

ANKOK実験： 低質量暗黒物質直接探索のための 低エネルギー電子反跳背景事象の理解

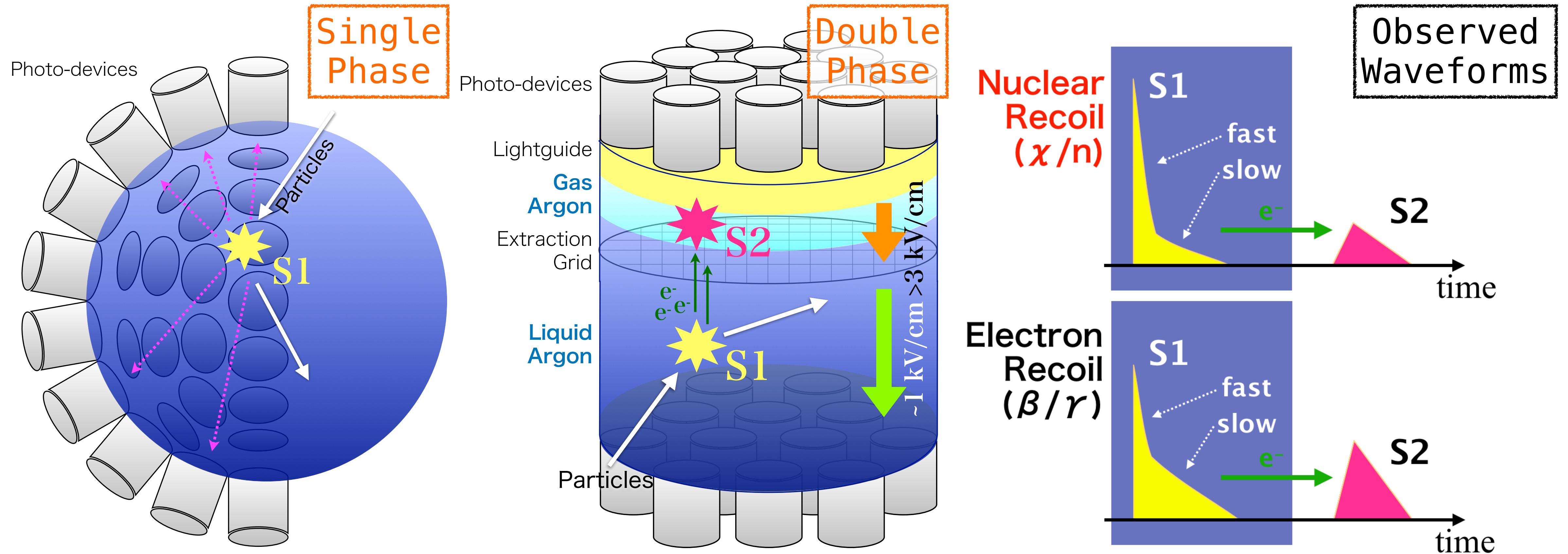
早稲田大学 木村真人

Liq.-Ar Scintillation Detectors

Attractive detector for WIMP search, ν -physics, ...

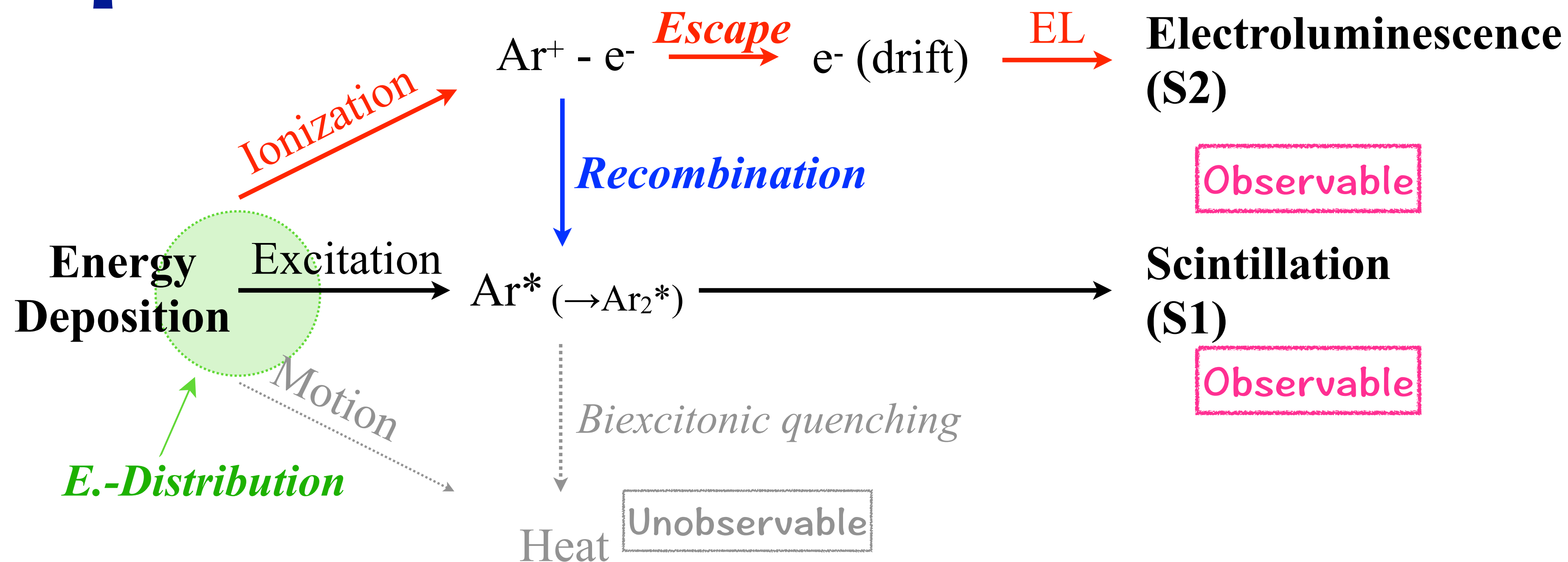
2

- Efficient conversion of energy deposition into scintillation (S1) and ionization (S2) signals.
- Powerful **pulse shape discrimination (PSD)** of nuclear recoils (NR) from electronic recoils (ER).
- **Cost effective detector** due to the availability of argon.



Liq.-Ar Response

- keV - MeV領域の応答の描像
- 依存性：反跳粒子(NR/ER/...), 反跳エネルギー, 印加電場



Energy Distribution

NR: Heat (Unobs.) へ大きな消費, 電場依存
 ER: ~100%がObs. channelへ消費, Constant?

Recombination Prob.

NR: 電場依存, エネルギーに対して単調増加
 ER: 電場依存, ~20 keVで最大値を取る

系統的な理解が検出器デザインやデータの解釈に不可欠

低質量WIMP探索におけるER背景事象⁴

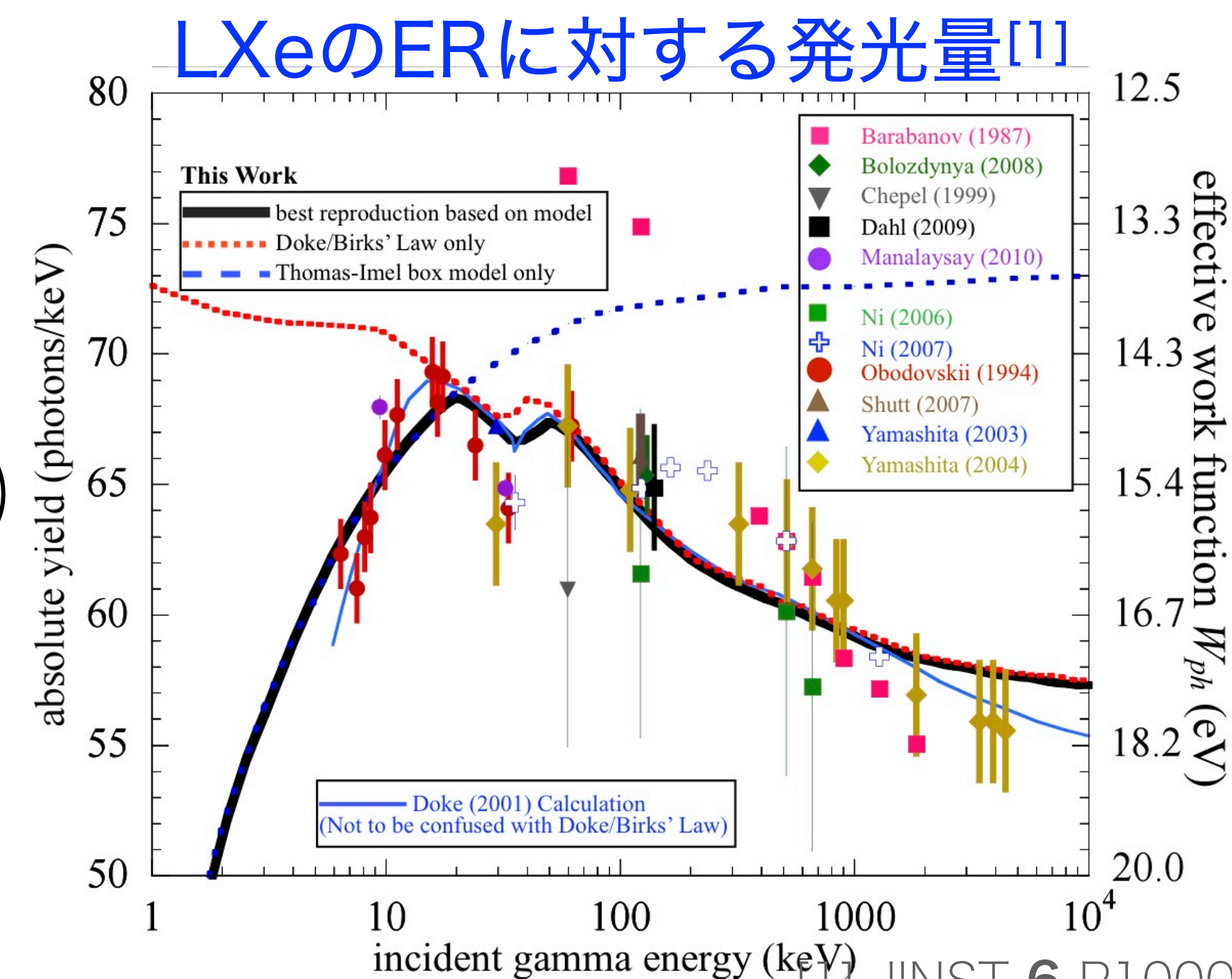
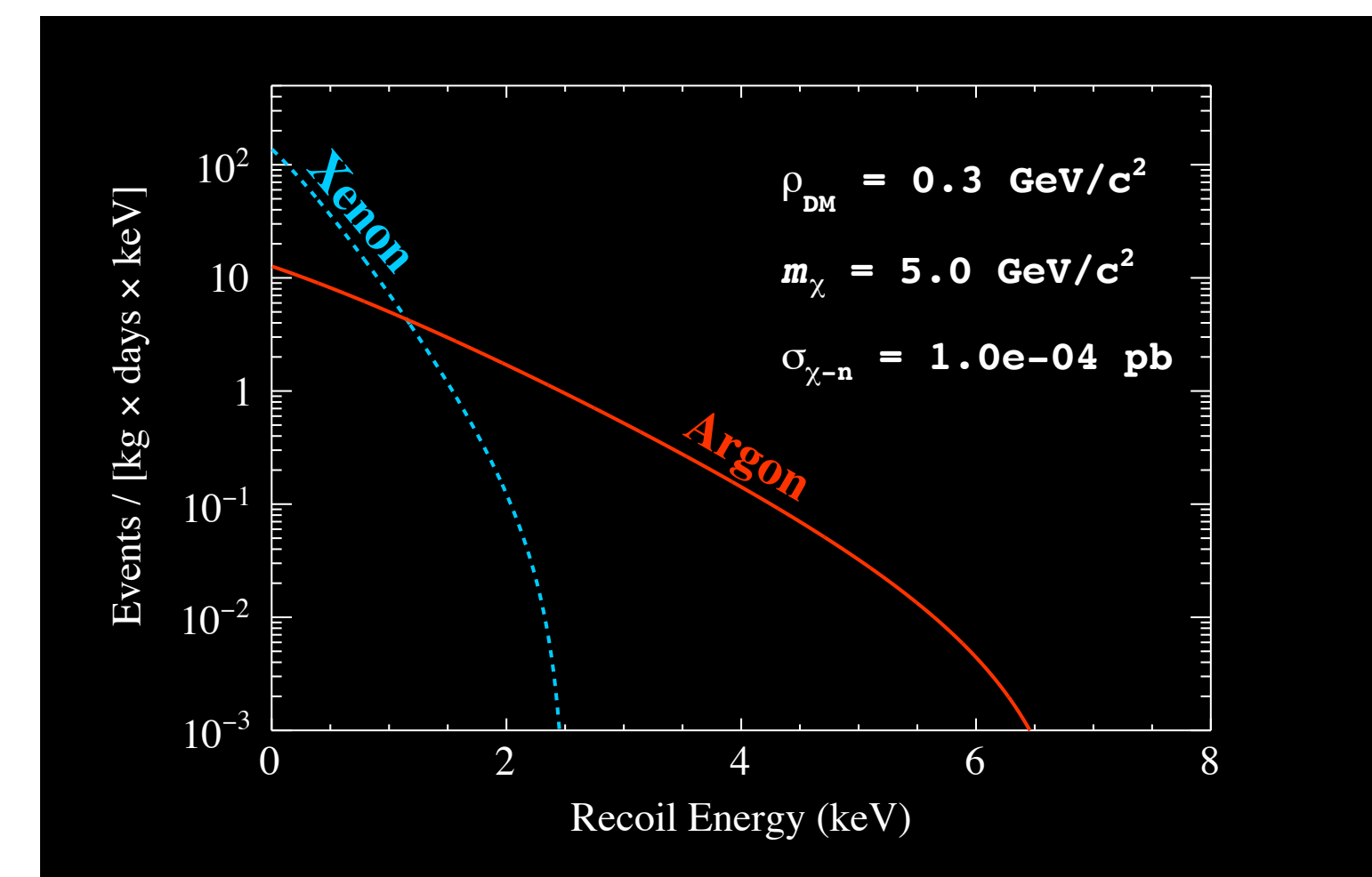
- : Energy Region of Interest $\lesssim 10 \text{ keV}_{\text{nr}} \sim 40 \text{ keV}_{\text{ee}}$
- : ER Background Source : ^{39}Ar , ^{37}Ar , ^{85}Kr , etc.
 → PSDを用いた解析的な除去 and/or
 Backgroundスペクトラムを予測した差し引き

: 液体アルゴン発光量は,
 NR, ERともにエネルギーに依存すると予想

- NR : 複数の測定結果 (エネルギーに対して単調減少)
- ER : 40 keV_{ee}以下の測定はない
 (c.f. キセノン検出器におけるエネルギー依存性の報告)

: 低エネルギー閾値化の実現には,
 信号領域における検出器応答の系統的理解が欠かせない

本研究 : keV - MeV領域のER光量測定 @ ゼロ電場

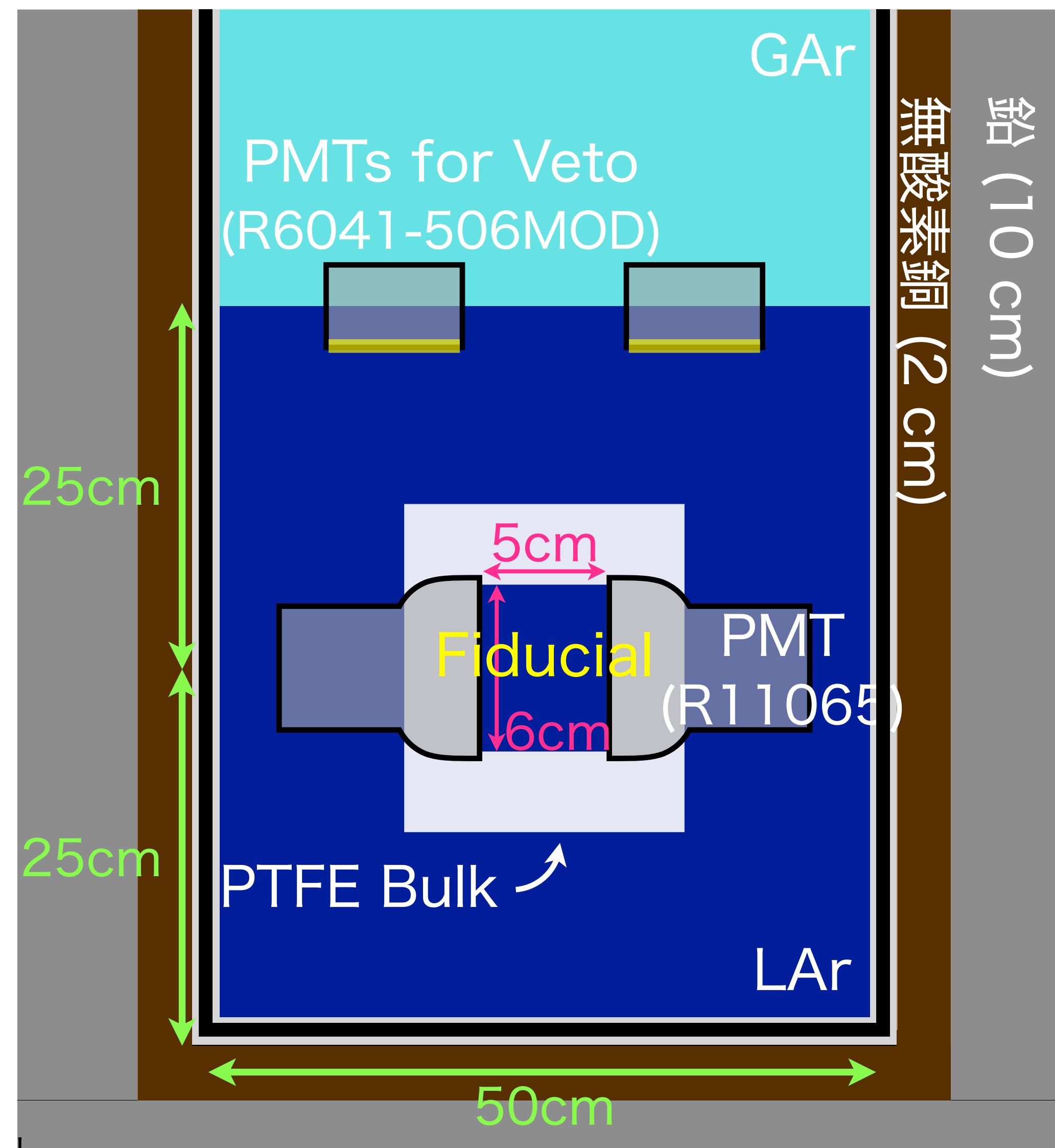


Setup : S1大光量検出に特化した検出器

検出器詳細 : 5
青山一天他,
JPS2019年次大会 17aK104-8

- : Single phase (Null-Field),
Active region = $\phi 6.4 \text{ cm} \times L5 \text{ cm}$
(LAr = 225 g)
 - 3-inch PMT (R11065) $\times 2$,
窓面に波長変換剤 (TPB) を真空蒸着
 - 内壁は反射材 (ESR) にTPBを蒸着
- : Active shielding (LAr)
 - Total $\sim 140 \text{ kg}$
 - 2 inch PMT $\times 4$ を有感領域直上に配置
- : Passive shielding
 - 鉛 (10 cm) + 無酸素銅 (2 cm)

→ Event Rate $\lesssim 1 \text{ Hz}$ @ Single-Photon Coincidence



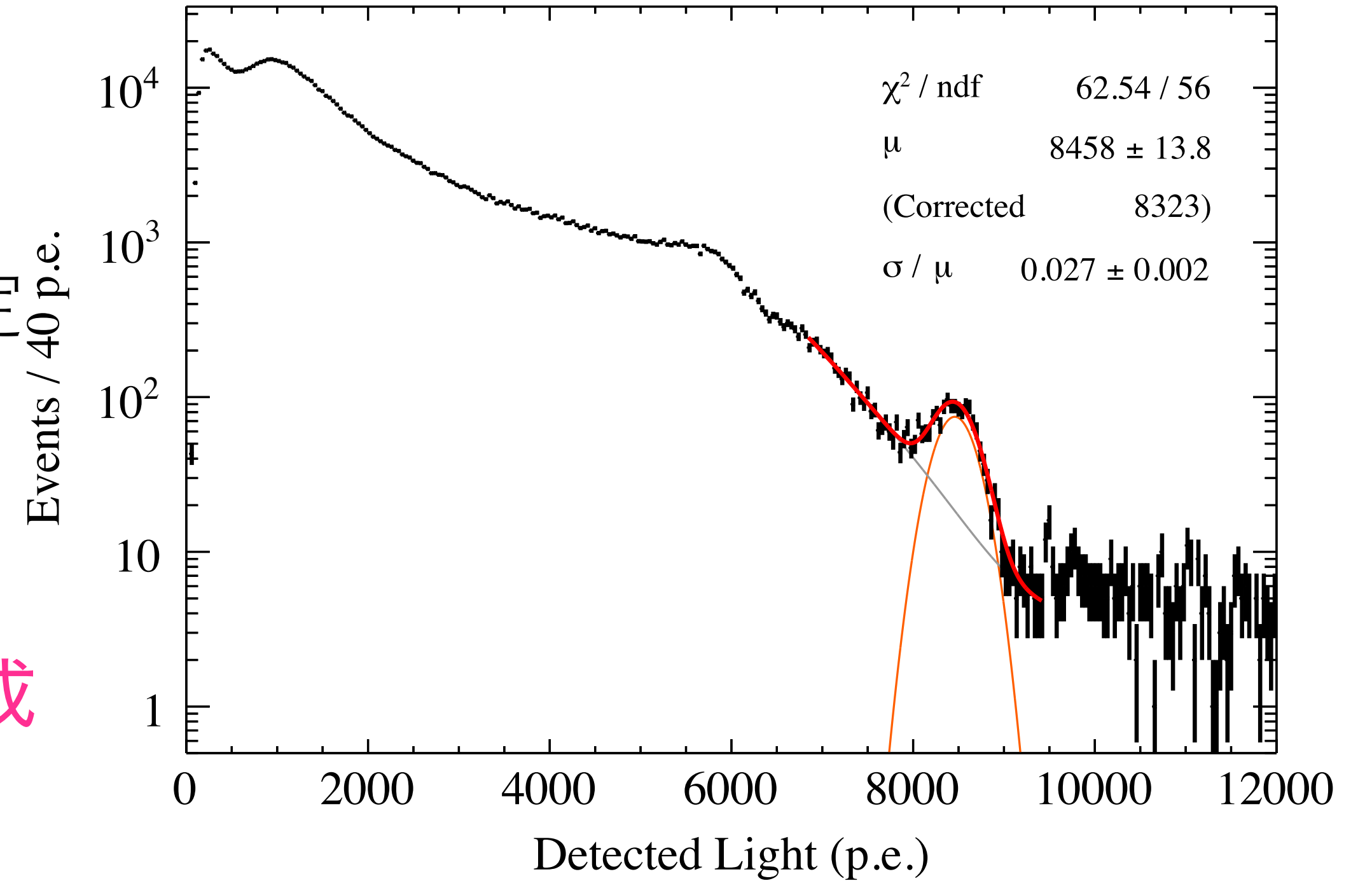
検出器光量

: ¹³⁷Cs (662 keV) 全吸収ピークを用いて測定

: 検出光量

= 12.6 +/- 0.3 (11.1 +/- 0.3) p.e./keV

世界最大光量を達成



○ 主な不定性は

PMT (R11065) に起因

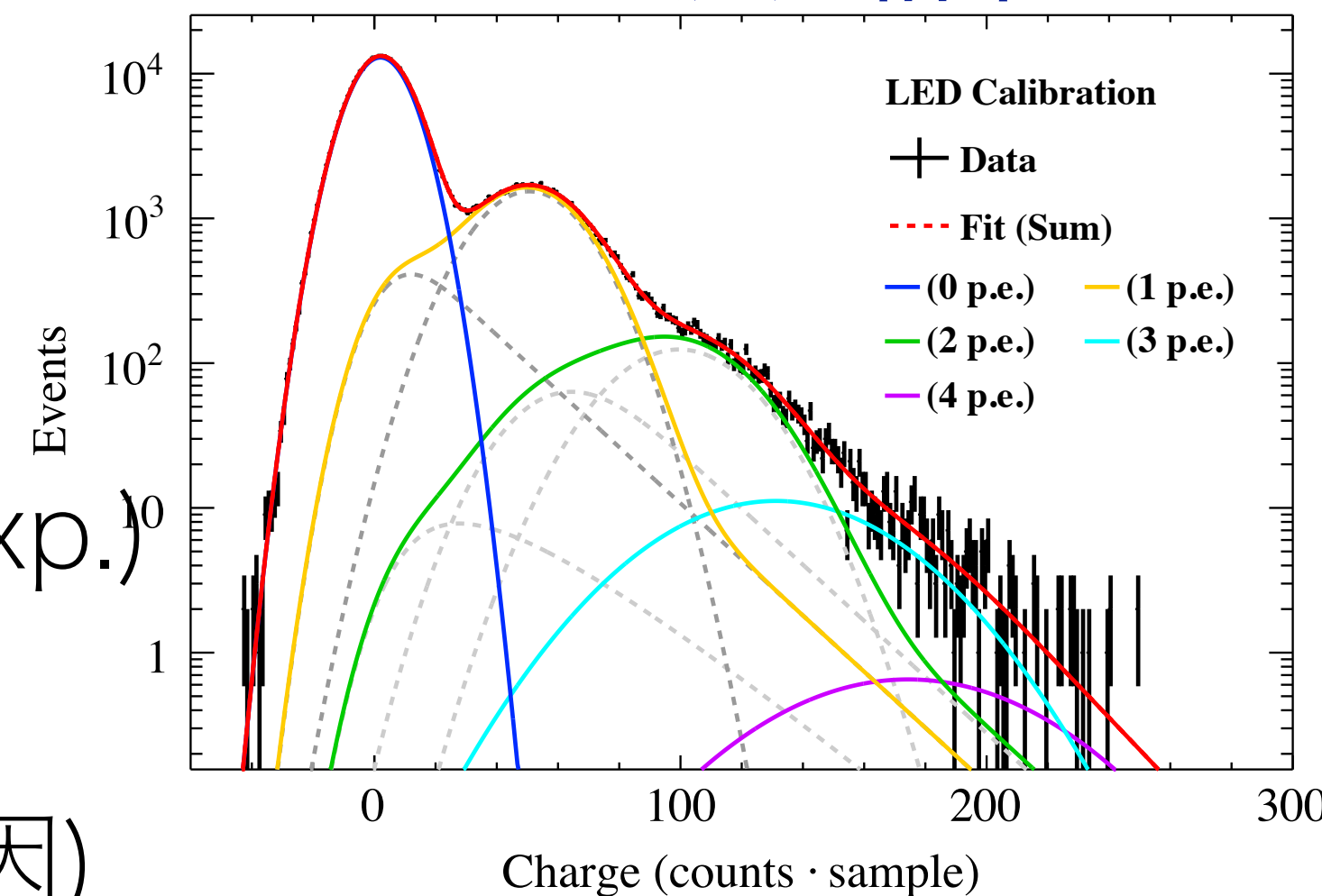
- “Under-Amplified”成分の存在示唆

(→ ゲイン関数は $G_{\text{gas}} \oplus \text{Exp.}$)

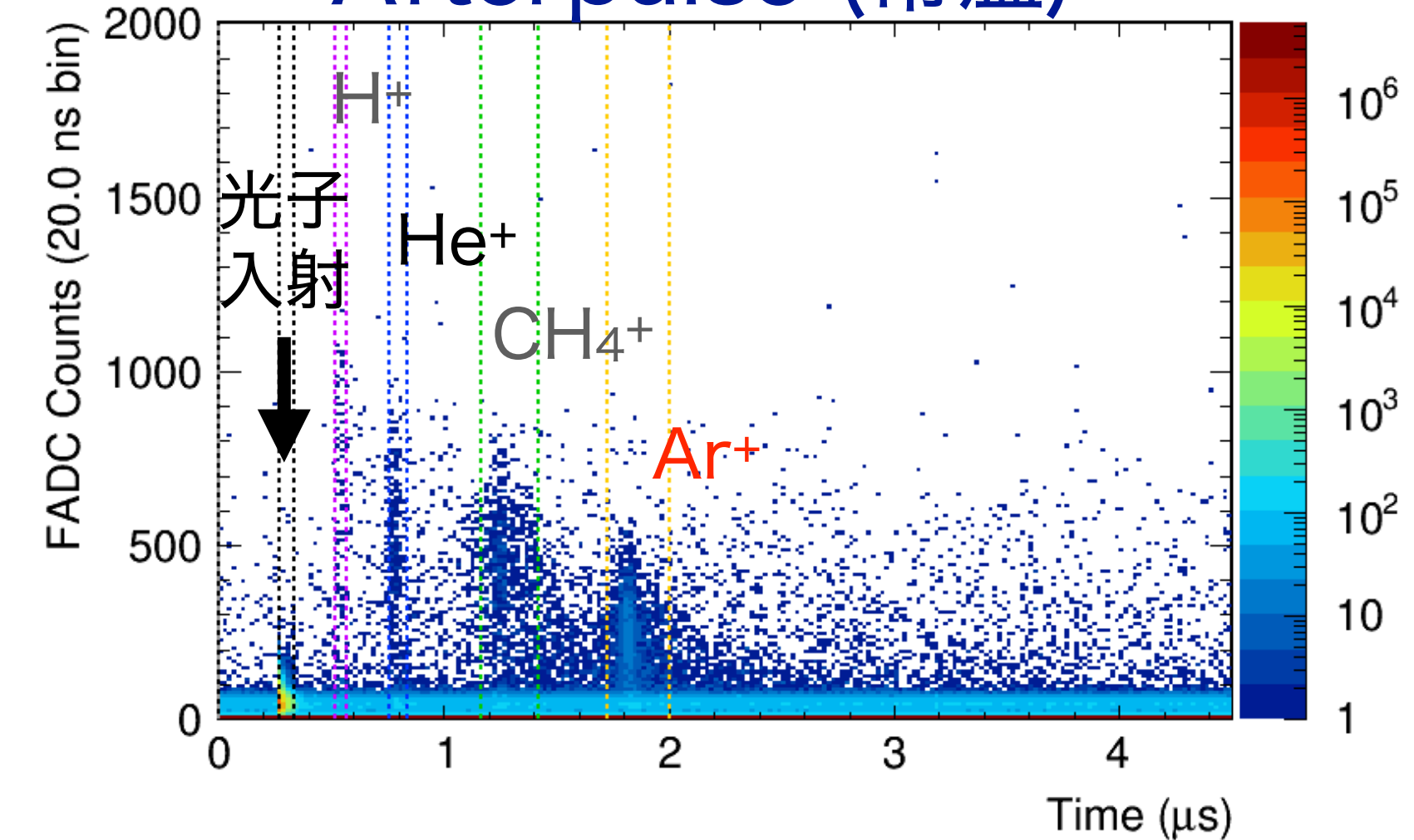
- Afterpulseの存在

(主にPMT真空内の不純物起因)

ゲイン測定結果

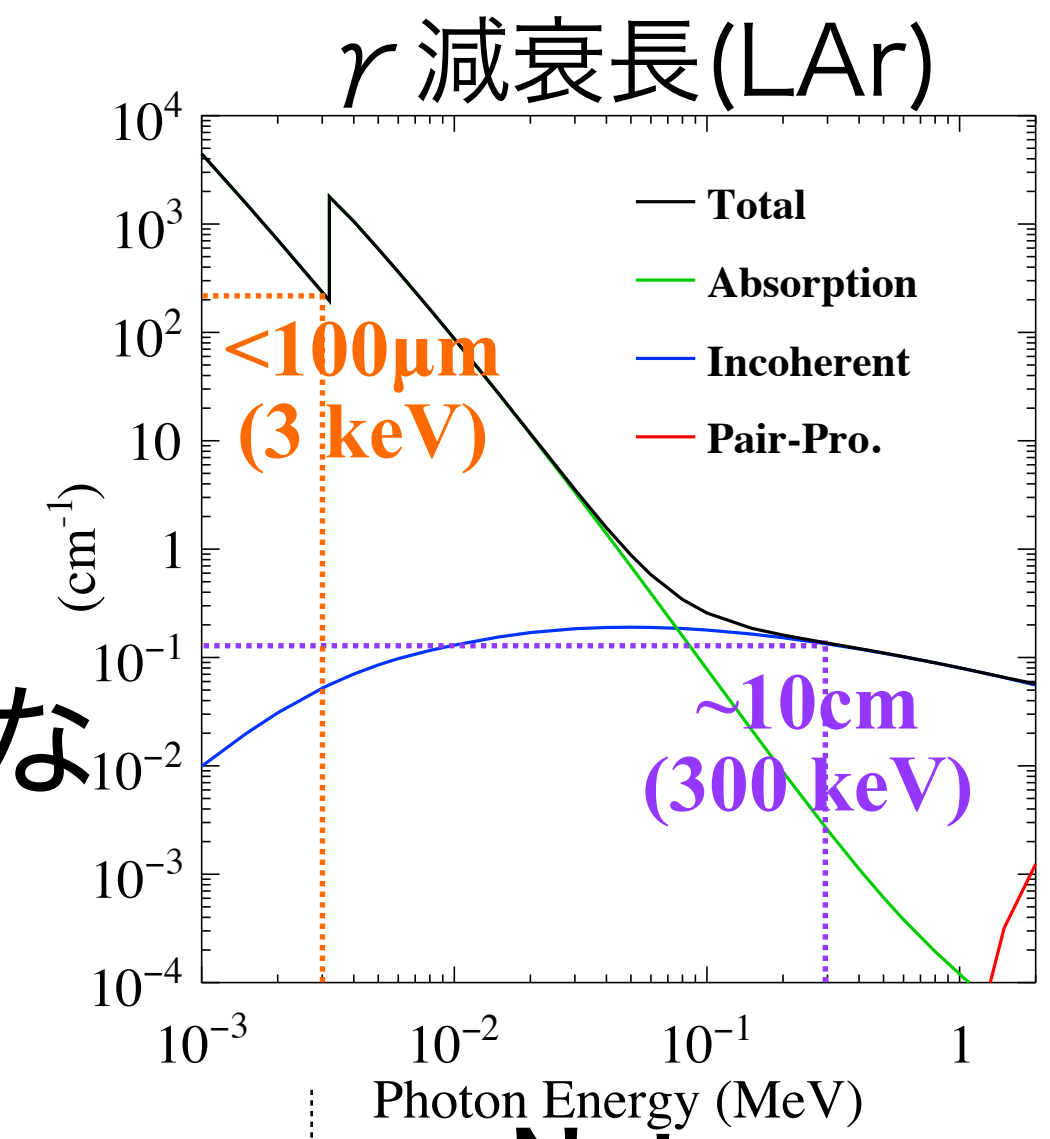


Afterpulse (常温)

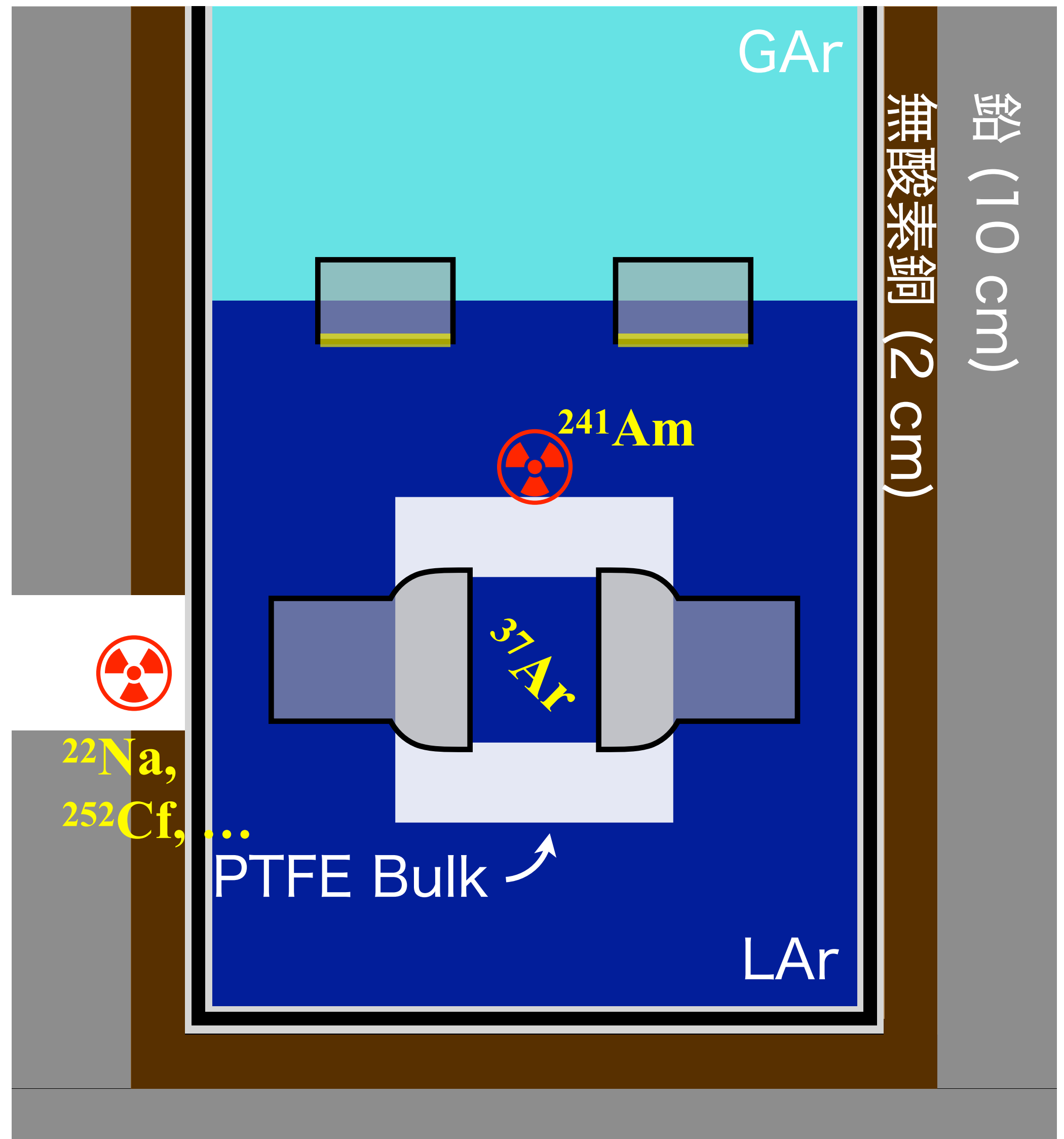


Calibration Source

- >300 keVの γ 線源は
チェンバー外から照射。
- <200 keVの較正には、
有感領域付近で生成可能な
ソースを利用。



Energy [keV]	RI	Pos.	Note
1274.6	²² Na		
661.7	¹³⁷ Cs	チェンバー外	
511.0	²² Na		Back-to-Back
356.0	¹³³ Ba		
197.1	¹⁹ F (n, γ)	内部で生成	²⁵² Cfを利用
109.8	¹⁹ F (n, γ)		²⁵² Cfを利用
59.54	²⁴¹ Am	チェンバー内	α -tagging
2.82	³⁷ Ar	Fiducial内	LAr内一様



極低エネルギー一較正 : Argon-37

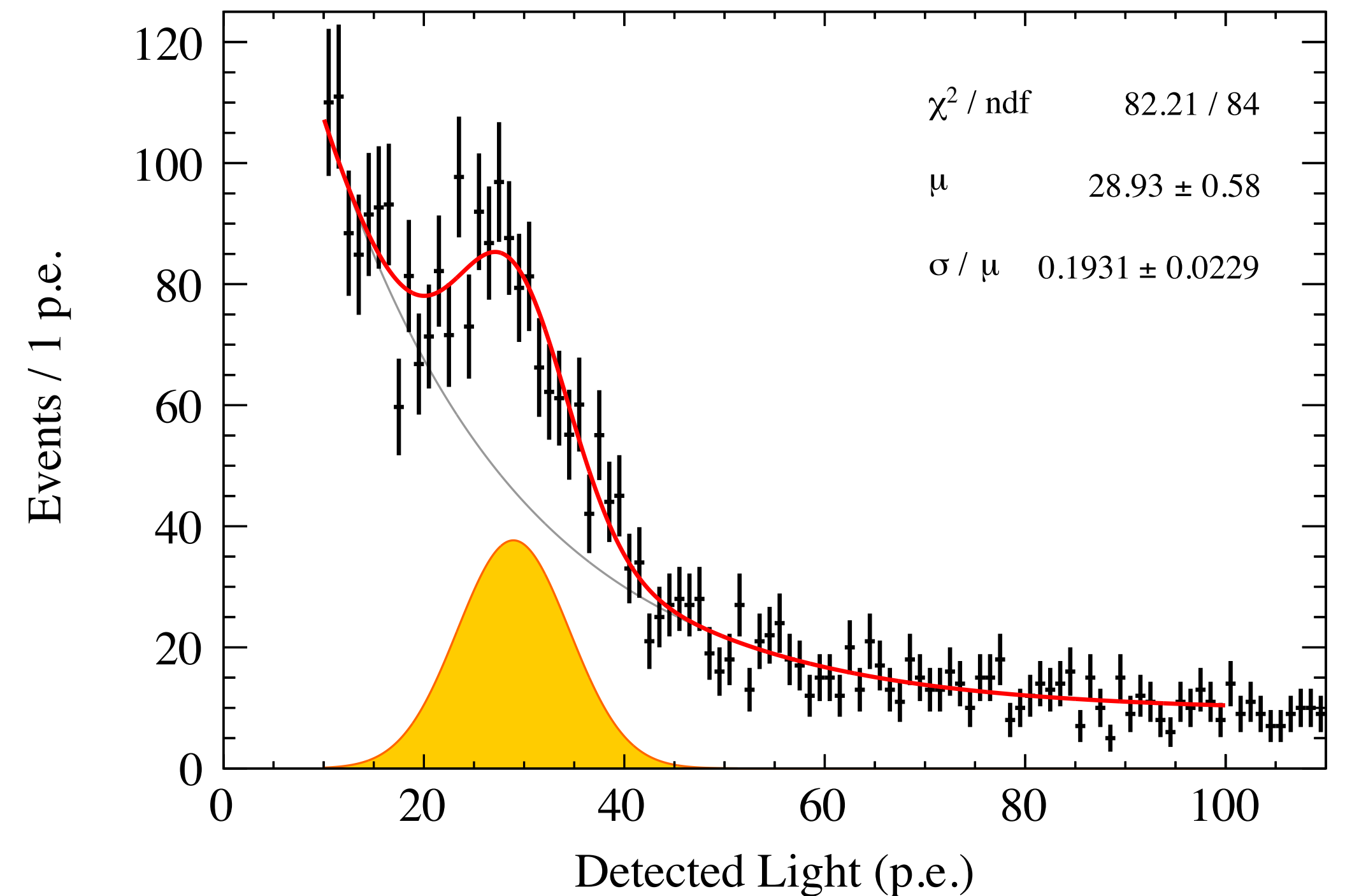
- : 大気アルゴン中に存在する³⁷Ar由来の2.8 keV線を活用
 - Cosmogenic, 地上実験時には不可避な背景事象
- : 大気アルゴン中の³⁷Arを用いるため, Passive shield + LAr Active shieldによって環境放射線を遮蔽
- : 2-PMT Coincidence Trigger (~1 p.e.閾値), 0.23 kg x 27 hourのデータ取得により, 2.8 keV事象をシンチレーション光で初観測

Gaus.
Fitting

$\mu = 28.9 \pm 0.6$ p.e.,
 $\sigma = 19.3\%$ ($\sim 1/\sqrt{N}$),
 Rate ~ 30 mBq/kg

³⁷ Ar	
半減期	35.0 day
生成	⁴⁰ Ar(n, 4n) ³⁷ Ar, ³⁶ Ar(n, γ) ³⁷ Ar, ⁴⁰ Ca(n, α) ³⁷ Ar
崩壊	Electron Capture (100%) 2.8 keV (K-shell), 0.27 keV (L-shell)
存在量	$\sim 1.3 \times 10^{-20}$ (~ 45 mBq/kg)

[2] PRC 100 024608 (2019)



測定結果

arXiv:2003.14248

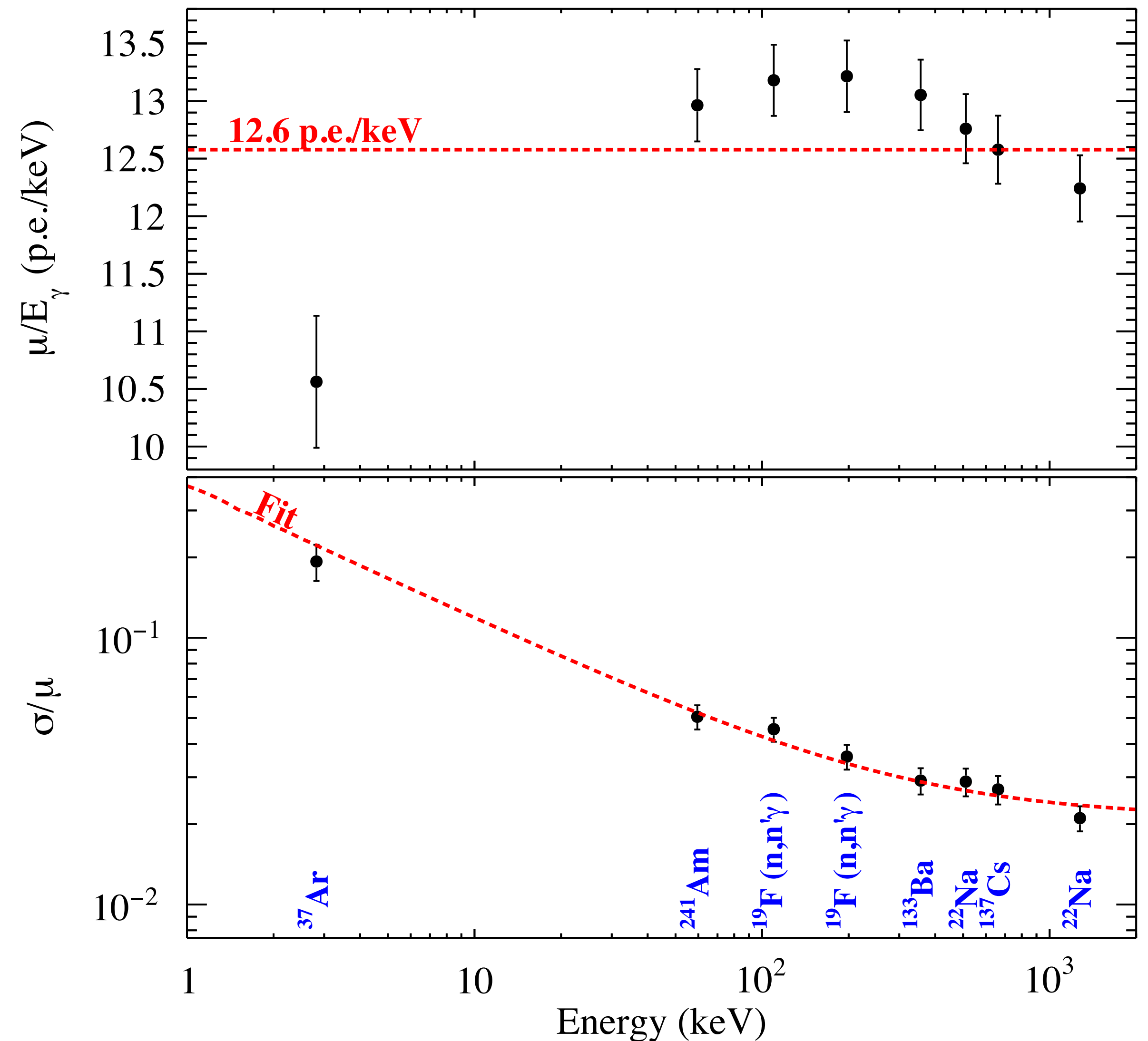
: 2.8 keV - 1275 keVの電子反跳に対する検出光量とエネルギー分解能

- エネルギーに依存した検出光量
(→ 詳細は次頁)
- エネルギー分解能:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{0.37^2}{E [\text{keV}]} + 0.021^2}$$

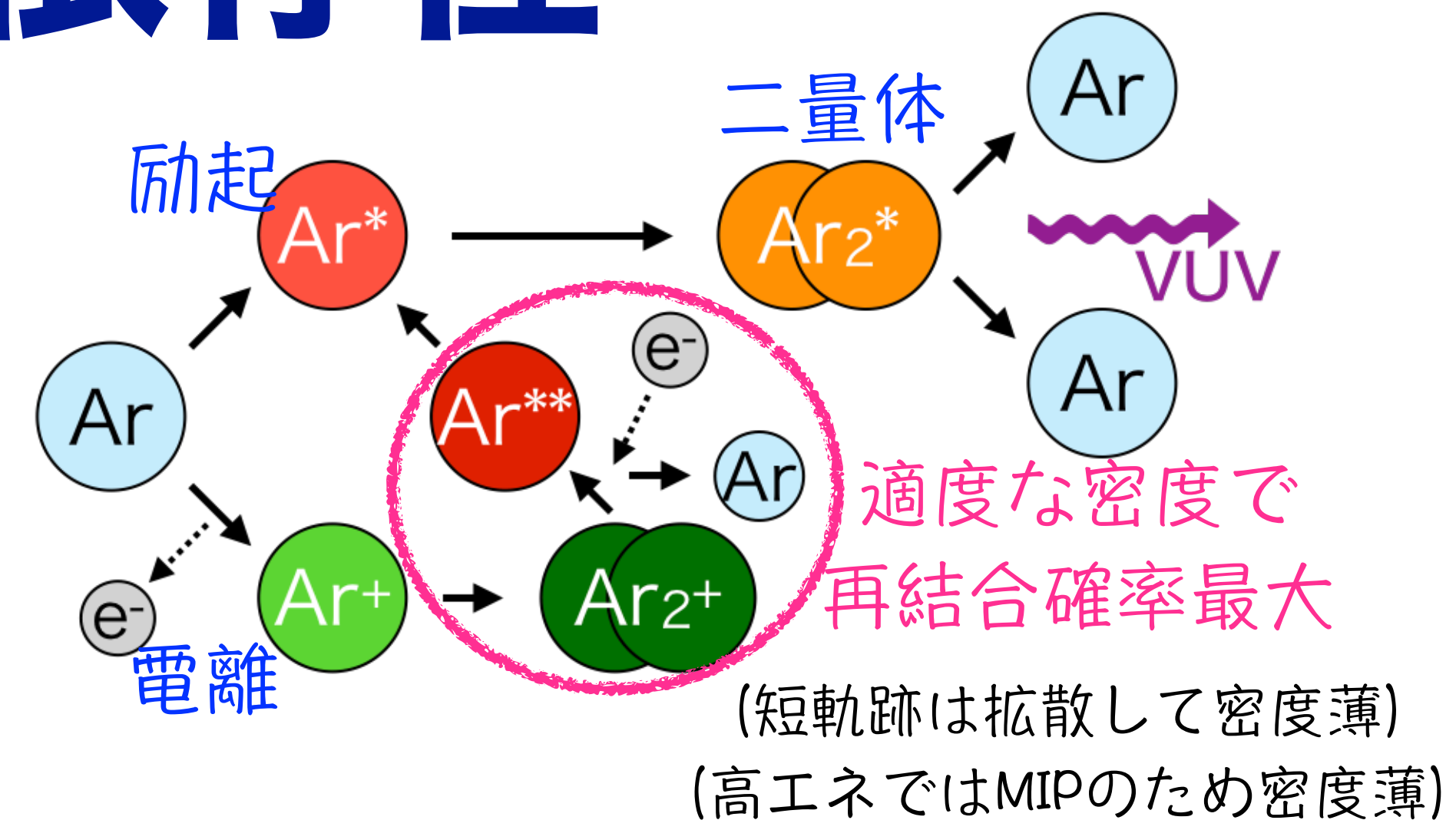
Stochastic項は

光子数統計 (Poisson過程) と
PMTのゲイン分散が主な寄与



発光効率のエネルギー依存性

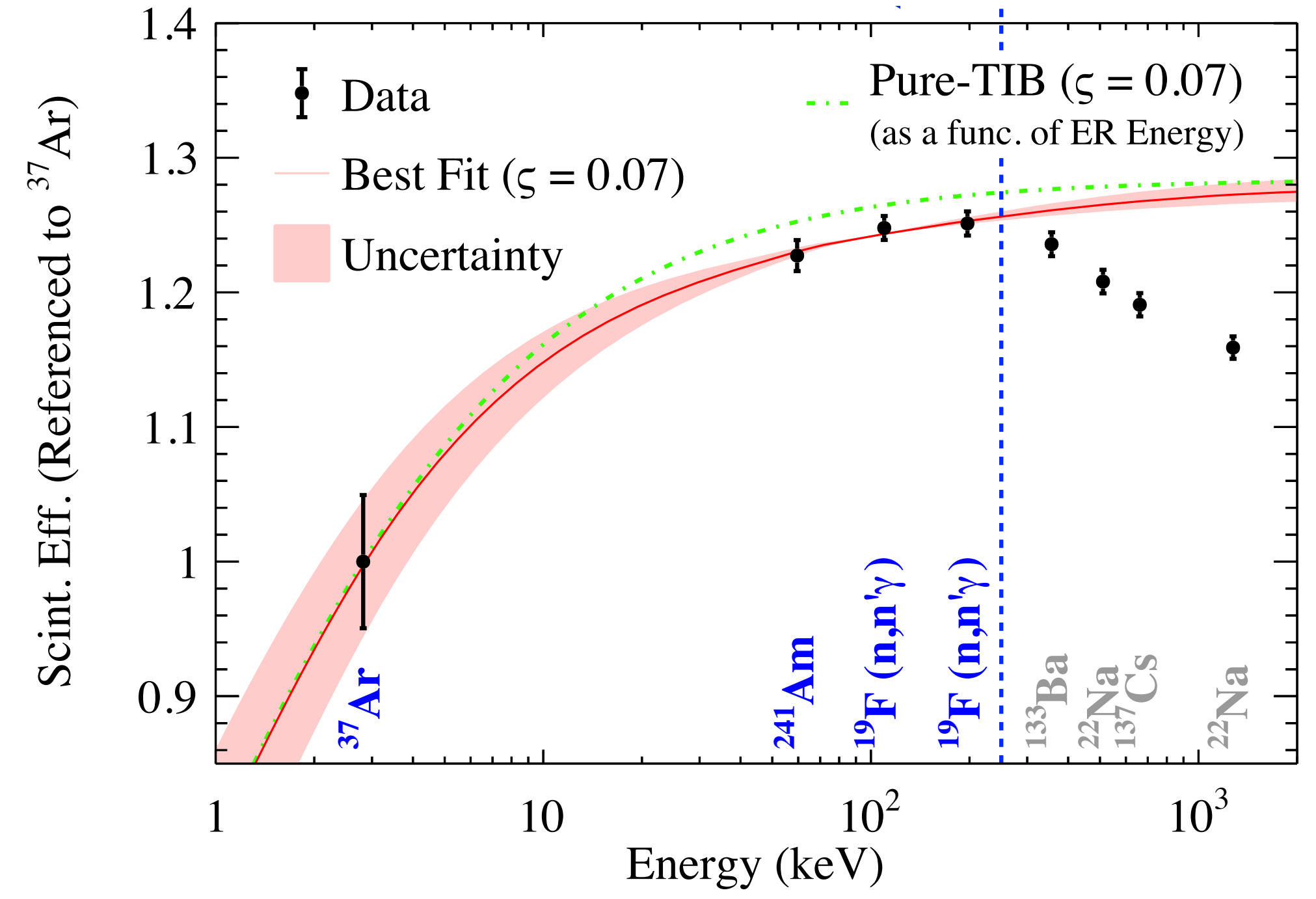
- : 液体キセノンと同様に、
電離電子-イオン再結合過程に起因すると解釈できる
 - 電離密度が反跳電子の軌跡長とそのdE/dxに依存
- : <200 keVの領域をTIB Modelにより説明
 - 検出器内での散乱回数（反跳電子数）を考慮してデータをフィット
 - （全吸収エネルギーではなく）反跳電子のエネルギーによって決まる値 = **検出器に不変な量**を決定



TIB Model

$$n_{ph} = \frac{E}{W}(N_{ex} + RN_i), \quad R = 1 - \frac{\ln(1 + N_i\zeta)}{N_i\zeta}$$

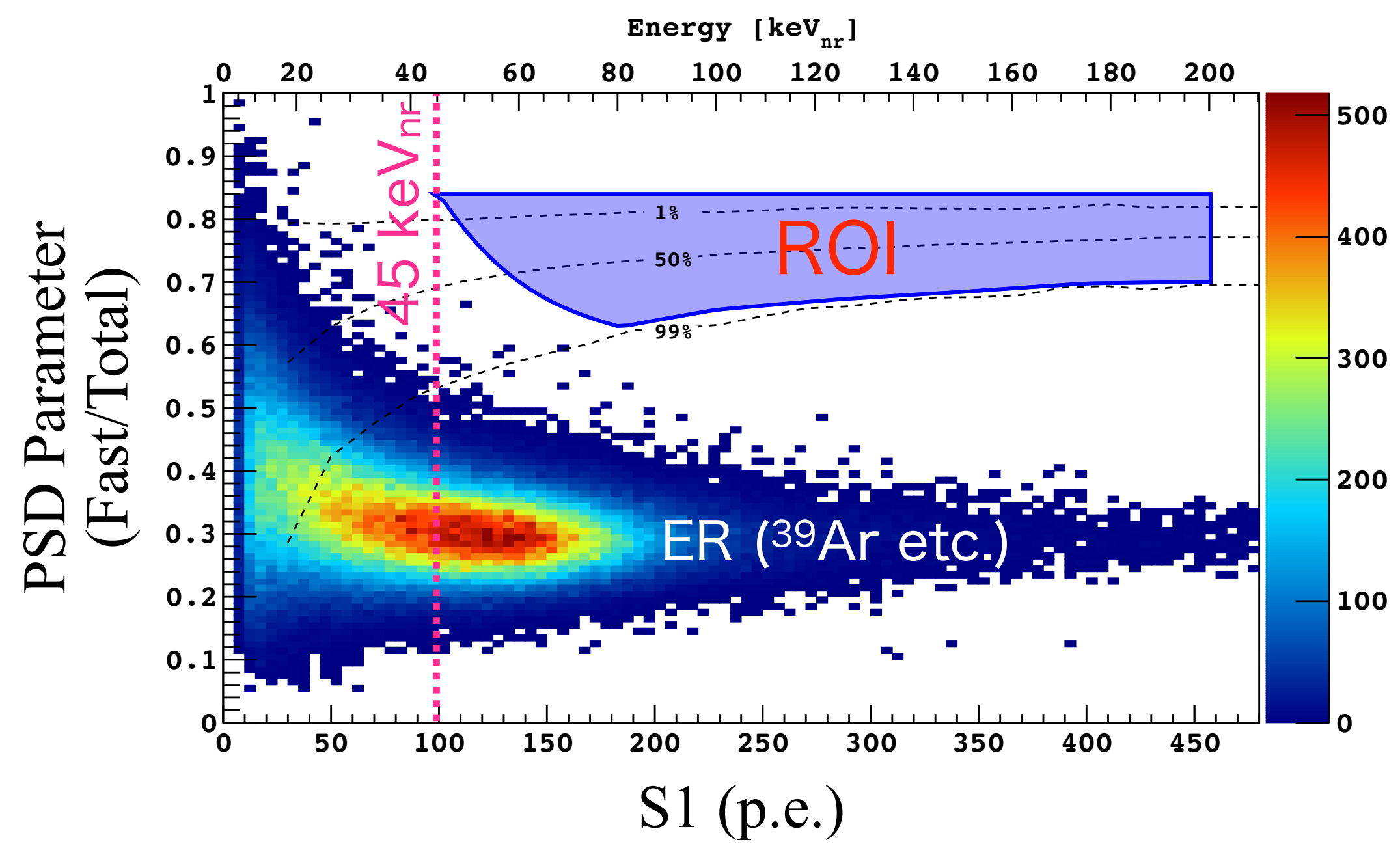
[N_{ex} : 生成励起子数, N_i : 生成電離数, ζ : Free Parameter]



纏めと展望 ¹¹

- : 低エネルギー (<10 keV) 電子反跳事象は
低質量WIMP暗黒物質探索における主要な背景事象源
- : 小型1相検出器と種々較正源を用いて液体アルゴン応答を測定
 - **世界最大光量**を達成: 12.6 ± 0.3 (11.1 ± 0.3) p.e./keV
 - 大気アルゴン中の放射性同位体³⁷Ar (2.8 keV) を観測
- : 液体アルゴンシンチレーション発光効率のエネルギー依存性を測定
 - **再結合確率のエネルギー依存性**によって説明
 - 原子核反跳に対するアルゴン応答の理解と同様のアナロジー
 - **低エネルギー領域では発光効率が減衰**することを示唆
 - 低エネルギー電子背景事象量が実効的に増加する可能性

Backup



PRD 98 102006 (2018)

