

XENONnT实验最新进展： WIMP、中微子CEvNS与轻暗物质搜寻

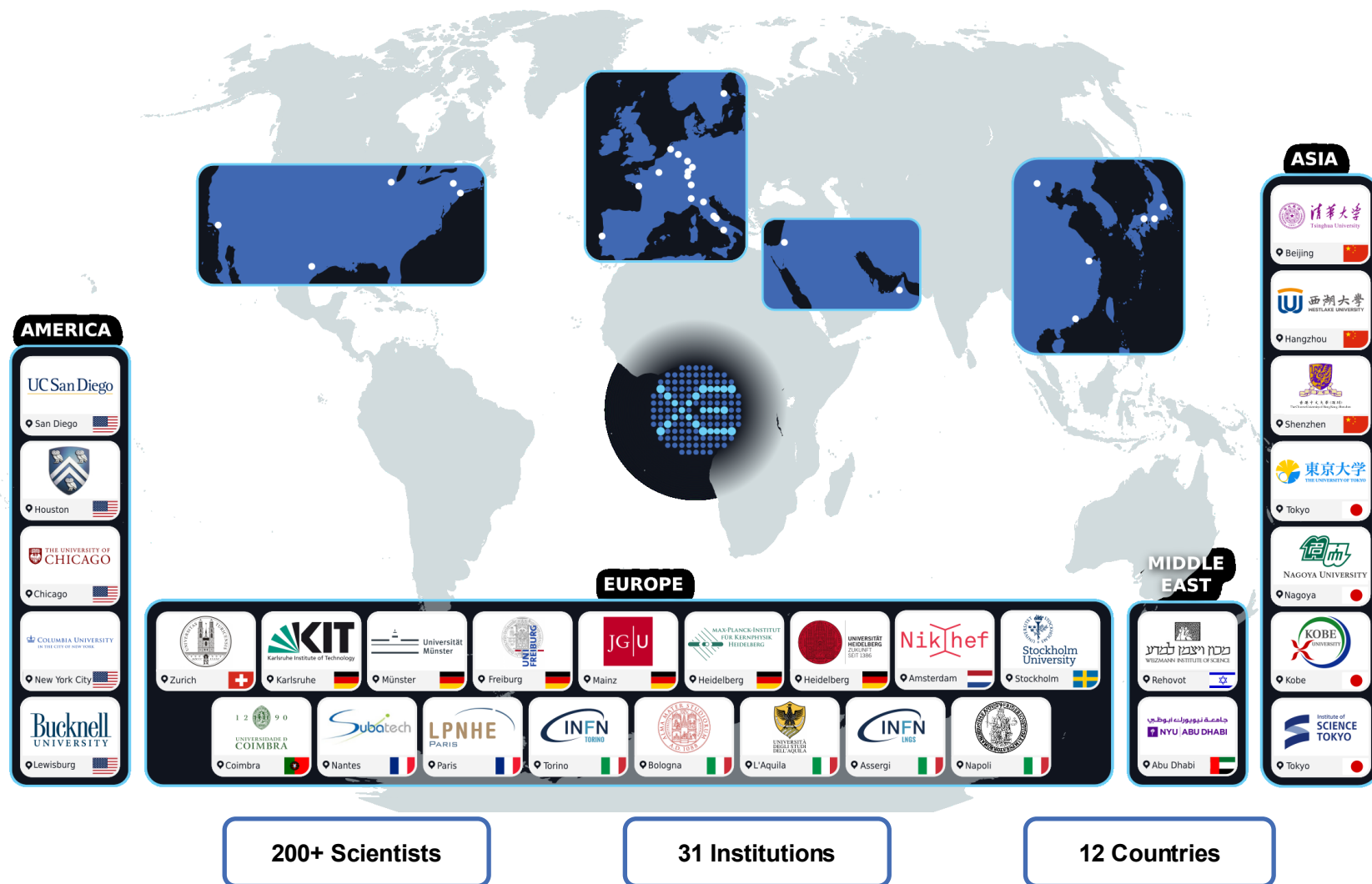
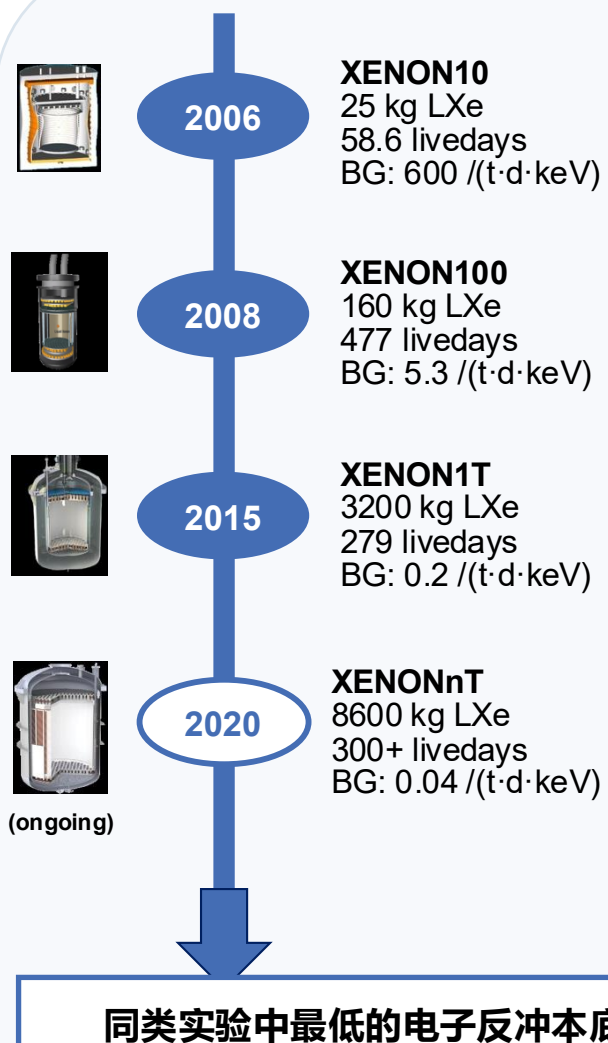
蔡畅 清华大学物理系

On behalf of the XENONnT Collaboration

中国物理学会高能物理分会学术年会

广州，2026年7月16日

XENONnT实验发展



XENONnT探测器：TPC与反符合探测器



液氙暗物质
直接探测

意大利 INFN 格兰萨索国家实验室 (LNGS)
地下 1.4 km — 3600 米水当量屏蔽体

700吨水箱内的三层嵌套探测器

1 缪子 反符合

掺钐水切伦科夫反符合：
标记缪致中子

被动屏蔽：
天然放射性 γ 和中子

84 只 8" PMT

JINST 9, P11006 (2014)

2 中子 反符合

掺钐水切伦科夫反符合：
标记材料放射性中子

33 m³ 体积
环绕低温恒温器

120 只 8" PMT

Eur. Phys. J. C 85 (2025) 695

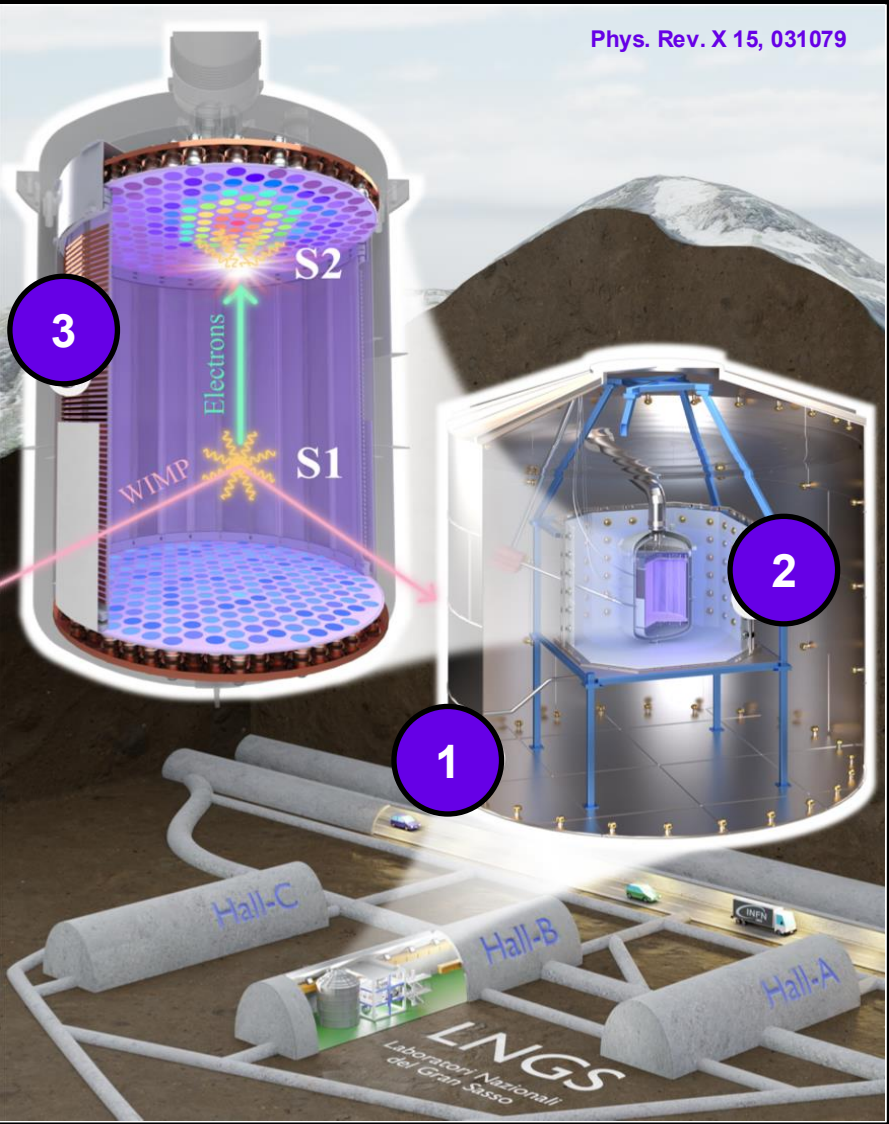
3 时间 投影室

双相液氙 TPC
5.9 t 灵敏体积
8.6 t 总质量

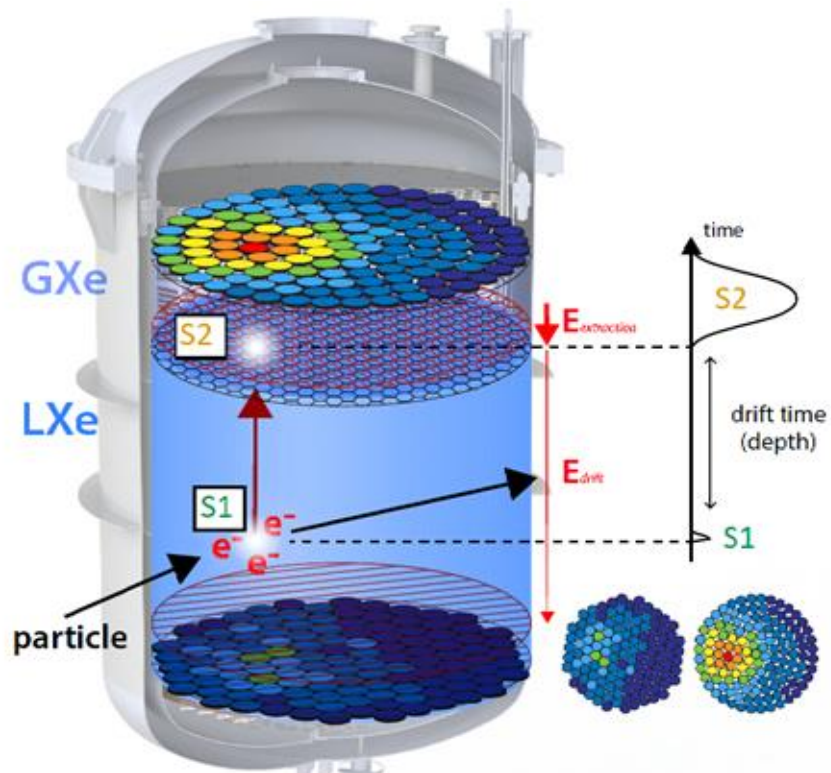
1.5 m 漂移长度
1.3 m 直径

494 只 3" PMT

Eur. Phys. J. C 84 (2024) 784



液氙TPC探测原理



双相TPC探测原理

信号探测

能量沉积产生瞬发闪烁光S1；电离电子向上漂移，在气相产生放大的S2。

三维定位

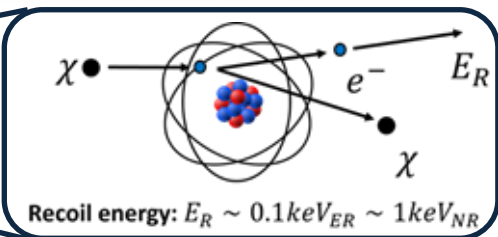
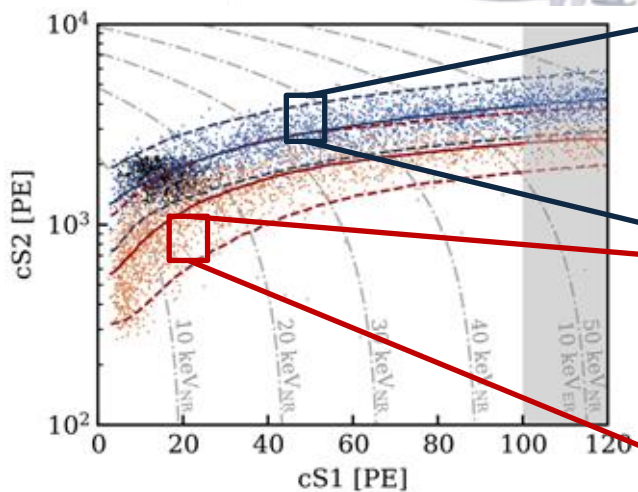
x-y由S2光斑分布给出，z由S1-S2漂移时间给出，从而选取最干净的中心有效体积。

能量重建

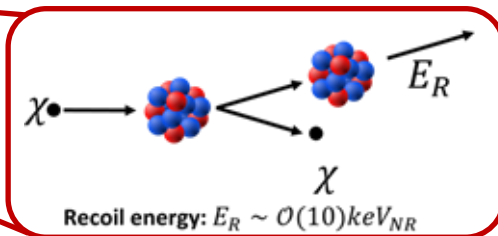
由S1与S2联合重建沉积能量： $E \propto S1/g_1 + S2/g_2$ 。

粒子鉴别

由S2/S1区分电子反冲ER与核反冲NR；中子、CEvNS与WIMP均产生NR。

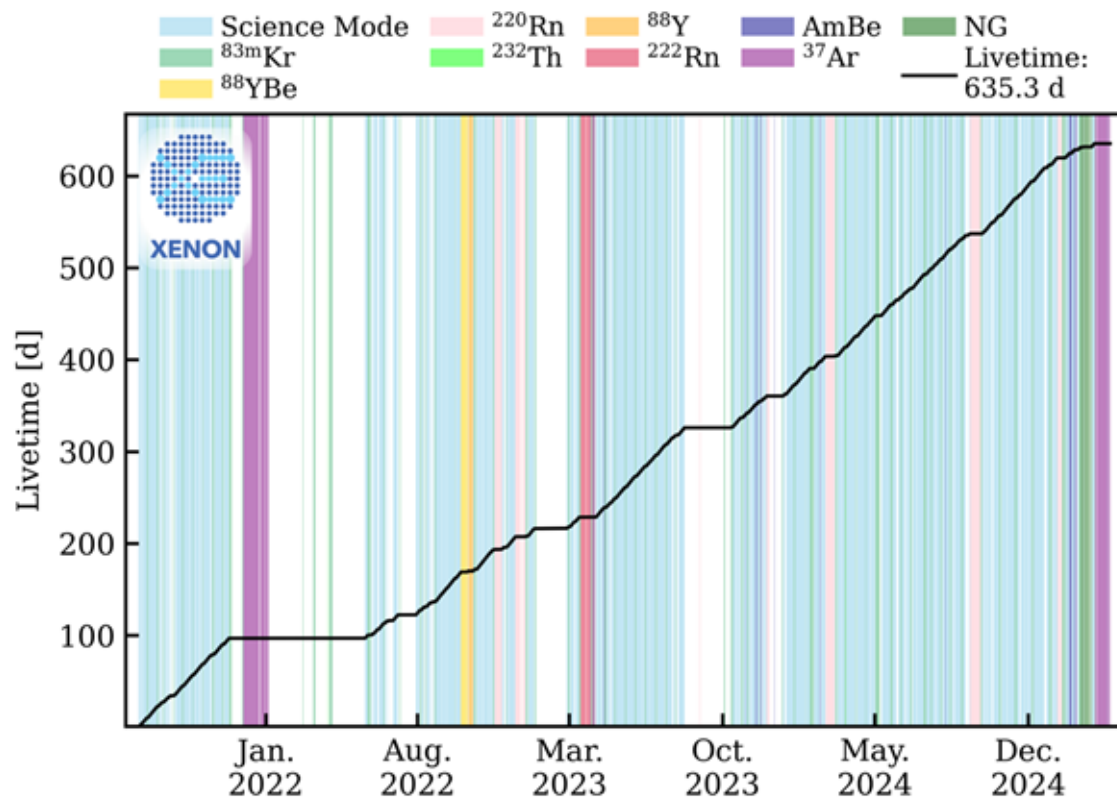


ELECTRONIC RECOIL

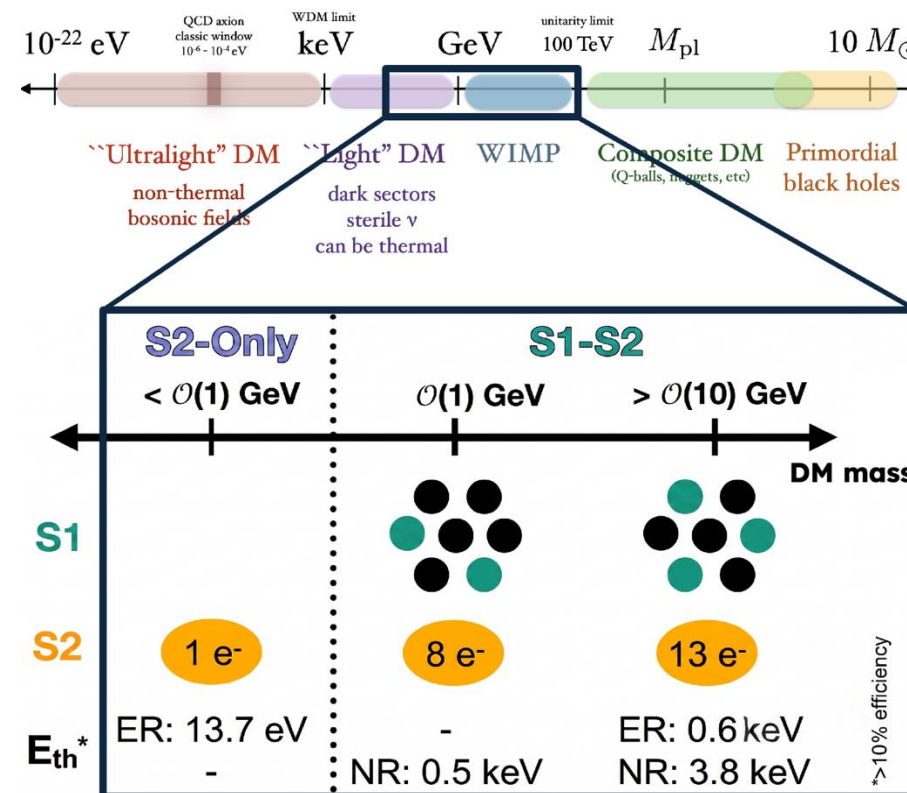


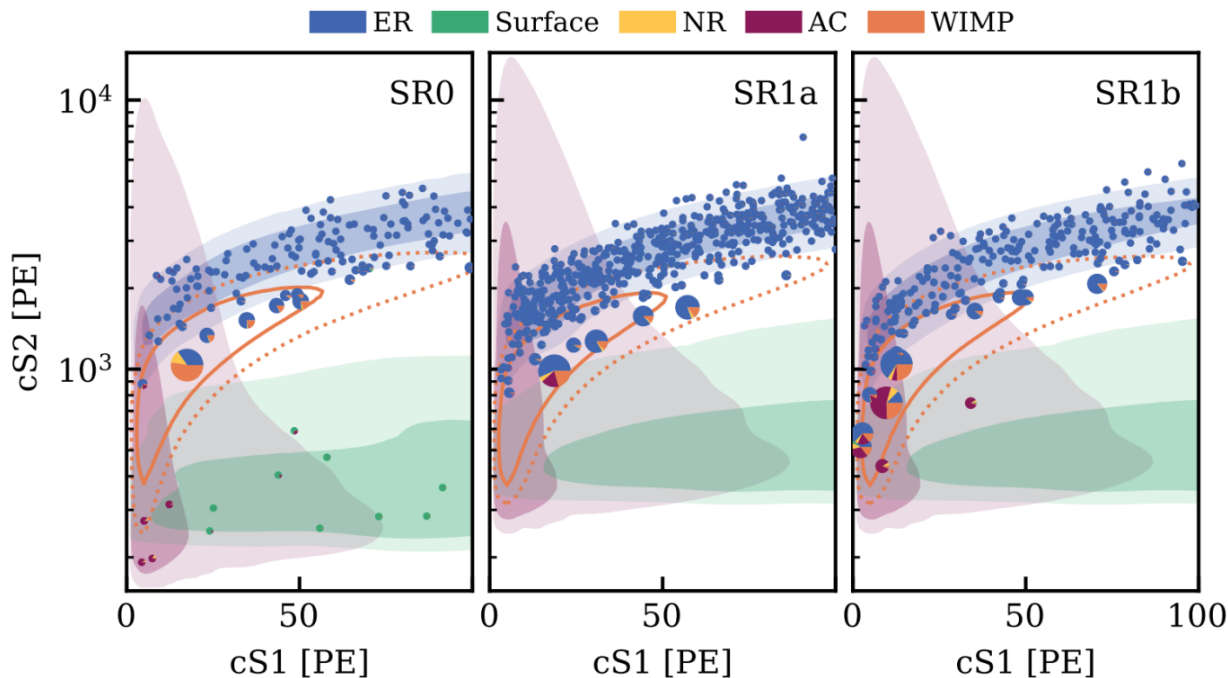
NUCLEAR RECOIL

- 累计取数超过600天，有效质量约4吨
- 氡本底进一步降低；SR2掺钎后中子标记效率约76%
- 统一信号重建，采用盲分析与似然推断



- “三重符合S1” –S2: 标准WIMP ($>10 \text{ GeV}/c^2$)
- “二重符合S1” –S2: 轻暗物质与 ^8B CEvNS
- “S2-only”: 将质量灵敏区间拓展至亚GeV

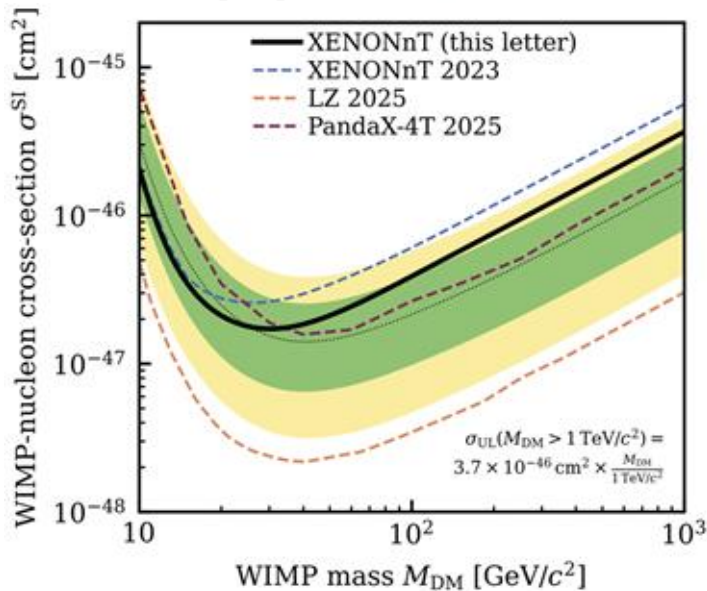




WIMPs搜寻结果

- SR0+SR1合计3.1吨·年曝光量；
- 数据与本底预期一致，未见显著超出
- $\sigma_{SI} \leq 1.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$
@ 30 GeV/c² (90% CL) ；
- 继续向更低质量推进，即将进入太阳中微子雾；

	SR0		SR1a		SR1b	
	Nominal	Best fit	Nominal	Best fit	Nominal	Best fit
ER (flat)	134	136 ± 12	430 ± 30	450 ± 20	151 ± 11	154 ± 10
ER (³ H-like)	-	-	62	40 ± 30	101	80 ⁺¹⁸ ₋₁₇
ER (³⁷ Ar)	-	-	58 ± 6	55 ± 5	-	-
Neutron	0.7 ± 0.3	0.6 ± 0.3	0.47 ± 0.19	0.45 ± 0.19	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.3
CEνNS (solar)	0.16 ± 0.05	0.16 ± 0.05	0.010 ± 0.003	0.010 ± 0.003	0.019 ± 0.006	0.019 ± 0.006
CEνNS (atm.+DSNB)	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.024 ± 0.012	0.024 ± 0.012	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.02
AC	4.3 ± 0.9	4.4 ^{+0.9} _{-0.8}	2.12 ± 0.18	2.10 ± 0.18	3.8 ± 0.3	3.8 ± 0.3
Surface	13 ± 3	11 ± 2	0.43 ± 0.05	0.42 ± 0.05	0.77 ± 0.09	0.76 ± 0.09
Total background	152	152 ± 12	553	550 ± 20	257	239 ± 15
WIMP (200 GeV/c ²)	-	1.8	-	1.1	-	2.1
Observed	152		560		245	

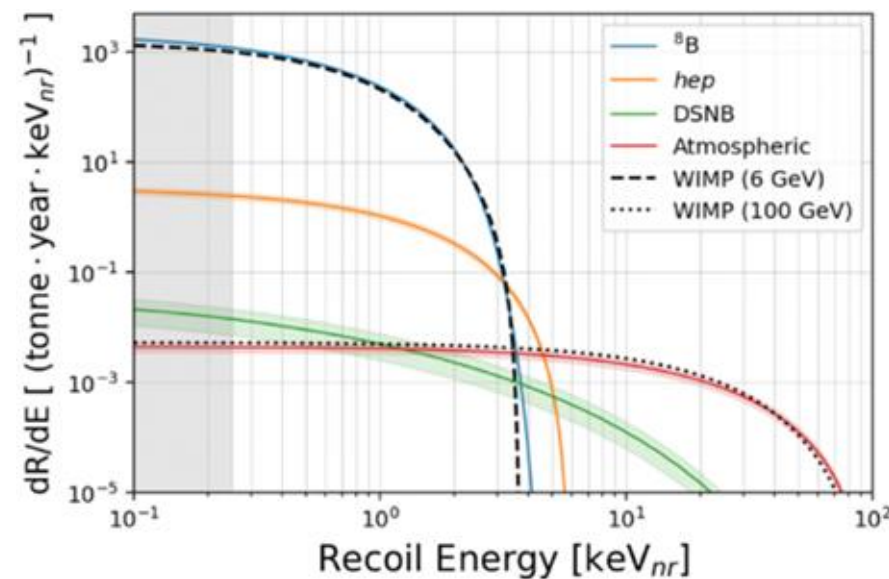
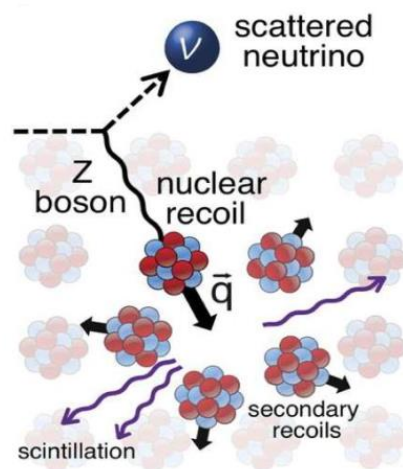


中微子雾：从探测瓶颈到可测信号



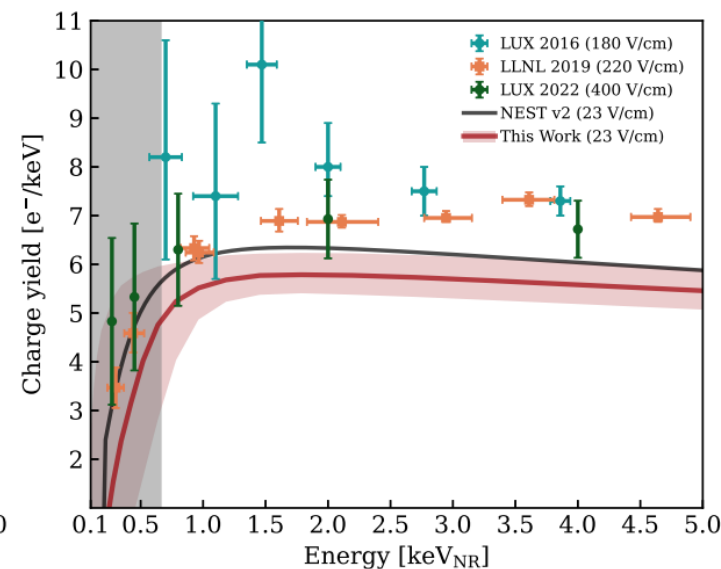
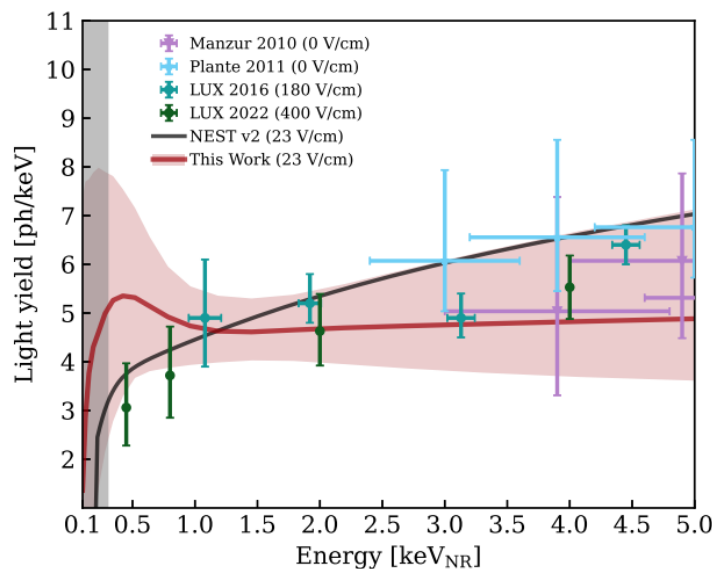
中微子雾从何而来

- 太阳 ^8B CEvNS的核反冲能谱与约 **$5.5 \text{ GeV}/c^2$ WIMP**几乎一致；
- 约90%的可探测反冲落在0.75–2.25 keV_{NR}，信号能量低、特征相近。



^{88}YBe 刻度：降低低能区的系统误差

- 该能区光产额Ly与电荷产额Qy是系统误差主导；
- 约183小时专门刻度，将光电产额标定推进到0.3–5 keV_{NR} 区间；
- 更新NESTv2 NR 光电产额曲线；



太阳⁸B中微子CEνNS信号测量



低阈值与偶然符合本底

- SR0+1+2合计6.77吨·年；S1阈值放宽至2–3个PMT符合
- 偶然符合本底由约400事例/天下降至全数据集 40.2 ± 1.4 个

观测结果

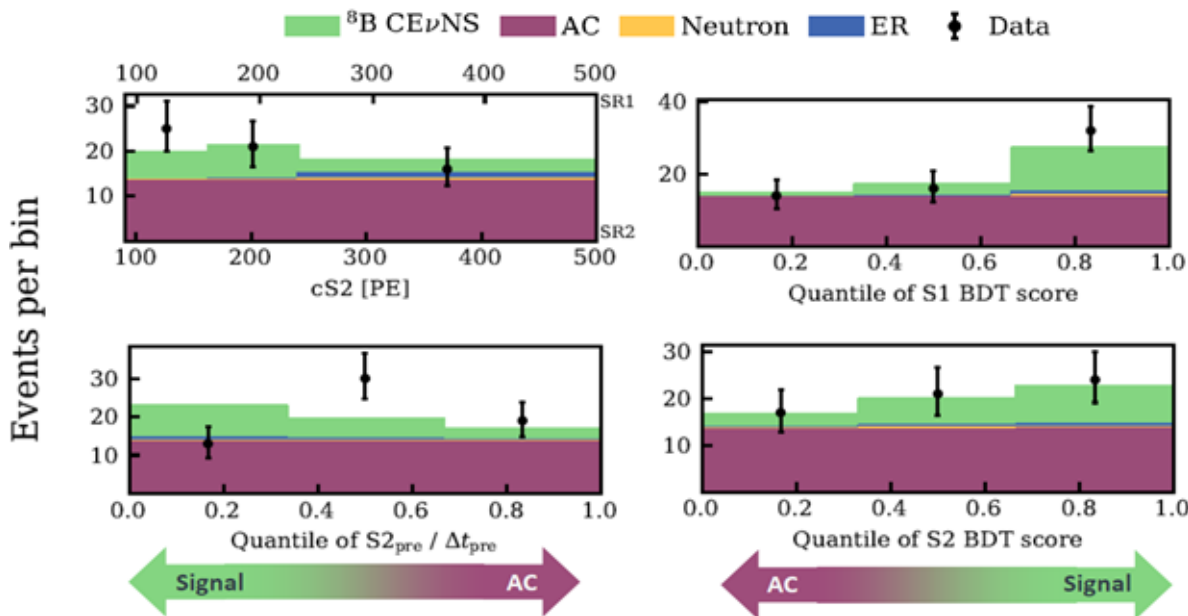
- 观测62个事例，本底预期42.1，⁸B最佳拟合 17 ± 5
- 相对纯本底假设达到 3.3σ ，中微子雾成为可测信号

太阳中微子与低动量转移弱相互作用

- $\Phi(^8\text{B}) = (5^{+3}_{-2}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，与SNO实验结果一致
- 同一数据还可检验低动量转移下的弱相互作用及超出标准模型情形

详细内容见17日刘可欣博士的XENON B8报告：

Probing the Solar ⁸B Neutrino Fog with XENONnT



RESULTS

Component	Expectation	Best-fit
Total background	$42.1^{+1.9}_{-1.7}$	42.4 ± 1.9
Total ⁸ B	16^{+5}_{-4}	17 ± 5
Total observed	9 (SR0) + 28 (SR1) + 25 (SR2) = 62	

太阳 ^8B 中微子CEvNS信号测量



低阈值与偶然符合本底

- SR0+1+2合计6.77吨·年；S1阈值放宽至2–3个PMT符合
- 偶然符合本底由约400事例/天压至全数据集 40.2 ± 1.4

观测结果

- 观测62个事例，本底预期42.1， ^8B 最佳拟合 17 ± 5
- 相对纯本底假设达到 3.3σ ，中微子雾成为可测信号

太阳中微子与低动量转移弱相互作用

- $\Phi(^8\text{B}) = (5^{+3}_{-2}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，与SNO实验结果一致
- 同一数据还可检验低动量转移下的弱相互作用及超出标准模型限制

详细内容见17日刘可欣博士的XENON B8报告：

[Probing the Solar \$^8\text{B}\$ Neutrino Fog with XENONnT](#)



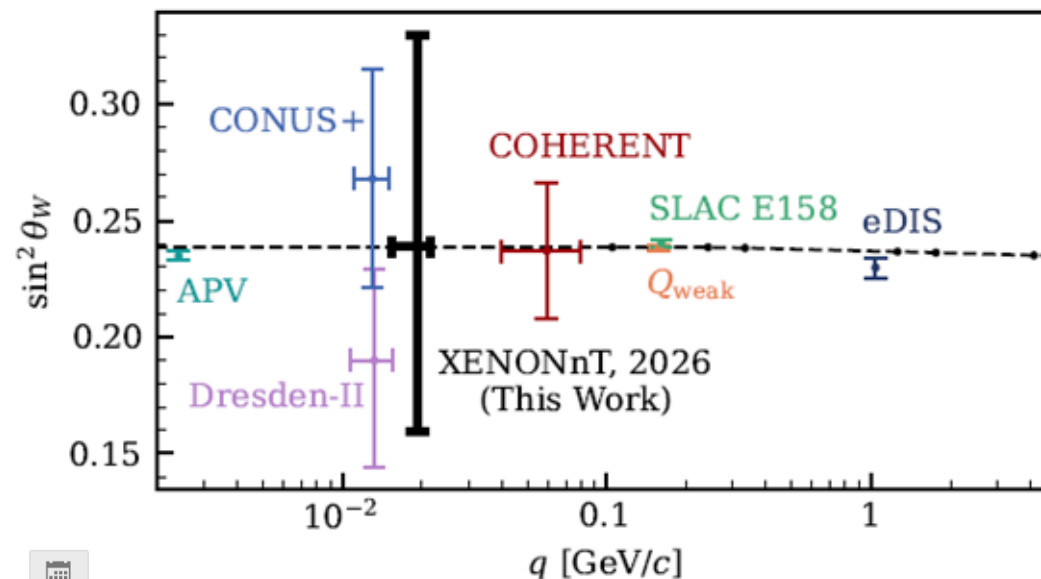
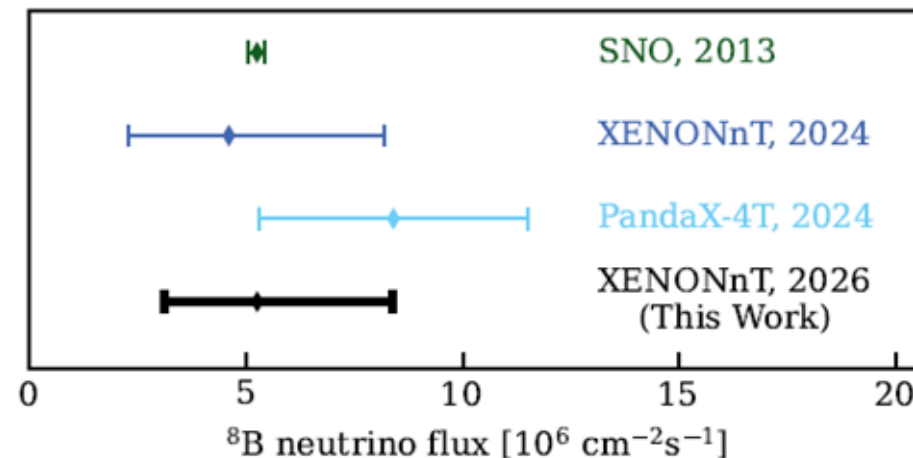
2026年7月17日 上午10:47

8m

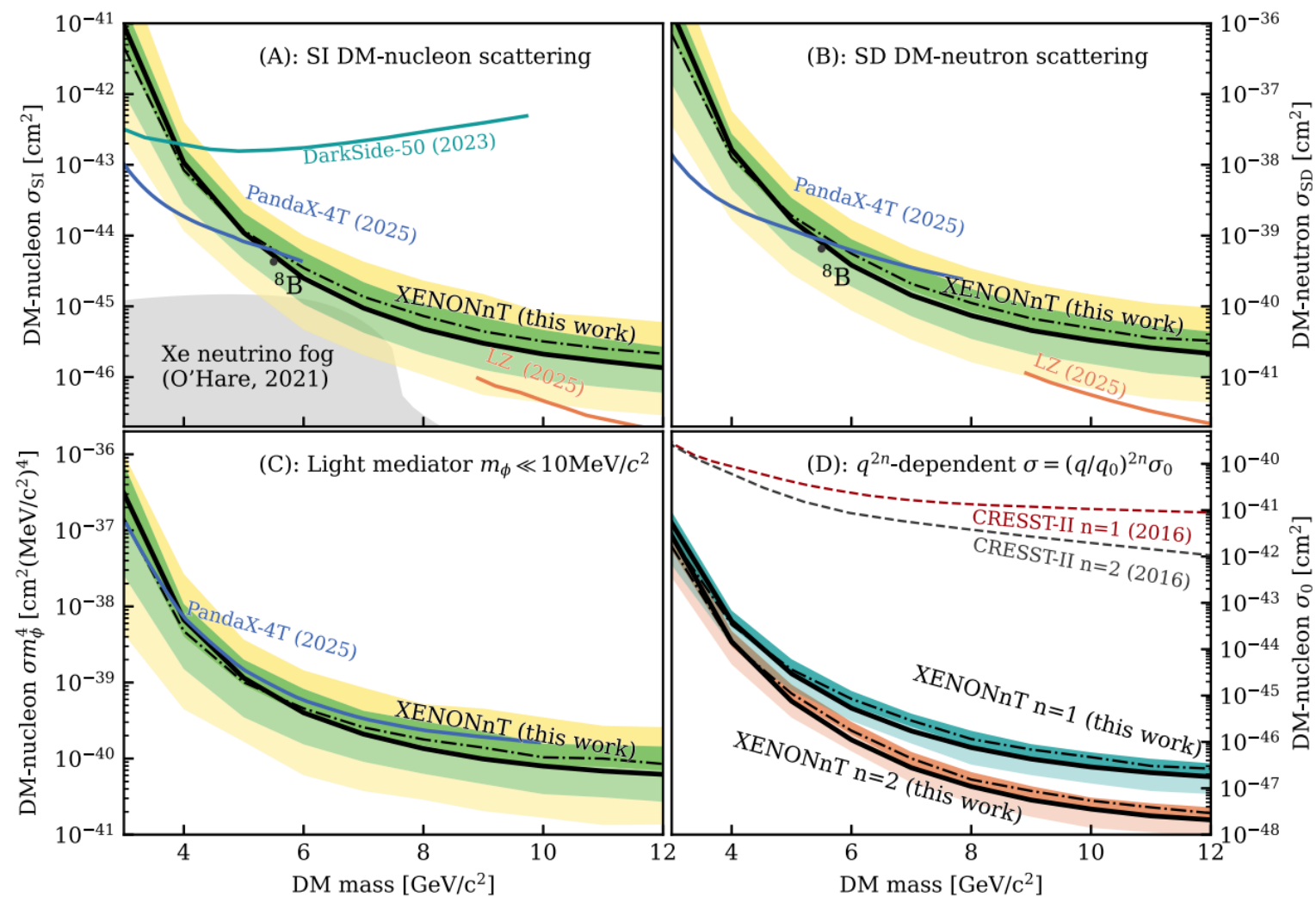
江门厅 (2号楼三楼)

分会快速报告

分会4：中微子物理、...



在中微子雾中搜寻轻暗物质



将 ^8B CEvNS作为本底

- 基于同一低阈值数据，在3–12 GeV/c²搜寻轻WIMP
- 未见显著超出；在4–7 GeV/c²给出有竞争力的自旋无关截面上限

中微子雾中继续搜寻暗物质

- 曝光量增加93%
- 5 GeV/c²处中位灵敏度仅提高约10%
- 仅靠增加曝光在该质量区间效率下降，但更高质量区间仍然有探测潜力

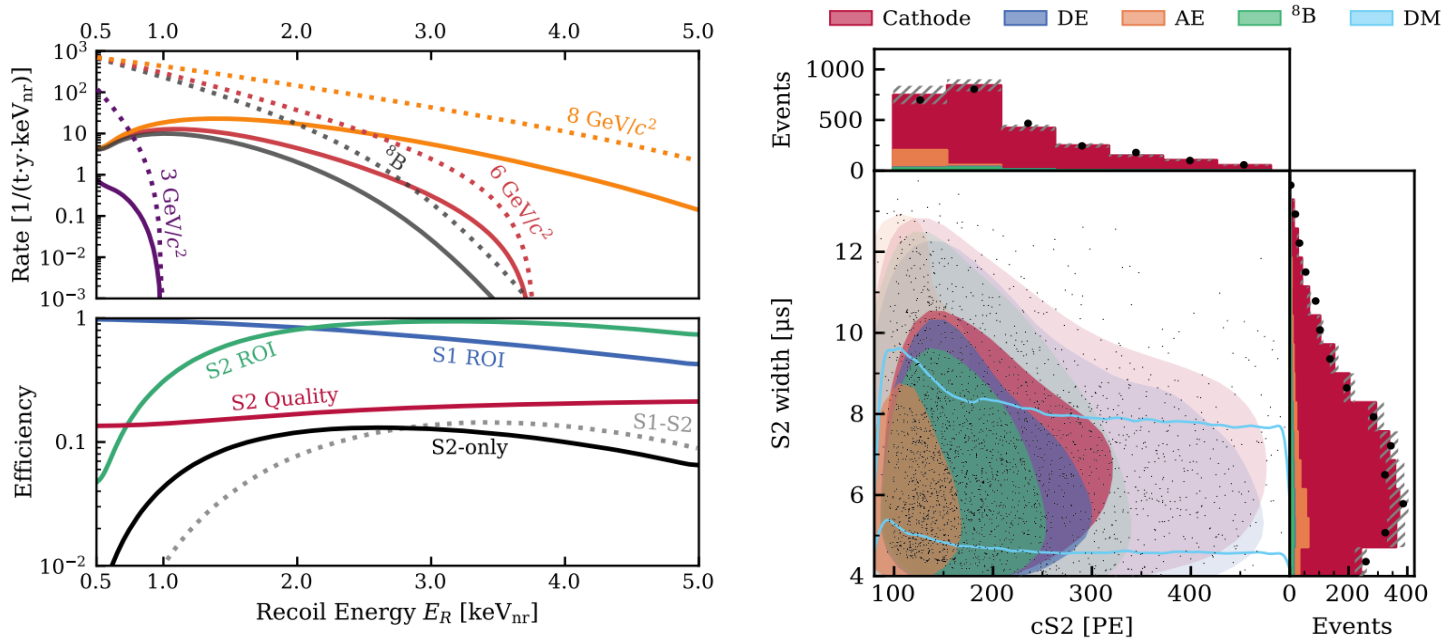


观测数据与分析

- 仅使用电离信号S2，阈值约3–16个电子
- 能区可低至0.04 keV_{er}
- SR0+1+2总曝光7.83吨·年
- 首次在完整本底模型下开展S2-only盲分析

揭盲结果与物理意义

- 阴极本底与延迟电子本底由数据驱动方法约束
- 观测与本底预期一致，未见显著超出
- 显著改进约5 GeV WIMP、轴子样粒子、暗光子及暗物质–电子散射约束
- 将液氙TPC灵敏区间拓展至亚GeV



Science run (exposure)	SR0 (1.50 t · y)		SR1 (2.44 t · y)		SR2 (3.89 t · y)	
Component	Expectation	Best fit	Expectation	Best fit	Expectation	Best fit
Cathode	480 ± 70	477 ⁺²⁵ ₋₂₄	660 ± 70	726 ⁺²⁸ ₋₂₇	1210 ± 90	1080 ± 30
Delayed electron	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.5	0.34 ± 0.07	0.34 ± 0.07	17.2 ± 2.3	17.1 ± 2.3
Accidental electron	97 ± 17	89 ± 13	108 ± 8	106 ± 8	—	—
⁸ B CEνNS	21 ± 5	18 ⁺⁵ ₋₄	29 ± 7	26 ⁺⁷ ₋₆	32.3 ± 8	29 ⁺⁸ ₋₆
Total background	600 ± 80	586 ± 28	800 ± 80	858 ⁺³⁰ ₋₂₉	1260 ± 100	1130 ± 30
Observed	583		864		1107	

S2-only通道：打开亚GeV窗口

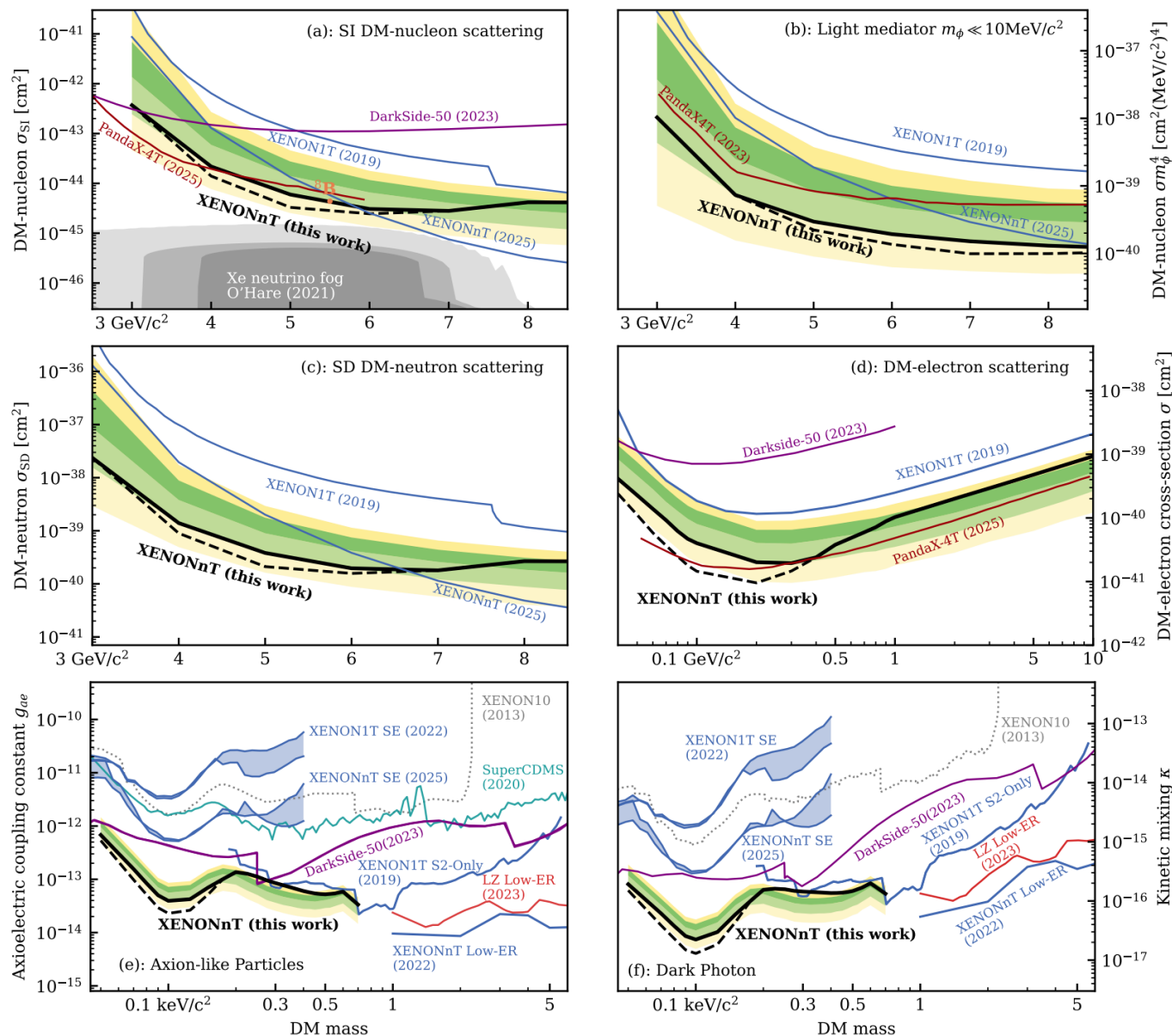


观测数据与分析

- 仅使用电离信号S2，阈值约3–16个电子
- 能区可低至0.04 keV_{ee}
- SR0+1+2总曝光7.83吨·年
- 首次在完整本底模型下开展S2-only盲分析

揭盲结果与物理意义

- 阴极本底与延迟电子本底由数据驱动方法约束
- 观测与本底预期一致，未见显著超出
- 显著改进约5 GeV WIMP、轴子样粒子、暗光子及暗物质-电子散射约束
- 将液氙TPC灵敏区间拓展至亚GeV





标准WIMP搜寻

- 3.1吨·年盲分析，未见显著超出
- $\sigma_{SI} \leq 1.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2 @ 30 \text{ GeV}/c^2$
- SR0 + 1 + 2结果即将发布

太阳⁸B CEvNS测量

- 太阳⁸B CEvNS达到 3.3σ 统计显著度
- 同一数据贯通太阳中微子、轻WIMP与低能弱相互作用

轻质量暗物质的探索

- 曝光量+93%，5 GeV灵敏度仅+10%：中微子雾使增益放缓；
- S2-only通道将灵敏区间拓展至亚GeV；

未来展望

- XENONnT SR3调试中：
 - 更高漂移电场，更好的粒子鉴别能力
- XLZD：面向暗物质与中微子天体物理的多物理平台



致谢



Thank you!
谢谢!

On behalf of the XENONnT Collaboration