

# Composite Dark Matter and XENON1T Direct Detection

报告人：祖磊

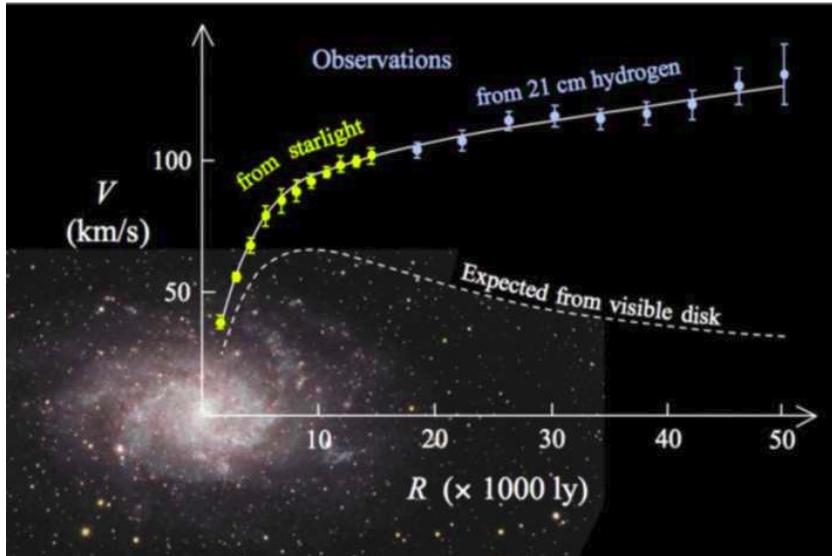
指导老师：范一中，冯磊

紫金山天文台暗物质与空间天文团组

Zu et.al Nul.Phys.B (2021) , Zu et.al JCAP (2021)

# Dark Matter in a nutshell

- 1930s Fritz Zwicky 等人对星系团质光比的观测
- 1970s Vera Rubin 等人对星系旋转曲线的测量



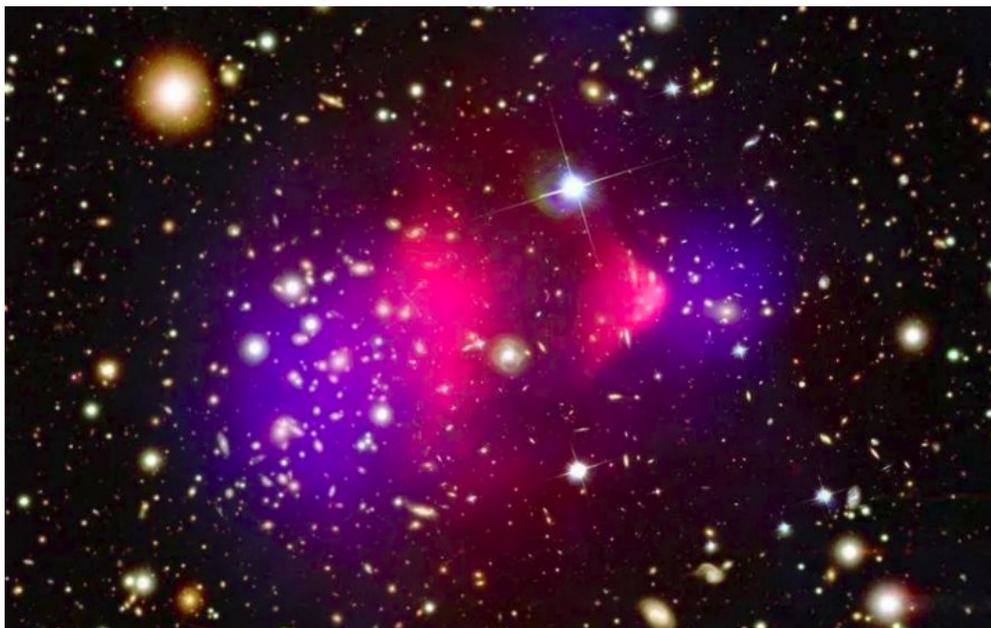
不发光的物质

Or

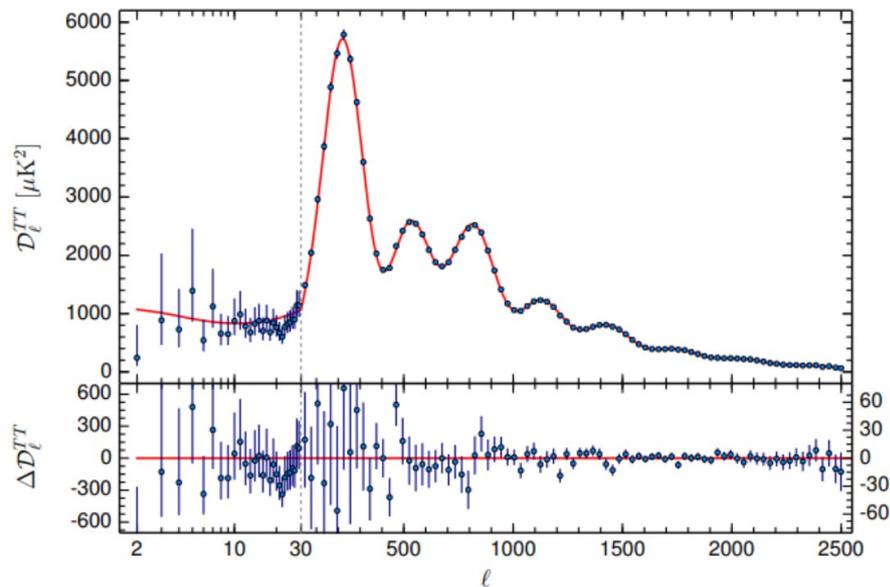
引力理论修改

# Dark Matter in a nutshell

- 其他观测证据:



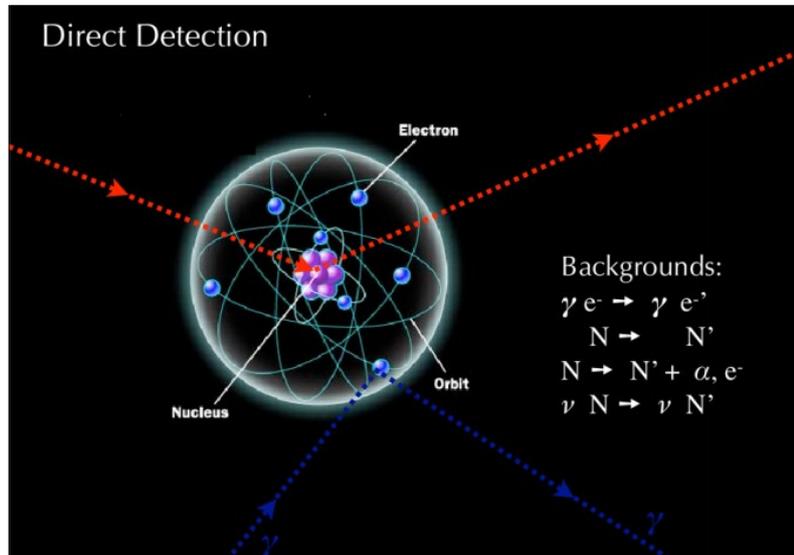
子弹星系团并合的引力透镜 ( 蓝 ) 和 X-ray( 红 ) 成像



Plank 卫星观测 CMB 角功率谱

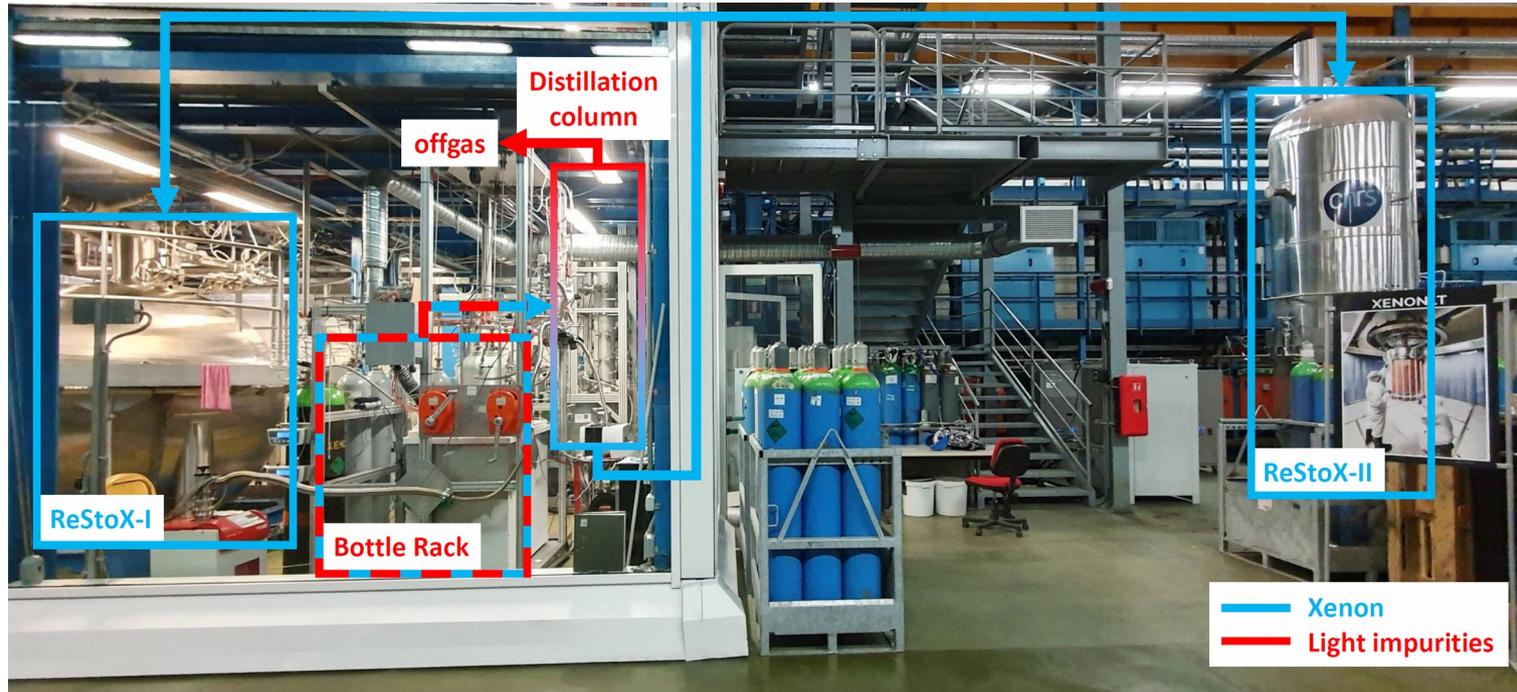
# Dark Matter Direct Detection

- 实验室中探测暗物质粒子与普通物质之间的相互作用
- 测量核子或电子反冲信号，受到宇宙线的干扰，只能建于地下



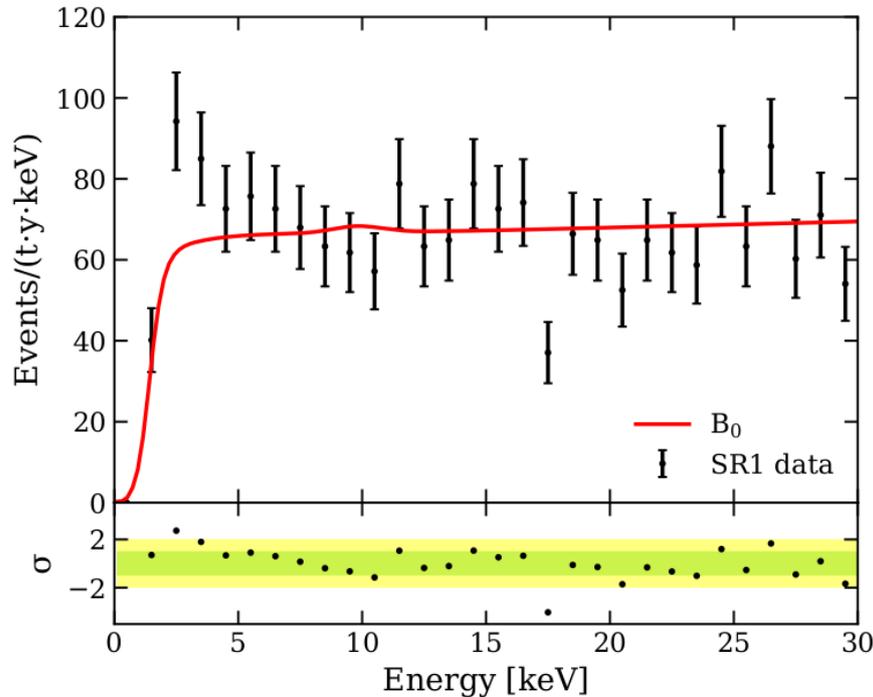
# XENON1T

位于意大利 Gran Sasso 地下实验室



# XENON1T electron recoil

- 7keV 以下的  $3.2\sigma$  疑似超出，集中于 2-3keV



XENON1T 实验所测得的电子反冲数据，其中红色线代表预期背景。

# Composite Dark Matter

- 暗物质可以不仅仅是一种成分
- 暗物质粒子与普通物质之间的相互作用较弱，但是暗物质粒子之间却允许存在较强的相互作用
- Dark sector gauge group

# Mirror Dark Matter

- 最早提出于左右手不对称发现时
- 所有普通物质拥有其对应的镜像粒子，镜像粒子之间存在新的  $Z_2$  对称性，则宇称总体上仍然守恒。

$$L = L_{SM}(e, \mu, d, \gamma, W, Z, \dots) + L_{SM}(e', \mu', d', \gamma', W', Z', \dots) + L_{mix}$$

$$L_{mix} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \lambda \phi^\dagger \phi \phi'^\dagger \phi',$$

# Mirror Dark Matter

- 宇宙学和大尺度结构的观测要求:  $T_{dark} \ll T_{SM}$
- $\epsilon \sim 10^{-9}$  时镜像粒子可以满足宇宙学要求并形成等离子体结构
- 数值模拟结果:

- 密度分布: 
$$\rho \sim \frac{\rho_0 r_0^2}{r^2 + r_0^2},$$

- 速度分布: 
$$f_e(v) = e^{-\frac{1}{2}m_e v^2/T}.$$

$$T \approx \frac{1}{2} \bar{m} v_{rot}^2$$

(等离子体结构可以提供较高的暗物质粒子速度)

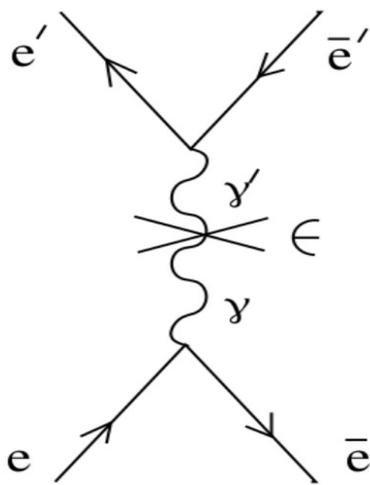
# 镜像电子直接探测

- 镜像电子：带电荷为  $\epsilon e$
- 镜像电子与电子相互作用：

$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{\lambda}{E^2 v^2} \quad \lambda = \frac{2\pi\epsilon^2 \alpha^2}{m_e}$$

- 忽略原子核对最外层核外电子的影响后：

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dE} &= g N_T n_{e'} \int \frac{d\sigma}{dE} \frac{f_{e'}(v)}{k} |v| d^3v \\ &= g N_T n_{e'} \frac{\lambda}{E^2} \int_{|v| > v_{min}}^{\infty} \frac{f_{e'}(v)}{k|v|} d^3v. \end{aligned}$$



# 屏蔽效应

- 地球对镜像电子和镜像核子的俘获概率不同
- 地球俘获的镜像粒子形成势垒（类似于太阳风在金星和月球表面所受到的屏蔽效应）
- 屏蔽效应影响地球附近镜像电子的数密度和速度分布

# 屏蔽效应

- 简单考虑:
- 满足  $|\bar{v}| \gg v_{min}$  的镜像电子基本不受屏蔽效应影响
- 对于  $E_R < E_R^T$  的部分无屏蔽效果
- 对于  $E_R > E_R^T$  的部分则完全屏蔽

# 数据拟合

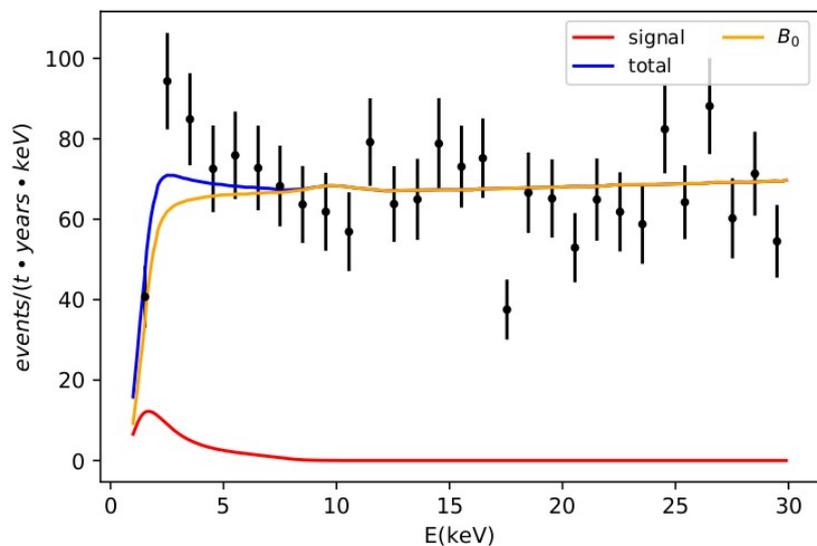
- 反应事件率：
$$\frac{dR}{dE} = g N_T n_{e'} \frac{\lambda}{v_c^0 E_R^2}, \quad E_R < E_R^T$$

- 考虑仪器分辨率和探测器探测效率后：

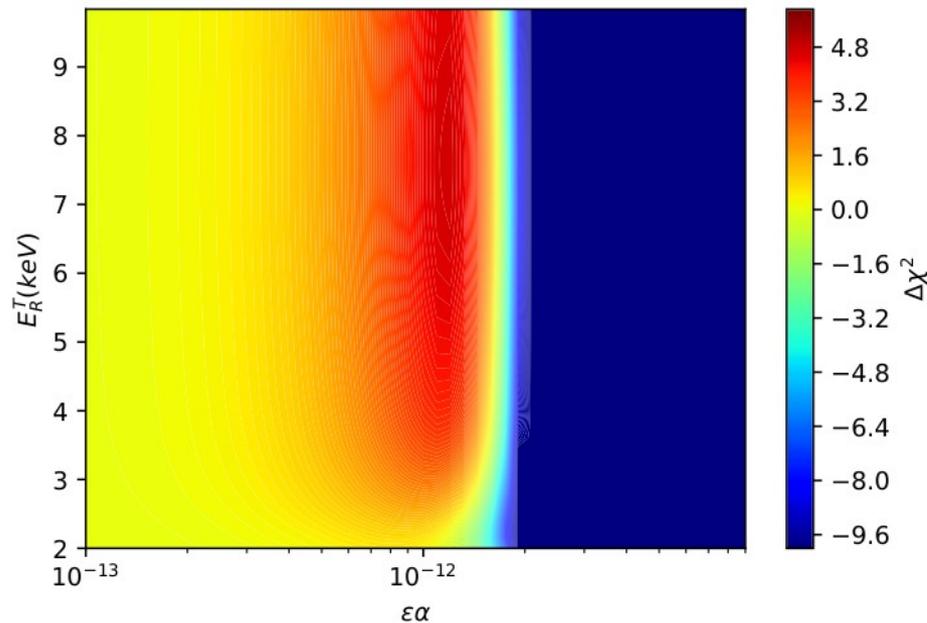
$$\frac{dR}{dE_m} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{1keV}^{E_R^T} \frac{dR}{dE} e^{-(E-E_m)^2/2\sigma^2} \times \gamma(E) dE,$$

# 数据拟合

- 定义变量:  $\alpha = \sqrt{\frac{n_e / 0.2 \text{cm}^{-3}}{v_c^0 / 50000 \text{km/s}}}$ ,



(a)  $\epsilon\alpha = 1.2 \times 10^{-12}$ ,  $E_R^T = 7.6 \text{keV}$



(b)  $\Delta\chi^2$

# 镜像暗物质解释 XENON1T

- 若要解释 XENON1T 的实验数据最佳拟合值 ( $\epsilon\alpha \sim 10^{-12}$ ), 则在要求  $\epsilon \sim 10^{-10}$  时, 有  $\alpha \sim 10^{-2}$ , 这意味着镜像电子的屏蔽效应应该足够强。
- 类似的结果同样出现在其他的直接探测实验中如:  
Darkside50 ( $\epsilon\alpha < 1.5 \times 10^{-11}$ ) LUX (当  $T \sim 0.3\text{keV}$  时,  $\epsilon < 10^{-11}$ )

# Plasma Dark Matter

- 镜像暗物质的严格要求来自于人们对理论之美的追求，但自然界并不为此负责。
- 仅有两种暗物质粒子，满足额外的  $U(1)'$  对称性，就可以预言镜像暗物质粒子所预言的大部分实验结果。

# Plasma Dark Matter

- 只考虑暗质子（质量大）和暗电子（质量小）两种粒子。

$$L = L_{SM} + L_{dark} + L_{mix},$$

$$L_{dark} = -\frac{1}{4}F'^{\mu\nu}F'_{\mu\nu} + \bar{p}_d(iD_\mu\gamma^\mu - m_{p_d})p_d \\ + \bar{e}_d(iD_\mu\gamma^\mu - m_{e_d})e_d.$$

# 等离子体暗物质

- 等离子体形成条件：
  - 暗原子的结合能要远小于暗物质的温度：

$$\left(\frac{\alpha_d}{10^{-2}}\right)^2 \left(\frac{\mu_d}{\text{MeV}}\right) \left(\frac{\text{GeV}}{m_{p_d}}\right) \lesssim 1$$

- 冷却时标长于哈勃时标：

$$m_{p_d} \gtrsim 20 \left(\frac{\text{MeV}}{m_{e_d}}\right) \left(\frac{\alpha_d}{10^{-2}}\right)^2 \text{GeV}.$$

# 等离子体暗物质

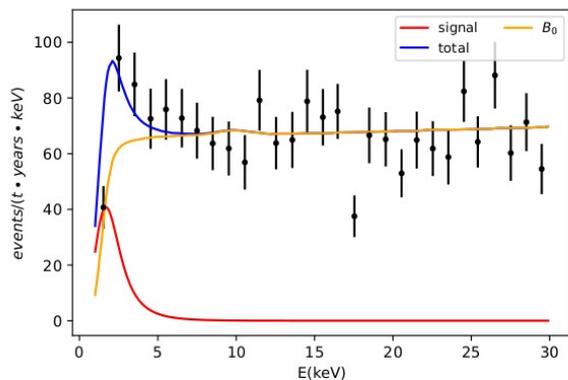
- 当  $m_{p_d} > 20\text{GeV}$  屏蔽效应可以基本忽略

- 直接探测反应率：
$$\begin{aligned}\frac{dR}{dE_R} &= gN_T n_{e_d} \int \frac{d\sigma}{dE_R} f_{e_d}(v; v_B) |v| d^3v \\ &= gN_T n_{e_d} \frac{\lambda}{E_R^2} \int_{|v| > v_{min}}^{\infty} \frac{f_{e_d}(v; v_B)}{|v|} d^3v,\end{aligned}$$

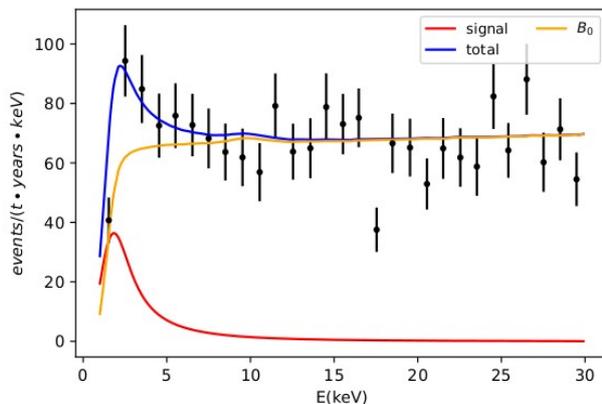
- 积分后：
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{gN_T n_{e_d} \lambda}{2E_R^2 |v_B|} [\text{erf}(x+y) - \text{erf}(x-y)]$$

# 数据拟合

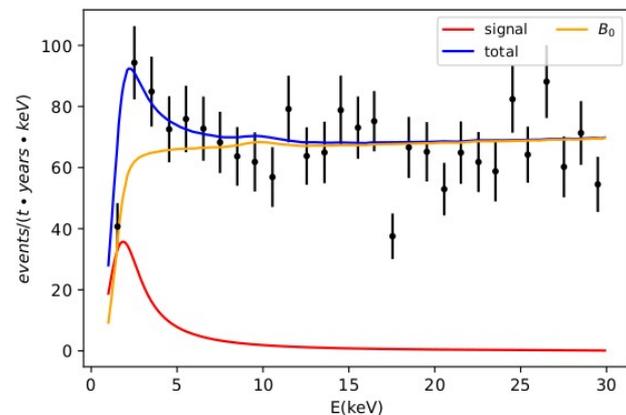
- 电子反冲数据拟合:



(a)  $m_{e_d} = 1 \text{ MeV}$ ,  $m_{p_d} = 20 \text{ GeV}$ ,  $\epsilon = 6.8 \times 10^{-12}$



(b)  $m_{e_d} = 1 \text{ MeV}$ ,  $m_{p_d} = 200 \text{ GeV}$ ,  $\epsilon = 2.6 \times 10^{-11}$



(c)  $m_{e_d} = 1 \text{ MeV}$ ,  $m_{p_d} = 2000 \text{ GeV}$ ,  $\epsilon = 1.4 \times 10^{-10}$

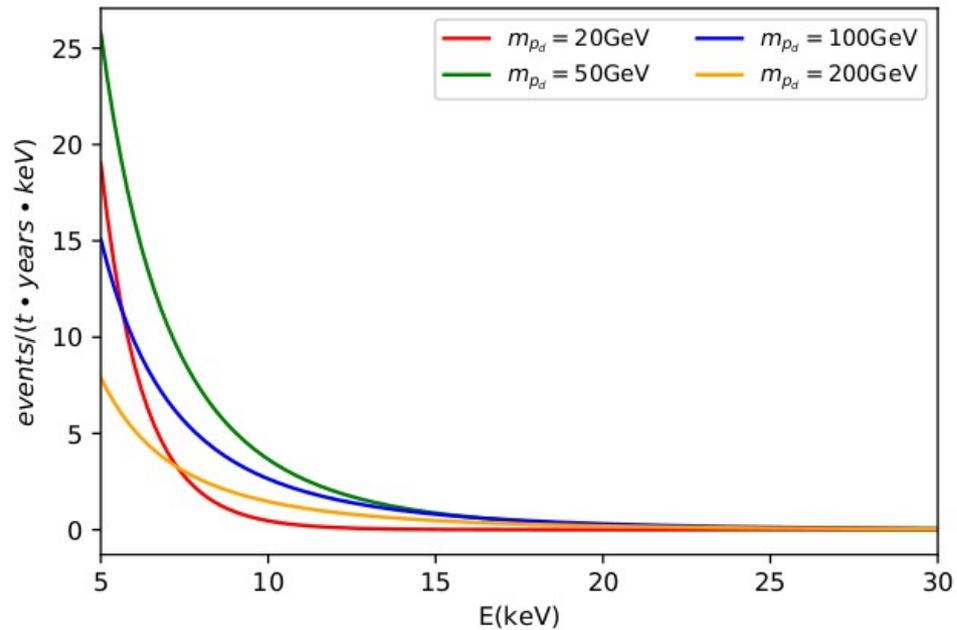
# 核子反冲预言

- 对于暗质子核反冲实验：

$$\lambda_c = \frac{2\pi\epsilon^2 Z^2 \alpha^2}{m_A} F_A^2(qr_A) \quad F_A(qr_A) = 3 \frac{j_1(qr_A)}{qr_A} e^{-(qs)^2/2},$$

- 事件率：
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T n_{pd} \lambda_c}{2E_R^2 |v_B|} [\text{erf}(x+y) - \text{erf}(x-y)].$$

# 核子反冲预言



# 等离子体暗物质

- 无屏蔽效应，更多的参数空间
- 在一定程度上解释了 XENON1T 的电子反冲信号并预言了核反冲的探测结果

# 总结

- XENON1T 低能电子反冲数据中有疑似信号
- 镜像暗物质和等离子体暗物质模型可以提供给暗物质足够的速度，从而在一定程度上解释该疑似信号
- 未来的更多直接探测实验结果会对该模型进行检验