

课题一： PandaX 500公斤级液氙探测器的运行和优化

周宁

上海交通大学

重点专项中期检查会 2018.7.28

课题一目标任务

- 2016-至今：总体平稳采集暗物质物理数据
- 探测灵敏度已达到 $8.6 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$

课题目标、成果与考核指标表

课题目标 ¹	成果名称	成果类型	考核指标 ²				考核方式 (方法)及 评价手段 ⁴
			指标名称	立项时已有 指标值/状态	中期指标 值/状态 ³	完成时指标 值/状态	
本课题的目标是依托 PandaX-II 500 公斤级液氙探测器,提高探测灵敏度,寻找高质量区的弱相互作用重粒子(WIMPs),争取率先发现这种可能的暗物质粒子。为下一步在锦屏地下实验室开展多吨级的液氙和液氙实验打基础,有机会把未来暗物质探测的灵敏度推进到“中微子本底”极限	PandaX-II 液氙探测器的运行和优化的结果	☑其他:新物理结果	暗物质物理数据的采集天数	19	300	700	发表同行评议论文或者在国际会议上的特邀报告上的汇报,同行对文章的引用
			暗物质的探测灵敏度	$3 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$	$5 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$	$1 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$	
科技报告考核指标	序号	报告类型 ⁵	数量	提交时间		公开类别及时限 ⁶	
	1	年度技术进展报告	3	课题执行期每年年底		公开	
	2	中期技术进展报告	1	2018年6月		公开	
	3	最终科技报告	1	2021年6月		公开	

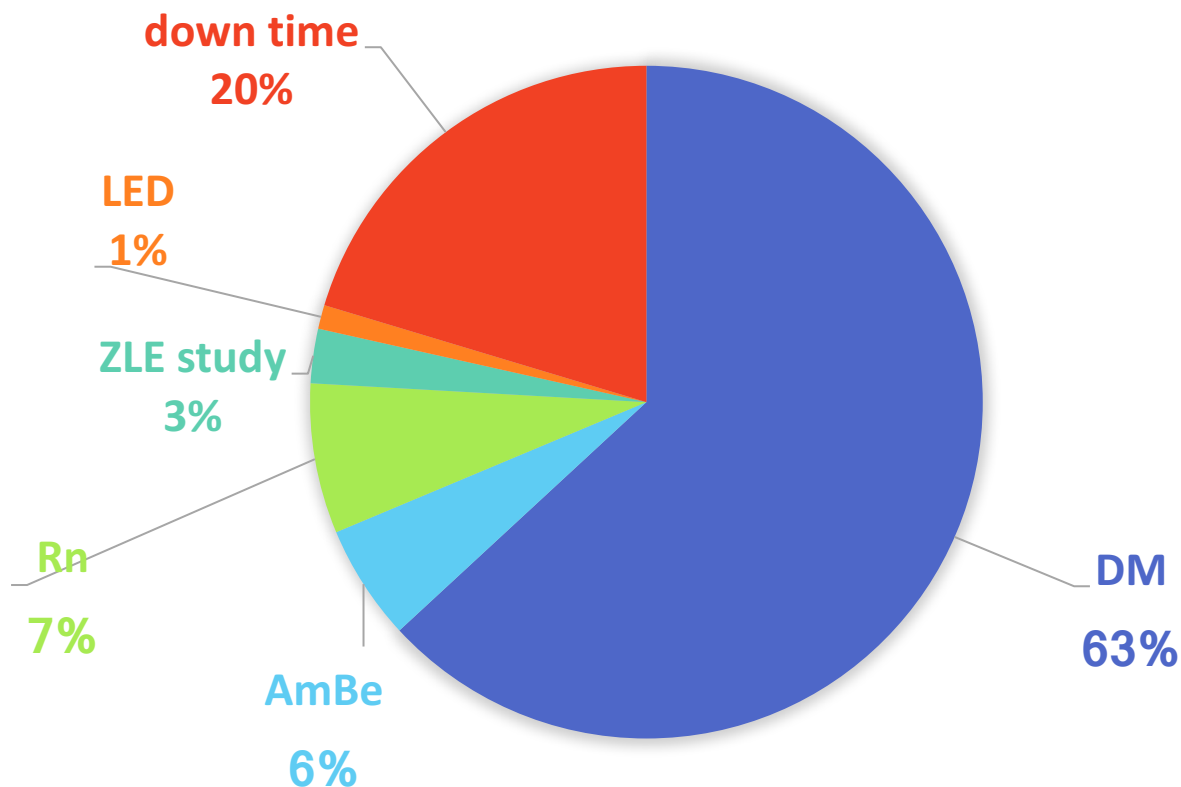
其他目标与考核指标(对于难以采取上述表格细化的课题目标及其考核指标,可在此细化填写,限1000字以内。)

汇报提纲

- 研究内容1: PandaX-II实验运行状况
 - 物理数据采集
 - 能量、位置刻度
 - 氙的提纯
- 研究内容2: PandaX实验数据分析及模拟研究
 - 自旋无关
 - 自旋相关
 - 轴子
 - 非弹性散射
 - 轻质量中间传播子
 - 模型无关有效场理论
 - 四吨级探测器灵敏度模拟
- 研究队伍、人才培养、合作交流

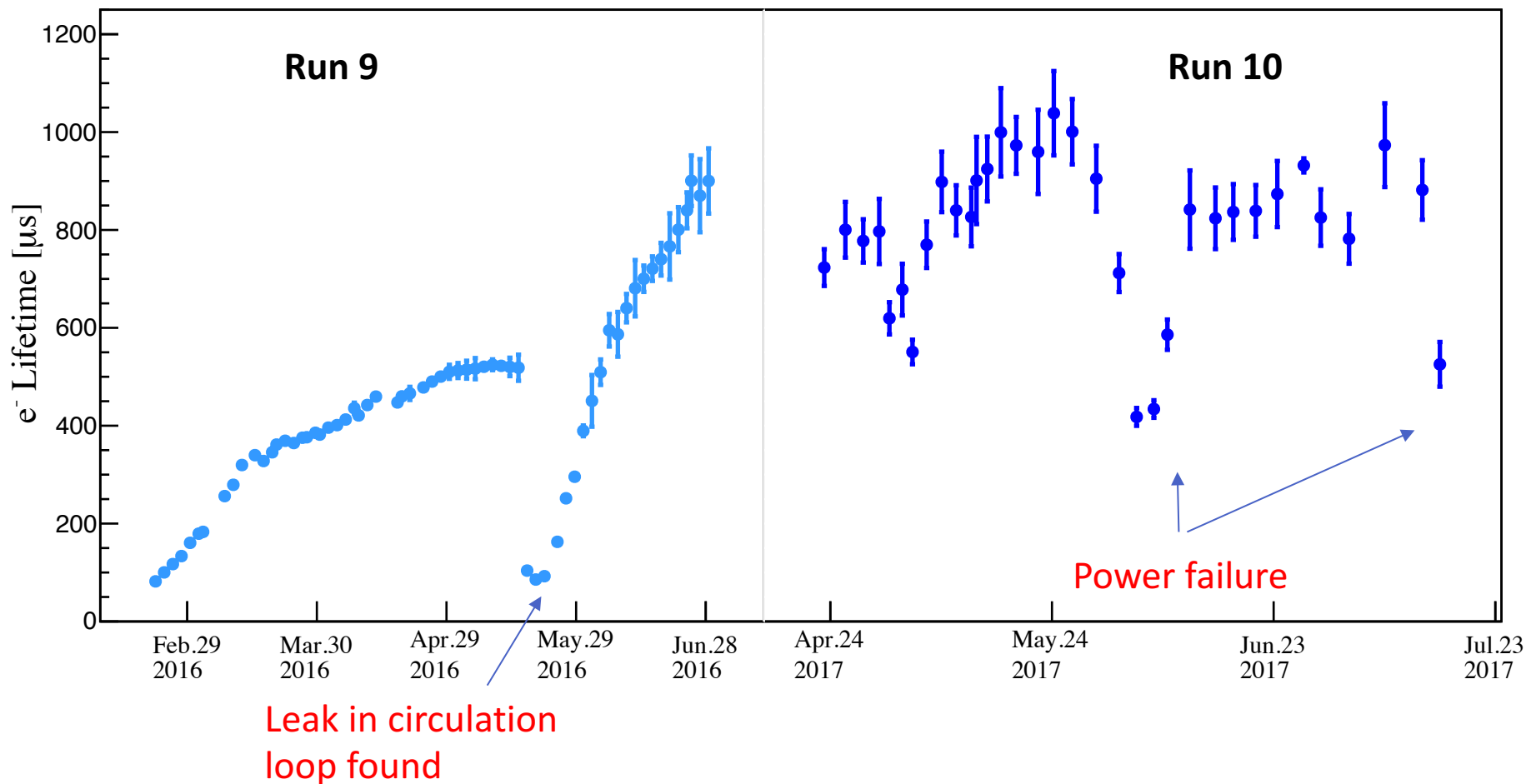
实验中期运行情况

- 2015年试运行：Run 8 = 6.8 吨天 曝光量
- 2016-2017年低本底运行：Run 9 + Run10 = 54 吨天 曝光量
- 2018年继续暗物质数据采集，增加约 85 吨天 曝光量



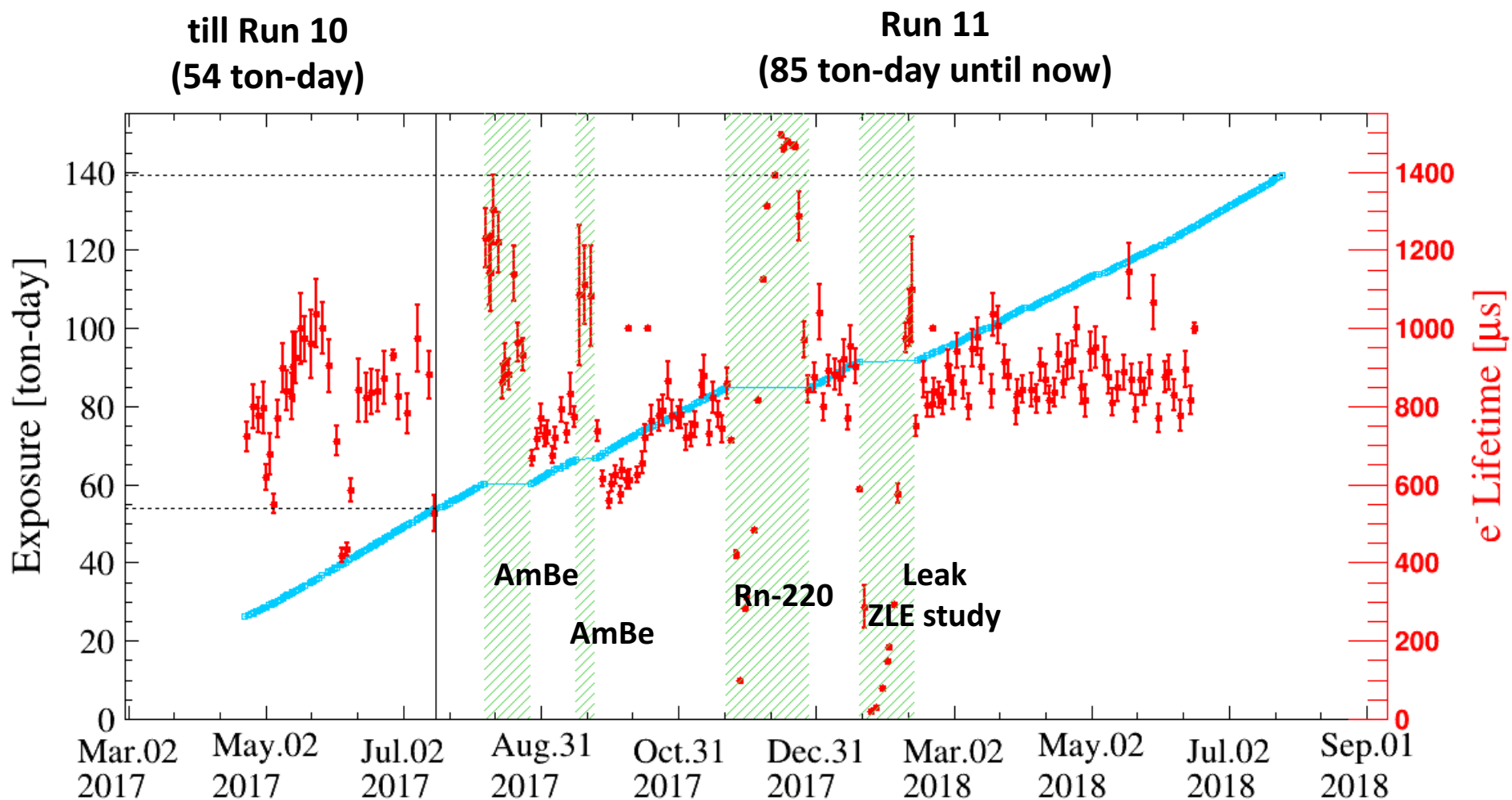
物理数据采集

- 从 Run9 到 Run10, 电子寿命大幅度提高, 平均为 $800 \mu\text{s}$ (对应 1.4 m 漂移长度), 达到稳定。



物理数据采集

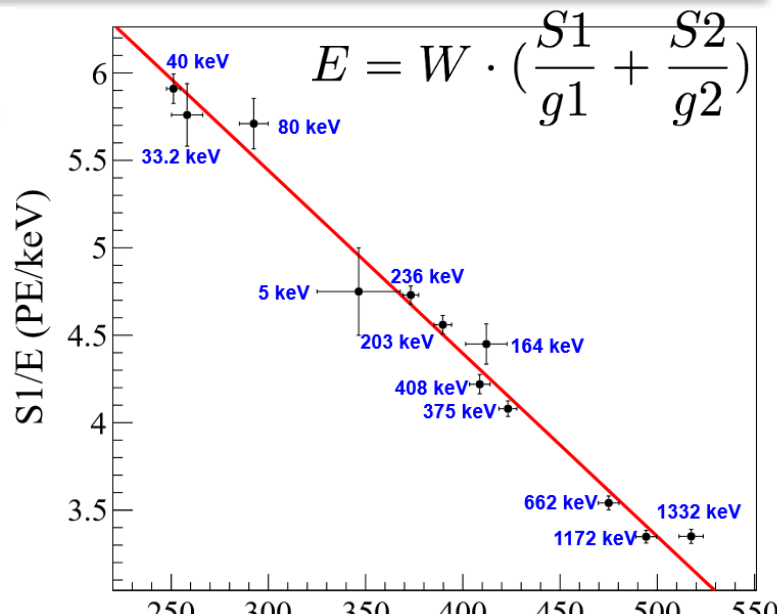
- Run11 平稳取数，获得 85 吨天的曝光量。



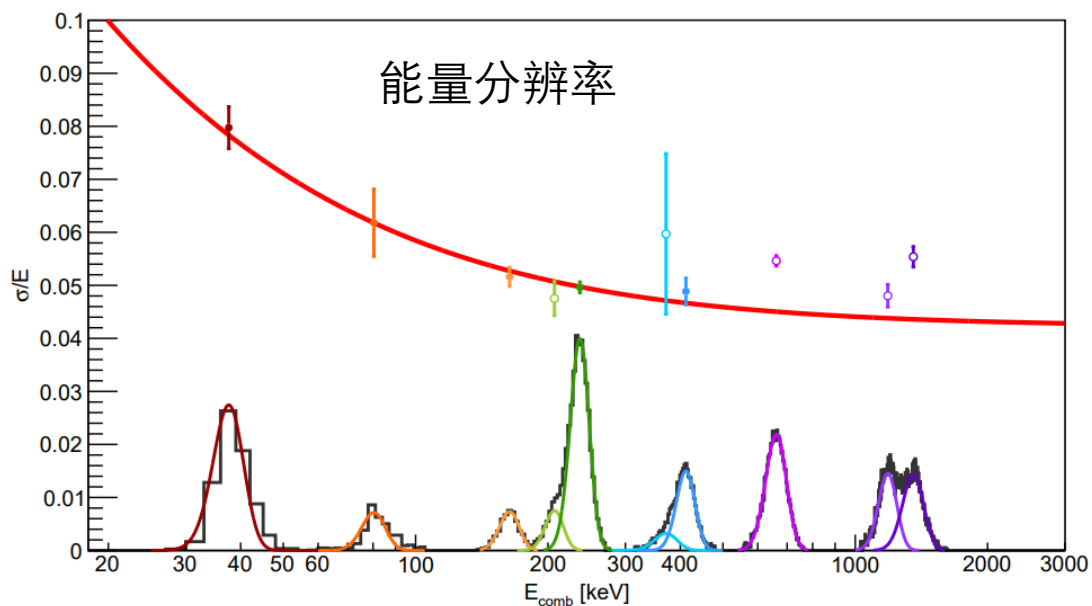
探测器响应稳定

$$E_{ee} = W \times \left(\frac{S1}{\text{PDE}} + \frac{S2}{\text{EEE} \times \text{SEG}} \right)$$

- PDE: 光子探测效率 $\sim 12\%$
- EEE: 电子萃取效率 $\sim 50\%$
- SEG: 单电子效率 $\sim 25 \text{ PE/e}$



- 能量分辨率
 - 40keV 达到 $\sim 8\%$
 - 高能区 达到 $\sim 5\%$



运行改进

- 采用FPGA-based 触发方式，降低触发阈值

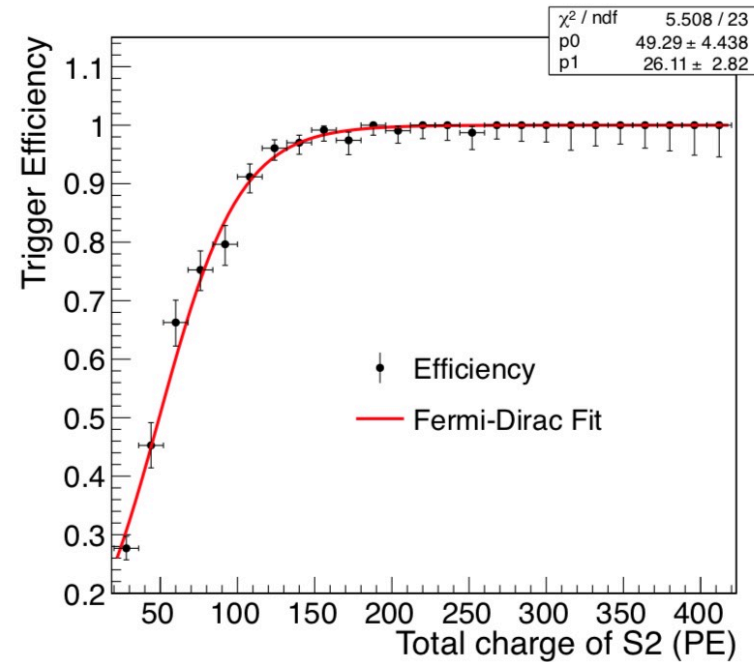
– S2 50% 79 PE -> 50 PE

*JINST 12 (2017)
no.08, T08004*

- 采用AmBe/氡化甲烷/ ^{220}Rn 刻度，改进探测器响应模型

- 两次精馏，本底不断下降

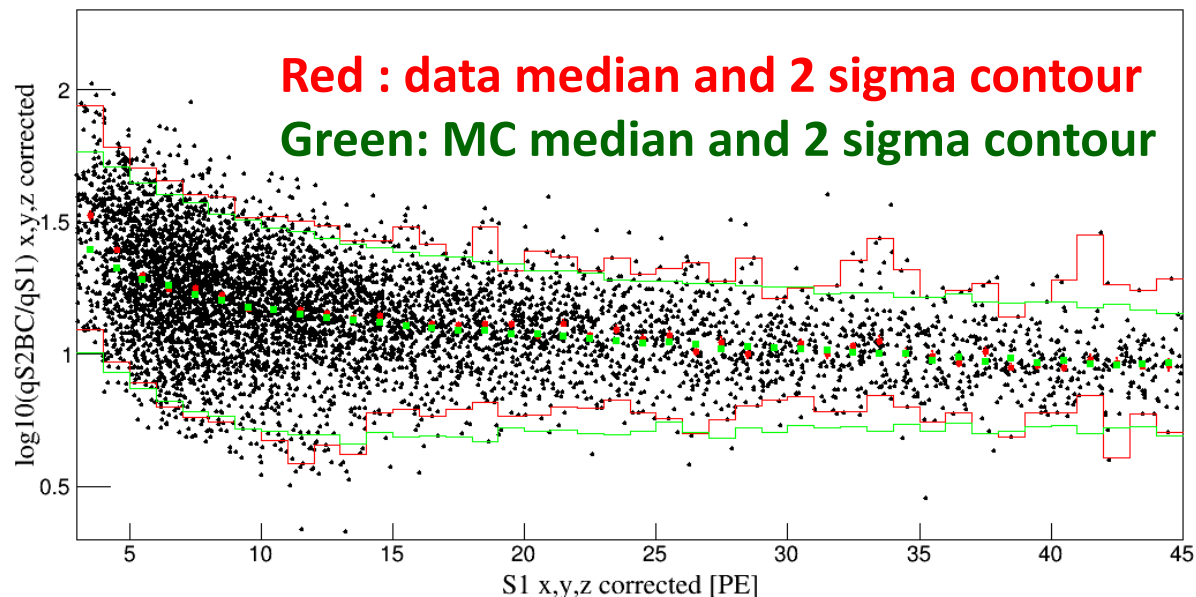
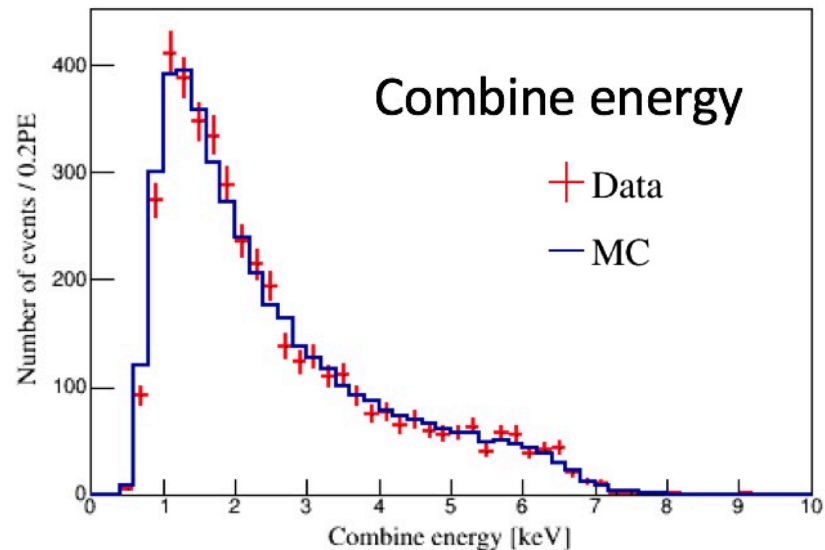
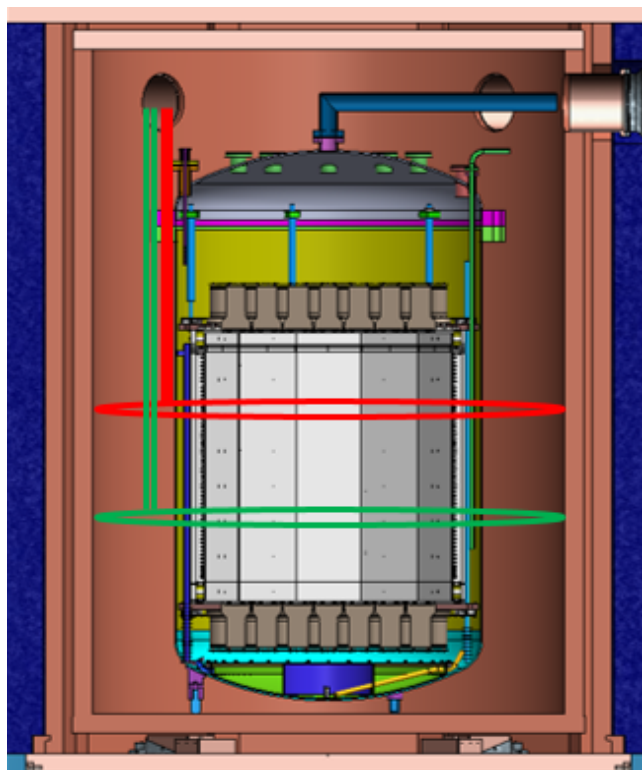
- 氦含量下降了 60 倍
- 总体下降了15倍



mDRU	Run 8	Run 9	Run 10
^{85}Kr	11.7	1.19	0.20
^{127}Xe	0	0.42	0.021
Tritium	0	0	0.27
^{222}Rn	0.06	0.13	0.12
^{220}Rn	0.02	0.01	0.02
Detector ER	0.20	0.20	0.20
Solar neutrino	0.01	0.01	0.01
^{136}Xe	0.0022	0.0022	0.0022
Total	12.0	1.96	0.79

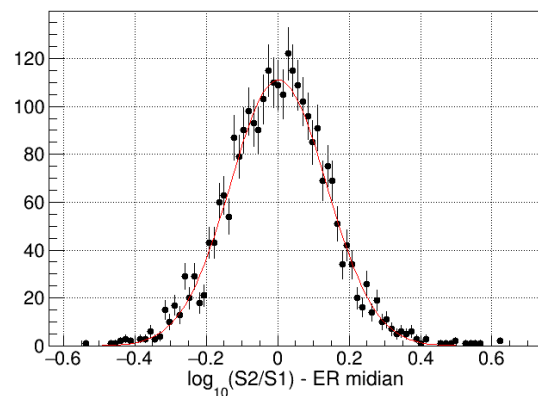
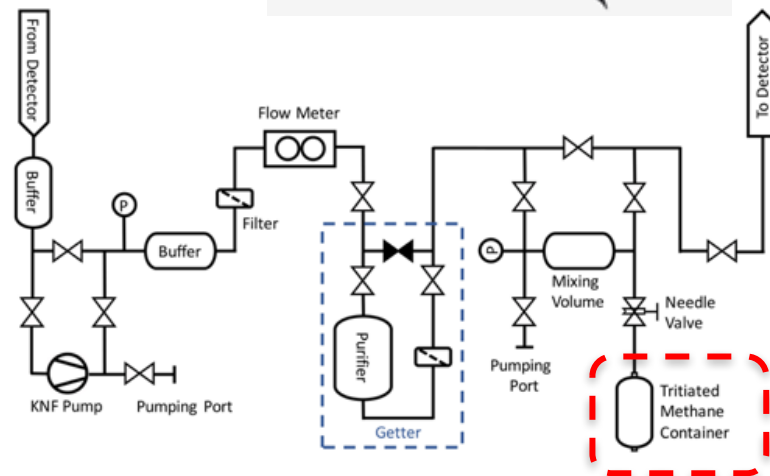
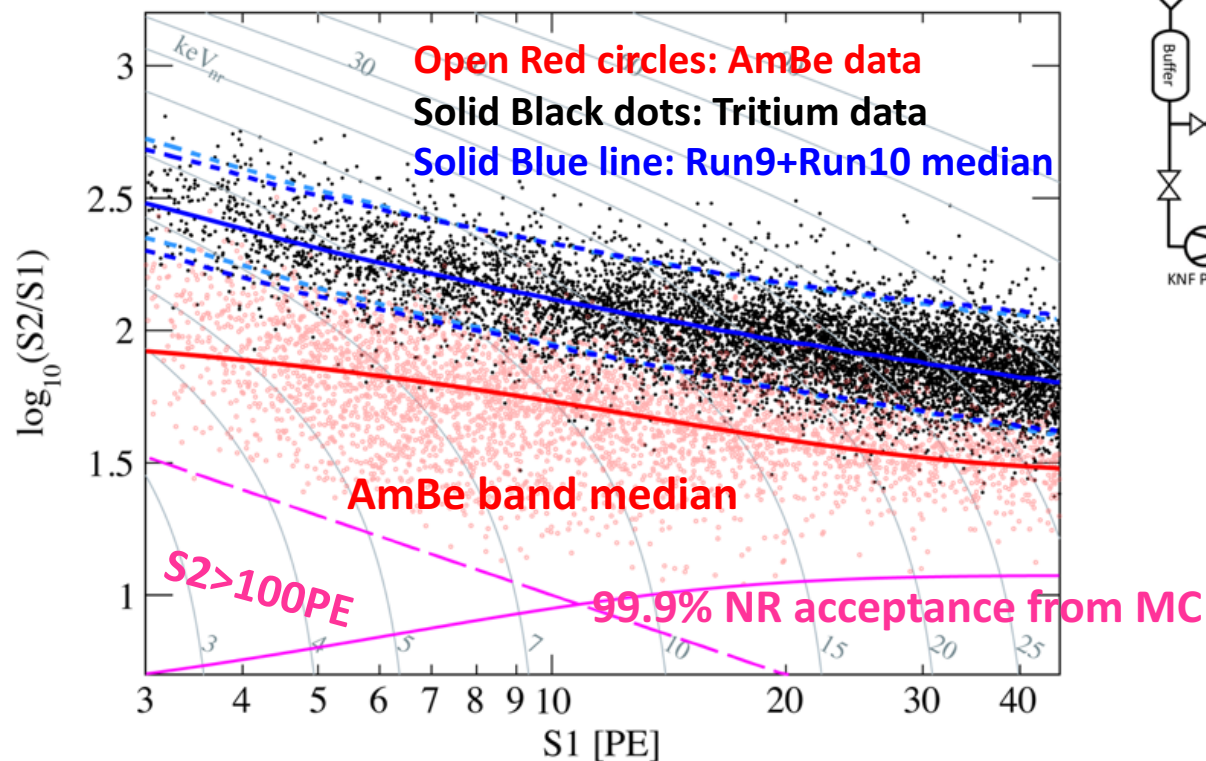
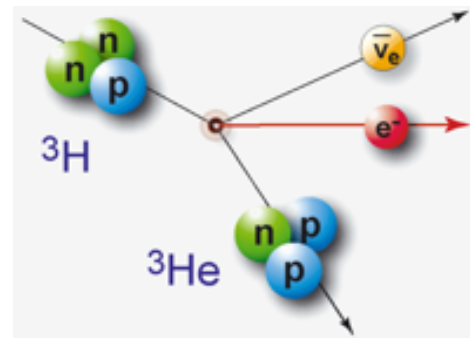
核反冲刻度： 镅-铍中子源

- 采用AmBe中子源进行核反冲刻度
- 取得约10000个低能量核反冲事例
- 模拟和数据符合



电子反冲刻度：氚化甲烷

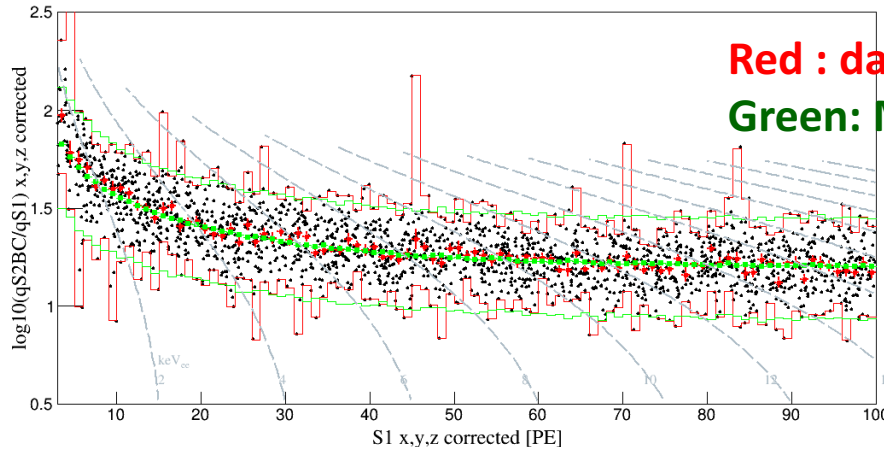
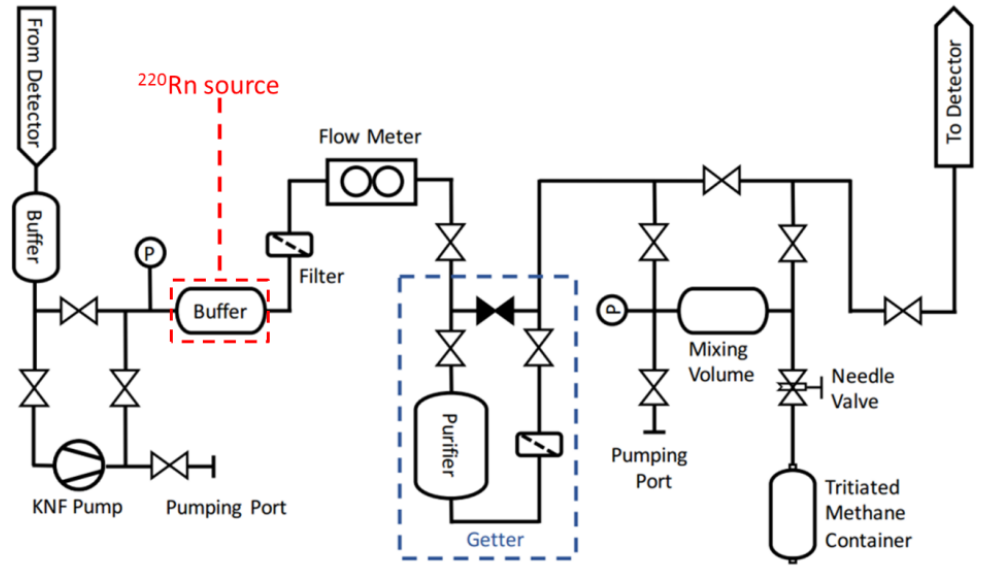
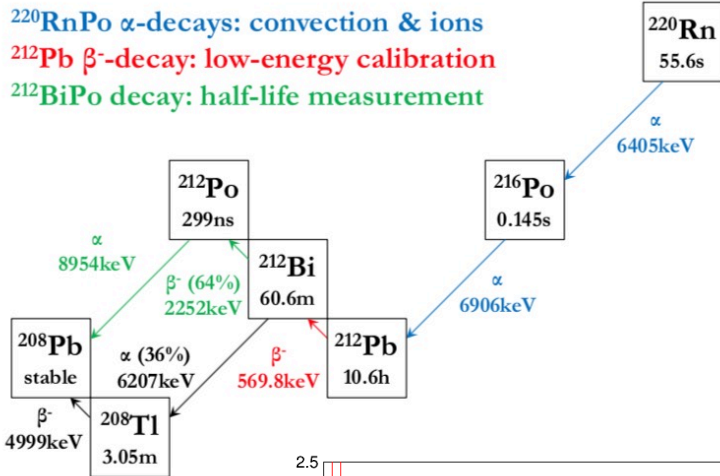
- 微量氚化甲烷的气体通过气体循环系统注入液氙
 - 解决了探测器中心事例率低的问题
- 收集到约8000 个低能量电子反冲事例
- 氚半衰期长，完全清除难度大



电子反冲刻度：氡²²⁰

- 2017年11月-12月，开展²²⁰Rn尝试进行注入式电子反冲刻度
- 取得约2000个低能电子反冲事例，初步达到要求
- 继续研究提高刻度效率

²²⁰RnPo α-decays: convection & ions
²¹²Pb β-decay: low-energy calibration
²¹²BiPo decay: half-life measurement



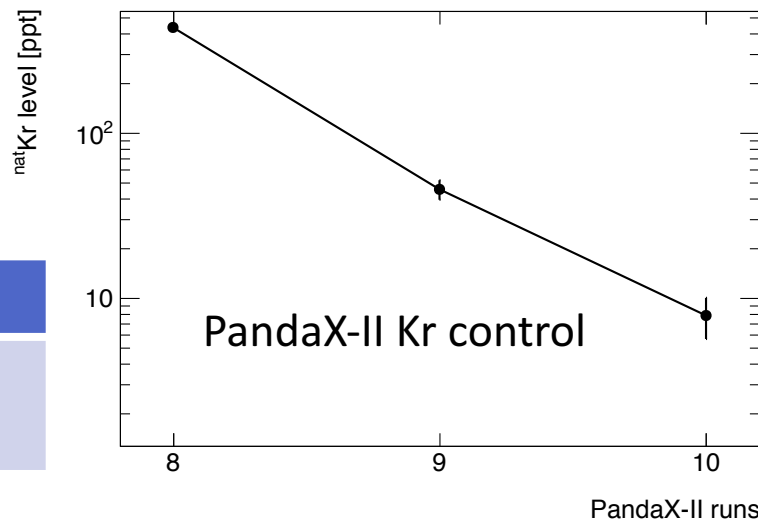
Red : data median and 2 sigma contour
 Green: MC median and 2 sigma contour

氙精馏和提纯

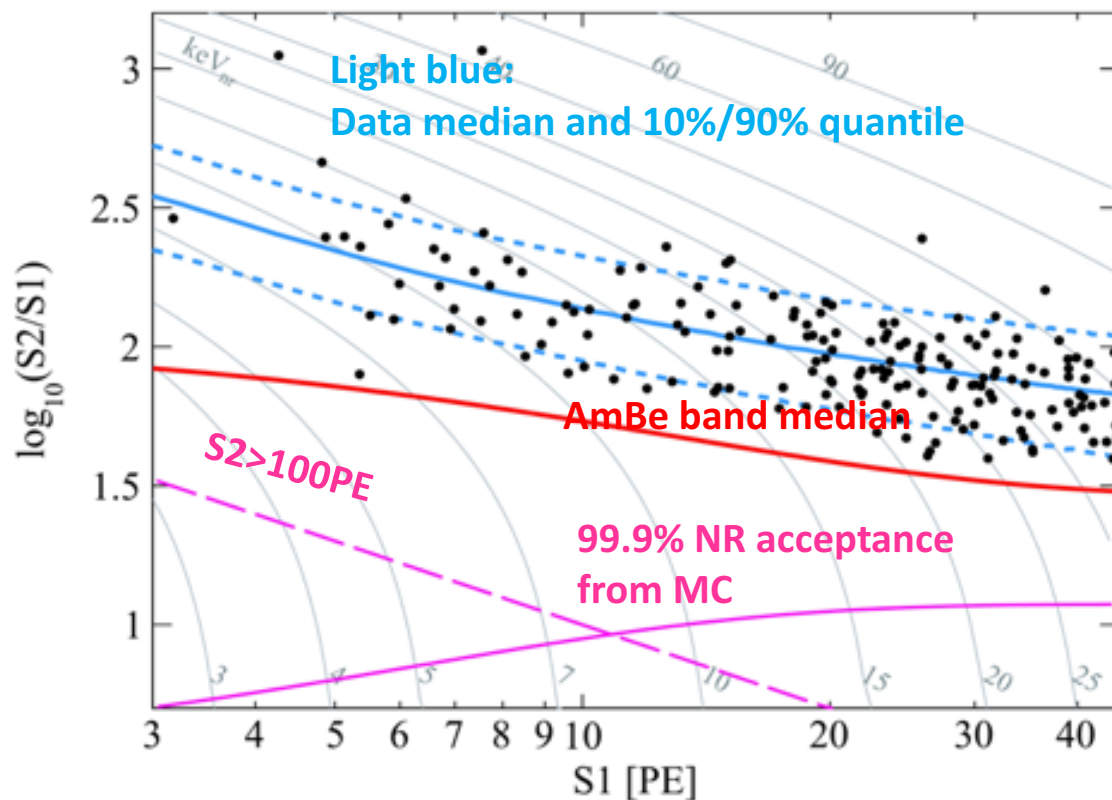
- 第一次精馏：2016年初
 - Run 8 发现氙中有大量的氦气漏入
 - 运回上海精馏
 - 途中引入宇生 ^{127}Xe
- 第二次精馏：2016年末
 - Run 9 之后的氟化甲烷刻度引入难以去除的氙
 - 在锦屏现场精馏



PandaX-II	Run 8	Run 9	Run 10
氦含量水平	437 ± 13 ppt	44.5 ± 6.2 ppt	6.6 ± 2.2 ppt



Run10 的数据分布



- 177个事例
- 在核反冲分布中线下方信号区
 - 预期本底: 1.8 ± 0.5
 - 观测事例: 0

	ER	Accidental	Neutron	Total Fitted	Total Observed
Run 9	376.1	13.5	0.85	390 ± 50	389
Below NR median	2.0	0.9	0.35	3.2 ± 0.9	1
Run 10	172.2	3.9	0.83	177 ± 33	177
Below NR median	0.9	0.6	0.33	1.8 ± 0.5	0

汇报提纲

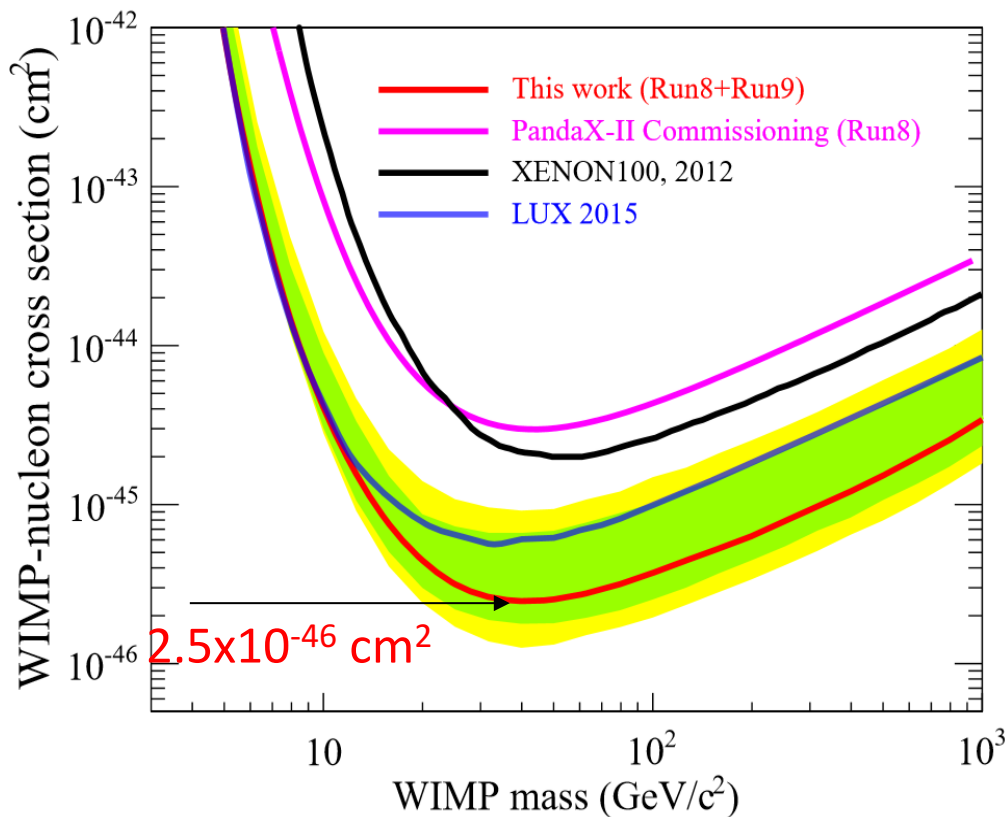
- 研究内容1: PandaX-II实验运行状况
 - 物理数据采集
 - 能量、位置刻度
 - 氙的提纯
- 研究内容2: PandaX实验数据分析及模拟研究
 - 自旋无关
 - 自旋相关
 - 轴子
 - 非弹性散射
 - 轻质量中间传播子
 - 模型无关有效场理论
 - 四吨级探测器灵敏度模拟
- 研究队伍、人才培养、合作交流

Highlights of PandaX-II Results

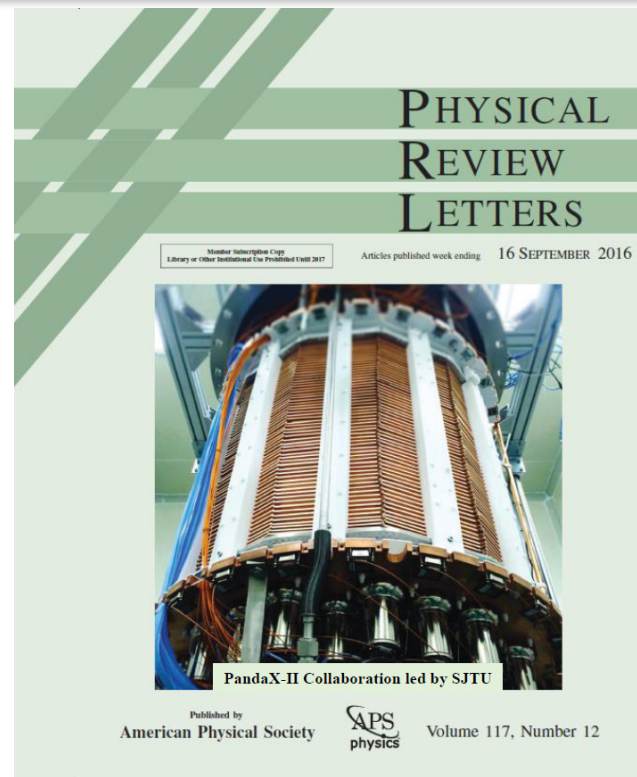
- 33 吨天: Run 8 + Run 9
 - spin independent search, [PRL 117, 21303 \(2016\)](#)
 - spin dependent search, [PRL 118, 071301 \(2017\)](#)
- 27 吨天: Run 9
 - inelastic scattering search, [PRD 96, 102007 \(2017\)](#)
 - axion and ALP search, [PRL 119, 181806 \(2017\)](#)
- 54 吨天: Run 9 + Run 10
 - spin independent search, [PRL 119, 181302 \(2017\)](#)
 - light mediator search, [PRL 121, 021304 \(2018\)](#)
 - general EFT and spin-dependent search, [arXiv:1807.01936](#)
- 四吨级暗物质探测模拟
 - PandaX-4T sensitivity study, [arXiv:1806.02229](#)

代表成果一：自旋无关的暗物质探测

- 2016年9月，33吨天 曝光量
- 在40 GeV暗物质质量处，最强限制达到 $2.5 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$



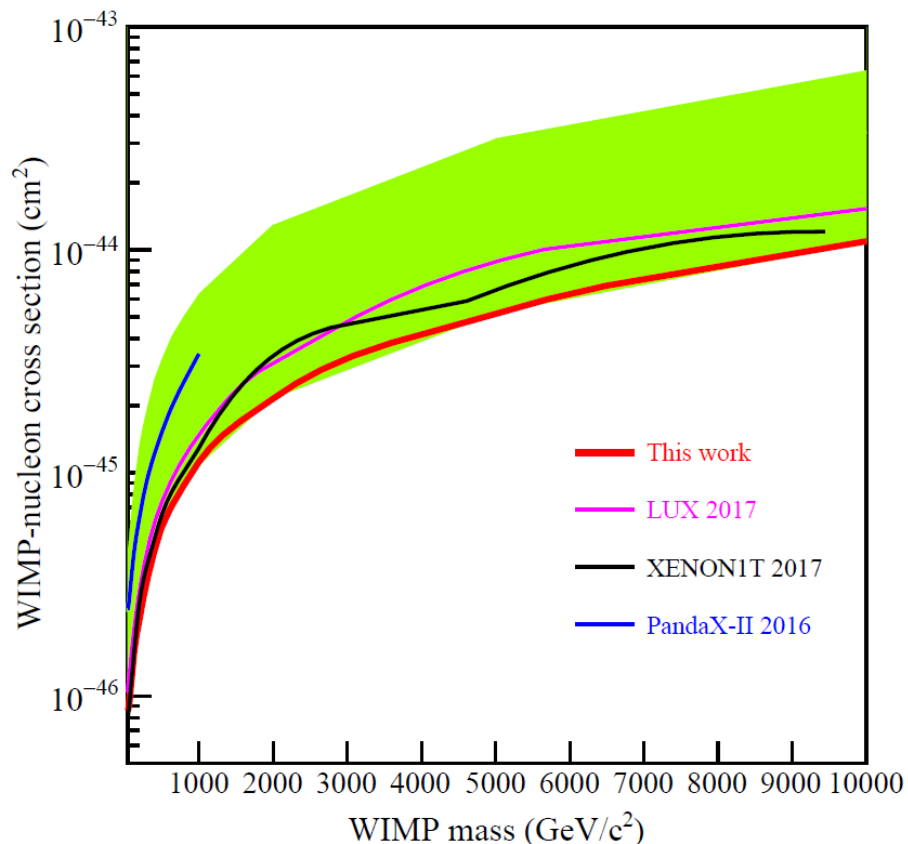
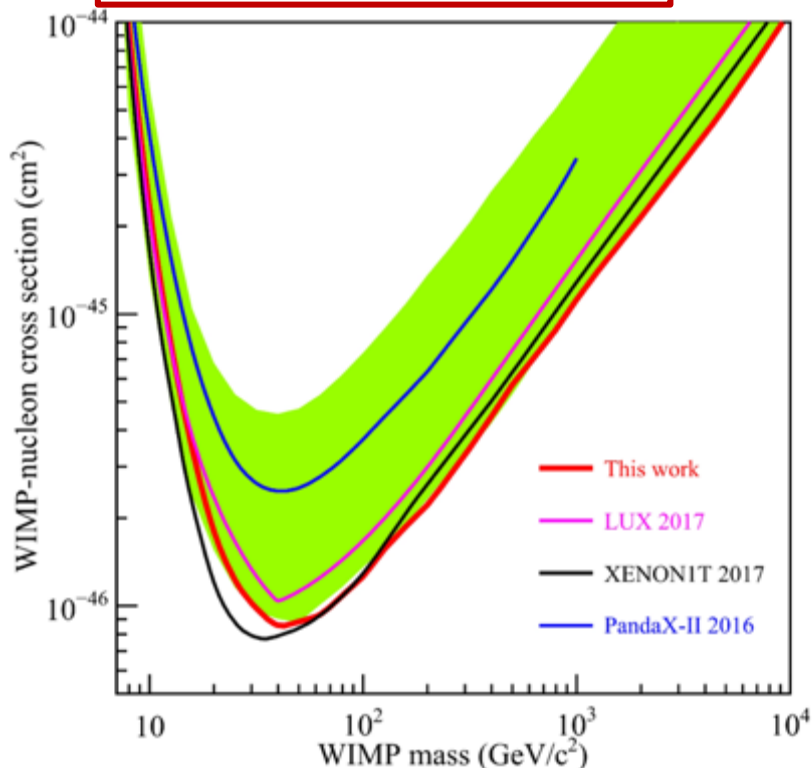
Phys. Rev. Lett. 117, 121303 (2016)



- PRL封面文章并“编辑推荐”
- INSPIRE引用383次

代表成果一：自旋无关的暗物质探测

PRL 119, 181302 (2017) 编辑推荐



- 2017年，54吨天曝光量结果发表，最强限制达到 $8.6 \times 10^{-47} \text{cm}^2$
- 实现PandaX一期灵敏度的120倍，仍未发现暗物质事例
- 2017最灵敏的探测结果，超越LUX和XENON1T最新成果
- **INSPIRE引用201次**

代表成果一：自旋无关的暗物质探测

- 国际影响力

Viewpoint: The Relentless Hunt for Dark Matter “对暗物质锲而不舍的追捕”

Dan Hooper, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA

October 30, 2017 • *Physics* 10, 119

The latest results from two dark matter searches have further ruled out many theoretically attractive dark matter particle candidates.

Two independent experimental collaborations—XENON [1] and PandaX-II [2]—have recently taken the next steps in this relentless march of progress ... At higher masses, the limits presented by PandaX-II are slightly more stringent than those from XENON1T



First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment
E. Aprile et al. (XENON Collaboration)
Phys. Rev. Lett. 119, 181301 (2017)
Published October 30, 2017

[Read PDF](#)

Dark Matter Results from 54-Ton-Day Exposure of PandaX-II Experiment
Xiangyi Cui et al. (PandaX-II Collaboration)
Phys. Rev. Lett. 119, 181302 (2017)
Published October 30, 2017

[Read PDF](#)

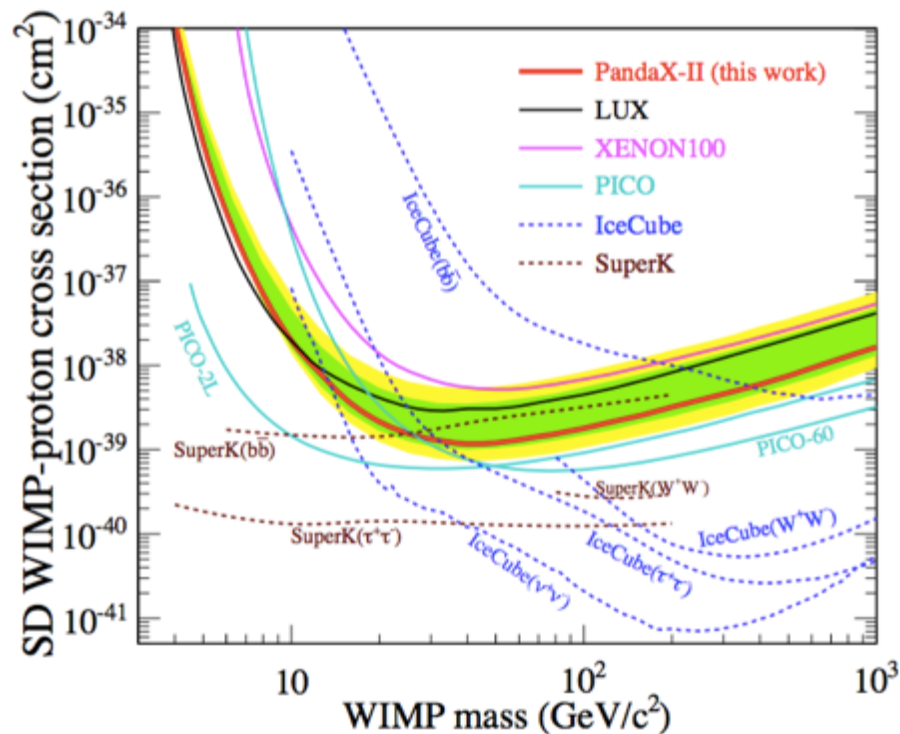
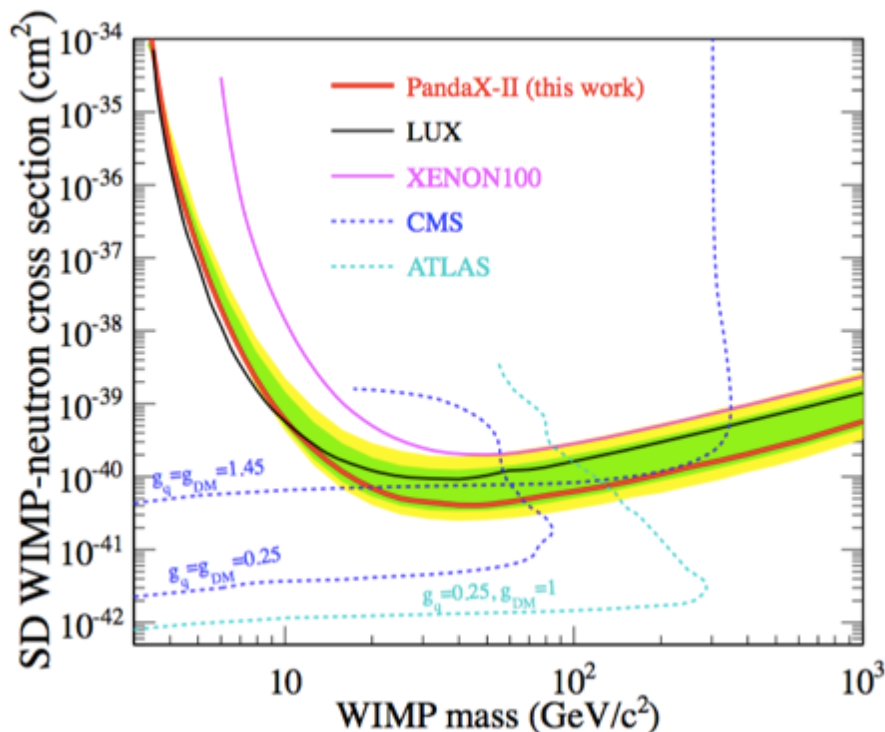
费米实验室理论天体部主任Dan Hooper：“两个独立的研究组，XENON1T和PandaX-II在对暗物质艰难的追捕中又前进了一步。。。对大质量暗物质，PandaX-II的灵敏度更高。。。”

代表成果二：自旋相关的暗物质探测

- 氙的两种同位素 ^{129}Xe 和 ^{131}Xe 具有自旋（未配对中子）
- 液氙实验对暗物质-中子自旋相关相互作用敏感
- 2017年，PandaX二期实验取得国际领先的暗物质-中子自旋相关相互作用的限制

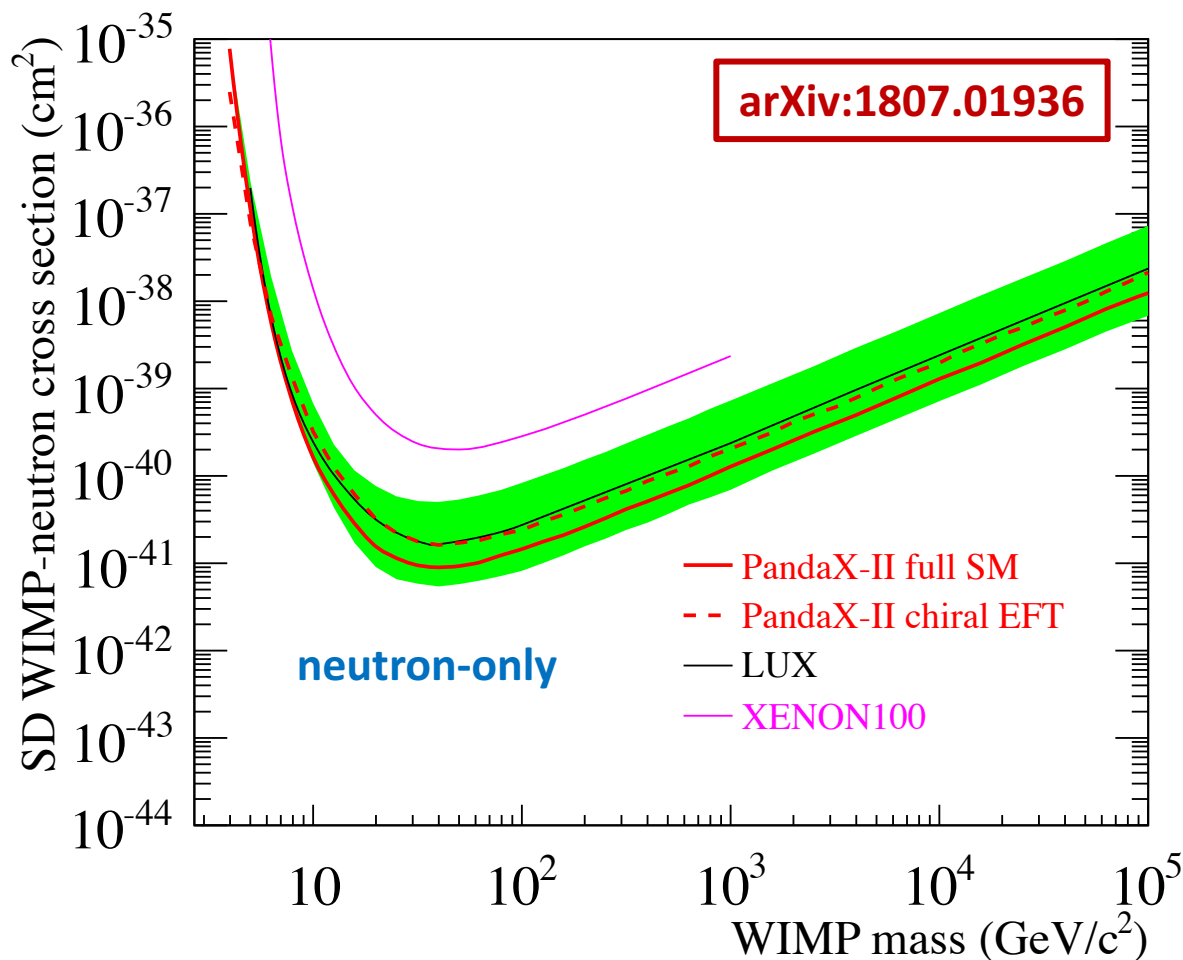
Phys. Rev. Lett. 118, 071301 (2017)

“编辑推荐”，INSPIRE引用87次



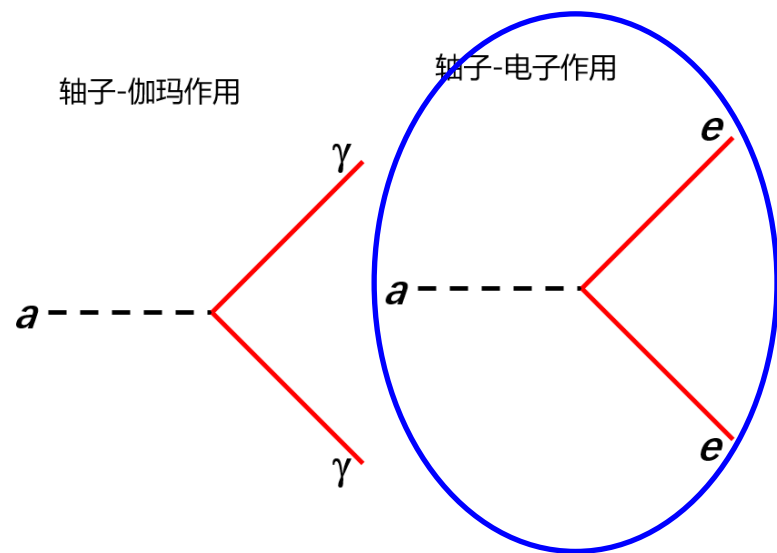
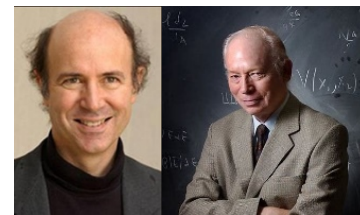
代表成果二：自旋相关的暗物质探测

- 分析54 吨天曝光量数据
- 给出世界最强的暗物质和中子自旋相关作用的限制



代表成果三：轴子暗物质探测

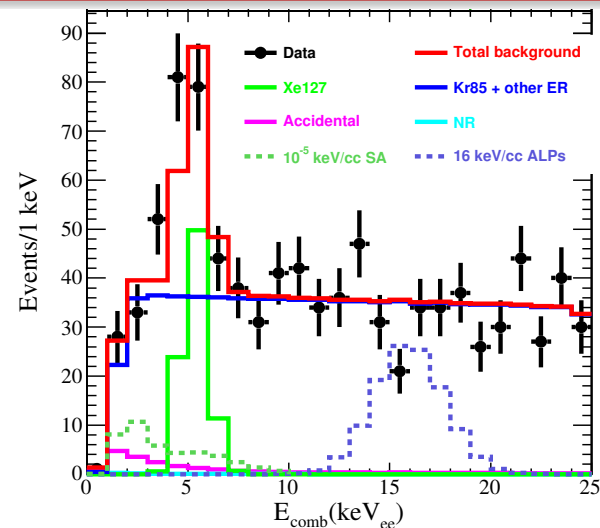
- 轴子是为了解决强作用CP对称性而提出的一种质量很轻的粒子 *Wilczek & Weinberg (1977)*
- 很多实验通过强电磁场寻找轴子-光子作用，多年未果
- 可以通过液氦探测器寻找轴子-电子相互作用



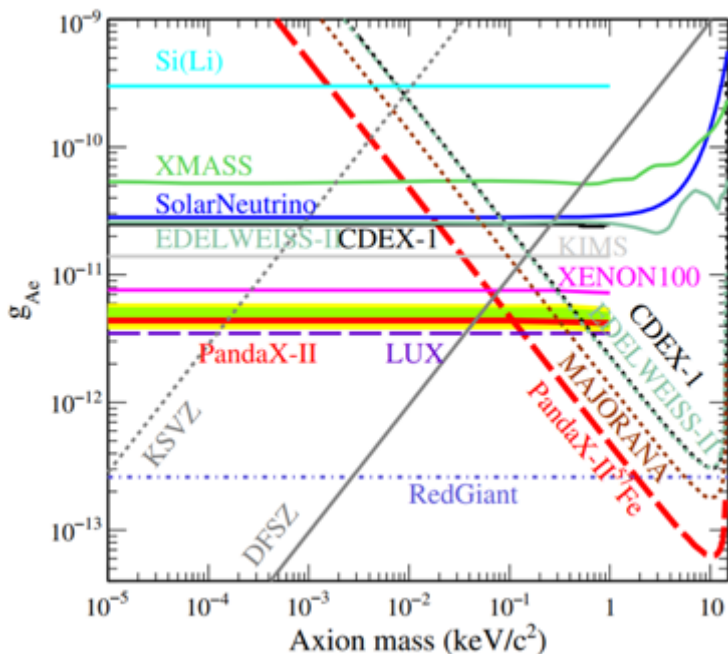
代表性成果三：轴子暗物质探测

- 太阳轴子和类轴子粒子可以产生**电子反冲**信号（WIMP产生核反冲信号）
- 分析 Run9 的电子反冲事例
- 给出世界最强的轴子限制

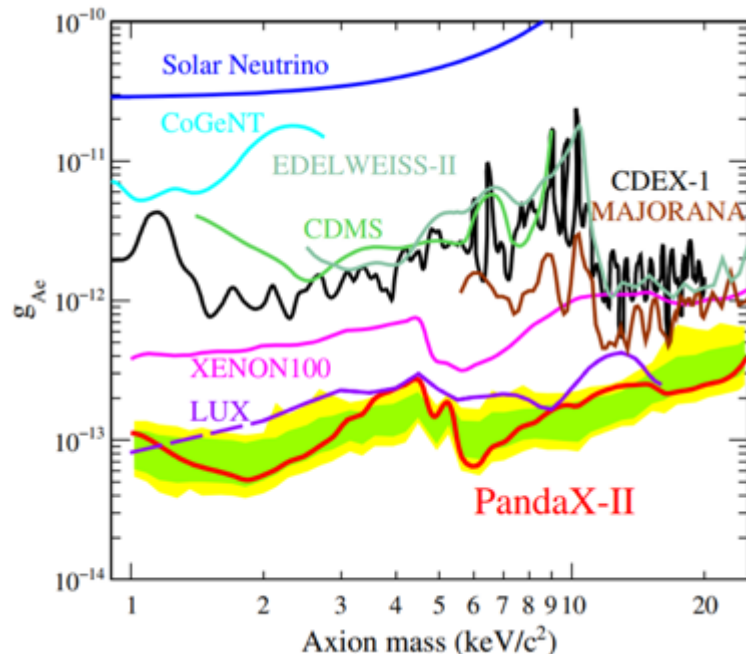
Phys. Rev. Lett. 119, 181806 (2017)



Solar Axion



Galactic Axion-like Particle

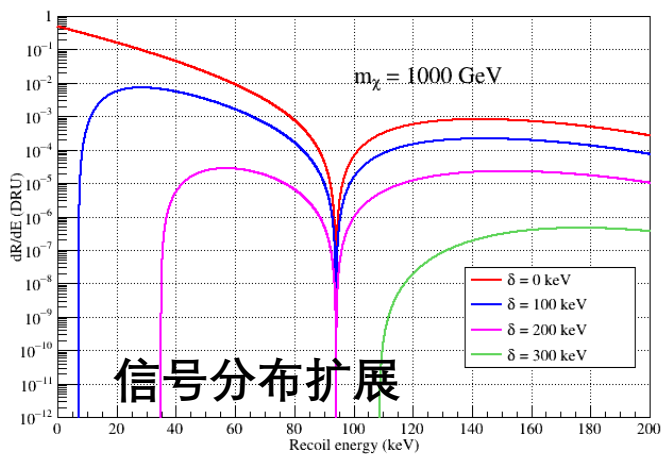


代表成果四：暗物质非弹性散射信号

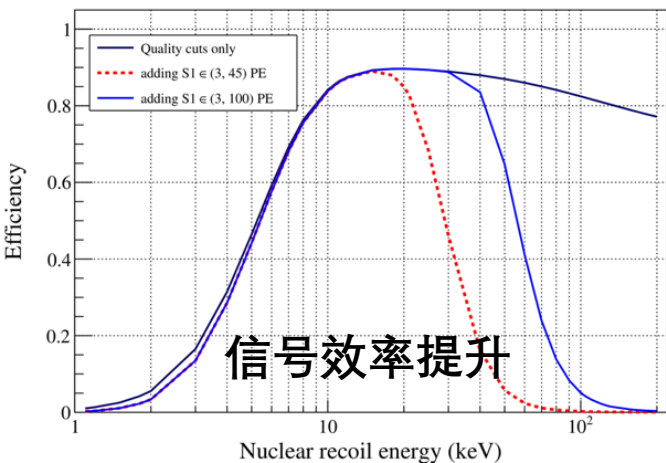
- 传统模型拓展：两种暗物质粒子模型，非弹性散射
- 非弹信号区可以在高能量区
- 27 吨天数据，拓展信号区间

Phys. Rev. D96, 102007 (2017)

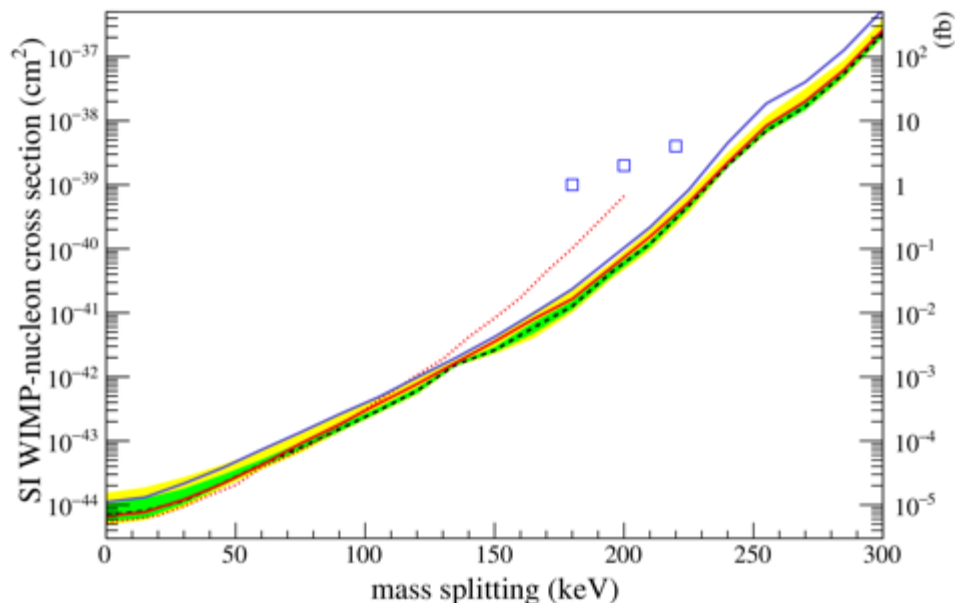
WIMP mass = 1 TeV



信号分布扩展



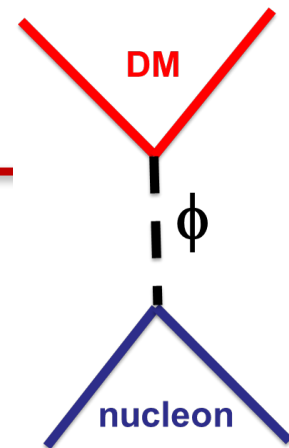
信号效率提升



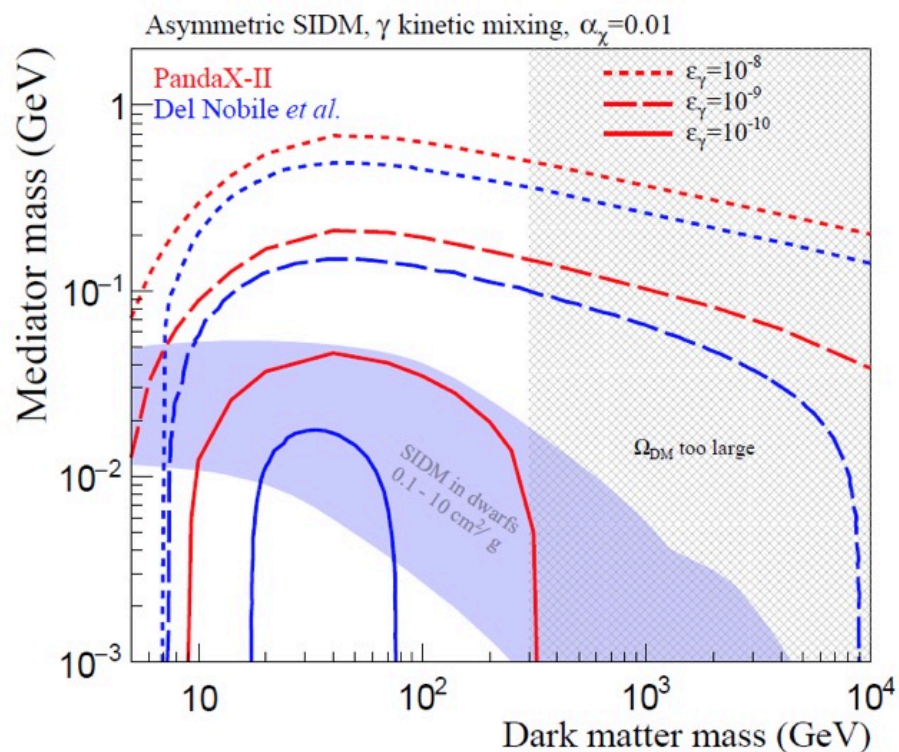
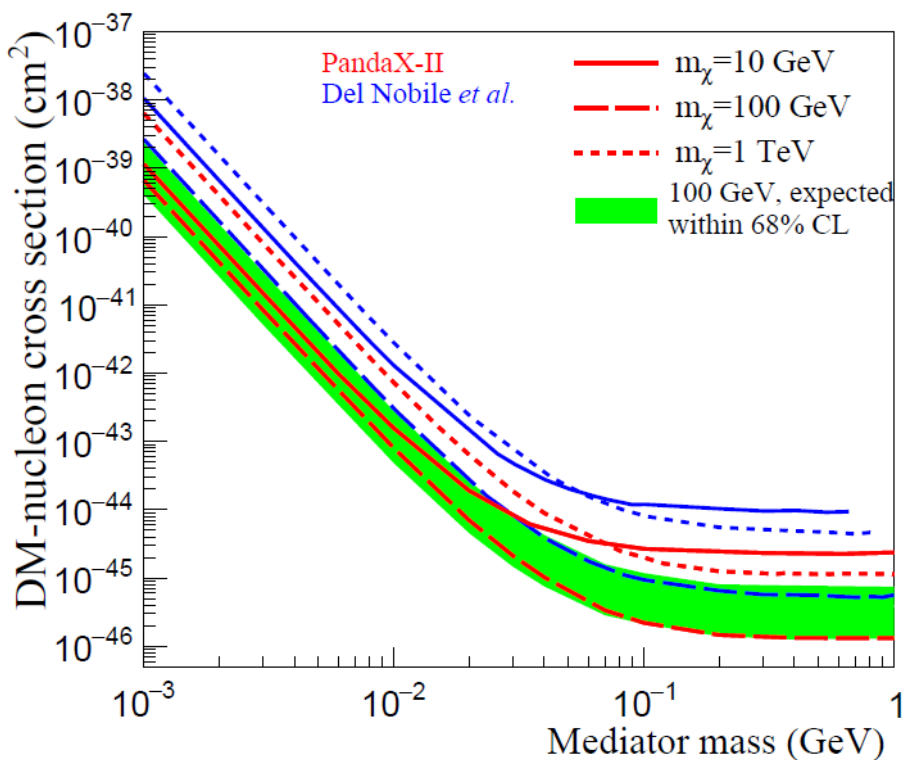
排除了解释CRESST实验高反冲能信号的三种拟合参数

代表成果五：小质量传播子信号

- 小质量传播子
- 54吨天曝光量给出小质量传播子信号最强的限制
- 同时限制自作用暗物质模型的参数

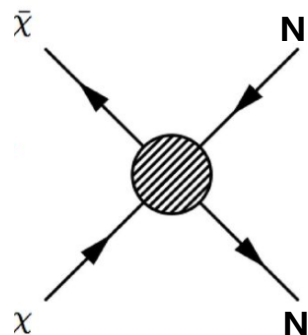


PRL 121, 021304 (2018), 编辑推荐



代表成果六：暗物质有效场作用

- 美国科学院院士Wick Haxton（加州大学伯克利分校）等提出，Phys. Rev. C 89, 065501 (2014)
- 理论模型无关的有效场模型



	暗物质流	物质流
点相互作用	矢量	矢量
	矢量	轴矢量
	轴矢量	矢量
	轴矢量	轴矢量
偶极矩相互作用	磁偶极矩	矢量
	电偶极矩	矢量
	磁偶极矩	磁偶极矩
...

↩ 自旋无关

↩ 自旋相关

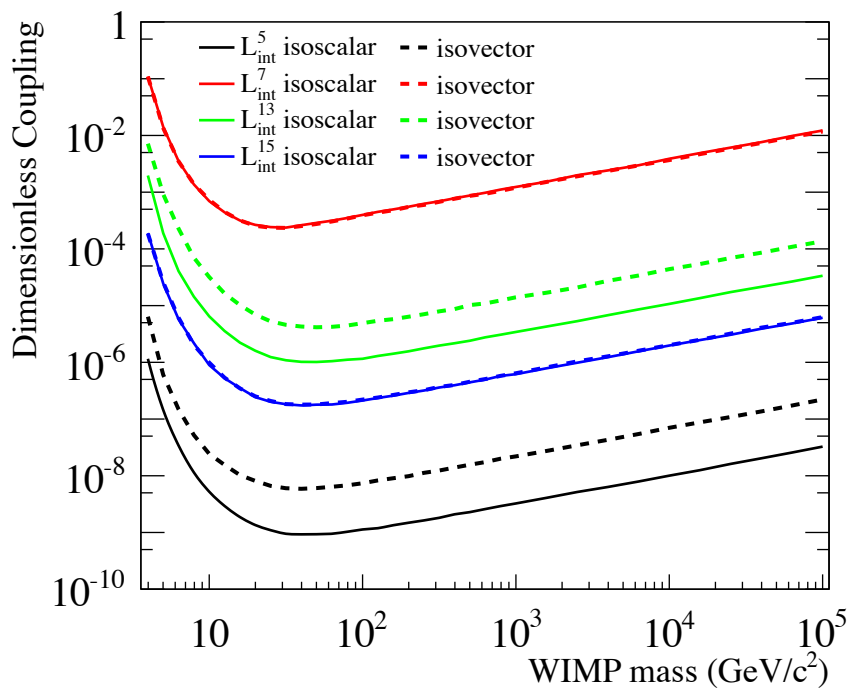
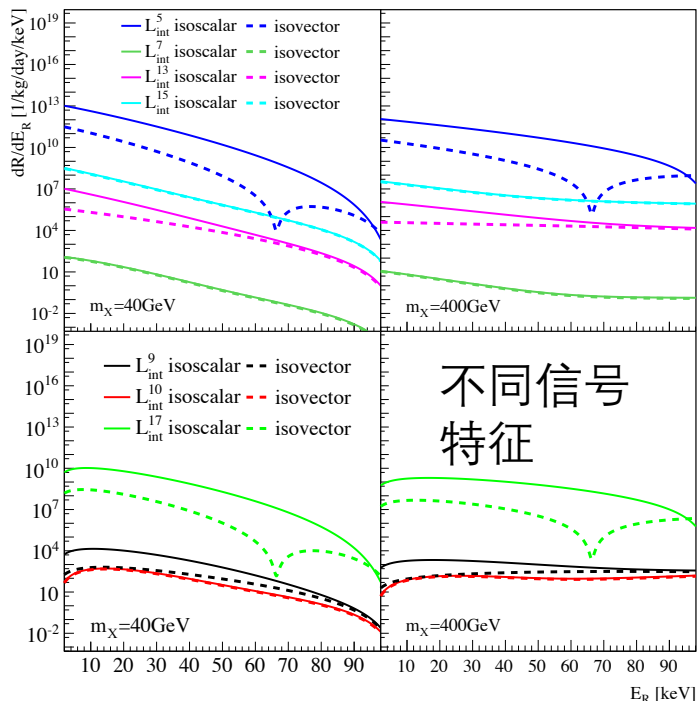
代表成果六：暗物质有效场作用

- 将传统信号模型扩展到多种相对论性有效场模型
 - 包含矢量，轴矢量，磁矩，电偶极矩等；
 - 同位旋不同组合

arXiv:1807.01936

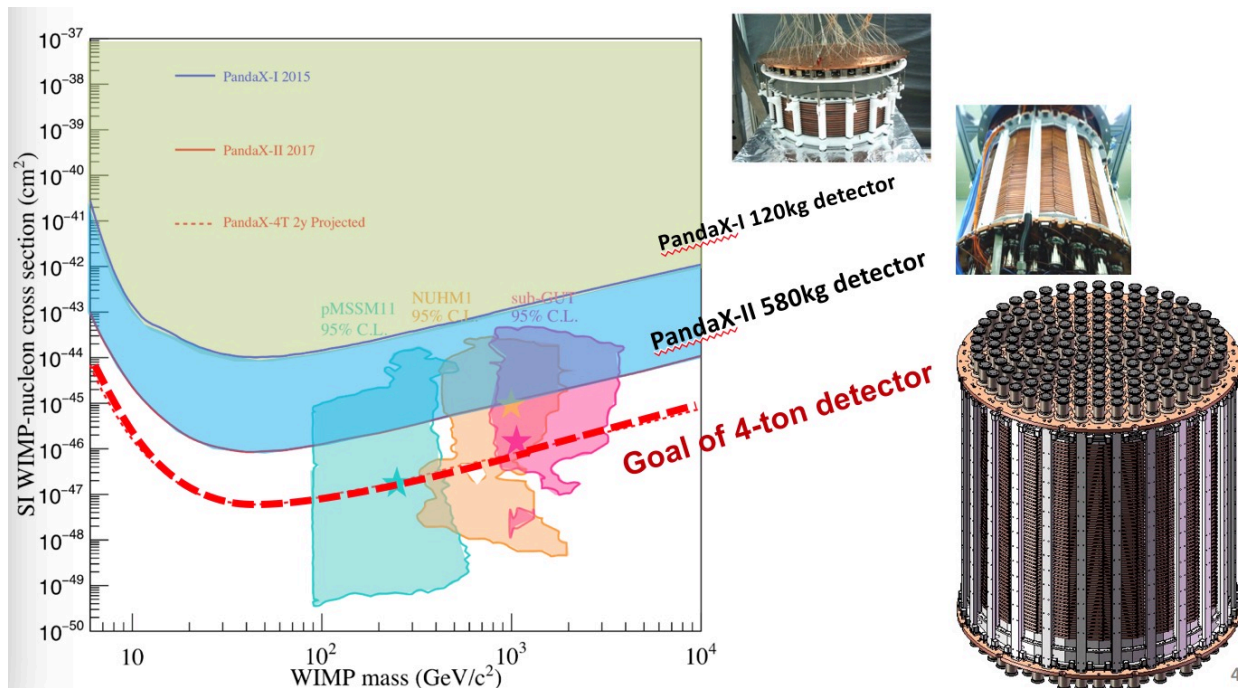
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{int}}^5 &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{N}\gamma_\mu N & \mathcal{L}_{\text{int}}^9 &\equiv \bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\chi\bar{N}\gamma_\mu N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^7 &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{N}\gamma_\mu\gamma^5 N & \mathcal{L}_{\text{int}}^{17} &\equiv i\bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^{13} &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu N & \mathcal{L}_{\text{int}}^{10} &\equiv \bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\chi\bar{N}i\sigma_{\mu\alpha}\frac{q^\alpha}{m_M}N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^{15} &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu\gamma^5 N \end{aligned}$$

初步广泛寻找暗物质迹象



代表成果七：未来四吨级实验预期

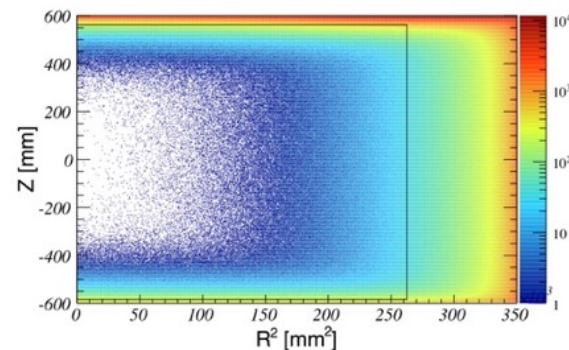
- 四吨级液氙探测实验：灵敏度提高1个数量级



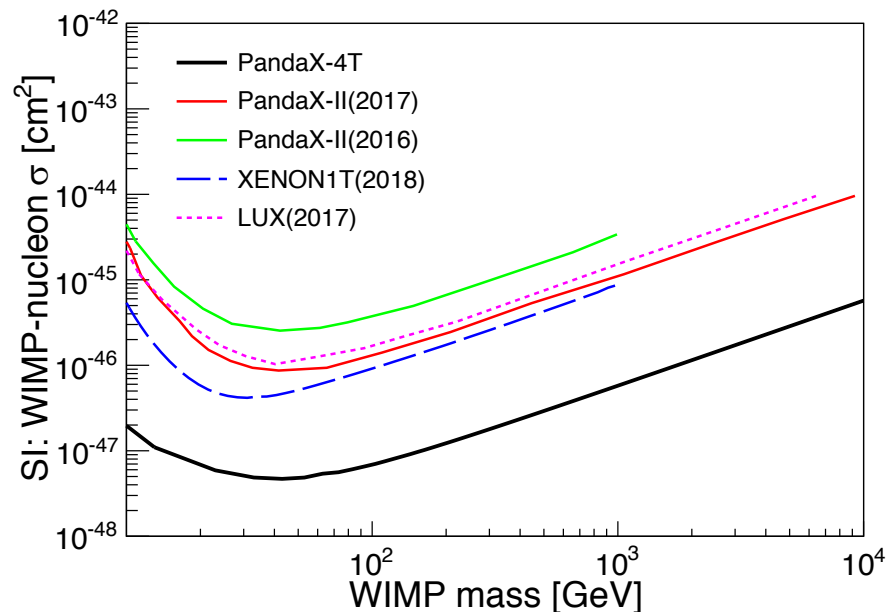
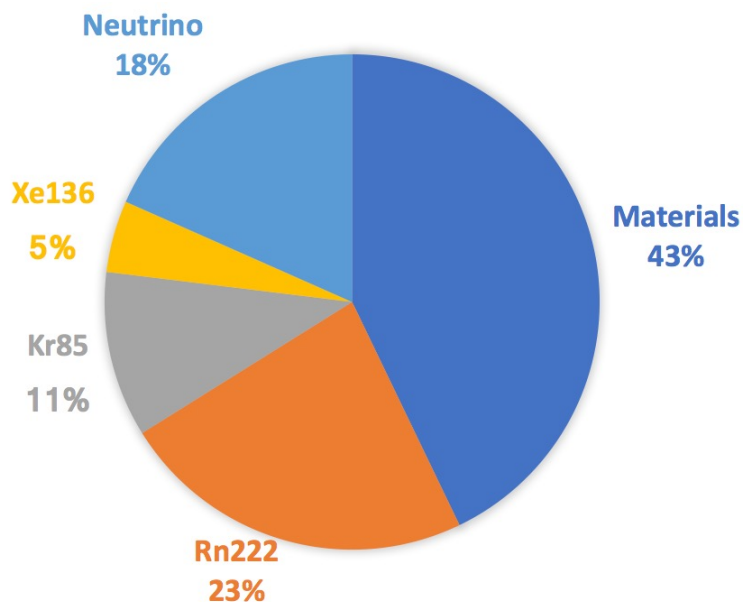
探测仪	液氙重量 (公斤)	本底水平 事例/吨·天 /keV=mDRU	探测灵敏度 (cm ²)	运行情况
PandaX-II	580	0.8	8.6×10^{-47}	运行中
PandaX-4T	4000	0.05	6.0×10^{-48} (预期)	2020年

代表成果七：未来四吨级实验预期

- 模拟研究电子反冲和核反冲本底
 - 探测器材料，氙中放射性杂质，中微子
- 预期本底水平
 - 电子反冲本底：0.05 mDRU
 - 核反冲本底：1 event / ton / year
- 探测灵敏度可以达到 $6.0 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$

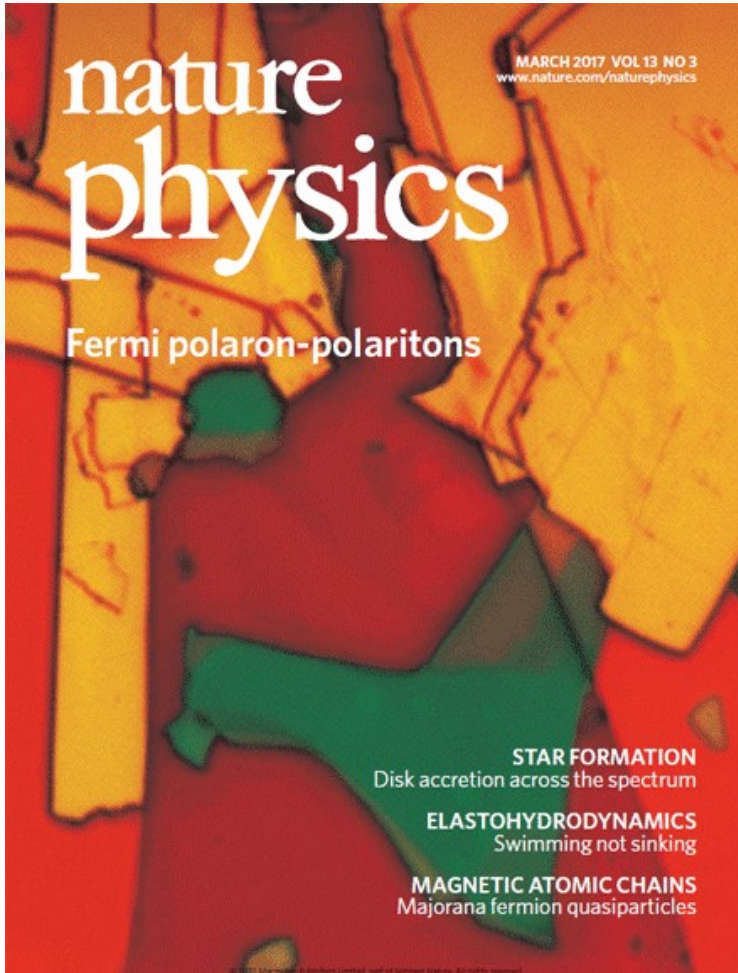


arXiv:1806.02229
Accepted by Sci. China-Phys.
Mech. Astron.



国内外影响力

- 《Nature Physics》 暗物质直接探测综述文章



受 《Nature Physics》 邀请，
撰写暗物质直接探测领域的综述文章。
Nature Physics 13, 212 (2017)

nature physics

Home | Current issue | Comment | Research | Archive | Authors & referees | About the journal

home > current issue > progress article > full text

NATURE PHYSICS | PROGRESS ARTICLE

Current status of direct dark matter detection experiments

刘江来、 谌勋、 季向东

Jianglai Liu, Xun Chen & Xiangdong Ji

Affiliations | Corresponding author

Nature Physics 13, 212–216 (2017) | doi:10.1038/nphys4039

Received 16 November 2016 | Accepted 13 January 2017 | Published online 02 March 2017

PDF Citation Reprints Rights & permissions Article metrics

Abstract



2017年度报告

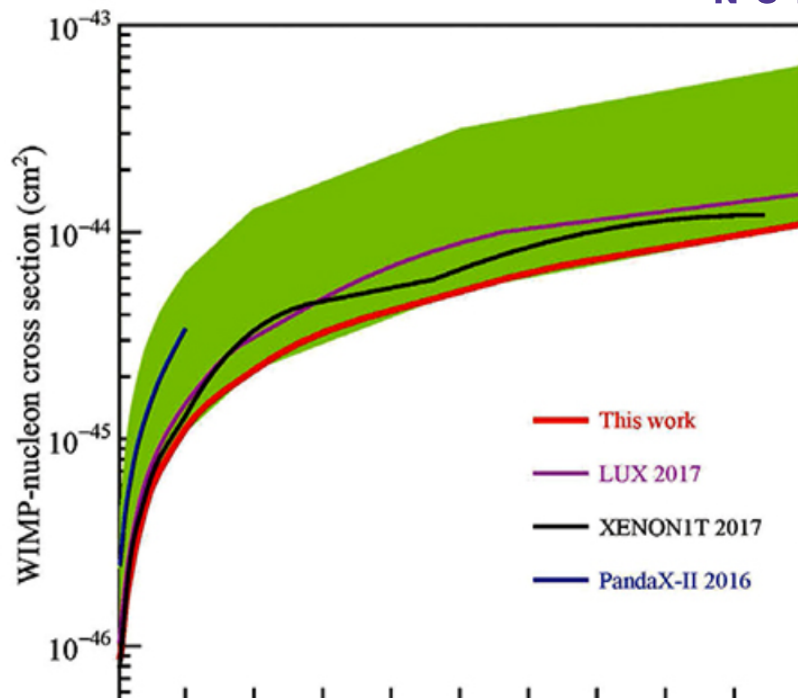
ANNUAL REPORT

第二部分 2017年度国家自然科学基金项目成果巡礼

2.4 PandaX二期暗物质直接探测实验取得重要进展

锦屏的PandaX实验是我国首个大型液氙暗物质探测实验，由上海交通大学季向东教授担任首席科学家。该实验于2009年开始筹备，并于2014年完成120公斤级一期实验，发表了首个物理结果，实现了在暗物质探测领域从无到有的突破。但是，更大规模的美国的LUX实验和欧洲的XENON1T实验也在迅速开展，形成了异常激烈的国际竞争环境。

国家自然科学基金委员会于2015年1月启动了以上海交通大学Karl Giboni教授为负责

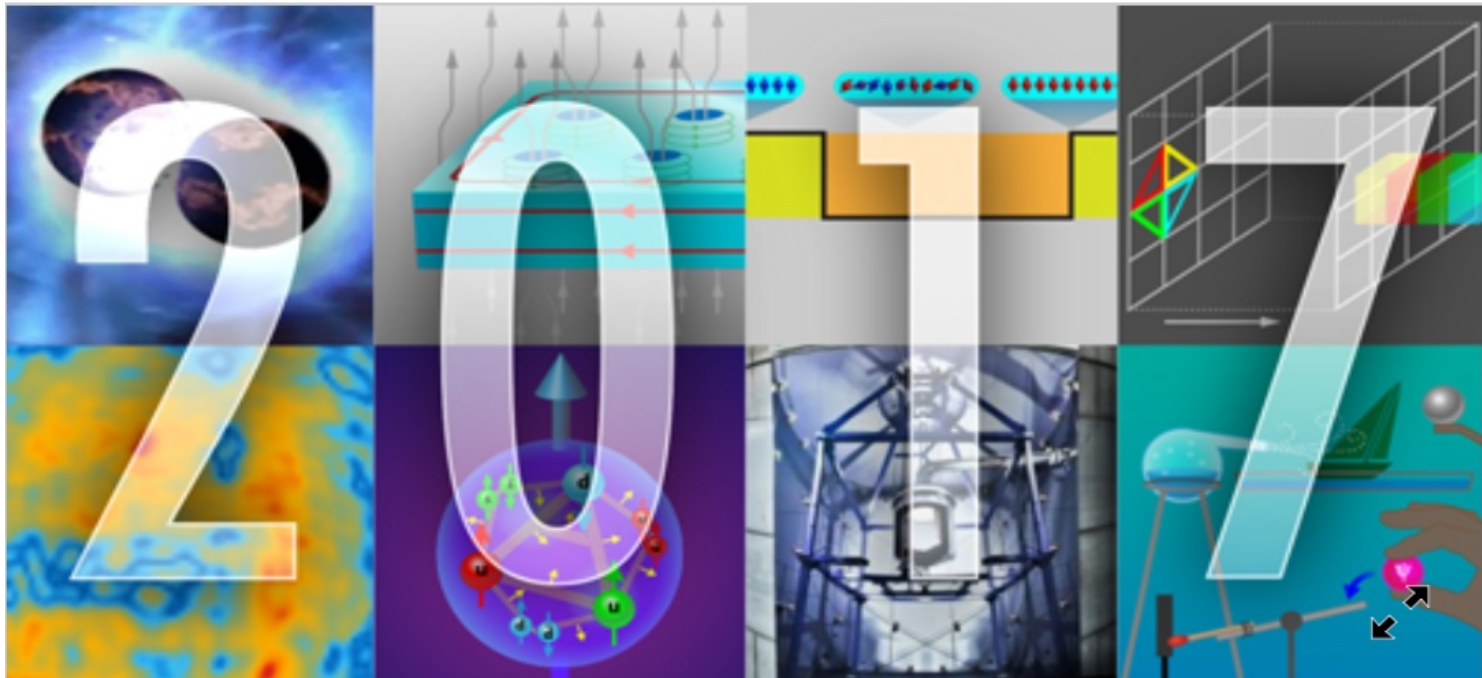


PandaX最灵敏探测成果入选APS《物理》2017年度八大亮点

Highlights of the Year

December 18, 2017 • *Physics* 10, 137

Physics looks back at its favorite stories from 2017.



汇报提纲

- 研究内容1: PandaX-II实验运行状况
 - 物理数据采集
 - 能量、位置刻度
 - 氙的提纯
- 研究内容2: PandaX实验数据分析及模拟研究
 - 自旋无关
 - 自旋相关
 - 轴子
 - 非弹性散射
 - 轻质量中间传播子
 - 模型无关有效场理论
 - 四吨级探测器灵敏度模拟
- 研究队伍、人才培养、合作交流

研究队伍和人才培养

- 符长波（上海交通大学）卓越创新中心“青年拔尖人才奖”
- 周宁（上海交通大学）卓越创新中心“青年优秀人才奖”
- 谌勋（上海交通大学）卓越创新中心“青年优秀人才奖”

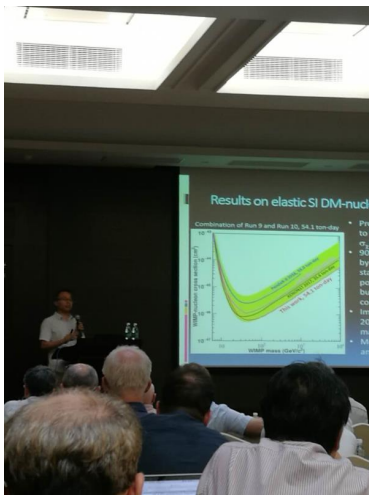
- 肖梦姣第一期博士后出站，第二期MIT博士后
- 夏经铠（上海交通大学）获得“赵忠尧博士后”

- 周小鹏（北京大学），博士毕业，现为北京航空航天大学“百人博士后”，继续进行PandaX实验
- 谢鹏伟（上海交通大学），博士毕业，现为李政道研究所博士后，继续进行PandaX实验；获得博士后科学基金面上项目资助，获得“赵忠尧博士后”（优秀）
- 李绍莉（上海交通大学），博士毕业
- 王秋红（上海应物所），2017年博士研究生国家奖学金

合作交流

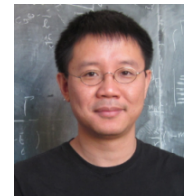
• 会议报告

- 26个重要国际会议报告，15个国内会议报告
- 会议上发布PandaX-II实验的最新进展



• 国际合作

- 和Prof. H.B. Yu (UC-Riverside) 合作完成小质量传播子模型寻找
- 和Prof. W. Haxton (UC-Berkely) 合作完成有效场模型寻找



总结

- PandaX-II 500公斤级暗物质探测实验稳定运行两年多。
- 暗物质探测灵敏度实现了 $8.6 \times 10^{-47} \text{cm}^2$ ，达到5年考核指标。
- 实验发表 5篇PRL 文章（编辑推荐4篇），1篇PRD，1篇Sci. China, 1篇正在PRL审稿，inSPIRE上总引用率达到682次。
- 实验组成员26个国际会议报告，15个国内会议报告

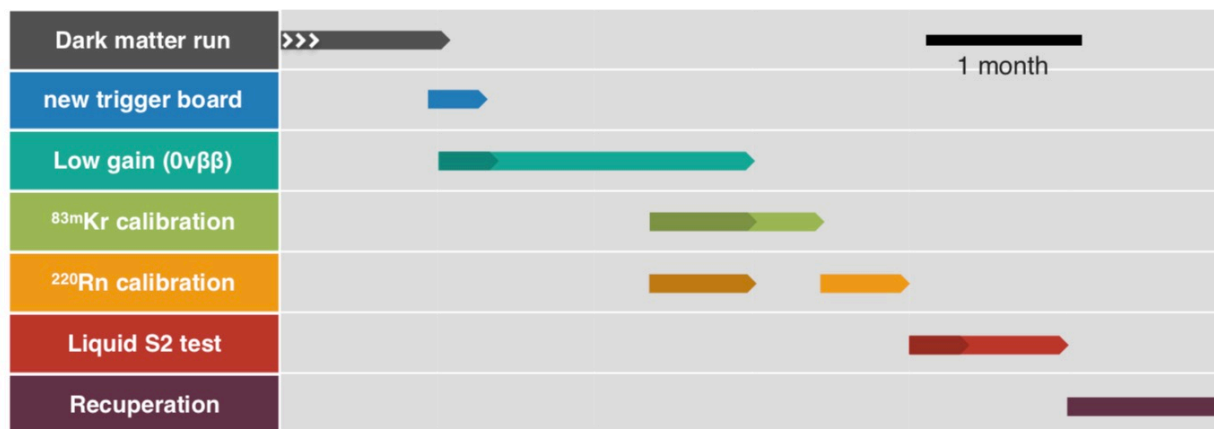
课题目标、成果与考核指标表

课题目标 ¹	成果名称	成果类型	考核指标 ²				考核方式 (方法)及 评价手段 ⁴
			指标名称	立项时已有 指标值/状态	中期指标 值/状态 ³	完成时指标 值/状态	
本课题的目标是依托 PandaX-II 500 公斤级液氙探测器,提高探测灵敏度,寻找高质量区的弱相互作用重粒子(WIMPs),争取率先发现这种可能的暗物质粒子。为下一步在锦屏地下实验室开展多吨级的液氙和液氙实验打基础,有机会把未来暗物质探测的灵敏度推进到“中微子本底”极限	PandaX-II 液氙探测器的运行和优化的结果	☐其他: 新物理结果	暗物质物理数据的采集天数	19	300	700 接近完成	发表同行评议论文或者在国际会议上的特邀报告上的汇报,同行对文章的引用
			暗物质的探测灵敏度	$3 \times 10^{-45} \text{cm}^2$	$5 \times 10^{-46} \text{cm}^2$	$1 \times 10^{-46} \text{cm}^2$	
科技报告考核指标	序号	报告类型 ⁵	数量	提交时间		公开类别及时限 ⁶	
	1	年度技术进展报告	3	课题执行期每年年底		公开	
	2	中期技术进展报告	1	2018年6月		公开	
	3	最终科技报告	1	2021年6月		公开	
其他目标与考核指标(对于难以采取上述表格细化的课题目标及其考核指标,可在此细化填写,限1000字以内。)							

后续阶段任务

- 完成暗物质物理数据采集任务：预计2018年底达到700天运行
- 随即开展液氙探测的新技术研发，准备探测器升级，应对国际激烈竞争。
 - 新触发板，数据获取和触发时间同步，优化电子学触发及控制算法
 - 低放大运行，测试无中微子双贝塔衰变事件采数
 - ^{83m}Kr 的刻度，注入式低能量单能峰刻度技术
 - ^{220}Rn 的刻度，注入式低能量连续谱刻度技术
 - 液氙二次发光研究，提高探测均匀性和探测效率
 - 液氙快速回收提纯精馏

各任务
时间需求



preparation



data taking

Backup

会议报告

- PANIC, Beijing, 2017 Sep. 1-5, **Xiangdong Ji**,
- Lepton & Photon, SYSU, 2017 Aug. 7-12, **Jianglai Liu**
- TeVPA, Ohio State Univ., 2017 Aug. 7-12, **Xiangdong Ji** (review talk)
- TAUP, SNOLab, 2017 July 24-29, **Ning Zhou**
- OCPA9, Tsinghua Univ., 2017 July 17-20, **Yong Yang**
- EPS-HEP, Venice, 2017 July 5-12, **Jianglai Liu**
- Gordan conference, Hong Kong, 2017 June 24-25, **Binbin Yan**
- WIN2017, Irvine, 2017 June 19-24, **Mengjiao Xiao**
- CYGNUS, Xichang, 2017 June 13-16, **Xiangyi Cui**
- TIPP, Beijing, 2017 May 22-26, **Ning Zhou, Qinyu Wu**
- Pheno, Pittsburg, 2017 May 8-10, **Jianglai Liu**
- Rencontre de Blois, Blois, France, 2017 May 28 - June 2, **Andi Tan**
- PATRAS, Thessaloniki, Greece, 2017 May 15-19, **Andi Tan**
- PPC 2017, Corpus Christi, Texas, 2017 May 22-26, **Changbo Fu**
- XeSAT 2017, Khon Kaen, Thailand, 2017 Apr. 3-7, **Xun Chen, Franco Giuliani**
- AFAD2017, Lanzhou, 2017.01.16 **Ning Zhou**
- HBSM2016, Weihai, China 2016.08.15 **Ning Zhou**

会议报告

- AFAD2018, Daejeon, Korea, **Jingkai Xia**
- UCLA DM 2018, Los Angles, USA, **Jianglai Liu**
- Axion workshop 2018, Osaka, Japan, **Andi Tan**
- CosPA workshop 2018, **Mengjiao Xiao**
- PATRAS2018, DESY, Germany, **Pengwei Xie**
- ICHEP2018, Seoul, Korea, **Ning Zhou**
- IDM2018, **Yong Yang**

- BNU DM workshop, Beijing, 2018, **Xun Chen, Jianglai Liu, Ning Zhou**
- CHEP, Shanghai, 2018, **Yong Yang, Jingkai Xia, Binbin Yan, Qihong Wang, Ning Zhou, Li Zhao, Tao Zhang, Xiangxiang Ren, Xun Chen, Pengwei Xie, Jumin Yuan, Qibin Zheng**