

# 液体アルゴンによる Non-WIMP暗黒物質探索に関する考察

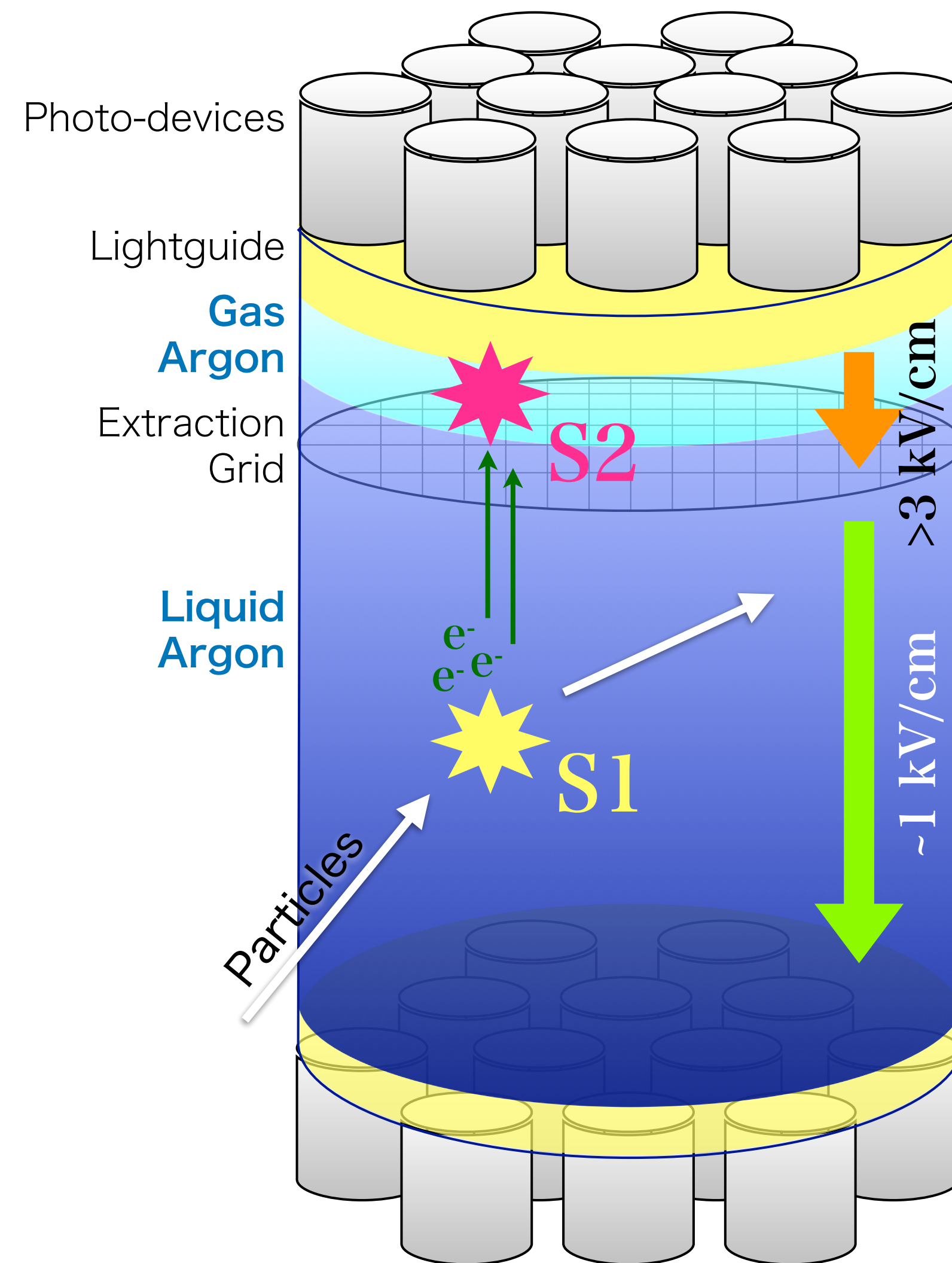
早稲田大学 (ANKOK Group)

木村 真人

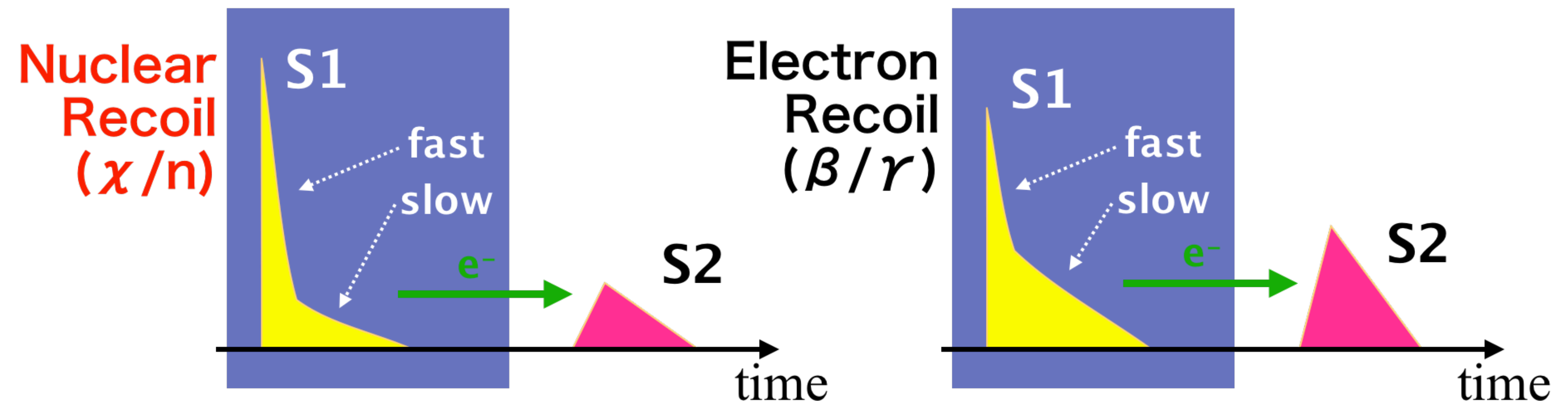
# LAr vs LXe<sup>2</sup>

	液体キセノン	液体アルゴン	
原子番号	54	18	— ○ 低質量WIMPに対して大きな反跳エネルギー
沸点	165 K	87 K	— ○ 高純度化が容易
密度	3.0 g/cm <sup>3</sup>	1.4 g/cm <sup>3</sup>	— ▲ 自己遮蔽力
W値	14.7 eV	19.5 eV	— ○ 同程度の観測光量・電子量を確立
蛍光波長	175 nm	128 nm	— ▲ 直接検出の困難 ⇔ 波長変換技術の確立, 新デバイス開発
蛍光時定数 (早)	4 ns	6 ns	— ○ 非常に優れた粒子識別能力 (電場の有無によらない)
蛍光時定数 (遅)	22 ns	1.6 μs	
長寿命RI	なし	<sup>39</sup> Ar (269yr)	— ▲ 極めて厄介な電子反跳背景事象源 ⇔ 精製・除去技術の開発
価格	~500,000円/kg	(~1,000円/kg)	— ○ <u>大気アルゴンであれば容易に入手可能</u>

# LAr Scintillation Detector



- 液体アルゴン中のシンチレーション光(S1)と、電離電子が誘発するエレクトロルミネセンス光(S2)を検出
  - 低エネルギー (数光子 or 1電子信号) 事象に有感
  - 3次元位置再構成能力 (光検出パターン ⊕ S1-S2時間差)
  - 電子反跳( $\beta / r$ )と原子核反跳(中性子/WIMP/( $\alpha$ ))の識別  
: S1波形弁別 (PSD) ⊗ 電離蛍光比 (S2/S1)





# 粒子識別

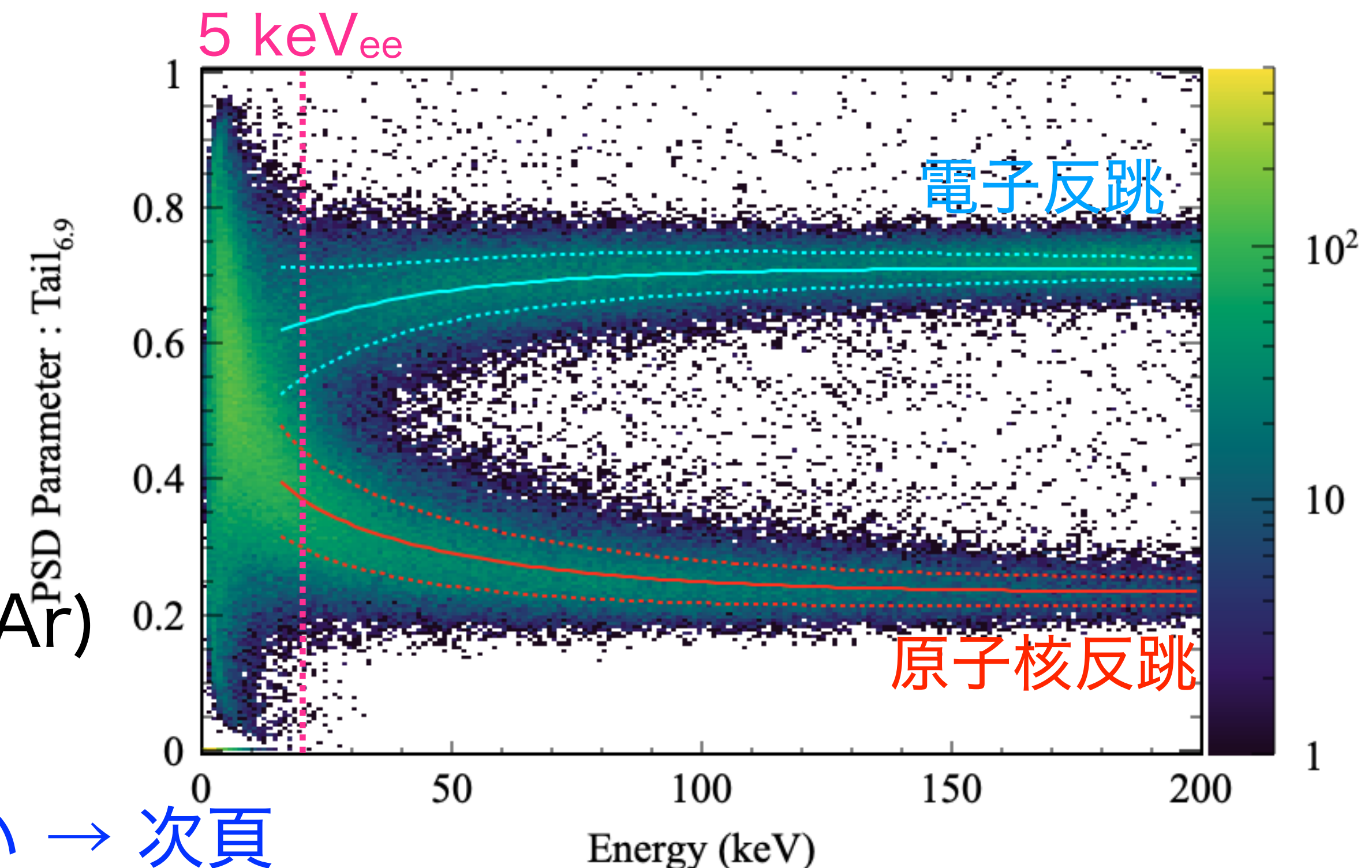
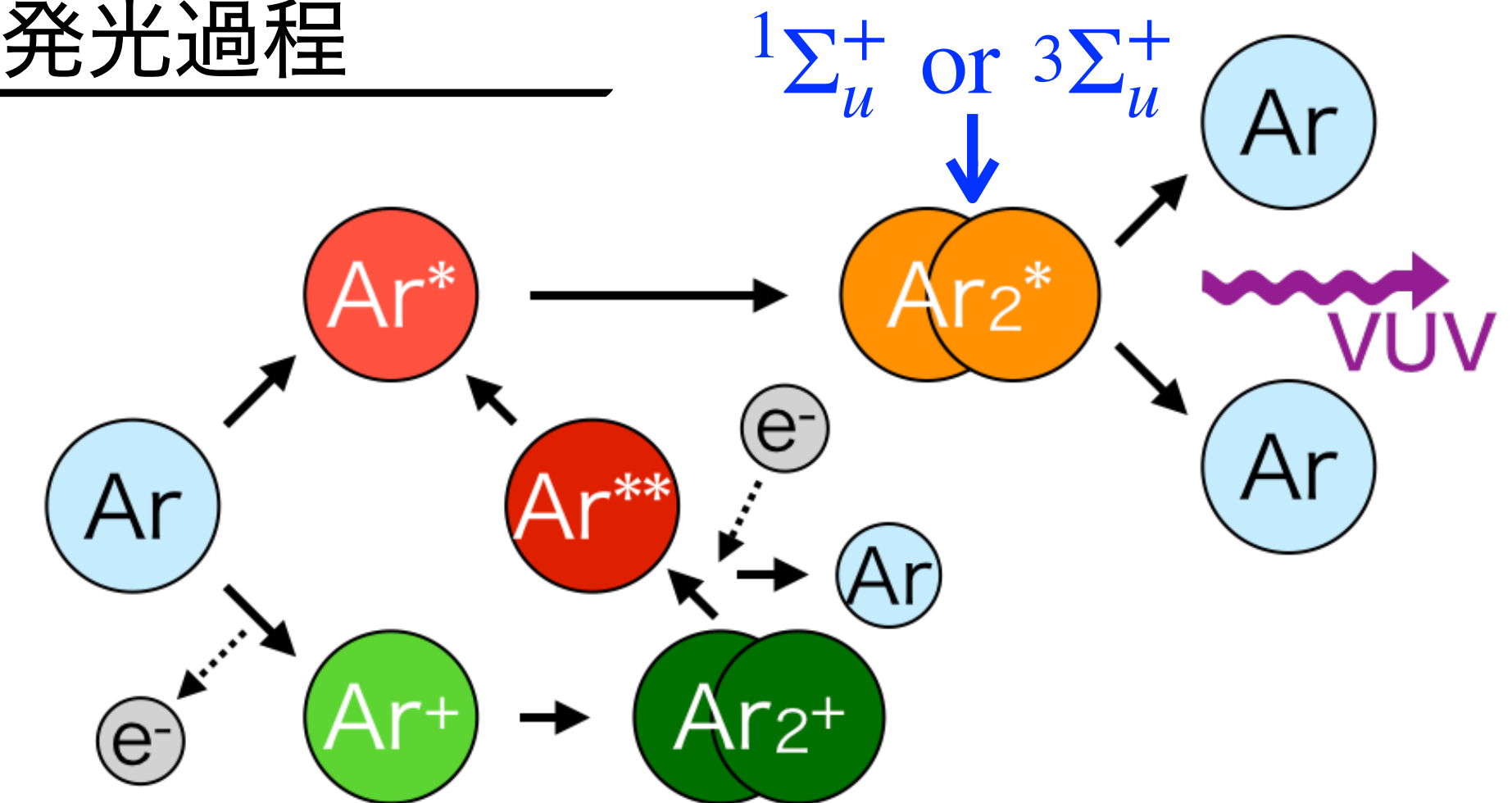
- 液体アルゴン分子の励起状態は  $dE/dx$  やエネルギー損失量に強く依存 (スピン一重項 or スピン三重項)
- 2つの励起状態で崩壊時定数は  $>100$  倍異なる

→ シンチレーション光波形による  
非常に優れた事象弁別

- 電場の有無に関わらず機能
- 分離能力は観測光量に比例して向上
- 非物理的な事象も効率的に除去
- Standard-WIMP探索の強力な武器 (対 $^{39}\text{Ar}$ )

⇔ 電子反跳信号の探索に対しては  
別のアプローチを採らなければならない → 次頁

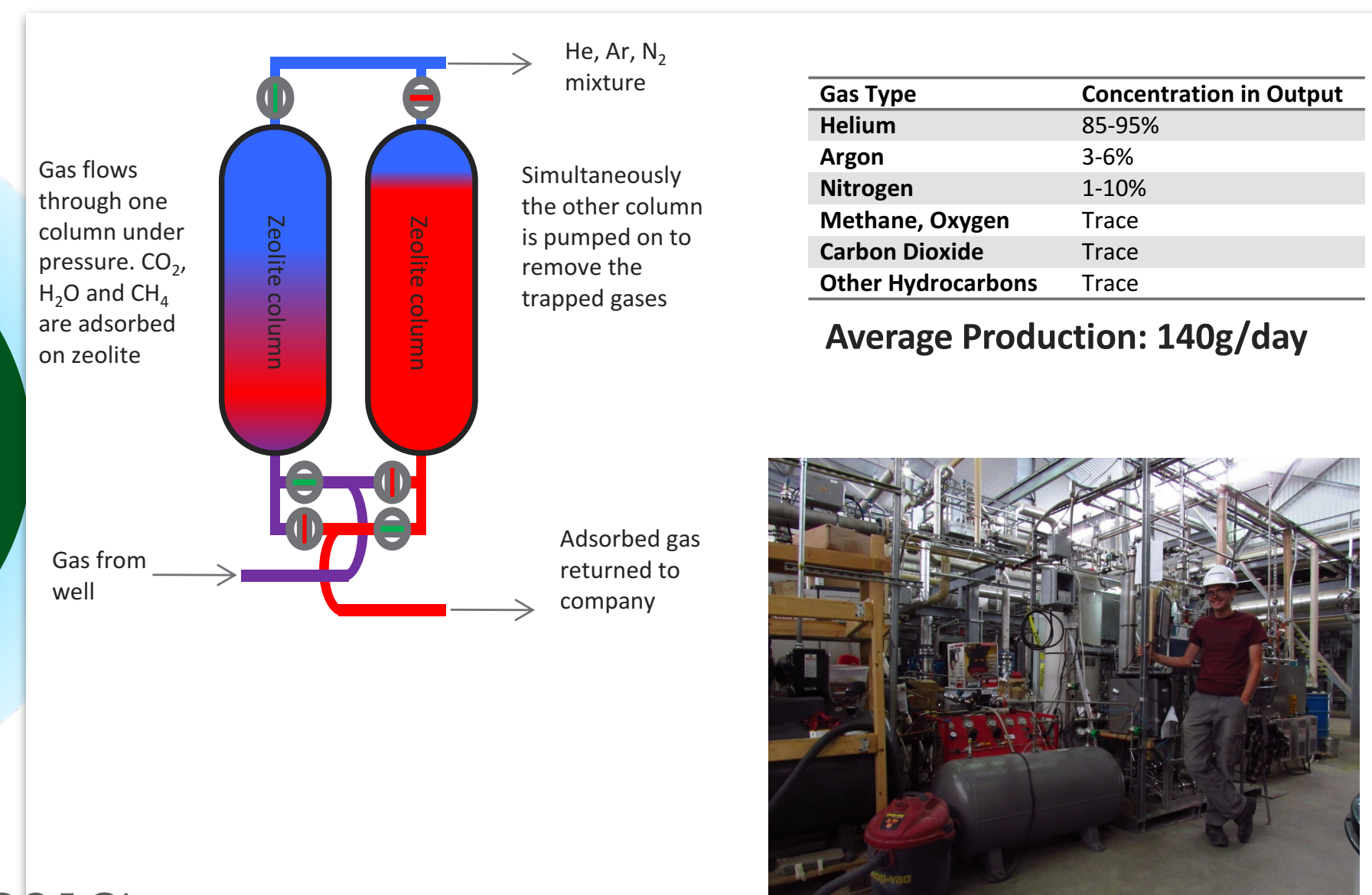
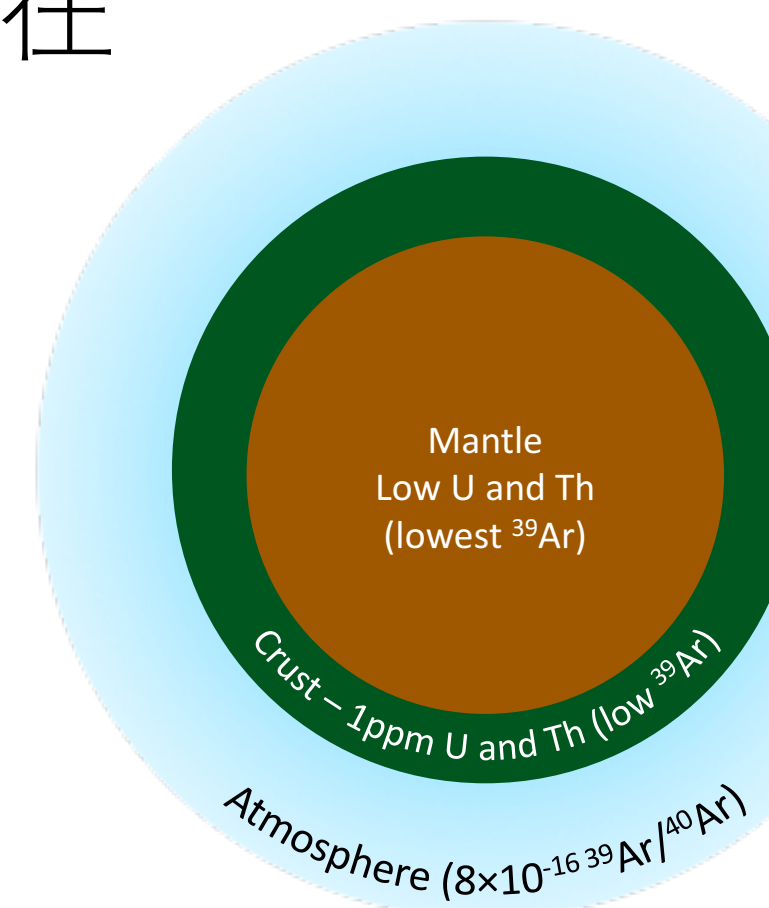
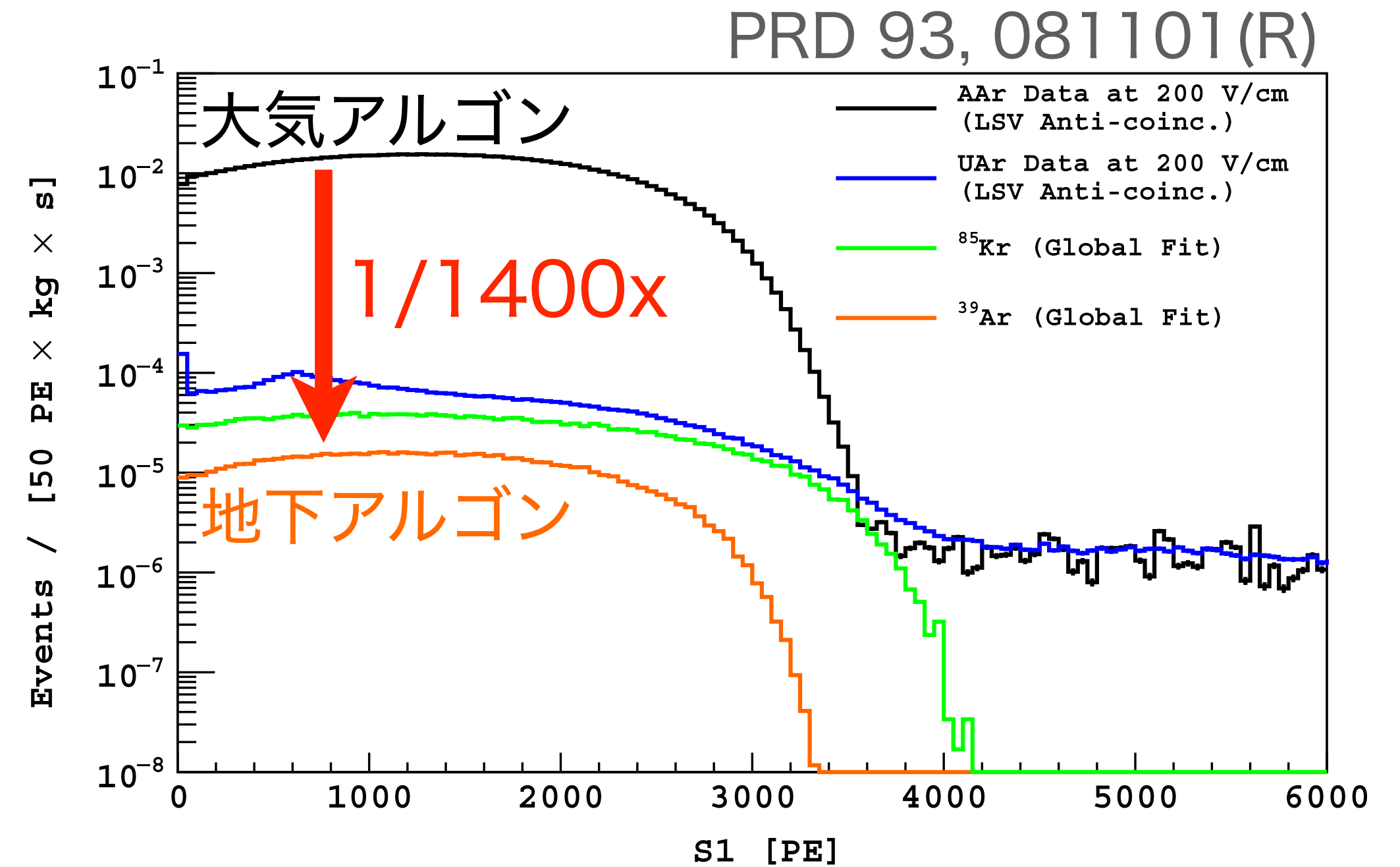
発光過程





# 背景事象源

- 最大の電子反跳背景事象源： $^{39}\text{Ar}$ 
  - Cosmogenic  
:  $(^{40}\text{K} + e^- \Rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e + \gamma)$ ,  
 $^{40}\text{Ar}(n, 2n)^{39}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}(\mu, d)^{39}\text{Cl}$ , etc.
  - $t_{1/2} = 269 \text{ yr}$ ,
  - $Q_\beta = 565 \text{ keV}$
  - 通常 (大気アルゴン中),  $1 \text{ Bq/kg}$  で存在
- “Depleted Argon” (by DarkSide-50)  
:  $^{39}\text{Ar} = 0.7 \text{ mBq/kg}$ 
  - 地下ガス田の $\text{CO}_2$ 中のアルゴンを抽出  
( $\text{CO}_2$ 中に400 ppm)
  - 精製実績 = 140 g/day



Thomas Alexander  
(@LRUA Workshop 2018)

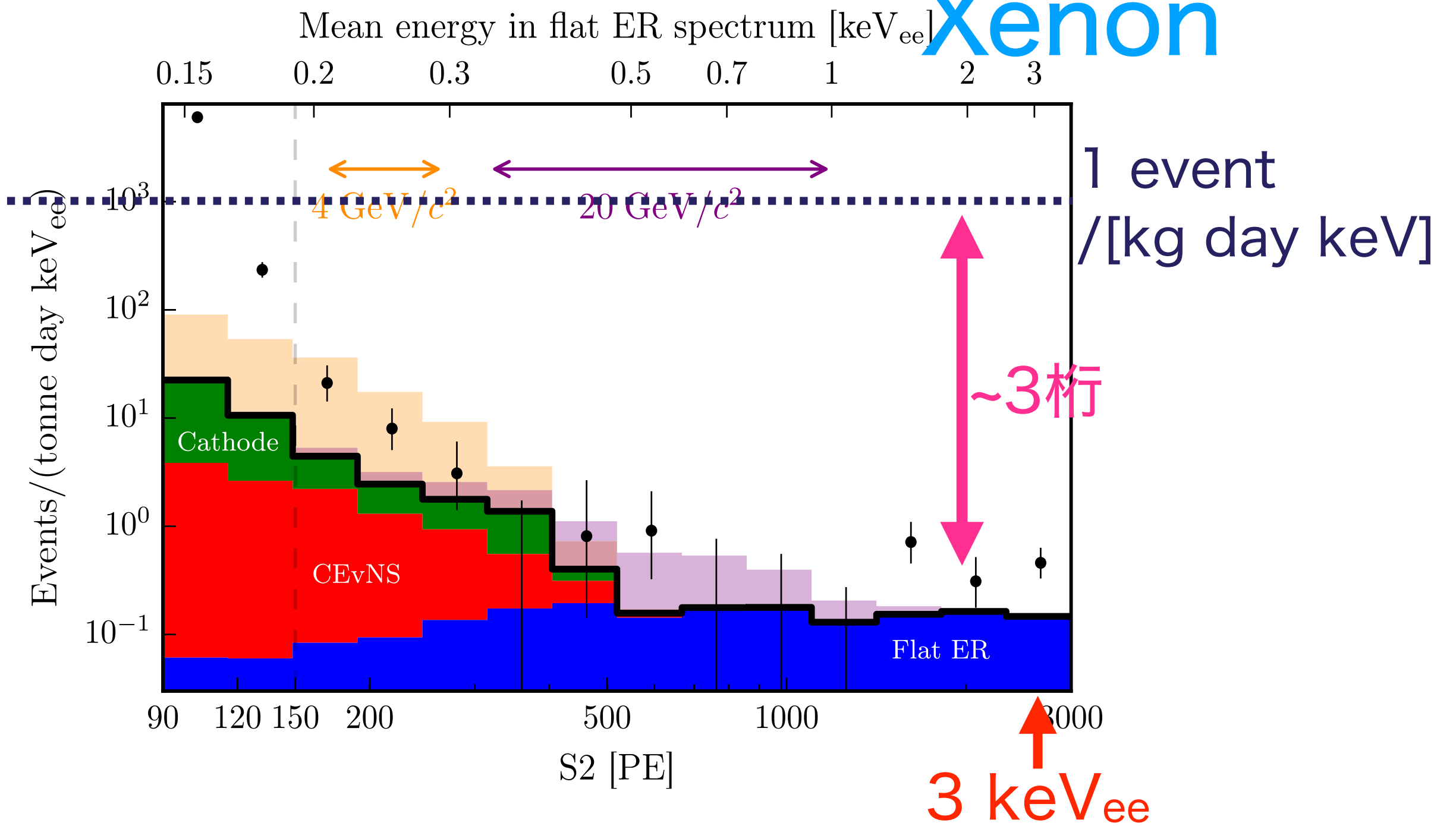
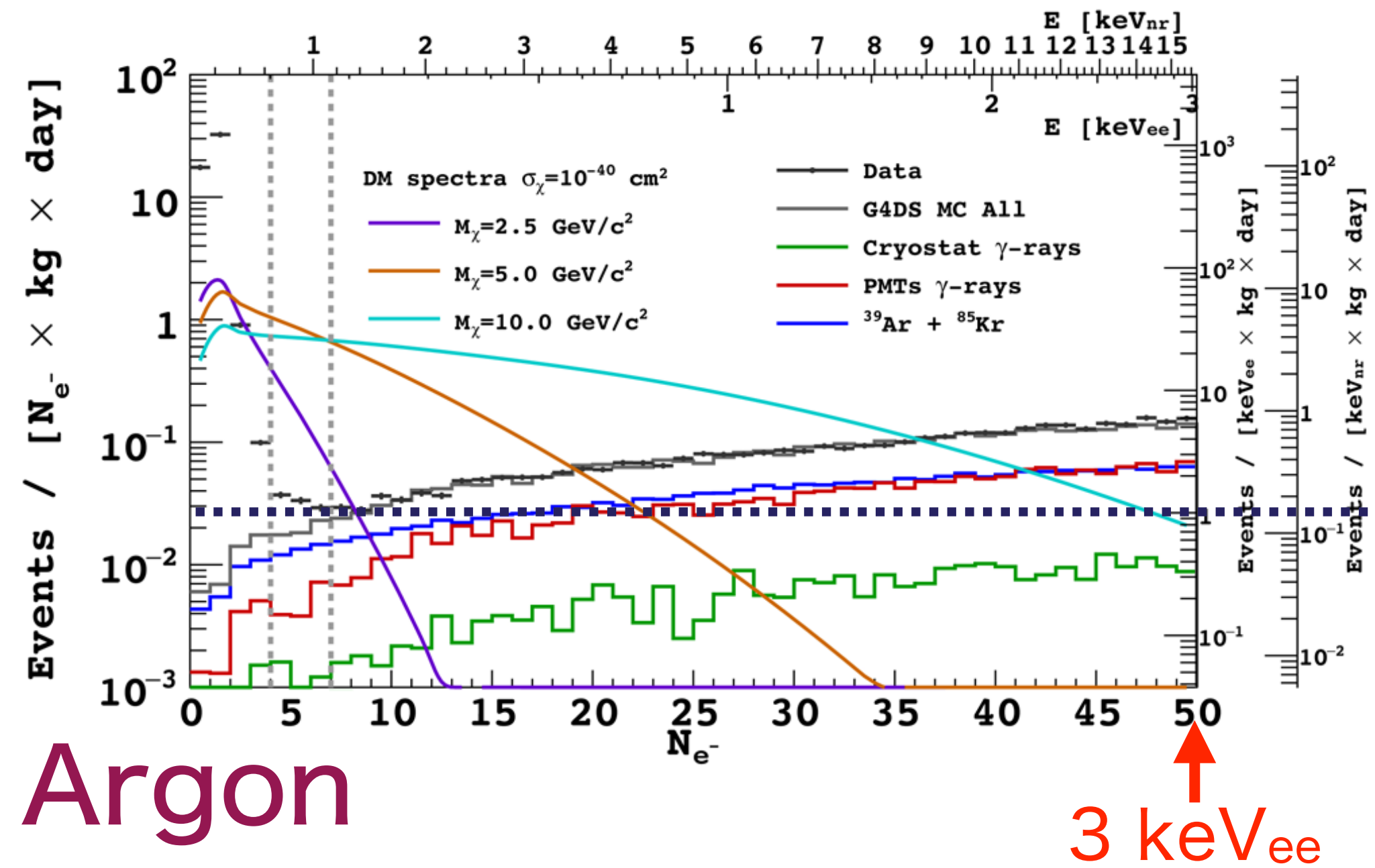
Argon : DarkSide-50 (PRL 121 081307)

Xenon : XENON1T (PRL 123 251801)

# LAr vs LXe <sup>6</sup>

## ( $\leq 3$ keV<sub>ee</sub>)

Xenon



- Depleted-Argonを用いた場合でも、LAr検出器の事象レートは約3桁高い
  - 原子番号の小ささ (i.e.反跳エネルギーの大きさ) に帰して、Low-Mass WIMP (1.8–3.5 GeV/c<sup>2</sup>) に対してはより高い感度を持っている
- 電子反跳稀信号の探索には、さらなる<sup>39</sup>Arの除去が不可欠

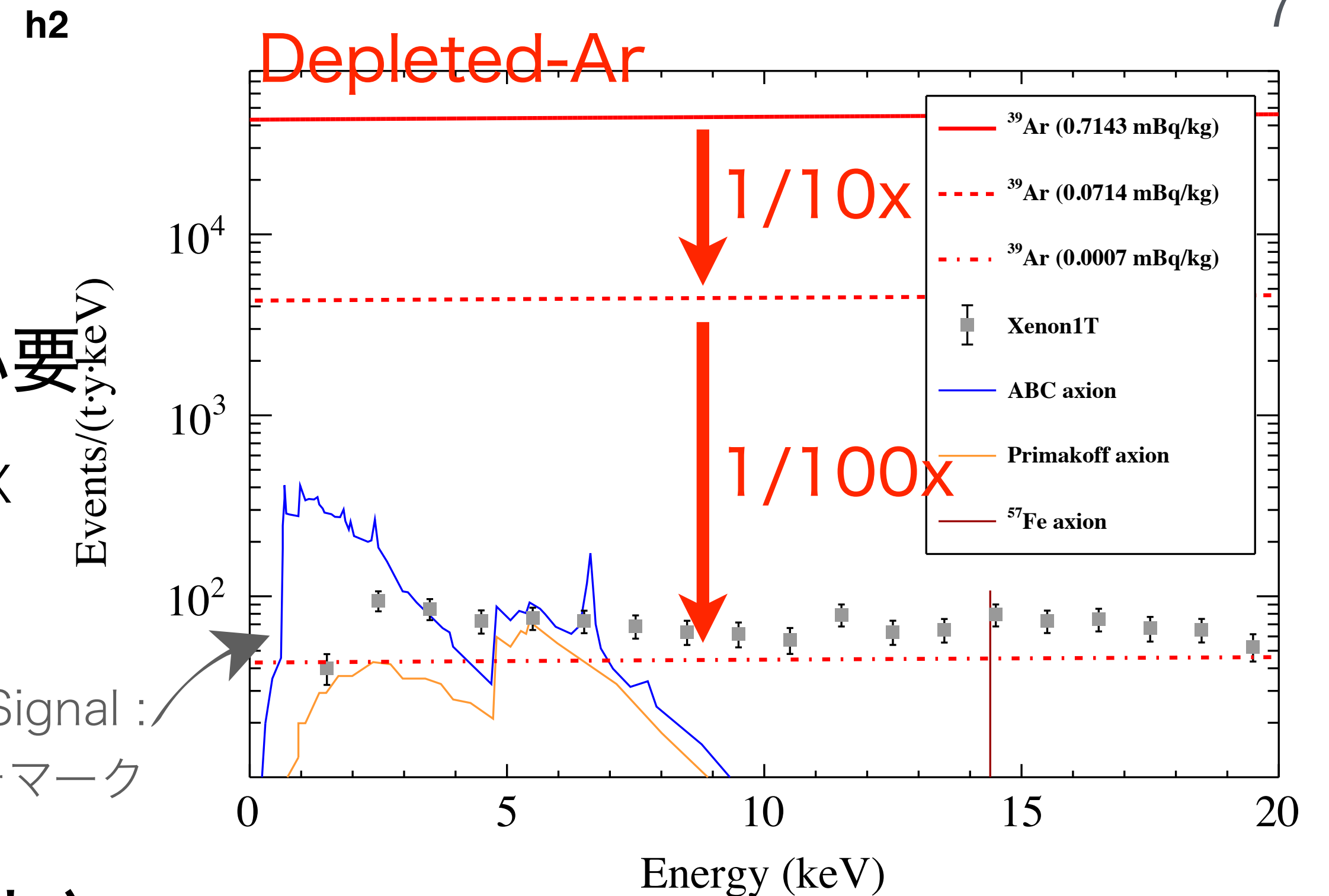


# 背景事象源

- Xe1Tの背景事象レベルを得るには,  
 $^{39}\text{Ar}$ を大気アルゴンから $10^{-5}\sim 10^{-6}$ の抑制が必要

- これまでの達成値から $1/100x \sim 1/1000x$
- (アクシオン信号であればさらに $1/10x$ )
- $O(1\text{t}-10\text{t})$ の生成量も必要

Axion Signal :  
Xe1Tのベンチマーク

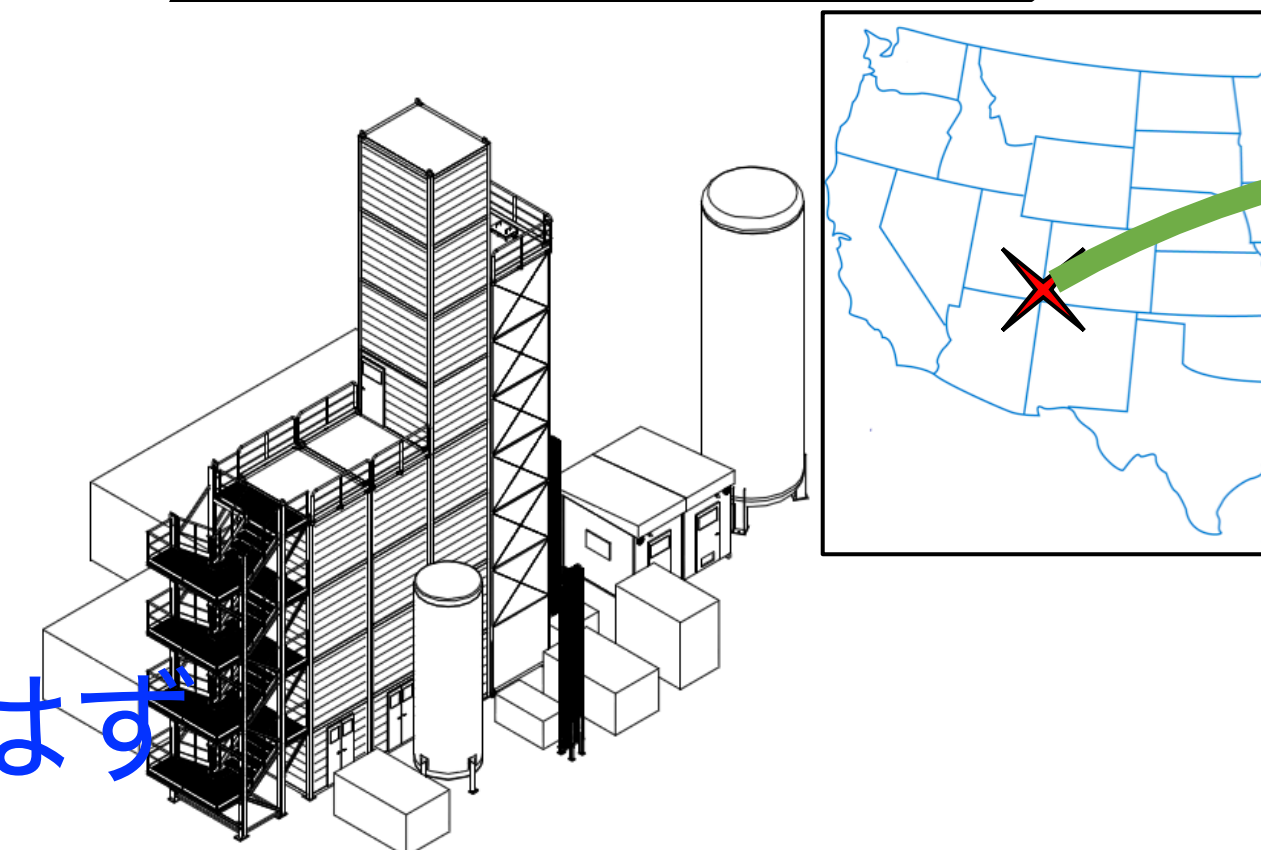


- Depleted Argonの大量生成 (by DarkSide)

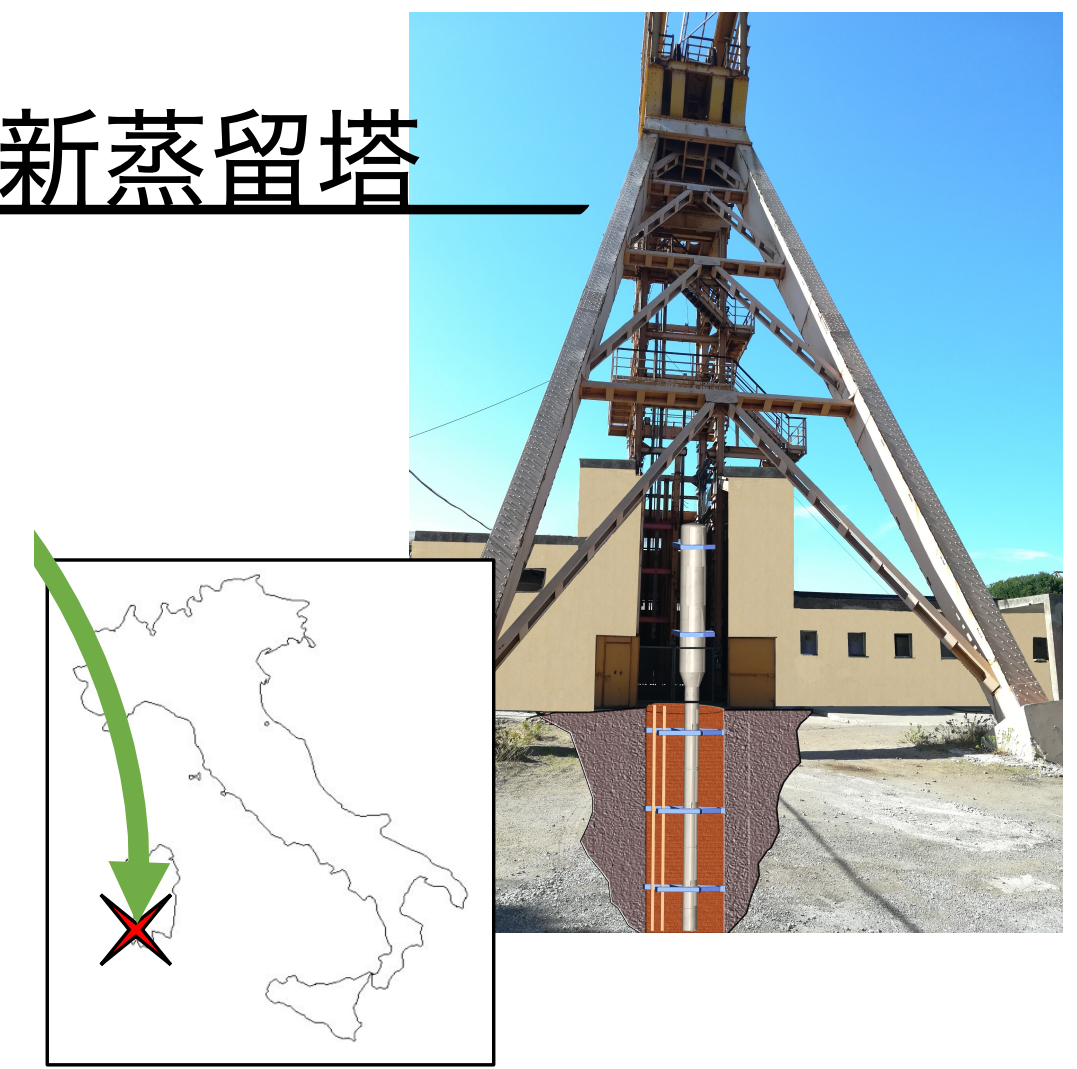
- 精製施設を増強 (250 kg/day, 建設中)
- 蒸留塔 (350m) による追精製・追純化  
 (~10 kg/day, コミッショニング中?)

- ◆ 計画通り稼働開始すれば,  
 1tonの $^{39}\text{Ar}$ -Freeアルゴンも得られるはず

新精製施設



新蒸留塔

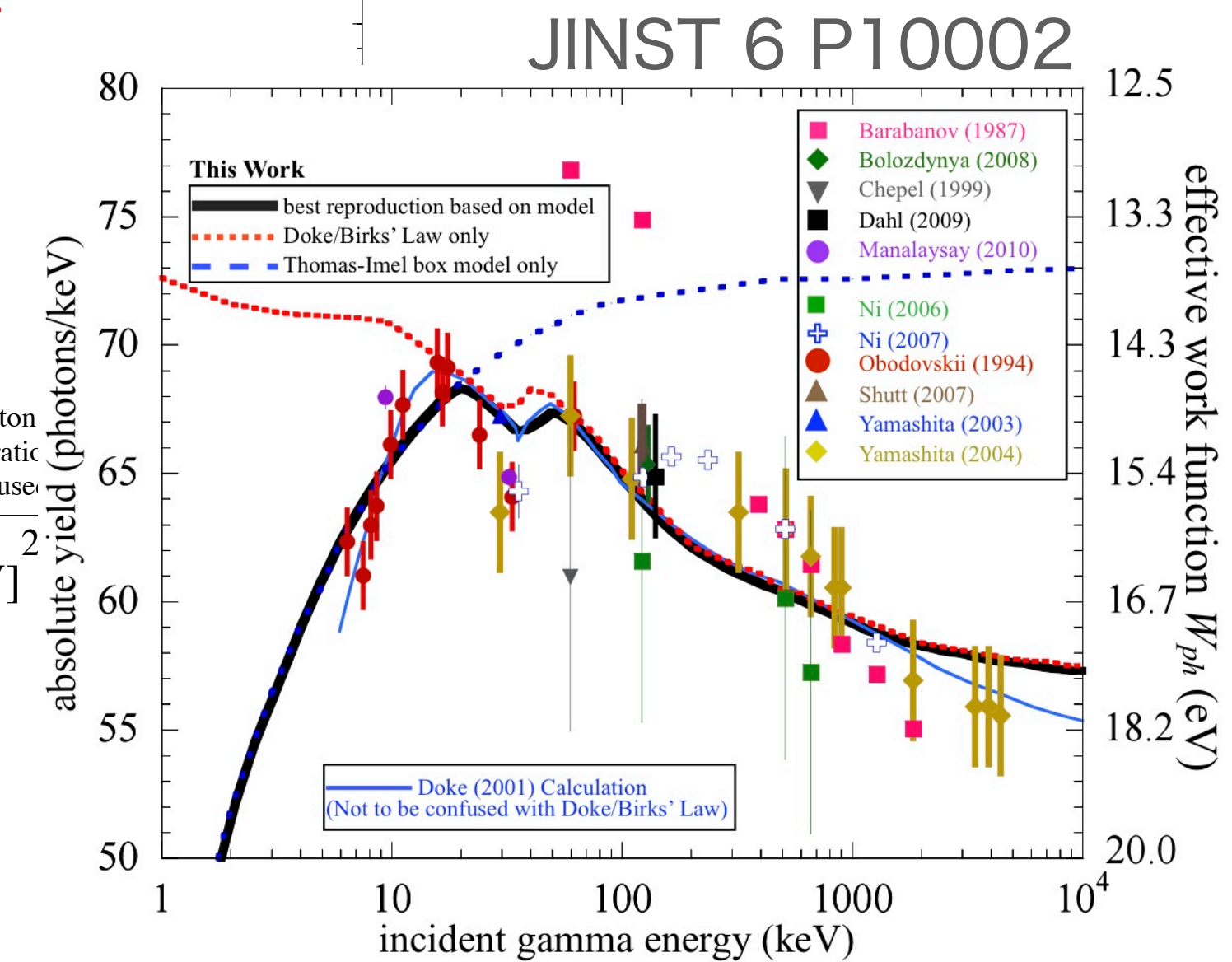
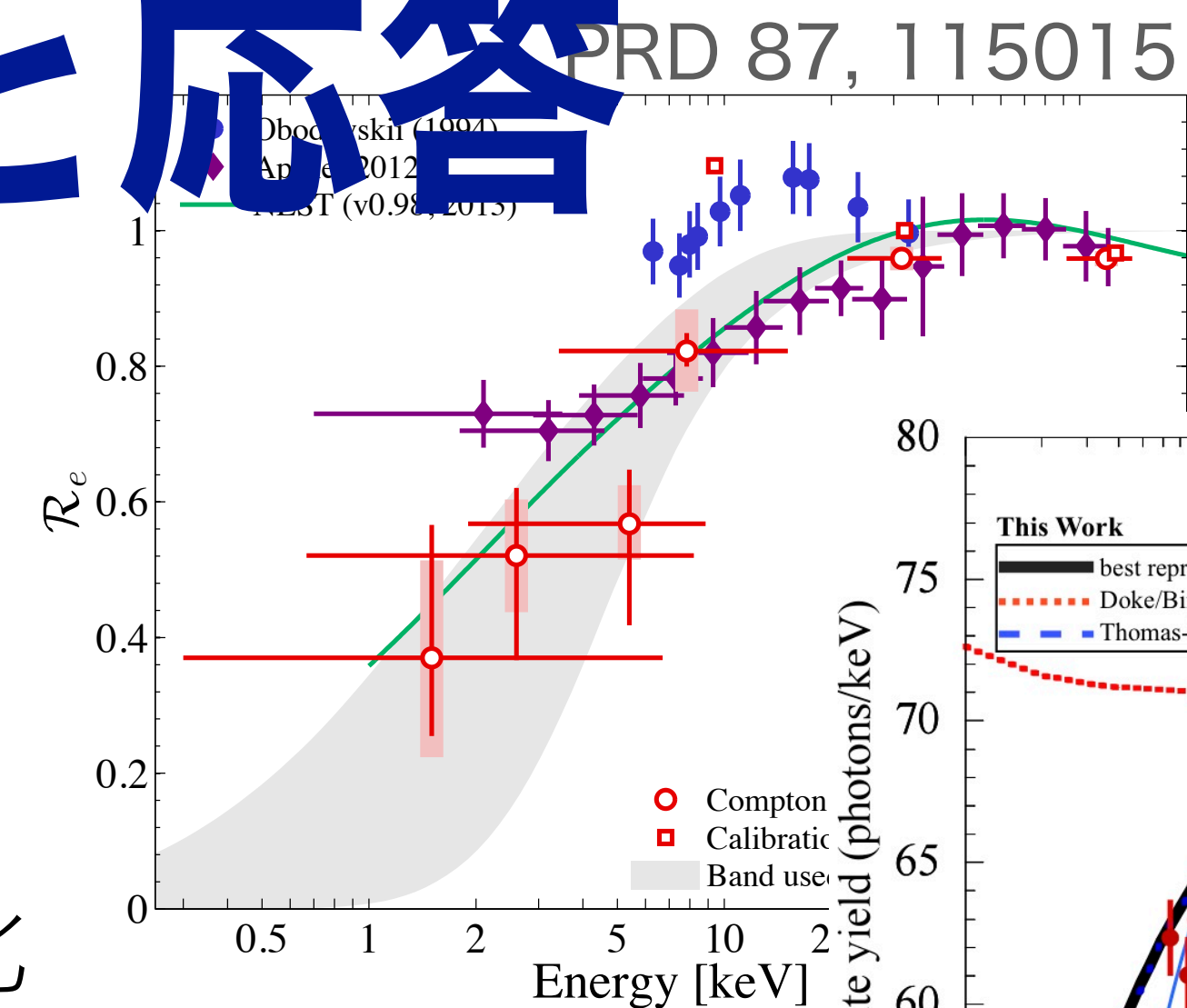




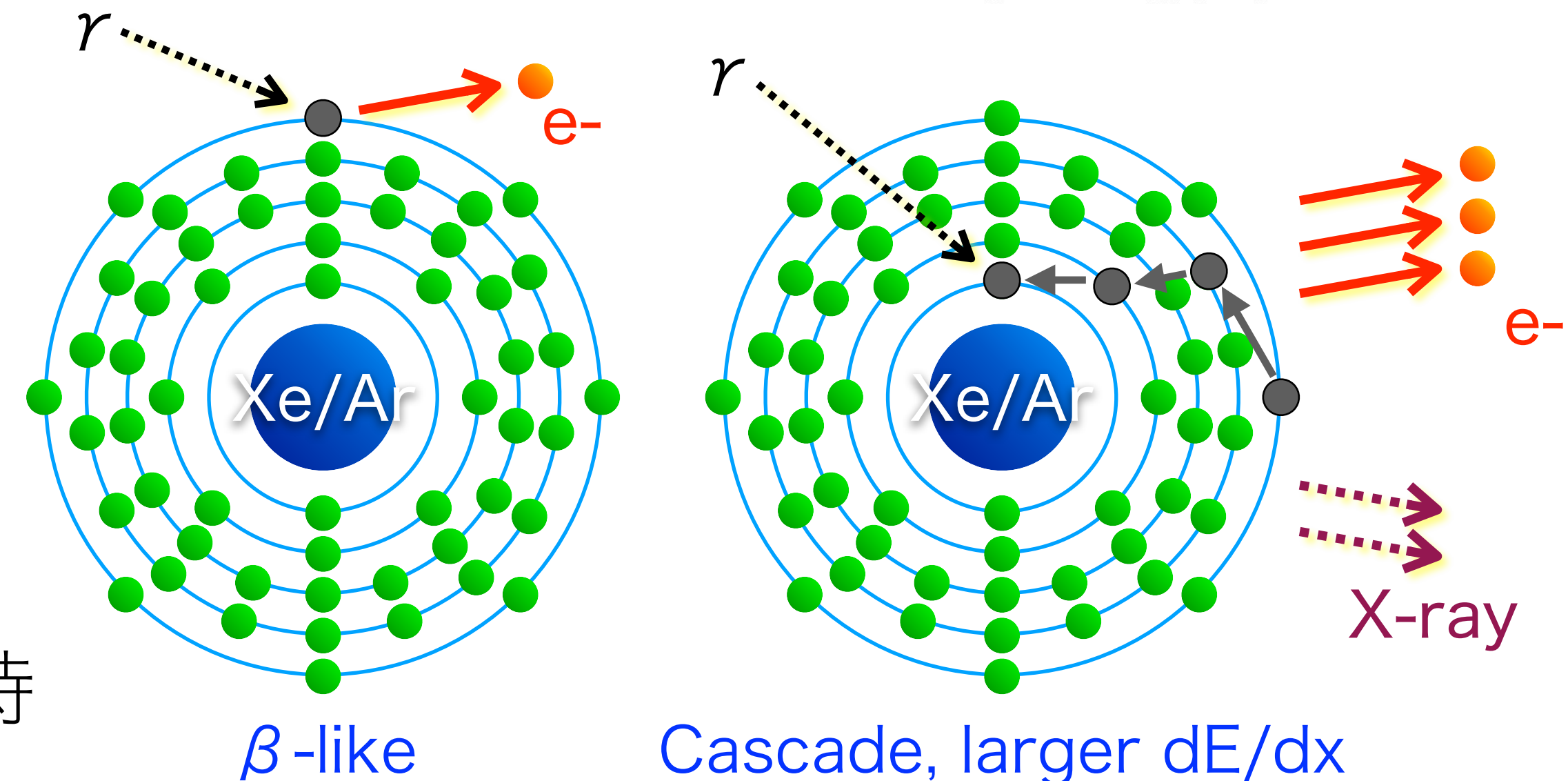
# 低エネルギー信号と応答

8

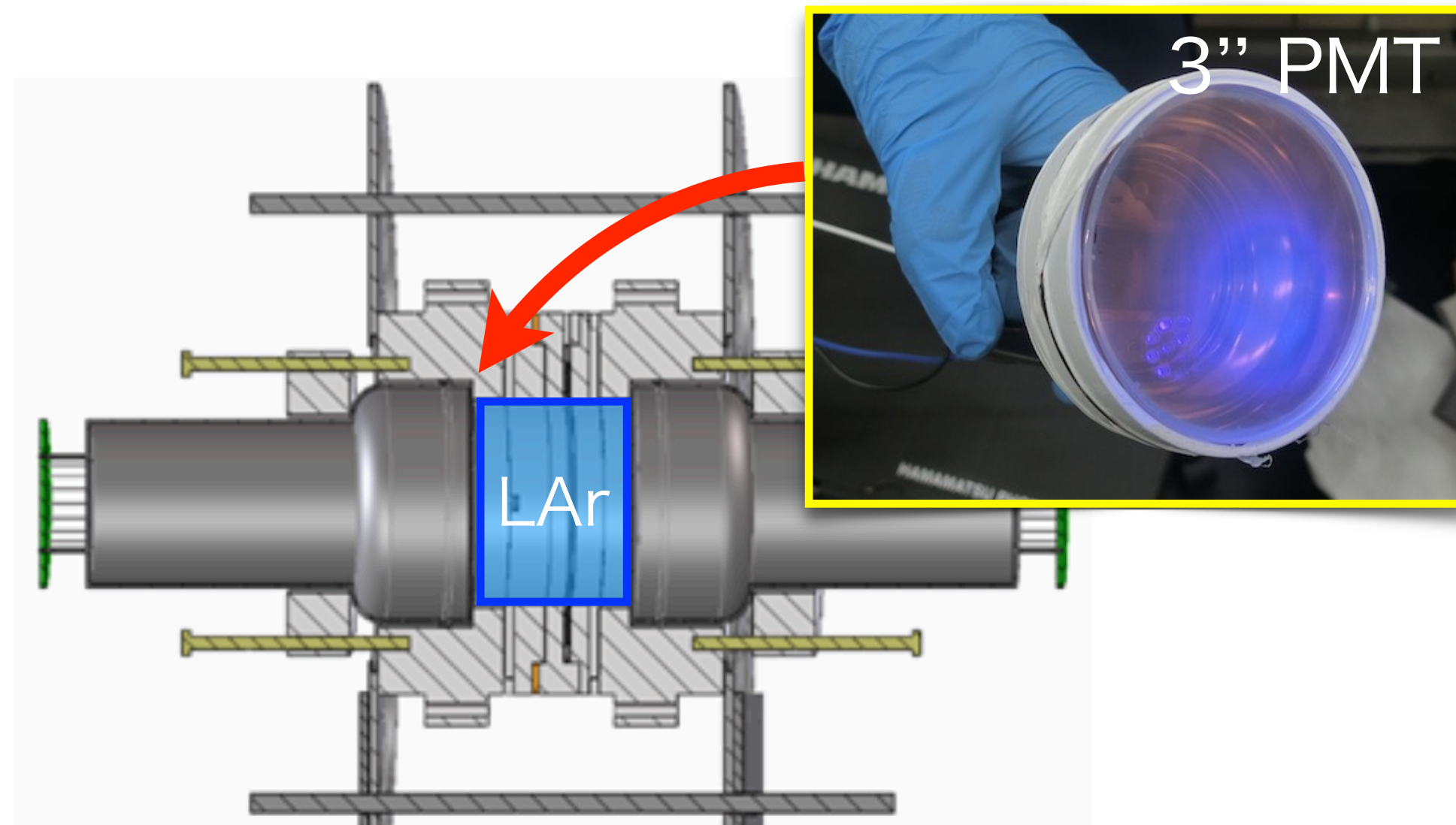
- 液体キセノン応答理解の目覚ましい進展
  - 生成光子数/電子数の詳細な測定
  - 種々の実験グループによる測定と,  
“NEST”をはじめとした包括的なモデル化
  - 低エネルギー電子反跳に対する検出器応答  
の理解・解析に大きな貢献



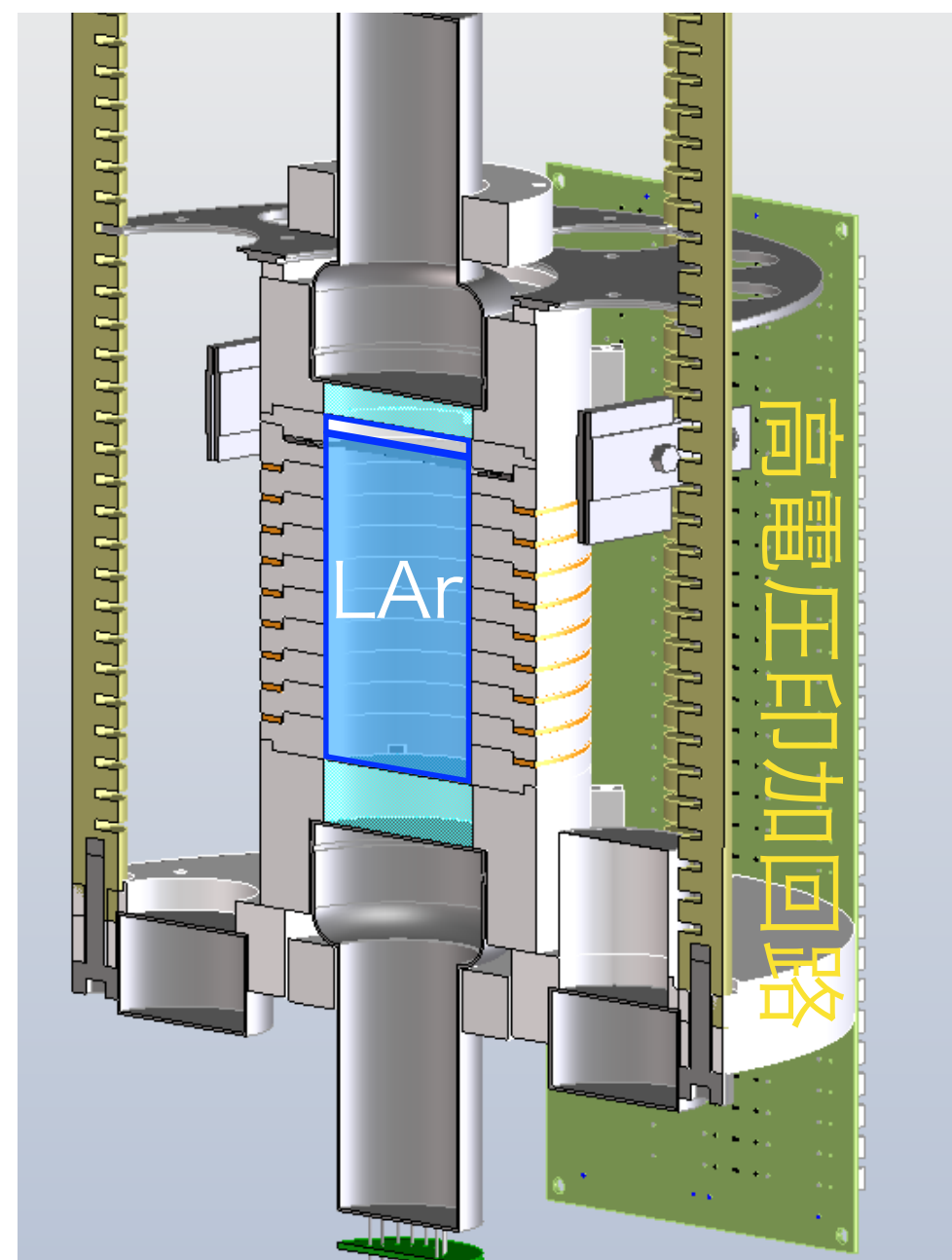
- 液体アルゴンの理解はまだまだ乏しい
  - 液体希ガス検出器応答としての  
液体キセノンとの類似性
  - 原子番号 (電子殻構造) の大きな差異  
→ “電子反跳”応答はよりシンプルだと期待



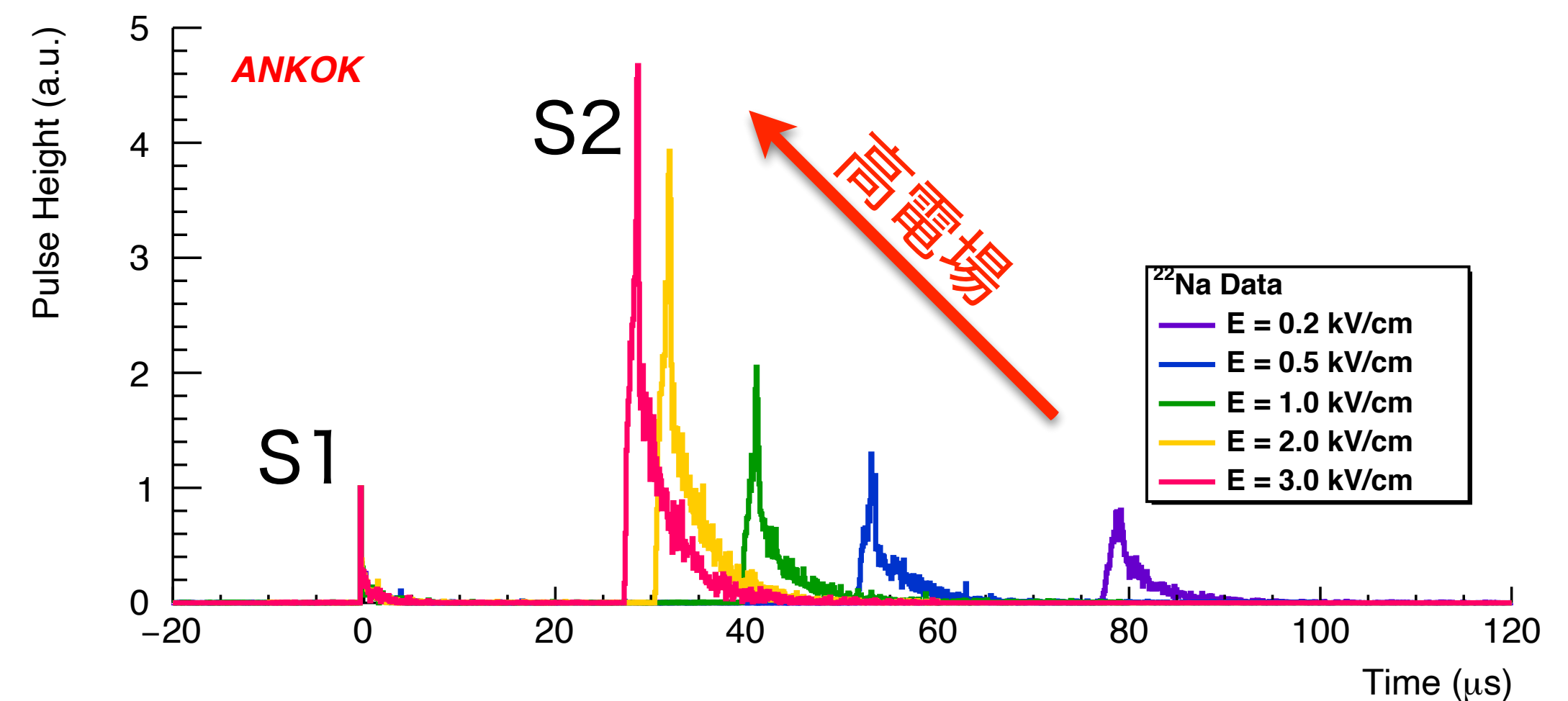
# 低エネルギー事象のための検出器技術<sup>9</sup>



- 真空紫外光 (128 nm) の高効率検出 @ 極低温
  - 光検出器窓面や検出器内壁 (反射材) へ波長変換材 (TPB) を真空蒸着
  - 13 p.e./keV (PMT), ~25 p.e./keV (MPPC) を実証 (c.f. XMASS ~ 15 p.e./keV)



- 電離電子生成量の向上と電離信号検出効率の最大化
  - 高ドリフト電場の形成 (最大3 kV/cm)
  - 電離電子検出効率 ~100%
  - S2増幅率 >10 photon/e<sup>-</sup>



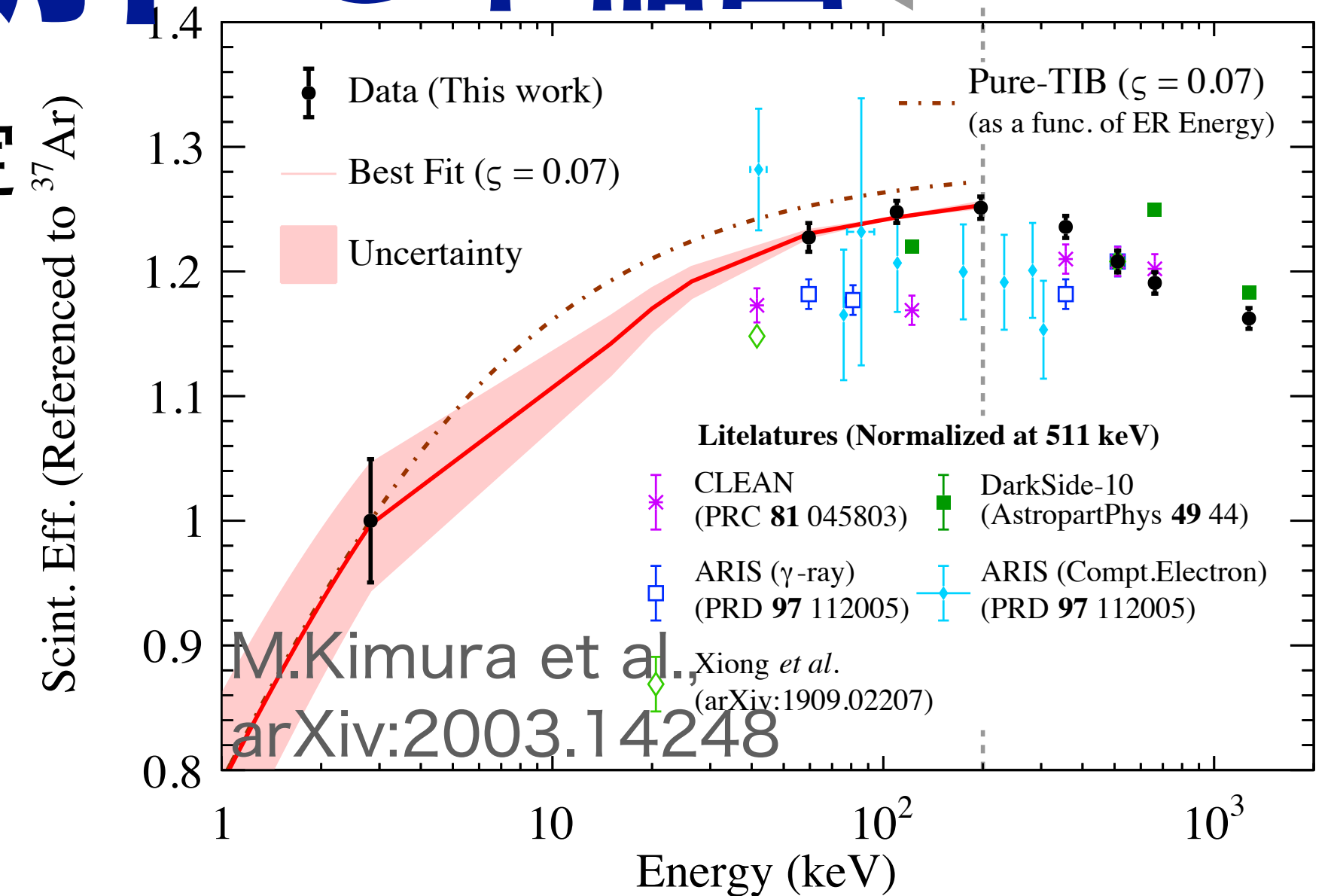


# 低エネルギー応答の理解 @早稲田

10

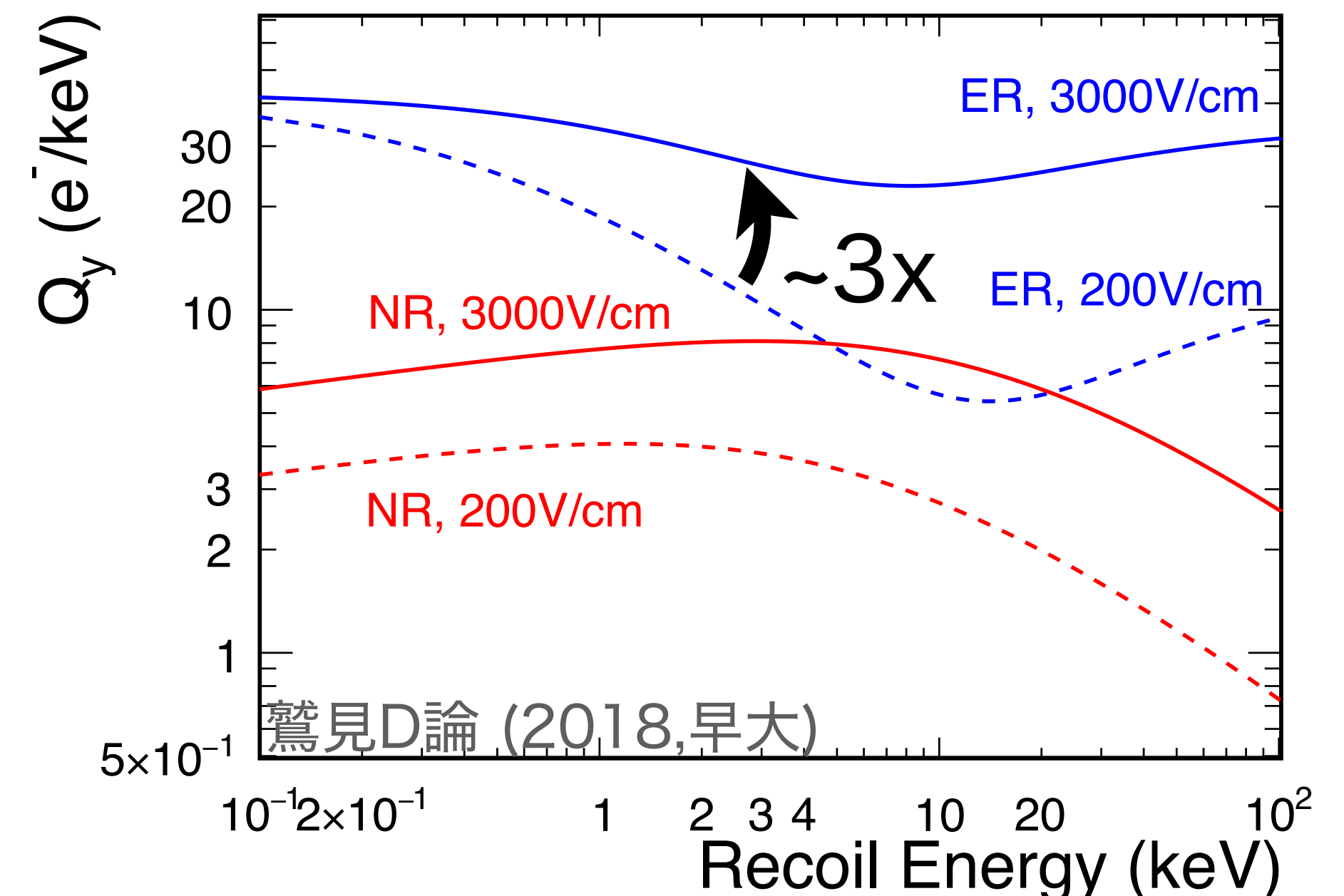
## ○ 高感度アルゴン検出器による低エネルギー応答測定

- 光量に特化した1相検出器 (電場なし) により,  
10keV以下のシンチレーション応答を初めて測定
- エネルギー依存性を関数化



## ○ 高電場アルゴン検出器による電場応答の測定

- 高電場印加に特化した2相型検出器により,  
0–3 kV/cm下での検出器応答  
(S1や電離電子生成量) を算出
- 任意の電場下での電離電子生成量を予測
- 1kV/cm以上での電子反跳応答の初めての測定

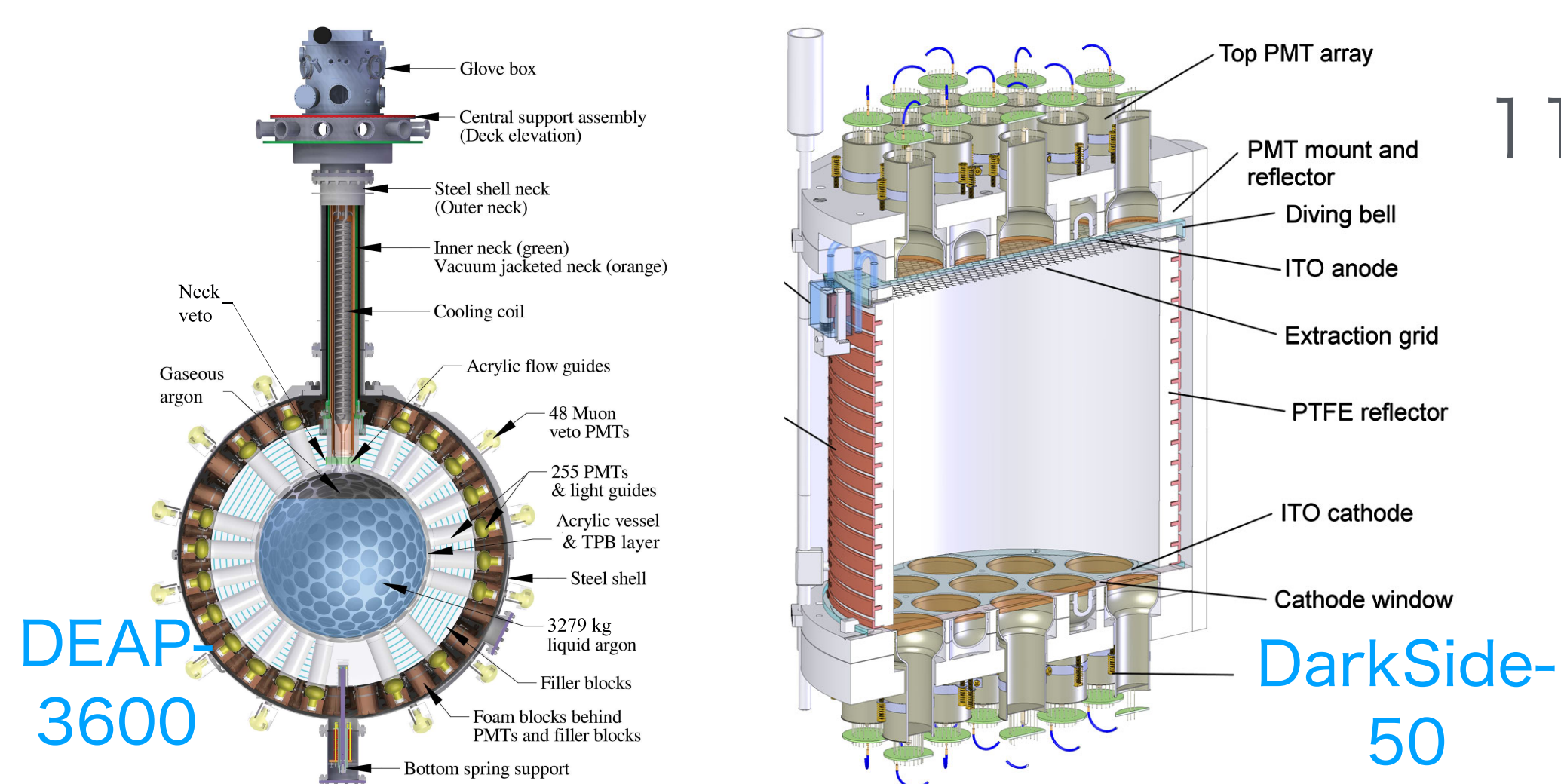




# LArによるDM探索

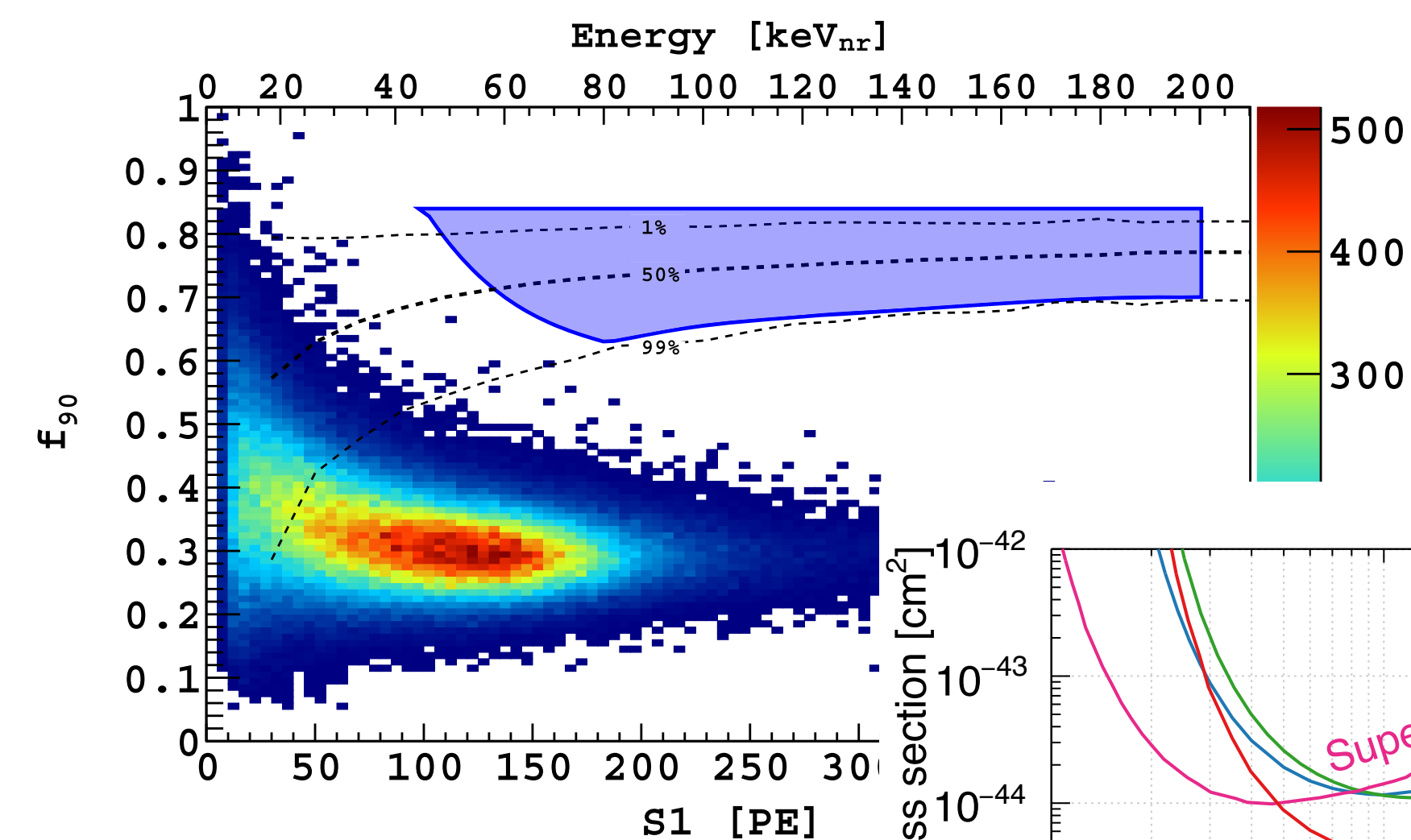
## Standard-WIMP探索

- DEAP3600 (1相), DarkSide-50 (2相)
- S1波形弁別によって  $>20 \text{ GeV}/c^2$  の領域を Background-Free に探索

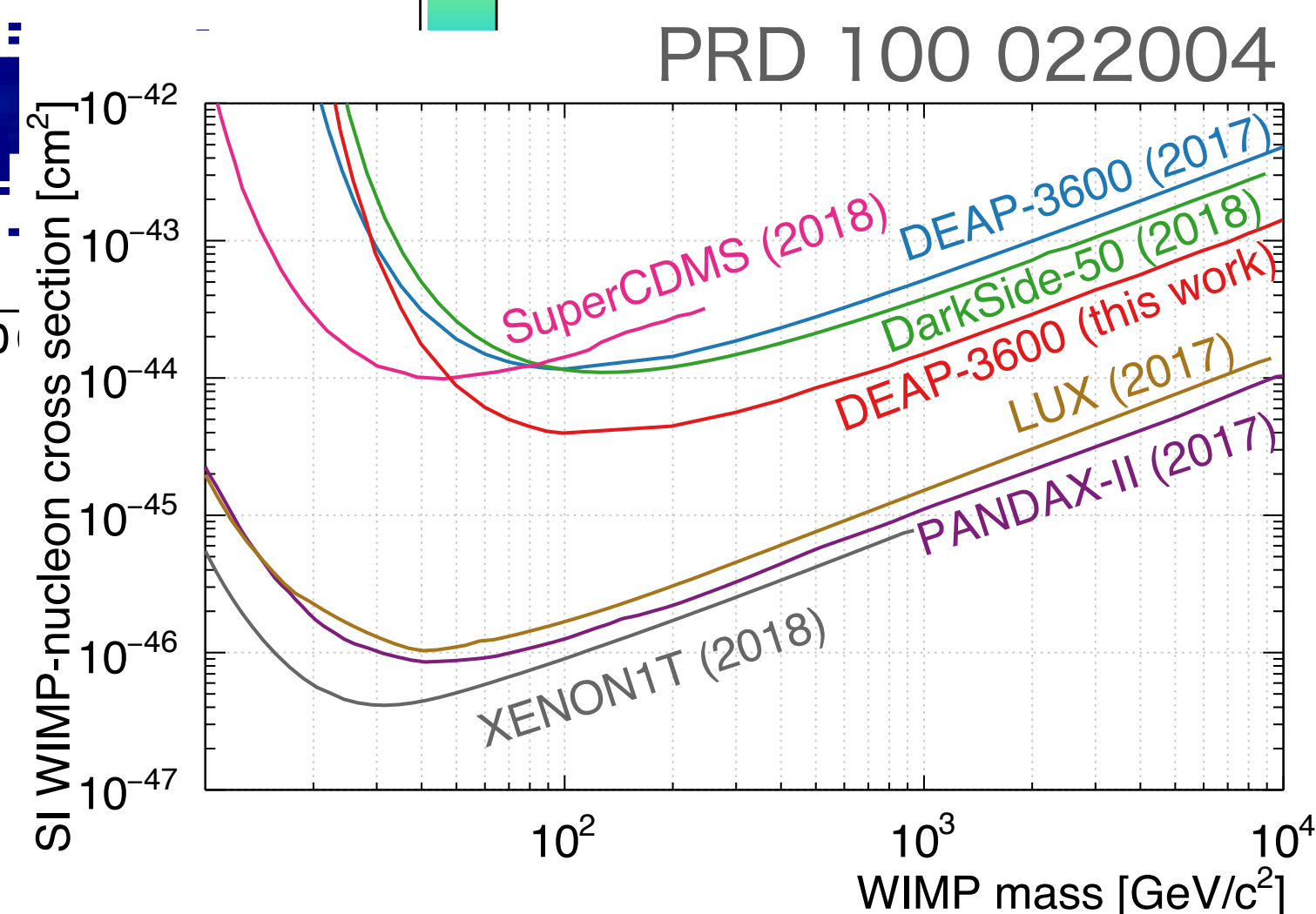


## Low-Mass WIMP/Non-WIMP探索

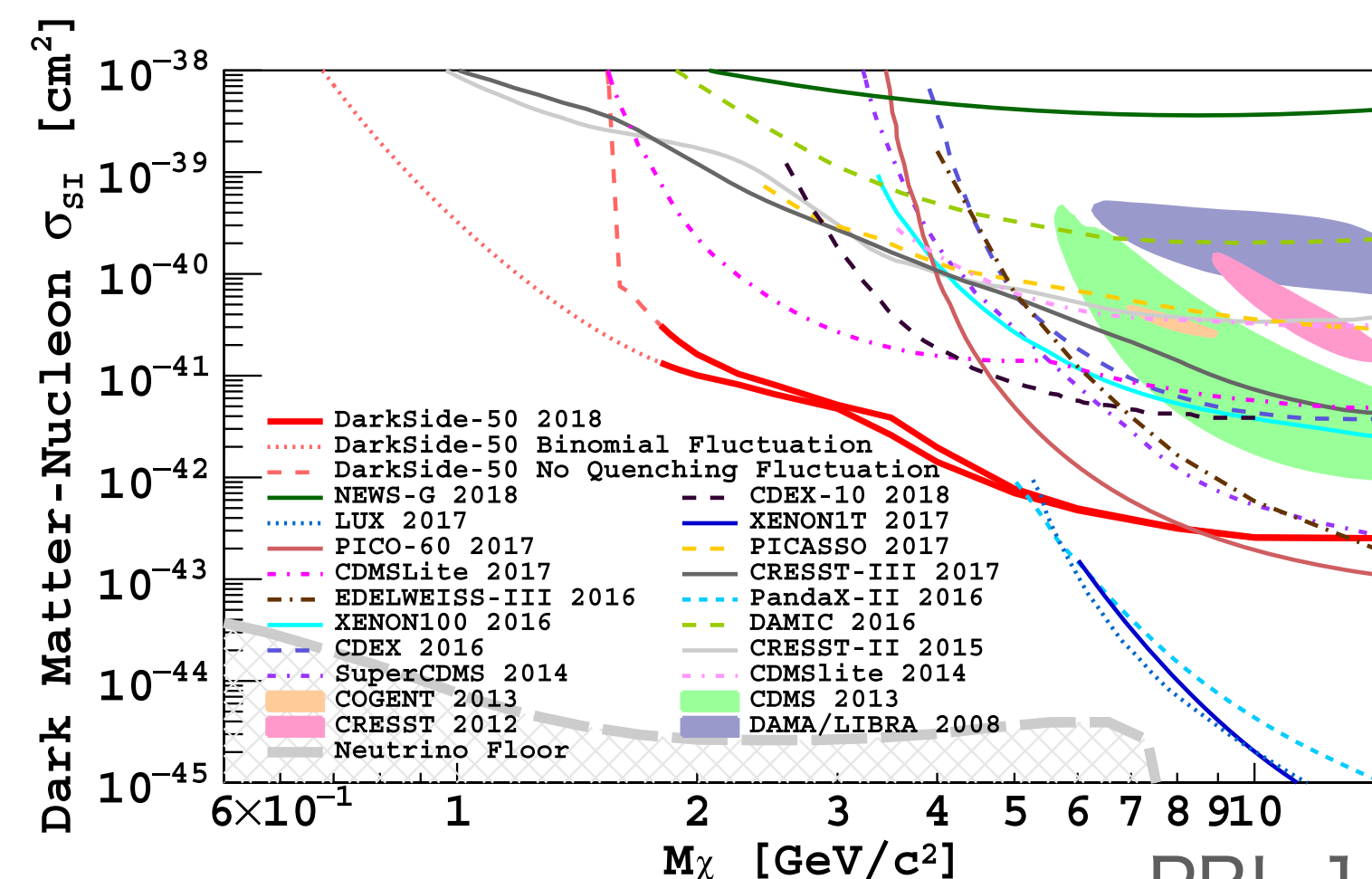
- DarkSide-50 (2相, 200 V/cm)
- S2のみを利用し,  $0.6 \text{ keV}_{\text{nr}}, 0.05 \text{ keV}_{\text{ee}}$  閾値による探索



PRD 98 102006



PRD 100 022004



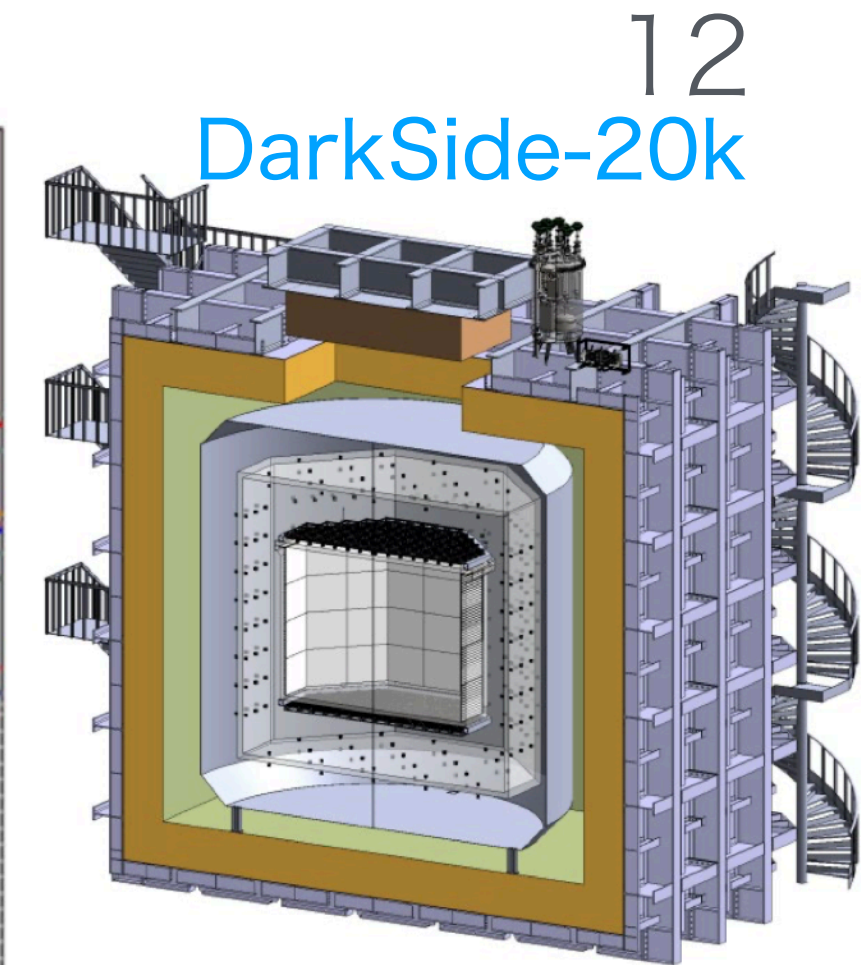
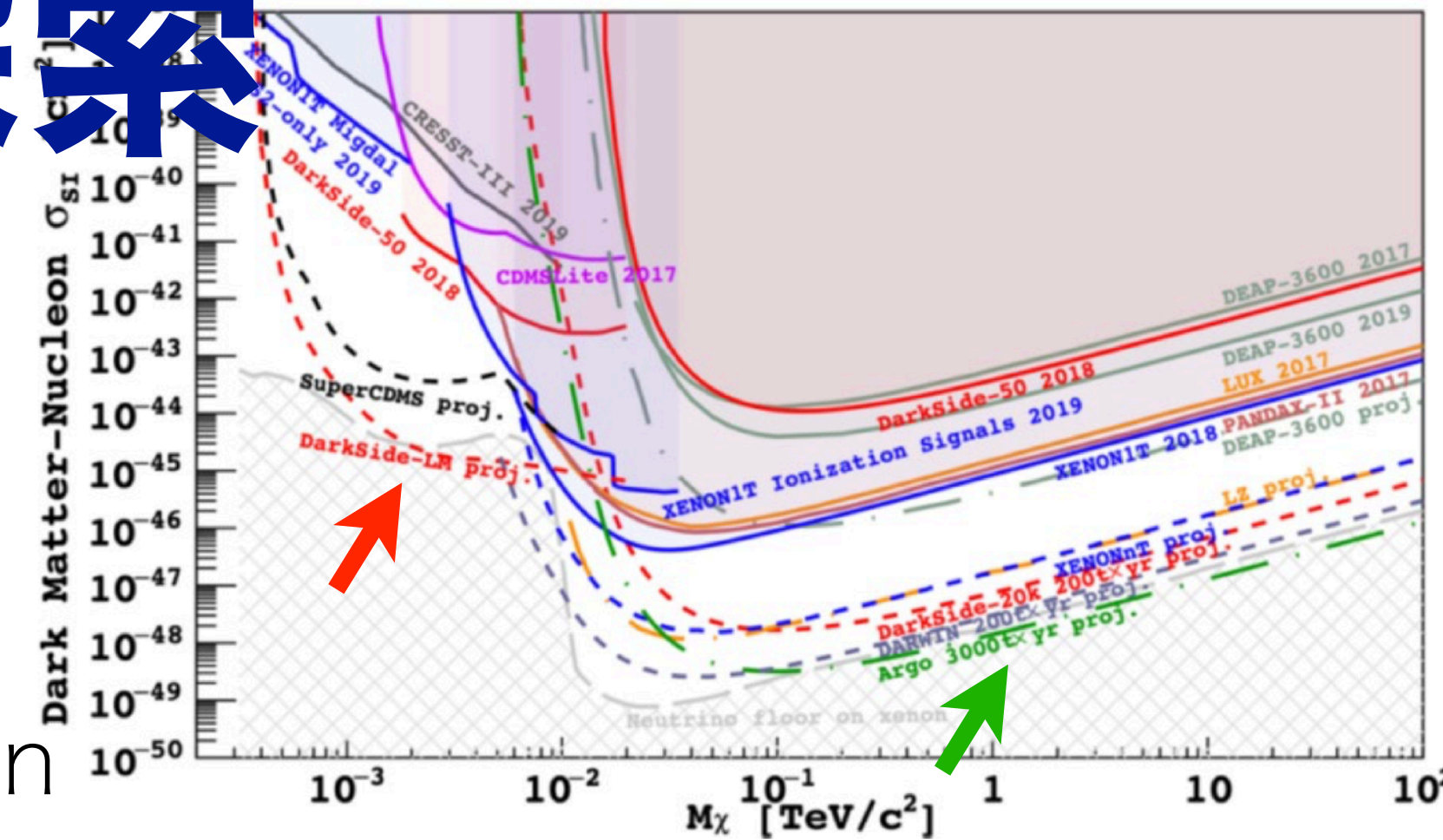
PRL 121 081307



# LArによるDM探索

- 次期計画：DarkSide-20k → ARGO

- 2相検出器
- DS20k : 地下Ar (1/1400x) 30-50 ton,  
ARGO: 地下Ar (1/1400 x (1/10)<sup>n</sup>), 500 ton
- キセノン検出器と異なり, Standard-WIMP Searchと低エネルギー探索を  
両立することは難しい (BG量とDepleted-Argon精製量の兼ね合い)  
=> それぞれの物理に特化した複数の検出器を構築できればよい



L.Rignanesi  
@ ICHEP2020

- XENON1T Excessの検証, Non-Standard WIMP探索

- <sup>39</sup>Arを大気アルゴンの10<sup>-6</sup>まで抑えたLArをO(1ton)用意できれば到達できる
- 光量の確保 and/or 高電場印加により, 低エネルギー側への感度が向上できないか

- 通常のWIMP Search (>100 keVの原子核反跳信号) では, 波形弁別が非常に有効

=> <sup>39</sup>Arへの要請は主にトリガー・パイルアップ,

1相検出器であれば要請は小さくなる (1/100@500tでパイルアップは回避)

- 液体アルゴン検出器はWIMP/Non-WIMP双方に対して魅力的なデバイス
  - ： 非常に優れた**粒子識別能力**
  - ： **低エネルギー事象** (~Sub-keV) に対する大きな信号量 (観測量)
- 長寿命放射性同位体 $^{39}\text{Ar}$ の除去が絶対的に必要
  - ： Xe1Tレベルには, 現在までの達成値 (1/1400) の更に1/1000が必要
  - ：  $^{39}\text{Ar}$ 含有量を抑えたアルゴンの研究がDarkSideを中心に進められている
- 液体キセノン検出器と比べると...
  - ： 同程度のシンチレーション検出効率, 電子検出効率
  - ： 入手が容易 (安価) であり, 速い (多種多様な) 研究開発が可能,  
ただし大型実験の実現には,  $^{39}\text{Ar}$ を除去したアルゴンの確保が最大の障壁となる
  - ： 新物理の示唆に対しては**大変意義の高い相互検証**になる (検出器技術の類似性, 核種依存性)
- これまで早大(ANKOK)では低エネルギー領域に特化した研究・開発を進めてきた
  - ： 大光量 (~20 p.e./keV) 検出器, 高電場検出器 (~3 kV/cm),  
低エネルギー・高電場下での液体アルゴン応答測定
  - ：  $^{39}\text{Ar}$ の少ないアルゴンの精製・入手が確立されれば, できることが大きく増える



# Backup