子 ; **要求这两个 jet 的不变质量满足  $40$  GeV  $< m_{jj} < 95$  GeV**

**重建反冲质量:**  $m_{\text{rec}} = \sqrt{(p_{e^+} + p_{e^-} - p_{j_1} - p_{j_2})^2}$  ; **剔除  $m_{\text{rec}} < 200$  GeV 的事例**

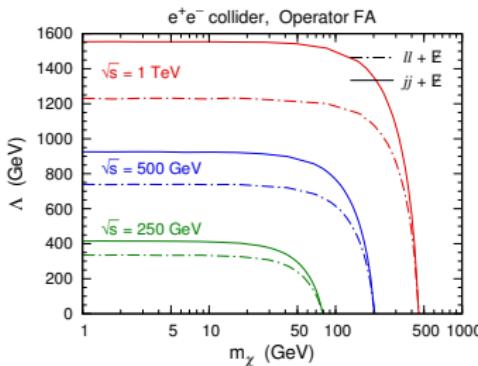
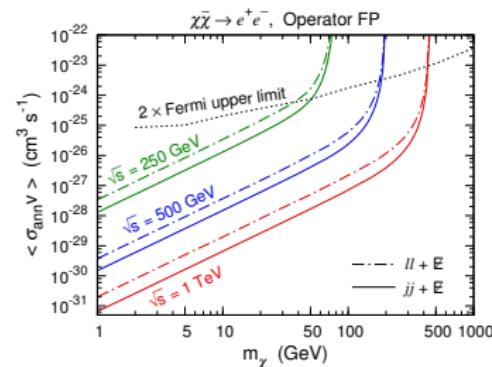
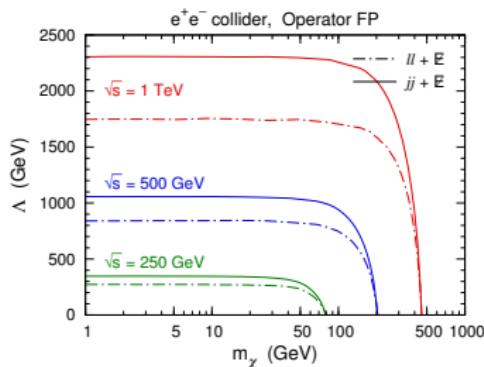


# $3\sigma$ 灵敏度：暗物质与 $Z Z/Z\gamma$ 的相互作用



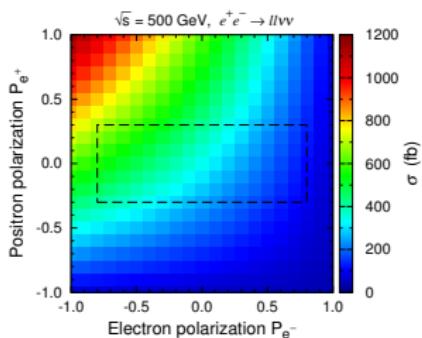
(积分亮度取为  $1000 \text{ fb}^{-1}$ ; 对  $\mathcal{O}_{F1}$  和  $\mathcal{O}_{F2}$  算符假设  $\Lambda = \Lambda_1 = \Lambda_2$ )

$3\sigma$  灵敏度：暗物质与  $e^\pm$  的相互作用

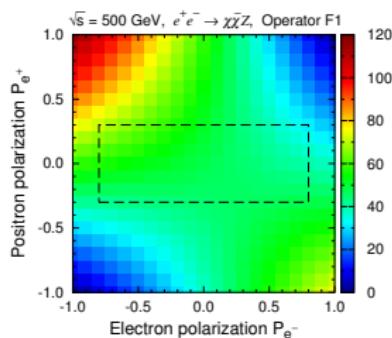


(积分亮度取为  $1000 \text{ fb}^{-1}$ ; Fermi 给出的排除限来自 arXiv:1310.0828)

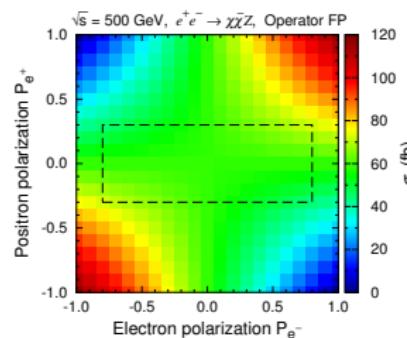
### 极化截面



( $\ell\ell\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\ell\nu$  行为相似)



( $\mathcal{O}_{F1}, \mathcal{O}_{F2}, \mathcal{O}_{FH}, \mathcal{O}_{FA}$  行为相似)

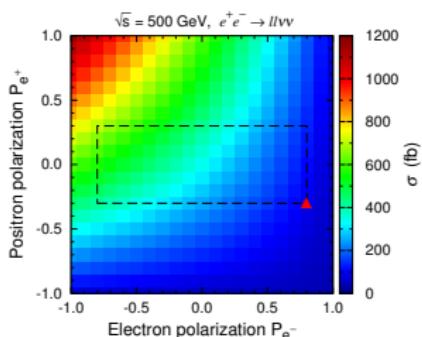


(O<sub>FP</sub>)

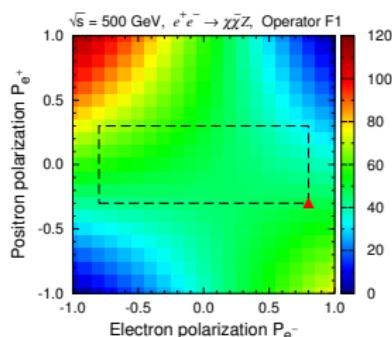
虚线方框表示 ILC 可以达到的极化范围：

$$-0.8 \leq P_{e^-} \leq +0.8, \quad -0.3 \leq P_{e^+} \leq +0.3$$

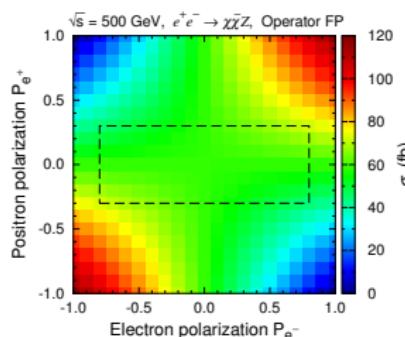
### 极化截面



( $\ell\ell\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\ell\nu$  行为相似)



( $\mathcal{O}_{F1}, \mathcal{O}_{F2}, \mathcal{O}_{FH}, \mathcal{O}_{FA}$  行为相似)



(O<sub>FP</sub>)

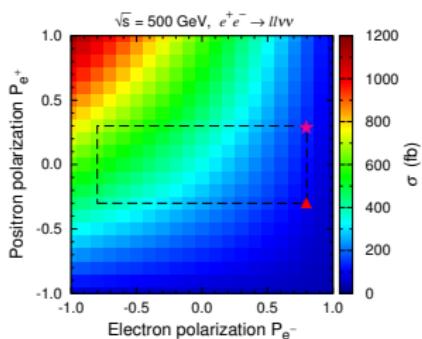
虚线方框表示 ILC 可以达到的极化范围：

$$-0.8 \leq P_{e^-} \leq +0.8, \quad -0.3 \leq P_{e^+} \leq +0.3$$

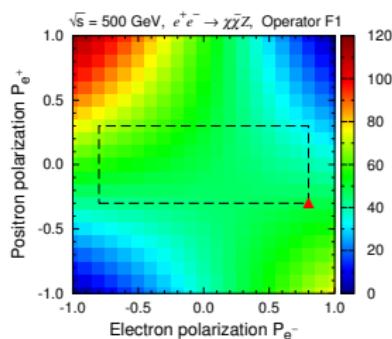
要得到最大的信号显著性，可选择适当的极化束流：

$\Delta(P_{e^-}, P_{e^+}) = (+0.8, -0.3)$  对  $\mathcal{O}_{\text{F1}}$ ,  $\mathcal{O}_{\text{F2}}$ ,  $\mathcal{O}_{\text{FH}}$  和  $\mathcal{O}_{\text{FA}}$  算符而言最优

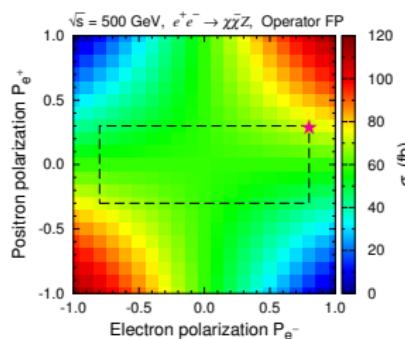
### 极化截面



( $\ell\ell\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\bar{\nu}\nu$ ,  $jj\ell\nu$  行为相似)



( $\mathcal{O}_{F1}$ ,  $\mathcal{O}_{F2}$ ,  $\mathcal{O}_{FH}$ ,  $\mathcal{O}_{FA}$  行为相似)



(O<sub>FP</sub>)

虚线方框表示 ILC 可以达到的极化范围：

$$-0.8 \leq P_{e^-} \leq +0.8, \quad -0.3 \leq P_{e^+} \leq +0.3$$

要得到最大的信号显著性，可选择适当的极化束流：

$\Delta(P_{e^-}, P_{e^+}) = (+0.8, -0.3)$  对  $\mathcal{O}_{F1}$ ,  $\mathcal{O}_{F2}$ ,  $\mathcal{O}_{FH}$  和  $\mathcal{O}_{FA}$  算符而言最优

★  $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (+0.8, +0.3)$  对  $\mathcal{O}_{\text{FP}}$  算符而言最优

# 极化束流对灵敏度的提升

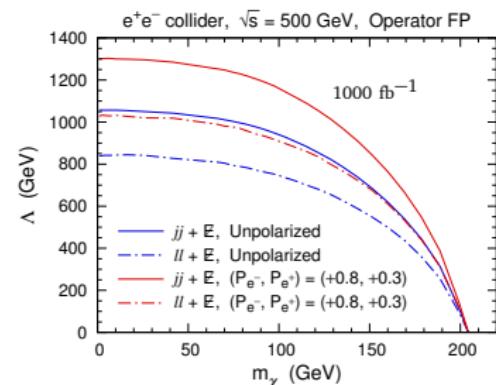
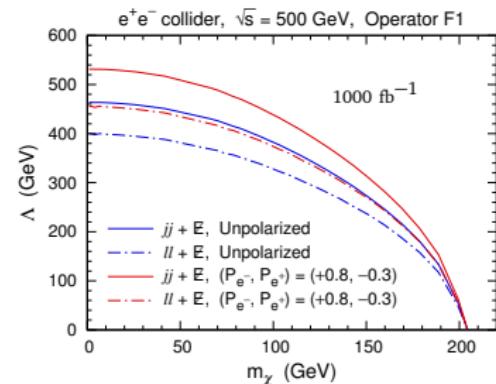
$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ , 积分亮度为  $100 \text{ fb}^{-1}$  时,  
采用最优极化束流后的信号显著性  $S_{\text{pol}}$  与  
不采用极化束流时的信号显著性  $S_{\text{unpol}}$ :

带电轻子道  $\ell^+ \ell^- + \not{E}$

	$S_{\text{unpol}}$	$S_{\text{pol}}$	$S_{\text{pol}}/S_{\text{unpol}}$
$\mathcal{O}_{F1}$	5.69	10.1	<b>1.78</b>
$\mathcal{O}_{F2}$	6.24	10.9	<b>1.75</b>
$\mathcal{O}_{FH}$	5.50	9.70	<b>1.76</b>
$\mathcal{O}_{FP}$	7.47	13.4	<b>1.79</b>
$\mathcal{O}_{FA}$	5.25	9.29	<b>1.77</b>

强子道  $jj + \not{E}$

	$S_{\text{unpol}}$	$S_{\text{pol}}$	$S_{\text{pol}}/S_{\text{unpol}}$
$\mathcal{O}_{F1}$	14.3	26.0	<b>1.82</b>
$\mathcal{O}_{F2}$	16.1	28.6	<b>1.78</b>
$\mathcal{O}_{FH}$	13.5	24.8	<b>1.84</b>
$\mathcal{O}_{FP}$	18.7	34.4	<b>1.84</b>
$\mathcal{O}_{FA}$	12.3	23.0	<b>1.87</b>



# 强子对撞机上的暗物质简化模型研究

- 与正负电子对撞机相比，强子对撞机可达到的对撞能量要高得多，有机会产生非常重的粒子，适合作为“**发现机器**”。
- 不过，强作用过程引起的背景较为庞大和复杂，因而在强子对撞机上进行精确测量有一定难度。
- 目前能量最高的强子对撞机 LHC 尚未发现任何超出标准模型的新粒子。
- 大家对 LHC 下一阶段实验寄予厚望的同时，也开始设计下一代强子对撞机，如 SppC 和 VHE-LHC，希望能将对撞能量提升到  $\mathcal{O}(100)$  TeV。

# 强子对撞机上的暗物质简化模型研究

- 接下来，我们将用**简化模型 (Simplified Model)** 来描述暗物质相互作用，讨论  $pp$  对撞机现有数据对暗物质性质的限制和未来实验灵敏度。
- 相比于 UV 完整模型，这里所说的简化模型**不需要包含完整的粒子谱**，而将与特定唯象学研究相关的粒子单独抽取出来讨论，达到简化的目的，也更贴近于对撞机实验的特定搜寻道。
- 另一方面，不同于高量纲有效算符，简化模型中的相互作用一般由可重整的低量纲算符描述，因而考虑了**较轻传播子的效应**，预言出来的过程具有更加合理的截面和分布。

相关文章 : ZHY, Bi, Yan, Yin, *Phys. Rev.* **D87**, 055007 [arXiv:1211.2997]

ZHY, Bi, Yan, Yin, *Phys. Rev.* **D91**, 035008 [arXiv:1410.3347]

Xiang, Bi, Yin, ZHY, *Phys. Rev.* **D91**, 095020 [arXiv:1503.02931]

○○○○○○○○○○

超对称模型暗物质遗留密度

在超对称模型中， $\tilde{\chi}_1^0$  涅灭到标准模型费米子的过程受到螺旋度压低，截面偏小。一般情况下给出的暗物质遗留密度偏大，需要考虑特殊的参数区域。

① Bulk 区域:  $\tilde{\chi}_1^0$  的主要分量是 bino, 主要通过交换  $t$  道较轻的 sfermion 湮灭

## ② Focus point 区域

$\tilde{\chi}_1^0$  是 bino 与 higgsino/wino 的混合态

$$m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\chi}_1^\pm} \text{ 或 } m_{\tilde{\chi}_2^0}$$

$\tilde{\chi}_1^0$  与  $\tilde{\chi}_1^\pm$  或  $\tilde{\chi}_2^0$  共湮灭 (coannihilation)

### ③ Sfermion 共湮灭区域:

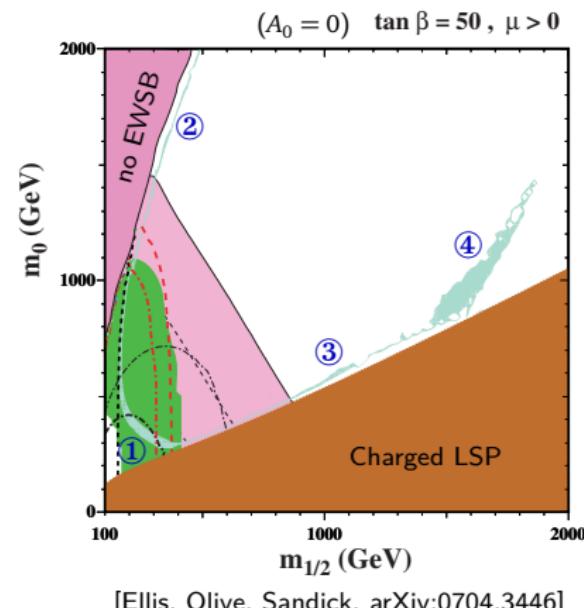
$$m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\tau}_1} \text{ or } m_{\tilde{t}_1}$$

$\tilde{\chi}_1^0$  与  $\tilde{\tau}_1$  或  $\tilde{t}_1$  共湮灭

#### ④ Higgs funnel 区域:

$$2m_{\tilde{\chi}_1^0} \simeq m_{A^0}, m_{h^0} \text{ 或 } m_{H^0}$$

$\tilde{\chi}_1^0$  通过某个中性 Higgs 粒子的共振峰湮灭



## 共湮灭图像

一般来说，要通过共湮灭机制来得出正确的暗物质遗留密度，次最轻超对称粒子 (NLSP) 的质量  $m_{\text{NLSP}}$  应满足

$$\frac{m_{\text{NLSP}} - m_{\tilde{\chi}_1^0}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \lesssim 20\%$$

[Profumo, Yaguna, arXiv:hep-ph/0407036]

在这里，我们考虑 3 种与较轻的  $t_1$  有关的共湮灭图像

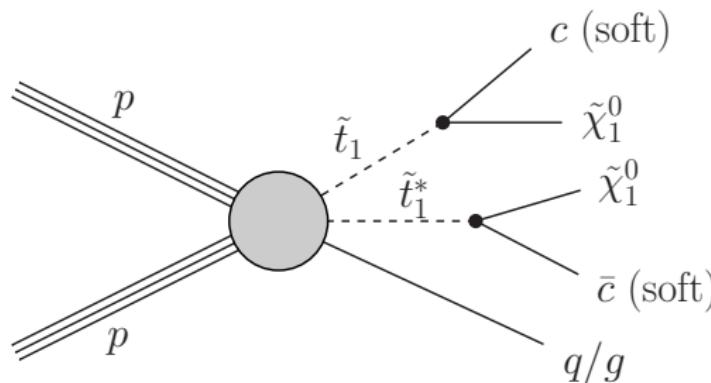
- $\tilde{t}_1 - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像:  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{t}_1}$
  - $\tilde{\chi}_1^\pm - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像:  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\chi}_1^\pm} < m_{\tilde{t}_1}$
  - $\tilde{\tau}_1 - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像:  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\tau}_1} < m_{\tilde{t}_1}$

假设其它超对称粒子比较重，研究这些图像对 LHC 搜寻  $\tilde{t}_1 \tilde{t}_1^*$  对产生过程的影响

$\tilde{t}_1 - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像

在此图像中，假设  $\tilde{t}_1$  是 NLSP，且  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{t}_1}$ ，则  $\tilde{t}_1 \rightarrow t \tilde{\chi}_1^0$  和  $\tilde{t}_1 \rightarrow b W \tilde{\chi}_1^0$  衰变模式很可能在运动学上被禁闭，而  $\tilde{t}_1 \rightarrow f f' b \tilde{\chi}_1^0$  衰变模式被 4 体相空间严重压低，于是圈图过程  $\tilde{t}_1 \rightarrow c \tilde{\chi}_1^0$  很可能成为主要衰变模式

对于  $m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_c < m_{\tilde{t}_1} < m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_b + m_W$  参数区域，我们假设  $\tilde{t}_1 \rightarrow c \tilde{\chi}_1^0$  (100%)



LHC 搜寻道: monojet +  $\cancel{E}_T$

**标准模型背景:**  $Z(\rightarrow \nu\bar{\nu}) + \text{jets}$ ,  $W(\rightarrow \ell\nu) + \text{jets}$ , ...

○○○○○○○○○○

超对称模型共湮灭图像与标量顶夸克搜寻

$\tilde{t}_1$ - $\tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像： $\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$

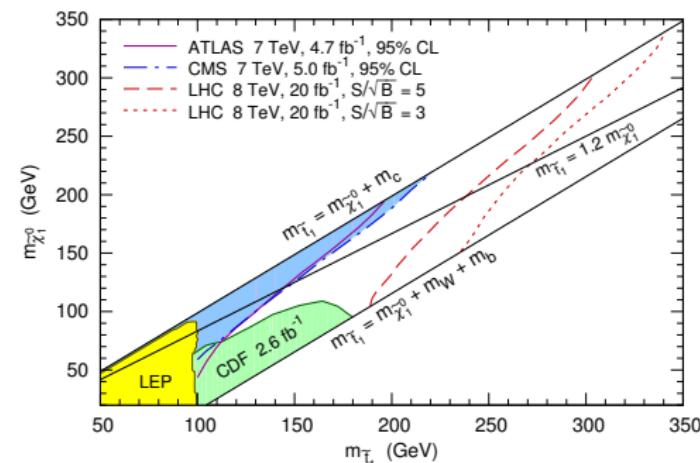
$\sqrt{s} = 7$  TeV 时，利用 ATLAS 和 CMS 合作组在 monojet +  $\cancel{E}_T$  搜索道的  $\sim 5$   $\text{fb}^{-1}$  数据分析结果，我们模拟了信号产生过程，给出对“共湮灭区域” ( $m_{\tilde{t}_1} < 1.2m_{\tilde{\chi}_1^0}$ ) 的限制：

$m_{\tilde{t}_1} \gtrsim 150 - 220$  GeV (95% CL)

接着，我们通过模拟估算在  $\sqrt{s} = 8$  TeV 的 LHC 上采集  $20 \text{ fb}^{-1}$  数据的实验灵敏度，将筛选条件取为：

$\cancel{E}_T > 300$  GeV; 领头 jet 满足  $p_T > 150$  GeV 和  $|\eta| < 2.4$ ;  $p_T > 50$  GeV 的 jet 不能超过 2 个;  $\Delta\phi(j_1, j_2) < 2.5$ ; 没有孤立轻子

⇒ 可以探索到  $m_{\tilde{t}_1} \gtrsim 270 - 340$  GeV ( $3\sigma$  灵敏度)



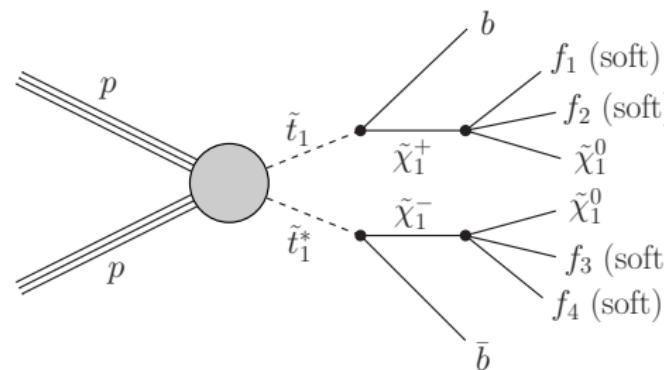
0000000000 00000

超对称模型并湮灭图像与标量顶夸克搜寻

在此图像中，假设  $\tilde{\chi}_1^\pm$  是 NLSP，且  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\chi}_1^\pm} < m_{\tilde{t}_1}$ ， $\tilde{\chi}_1^\pm$  的 2 体衰变道（如  $\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W^+ \tilde{\chi}_1^0$  和  $\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \nu_\tau \tilde{\tau}_1$  等）在运动学上被禁止， $\tilde{\chi}_1^\pm$  主要通过 3 体过程衰变到  $\tilde{\chi}_1^0$  及两个轻子或夸克

我们固定  $(m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0})/m_{\tilde{\chi}_1^0} = 10\%$ , 对于  $m_b + m_{\tilde{\chi}_1^\pm} < m_{\tilde{t}_1} < m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_t$  区域,

假设  $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$  (100%) 和  $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow ff'\tilde{\chi}_1^0$  (100%)



LHC 搜寻道: 1-2  $b$ -jets +  $E_T$

**标准模型背景:** top pair,  $Z/W +$  heavy flavors, single top, ...

对称模型并湮灭图像与标量场奇点搜索

$\tilde{\chi}_1^\pm - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像:  $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow ff'\tilde{\chi}_1^0$

$\sqrt{s} = 7$  TeV 时, LHC 限制来自

ATLAS, 2.05 fb<sup>-1</sup>, 2b-jets + $\not{E}_T$  分析

ATLAS, 4.7 fb<sup>-1</sup>, 2b-jets + $E_T$  分析

CMS, 4.98 fb<sup>-1</sup>, b-jets +  $E_T$  分析

↓

至多排除到  $m_{\tilde{t}_1} \simeq 380$  GeV (95% CL)

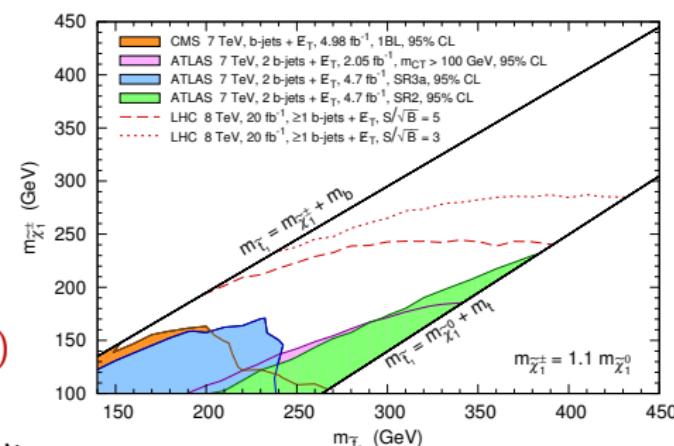
$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, 20 \text{ fb}^{-1}$  数据量 LHC 模拟

没有孤立轻子;  $\cancel{E}_T > 200$  GeV;  $H_T > 300$  GeV

$n_{\text{jet}} \geq 3$  ( $p_{\text{T}} > 60$  GeV);  $n_{b\text{-jet}} \geq 1$  ( $p_{\text{T}} > 30$  GeV)

$\Delta\phi(j_{1,2,3}, E_T) > 0.4$ ;  $m_{jjj} \notin (130, 200)$  GeV

⇒ 至多探索到  $m_{\tilde{t}_1} \simeq 430$  GeV ( $3\sigma$  灵敏度)



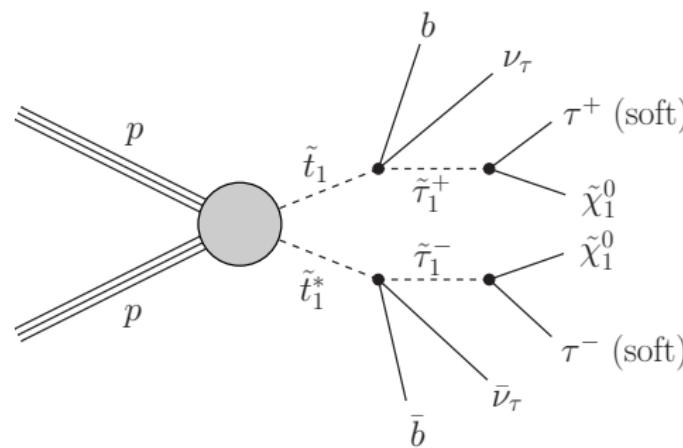
0000000000 00000

超对称模型共湮灭图像与标量顶夸克搜寻

### $\tilde{\tau}_1 - \tilde{\chi}_1^0$ 共湮灭图像

在此图像中，假设  $\tilde{\tau}_1$  是 NLSP，且  $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\tau}_1} < m_{\tilde{t}}$

我们固定  $(m_{\tilde{\tau}_1} - m_{\tilde{\chi}_1^0})/m_{\tilde{\chi}_1^0} = 10\%$ , 对于  $m_b + m_{\tilde{\tau}_1} < m_{\tilde{t}_1} < m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_t$  区域, 假设  $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\tau}_1^+ \nu_\tau$  (100%) 和  $\tilde{\tau}_1^\pm \rightarrow \tau^\pm \tilde{\chi}_1^0$  (100%)



LHC 搜寻道: 1-2  $b$ -jets +  $\cancel{E}_T$  (与  $\tilde{\chi}_1^\pm - \tilde{\chi}_1^0$  共湮灭图像相同)



## 银心 GeV 连续谱超出

银心区域暗物质密度很大，一直受到间接探测实验的重点关注。不过，银心附近天体物理环境比较复杂，伽马射线源较多，通过伽马射线连续谱来寻找暗物质信号不容易。

# 银心 GeV 连续谱超出

银心区域暗物质密度很大，一直受到间接探测实验的重点关注。不过，银心附近天体物理环境比较复杂，伽马射线源较多，通过伽马射线连续谱来寻找暗物质信号并不容易。

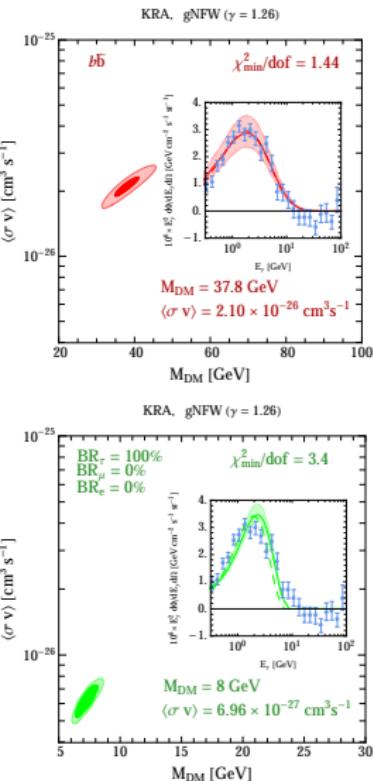
自 2009 年以来，一些研究组发现，在银心区域的 Fermi-LAT 伽马射线数据中，扣除已知天体物理背景之后，存在着显著性很高的连续谱超出信号，峰值在 GeV 附近，而且信号的空间分布与 NFW 暗物质密度分布的平方类似。

若用暗物质粒子湮灭到  $b\bar{b}$  解释，需要

$$m_\chi \simeq 30 - 40 \text{ GeV}, \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

若用暗物质粒子湮灭到  $\tau^+ \tau^-$  解释，需要

$$m_\chi \sim 9 \text{ GeV}, \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$



## $\tau$ portal 暗物质简化模型

我们研究一类  $\tau$  portal 暗物质简化模型，用暗物质粒子  $\chi$  湮灭到  $\tau^+ \tau^-$  来解释银心 GeV 超出信号，然后讨论在 LHC 上如何验证这个解释

## $\tau$ portal 暗物质简化模型

我们研究一类  $\tau$  portal 暗物质简化模型，用暗物质粒子  $\chi$  湮灭到  $\tau^+ \tau^-$  来解释银心 GeV 超出信号，然后讨论在 LHC 上如何验证这个解释

假设有一个中介粒子，与右手  $\tau$  子的相加性量子数相同，考虑两种情形：

- $\chi$  是自旋为 1/2 的费米子，中介粒子自旋为 0，记作  $\phi$
- $\chi$  是自旋为 0 的标量粒子，中介粒子自旋为 1/2，记作  $\psi$

对于费米子暗物质的情形，讨论两个模型 **DFDM** 和 **MFDM**，其中  $\chi$  分别为 Dirac 费米子和 Majorana 费米子，通过 Yukawa 耦合与右手  $\tau$  子相互作用：

$$\mathcal{L}_\phi = \lambda \phi \bar{\tau}_R \chi_L + \text{h.c.}$$

对于标量暗物质的情形，讨论两个模型 **CSDM** 和 **RSDM**，其中  $\chi$  分别为复标量粒子和实标量粒子，也通过 Yukawa 耦合与右手  $\tau$  子相互作用：

$$\mathcal{L}_\psi = \kappa \chi \bar{\tau}_R \psi_L + \text{h.c.}$$

# 低速极限下暗物质湮灭到 $\tau^+\tau^-$ 的截面

## DFDM 模型:

$$\frac{1}{2} \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\lambda^4 m_\chi^2 \beta_\tau}{64\pi(m_\phi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{9.4 \text{ GeV}} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{m_\phi/179 \text{ GeV}} \right)^4$$

## MFDM 模型:

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\lambda^4 m_\tau^2 \beta_\tau}{32\pi(m_\phi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\lambda}{m_\phi/93 \text{ GeV}} \right)^4$$

## CSDM 模型:

$$\frac{1}{2} \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\kappa^4 m_\tau^2 \beta_\tau^3}{32\pi(m_\psi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\kappa}{m_\psi/93 \text{ GeV}} \right)^4$$

## RSMD 模型:

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\kappa^4 m_\tau^2 \beta_\tau^3}{4\pi(m_\psi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\kappa}{m_\psi/156 \text{ GeV}} \right)^4$$

$(\beta_\tau \equiv \sqrt{1 - m_\tau^2/m_\chi^2}$ , 近似结果对应于  $m_\tau \ll m_\chi \ll m_\phi, m_\psi$ )

# 低速极限下暗物质湮灭到 $\tau^+\tau^-$ 的截面

## DFDM 模型:

$$\frac{1}{2} \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\lambda^4 m_\chi^2 \beta_\tau}{64\pi(m_\phi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_\chi}{9.4 \text{ GeV}} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{m_\phi/179 \text{ GeV}} \right)^4$$

## MFDM 模型: 螺旋度压低

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\lambda^4 m_\tau^2 \beta_\tau}{32\pi(m_\phi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\lambda}{m_\phi/93 \text{ GeV}} \right)^4$$

## CSDM 模型: 螺旋度压低

$$\frac{1}{2} \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\kappa^4 m_\tau^2 \beta_\tau^3}{32\pi(m_\psi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\kappa}{m_\psi/93 \text{ GeV}} \right)^4$$

## RSMD 模型: 螺旋度压低

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \frac{\kappa^4 m_\tau^2 \beta_\tau^3}{4\pi(m_\psi^2 + m_\chi^2 - m_\tau^2)^2} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \left( \frac{\kappa}{m_\psi/156 \text{ GeV}} \right)^4$$

$(\beta_\tau \equiv \sqrt{1 - m_\tau^2/m_\chi^2}$ , 近似结果对应于  $m_\tau \ll m_\chi \ll m_\phi, m_\psi$ )

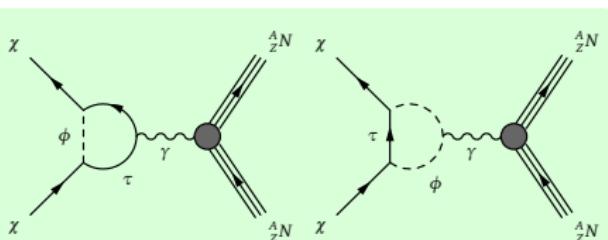
# 直接探测

**DFDM** 和 **CSDM** 模型中暗物质粒子与核子的自旋无关散射截面分别为

$$\sigma_{\chi N} = \frac{Z^2 e^2 B^2 \mu_{\chi N}^2}{\pi A^2} \quad \text{和} \quad \sigma_{\chi N} = \frac{Z^2 e^2 C^2 \mu_{\chi N}^2}{8\pi A^2}, \quad \mu_{\chi N} \equiv \frac{m_\chi m_N}{m_\chi + m_N}$$

形状因子  $B \simeq -\frac{\lambda^2 e}{64\pi^2 m_\phi^2} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{m_\tau^2}{m_\phi^2} \right) \right]$  匹配  $[\bar{\chi} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \partial^\nu \chi + \text{h.c.}] F_{\mu\nu}$  算符

形状因子  $C \simeq -\frac{\kappa^2 e}{16\pi^2 m_\psi^2} \left[ 1 + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{m_\tau^2}{m_\psi^2} \right) \right]$  匹配  $(\partial^\mu \chi)(\partial^\nu \chi^*) F_{\mu\nu}$  算符



费米子暗物质与原子核散射

$(\phi \leftrightarrow \psi)$ : 复标量暗物质与原子核散射)

$\tau$  portal 暗物质简化模型

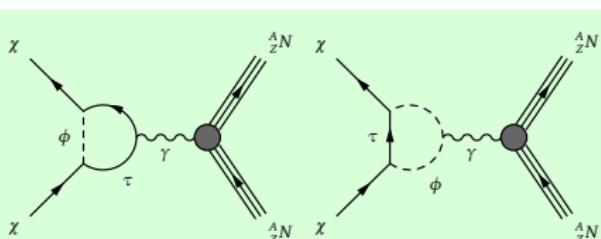
# 直接探测

**DFDM** 和 **CSDM** 模型中暗物质粒子与核子的自旋无关散射截面分别为

$$\sigma_{\chi N} = \frac{Z^2 e^2 B^2 \mu_{\chi N}^2}{\pi A^2} \quad \text{和} \quad \sigma_{\chi N} = \frac{Z^2 e^2 C^2 \mu_{\chi N}^2}{8\pi A^2}, \quad \mu_{\chi N} \equiv \frac{m_\chi m_N}{m_\chi + m_N}$$

形状因子  $B \simeq -\frac{\lambda^2 e}{64\pi^2 m_\phi^2} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{m_\tau^2}{m_\phi^2} \right) \right]$  匹配  $[\bar{\chi} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \partial^\nu \chi + \text{h.c.}] F_{\mu\nu}$  算符

形状因子  $C \simeq -\frac{\kappa^2 e}{16\pi^2 m_\psi^2} \left[ 1 + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{m_\tau^2}{m_\psi^2} \right) \right]$  匹配  $(\partial^\mu \chi)(\partial^\nu \chi^*) F_{\mu\nu}$  算符



费米子暗物质与原子核散射  
( $\phi \leftrightarrow \psi$ : 复标量暗物质与原子核散射)

在 **MFDM** 模型中，领头阶贡献  
来自 anapole moment 算符

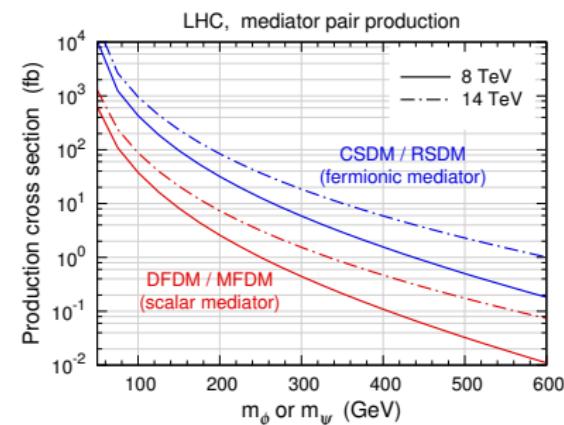
$$[-\bar{\chi} \gamma^\mu \gamma_5 \partial^\nu \chi + \text{h.c.}] F_{\mu\nu}$$

在 **RSDM** 模型中，领头阶贡献  
来自交换 2 个虚光子的双圈图

不受实验限制

# LHC 搜寻: $pp \rightarrow \phi\phi^*/\psi\bar{\psi} \rightarrow \tau^+\tau^-\chi\chi$

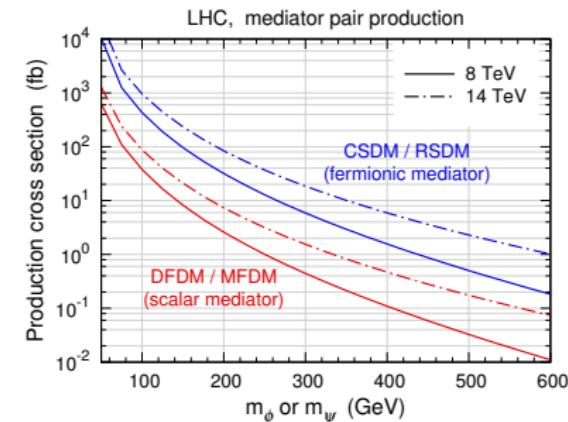
中介粒子  $\phi$  和  $\psi$  带有弱超荷和电荷，可以通过 Drell-Yan 过程 (交换  $s$  道  $\gamma/Z$ ) 在对撞机上成对产生，然后衰变为  $\tau^\pm$  和  $\chi$



# LHC 搜寻: $pp \rightarrow \phi\phi^*/\psi\bar{\psi} \rightarrow \tau^+\tau^-\chi\chi$

中介粒子  $\phi$  和  $\psi$  带有弱超荷和电荷，可以通过 Drell-Yan 过程 (交换  $s$  道  $\gamma/Z$ ) 在对撞机上成对产生，然后衰变为  $\tau^\pm$  和  $\chi$

$\tau$  轻子衰变分支比：  
 $e\nu_e\nu_\tau$  为 17.9%，  $\mu\nu_\mu\nu_\tau$  为 17.4%  
 强子模式总共 64.7%

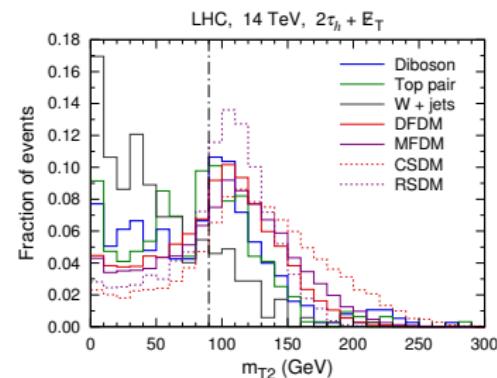


强子衰变的  $\tau$  子会形成 jet，在 LHC 上能通过  $\tau$ -tagging 技术将它重建出来：  
 $\sqrt{s} = 8$  TeV 时，采用 ATLAS 适中 (严格) 的  $\tau$ -tagging 技术，  
 正确率约为 60% (40%)，QCD jet 误判率约为 5% (2%)

我们模拟信号并对比实验结果，发现 8 TeV LHC 数据还不能限制这些模型  
 下面研究 14 TeV LHC 的搜寻能力，假设采用严格的  $\tau$ -tagging 技术

# 14 TeV LHC 搜索: $pp \rightarrow \phi\phi^*/\psi\bar{\psi} \rightarrow \tau^+\tau^-\chi\chi$

$2\tau_h + \cancel{E}_T$  搜索道: 要求有 2 个异号  $\tau_h$ ; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 90$  GeV

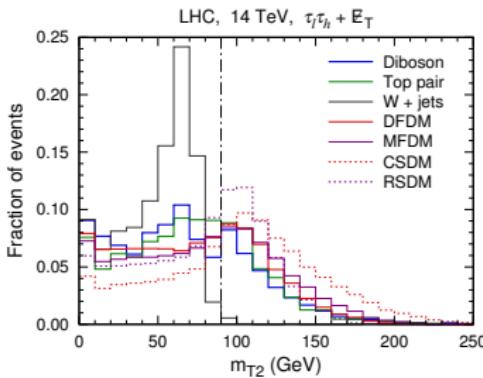
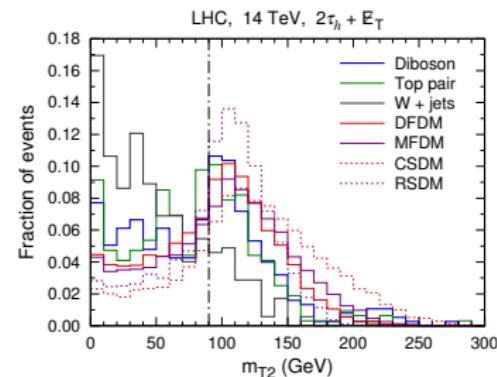


信号基准点：  
DFDM 模型  
 $m_\phi = 225$  GeV  
MFDM 模型  
 $m_\phi = 250$  GeV  
CSDM 模型  
 $m_\psi = 300$  GeV  
RSDM 模型  
 $m_\psi = 200$  GeV

# 14 TeV LHC 搜索: $pp \rightarrow \phi\phi^*/\psi\bar{\psi} \rightarrow \tau^+\tau^-\chi\chi$

$2\tau_h + \cancel{E}_T$  搜索道: 要求有 2 个异号  $\tau_h$ ; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 90$  GeV

$\tau_\ell\tau_h + \cancel{E}_T$  搜索道: 要求有 1 个  $\tau_h$  和 1 个  $\ell$ , 符号相反; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 90$  GeV



信号基准点：  
DFDM 模型

$m_\phi = 225$  GeV

MFDM 模型

$m_\phi = 250$  GeV

CSDM 模型

$m_\psi = 300$  GeV

RSDM 模型

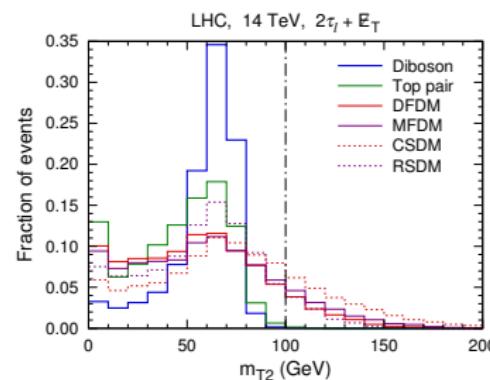
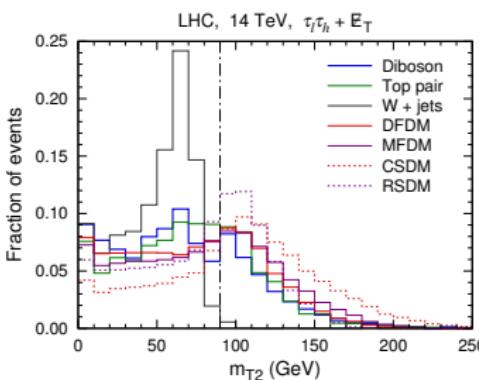
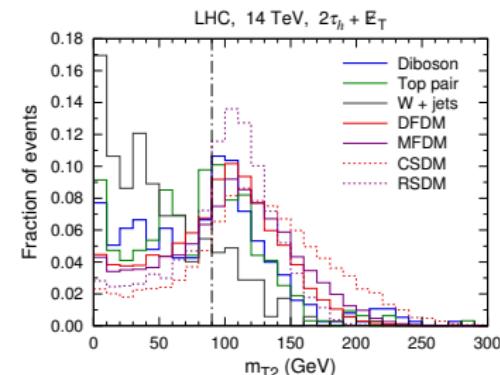
$m_\psi = 200$  GeV

# 14 TeV LHC 搜寻: $pp \rightarrow \phi\phi^*/\psi\bar{\psi} \rightarrow \tau^+\tau^-\chi\chi$

$2\tau_h + E_T$  搜寻道: 要求有 2 个异号  $\tau_h$ ; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 90$  GeV

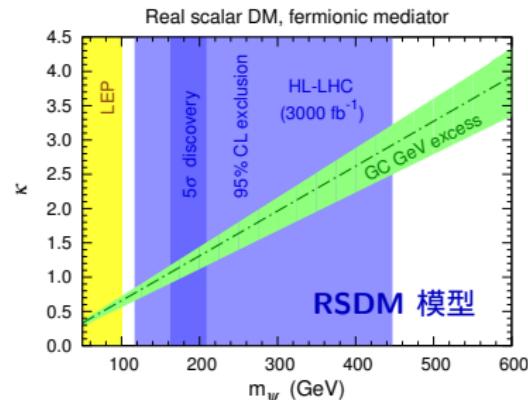
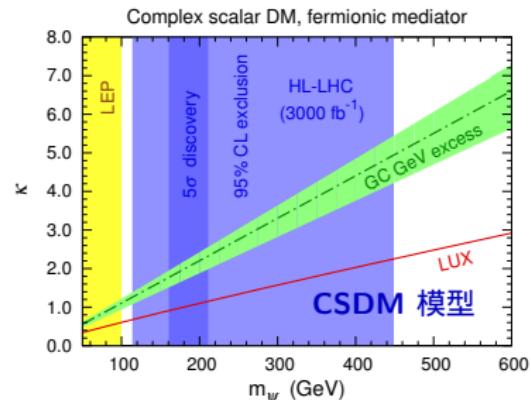
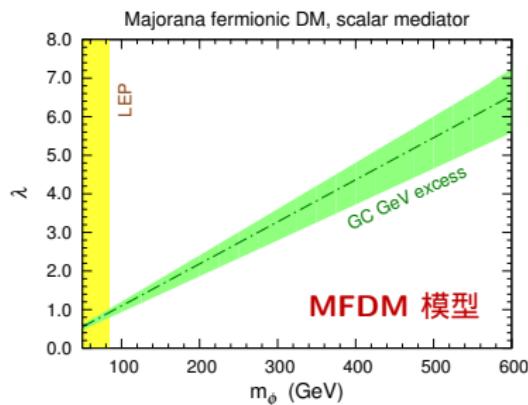
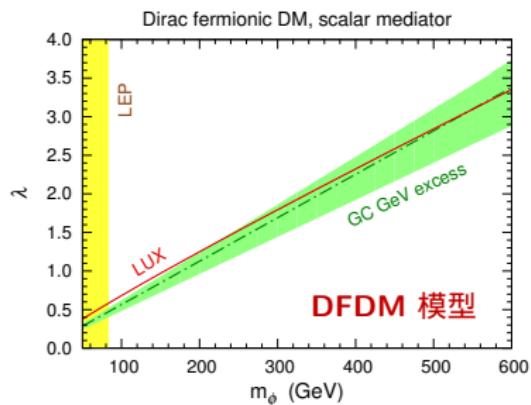
$\tau_\ell\tau_h + E_T$  搜寻道: 要求有 1 个  $\tau_h$  和 1 个  $\ell$ , 符号相反; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 90$  GeV

$2\tau_\ell + E_T$  搜寻道: 要求有 2 个异号  $\ell$ , 如果同味, 要求  $|m_{\ell\ell} - m_Z| > 10$  GeV; 没有其它粒子;  $m_{T2} > 100$  GeV



信号基准点：  
DFDM 模型  
 $m_\phi = 225$  GeV  
MFDM 模型  
 $m_\phi = 250$  GeV  
CSDM 模型  
 $m_\psi = 300$  GeV  
RSDM 模型  
 $m_\psi = 200$  GeV

## 综合结果



## LHC monojet + $\cancel{E}_T$ 搜寻道

在 LHC 上产生暗物质粒子对的同时，为了重建出  $\cancel{E}_T$  信号，可以要求有一个来自初态辐射的部分子与之伴随产生，形成 **monojet +  $\cancel{E}_T$  信号**。

在**有效场论**框架下，用**有效算符**描述暗物质粒子与夸克的相互作用，可以很方便地比较对撞机搜寻结果与其它探测实验结果。7 TeV 和 8 TeV 的 LHC 运行数据为暗物质相互作用设置了排除限。

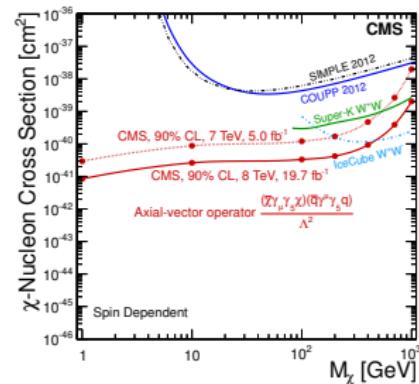
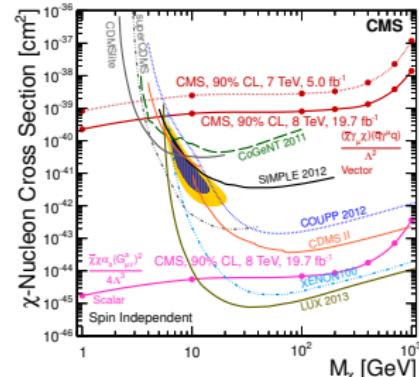
# LHC monojet + $\cancel{E}_T$ 搜寻道

在 LHC 上产生暗物质粒子对的同时，为了重建出  $\cancel{E}_T$  信号，可以要求有一个来自初态辐射的部分子与之伴随产生，形成 **monojet +  $\cancel{E}_T$**  信号。

在**有效场论**框架下，用**有效算符**描述暗物质粒子与夸克的相互作用，可以很方便地比较对撞机搜寻结果与其它探测实验结果。7 TeV 和 8 TeV 的 LHC 运行数据为暗物质相互作用设置了排除限。

右上图对应于**自旋无关**散射截面，对于  $\bar{\chi}\gamma_\mu\chi\bar{q}\gamma^\mu q$  算符，LHC 的排除能力只有在  $m_\chi$  小于几个 GeV 时才能够胜过直接探测实验。

右下图对应于**自旋相关**散射截面，直接探测实验灵敏度比较低，对于  $\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi\bar{q}\gamma^\mu\gamma_5 q$  算符，LHC 的排除能力要比直接探测实验强得多。



[CMS coll., arXiv:1408.3583]

## Z' portal 暗物质简化模型

**有效场论的适用范围有限**，当相互作用过程的动量转移足够大，可与中介粒子质量比拟，甚至超过中介粒子质量时，有效场论就失效了

为此，更合理而又简单的方式是研究简化模型，此处我们讨论一类 **Z' portal 暗物质简化模型**，假设中介粒子是自旋为 1 的中性粒子  $Z'$ ，考虑 3 种情况

- **FV 模型**: 暗物质粒子是 **Dirac 费米子**，发生 **矢量流耦合**

$$\mathcal{L}_{\text{FV}} = \sum_q g_q Z'_\mu \bar{q} \gamma^\mu q + g_\chi Z'_\mu \bar{\chi} \gamma^\mu \chi$$

- **FA 模型**: 暗物质粒子是 **Dirac 费米子**，发生 **轴矢量流耦合**

$$\mathcal{L}_{\text{FA}} = \sum_q g_q Z'_\mu \bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q + g_\chi Z'_\mu \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma_5 \chi$$

- **SV 模型**: 暗物质粒子是 **复标量粒子**，发生 **矢量流耦合**

$$\mathcal{L}_{\text{SV}} = \sum_q g_q Z'_\mu \bar{q} \gamma^\mu q + i g_\chi Z'_\mu [\chi^* \partial^\mu \chi - (\partial^\mu \chi^*) \chi]$$

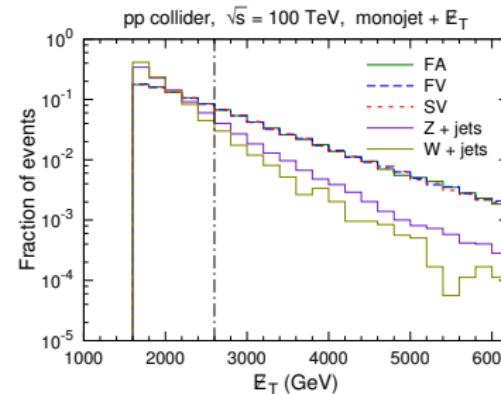
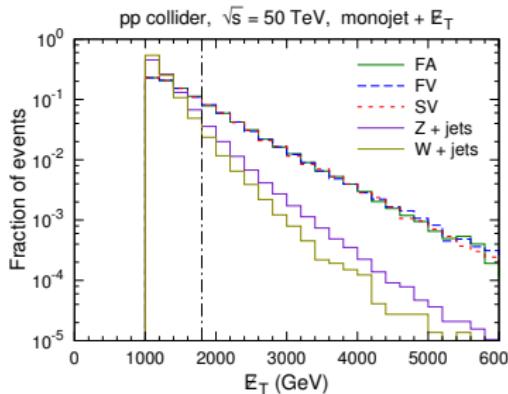
这部分工作属于 SppC pre-CDR，将对撞能量取为 33 TeV, 50 TeV 和 100 TeV

# Monojet + $\cancel{E}_T$ 搜寻道事例筛选条件

**暗物质产生信号:**  $pp \rightarrow Z'^{(*)} (\rightarrow \chi\bar{\chi}/\chi\chi^*) + \text{jets}$

**主要标准模型背景:**  $pp \rightarrow Z (\rightarrow \nu\bar{\nu}) + \text{jets}$ ,  $pp \rightarrow W (\rightarrow l\nu) + \text{jets}$

- 要求末态中至少有 1 个高能 jet, 对于  $\sqrt{s} = 33/50/100$  TeV, 要求领头 jet  $j_1$  满足  $|\eta(j_1)| < 2.4$  和  $p_T(j_1) > 1.6/1.8/2.6$  TeV,  $\cancel{E}_T > 1.6/1.8/2.6$  TeV
- $p_T > 100$  GeV 且  $|\eta| < 4$  的 jet 不能超过 2 个, 第 2 个 jet  $j_2$  是允许的, 只要它满足  $\Delta\phi(j_1, j_2) < 2.5$
- 不能含有  $p_T > 20$  GeV 且  $|\eta| < 2.5$  的孤立电子、 $\mu$  子、 $\tau_h$  和光子



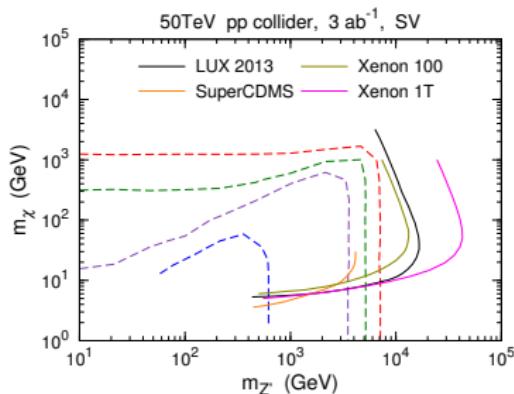
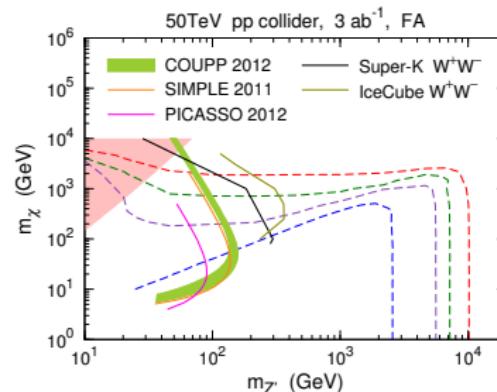
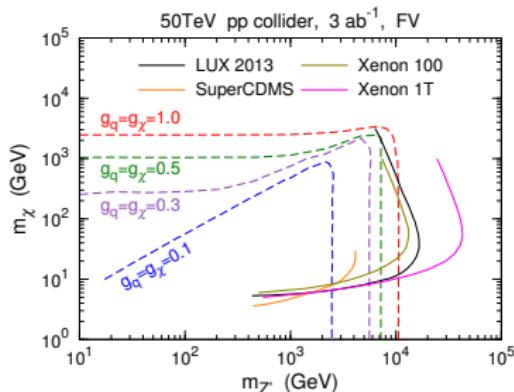
信号基准点 :

$$m_\chi = 1 \text{ TeV}$$

$$m_{Z'} = 5 \text{ TeV}$$

$$g_q = g_\chi = 0.1$$

SppC 预期排除能力 (90% 置信度) 与直接探测实验排除限



虚线为对撞机预期排除限

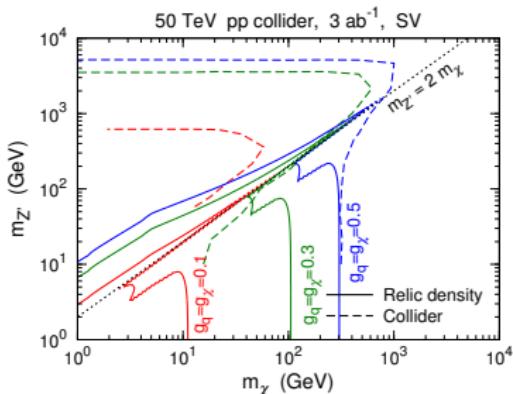
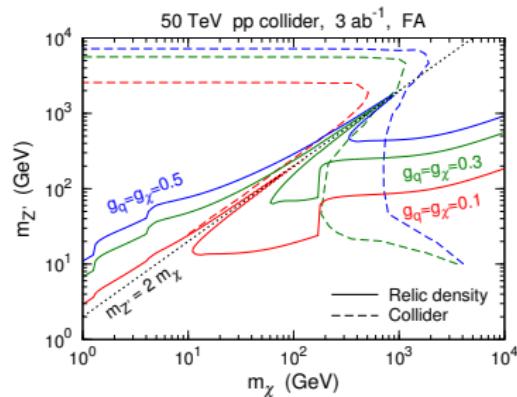
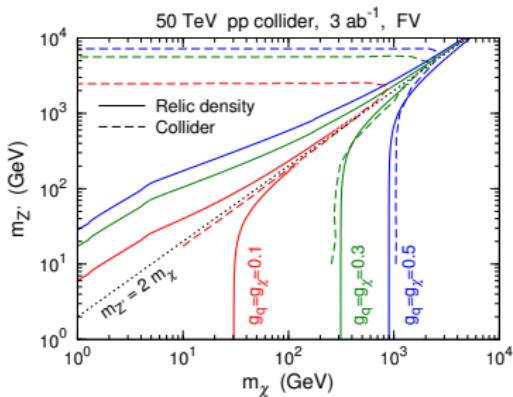
实线为直接探测排除限，对应于

$$g_q = g_\chi = 0.5$$

淡红色区域破坏么正性，对应于

$$g_q = g_\chi = 1$$

SppC 预期排除能力 (90% 置信度) 与暗物质遗留密度



虚线为对撞机预期排除限

实线对应于暗物质遗留密度观测值

# 总结

在以上工作中，我们主要研究对撞机上的暗物质唯象学。由于对撞机上的探测器不能探测暗物质粒子，暗物质产生过程表现为“**丢失能量**”信号。通过蒙特卡洛模拟，我们考查了对撞机搜寻暗物质的灵敏度，并与直接和间接探测实验的灵敏度比较。

- (1) 在**有效算符**框架下，我们研究了未来正负电子对撞机上 **monophoton** 和 **mono-Z 搜寻道**的灵敏度。我们发现，采用适当的**极化束流**可以非常有效地提高灵敏度。如果对撞能量达到 1 TeV 或 3 TeV, monophoton 搜寻道可以检验 Fermi-LAT 数据中的**银心线谱疑似信号**。
- (2) 在**超对称模型**中，通过**共湮灭效应**能够提高暗物质候选粒子  $\tilde{\chi}_1^0$  的有效湮灭截面，从而得出正确的暗物质遗留密度。我们考虑了 3 种可能的共湮灭图像，并讨论它们对 LHC 搜寻**标量顶夸克  $\tilde{t}_1$**  的影响。在这些图像中，LHC 对  $\tilde{t}_1$  的限制要比一般情况弱。

# 总结

在以上工作中，我们主要研究对撞机上的暗物质唯象学。由于对撞机上的探测器不能探测暗物质粒子，暗物质产生过程表现为“**丢失能量**”信号。通过蒙特卡洛模拟，我们考查了对撞机搜寻暗物质的灵敏度，并与直接和间接探测实验的灵敏度比较。

- (3) 在一类  **$\tau$  portal** 暗物质简化模型中，我们用暗物质湮灭到  $\tau^+\tau^-$  来解释 Fermi-LAT 数据中的**银心 GeV 连续谱疑似超出信号**。在 LHC 上，可以通过  $2\tau_h + \cancel{E}_T$ ,  $\tau_\ell\tau_h + \cancel{E}_T$  和  $2\tau_\ell + \cancel{E}_T$  这三个搜寻道来寻找模型里中介粒子的产生过程。我们发现，对于以费米子为中介粒子的模型，LHC 有能力检验这种解释。
- (4) 作为 **SppC pre-CDR** 的一部分，通过 **monojet +  $\cancel{E}_T$  搜寻道**，我们研究了对撞能量分别为 33, 50 和 100 TeV 的未来  $pp$  对撞机对 3 种  **$Z'$  portal** 暗物质简化模型的探测能力。对撞机搜寻灵敏度在一些情况下能够胜过直接探测，也有可能探索遗留密度观测值允许的大部分参数空间。

# 谢谢大家!