第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

基于CDEX-10搜寻原初黑洞蒸发keV至MeV轻暗物质粒子

张振华

中国暗物质实验（CDEX）合作组

清华大学

zhangzh20@mails.tsinghua.edu.cn

20230511 @千岛湖

内容提要

第一章 暗物质与直接探测实验

第二章 物理动机

第三章 预期能谱

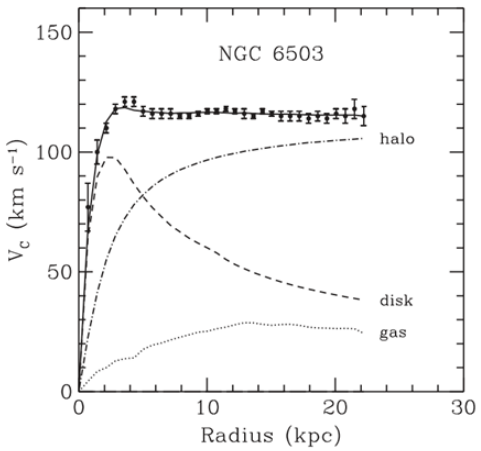
第四章 搜寻结果

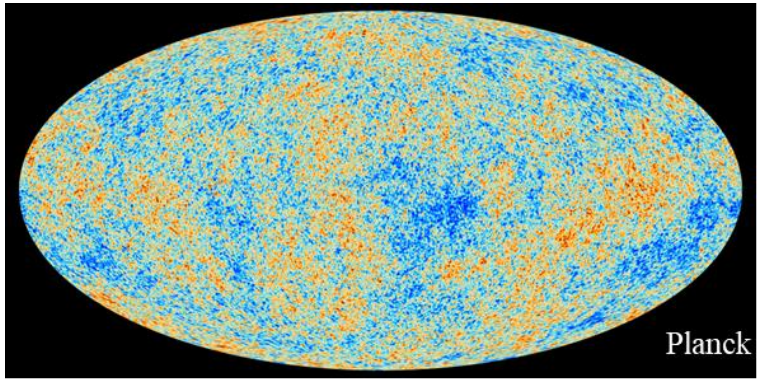
1.1 暗物质

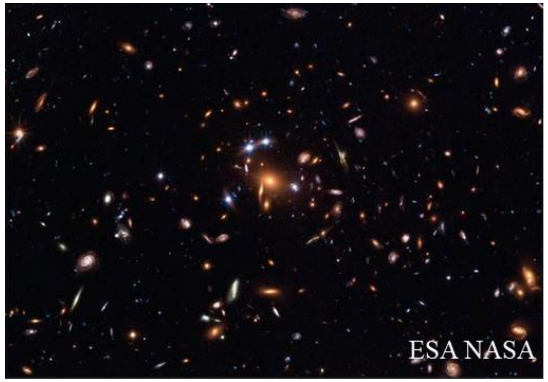
暗物质存在的证据：

1. 星系盘旋转曲线
2. 子弹星云
3. 微波背景辐射
4. 引力透镜

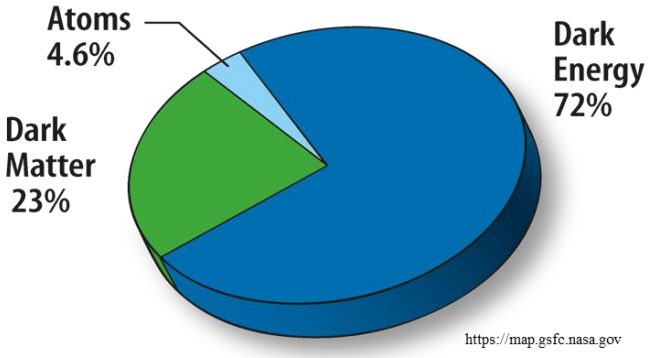
……



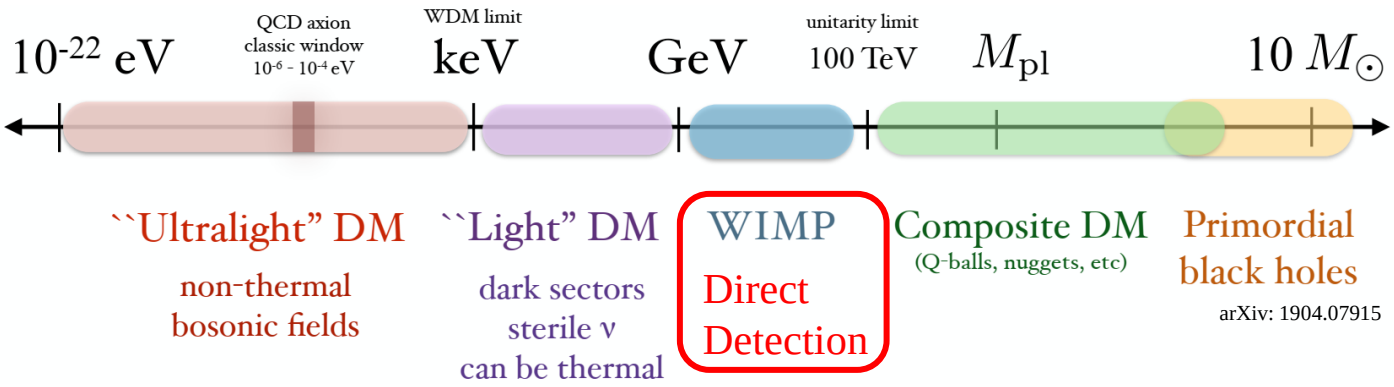




暗物质占宇宙23%！



1.2 暗物质粒子直接探测

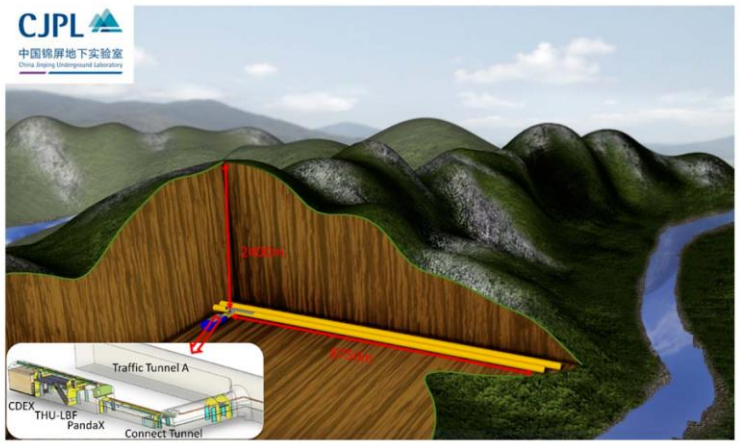


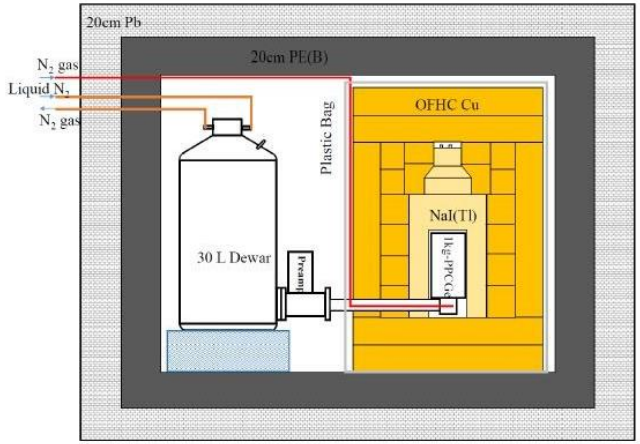
国际上部分主要暗物质直接探测实验

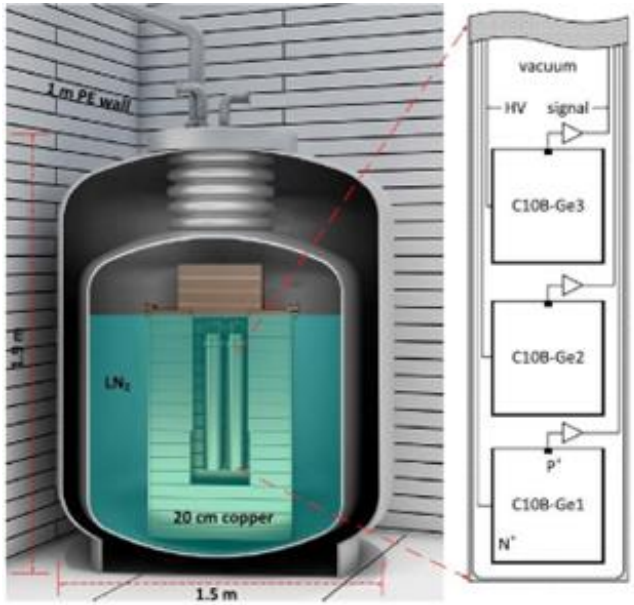
实验	靶物质/探测器	信号类型	所在实验室
XENON	LXe	电离、光子	意大利Gran Sasso
DarkSide	LAr	电离、荧光	意大利Gran Sasso
CRESST	$CaWo_4$	声子、光子	意大利Gran Sasso
EDELWEISS	Ge	电离、声子	法国Modane
PandaX	LXe	电离、荧光	中国锦屏
CDEX	pPCGe	电离	中国锦屏

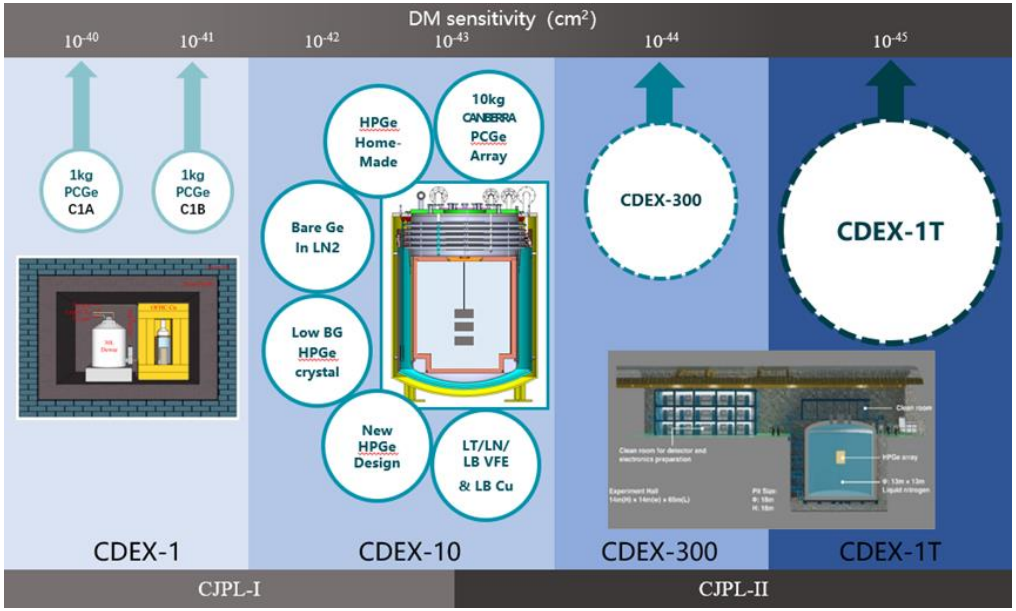
1.3 中国暗物质实验（CDEX）

中国暗物质实验
China Dark matter EXperiment









内容提要

第一章 暗物质与直接探测实验

第二章 物理动机

第三章 预期能谱

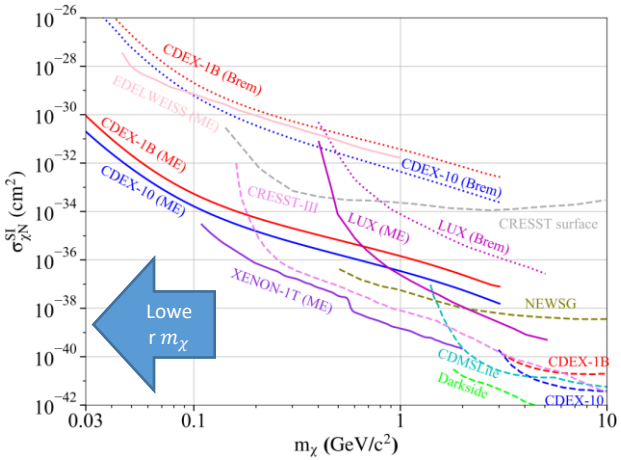
第四章 搜寻结果

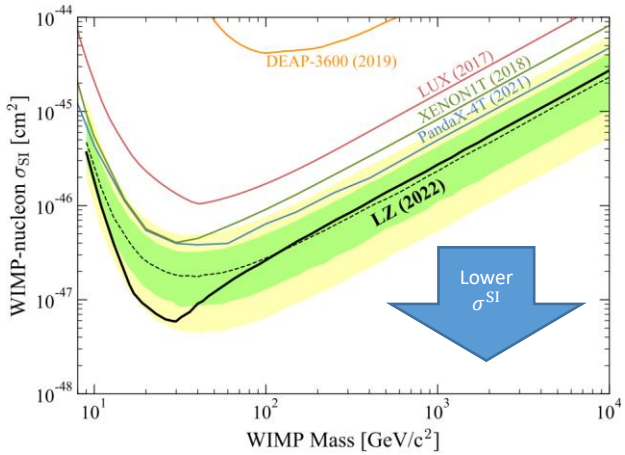
2.1 增强暗物质粒子源

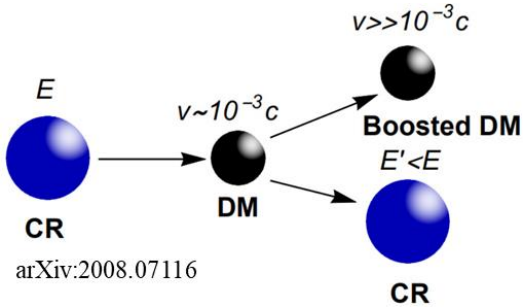
暗物质粒子（χ）搜寻实验（包括直接、间接探测和加速器实验）“一无所获”.....

更低的截面？ →更低的辐射本底？更大规模的探测器？

更轻的χ？→更低的阈值？更大的反冲能量？→暗物质粒子有更大的动能！







arXiv:2008.07116

增强暗物质粒子源？

宇宙线粒子散射（PROSPECT，PandaX-II，CDEX-10，……）；

中微子散射、太阳散射、……；

原初黑洞霍金辐射。

2.2 原初黑洞

原初黑洞（PBH），一种暗物质候选者。

形成机制：

a. 在辐射占优时代密度涨落塌缩；

b. 密度临界塌缩，可能发生在QCD时代；

c. 单一场膨胀塌缩；

d. 复合场膨胀塌缩；

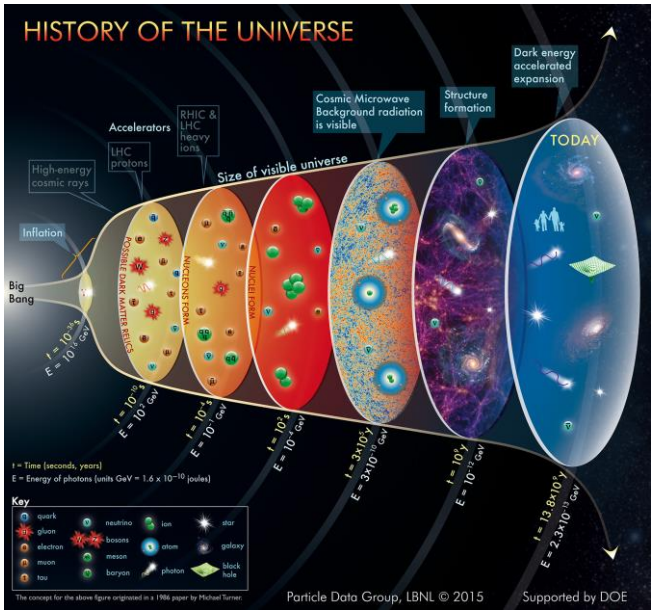
e. 在物质占优时代密度涨落塌缩；

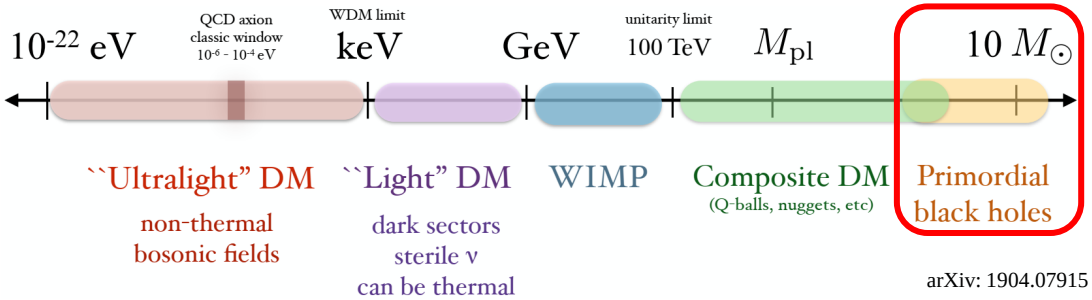
f. 宇宙弦圈坍缩；

g. 气泡碰撞坍缩；

h. 标量场塌缩；

i. 畴壁塌缩。





arXiv: 1904.07915

1997年，MACHO合作组大麦哲伦云微引力透镜结果：$0.5M_\odot$致密天体超出；

2016年，LIGO-Virgo发现恒星级质量黑洞合并引力波，可能是原初黑洞。

2.3 黑洞霍金辐射

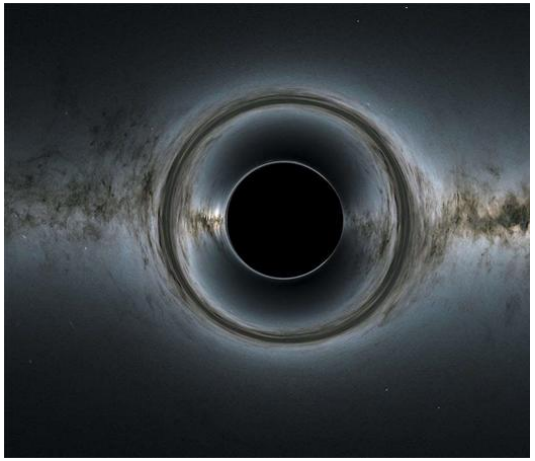
霍金辐射：霍金，广义相对论+量子场论，黑洞以黑体形式发出辐射从而逐渐失去质量，直至减小到普朗克质量。

CHARYBDIS（2003）和*BlackMax*（2008）：模拟大型强子对撞机（LHC）高维黑洞产生SM或BSM初级粒子。

PYTHIA，*HERWIG*和*Hazma*：计算次级粒子谱，量子色动力学（QCD）。

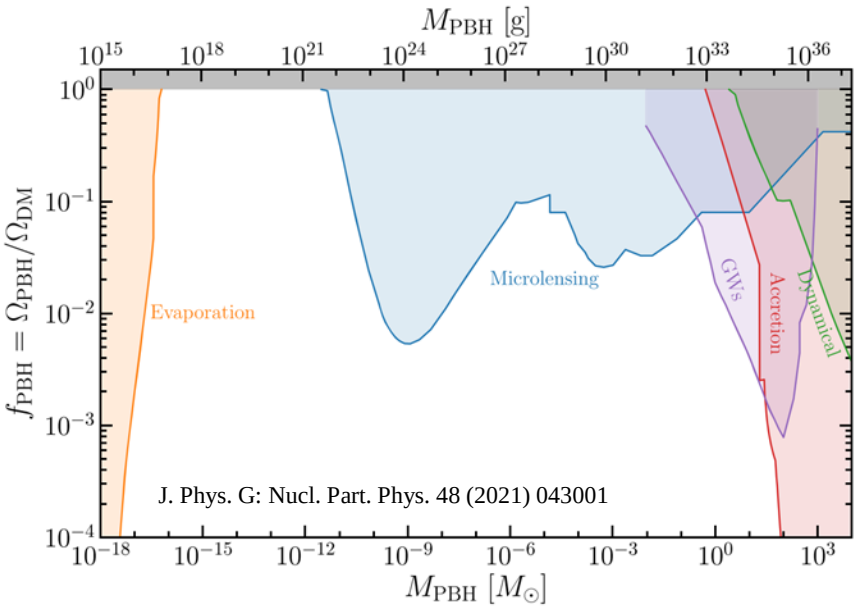
更多类型黑洞分布？宇宙中的黑洞？解析近似计算霍金辐射。

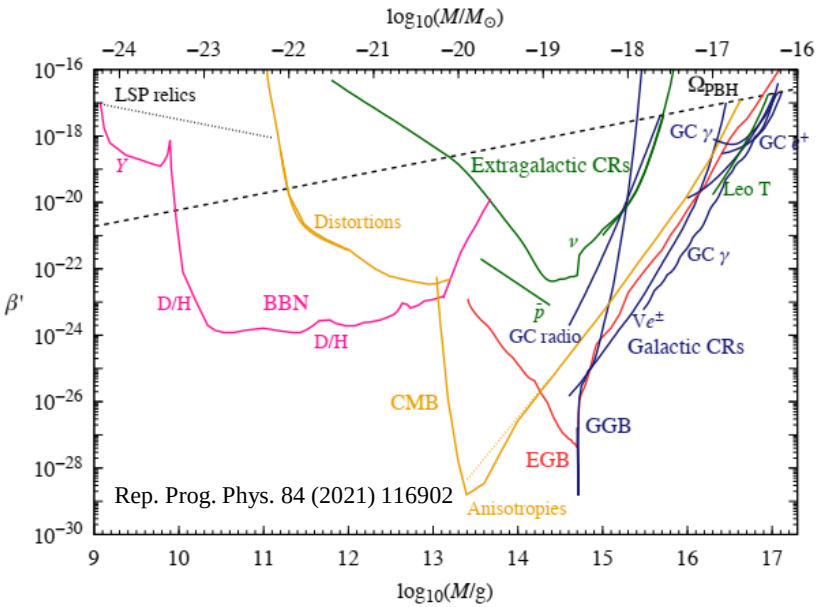
2019年5月，*BlackHawk v1*正式发布。2021年10月， *BlackHawk v2*增加了BSM！



$$\mathrm{HR}\begin{cases}\mathrm{SM}\begin{cases}\gamma\\ \nu\\ \ldots\end{cases}\\ \boxed{\mathrm{BSM}\begin{cases}\chi\\ \mathrm{Axion}\\ \mathrm{ALP}\end{cases}}\end{cases}$$

2.4 蒸发型原初黑洞丰度限制





a. 大爆炸核合成（BBN）；

b. 宇宙微波背景辐射（CMB）；

c. 银河系内、外γ射线背景；

d. 银河系内外宇宙线；

e. 原初黑洞爆炸；

f. 其他随机效应

$M_{PBH} \sim 10^{16}$ g（$M_{Halley} \sim 10^{18}$ g）

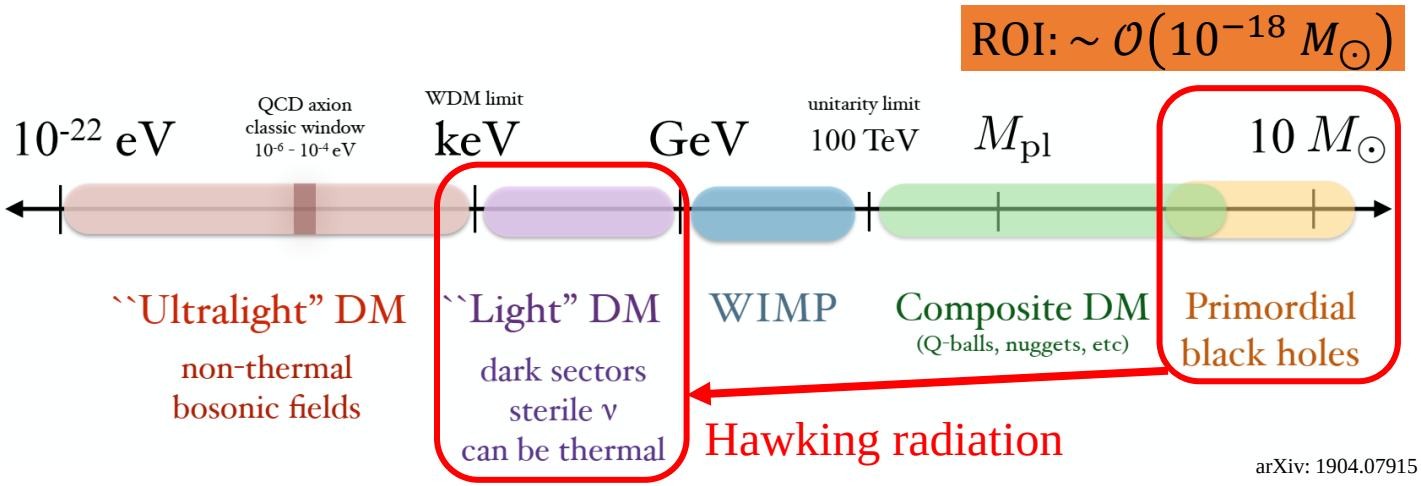
COMPTEL：0.8~30MeV系内 γ射线；

Voyager-1：$e^{\pm}$；

EDGES：21 cm；

JUNO，SuperK：ν。

2.5 物理动机



BSM粒子探测实验：

一种新颖的增强型粒子源

PBH霍金辐射搜寻实验：

一个新颖的直接搜寻对象

2022年1月，Calabrese等，XENON-1T，PBH蒸发χ与核散射；

2022年5月，Calabrese等，XENON-1T、Super-K，PBH蒸发χ与电子散射；

2022年9月，Li等，XENON-1T、Super-K，PBH蒸发χ与电子散射；

（类）轴子：Super-K、Hyper-K （2022）；e-ASTROGAM、AMEGO （2023）。

内容提要

第一章 暗物质与直接探测实验

第二章 物理动机

第三章 预期能谱

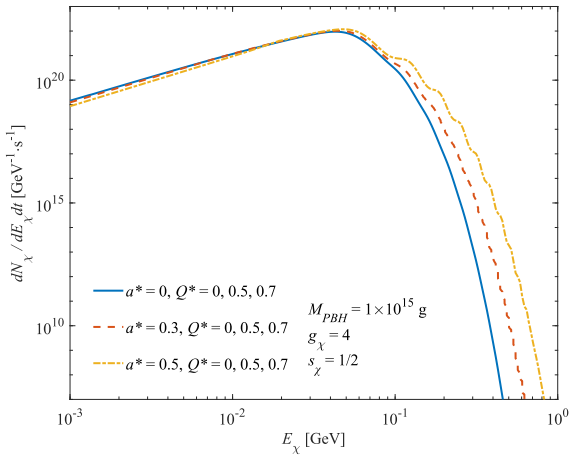
第四章 搜寻结果

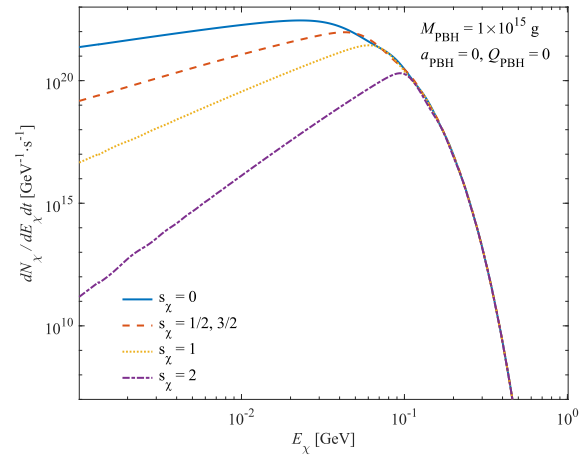
3.1 原初黑洞蒸发轻暗物质粒子

理论完备：广义相对论+量子场论→霍金辐射（包括BSM）→*Blackhawk-v2.1*

霍金温度： $T_{PBH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M_{PBH} k_B}$ (1)

χ发射率： $\frac{d^2 N_\chi}{dE_\chi dt} = \frac{g_\chi}{2\pi} \frac{\Gamma_\chi(E_\chi, M_{PBH})}{exp(E_\chi/k_B M_{PBH})+1}$ (2)



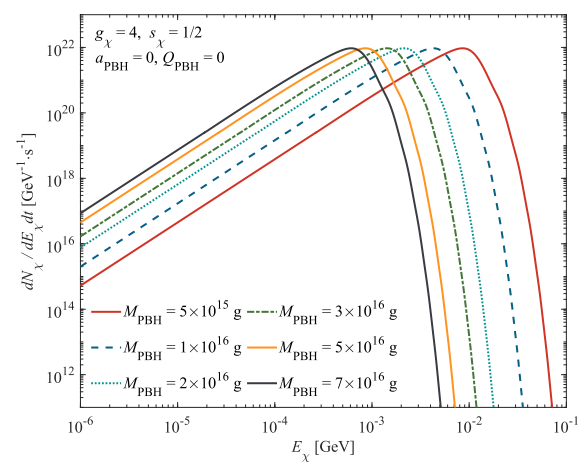


PBH自旋越大，蒸发能谱越硬。

χ：狄拉克费米子，$g_\chi = 4$；

PBH：以无自旋、不带电为例。

M_{PBH}↑，蒸发能谱越软！



3.2 到达地球轻暗物质粒子通量

$$\frac{d^2\phi_\chi}{dT_\chi d\Omega} = \frac{d^2\phi_\chi^{MW}}{dT_\chi d\Omega} + \frac{d^2\phi_\chi^{EG}}{dT_\chi d\Omega} \quad (3)$$

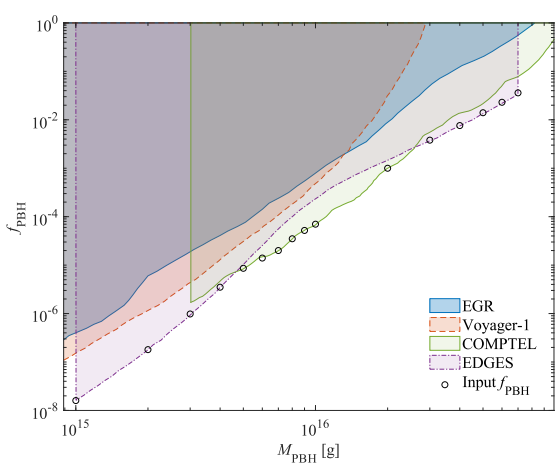
$$\frac{d^2\phi_\chi^{MW}}{dT_\chi d} = \frac{1}{4\pi}\frac{f_{PBH}}{M_{PBH}}\int\frac{d\Omega_s}{4\pi}\int dl\rho_{MW}^{\mathrm{NFW}}[r(s,\phi)]\frac{d^2N_\chi}{dT_\chi dt} \quad (4)$$

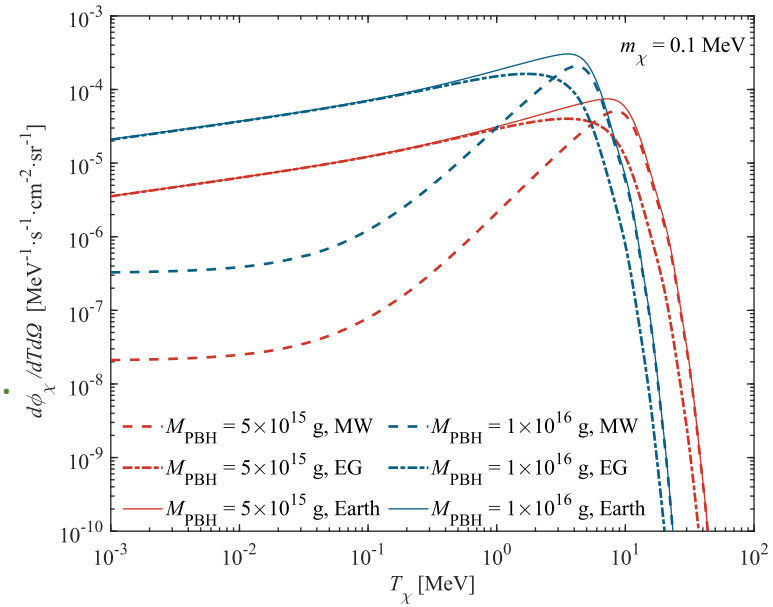
Navarro-Frenk-White DM 模型, $\rho_\chi = 0.4\ \mathrm{GeV/cm^3}$.

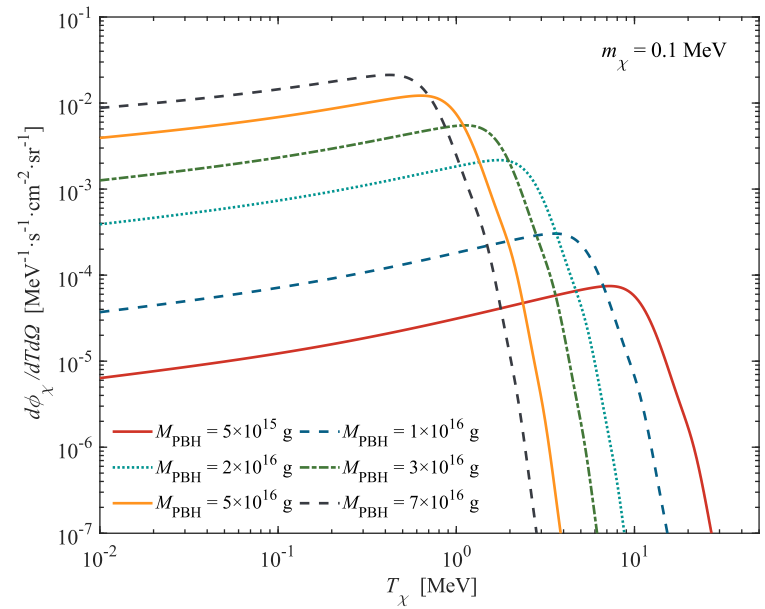
$$\frac{d^2\phi_\chi^{EG}}{dT_\chi d\Omega} = \frac{f_{PBH}\rho_{DM}}{4\pi M_{PBH}}\int dt[1+z(t)]\frac{d^2N_\chi}{dT_\chi dt} \quad (5)$$

$\rho_{DM} = 2.35\times10^{-30}\ \mathrm{g/cm^3}$,

t: 辐射和物质平衡期→现在。







3.3 到达实验室轻暗物质粒子通量

弹道轨迹近似（BTA）

$$T_d(T_0) = \frac{2m_\chi T_0}{2m_\chi e^\tau - T_0(1+e^\tau)} \quad (6)$$

式中， $\tau = d/l, d = 2400$ m。

$$l = \left[\sum_N n_N \sigma_{\chi N} \frac{2m_N m_\chi}{(m_N+m_\chi)^2}\right]^{-1} \quad (7)$$

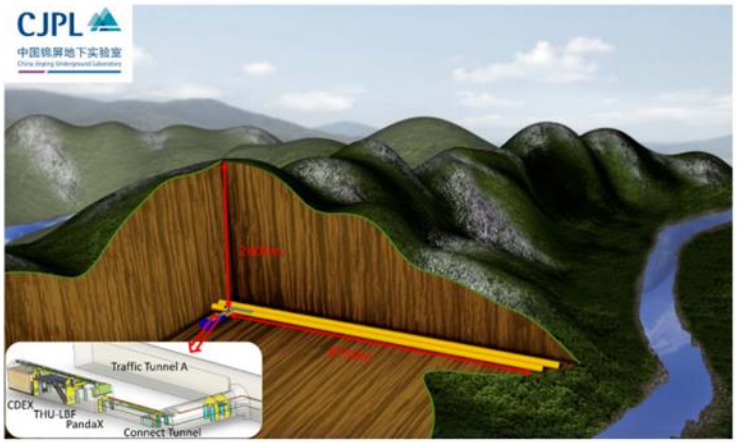
岩石密度和成分参考：

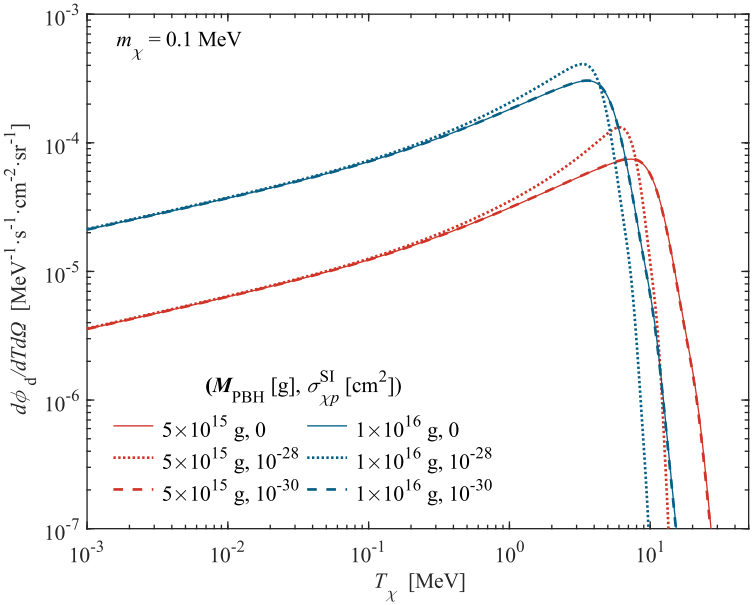
[Phys. Rev. D 105, 052005 (2022)].

$$\sigma_{\chi N} = \sigma_{\chi p}^{\mathrm{SI}} A_N^2 \left[\frac{m_N(m_\chi+m_p)}{m_p(m_\chi+m_N)}\right]^2 \quad (8)$$

到达实验室χ通量：

$$\frac{d^2\phi_\chi^d}{dT_d d\Omega} \approx \frac{4m_\chi^2 e^\tau}{(2m_\chi+T_d-T_d e^\tau)^2}\left(\frac{d^2\phi_\chi}{dT_0 d\Omega}\right) \quad (9)$$





3.4 核反冲能谱

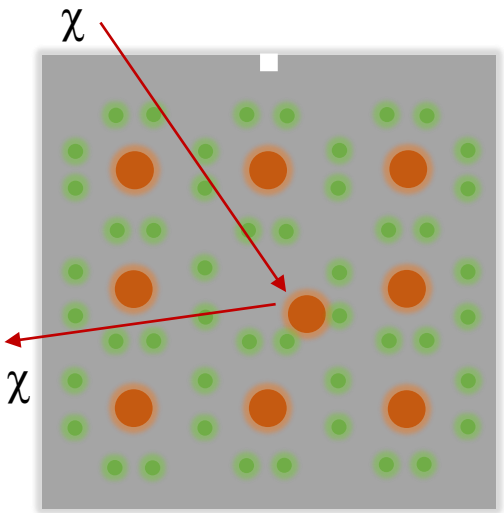
核反冲微分事例率：

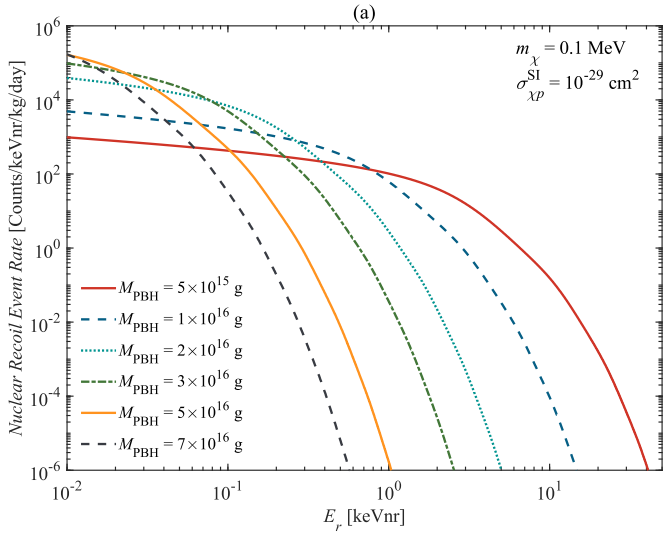
$$\frac{dR}{dE_r}(E_r) = \sigma_{\chi Ge} N_{Ge} \int dT_d d\Omega \frac{d^2\phi_\chi^d}{dT_d d\Omega} \frac{\Theta(E_r^{max} - E_r)}{E_r^{max}} \quad (10)$$

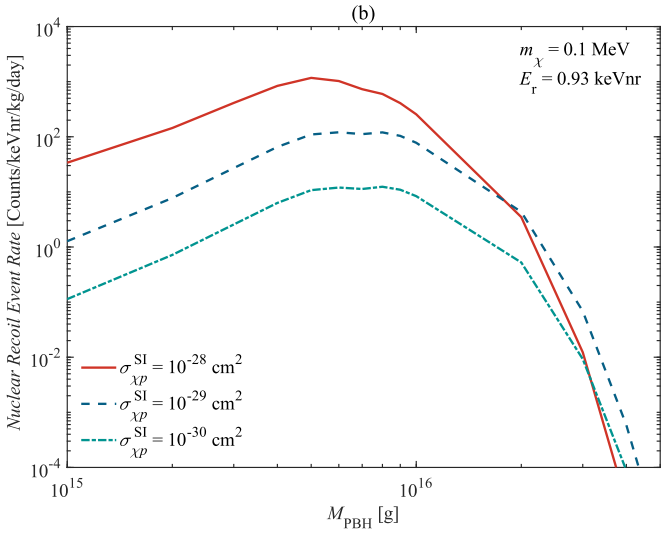
$$\sigma_{\chi Ge} = F^2(E_r)\sigma_{\chi p}^{SI} A_{Ge}^2 \left[\frac{m_{Ge}(m_\chi + m_p)}{m_p(m_\chi + m_{Ge})}\right]^2 \quad (11)$$

$F(E_r)$ 为Helm 核形状因子，

$$E_r^{max} = \frac{T_d^2 + 2m_\chi T_d}{T_d + (m_\chi + m_{Ge})^2/(2m_{Ge})} \quad (12)$$







3.5 预期能谱

预期事例率：

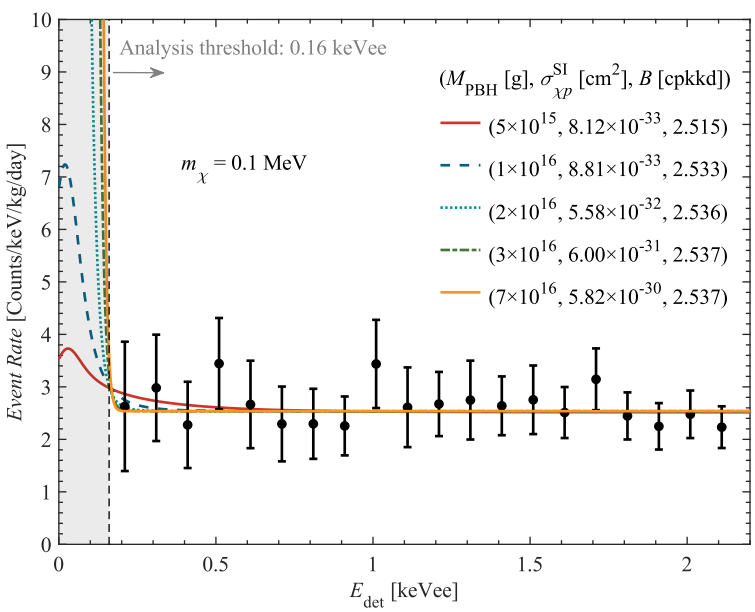
$$\frac{dR}{dE_{det}} = \frac{dR}{dE_r} \cdot \left(\frac{df_{nr}}{dE_r} \cdot E_r + f_{nr}\right)^{-1} \quad (13)$$

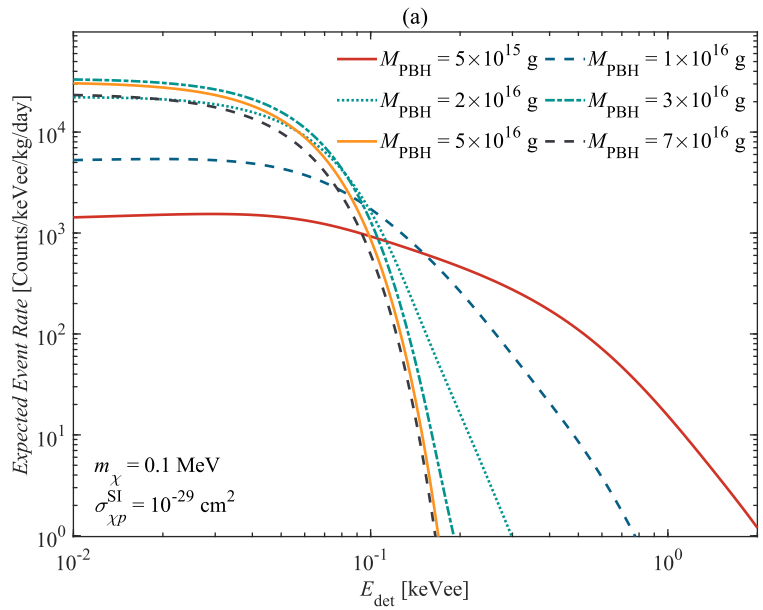
淬灭因子f_{nr}：Lindhard，$\kappa = 0.16$

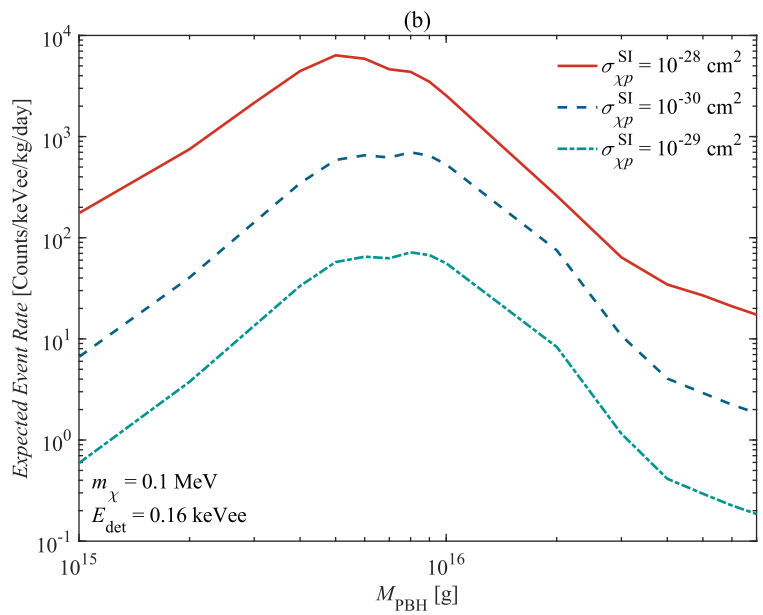
CDEX-10 能量分辨：

$$std = 35.8 + 16.6 \times E(\mathrm{keV})^{1/2}\ (\mathrm{eV}).$$

曝光量： 205.4 kg · day







内容提要

第一章 暗物质与直接探测实验

第二章 物理动机

第三章 预期能谱

第四章 搜寻结果

4.1 排除结果——$\sigma_{\chi p}^{SI}$

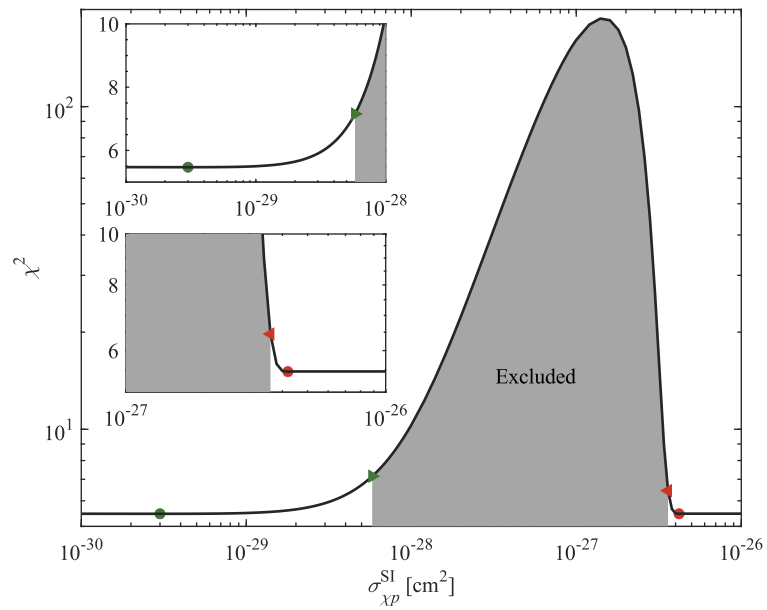
$$\chi^2\left(M_{PBH}, f_{PBH}, m_\chi, \sigma_{\chi p}^{SI}\right)$$

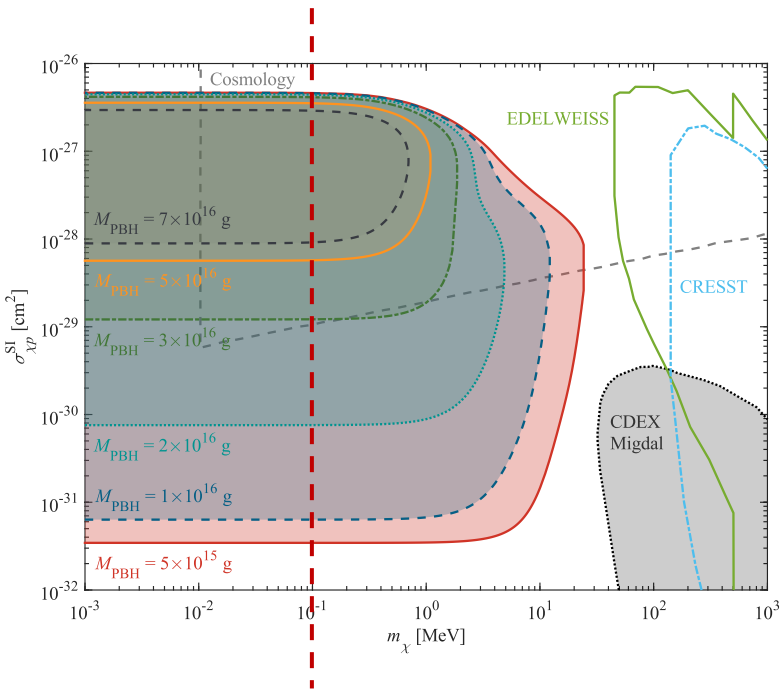
$$= \sum_i \frac{\left[n_i - B - S_i\left(M_{PBH}, f_{PBH}, m_\chi, \sigma_{\chi p}^{SI}\right)\right]^2}{\Delta_i^2} \quad (14)$$

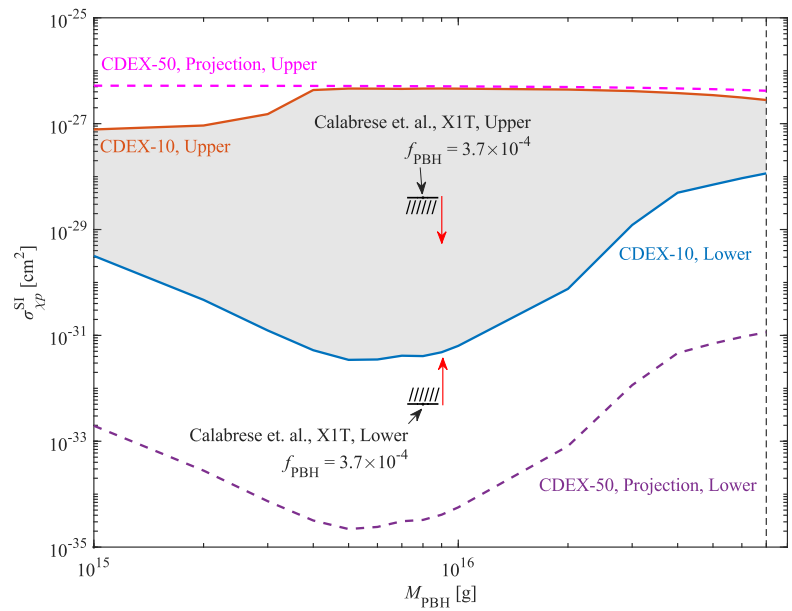
Feldman-Cousins χ^2方法，单边90% 置信度。

CDEX-10: 205.4 kg · day，$BKG \sim$ 2.5 cpkkd；

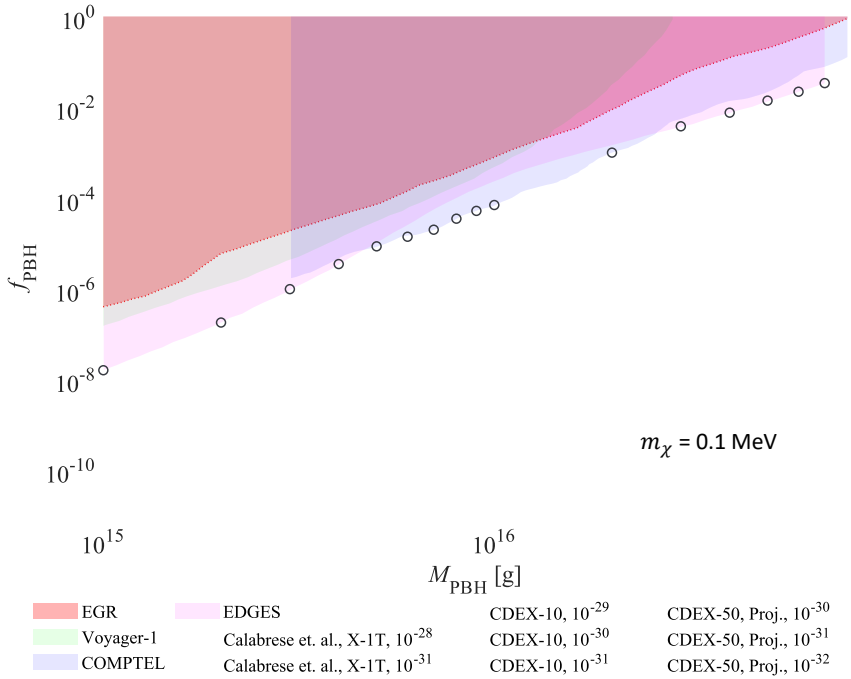
CDEX-50: 50 kg · yr , $BKG \sim$ 0.01 cpkkd。







4.2 排除结果——f_{PBH}



$(m_\chi,\ \sigma_{\chi p}^{\mathrm{SI}})$和$(M_{PBH}, f_{PBH})$简并……

现在：$(M_{PBH}, f_{PBH}) \rightarrow (m_\chi,\ \sigma_{\chi p}^{\mathrm{SI}})$；

未来：$(m_\chi,\ \sigma_{\chi p}^{\mathrm{SI}}) \rightarrow (M_{PBH}, f_{PBH})$？

汇报完毕！

谢谢！