



DARWIN

(dark matter wimp
search with liquid xenon)

東京大学カブリIPMU 山下雅樹

目的：

DARWIN実験は、XENONnT実験の後継機に位置し、地下実験室における
50トン級-液体キセノン検出器を用いた次世代WIMP暗黒物質直接探索実験

・宇宙は何でできているのか？

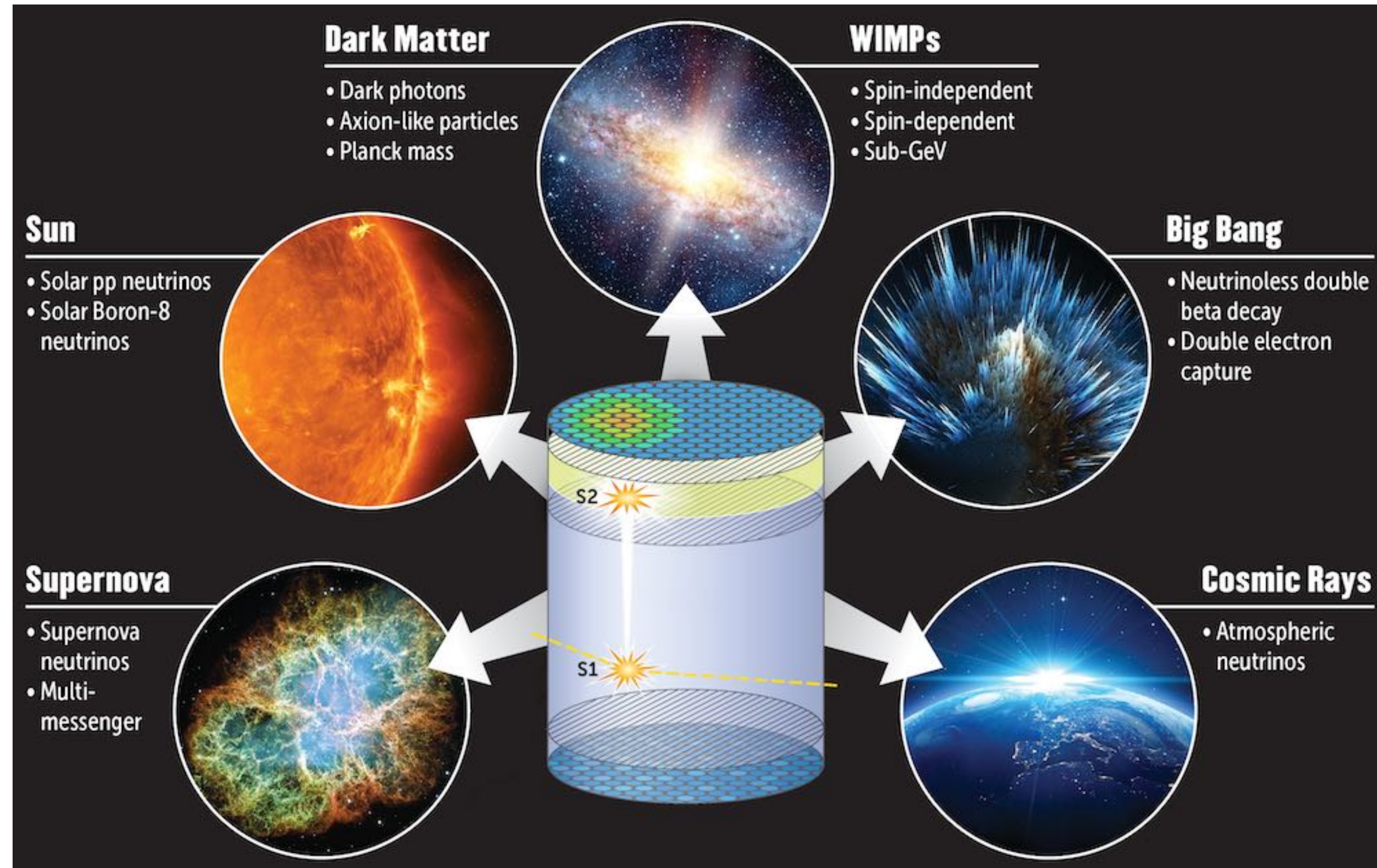
- ・宇宙の物質・エネルギー 95% unknown
 - ・暗黒エネルギー(68%), 暗黒物質(27%)
 - ・我々の身の回りにもあるはず。 ($0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$)

・暗黒物質の候補

- ・ WIMP, アクシオン, 原始ブラックホール など
- ・ WIMP: 有力候補の一つ。
 - ・ 超対称性粒子
 - ・ 宇宙の初期に熱的に生成。WIMPミラクル

・その他

- ・ pp太陽ニュートリノ観測 (~1% 精度)
 - ・ ^8B ニュートリノとのコヒーレント散乱
- ・ 超新星ニュートリノ
- ・ 二重ベータ崩壊 ($T_{1/2} 0\nu \sim 10^{27}$ years)

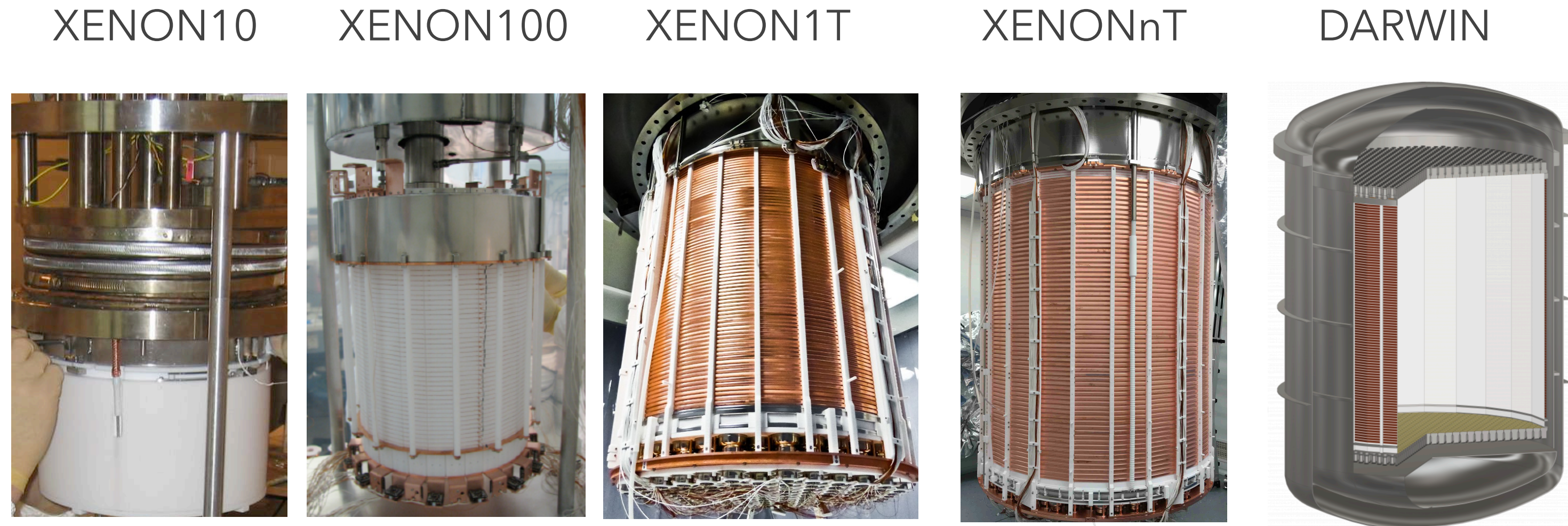


DARWIN Collaboration



DARWIN全体：アジア、米国、ヨーロッパから
165人、30研究機関が参加
国内
神戸大学, 東京大学, 名古屋大学

液体キセノンTPC検出器Evolution

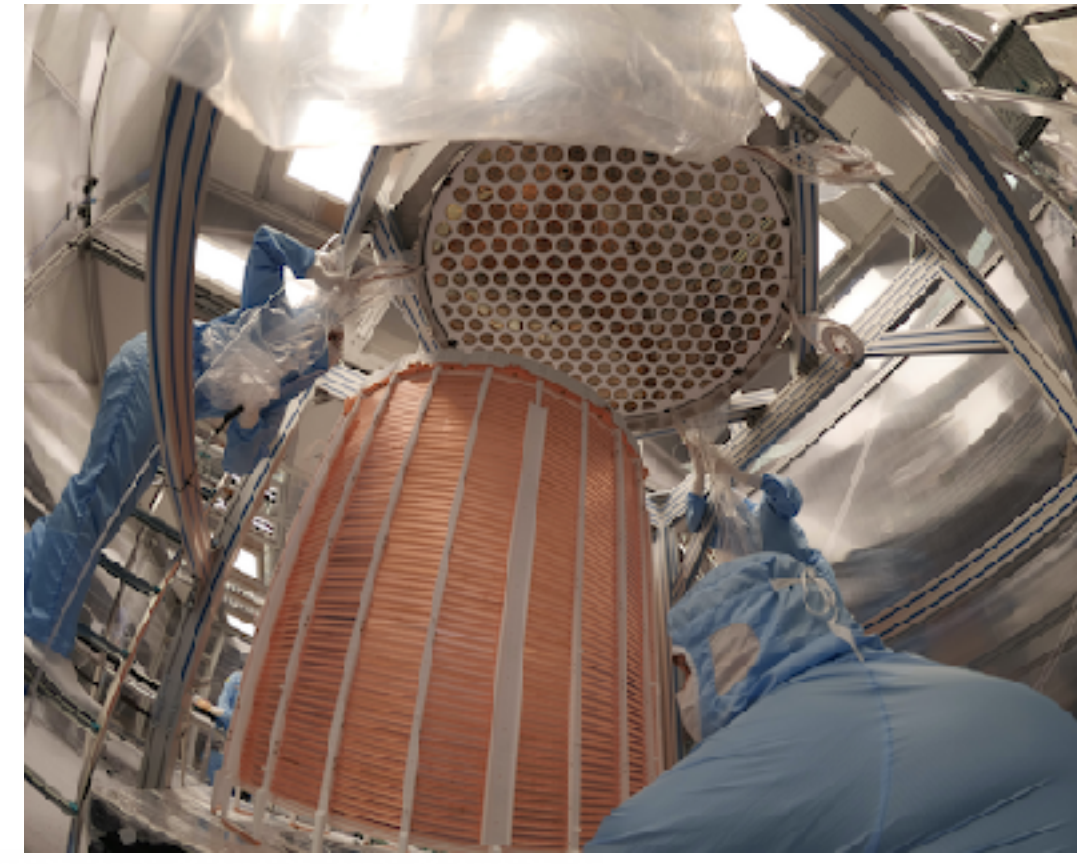


XENON10	XENON100	XENON1T	XENONnT	DARWIN
2005-2007	2008-2016	2012-2018	2020-2025	2027-
15 kg	161 kg	3200 kg	8400 kg	50 tonnes
15 cm	30 cm	96 cm	150 cm	260 cm
$\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$	$\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$	$\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$	$\sim 10^{-48} \text{ cm}^2$	$\sim 10^{-49} \text{ cm}^2$

- 各フェーズにて着実な成果。常に世界最高感度で探索。(実現性)
- XENON1T**: ^{124}Xe 二重電子捕獲の観測 (人類の知る最も長い半減期、 10^{22} 年, 2019 Nature)
低エネルギー電子反跳の超過事象 (未知の粒子か? トリチウムBGの可能性あり)
- XENONnT**: イタリアグランサッソにて実験開始 $\rightarrow 10^{-48} \text{ cm}^2$ 断面積の探索, XENON1T Excessの検証

WIMPとXe原子核の弾性散乱
 $WIMP + Xe \rightarrow WIMP + Xe$

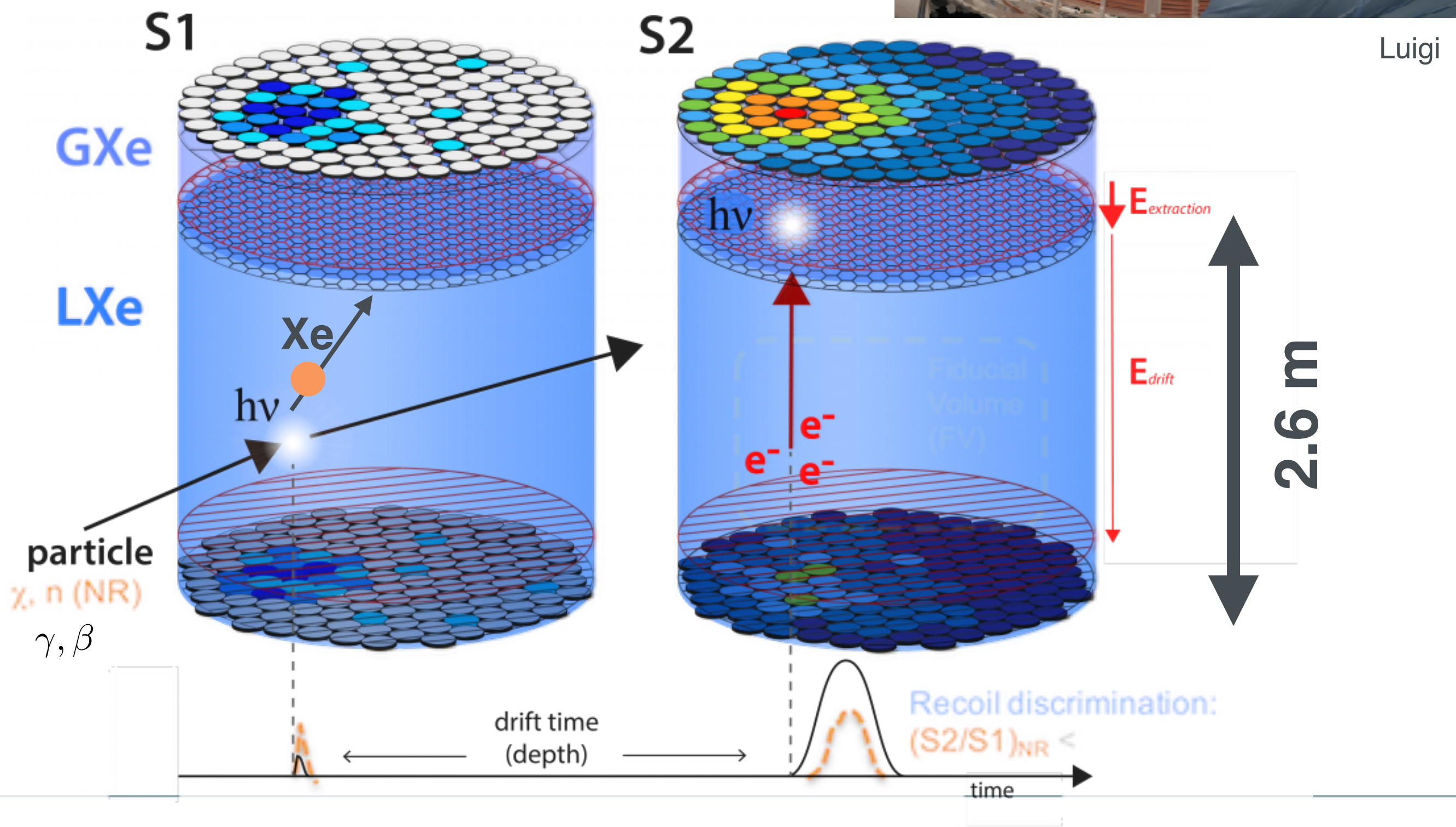
- S1:シンチレーション光
- S2:電離信号 (-> 比例蛍光)



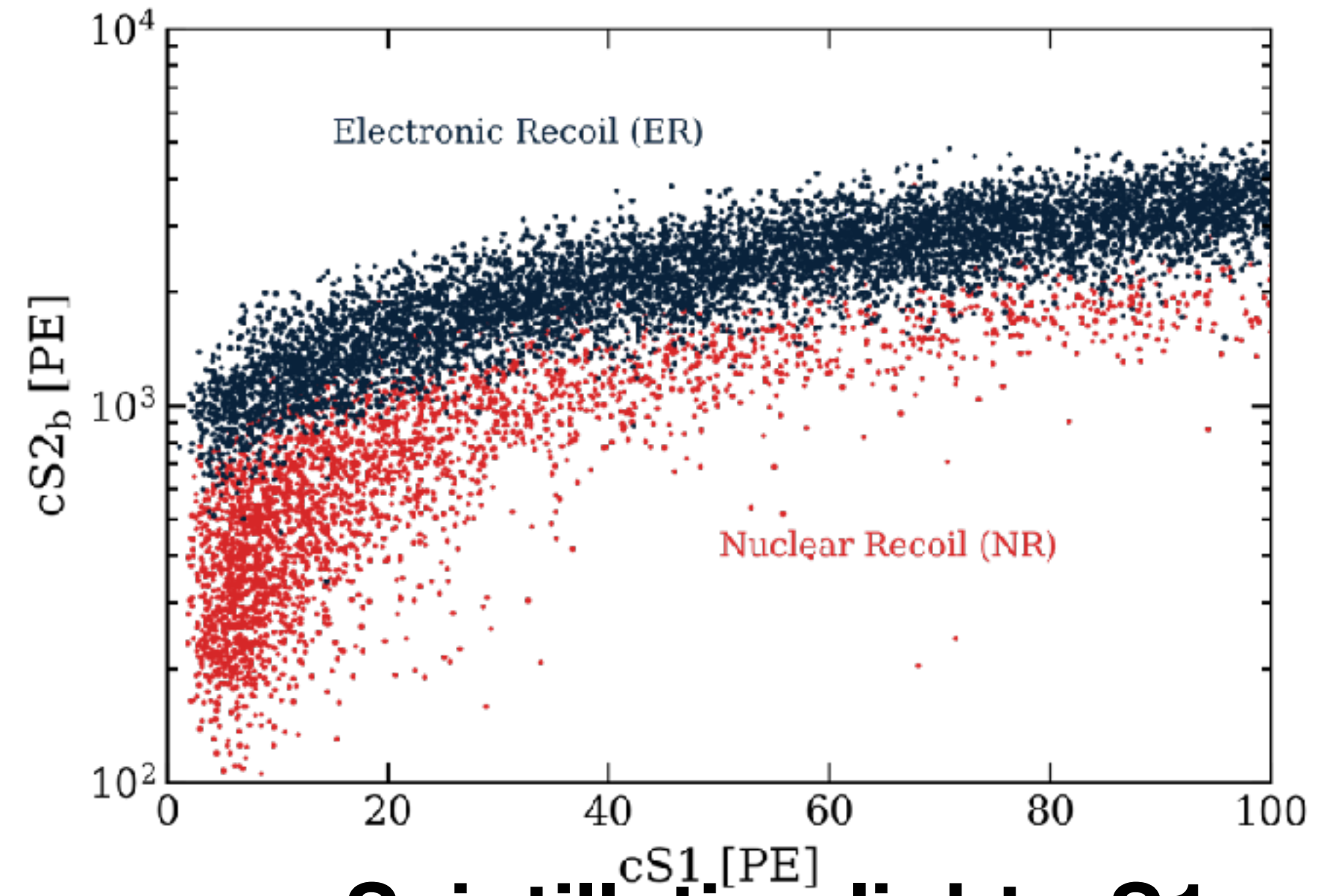
イベント事にシンチレーション光と電離信号を読み出す。

- 3次元位置構成: x-y (S2) and z (ドリフト時間)
- Xe:Z(=54), 中心の有効体積を選ぶことにより、外来の γ 線や表面の放射線を効率よく除去。コンプトン散乱、中性子による多重散乱も識別。(1/10⁴ - 1/10⁵)

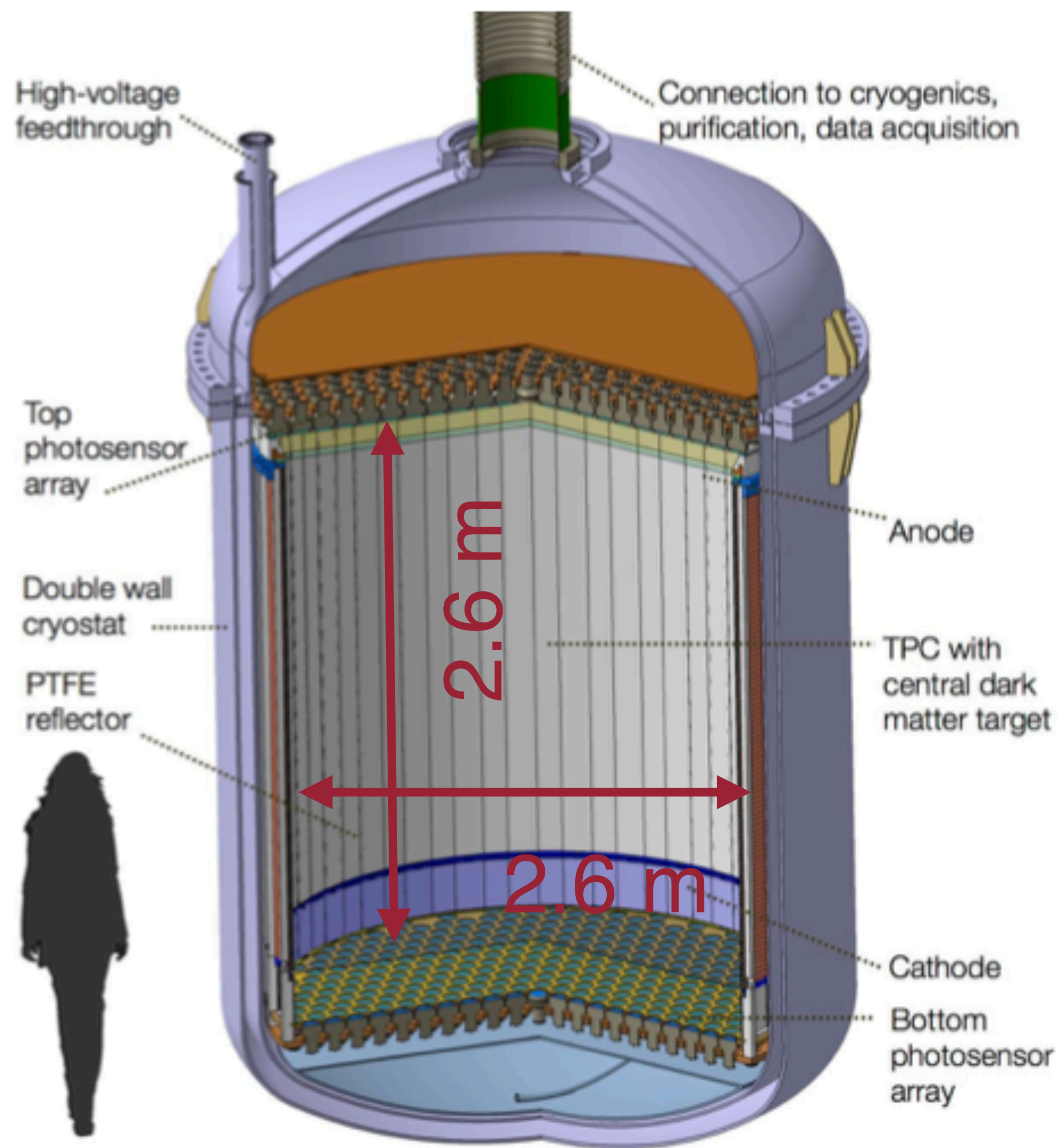
WIMP(原子核反跳)と電子散乱をS2/S1信号比によって粒子弁別可能 (1/200)



• Ionization electron - S2



• Scintillation light - S1



Size

- 液体キセノン 40トン有感質量 (全質量50トン)
- 2.6 m ドリフト長
- ~1800 PMTs

Background

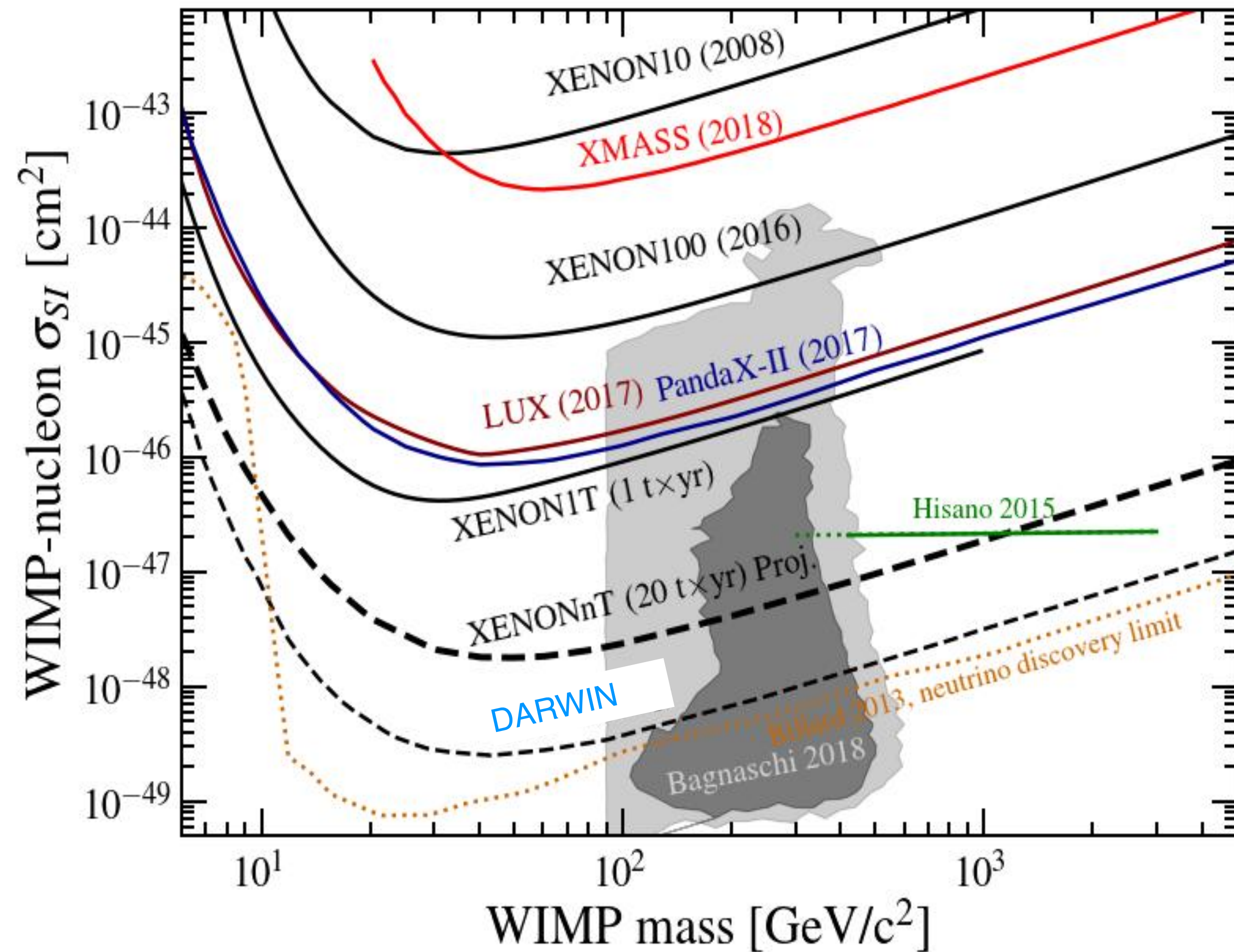
- ^{222}Rn (0.1 uBq/kg) (1/10 XENONnT goal)
- (α, n) neutron (PTFE, Cryostat, PMT)

R&Dを進めている。

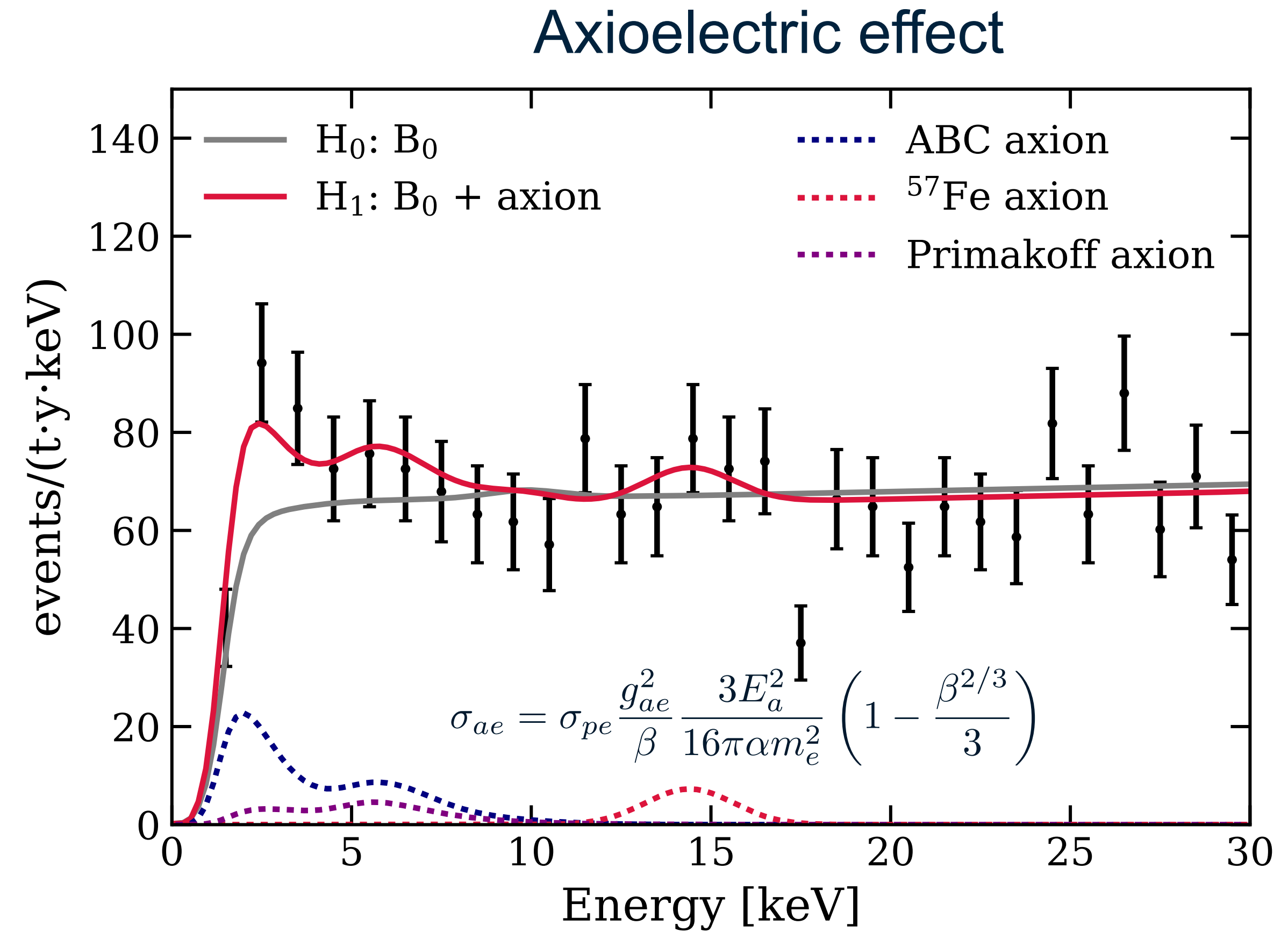
純化などのsubsystemはXENONnT自身を使い物理探索を進めながら開発が可能。

DARWIN実験による検出感度

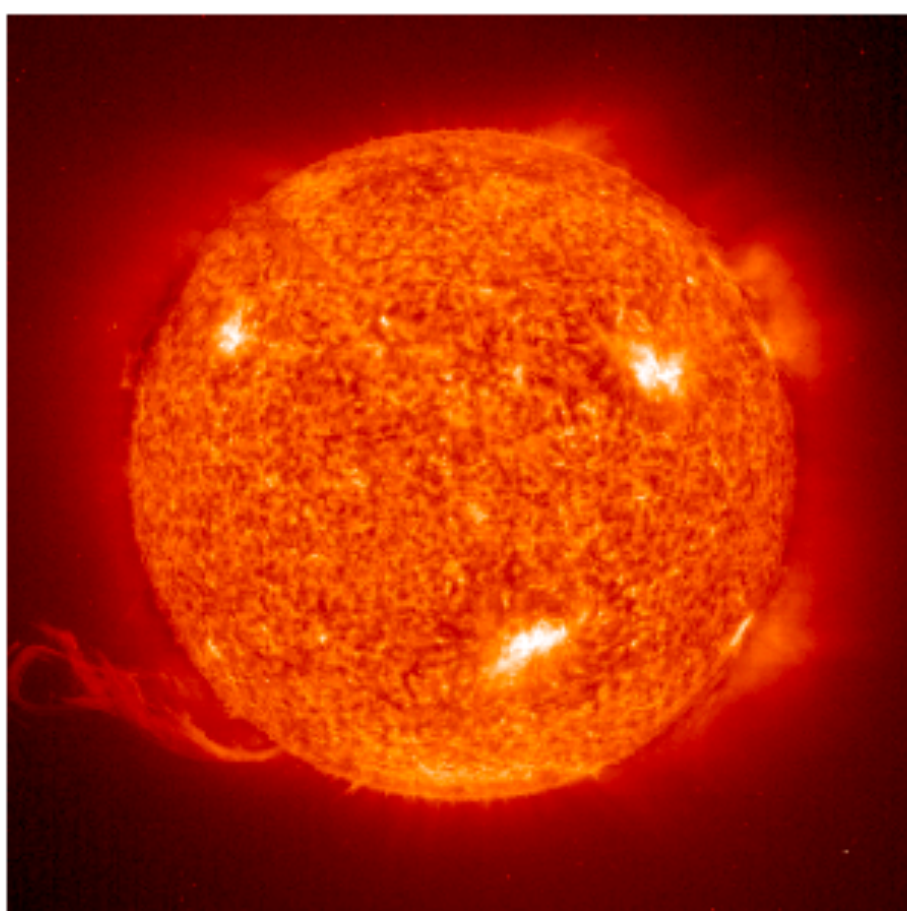
XENONによるWIMP探索とDARWINの展望



XENON1T 電子反跳事象の超過(2019)

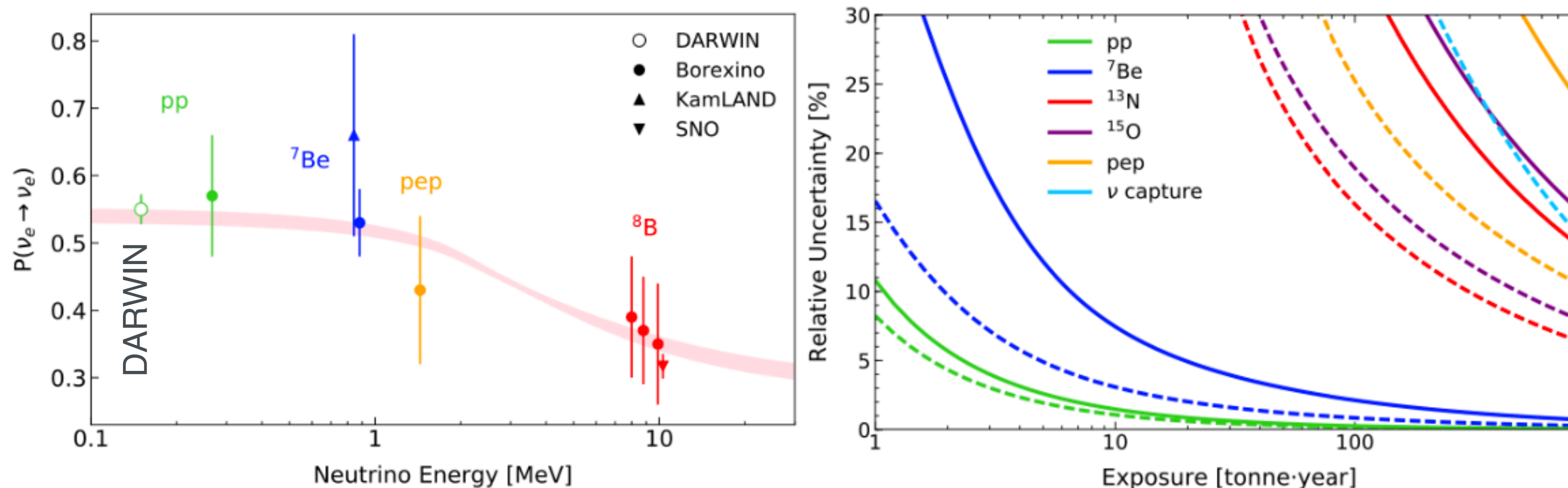


Axion favored over background-only at 3.5 σ
検出器内のトリチウムBGの可能性あり



- ν -electron elastic scattering $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$
- DARWIN: 7.2 ev/day in 30 t for the energy range $E = (2 - 30) \text{ keV}_{ee}$ (pp-neutrinos)
- Precision $< 1\%$ \rightarrow test non-standard ν -interactions
- 90 events/t·y $CE\nu NS$ of ^8B - ν 's above $\sim 1 \text{ keV}_{ee}$

DARWIN, JCAP 11 (2016) 017



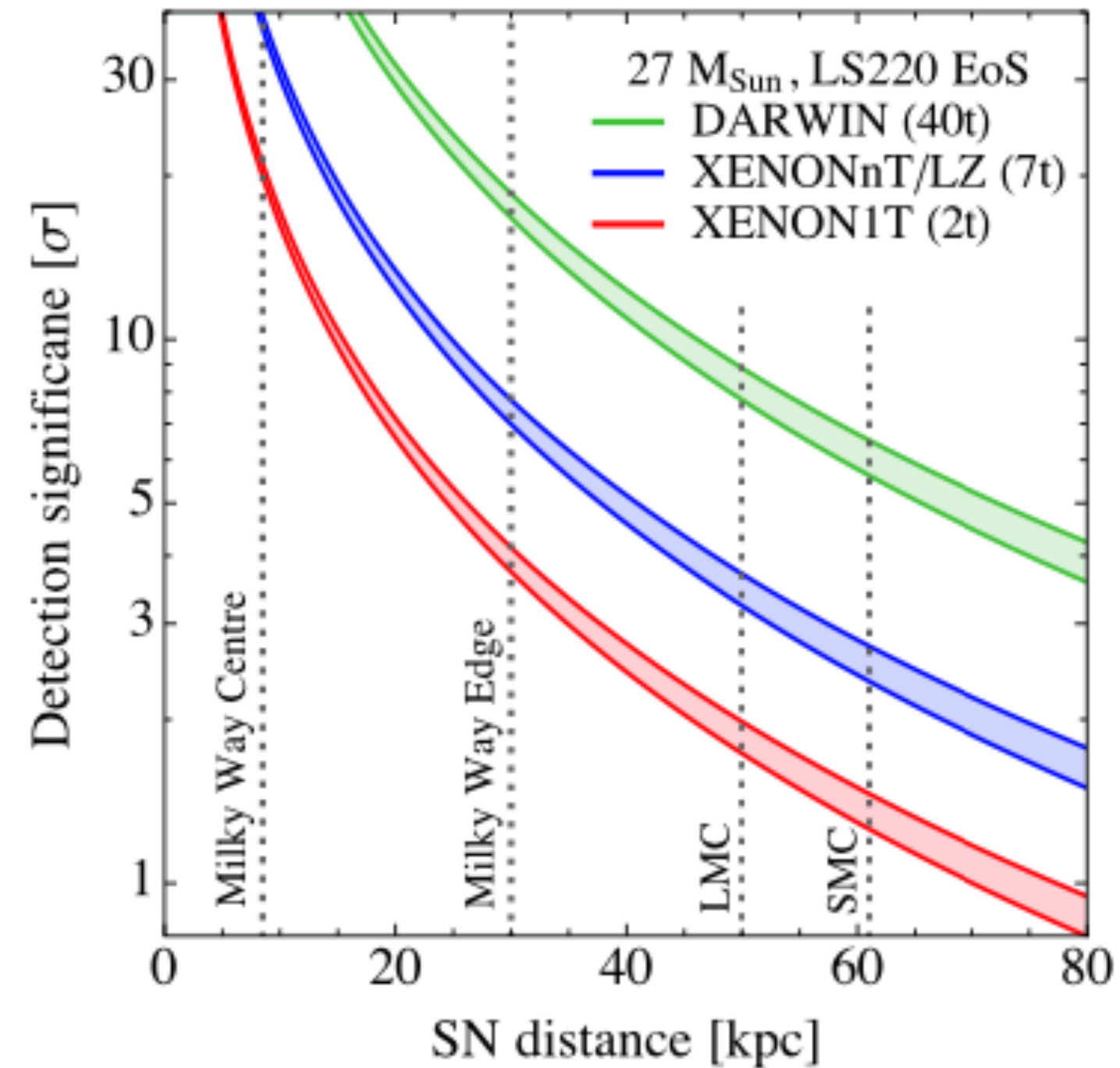
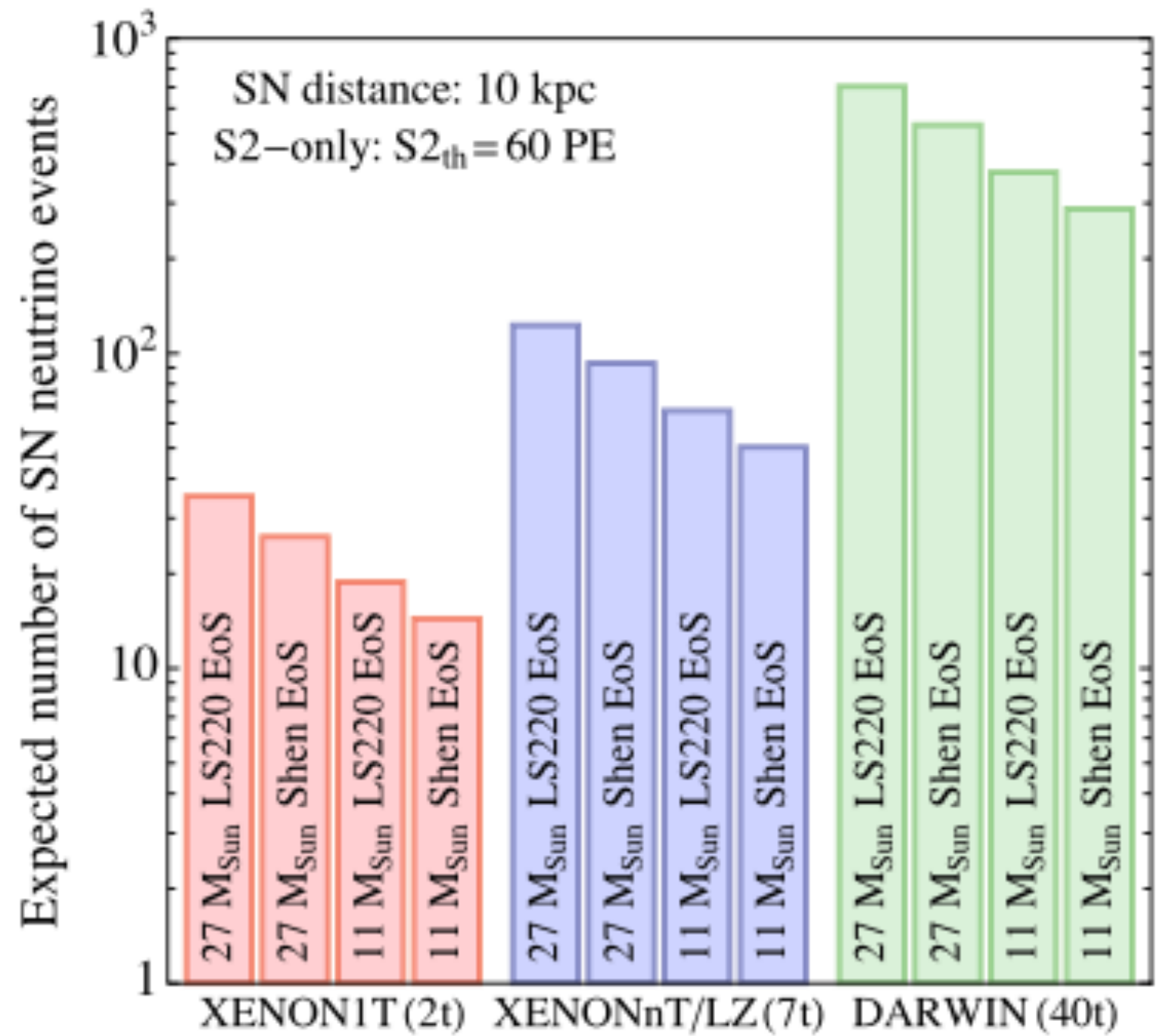
DARWIN, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 12, 1133

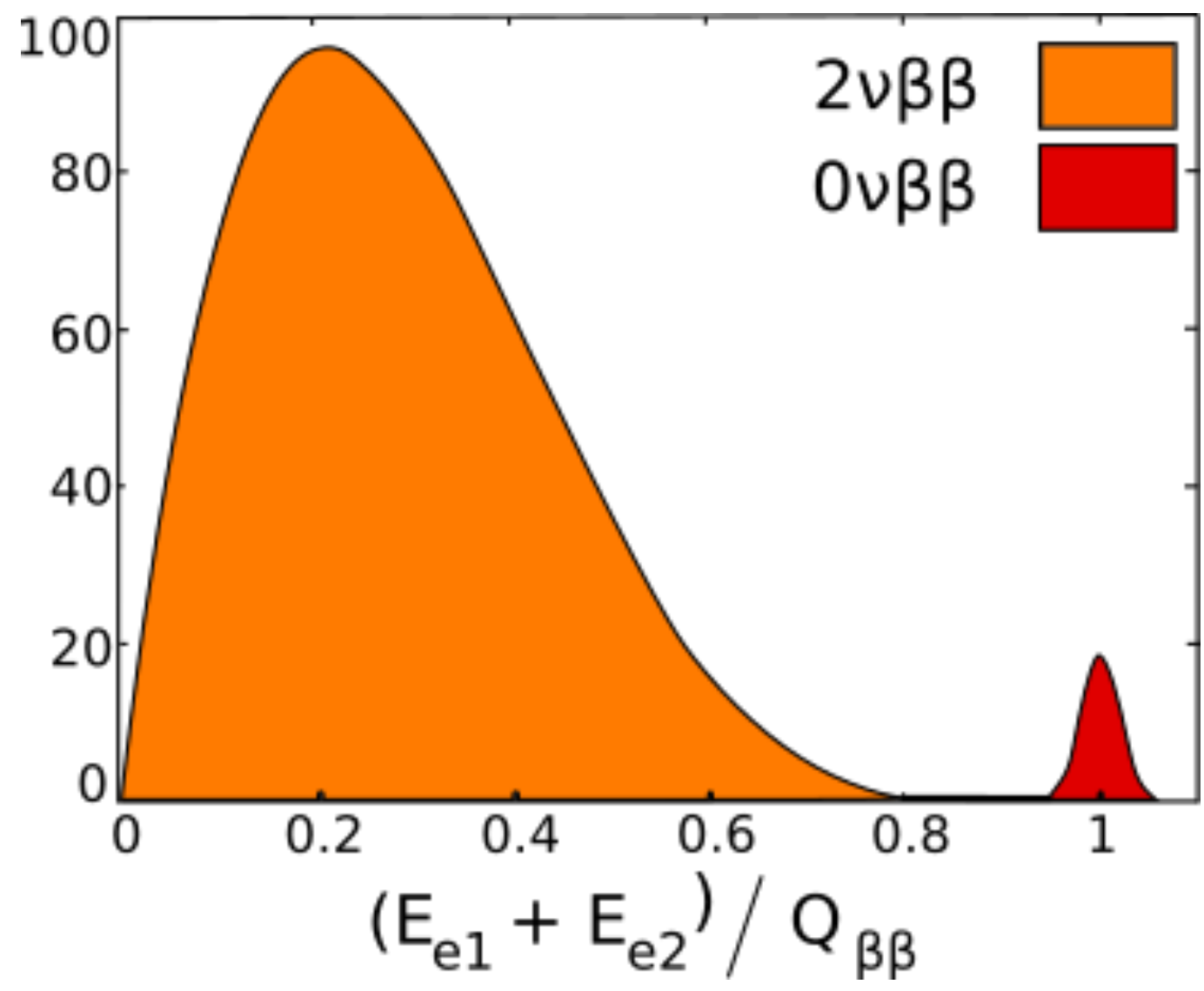
DARWIN: 液体キセノン40トン有効質量

Coherent ν elastic scatteringを通して観測(すべてのflavor)

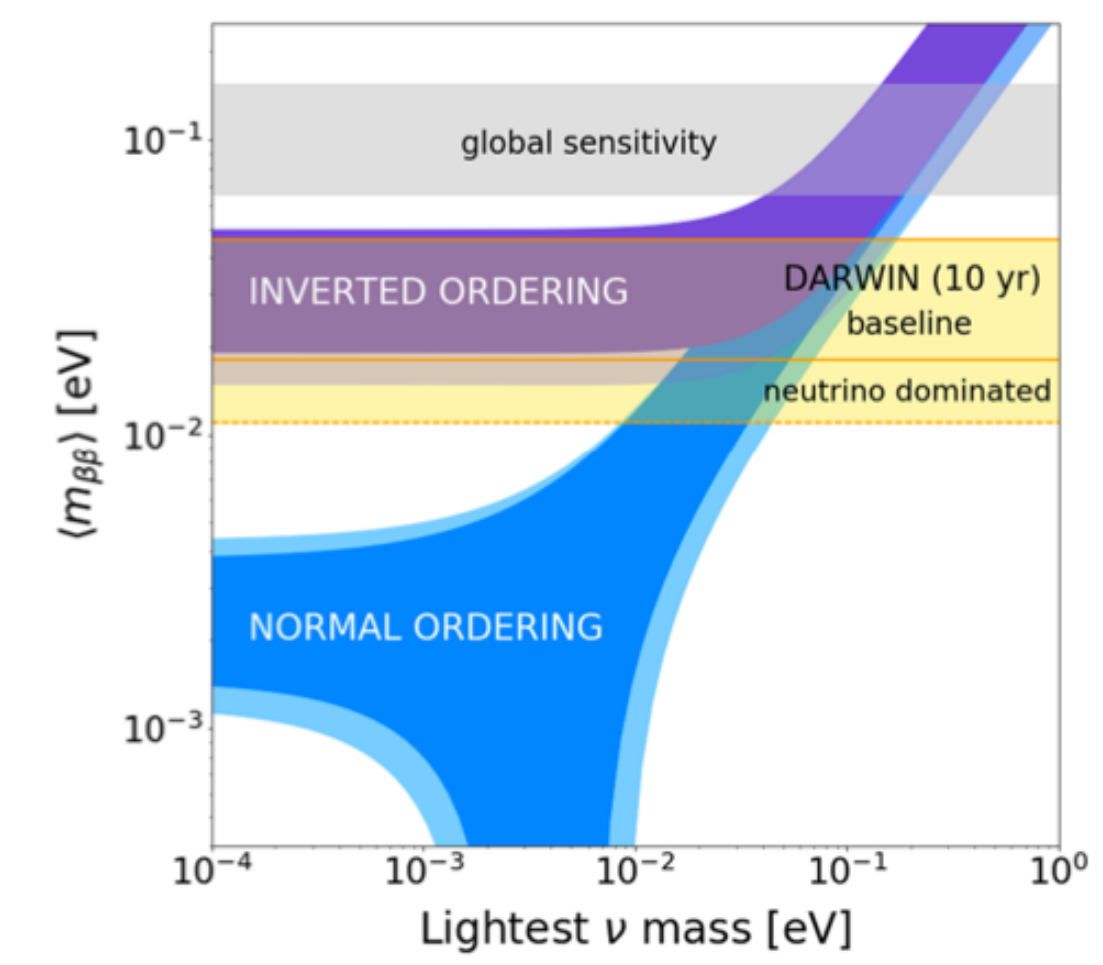
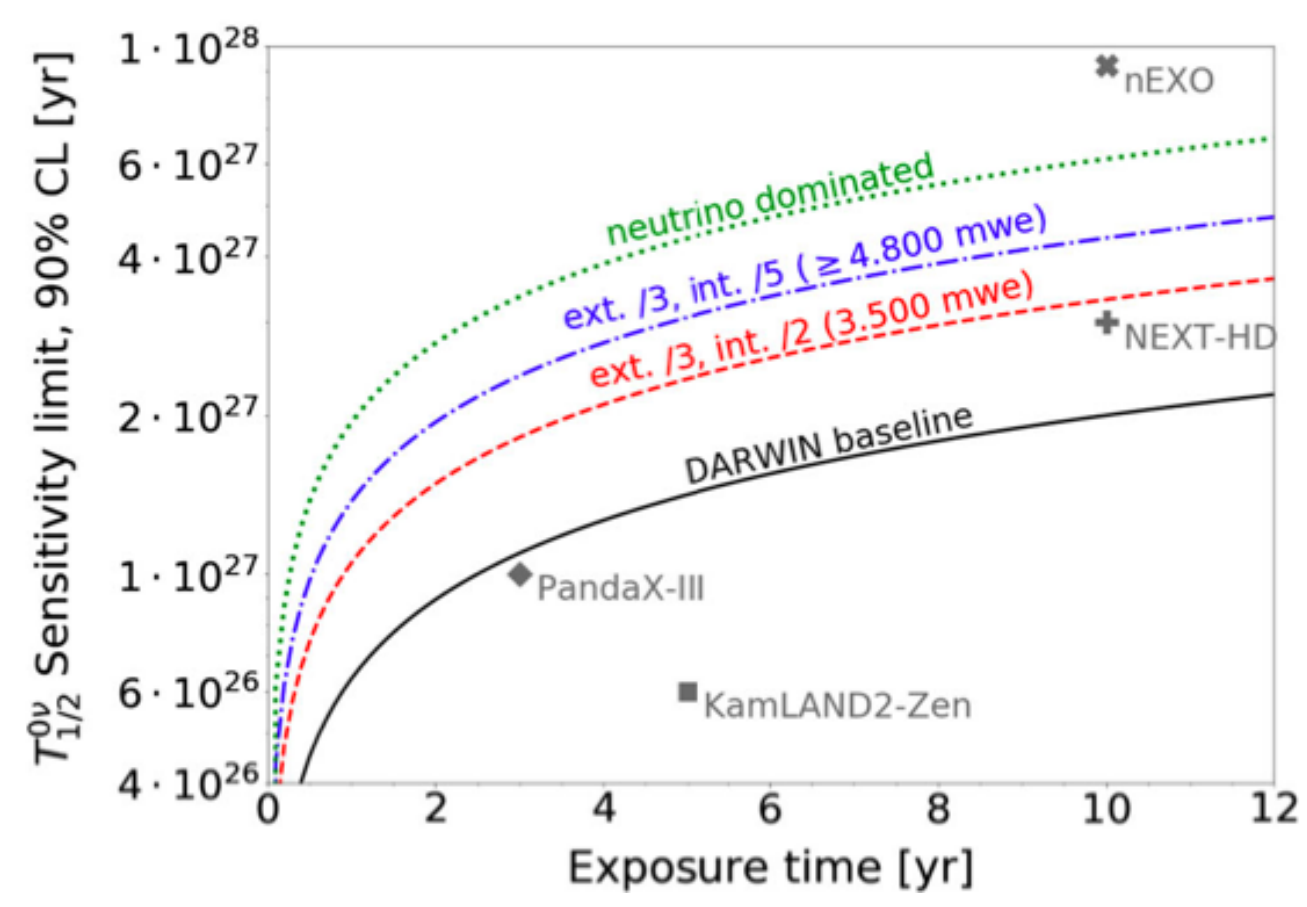
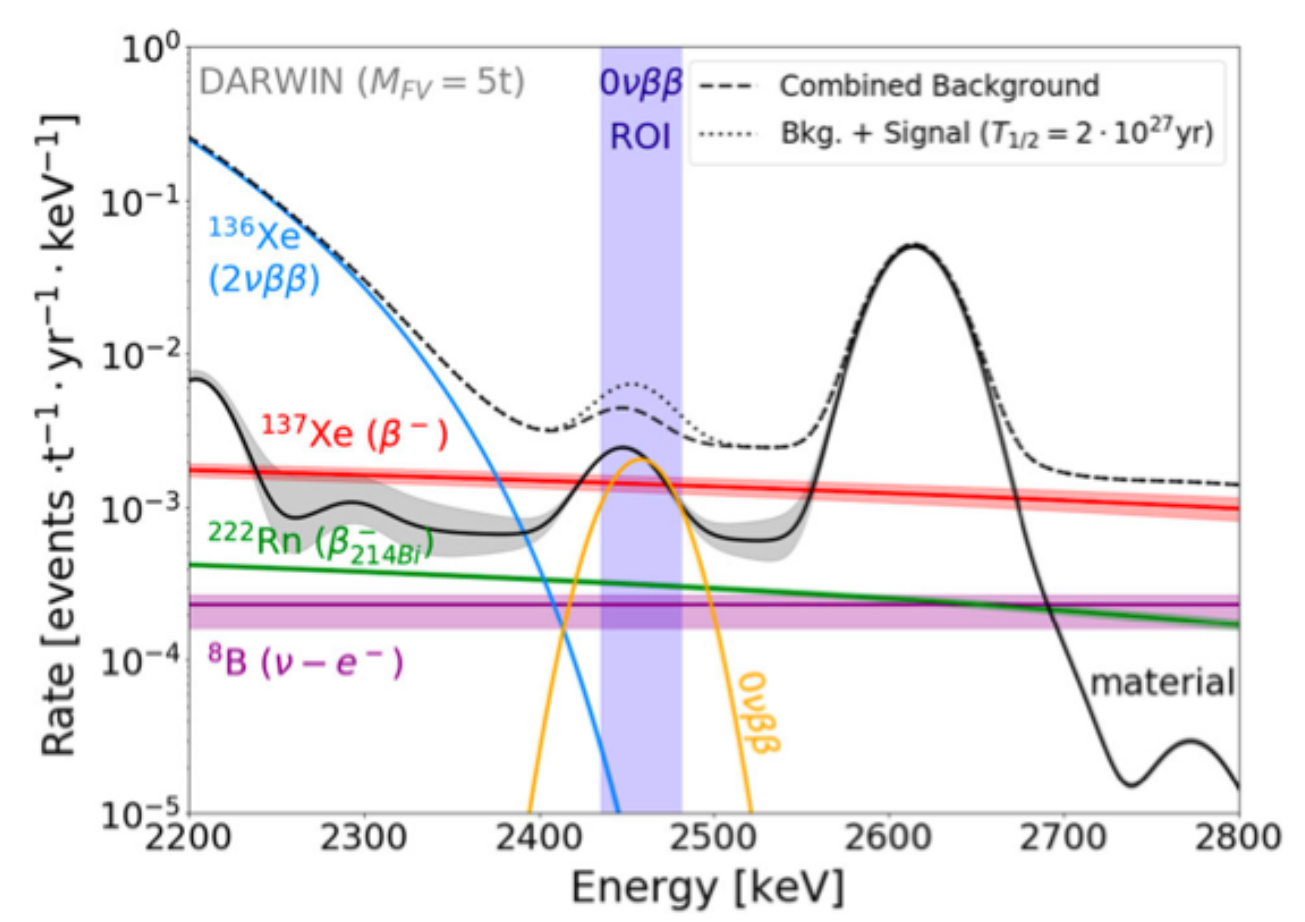
$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_N}{4\pi} Q_W^2 \left(1 - \frac{m_N E_R}{2E_\nu^2}\right) F^2(E_R),$$

S2-only analysis (~3電離電子, 原子核反跳エネルギー ~ 1keV)





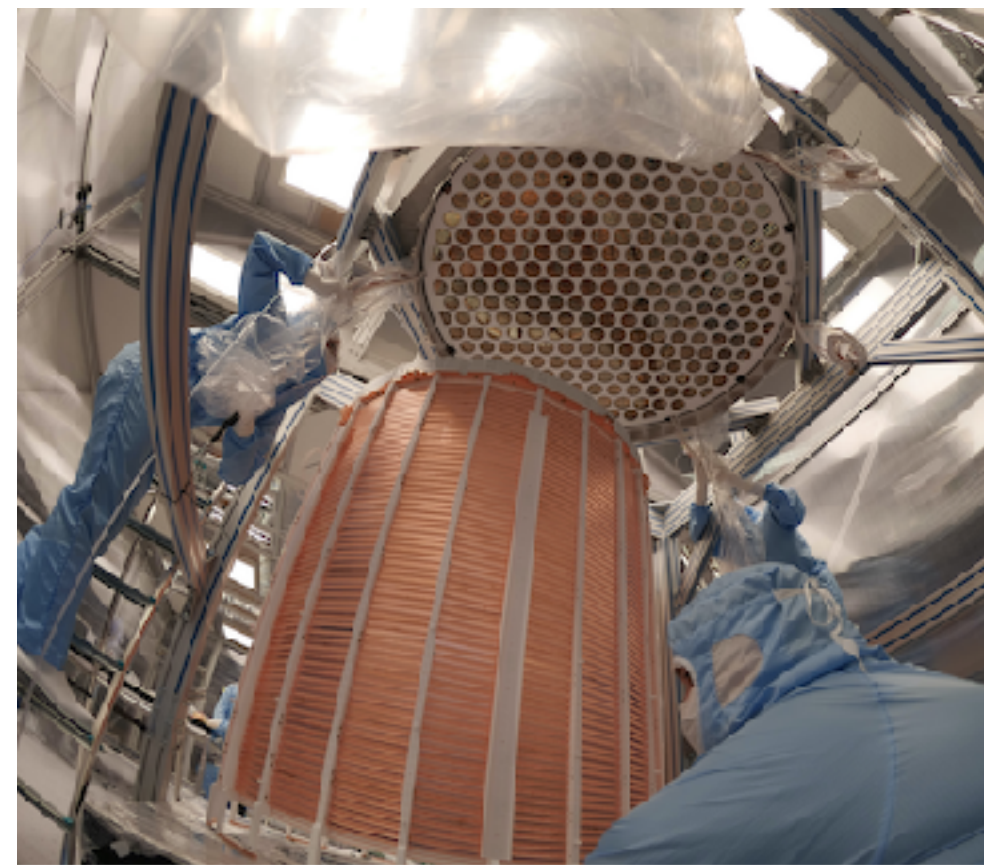
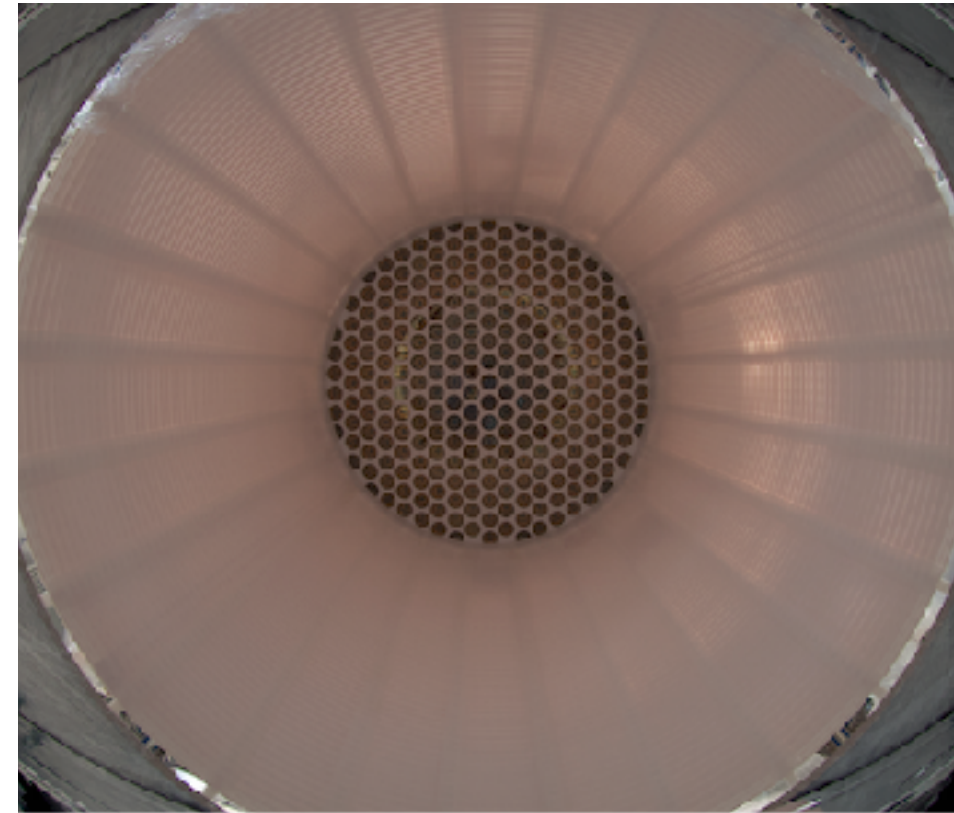
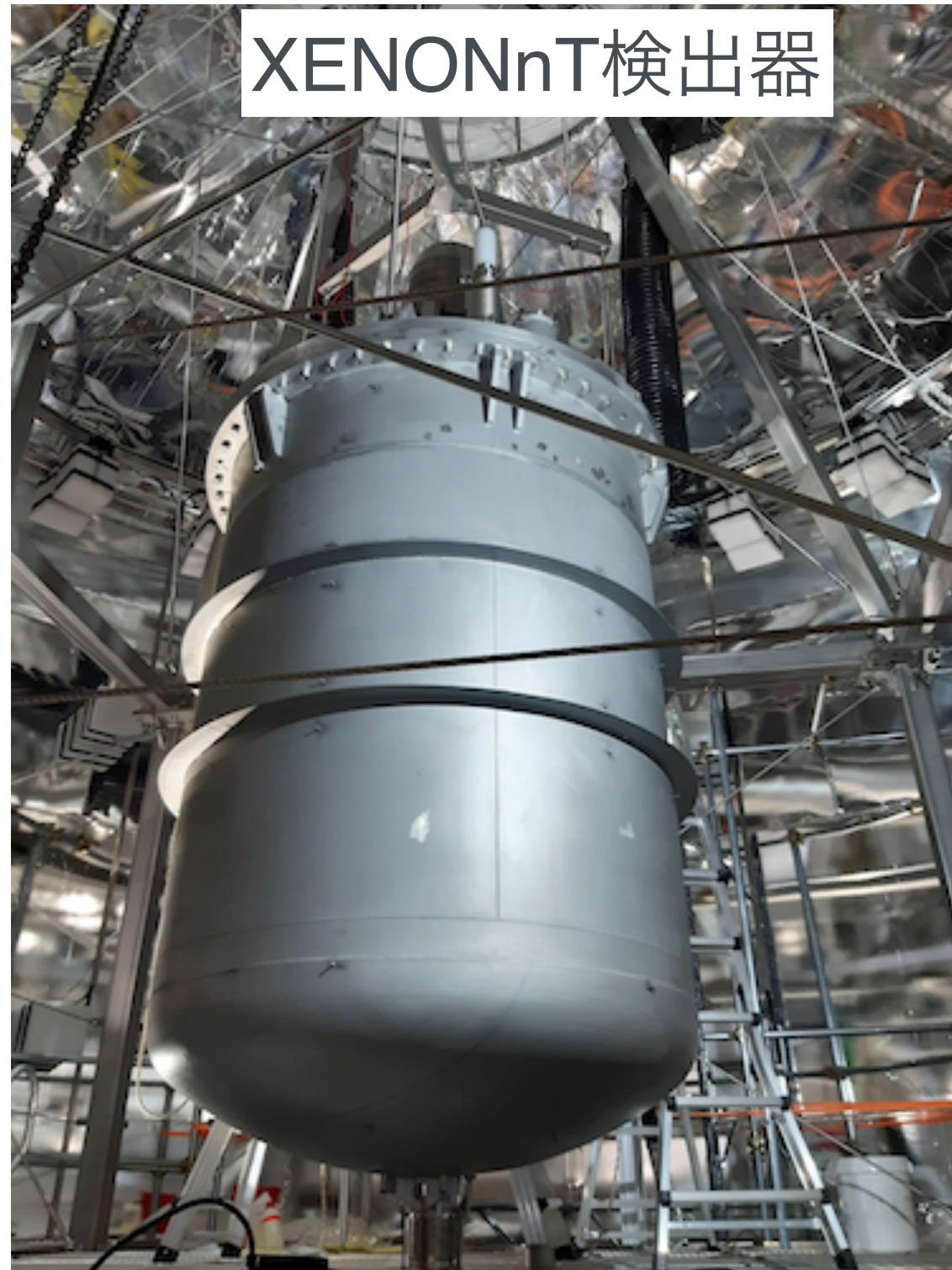
- Test of **lepton flavour conservation**
- ^{136}Xe is a $0\nu\beta\beta$ candidate with **8.9%** natural abundance
- Without isotopic enrichment:
 ~ 3.5 t of ^{136}Xe in DARWIN
- Peak at $Q_{\beta\beta}(^{136}\text{Xe}) = 2.458$ MeV



日本の貢献

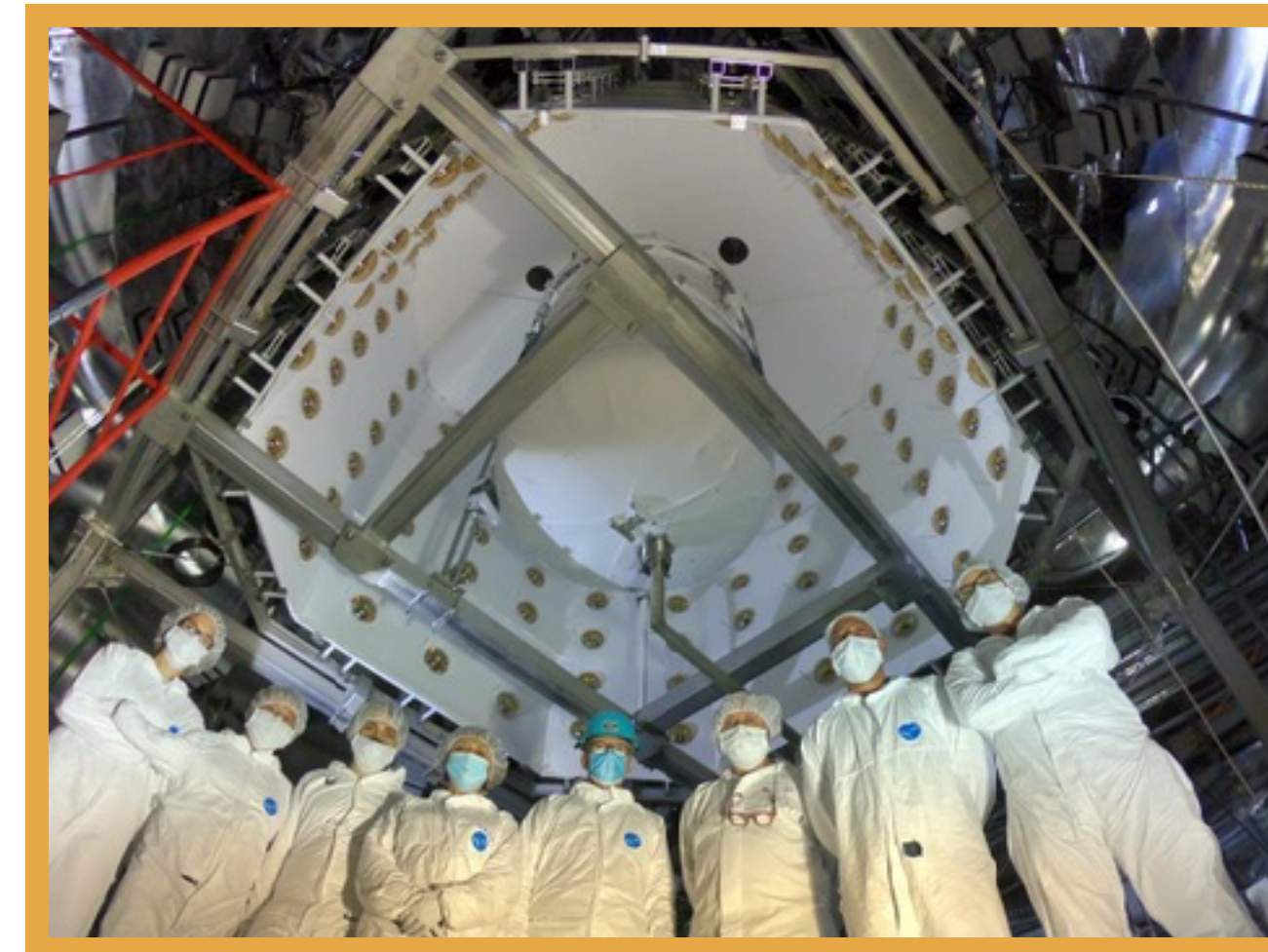
- ・XENONnT自身が物理探索をしながらDARWINの下準備になっている。
- ・日本の担当する液体キセノン純化、中性子カウンターが非常にうまく行っている。
(XENON1Tを大きく超える純度)
- ・2021年に初期成果を目指している。

Credit: Luigi Di Carlo for the XENON Collaboration



LXe purification

- ・ Faster xenon cleaning
- ・ 5 L/min LXe (2500 slpm)
- ・ XENON1T ~ 100 slpm

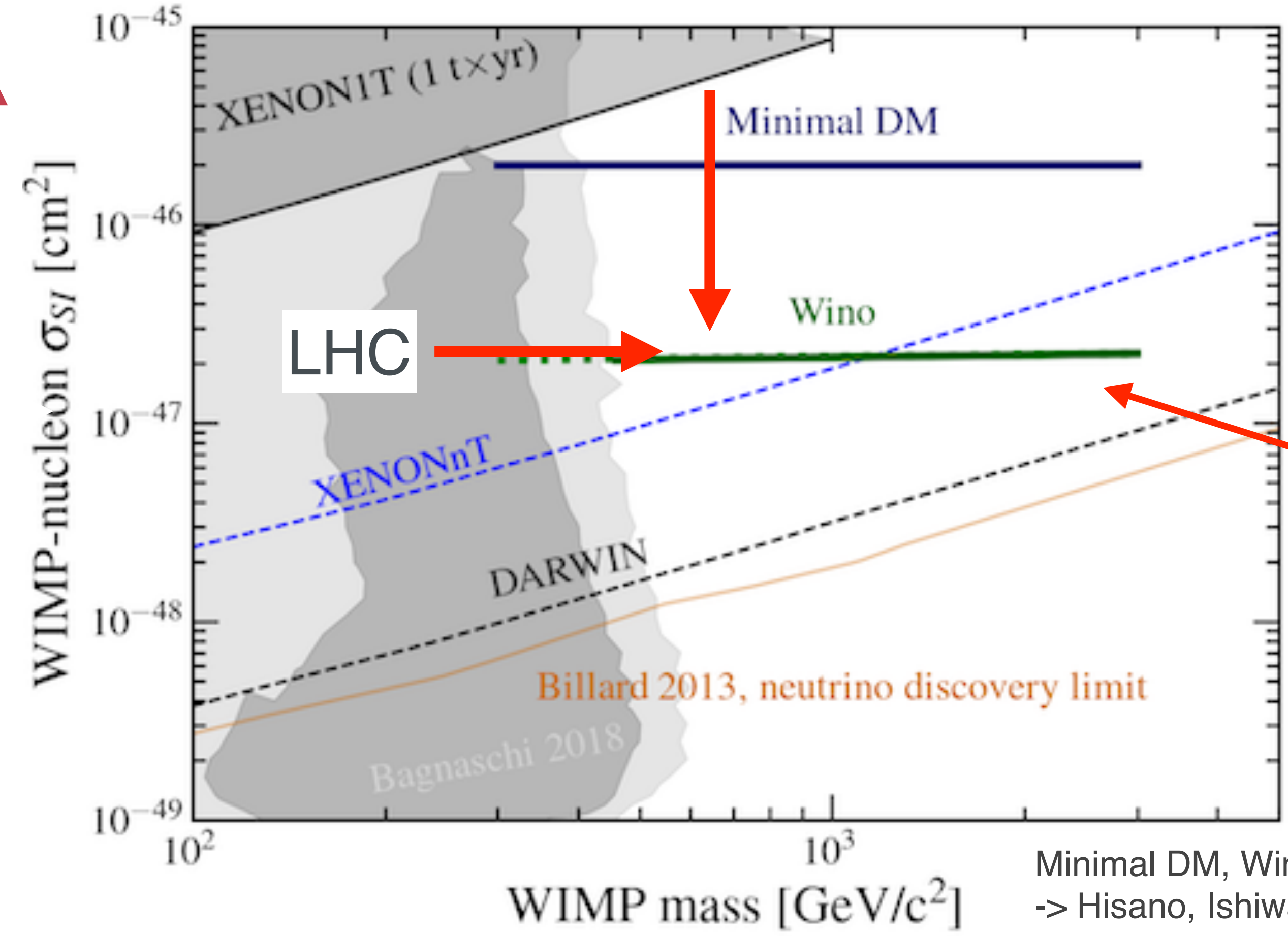
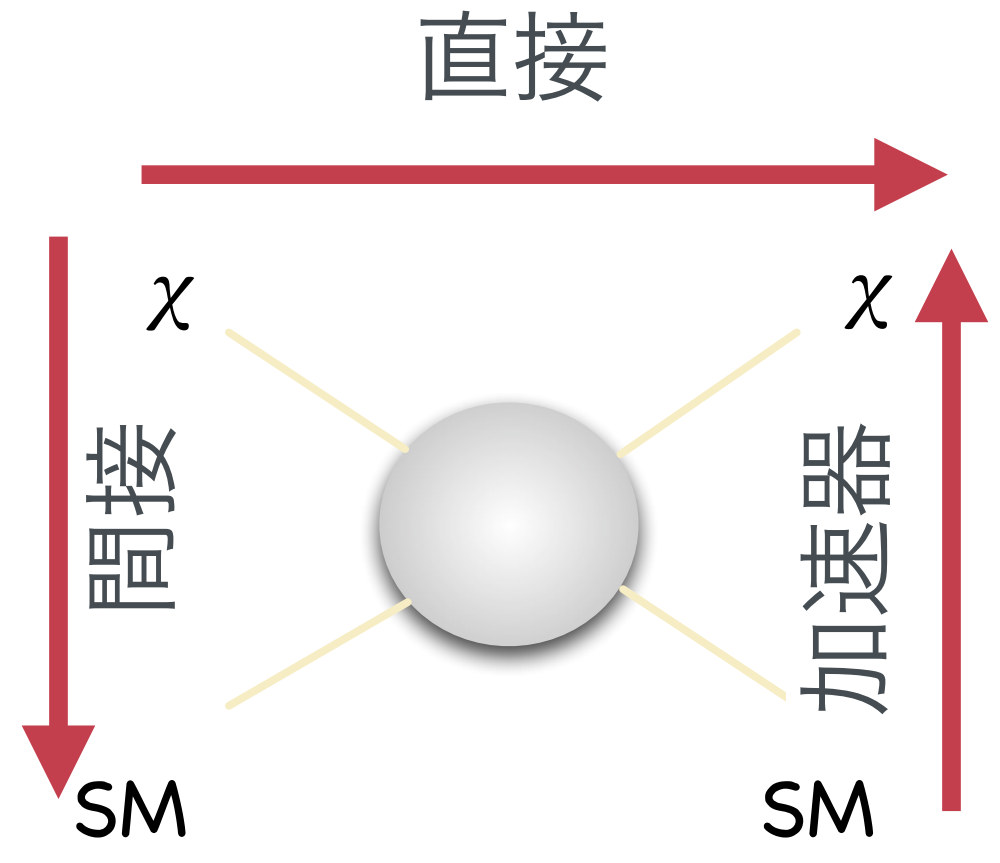


NVeto

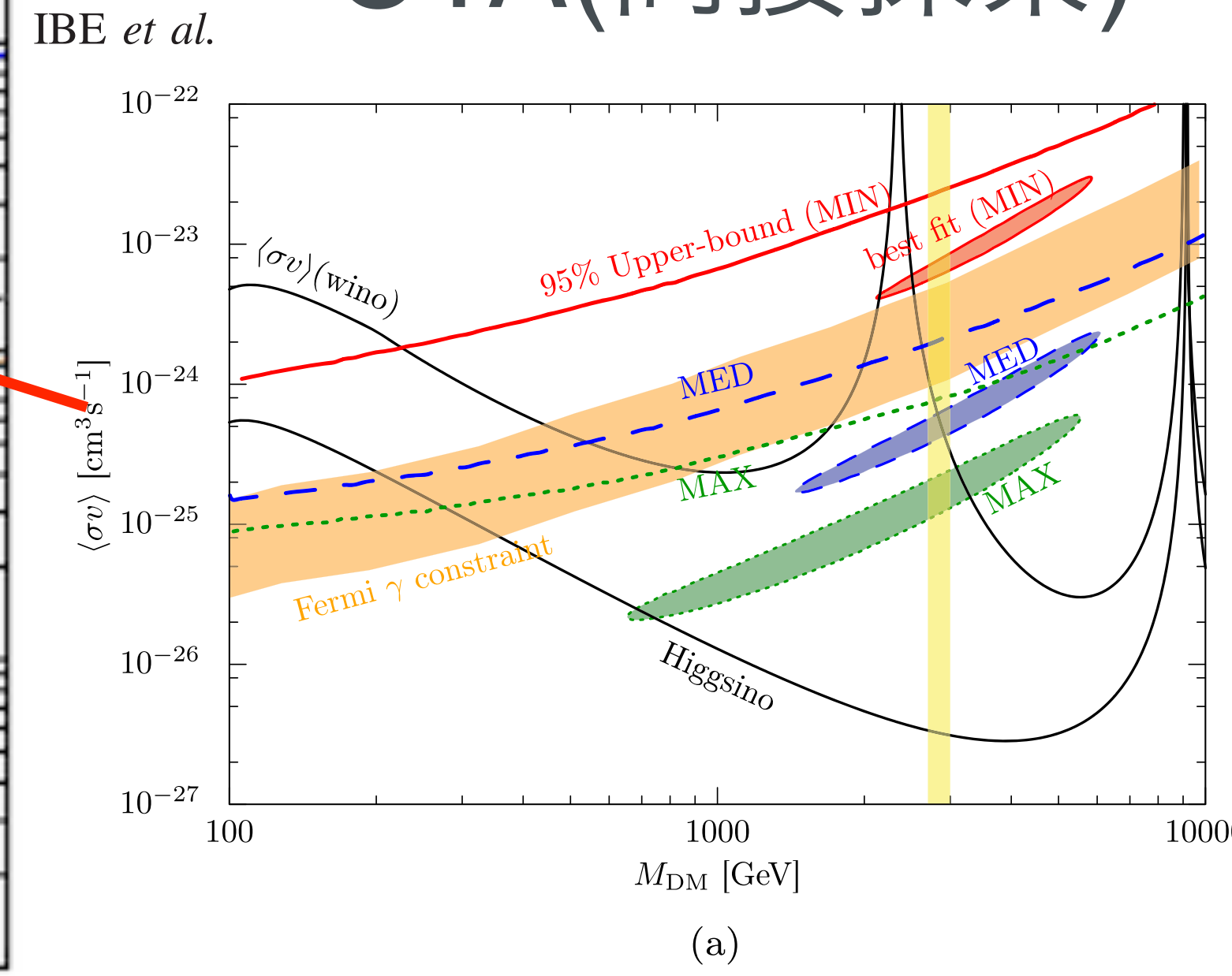
- ・ Inner region of existing muon veto
- ・ optically separate
- ・ 120 additional PMTs
- ・ Gd in the water tank
- ・ 0.5 % $Gd_2(SO_4)_3$

2020年代におけるWIMP - DM

CRCの活性化



CTA(間接探索)



Minimal DM, Wino
-> Hisano, Ishiwata, Nagata JHEP06(2015)097

DARWINに向けた国内の取り組み CRCの活性化

- ・宇宙線研地下神岡施設共同利用、Generation Three Consortium (G3C)の立ち上げ(2018)
(神戸大, 東大, 名古屋大, 日本大学, 横浜国立大)
- ・XMASSの時代からR13111の性能改善, 現在のXENON, LZ, Panda-XなどのPMTよりも一桁近く低バックグラウンドを実現している。
- ・その他、将来へ向けた光センサーの開発

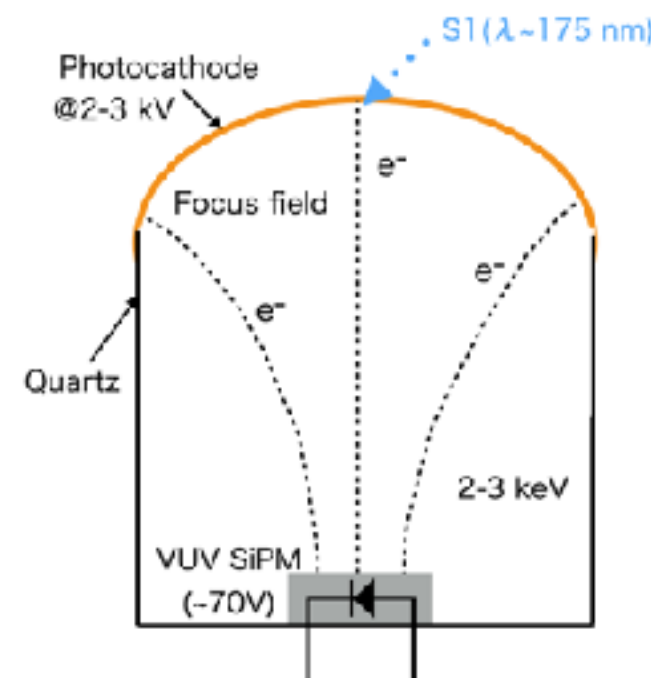
Hamamatsu R13111

K. Abe et al. JINST 15 P09027



この分野で最も放射性不純物が最も小さい3インチ光電子増倍管

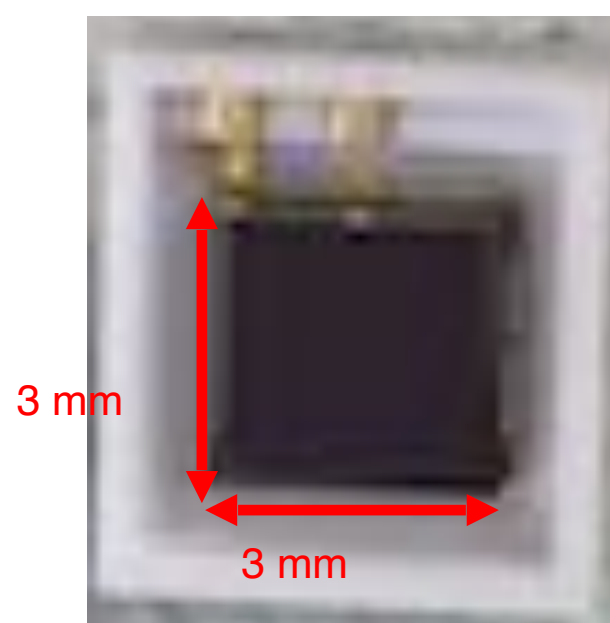
Hybrid Photosensor (PMT+SiPM)



SiPMを電子検出器として使用部材を究極に減らす。
プロトタイプ試験終了
要一電極改善 (収集効率)

低Dark Noise SiPM

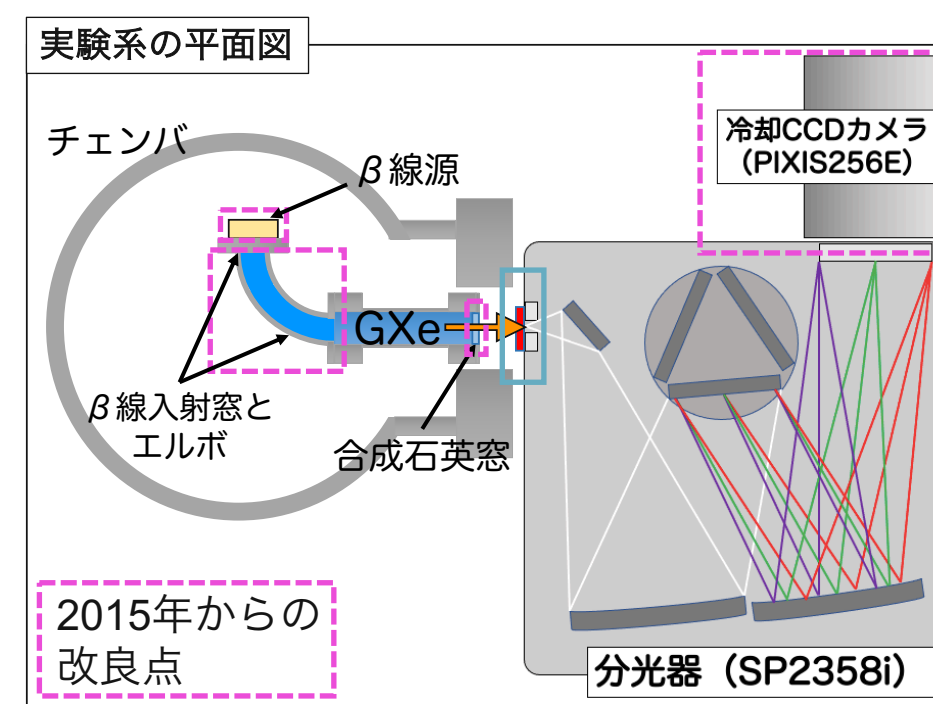
Ozaki et al. JINST 16 P03014



従来のものに比べ1桁以上
Dark Noiseの改善
VUV版を今後入手
+低放射能下

LXeの近赤外領域での発光

Set up@横国



β線励起によるGXeのNIR発光スペクトル測定の実験系

液体Xeの赤外発光の測定
新しい粒子弁別や時間情報の改善の可能性

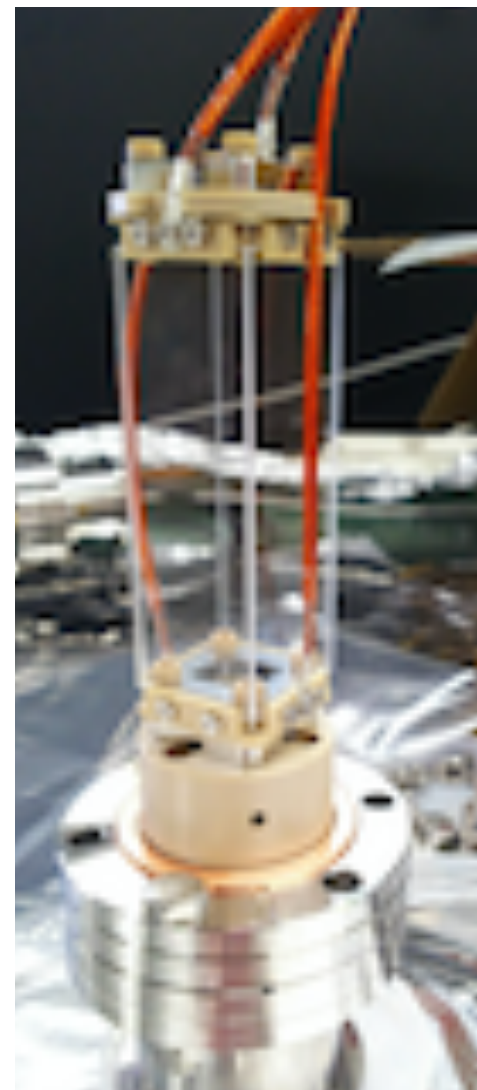
DARWINに向けた国内の取り組み

- ・宇宙線研地下神岡施設共同利用、Generation Three Consortium (G3C)の立ち上げ(2018) (神戸大, 東大, 東北大, 名古屋大、横浜国立大)
- ・ XMASSの時代からR13111 の性能改善, 現在のXENON,LZ, Panda-XなどのPMTよりも一桁近く低バックグラウンドを実現している。
- ・その他、将来へ向けた光センサーの開発

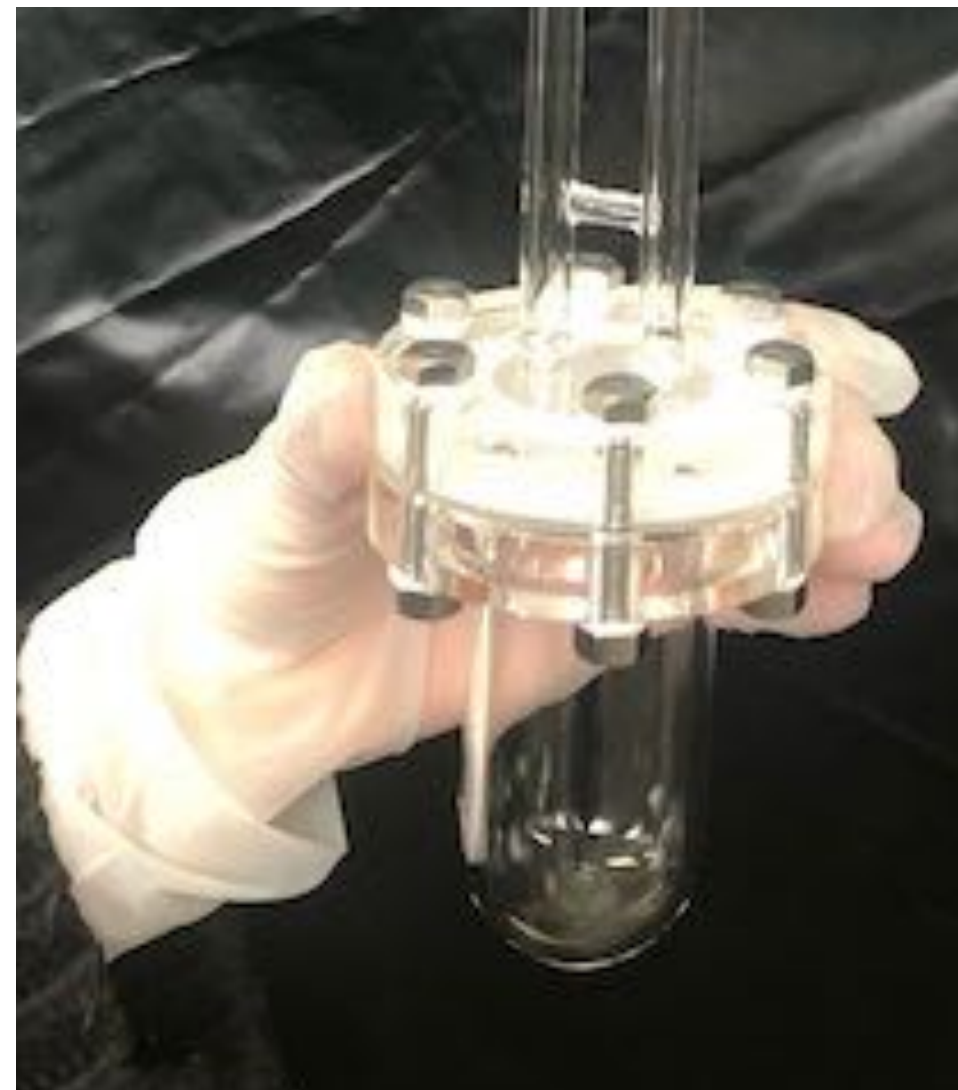
CRCの活性化

密閉型Time Projection Chamber

Sato et al. PTEP 2020 113H02



Set up@名古屋大



Set up@神岡

- 内部メインバックグラウンドであるラドンを遮蔽するための密閉型TPCの開発
- 質量の小さい暗黒物質探索を展開 (< 1GeV)
- 学生を中心に開発

次世代の実験に向けて世界で一つの究極のキセノン検出器を

2021/4/26,27 XENON/DARWIN, LUX-ZEPLIN meeting
<https://indico.cern.ch/event/1028794/>

2021/7/6 : 16カ国 104名が署名
MOU締結: XENON, DARWIN, LUX-ZEPLIN(米国)

日本グループ: 神戸大学、東京大学、名古屋大学

Leading Xenon Researchers unite to build next-generation Dark Matter Detector

The XENON/DARWIN and LUX-ZEPLIN collaborations have now joined forces to work together on the design, construction, and operation of a new, single, multi-tonne scale xenon observatory to explore dark matter. The detector will be highly sensitive to a wide range of proposed dark matter particles and their interactions with visible matter. Over the last 20+ years, experiments using liquefied xenon targets have delivered world-leading results in the global quest for direct dark matter detection. This next-generation detector aims to continue the pursuit.

- ・White Paper 準備中
- ・サイトについては、Scientificな検討や、安全、環境への配慮、labのサポートを勘案してこれから決定していく。
- ・深度が浅いがインフラの整っている神岡地下施設も候補として検討して行く。

<https://www.ipmu.jp/ja/20210721-NextGenerationLiquidXenonDetector>

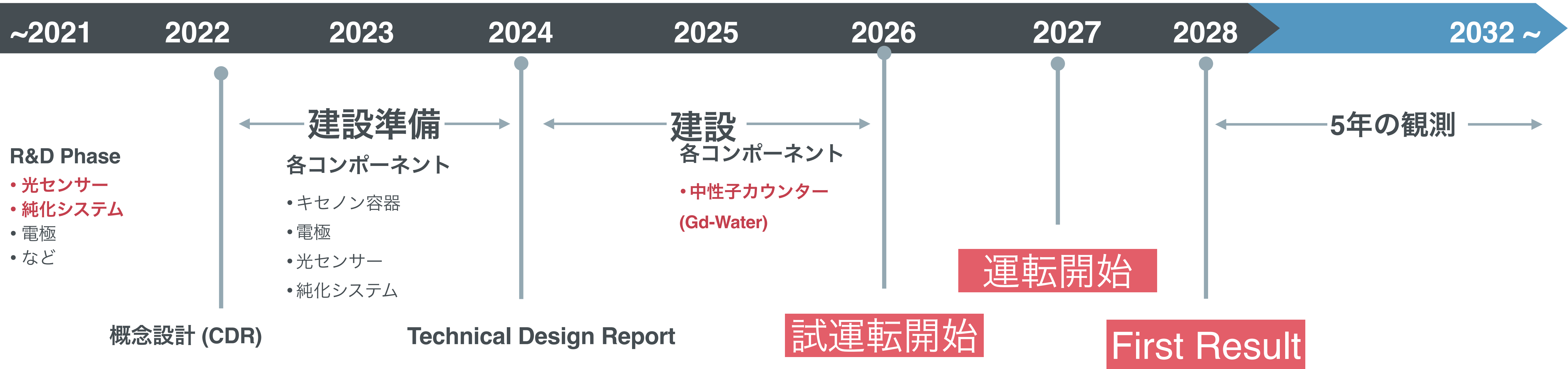
2021年7月21日
 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)

2021年7月20日、イタリアのグランサッソ国立研究所 (INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso) と米国のサンフォード地下研究所 (Sanford Underground Research Facility) は、ダークマターの直接探索を目指す XENON/DARWIN コラボレーションと LUX-ZEPLIN コラボレーションの研究者達が、次世代のダークマター直接探索実験に向けて共同で検出装置の設計、建設、運用を行うことを目的とする研究協力協定を2021年7月6日付で結んだことを発表しました。この研究協力協定には、16カ国から集まった104名の研究者が署名しており、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) の Kai Martens (カイ マルテンス) 主任研究者と山下雅樹 (やました まさき) 特任准教授も含まれています。また、日本からは他に名古屋大学や神戸大学の研究者も署名しています。

図. 液体キセノン次世代検出装置が取り組もうとしている研究課題の概要を示す。ダークマター直接探索のほかにも、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索、太陽アクシオン探索、太陽ニュートリノや大気ニュートリノ、超新星ニュートリノの観測等も行うことができる。(Credit: Next Generation Liquid Xenon Observatory)

DARWIN Time Line

R&D and construction parallel to XENONnT data taking



- 総予算: 約200億円
- 日本グループは光センサー開発及び調達、キセノン純化装置、中性子反同時検出器の貢献。5-10%の貢献を目指す。(大型科研費)
- 米国LUX-ZEPLINの参加により分担割合は調整の可能性あり。

キセノンガス (全体50トン)	172	億円
光検出器, クライオジェニクス, キセノン検出器, 水タンク, 純化設備	52	億円
合計	224	億円

- DARWIN実験は50トンの液体キセノンを用い断面積 10^{-49}cm^2 の感度を持つ
- WIMP探索と同時にニュートリノ観測, 二重ベータ崩壊探索を行う事が可能。
- XENON実験での長年の実績により、実現性が高い。
- 世界で一つの究極な検出器をつくらうという動きが開始した。日本もグループもサイン。
- 2027年の開始を計画している。

