

# 利用PandaX-II全部数据限制 自相互作用暗物质

杨继军(上海交通大学) 代表PandaX-II合作组

2021/08/18 高能分会-粒子天体物理

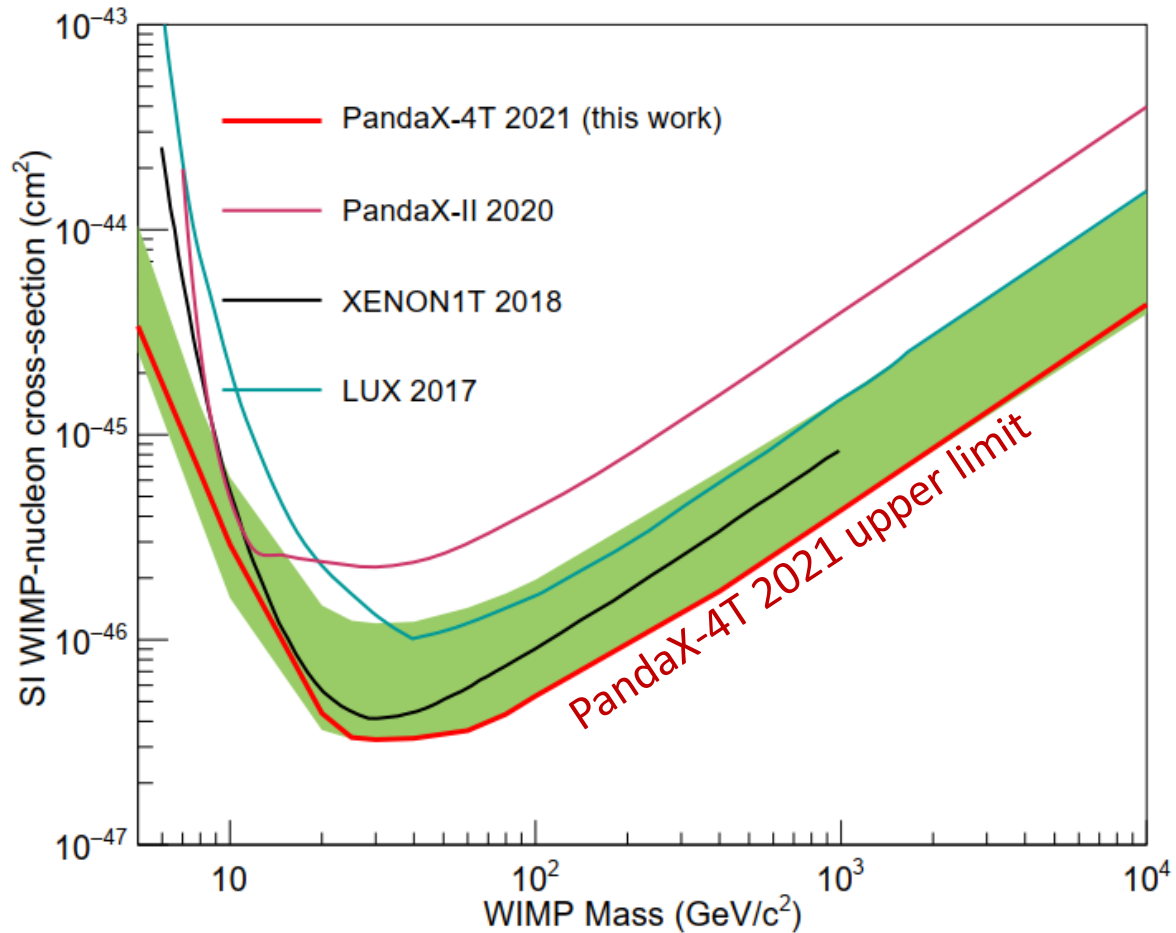
# 报告提纲

---

- PandaX-4T实验WIMP探测的最新结果
- 自相互作用暗物质 (SIDM) 模型的优势
- 在直接探测实验上寻找SIDM信号
- PandaX二期实验对SIDM模型参数限制

# PandaX-4T暗物质 (WIMP) 直接探测

<https://arxiv.org/pdf/2107.13438.pdf>

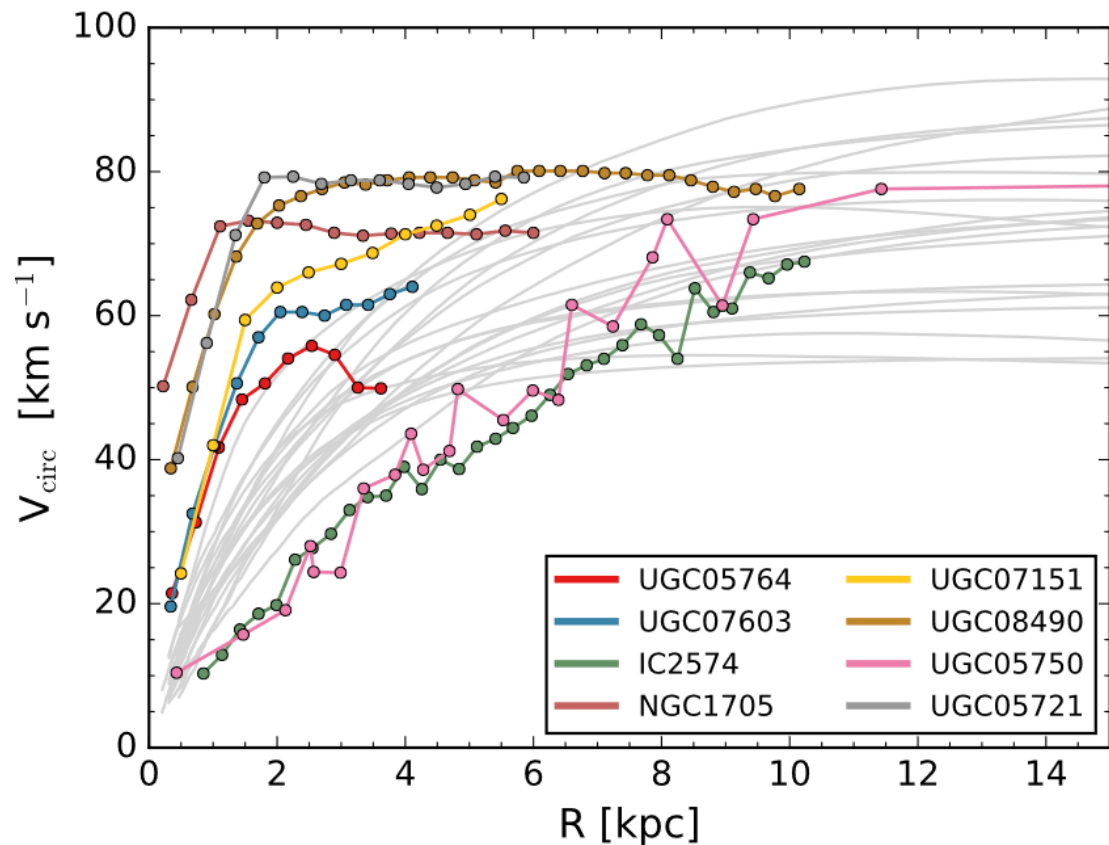


- 曝光量：0.63 吨·年
- 最新结果比XENON1T实验2018年的结果提高了 $\sim 1.3$ 倍 ( $40 \text{ GeV}/c^2$ )
- WIMP直接探测推进到新的领域
- WIMP (无碰撞的CDM) 在大尺度结构上跟观测数据符合，但在小尺度结构上存在一些系列的问题；

PandaX-4T对WIMP-核子散射截面的最新限制

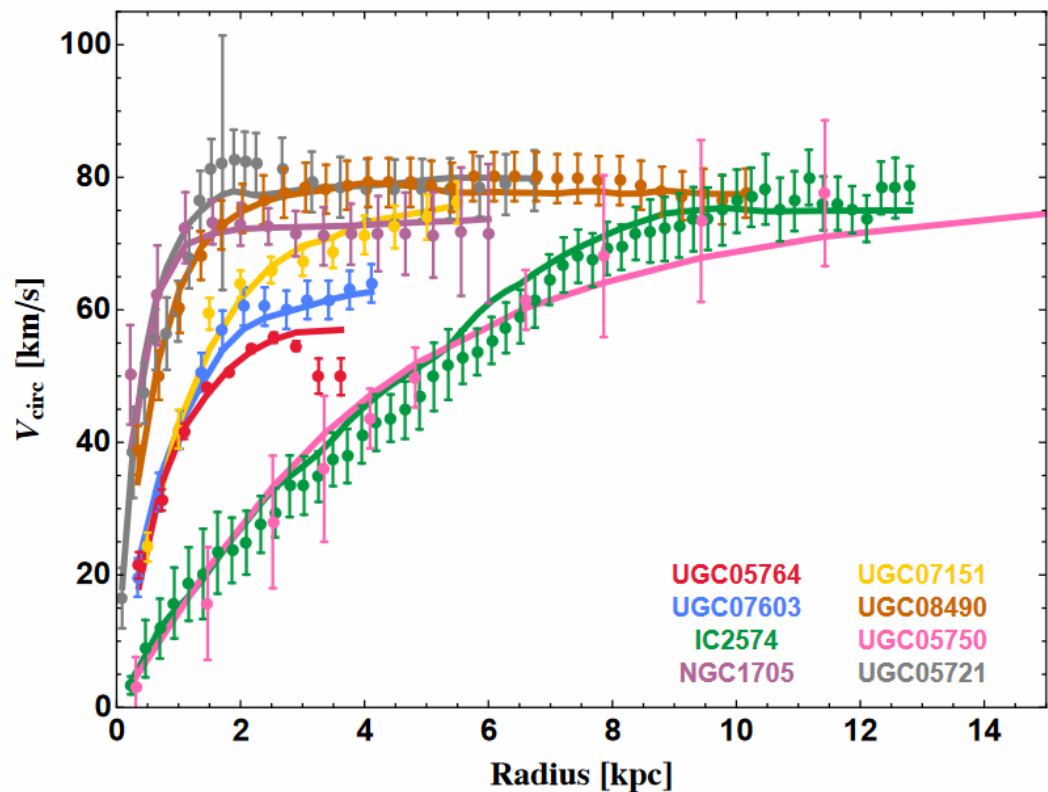
# 自相互作用暗物质的优势

最新的流体动力学CDM模拟



- 点：观测到的星系旋转曲线
- 灰色线：冷暗物质模拟

来自于我们的合作者，郁海波 (PBSM-2018)

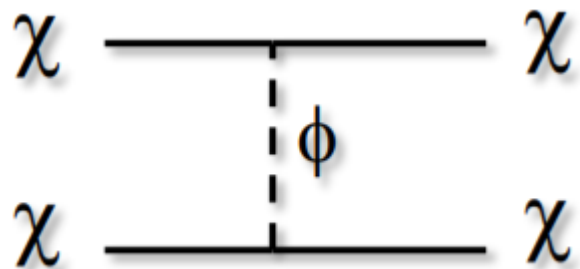


- 带颜色实线：SIDM拟合

# 从天体物理到粒子物理

- 暗物质自相互作用散射截面:

$$\sigma/m_\chi \sim 0.1 - 10 \text{ cm}^2/\text{g}$$



自相互作用

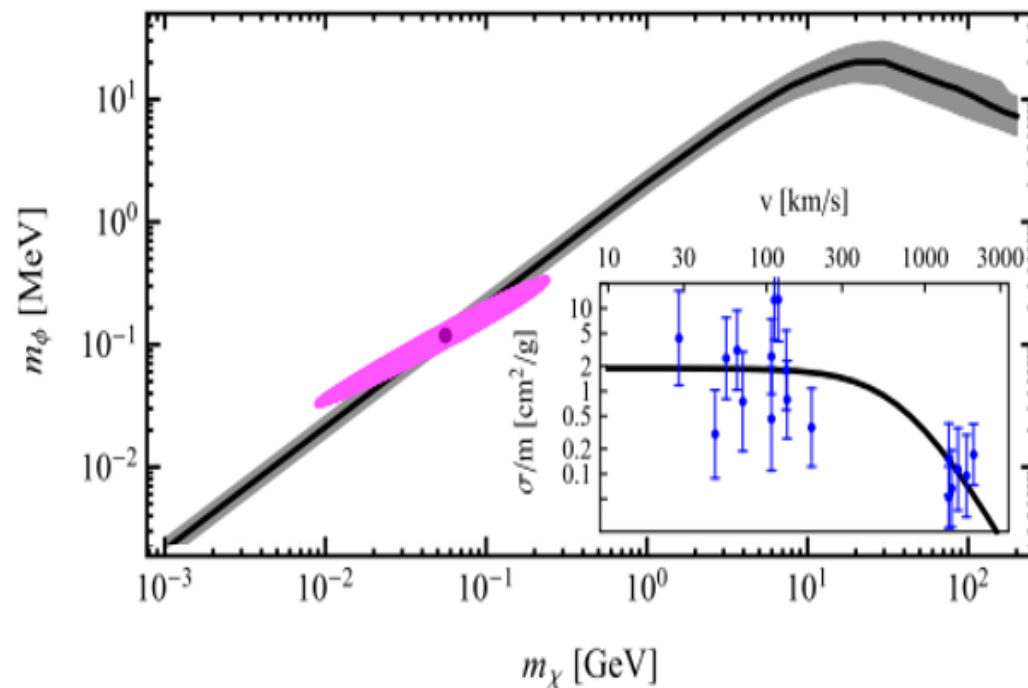
散射截面:

$$\sigma \sim \frac{g^4 m_\chi^2}{m_\phi^4}$$

质量:

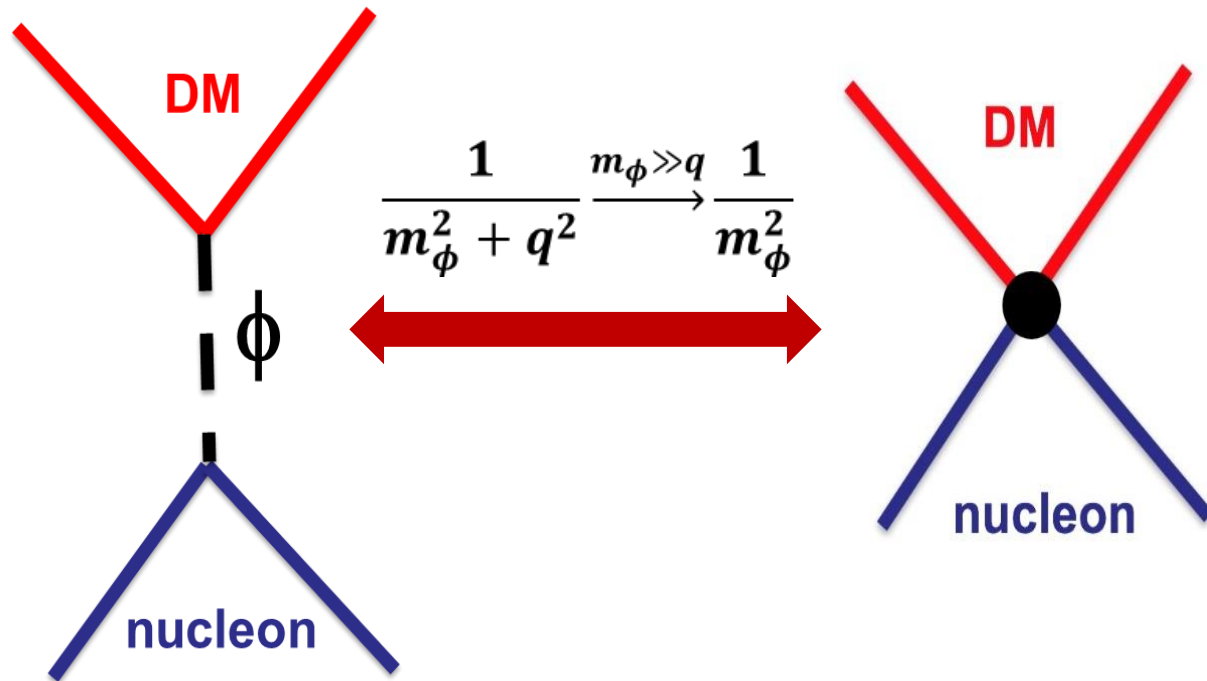
$$m_\phi \sim 1 - 100 \text{ MeV}$$

*Phys.Lett.B 783 (2018) 76-81*



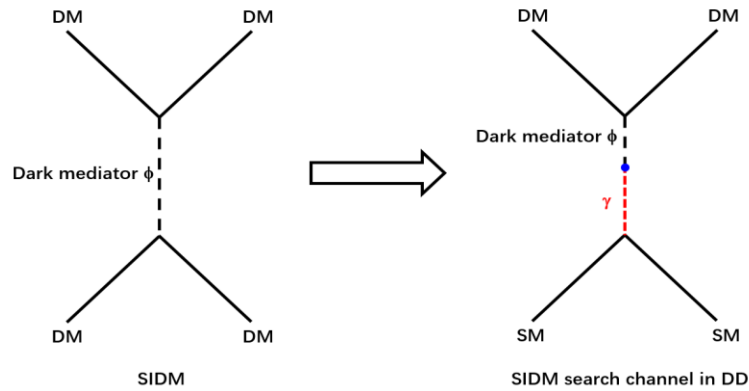
- 自相互作用暗物质需要一个质量在1GeV以下的传播子

# 如何探测自相互作用暗物质

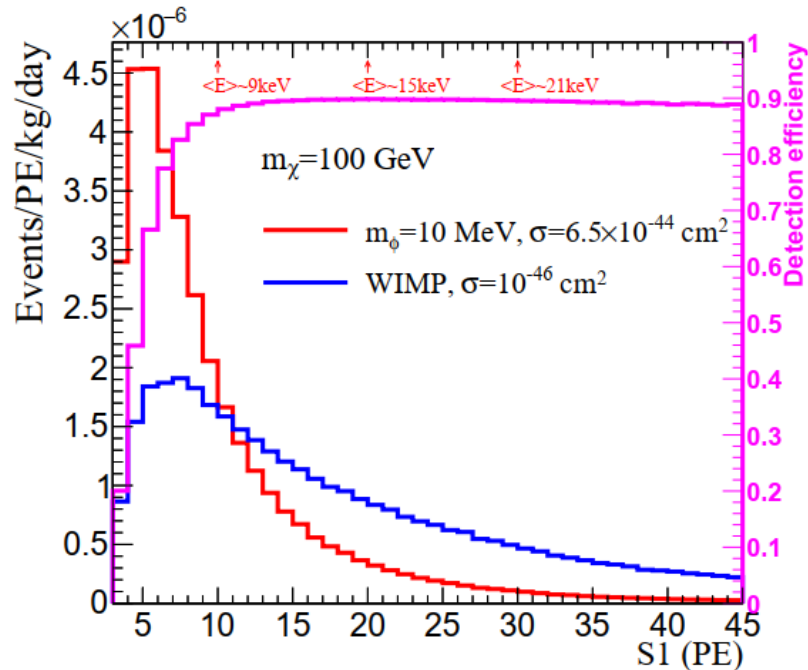


- 重传播子：
  - 自旋相关/不相关的WIMP模型；
  - 接触型相互作用
- 轻质量传播子：
  - 传播子质量 $m_\phi$ 与碰撞过程中的转移动量 $q$ 相当；
  - 耦合型相互作用；

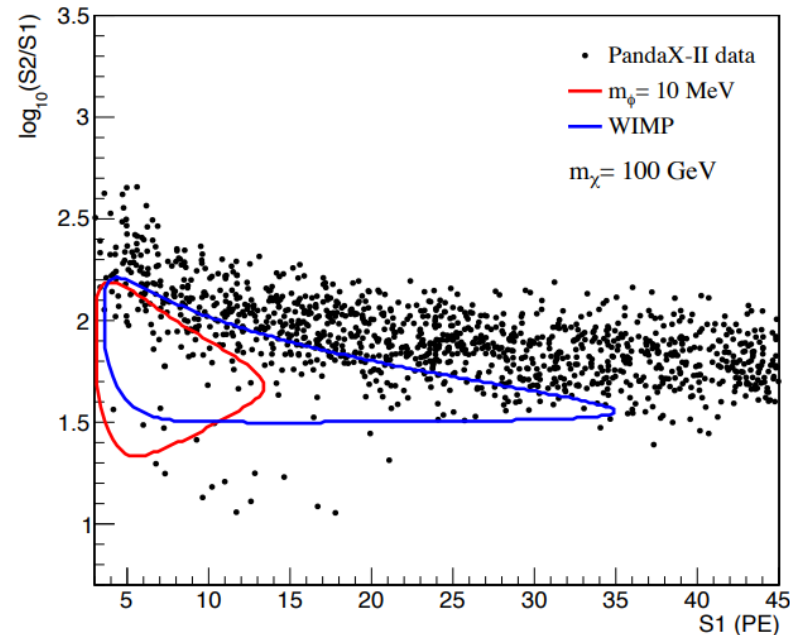
# 在直接探测实验上寻找SIDM信号



- 如果传播子和标准模型粒子 ( $\gamma/Z/H$ ) 发生耦合, 那么就可以在直接探测实验上寻找 SIDM
- 实际就是在实验上寻找轻传播子的过程
- SIDM信号更集中于低能区 ( $S_1 \leq 15 PE$ )



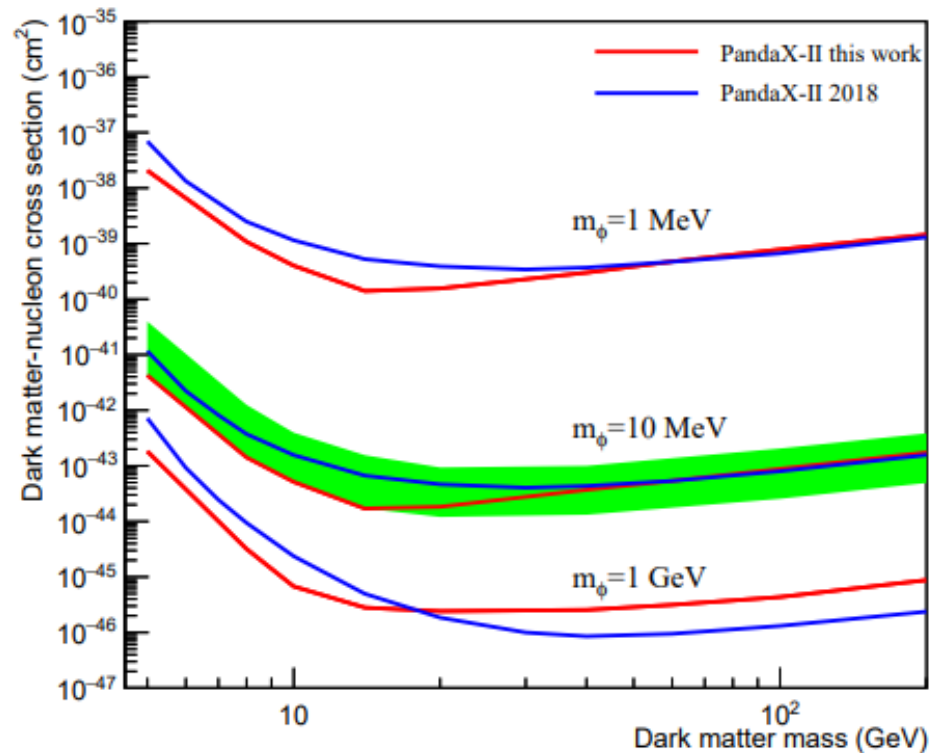
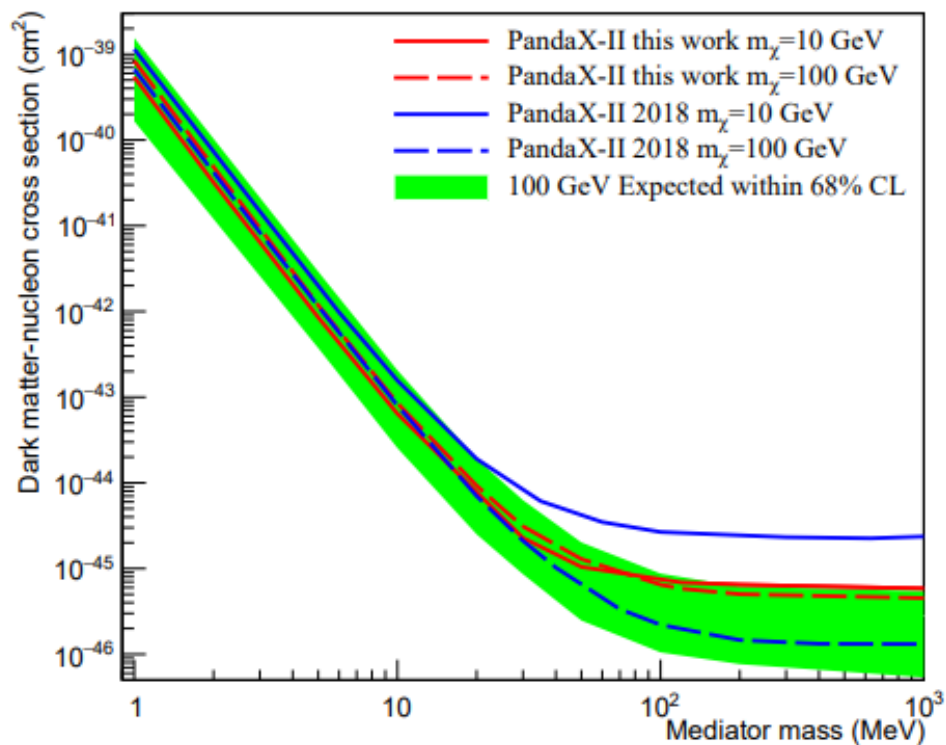
Phys. Rev. Lett. 121, 021304 (2018)



SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, Vol.64, 111062(2021)

# PandaX二期实验132吨天的限制结果

SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, Vol.64, 111062(2021)



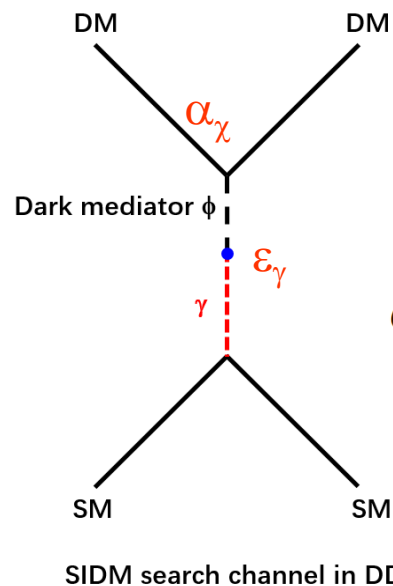
$$\sigma(q^2)_{\chi N} = \underbrace{\sigma|_{q^2=0}}_{\text{实验限制部分}} A^2 \left( \frac{\mu}{\mu_p} \right)^2 \underbrace{\frac{m_\phi^4}{(m_\phi^2 + q^2)^2}}_{\text{轻传播子项贡献}} F^2(q^2)$$

实验限制部分

轻传播子项贡献  
(标量/矢量)DM模型



# 自相互作用暗物质粒子物理模型

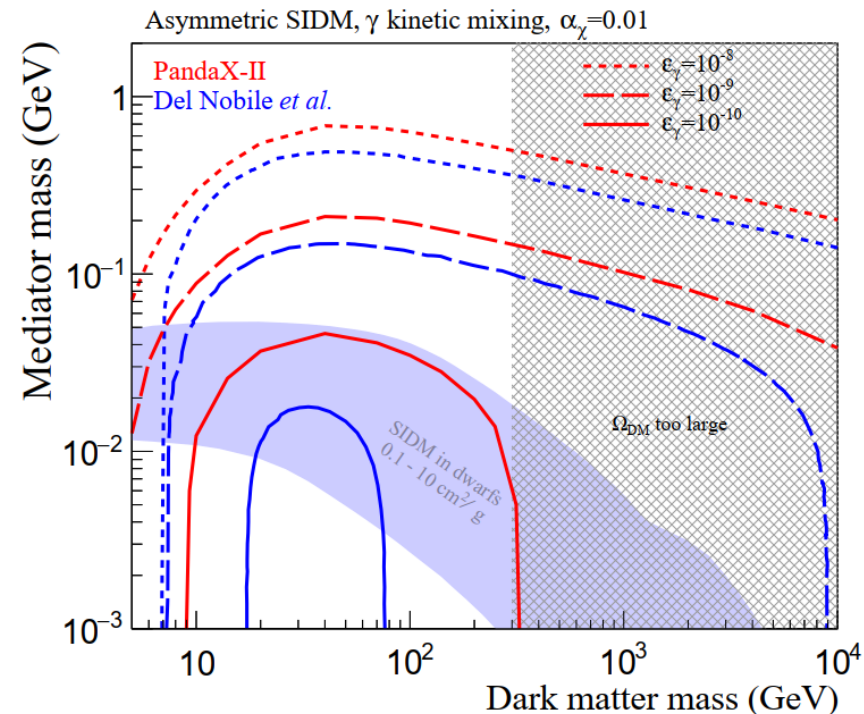


$$\sigma|_{q^2=0} = \frac{16\pi\alpha_{EM}\alpha_\chi\mu_p^2}{m_\phi^4} \left[ \frac{\epsilon_\gamma Z}{A} \right]^2$$

M. Kaplingha et. al, PRD 89,035009(2014)

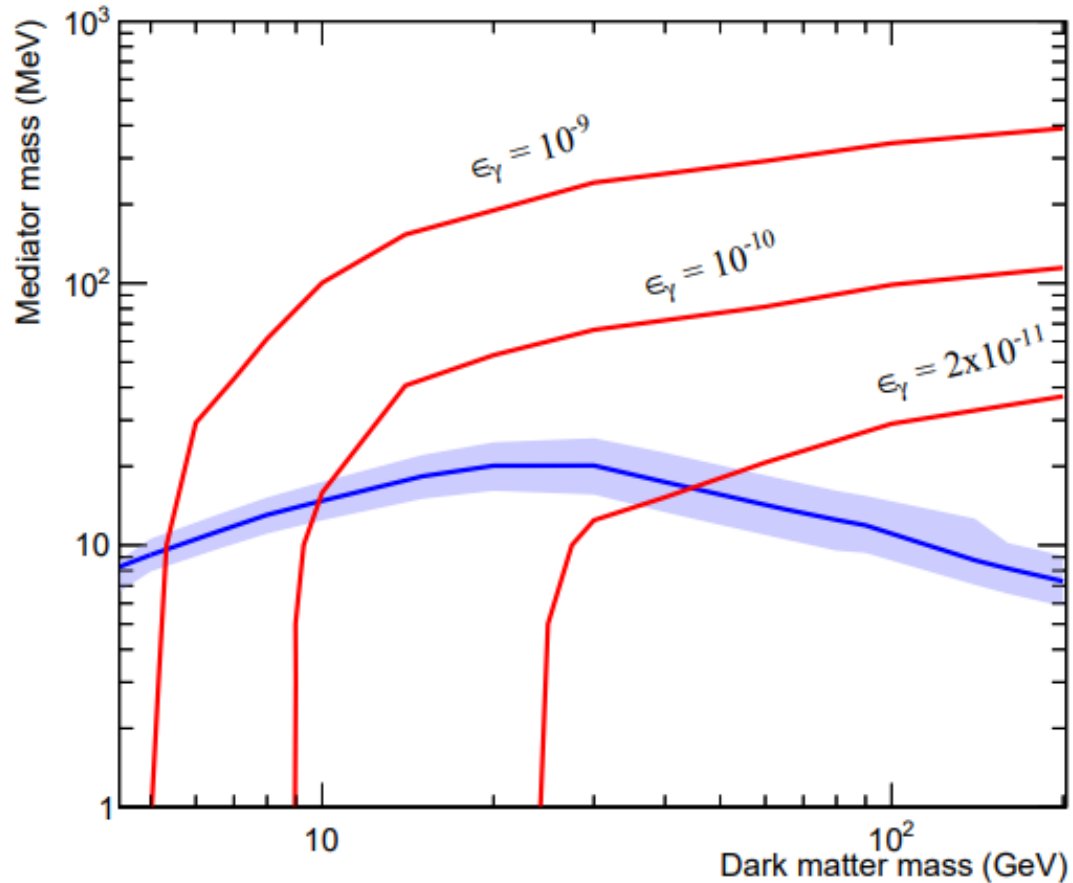
New Parameter	Description
$\alpha_\chi$	Fine structure in DM sector
$\epsilon_\gamma$	Mixing parameter between mediator and photon

- 对称暗物质：暗物质与反暗物质在宇宙早期是相等的， $\alpha_\chi$ 由观测到的暗物质残留密度决定
- 非对称暗物质：与对称性情形相反
- 散射截面依赖于三个参数 ( $m_\chi, m_\phi, \epsilon_\gamma$ )，无法和天文观测直接比较



Phys. Rev. Lett. 121, 021304 (2018)

# PandaX二期实验132吨天对传播子质量的限制

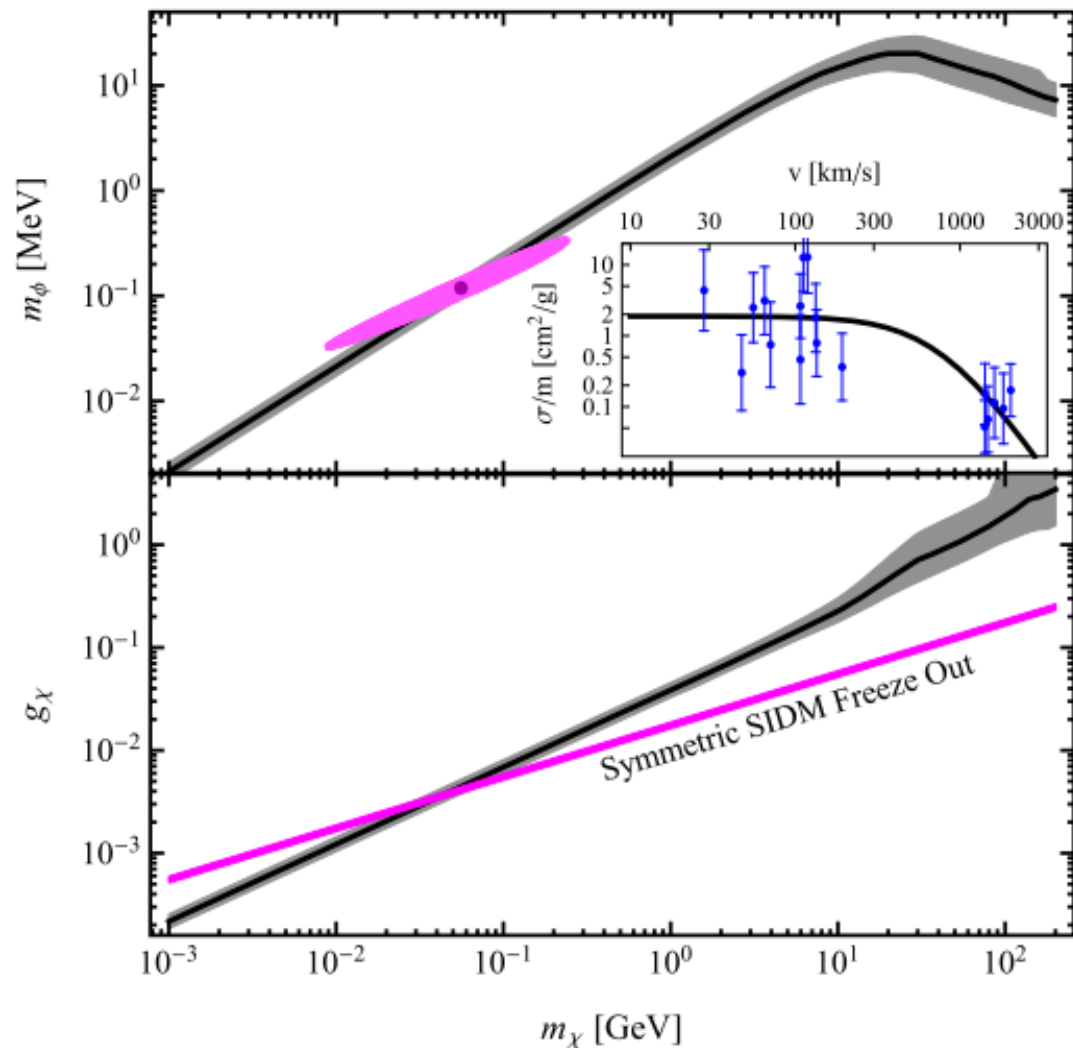


SCIENCE CHINA Physics, Mechanics &  
Astronomy, Vol.64, 111062(2021)

- 仅考虑非对称SIDM情形 ( $\phi$  和  $\gamma$  耦合)
- 暗物质精细结构常数  $\alpha_\chi$  取天文观测数据最佳拟合结果
- 我们的结果可以限制大部分的SIDM参数空间
- 随着耦合参数的增加, 传播子质量的灵敏度进一步提高

# 天文观测数据对传播子参数的限制

*Phys.Lett.B* 783 (2018) 76-81



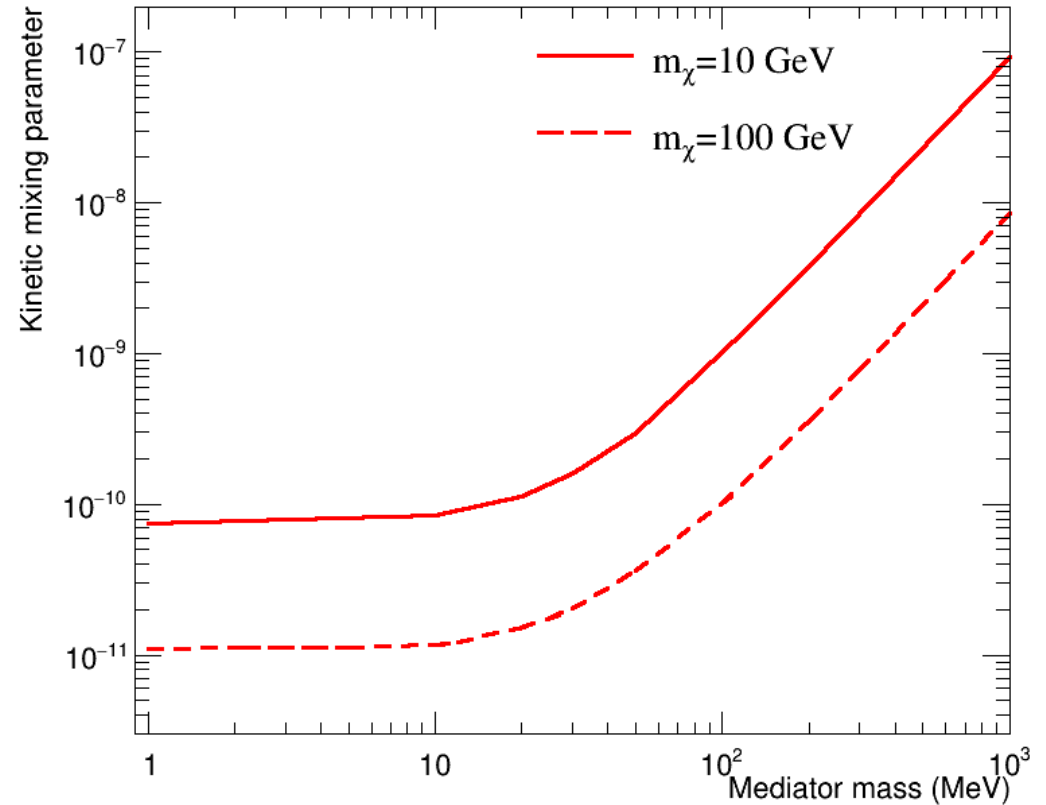
- 拟合天文学对星系观测的数据，得出传播子质量最可能的范围

散射截面：
$$\sigma \sim \frac{g_\chi^4 m_\chi^2}{m_\phi^4}$$

暗物质精细结构常数：
$$\alpha_\chi = \frac{g_\chi^2}{4\pi}$$

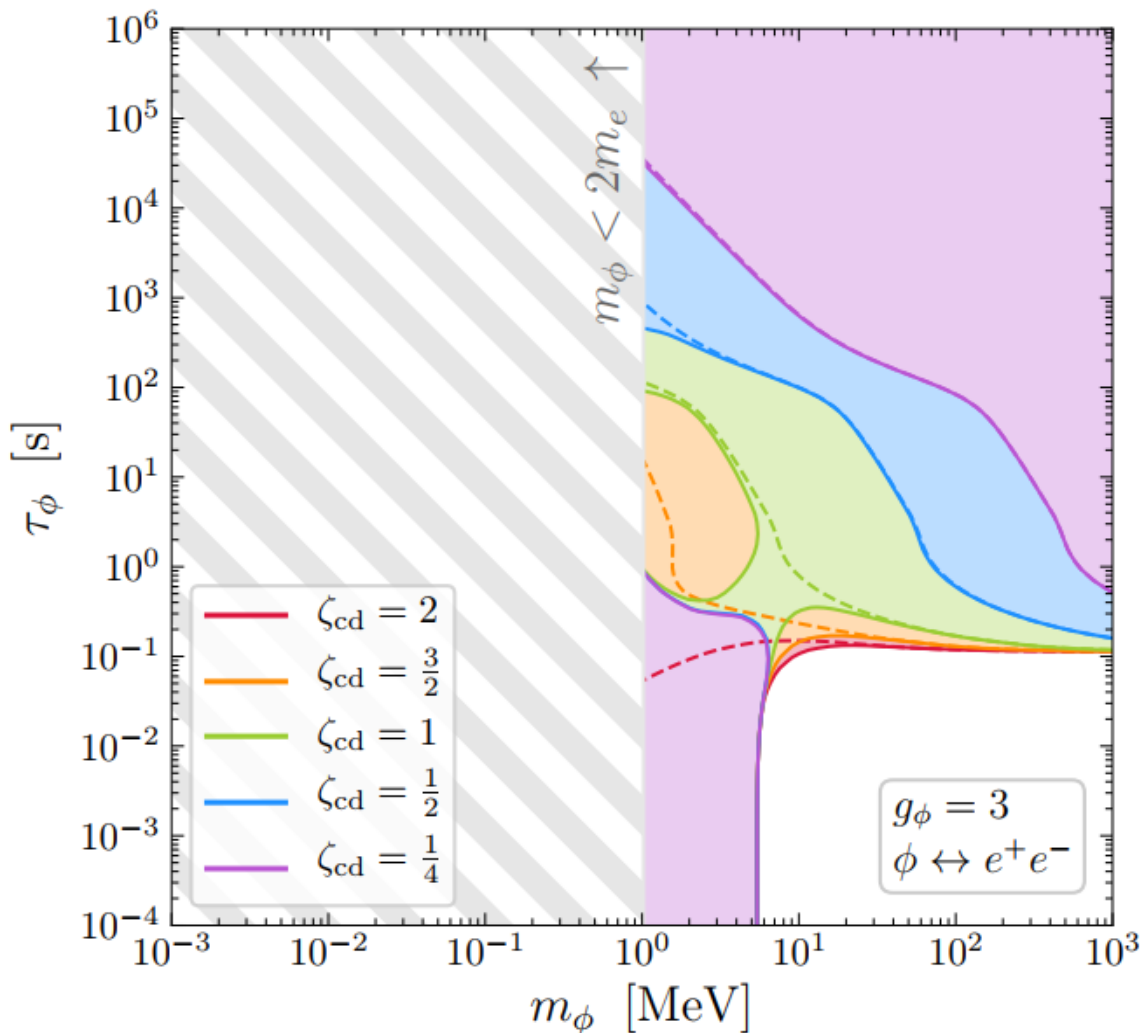
# PandaX二期实验对混合参数的限制

- 暗物质精细结构常数 $\alpha_\chi$ 固定为天文学观测数据最佳拟合值 (best-fit value)
- 固定 $m_\chi$ 和 $m_\phi$ ，利用直接探测实验数据，对混合参数 $\varepsilon_\gamma$ 进行限制



# 宇宙早期温度对传播子的寿命的限制

JCAP 04 (2021) 011



$$T_{D,cd} = \zeta_{cd} T_{cd}$$

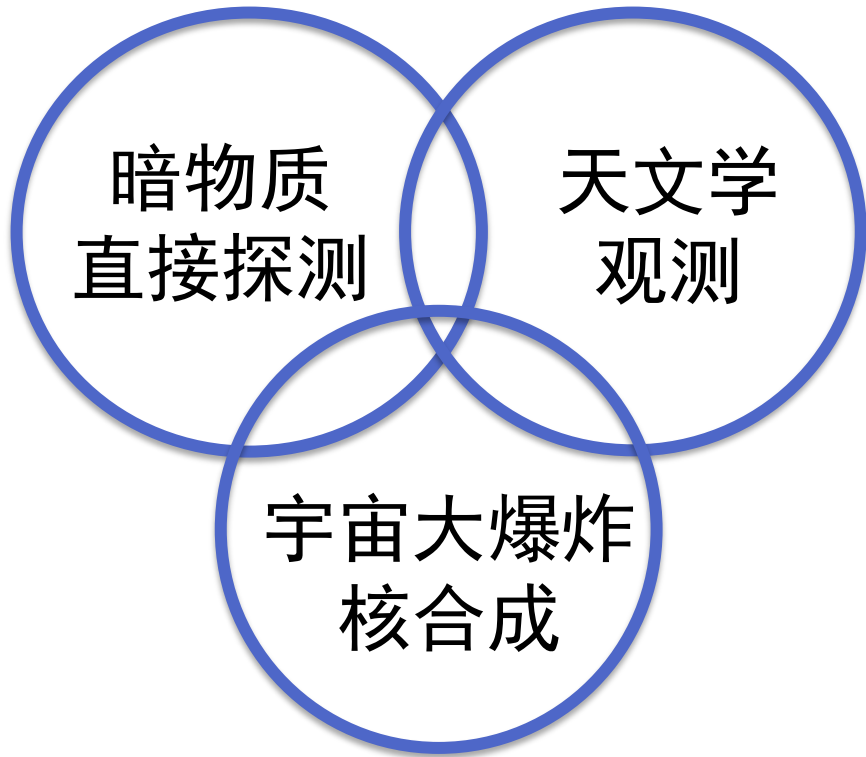
$T_{D,cd}$  = 暗物质的温度

$T_{cd}$  = 普通物质的温度

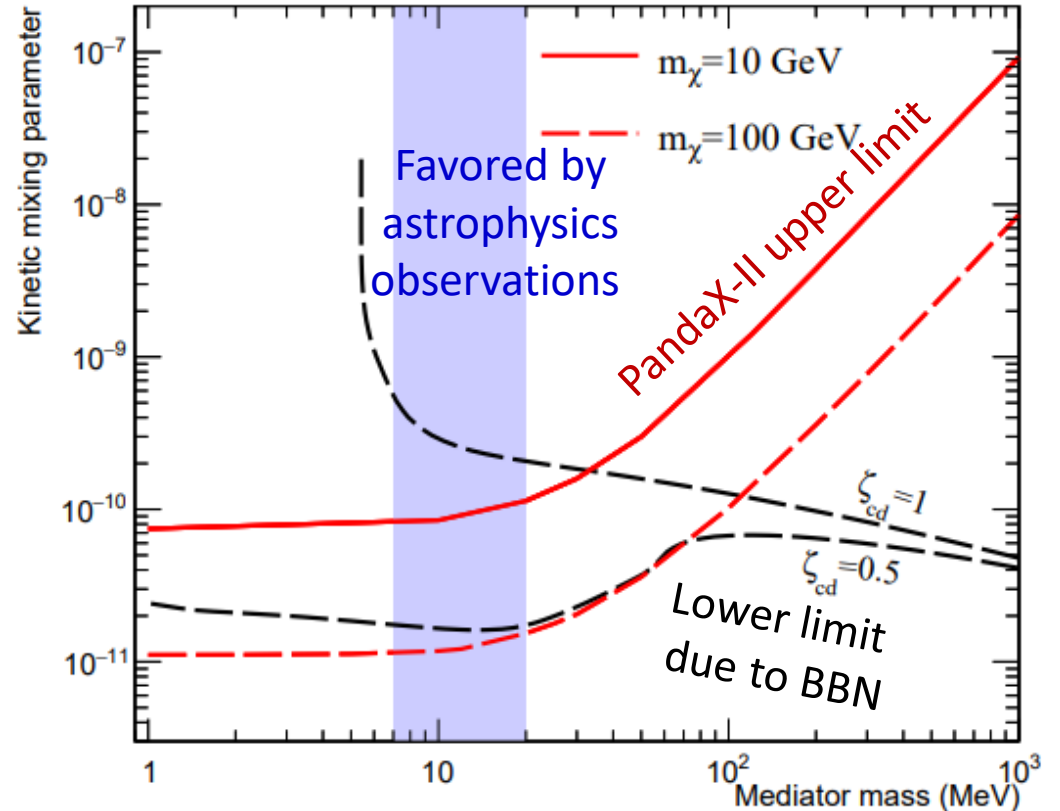
- 传播子衰变产生电子对会影响轻元素(氢、氦、氦、锂)的丰度
- 衰变产生的效果和传播子在早期宇宙的密度以及它的寿命有关
- 传播子在早期宇宙的温度越高, 它的密度越高, 为了避免影响元素的丰富, 它的寿命要越短

$$\tau_\phi = 3 / (\alpha_{SM} m_\phi \epsilon_\gamma^2)$$

# PandaX二期实验对SIDM耦合常数的限制



- 暗物质直接探测实验得到混合参数的上限
- BBN理论计算出混合参数的下限
- 从天文观测得到传播子质量“最理想”取值范围



SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, Vol.64, 111062(2021)

# 总结

---

- PandaX-4T实验将WIMP探测推到新的领域
- SIMD模型在解决星系观测小尺度结构问题上存在优势，可在PandaX-4T实验上寻找SIDM信号
- 利用PandaX二期实验数据，对SIDM与核反冲截面以及传播子质量给出新的限制
- 引入宇宙大爆炸核合成机制，根据宇宙早期温度、粒子数密度，对传播子寿命的限制，进而得到混合参数的下限，可以和实验数据得到的混合参数上限直接比较，结合天文观测数据的拟合，给出了SIDM传播子的参数空间