

PandaX-4T实验暗物质粒子 搜寻结果

张睿洋

6/27/2023

参考文献:

Meng Y, Wang Z, Tao Y, et al. [Dark matter search results from the PandaX-4T commissioning run](#)[J].
Physical Review Letters, 2021, 127(26): 261802.

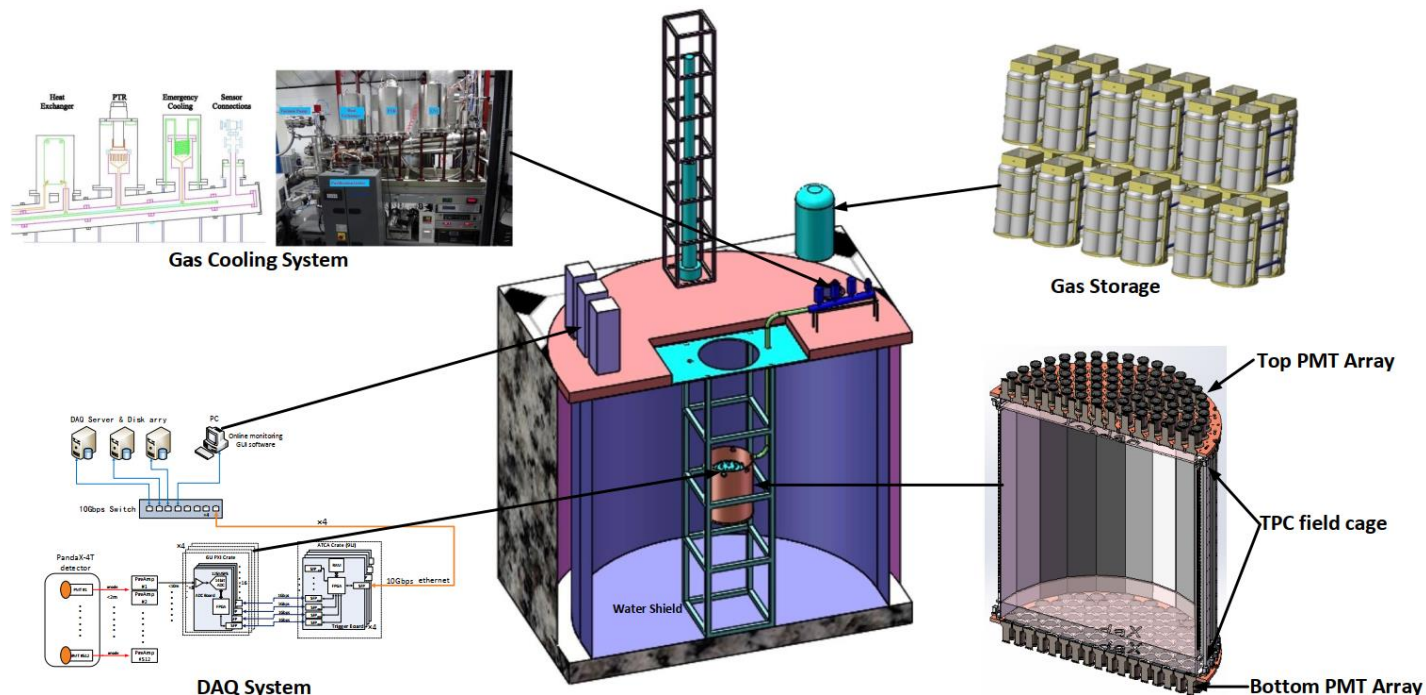
实验简介

- PandaX实验坐落在中国锦屏地下实验室
- 其目标在于使用气液两相型氙时间投影室（TPC）对弱相互作用大质量粒子（WIMP）暗物质进行直接探测
- PandaX-II探测器于2014年建成，顺利运行至2019年6月，其灵敏质量为0.5t
- PandaX-4T于2021年建成开始取数，其Xe总质量6t，灵敏质量约4t



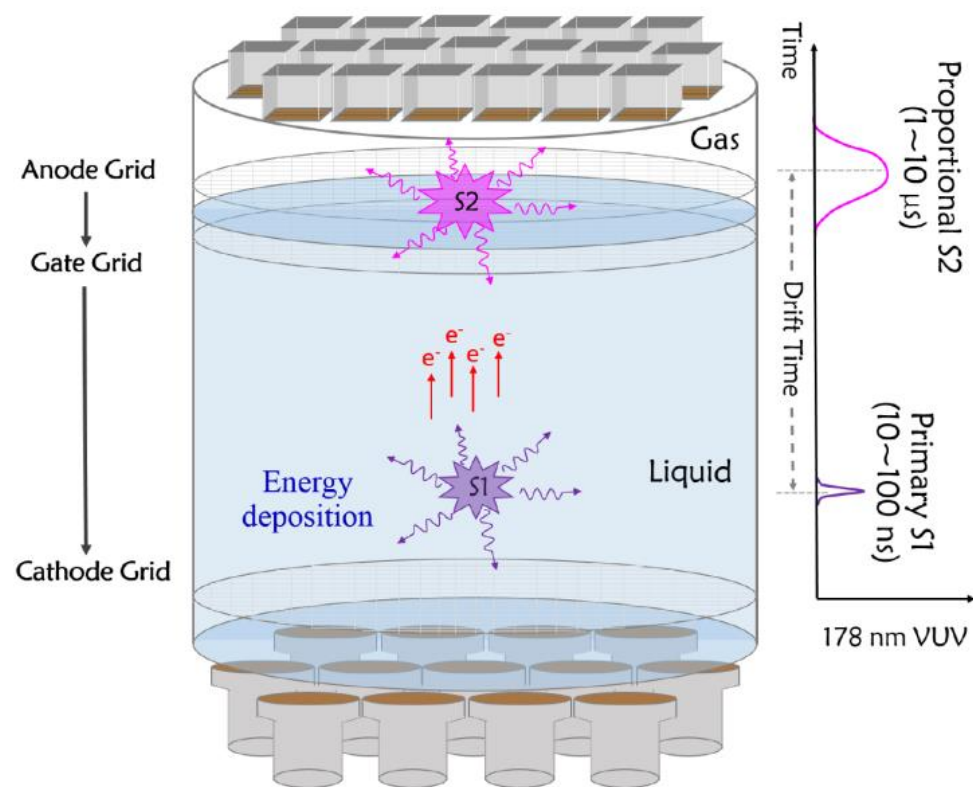
探测器结构

- 探测器主体为两相氙时间投影室
 - 上下采用PMT阵列为读出平面
 - TPC漂移区1.2m
 - 漂移电场~800V/cm
 - 采用低本底材料，探测器总本底 <math><0.05\text{mDRU}</math> (1DRU=1evt/keV/d/kg)
- 直径10m的不锈钢超纯净水箱包裹TPC
- 冷却系统
- 气体纯化、储存系统
- 数据获取系统-实时数据压缩和无触发数据采集



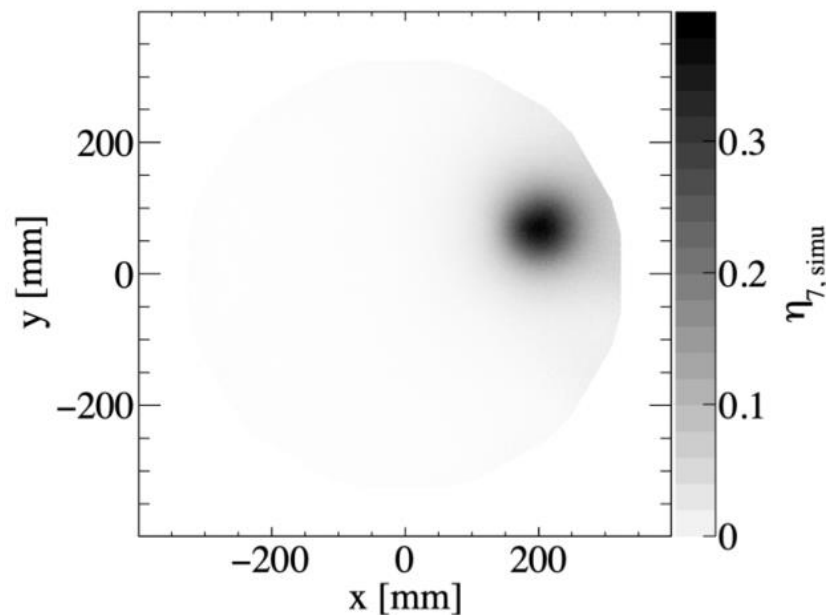
工作原理

- WIMP质量位于1GeV-1TeV区间，主要的相互作用方式为与大质量原子核发生核反冲（NR）
- WIMP与液相Xe原子发生碰撞沉积能量，产生闪烁光信号S1
- 电离产生的电子漂移至气相Xe中，在强电场的作用下进行倍增，发生电致发光，产生光信号S2
- S1与S2信号的时间差给出漂移距离，根据PMT的相应可以重建相互作用的三维位置
- S1与S2的信号幅度关系反映相互作用的种类是电子反冲（ER）或核反冲（NR）
- 搜寻超出本底水平的NR事例以搜寻WIMP



原始事例重建

- PMT信号被根据其波形、幅度特征分为S1、S2信号，选择S1、S2信号时间差小于1ms的信号合并成事例
- 使用三类筛选条件获取原始事例
 - 信号噪声水平
 - S1信号幅度、上下平面信号强度比、信号在PMT平面内分布限制
 - S2信号波形、上下平面信号强度比、信号在PMT平面内分布rms、位置重建精度
- 采用分别基于解析结果和模拟结果的光子传输函数(PAF)方法进行水平方向位置重建，将两者结合给出位置分辨最好的重建结果
 - 垂直方向位置分辨为3mm，由S2信号宽度确定
 - 水平方向的位置分辨与S2的幅度有关，在S2信号幅度为1000PE(100PE)时位置分辨为3.0mm(8.2mm)



基本思想都是基于光子传输函数 $\eta(x, y)$ 构造似然函数，取极大来估计 (x, y) 坐标

$$\ln L(x, y) = \sum_i S2_i \cdot \ln \frac{\eta_{i, \text{model} = \text{ana or simu}}(x, y)}{P(x, y)}$$

$$P(x, y) = \sum_i \eta_{i, \text{model} = \text{ana or simu}}(x, y)$$

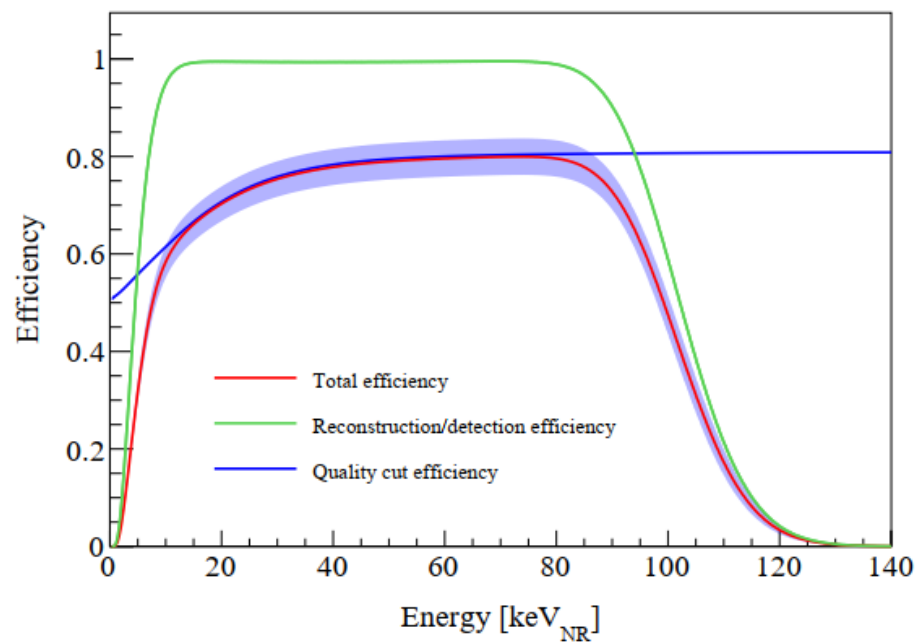
系统刻度

- 均匀性刻度
 - 垂直方向 $S2_b$ 信号响应的均匀性刻度使用Xe-131m的164keV退激发光
 - 3维位置的S1信号响应和水平面内的 $S2_b$ 信号响应刻度使用Kr-83m（能量41.5keV）
 - S1响应的rms为19%， $S2_b$ 响应的rms为15%
- 响应参数刻度
 - 事例的沉积能量满足公式 $E = 13.7 \text{ eV} \times \left(\frac{S1}{\text{PDE}} + \frac{S2_b}{\text{EEE} \times \text{SEG}_b} \right)$
 - 通过已知能量的ER事例，进行拟合来确定探测器的PDE，EEE，SEG参数

Set	1	2	3	4	5
Duration (days)	1.95	13.25	5.53	35.58	36.51
$\langle \tau_e \rangle$ (μs)	800.4	939.2	833.6	1121.5	1288.2
dt_{max} (μs)	800	810	817	841	841
V_{cathode} (-kV)	20	18.6	18	16	16
V_{gate} (-kV)	4.9	4.9	5	5	5
PDE (%)	9.0±0.2		9.0±0.2		
EEE (%)	90.2±5.4		92.6±5.4		
SEG _b (PE/e)	3.8±0.1		4.6±0.1		

系统刻度

- 效率刻度
 - 包括信号重建和探测效率以及数据筛选效率
 - 信号重建和探测效率使用data-driven方法进行刻度
 - 数据筛选效率刻度使用95%分位线内的刻度事例，求出使用所有筛选条件和除去此筛选条件情况下的事例数比值作为该筛选条件的筛选效率

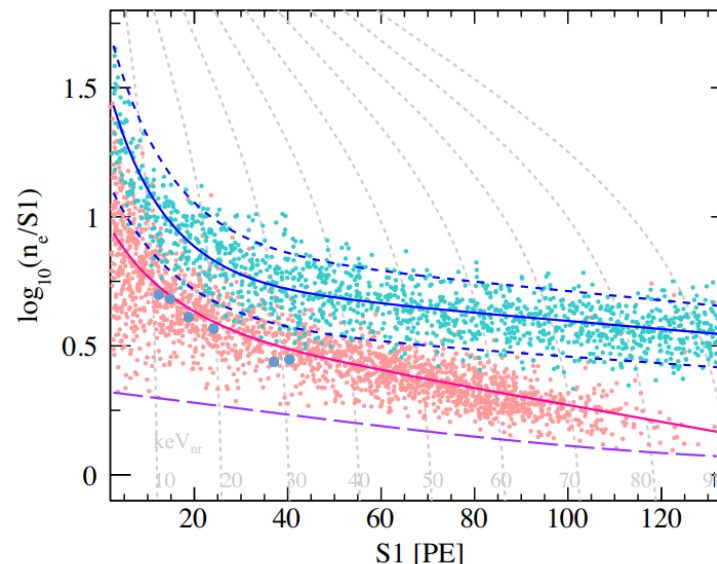


系统刻度

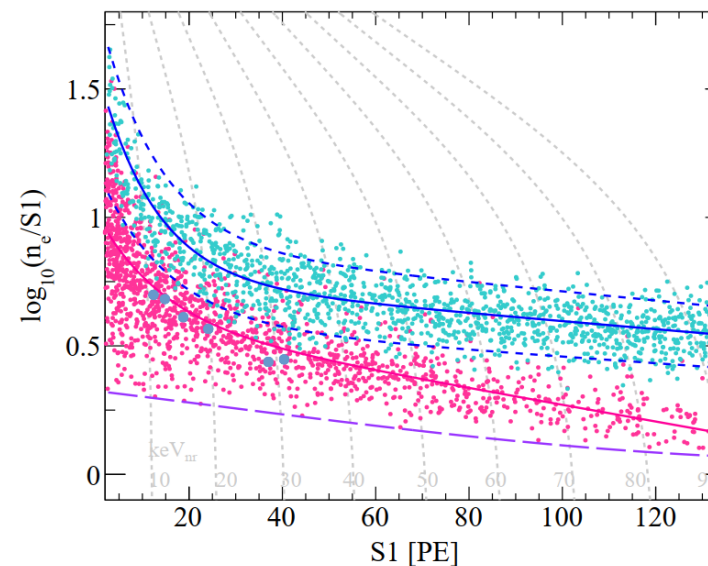
- ER/NR事例响应刻度
 - 对ER和NR事例，S1与S2信号的幅度关系有明显差异
 - ER事例（蓝）刻度采用Rn220放射源，NR事例（红）刻度采用两种不同的中子源Am241-Be源和D-D源分别进行
 - 使用不分bin似然函数用数据对ER和NR响应模型进行拟合，其主要的拟合参数为原初光产额和原初电荷产额，分位线由得到的模型抽样得到

$$-2\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N -2\ln(P(S1^i, S2^i))$$

$P(S1^i, S2^i)$ 是此模型给出的产生 $(S1^i, S2^i)$ 信号的概率密度，它是光产额和电荷产额的函数



Rn220/D-D事例刻度



Rn220/AmBe事例刻度

收集电子数

$$n_e = S2_b / (EEE \times SEG_b)$$

定义此变量作为纵轴是为了消除不同测试阶段内电子透过率(EEE)和单电子增益(SEG)的差异

本底评估

- 为了进行暗物质粒子搜寻，需要对探测器本底进行细致分析
- PandaX-4T实验的主要本底有以下部分：
 - 探测器材料本底，高纯锗探测器测量
 - TPC内的Rn222本底，alpha事例
 - Kr85本底， $\beta - \gamma$ 符合测量
 - 太阳中微子本底，根据模型估算
 - Xe136本底，根据丰度和半衰期计算
 - 氙本底
 - Xe127本底
 - 材料表面吸附本底，表面Po210衰变事例计算
 - 中子本底，根据单次/多次散射NR事例比值确定
 - B8中微子本底
 - 偶然符合本底，根据单独S1，S2信号的事例率计算
- 在整段数据采集时间内的总本底数估计为1054 ± 39个

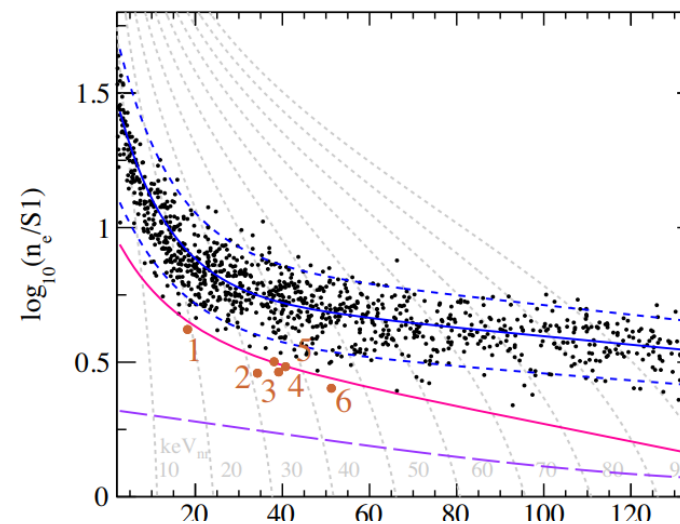
flat ER本底

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Total	Below NR median	Best fit
Rn	6.9 ± 3.8	42.8 ± 23.5	22.7 ± 12.5	162.0 ± 88.9	112.1 ± 61.5	346.5 ± 190.2	1.42 ± 0.78	...
Kr	1.1 ± 0.7	7.7 ± 4.9	3.2 ± 2.1	20.4 ± 13.1	20.9 ± 13.4	53.3 ± 34.2	0.21 ± 0.13	...
Material	0.8 ± 0.1	5.7 ± 0.7	2.4 ± 0.4	15.2 ± 1.9	15.6 ± 1.9	39.7 ± 5.0	0.16 ± 0.02	...
Solar ν	0.8 ± 0.2	5.4 ± 1.1	2.3 ± 0.5	14.3 ± 2.9	14.6 ± 2.9	37.4 ± 7.5	0.16 ± 0.03	...
¹³⁶ Xe	0.7 ± 0.1	4.6 ± 0.9	1.9 ± 0.4	11.8 ± 2.4	12.1 ± 2.4	31.1 ± 6.2	0.05 ± 0.01	...
Flat ER (data)	4.0 ± 2.9	54.5 ± 10.5	12.2 ± 4.9	240.5 ± 21.8	180.9 ± 18.9	492.1 ± 31.2	2.06 ± 0.14	509.6 ± 22.8
CH ₃ T	17 ± 5	88 ± 11	21 ± 6	258 ± 24	148 ± 17	532 ± 32	5.1 ± 0.3	532 ± 32
¹²⁷ Xe	0.19 ± 0.04	1.08 ± 0.25	0.96 ± 0.22	3.99 ± 0.92	1.91 ± 0.44	8.13 ± 1.07	0.12 ± 0.02	8.41 ± 2.08
Neutron	0.02 ± 0.01	0.15 ± 0.08	0.07 ± 0.03	0.45 ± 0.22	0.46 ± 0.23	1.15 ± 0.57	0.69 ± 0.35	0.82 ± 0.41
⁸ B	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.26 ± 0.13	0.29 ± 0.15	0.64 ± 0.32	0.62 ± 0.31	0.61 ± 0.17
Surface	0.01 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.18 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.47 ± 0.13	0.42 ± 0.12	0.44 ± 0.11
Accidental	0.04 ± 0.01	0.32 ± 0.05	0.03 ± 0.01	0.99 ± 0.18	1.05 ± 0.21	2.43 ± 0.47	0.80 ± 0.15	2.31 ± 0.45
Sum	21 ± 6	144 ± 15	34 ± 8	504 ± 32	333 ± 25	1037 ± 45	9.8 ± 0.6	1054 ± 39
Data	21	148	34	496	359	1058	6	

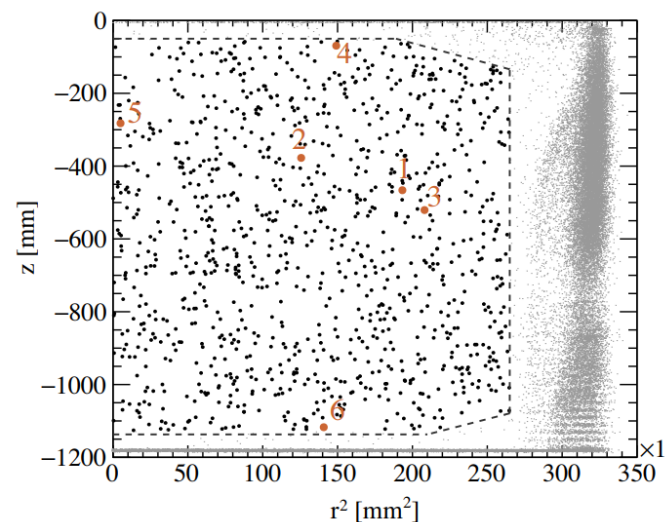
事例筛选条件

- 暗物质候选事例由以下筛选条件给出：
 - S1信号幅度位于[2,135] PE
 - S2信号幅度位于[80,20000] PE
 - 反符合PMT在时间窗内没有光子信号
 - 事例位于99.5% NR分位线之上（图中紫色虚线）
- 在PandaX-4T总计0.63吨年的运行后，得到候选事例1058个（如右图），它们均匀地分布在灵敏区域内
- 其中有6个事例位于NR中值线之下

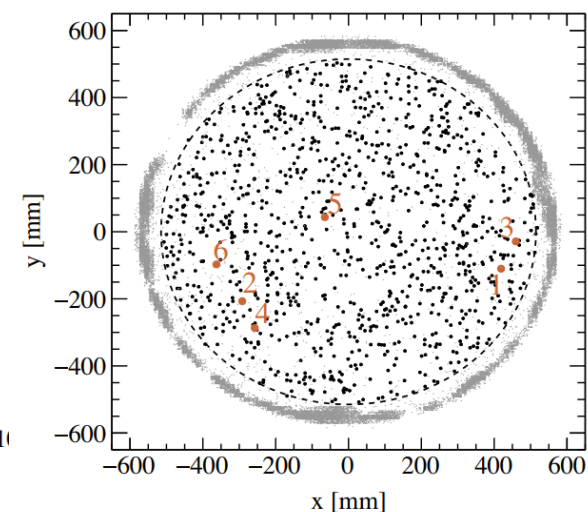
(a) $\log_{10}(n_e/S1)$ vs. $S1$



(b) z vs. r^2



(c) y vs. x



似然函数构造

- 对于每一组 $(m_\chi, \sigma_{\chi,n})$ 参数，理论给出的暗物质NR事例率以及能谱由standard halo模型给出
- 并进而结合刻度得到的探测器响应模型，由模拟给出对应的信号事例的pdf $P_s^n(S1, S2, r, z)$
- 本底事例的pdf $P_b^n(S1, S2, r, z)$ 根据本底的类型不同，由模拟、刻度结果给出，或设为均匀分布
- 构造如下形式的似然函数:
- $\mathcal{L} = \left\{ \prod_{n=1}^{nset} \left[\text{Pois}(\mathcal{N}_{obs}^n | \mathcal{N}_{fit}^n) \times \prod_{i=1}^{\mathcal{N}_{obs}^n} (l_s^{n,i} + \sum_b l_b^{n,i}) \right] \right\} \times [G(\delta_s, \sigma_s) \prod_b G(\delta_b, \sigma_b)]$
- 将数据按照测试条件不同分为 $nset$ 组， \mathcal{N}_{obs}^n 为第 n 组数据中观测到的事例数， \mathcal{N}_s^n 和 \mathcal{N}_b^n 为预计的信号和本底事例数， \mathcal{N}_s^n 与 $\sigma_{\chi,n}$ 相关
- δ_s 和 δ_b 为信号和本底事例数的归一化系数，它们由信号和本底对应的高斯补偿函数约束
- 高斯补偿函数的宽度 σ_s 和 σ_b 由响应模型参数的误差和本底测量的误差给出
- 似然函数 \mathcal{L} 中暗物质反应截面 $\sigma_{\chi,n}$ 是待检验参数，其余是冗余参数

$$\mathcal{N}_{fit}^n = \mathcal{N}_s^n(1 + \delta_s) + \sum_b \mathcal{N}_b^n(1 + \delta_b),$$

$$l_s^{n,i} = \frac{\mathcal{N}_s^n(1 + \delta_s) P_{DM}^n(S1^i, S2^i, r^i, z^i)}{\mathcal{N}_{fit}^n},$$

$$l_b^{n,i} = \frac{\mathcal{N}_b^n(1 + \delta_b) P_b^n(S1^i, S2^i, r^i, z^i)}{\mathcal{N}_{fit}^n},$$

$$G(\delta, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right).$$

暗物质事例搜寻

- 构造相应的剖面似然比 $\lambda(\sigma_\chi) = \frac{L(\sigma_\chi, \hat{\boldsymbol{\theta}})}{L(\hat{\sigma}_\chi, \hat{\boldsymbol{\theta}})}$

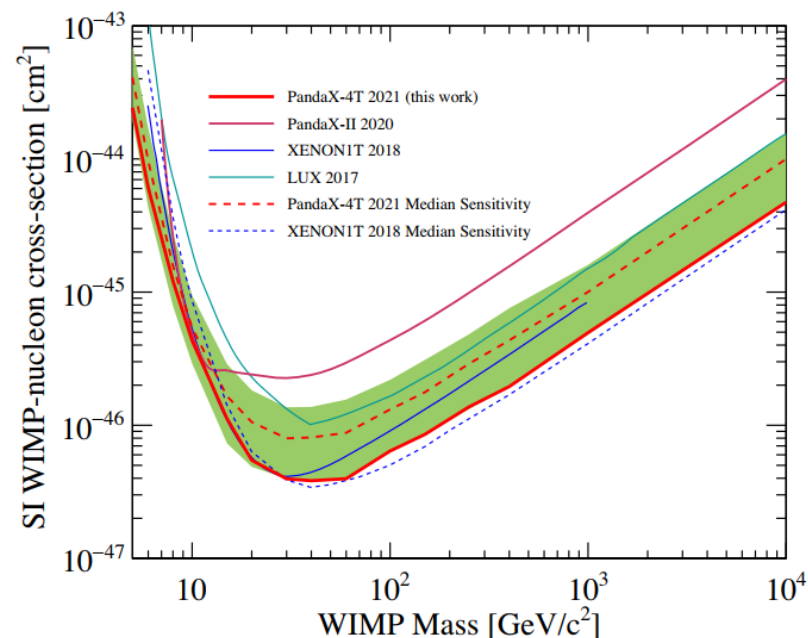
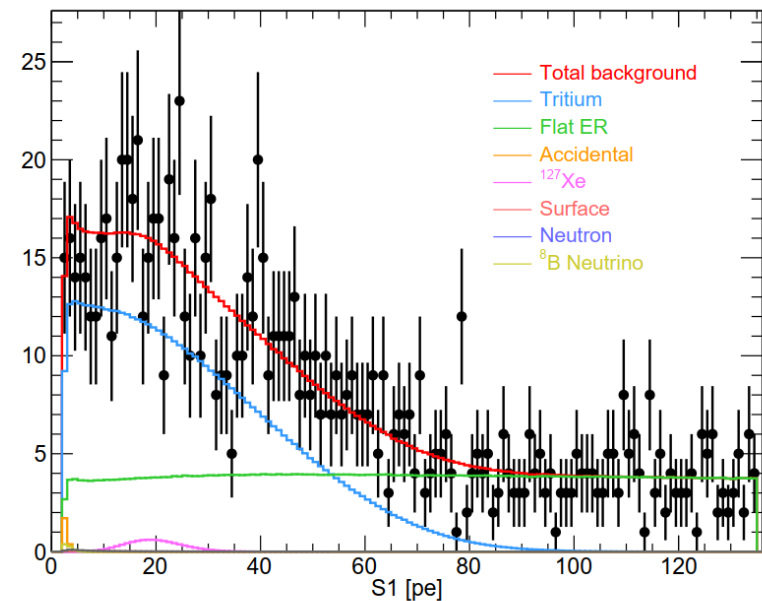
- 检验统计量定义为

$$q_\chi = \begin{cases} -2\log(\lambda(\sigma_\chi)) & \hat{\sigma}_\chi \geq 0 \\ -2\log\left(\frac{L(\sigma_\chi, \hat{\boldsymbol{\theta}})}{L(0, \hat{\boldsymbol{\theta}}(0))}\right) & \hat{\sigma}_\chi < 0 \end{cases}$$

- 这样定义是为了在即使在 $\hat{\sigma}_\chi < 0$ 的情况下，也给出合理结果
- q_χ 的pdf分布由模拟给出，它与 m_χ 有关，将不同 σ_χ 下的 q_χ 结果与其pdf比较得到对应的 $(m_\chi, \sigma_{\chi,n})$ 参数下的p值
- 扫描 $(m_\chi, \sigma_{\chi,n})$ 参数空间后，并未发现数据有明显超出本底 ($\sigma_\chi > 0$) 的迹象

纯本底检验

- 因此使用纯本底假设检验上述数据
- 对于给定的数据（事例的S1,S2信号幅度和三维位置），使用纯本底假设对上述测量数据进行拟合，给出拟合优度p值为0.71
- 令 q_χ 中 $\sigma_\chi = 0$ ，给出纯本底假设下的检验统计量
- 扫描 m_χ 给出不同 m_χ 下 σ_χ 的90%置信上界，如图中红线所示
- 此结果在 $40\text{GeV}/c^2$ 下给出对暗物质-核子无相互作用截面的最强限制，为 $3.8 \times 10^{-47} \text{cm}^2$



NR事例来源分析

- 共有6个事例位于NR中值线之下，这6个事例被认为是“最像”暗物质的事例
- 求出这6个事例在不同本底来源假设下的似然比
- 发现这些事例都最可能来源于氚本底
- 目前，PandaX-4T实验正在对氚本底进行去除，去除后，在6吨年的数据下，对暗物质的探测灵敏度有望提升一个量级

