

暗物质间接探测给出DM湮灭的截面限制

张朋龙

暗物质(DM)湮灭产生的光子

- 末态辐射（初级末态 γ 光子）
- 逆康普顿效应（次级光子）
- 同步辐射（次级光子）

末态辐射

- 暗物质湮灭产生初级末态 γ 光子.
- 探测器 ψ 方向的 γ 射线流强:

$$\Phi(\psi) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{los}} \xi(\mathbf{x}, E) dl(\psi)$$

- $\xi(\mathbf{x}, E)$ 为发射率, 对于末态辐射的发射率就是暗物质湮灭的源函数:

$$\xi(\mathbf{x}, E) = Q_{\text{anni}}(\mathbf{x}, E) = \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_\chi^2} \left(\frac{dN}{dE} \right)_\gamma \rho^2(\mathbf{x}),$$

$\left(\frac{dN}{dE} \right)_\gamma$ 是光子的数密度, $\rho(\mathbf{x})$ 是DM密度.

末态辐射

- 对立体角和距离积分，得到流强：

$$\bar{\Phi}_{\Delta\Omega}\Delta\Omega = \int_{\Delta\Omega} \Phi(\psi) d\Omega = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_\chi^2} \left(\frac{dN}{dE}\right)_\gamma J^{\text{NFW}}.$$

其中J因子为：

$$J(\psi) = \int_{\text{los}} \rho^2(r(\psi)) dl(\psi) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \rho^2 \left(\sqrt{l^2 + d^2 - 2dl \cos \theta} \right) dl,$$

- 等式左边相当于实验数据给出的光子流强
- 带入探测器实验结果可以给出暗物质湮灭的散射截面

逆康普顿效应

- 利用逆康普顿(Compton)效应给出暗物质湮灭截面限制
- 暗物质湮灭产生的高能初级正负电子会与周围的低能背景光子(CMB)发生逆Compton 散射, 从而产生次级光子, 与初级光子叠加给出总能谱.
- 矮星系Draco的质光比很大, 发光物质很少, 我们可以近似地认为它的背景光子场纯粹是CMB, 下面将讨论暗物质湮灭产生的正负电子与CMB 光子的相互作用.

电子的传播方程

- 正负电子由暗物质湮灭产生之后, 要在矮星系Draco 中传播, 在扩散传播时, 会发生逆Compton 散射、同步辐射等造成能量损失.
- 传播方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{dn_e}{dE} = \nabla \left[D(E, \mathbf{x}) \nabla \frac{dn_e}{dE} \right] + \frac{\partial}{\partial E} \left[b(E, \mathbf{x}) \frac{dn_e}{dE} \right] + Q_e(E, \mathbf{x}),$$

其中 $D(E; \mathbf{x})$ 是位置空间扩散系数, $b(E; \mathbf{x})$ 是能量损耗率.

传播方程静态解

- 如若源和正负电子的数密度均达到平衡, 不再依赖于时间, 给出传播方程静态解.

$$\frac{dn_e}{dE}(r, E) = \frac{1}{b(E)} \int_E^{m_\chi} dE' \hat{G}(r, v - v') Q_e(r, E'),$$

- 其中Green 函数

$$\begin{aligned} \hat{G}(r, \Delta v) &= \frac{1}{(4\pi\Delta v)^{1/2}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} (-1)^n \int_0^{r_t} dr' \frac{r'}{r_n} \\ &\times \left\{ \exp \left[-\frac{(r' - r_n)^2}{4\Delta v} \right] - \exp \left[-\frac{(r' + r_n)^2}{4\Delta v} \right] \right\} \frac{\rho^2(r')}{\rho^2(r)} \end{aligned}$$

源函数

- 暗物质湮灭产生正负电子的源函数,

$$Q_e(r, E) = 2\rho^2(r) \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_\chi} \left(\frac{dN}{dE}\right)_{e^+},$$

其中源处的电子数密度 $\left(\frac{dN}{dE}\right)_e$ 由PYTHIA 算出, 2代表正负电子都考虑.

- 这样可以得到传播到距离Draco 中心r 处的电子数密度 $\frac{dn}{dE}(r, E)$.

逆Compton 散射的发射率

- 传播到 r 处的正负电子与CMB 光子发生逆Compton 散射, 产生次级光子的发射率:

$$\xi_{\text{IC}}(r, E_\gamma) = \int dE_{\text{CMB}} \frac{dn_{\text{CMB}}}{dE_{\text{CMB}}} \int dE_e \frac{dn_e}{dE_e}(r, E_e) v_e F_{\text{IC}}(E_{\text{CMB}}, E_e, E_\gamma)$$

- 函数 F_{IC} 是:
$$F_{\text{IC}}(E_{\text{CMB}}, E_e, E_\gamma) = \frac{3\sigma_T}{4(E_e/m_e c^2)^2} \frac{1}{E_{\text{CMB}}} \times \left[2q \ln q + (1 + 2q)(1 - q) + \frac{(\Gamma q)^2 (1 - q)}{2(1 + \Gamma q)} \right]$$

- 其中

$$\Gamma = \frac{4E_{\text{CMB}}E_e}{m_e^2 c^4}, \quad q = \frac{E_{\text{CMB}}/E_e}{(1 - E_{\text{CMB}}/E_e) \Gamma},$$

CMB光子数密度

- CMB 是典型的黑体谱, 光强服从Planck 分布, CMB光子数密度为:

$$\frac{dn_{\text{CMB}}}{dE_{\text{CMB}}} = \frac{E_{\text{CMB}}^2}{\pi^2 \hbar^3 c^3} \frac{1}{\exp(E_{\text{CMB}}/k_B T) - 1},$$

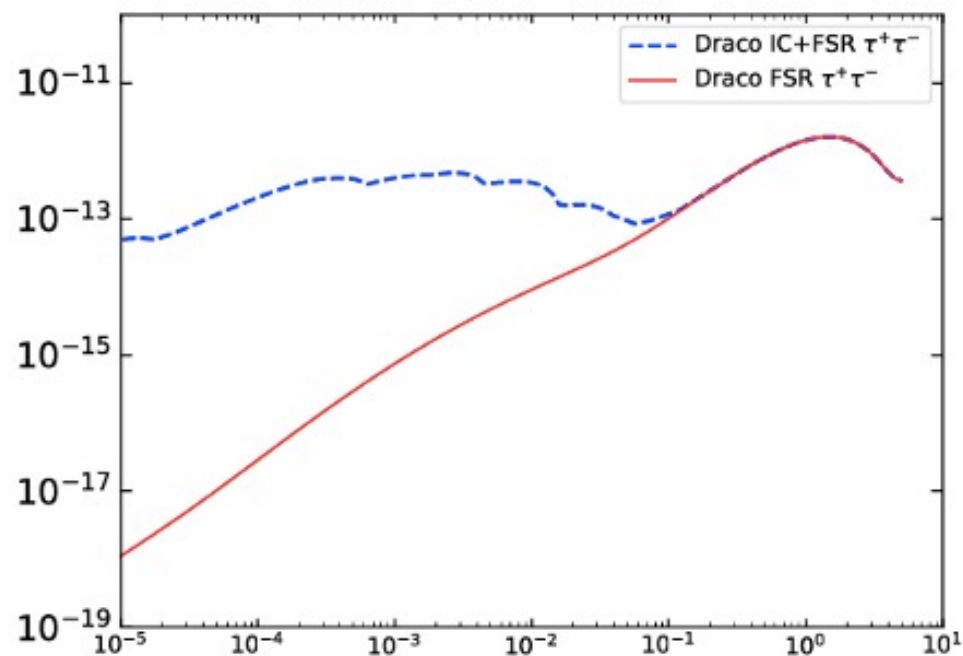
- 其中CMB 温度 $T = 2.725 \text{ K}$.

逆Compton 效应贡献的次级 γ 射线流强

- 次级 γ 射线流强:
$$\bar{\Phi}_{\Delta\Omega}^{\text{IC}} \Delta\Omega \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{\text{los}} \xi_{\text{IC}}(r, E) dl(\psi),$$
- 逆Compton 效应贡献的次级 γ 射线流强, 与初级流强叠加得到总的 γ 射线流强.

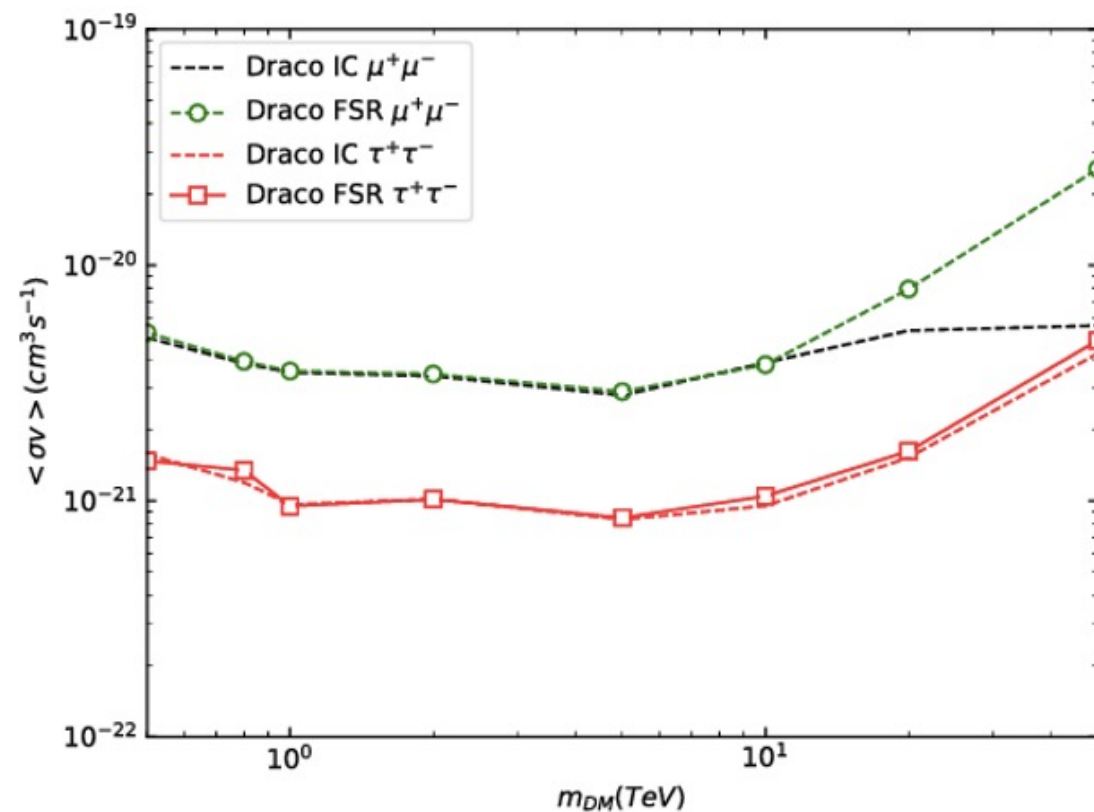
逆Compton 效应贡献的次级 γ 射线流强

- 暗物质质量5TeV时通过 $\tau\tau$ 道湮灭产生的 γ 射线流强，横轴是光子能量(TeV)，纵轴是 $E^2\text{Flux}(\text{TeV cm}^{-2}\text{s}^{-1})$.



暗物质湮灭截面

- 由末态辐射光(FSR)给出的暗物质截面.
- 初级光子(FRS)和次级光子(IC)叠加给出的暗物质截面.



同步辐射

- 正负电子在星系磁场中发生同步辐射产生次级光子.

- 同步辐射功率

$$P_{syn}(\nu, E, r) = \int_0^\pi d\theta \frac{\sin \theta}{2} 2\pi \sqrt{3} r_0 m_e c \nu_0 \sin \theta F\left(\frac{x}{\sin \theta}\right)$$

- 其中 r_0 是经典电子半径, $\nu_0 = eB/(2\pi m_e c)$

$$x \equiv \frac{2\nu(1+z)}{3\nu_0\gamma^2}$$

$$F(s) \equiv s \int_s^\infty d\xi K_{5/3}(\xi) \approx 1.25 s^{1/3} \exp(-s) [648 + s^2]^{1/12},$$

同步辐射

- 同步辐射的发射率:

$$j_{syn}(\nu, r) = 2 \int_{m_e}^{M_\chi} dE \frac{dn_e}{dE}(E, r) P_{syn}(\nu, E, r)$$

- 其中 $\frac{dn}{dE}(E, r)$ 由Green函数给出传播到距离星系中心r处的电子数密度.

同步辐射

- 同步辐射产生的光子流强:

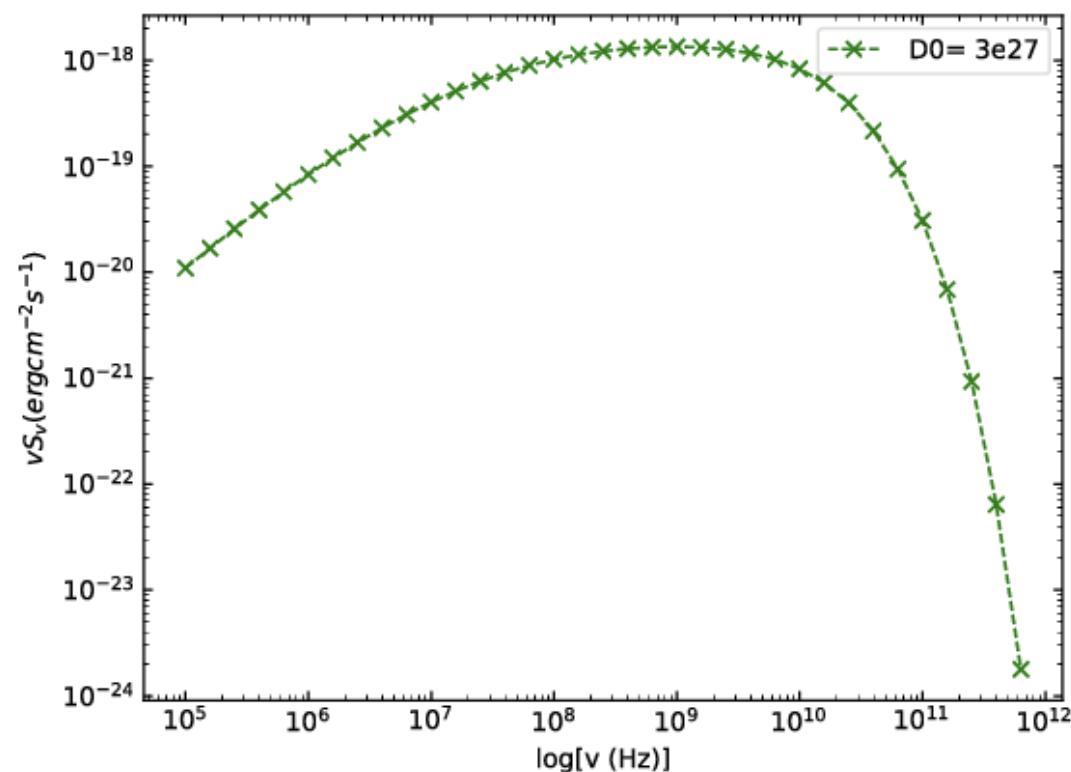
$$S_{syn}(\nu) = \int_{\Omega} d\Omega \int_{los} dl j_{syn}(\nu, l)$$

- 近似为:

$$S_{syn} \approx \frac{1}{D_A^2} \int dr r^2 j_{syn}(\nu, r),$$

同步辐射

- 矮星系Draco中暗物质通过 $b\bar{b}$ 道湮灭产生的同步辐射流强:



逆康普顿 + 同步辐射

- 逆Compton + 同步辐射 能谱分布,

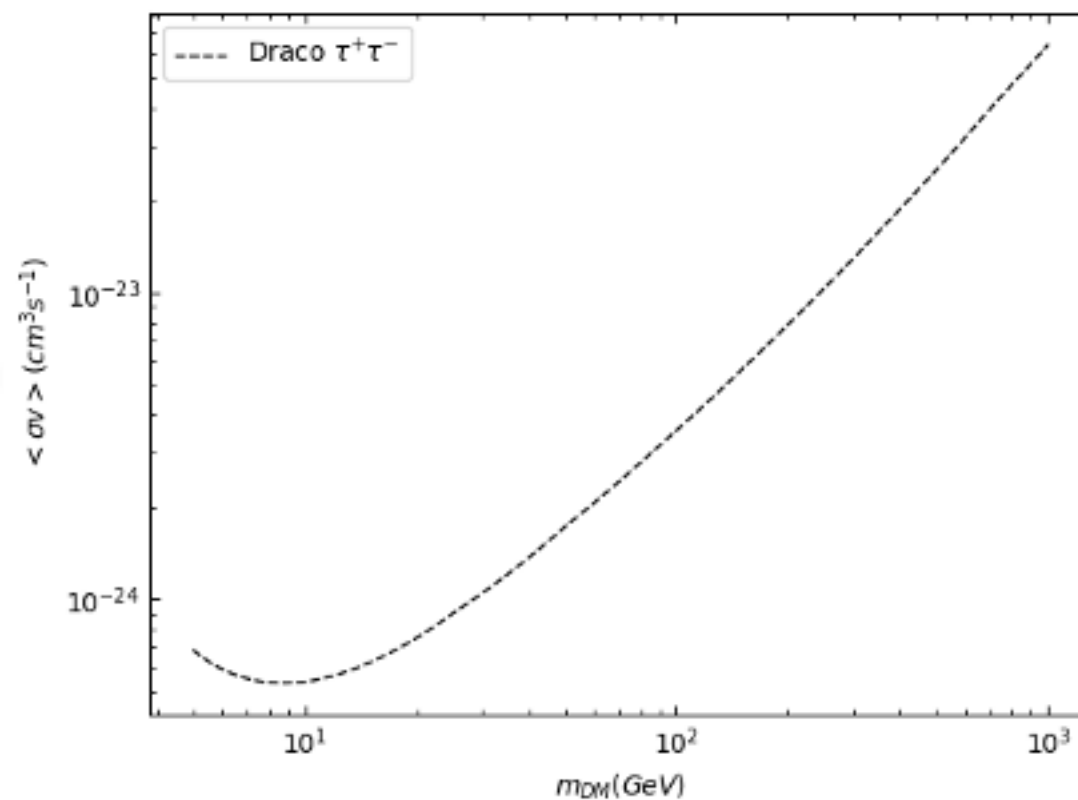
$$S_\nu(\nu) = \int d\Omega \int_{l.o.s.} \frac{dl}{4\pi} \int_E^{m_\chi} 2dE \times (\mathcal{P}_{IC} + \mathcal{P}_{syn}) \times \frac{\partial n_e}{\partial E}.$$

- 理论值和观测值:
- $$S_\chi = \frac{\langle \sigma v \rangle}{M_\chi^2} S'_\chi,$$

- 散射截面:
- $$\langle \sigma v \rangle = \frac{S_{obs}}{S'_\chi} M_\chi^2.$$

暗物质湮灭截面限制

- 暗物质湮灭散射截面初步解.



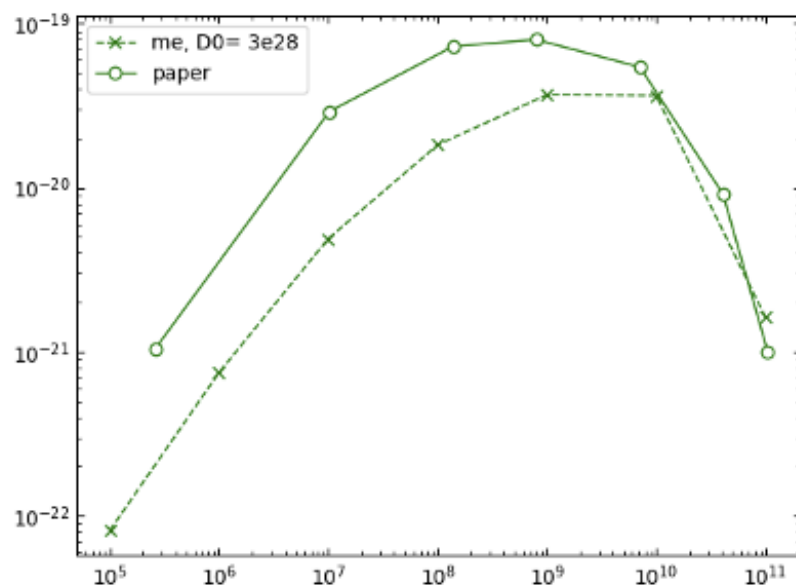
Back up

- 能损

$$\begin{aligned} b(E, \mathbf{r}) &= b_{IC}(E) + b_{Synch.}(E, \mathbf{r}) + b_{Coul.}(E) + b_{Brem.}(E) \\ &= b_{IC}^0 E^2 + b_{Synch.}^0 B^2(r) E^2 \\ &\quad + b_{Coul.}^0 n_e \left(1 + \log \left(\frac{E/m_e}{n_e} \right) / 75 \right) \\ &\quad + b_{Brem.}^0 n_e \left(\log \left(\frac{E/m_e}{n_e} \right) + 0.36 \right). \end{aligned}$$

同步辐射

- 矮星系Draco中暗物质通过 $b\bar{b}$ 道湮灭产生的同步辐射流强：



RX-DMFIT软件包给出同步辐射流强

- 矮星系Draco中暗物质通过 $b\bar{b}$ 道湮灭产生的同步辐射流强：

