

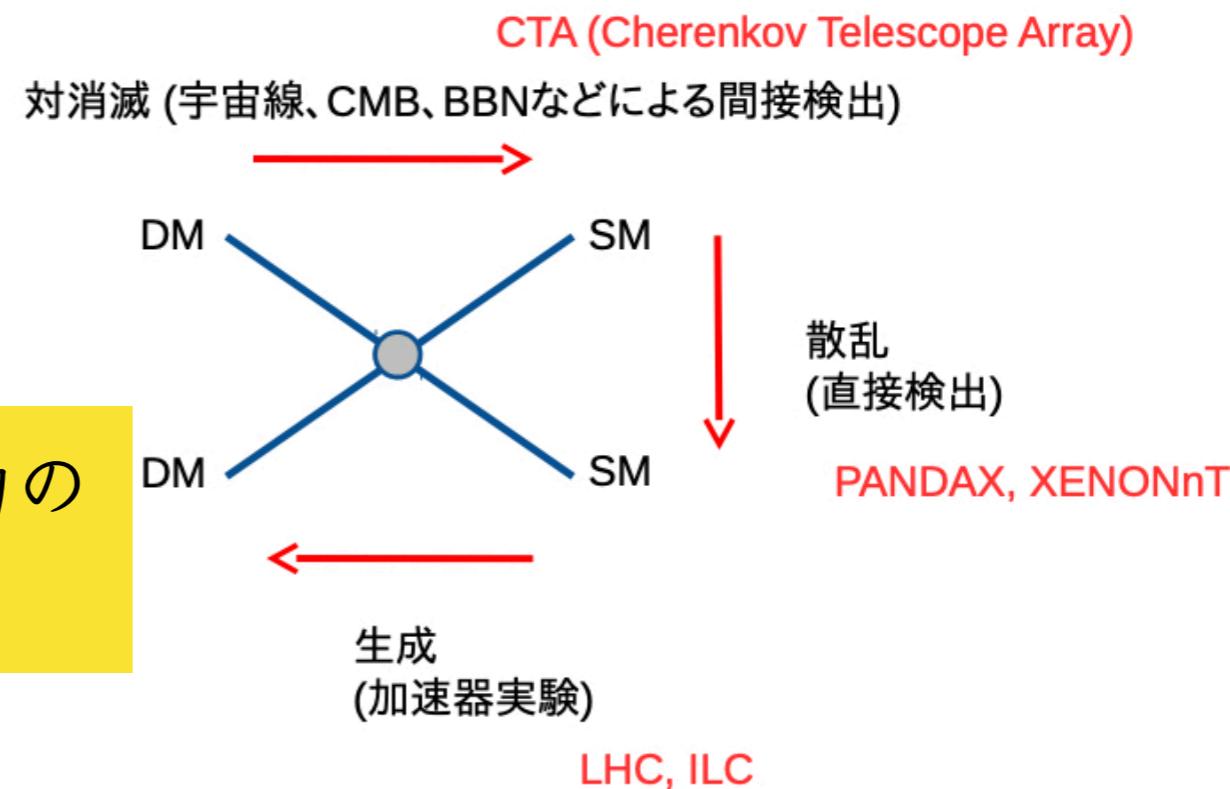
The first search for bosonic super-WIMPs with masses up to $1 \text{ MeV}/c^2$ with GERDA

2020.7.21 谷 真央

Dark Matter (DM)

- 多くの観測から存在が指摘されている
 - 銀河の回転速度
 - 重力レンズ
 - 宇宙の大規模構造
 - CMB
 - ...
- DM が SM (標準模型粒子) とどう結合するかは不明
- DAMA 実験 (イタリア) が DM の季節変動検出を主張するも、他実験では検出されていない
- DM の質量が GeV~TeV スケールなら、熱的残存量をうまく説明 (WIMP ミラクル)
- Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) では SM と弱いスケールで結合し、原子核反跳などとして観測できると期待
- 様々な実験で探索してきたが、兆候はつかめず

これらは DM の重力の効果のみを示す



super-WIMP

- WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) の考え方
 - 宇宙初期に熱的に生成された DM が今も残っていると考える
 - 宇宙が膨張し反応できなくなると、DM は消滅できなくなる (freeze out)
 - 残存量を説明するには、弱い力程度の相互作用の強さを要求
- 現在のところ WIMP は見つからない (&解決しきれない問題)
→ keV スケールの DM を考える
- SM との相互作用は非常に弱くなる (super Weakly Interacting Massive Particle)
- 非常に稀に軽い SM (γ 、 ν) に崩壊することが許される
- フェルミオンの super-WIMPs (ステライルニュートリノ、グラビティーノ) は直接探索は不可能だと考えられている
- ボソンの super-WIMPs は理論的に直接探索不可能ではない

Plank Scale:

$M_{\text{Pl}} \simeq 1.2 \times 10^{19} \text{GeV}$ で結合

direct detection of super-WIMP

- 通常の WIMP 直接探索では主に原子核反跳がシグナル
- ボソンの super-WIMP (dark photon, axion-like particle) では、反応物質において光電効果の類似反応を起こし、電子を放出する
- cold DM を想定しており DM の速度が非相対論的だと仮定すると、光電ピークがたつ (→DM の質量に相当)

$$R \approx \frac{4 \cdot 10^{23}}{A} \frac{\alpha'}{\alpha} \left(\frac{[\text{keV}/c^2]}{m_v} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1} \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{dark photon} \\ (\text{vector}) \end{array}$$

$$R \approx \frac{1.2 \cdot 10^{19}}{A} g_{ae}^2 \left(\frac{m_a}{[\text{keV}/c^2]} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}, \quad (2) \quad \begin{array}{l} \text{ALPs} \\ (\text{pseudoscalar}) \end{array}$$

$\alpha'/\alpha, g_{ae}$: 結合定数 (無次元量)

A : 吸収体の原子質量

σ_{pe} : Geにおける光電効果の断面積

$$\frac{\sigma_{abs} v}{\sigma_{photo}(\omega = m_V) c} \simeq \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

$$\frac{\sigma_{abs} v}{\sigma_{photo}(\omega = m_a) c} \simeq \frac{3 m_a^2}{4 \pi \alpha f_a^2} \cdot \left(g_{ae} = \frac{2 m_e}{f_a} \right)$$

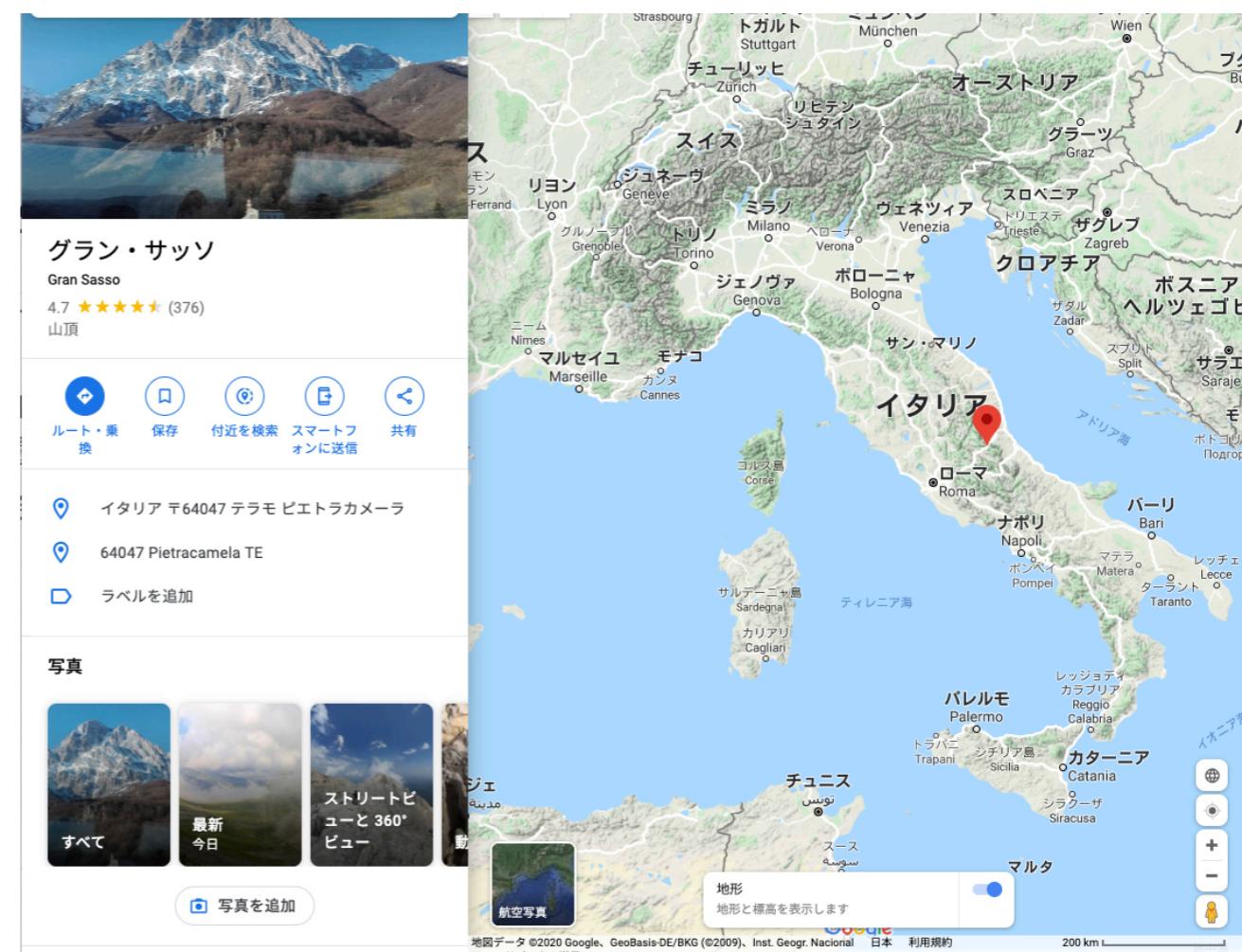
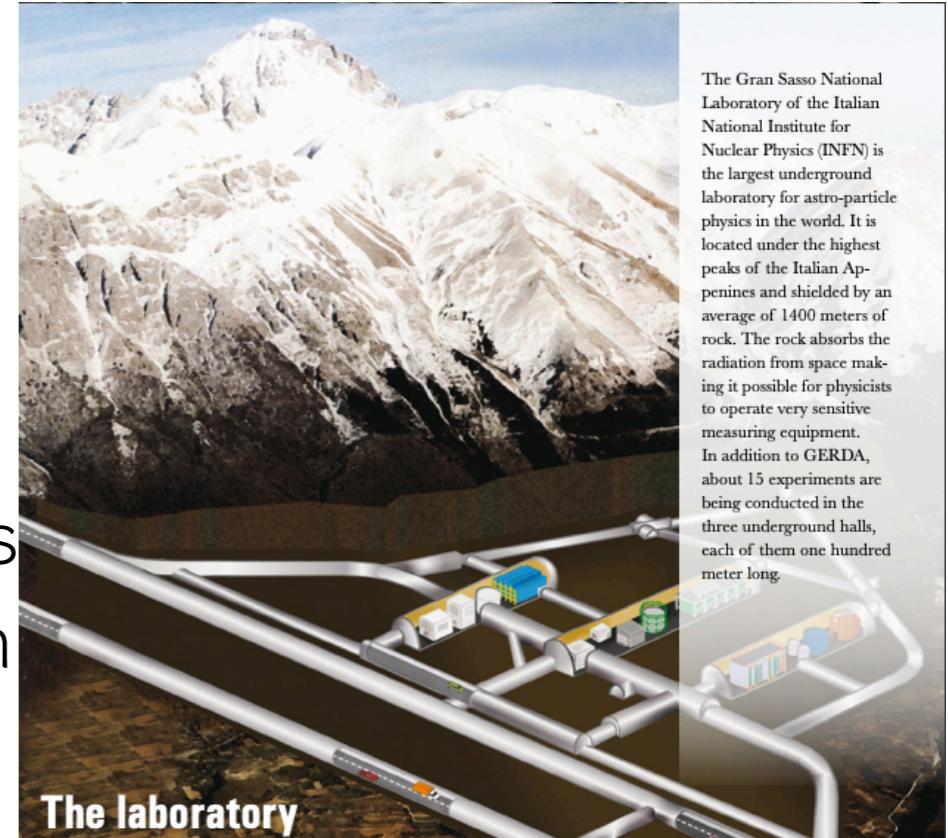
super-WIMPs searches

- 液体キセノン検出器 (大型化が可能)
 - XMASS (Xenon detector for weakly interacting Massive Particles, …, 神岡)
 - PandaX - II (Particle and Astrophysical Xenon Experiment, 中国)
 - LUX (Large Underground Xenon Experiment, アメリカ)
 - XENON100 (イタリア)
- ゲルマニウム検出器
(バンドギャップが小さく、非常にエネルギー分解能が良い)
 - MAJORANA DEMONSTRATOR
 - Super CDMS (Cryogenic DM Search, カナダ)
 - EDELWEISS - III
(Expérience pour DÉtecter Les WIMPs En Site Souterrain, フランス)
 - CDEX (China DM Experiment)

これらの実験では ~500 keV 領域を探索；今回は1 MeV まで探索

GERDA experiment

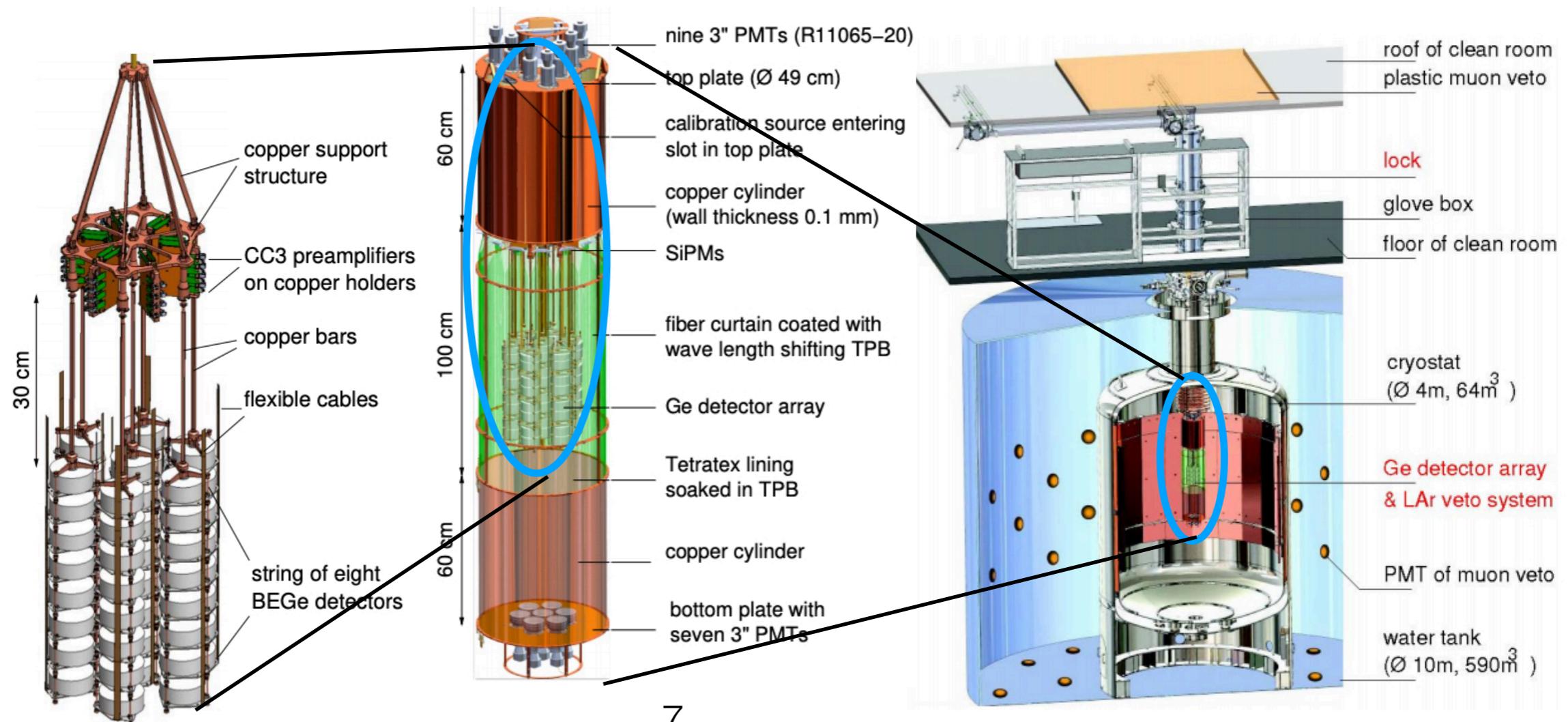
- Germanium Detector Array
- The Gran Sasso National Laboratory of the Italian National Institute for Nuclear Physics (イタリア) に位置、water equivalent ~3500m
- 高濃度 ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ を探索する実験



overview of the detector

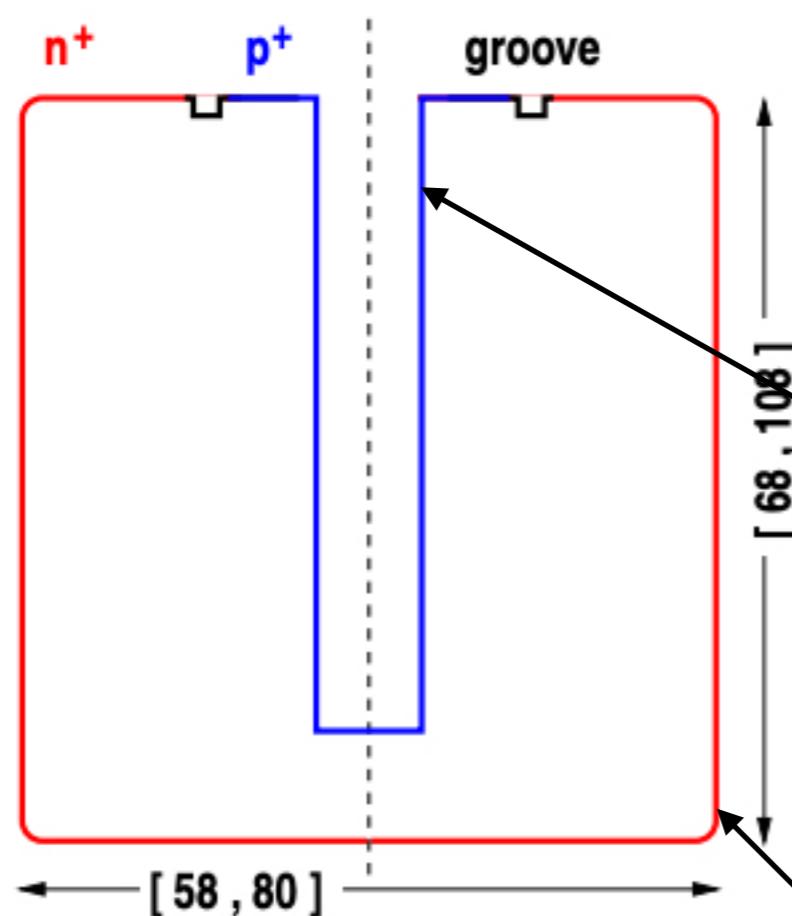
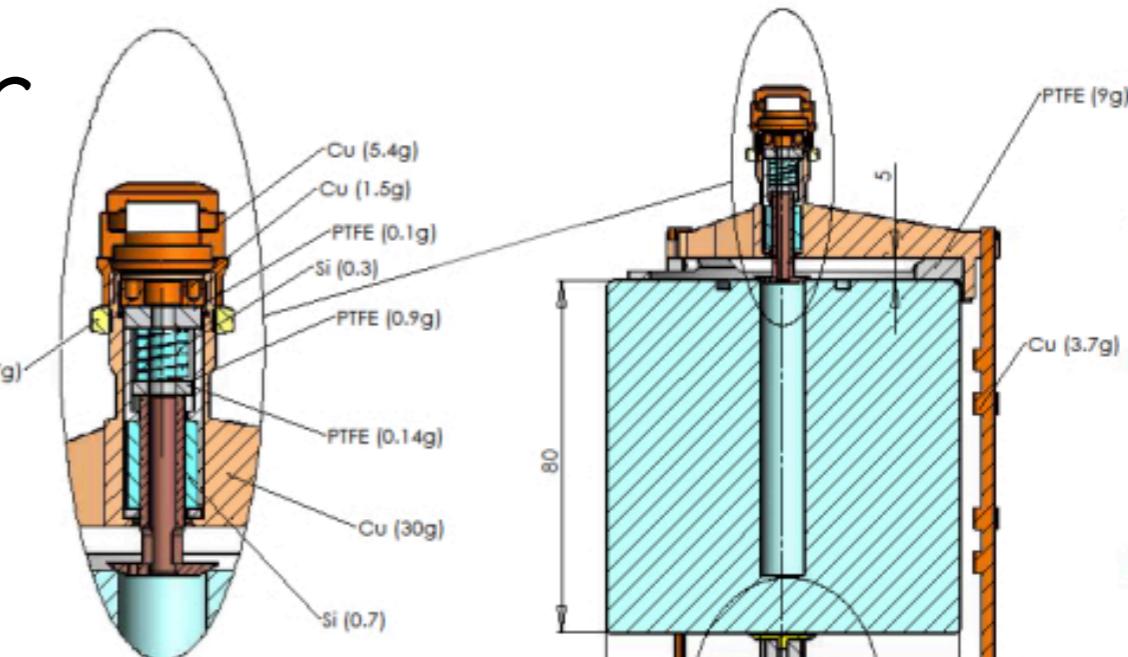
- 高濃度ゲルマニウム検出器と、それを囲う液体アルゴン(LAr)と水のタンクからなる
- 非常に稀な信号を検出するため、極めてバックグラウンドの少ない実験環境を作る

超低バックグラウンド+高いエネルギー分解能
→ピーコ構造を持つ稀な反応の探索に有利



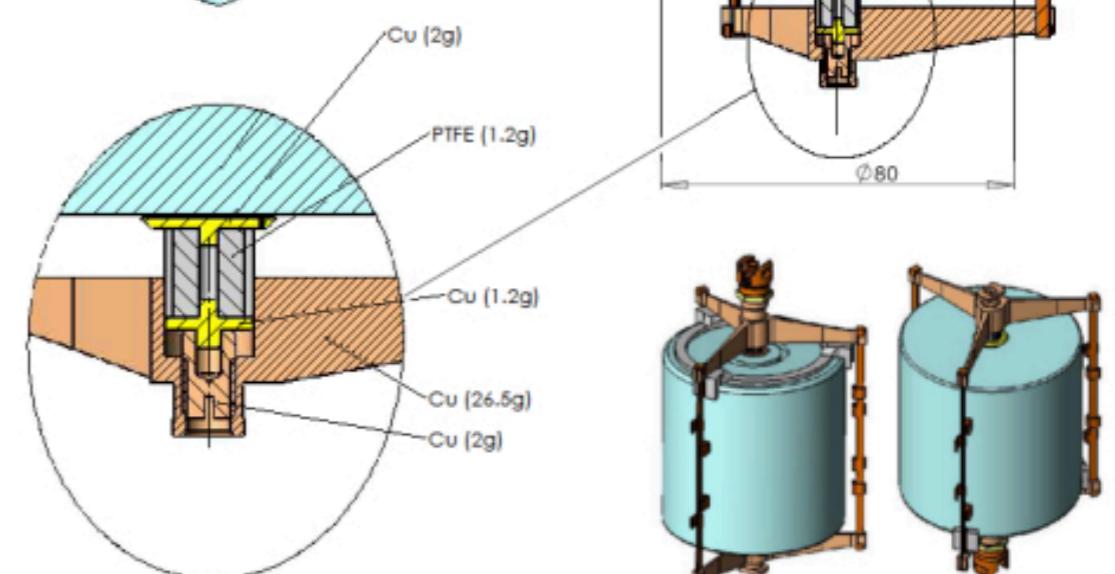
High-Purity Ge detector

- 二重ベータ崩壊核 ^{76}Ge の存在比を 86% 以上に高めた enriched material を使用 (天然は 7.8%)
- エネルギー分解能は $Q_{\beta\beta} = 2039 \text{ keV}$ で 0.2%
- 高濃度 ^{76}Ge を使うことで s/n 比が向上
- (欠点)大型化が困難



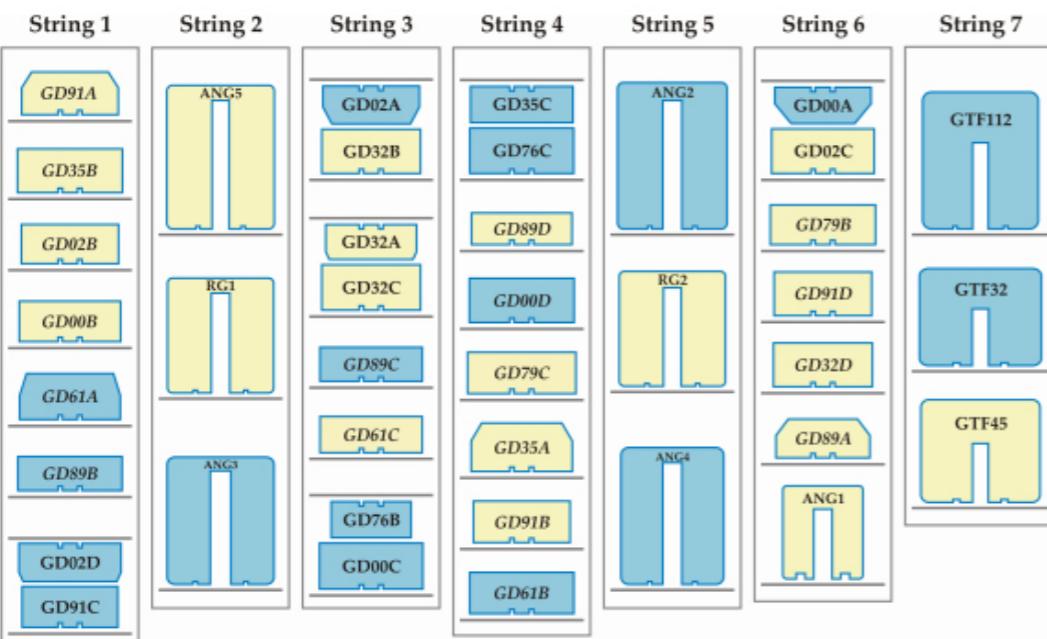
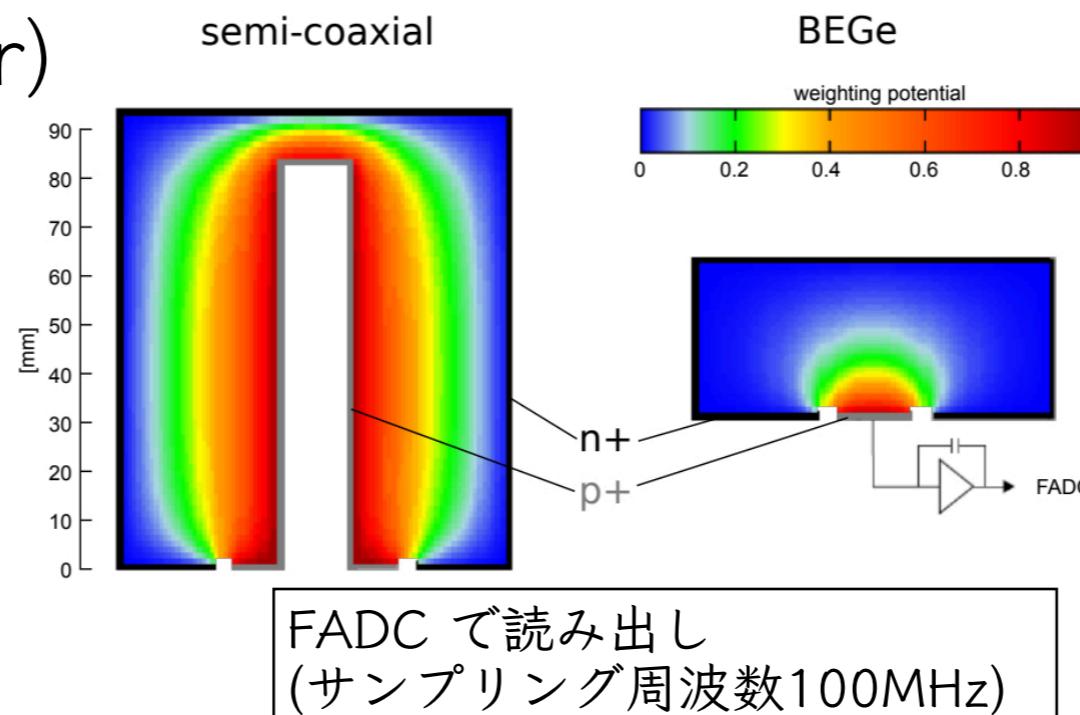
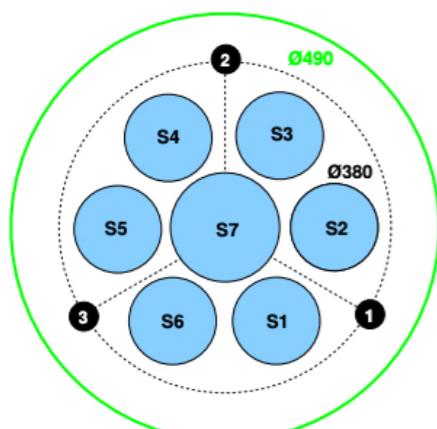
同軸 (coaxial) Ge 検出器

p電極(ホウ素イオン注入)
信号の読み出し
p-n間に溝(groove)
n電極(リチウム拡散)
HV (2.5~5.0 kV、逆バイアス)をかける

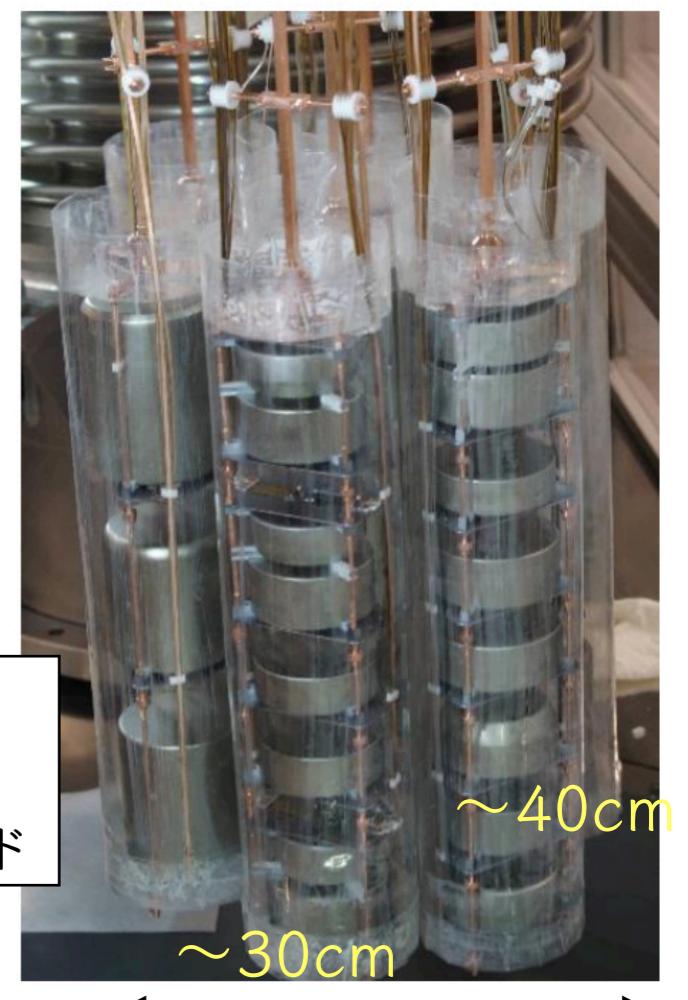
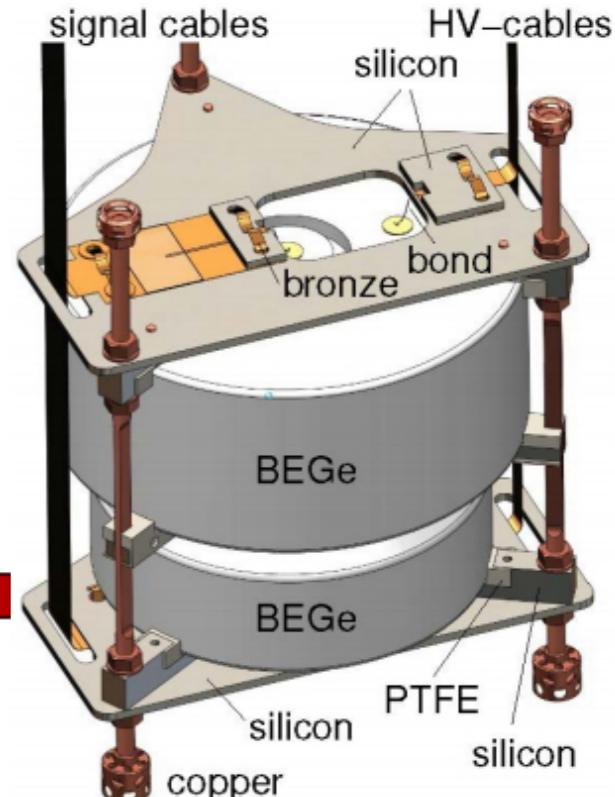


High-Purity Ge detector

- 7(+3)個のcoaxial detector (3個は天然Ge)
- 30個のBEGe (Broad Energy Ge detector)
- BEGe は波形弁別能力が高い



$(^{42}\text{Ar} \rightarrow)^{42}\text{K}$:
Q値 3.5 MeVの β 線源
高純度ナイロンでシールド



- 宇宙を構成する DM が全て super-WIMP と仮定（密度 0.3 GeV/cm^3 ）したとき、地球上の検出器における dark photon, ALPs の吸収率

$$R \approx \frac{4 \cdot 10^{23}}{A} \frac{\alpha'}{\alpha} \left(\frac{[\text{keV}/c^2]}{m_v} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1}\text{d}^{-1} \quad (1) \quad \text{dark photon (vector)}$$

$$R \approx \frac{1.2 \cdot 10^{19}}{A} g_{ae}^2 \left(\frac{m_a}{[\text{keV}/c^2]} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}, \quad (2) \quad \text{ALPs (pseudoscalar)}$$

$\alpha'/\alpha, g_{ae}$: 結合定数 (無次元量)

A : 吸収体の原子質量

σ_{pe} : Ge における光電効果の断面積

$$\frac{\sigma_{abs} v}{\sigma_{photo}(\omega = m_V) c} \simeq \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

$$\frac{\sigma_{abs} v}{\sigma_{photo}(\omega = m_a) c} \simeq \frac{3 m_a^2}{4 \pi \alpha f_a^2} \cdot \left(g_{ae} = \frac{2 m_e}{f_a} \right)$$

200 keV/c² ~ 1 MeV/c² 領域 : 2015年12月から2018年4月 (58.9 kg·year に相当)

60 keV/c² ~ 200 keV/c² 領域 : 2017年10月から2018年4月 (14.6 kg·year に相当)

exposure [kg·yr]	BEGe	coaxial	total
60 keV - 200 keV	7.7	6.9	14.6
200 keV - 1 MeV	30.8	28.1	58.9

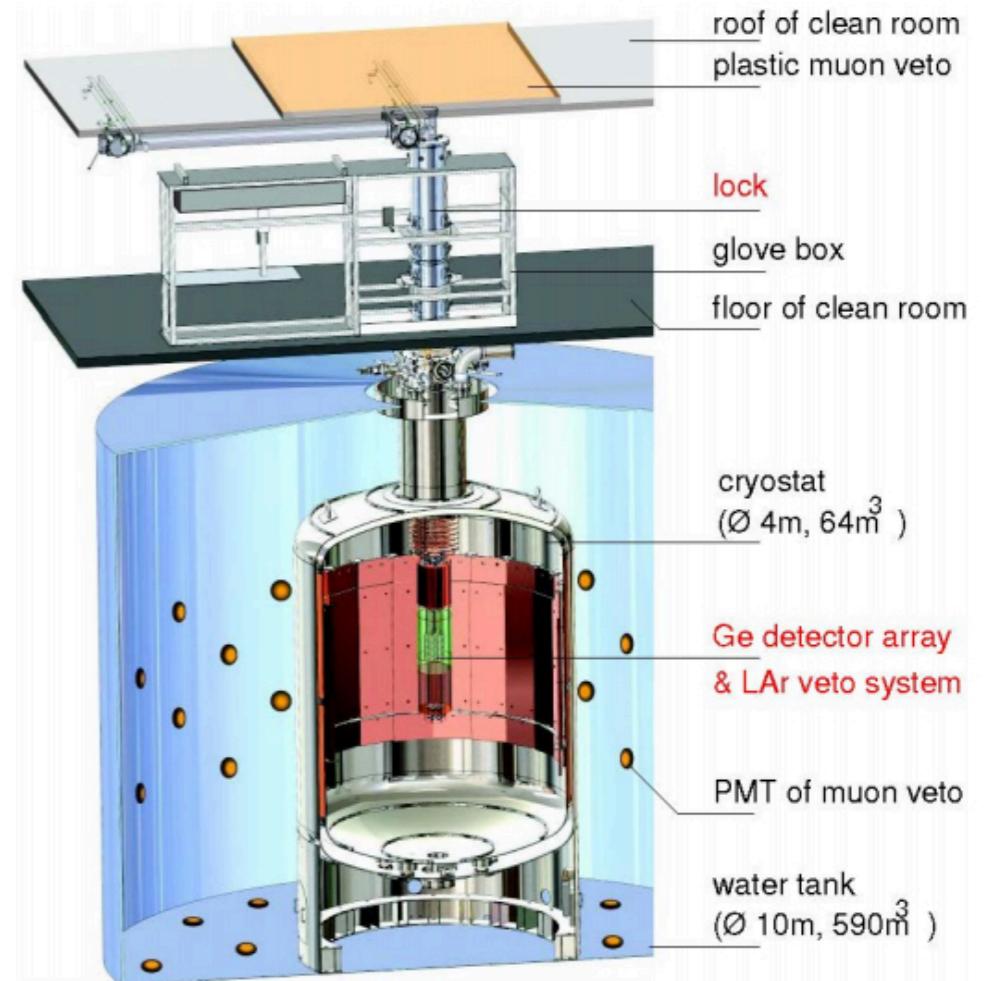
background

- 最大の寄与は、検出器の周辺物質内の放射性同位体。
 - 周りにものを置かない
 - 純度の高い物質を使う
- 岩石内の原子核の崩壊で生じる(α を介した)中性子・ γ 線
- LAr に内在・混入している放射性同位体 (^{39}Ar , ^{42}Ar , Rn)
- 宇宙線
- 宇宙線による核破碎でGe内に生じる核種 (^{60}Co , ^{68}Ge)
 - 高濃度ゲルマニウムを使うことでこれらの核種は生じにくい

Table 13 Counts in the analysis window observed in Phase IIa and IIb with indicated exposures \mathcal{E} after anti-coincidences within the detector array (AC), after anti-coincidences and LAr veto (LAr) or pulse shape discrimination (PSD), and after all cuts (all). The quoted background indices BI in units (biu) of 10^{-3} cts/(keV·kg·yr) have been determined after all cuts; the uncertainties are statistical and deduced for a Poissonian signal.

det/phase	\mathcal{E} (kg·yr)	AC cts	LAr cts	PSD cts	all cts	BI (biu)
Coax/IIa	5.0	19	12	8	4	$3.5^{+2.1}_{-1.5}$
	/IIb*	11.2	38	14	17	5
total*	16.2	57	26	25	9	$2.7^{+1.0}_{-0.8}$
BEGe/IIa	5.8	21	6	5	1	$0.7^{+1.1}_{-0.5}$
	/IIb	12.4	30	11	6	3
total	18.2	51	17	11	4	$1.0^{+0.6}_{-0.4}$

* Values preliminary since PSD cuts are not yet finalized.

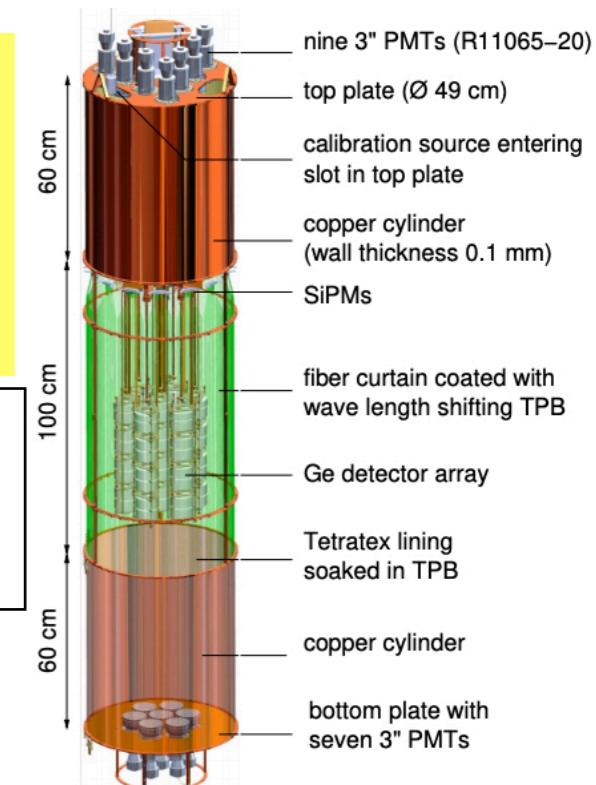


水とLAr で環境放射線を遮蔽
宇宙線ミューオンにはvetoをかける

LAr veto system
PMTとシリコン光検出器(SiPM)で LAr のシンチレーション光を検出する

$(^{42}\text{Ar} \rightarrow)^{42}\text{K}$:
Q値 3.5 MeVの β 線源
高純度ナイロンでシールド

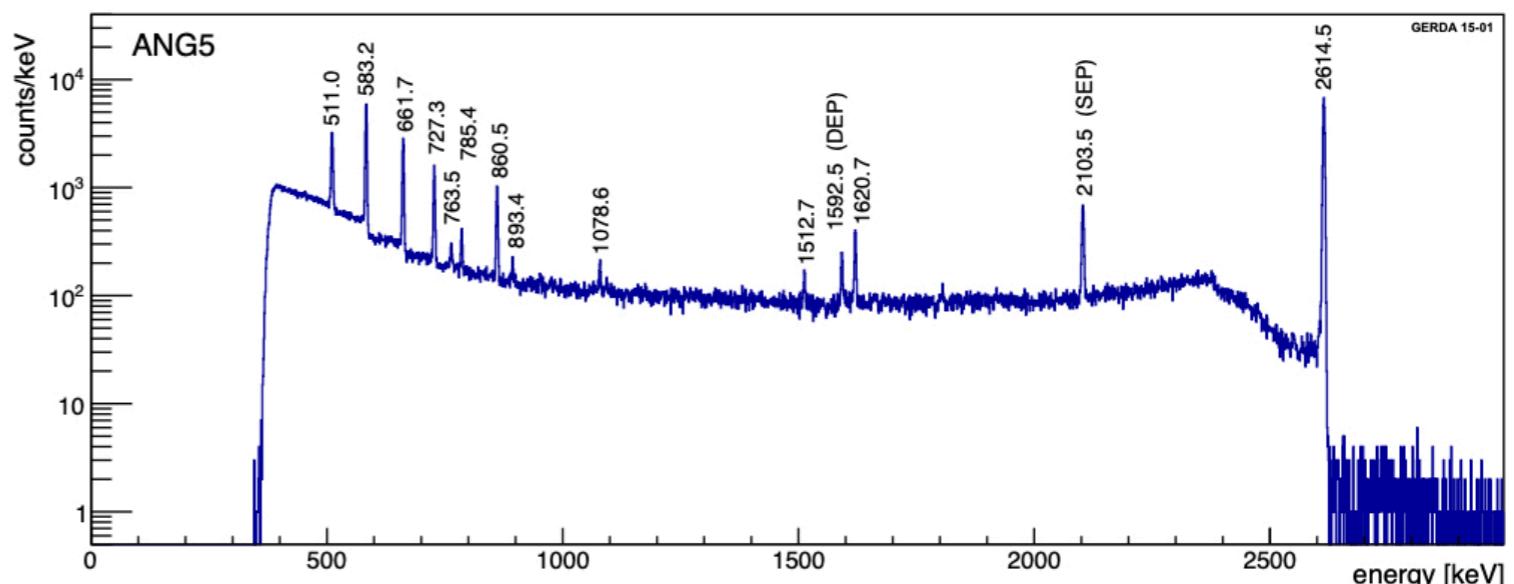
単位:
 10^{-3} counts/(keV·kg·year)



Calibration / Event selection

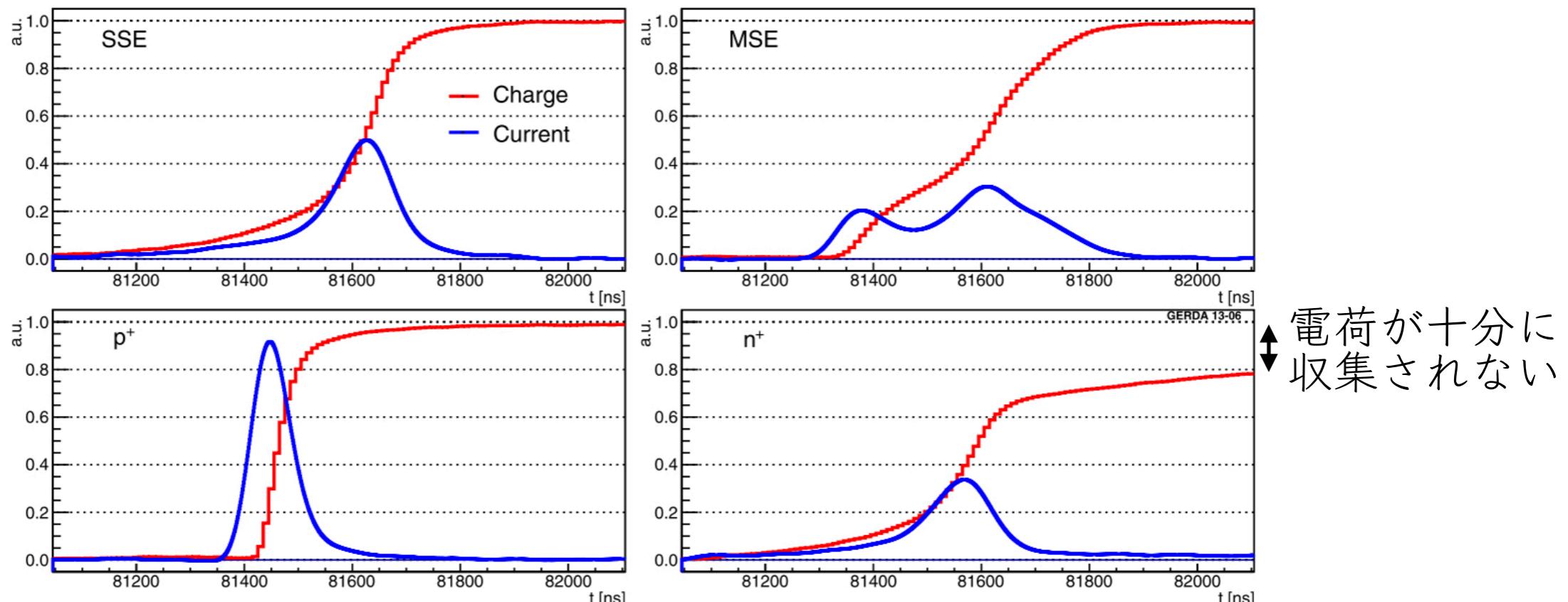
- 一週間おきに ^{228}Th 線源（総量 40 kBq）を用いたキャリブレーション
 - エネルギースレッショルド～400 keV
- 放電等、物理由来でないイベントは波形の情報をもとにカット
- 複数の Ge や、LAr・ミューオンveto などでコインシデンスが取れたら除く
(super-WIMPs は検出器内で一度だけ反応すると考える)
- Ge で反応後、 $6 \mu\text{s}$ のうちに LAr で反応があった場合は除く
(Ar が励起、一時的に二量体(excimer)となる)

以上により、bg を95%以上カット



pulse shape discrimination (PSD)

- $0\nu\beta\beta$ イベント : Ge 内の $\sim 1\text{mm}^3$ 程度の領域で信号が発生 (single-site events, SSE)
- γ 線による複数箇所でのエネルギー損失 (multiple-site events, MSE)
- 電極近辺で生じる α 、 β
 - n+極付近 : Li層では電場は弱く、長い risetime をもつ波形
 - p+極付近 : 電場が強く、短い risetime をもつ波形



Total Efficiency

$$\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{cuts}} \frac{1}{\mathcal{E}} \sum_i^{N_{\text{det}}} \mathcal{E}_i \cdot f_{\text{av},i} \cdot \epsilon_{\text{fep},i}$$

各 Ge 検出器について
和をとる

ϵ : exposure [kg·year]

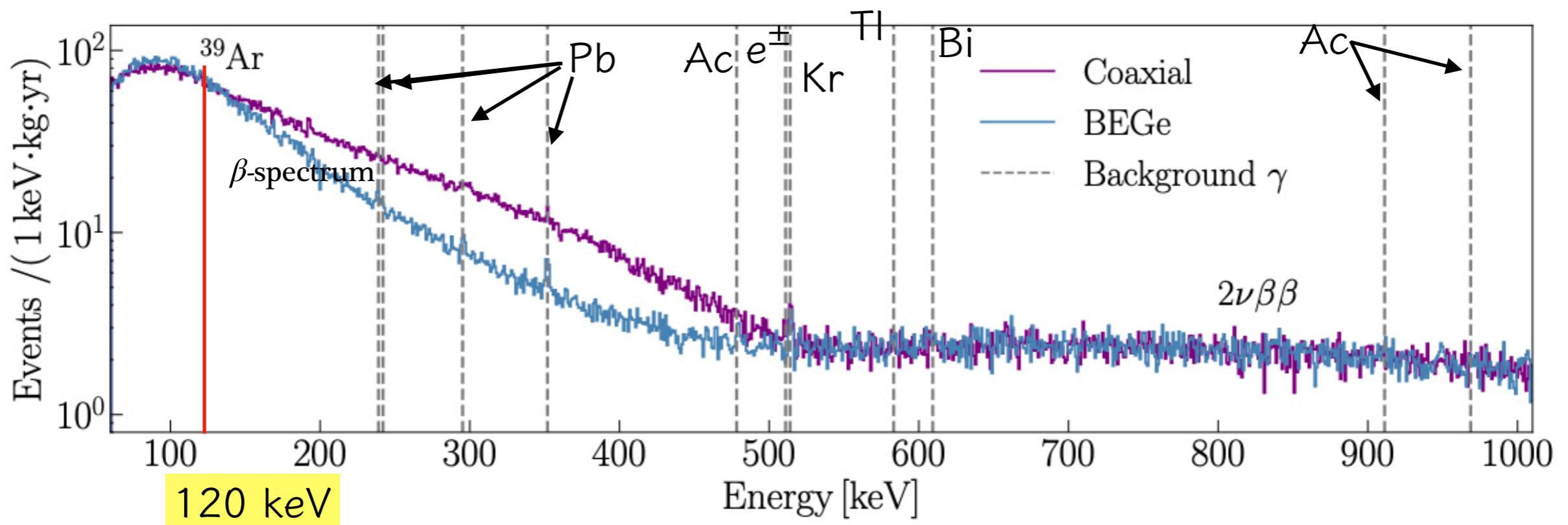
f_{av} : ^{76}Ge の質量比

ϵ_{fep} : the full energy absorption efficiency, シミュレーションで見積もる

	BEGe	Coaxial
$\langle \epsilon_{\text{fep}} \rangle E = 60 \text{ keV}$	99.5%	99.5%
$\langle \epsilon_{\text{fep}} \rangle E = 1000 \text{ keV}$	95.1%	96.2 %
$\epsilon_{\text{tot}} E = 60 \text{ keV}$	85.7%	84.2%
$\epsilon_{\text{tot}} E = 1000 \text{ keV}$	82.0%	81.4%

$\langle \epsilon_{\text{fep}} \rangle$: 各検出器についての平均値

survived events



- super-WIMP のシグナルは検出器の分解能で広がったガウシアンだと想定
- 24 keV 範囲ごとに Bayesian fit を行う

$$R_{\text{tot}}(E) = G_0(\mathcal{N}_0, E_0, \sigma_0) + F(E) + G_\gamma(\mathcal{N}_\gamma, E_\gamma, \sigma_\gamma)$$

G_0 : エネルギー(質量) E_0 のシグナルのガウシアン

G_γ : (範囲内に γ ピークがあるとき) γ によるbg のガウシアン

$F(E)$: bgの分布、120 keV 以下では 2次関数、それ以上では線形

γ 線源
(branching ratio > 0.1%)

Isotope of origin	Energy [keV]
^{228}Ac	478.3, 911.2, 969.0
^{208}Tl	583.2
^{212}Pb	238.6
^{214}Pb	242.0, 295.2, 352.0
^{214}Bi	609.3
^{85}Kr	514.0
e^+e^- -annih.	511.0

ベイズ推定

- パラメータ θ を求めたい。
- データDを観測した。
- θ についての事前情報を持っている。
- データDが観測された場合に、パラメータが θ である確率は

- 条件付き確率 $P(x|y)$ について、
 $P(x,y) = P(x|y)P(y) = P(y|x)P(x)$ より
$$P(x|y) = \frac{P(y|x)P(y)}{P(x)}$$

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)\pi(\theta)}{P(D)}$$

事後分布

尤度

データの分布 (規格化因子)

事前分布

$\pi(\theta)$: ひとまず仮定しておく
(一様分布だと、最尤法に一致)

- $P(\theta|D)$ が最大となるような θ を求める。

最尤法： [尤度関数] の最大化を行う

ベイズ推定： [尤度関数] • [事前分布] の最大化を行う

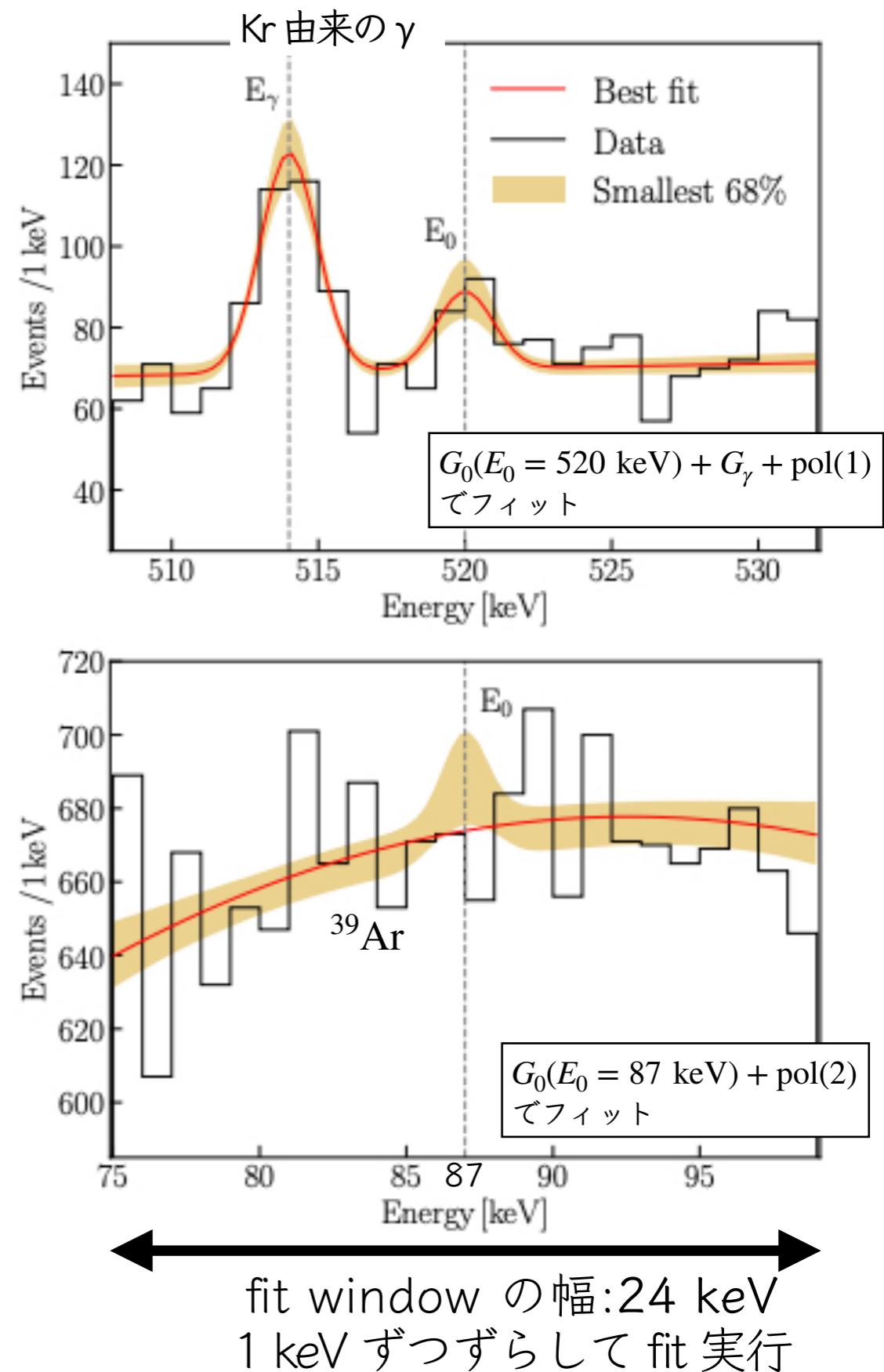
Data Analysis

- エネルギー E のとき、シグナルレート R_S となる確率は

$$P(R_S, \theta | \mathbf{E}, M) = \frac{P(\mathbf{E} | R_S, \theta, M) \pi(R_S) \pi(\theta)}{\int \int P(\mathbf{E} | R_S, \theta, M) \pi(R_S) \pi(\theta) d\theta dR_S}$$

M : モデル、 θ : 確率分布のパラメータ

- $\pi(R_S), \pi(\theta)$ を一様と仮定して BEGe 検出器データについて計算を実行
- 得られた確率分布を事前分布として Coaxial 検出器データについて計算を実行
- 5 σ 以上の有意度があるところをシグナルとして認める

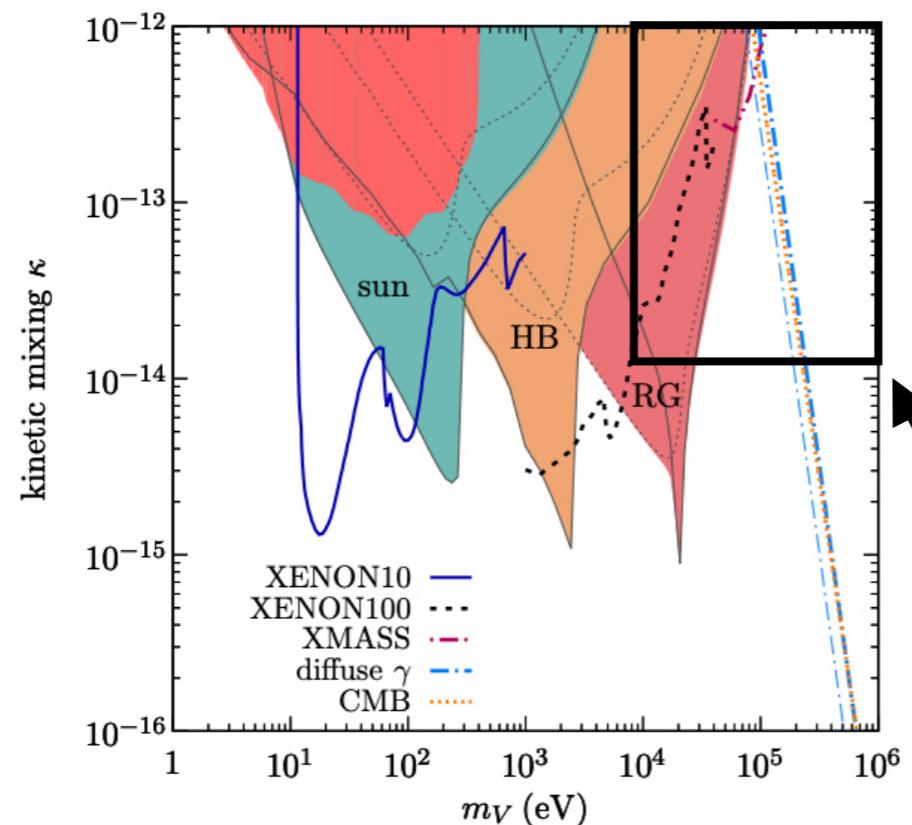


Axion-like particle

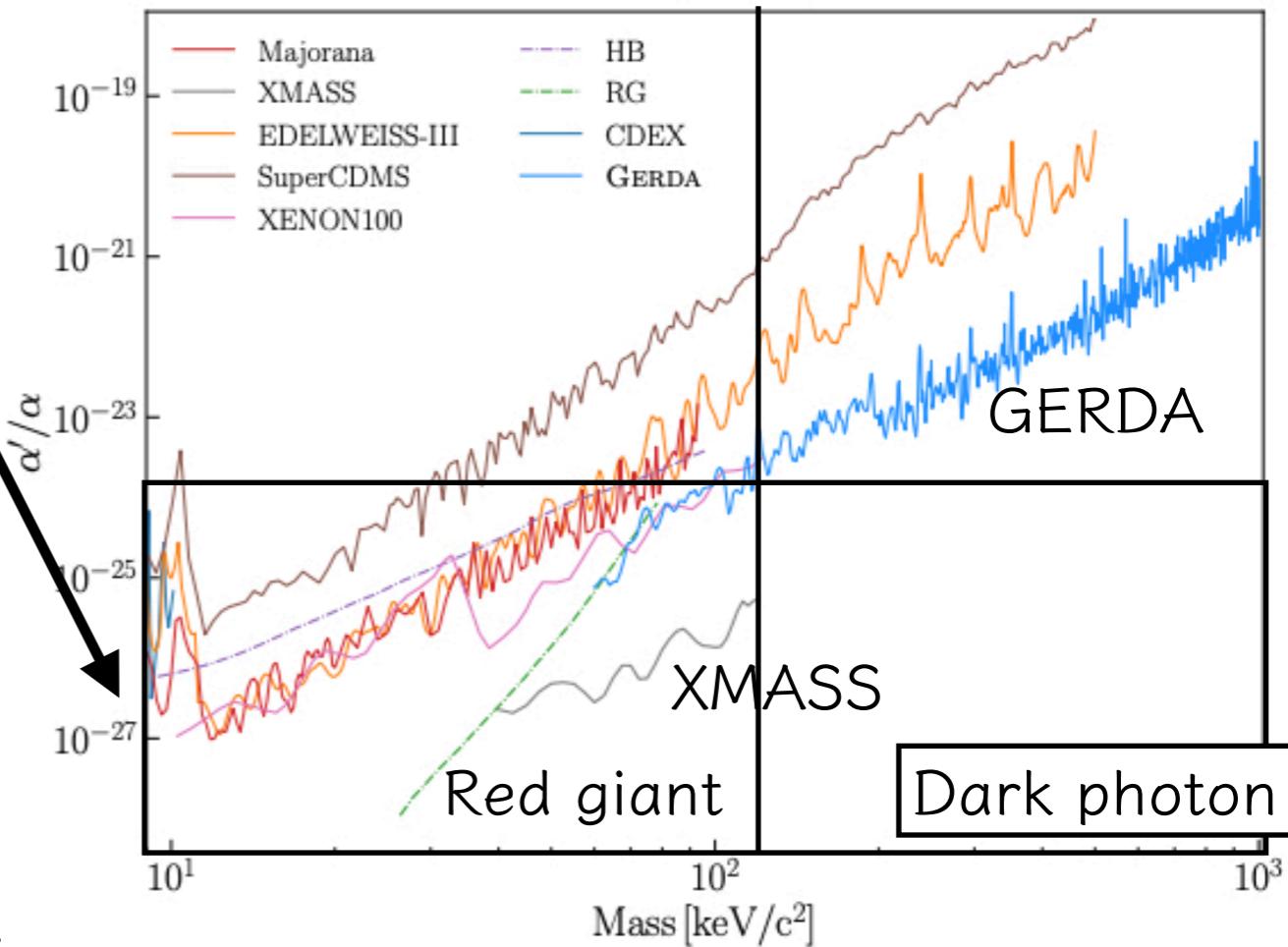
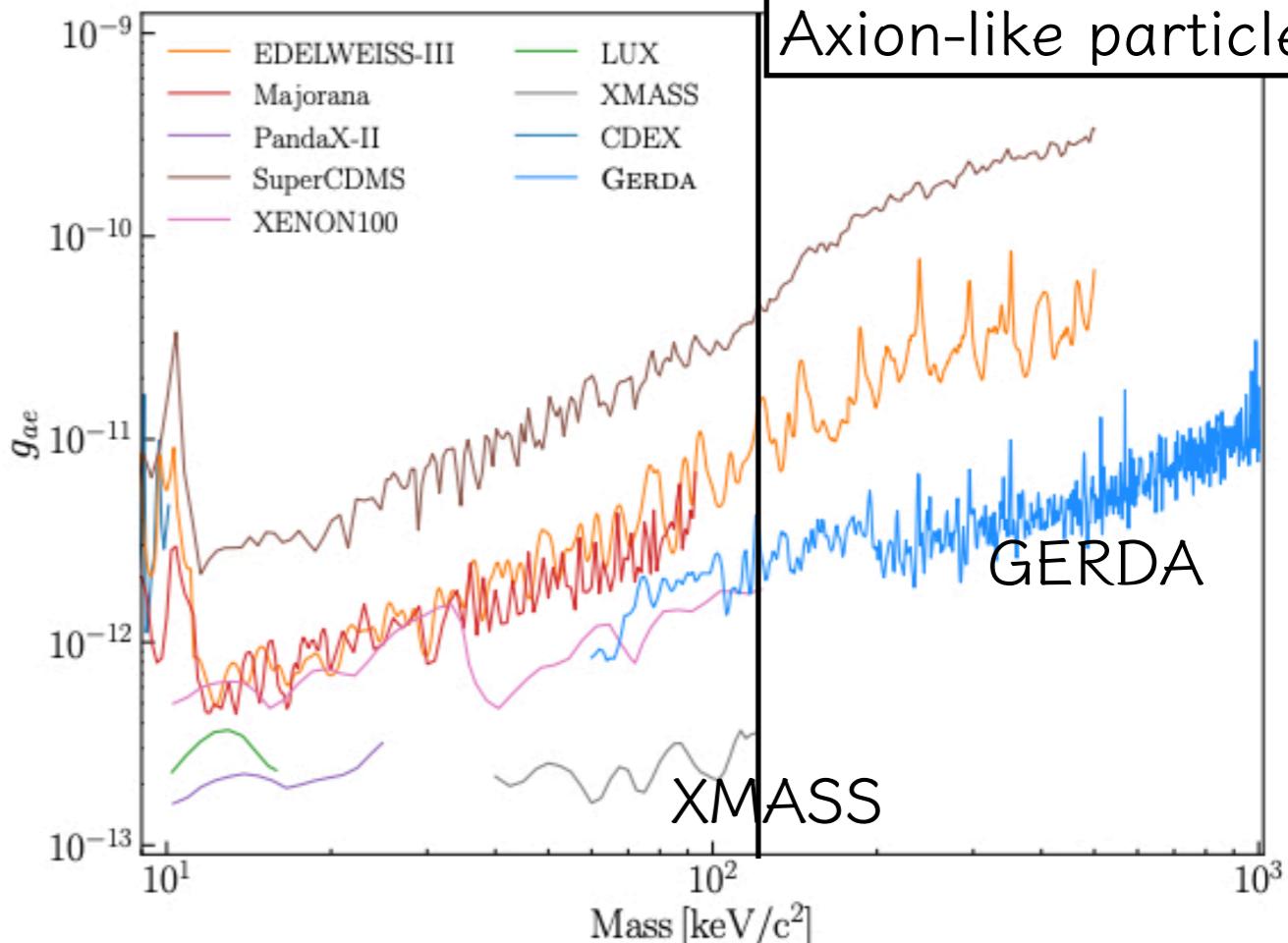
$$R \approx \frac{4 \cdot 10^{23}}{A} \frac{\alpha'}{\alpha} \left(\frac{[\text{keV}/c^2]}{m_v} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1}\text{d}^{-1} \quad (1)$$

$$R \approx \frac{1.2 \cdot 10^{19}}{A} g_{ae}^2 \left(\frac{m_a}{[\text{keV}/c^2]} \right) \left(\frac{\sigma_{pe}}{[\text{b}]} \right) \text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}, \quad (2)$$

- 有意なシグナルは見つからなかった
- $P(R_S | E)$ の信頼区間 90% の上限をつけた
- 120 keV 以上の領域で新しい上限がついた



$$\alpha' = \frac{(e\kappa)^2}{4\pi}$$



Conclusion

- ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ 探索の検出器 GERDA を用いた keV スケールの DM 探索
- SM と非常に弱く結合する super-WIMP の、光電効果に似た反応モードを探索
- シグナルは見つからなかった
- 120 keV ~ 1 MeV の質量領域で新しい上限をつけた

back up

Table 14 Main parameters of all detectors used in GERDA Phase II. The GD, ANG and RG detectors are made of germanium enriched in ^{76}Ge from 85.5 % to 88.3 %. The three GTF detectors are made from natural germanium. The operational voltages recommended by the manufacturer are quoted. A ‘y’ marks in column 4 the detectors with a passivation layer (PL) in the groove. The position number in a given string increases from top to bottom. The active masses of the newly produced BEGe detectors include a correction that considers a full charge collection depth growth occurred during storage at room temperature in the three years before deployment in GERDA. Finally, the full energy peak detector efficiencies ϵ_{fep} for the $0\nu\beta\beta$ decay in ^{76}Ge are quoted.

Nr.	Detector	V _{rec} [kV]	With PL	String & Position	f _{Ge76}	M _{diode} [g]	M _{av} [g]	$\epsilon_{fep} \pm u_{corr} \pm corr$
							$^{+ucorr+corr}_{-ucorr-corr}$	
13	GD32A	3.0		III-2	0.877 ± 0.013	458	404 $^{+10+4}_{-10-2}$	0.888 ± 0.001 ± 0.002
12	GD32B	4.0		III-1	0.877 ± 0.013	716	632 $^{+10+4}_{-10-2}$	0.900 ± 0.001 ± 0.002
14	GD32C	4.0		III-3	0.877 ± 0.013	743	665 $^{+10+4}_{-10-2}$	0.901 ± 0.001 ± 0.002
34	GD32D	4.0		VI-4	0.877 ± 0.013	720	657 $^{+10+5}_{-10-2}$	0.900 ± 0.001 ± 0.002
24	GD35A	4.0		IV-5	0.877 ± 0.013	768	693 $^{+13+3}_{-13-2}$	0.904 ± 0.001 ± 0.002
1	GD35B	4.0		I-1	0.877 ± 0.013	810	740 $^{+11+5}_{-11-2}$	0.902 ± 0.001 ± 0.002
19	GD35C	3.5	y	IV-0	0.877 ± 0.013	634	572 $^{+9+4}_{-9-3}$	0.893 ± 0.001 ± 0.002
4	GD61A	4.5	y	I-4	0.877 ± 0.013	731	652 $^{+12+4}_{-11-3}$	0.902 ± 0.001 ± 0.002
26	GD61B	4.0	y	IV-7	0.877 ± 0.013	751	666 $^{+12+5}_{-12-2}$	0.899 ± 0.001 ± 0.002
16	GD61C	4.0		III-5	0.877 ± 0.013	634	562 $^{+10+5}_{-10-3}$	0.892 ± 0.001 ± 0.002
17	GD76B	3.5	y	III-6	0.877 ± 0.013	384	326 $^{+7+3}_{-7-2}$	0.883 ± 0.001 ± 0.002
20	GD76C	3.5	y	IV-1	0.877 ± 0.013	824	723 $^{+12+5}_{-12-2}$	0.902 ± 0.001 ± 0.002
32	GD79B	3.5		VI-2	0.877 ± 0.013	736	648 $^{+13+5}_{-13-2}$	0.897 ± 0.001 ± 0.002
23	GD79C	3.5		IV-4	0.877 ± 0.013	812	713 $^{+11+5}_{-11-2}$	0.900 ± 0.001 ± 0.002
35	GD89A	4.0		VI-5	0.877 ± 0.013	524	462 $^{+10+3}_{-9-2}$	0.893 ± 0.001 ± 0.002
5	GD89B	3.5	y	I-5	0.877 ± 0.013	620	533 $^{+12+4}_{-12-2}$	0.890 ± 0.001 ± 0.002
15	GD89C	4.0	y	III-4	0.877 ± 0.013	595	520 $^{+12+5}_{-11-2}$	0.889 ± 0.001 ± 0.002
21	GD89D	4.0		IV-2	0.877 ± 0.013	526	454 $^{+9+5}_{-9-2}$	0.884 ± 0.001 ± 0.002
0	GD91A	3.5		I-0	0.877 ± 0.013	627	557 $^{+10+3}_{-11-2}$	0.898 ± 0.001 ± 0.002
25	GD91B	3.5		IV-6	0.877 ± 0.013	650	578 $^{+10+5}_{-10-2}$	0.897 ± 0.001 ± 0.002
7	GD91C	4.0	y	I-7	0.877 ± 0.013	627	556 $^{+11+4}_{-11-2}$	0.896 ± 0.001 ± 0.002
33	GD91D	4.5		VI-3	0.877 ± 0.013	693	615 $^{+12+5}_{-12-2}$	0.899 ± 0.001 ± 0.002
30	GD00A	2.5	y	VI-0	0.877 ± 0.013	496	439 $^{+8+3}_{-9-2}$	0.888 ± 0.001 ± 0.002
3	GD00B	3.5		I-3	0.877 ± 0.013	697	613 $^{+12+5}_{-12-2}$	0.897 ± 0.001 ± 0.002
18	GD00C	3.5	y	III-7	0.877 ± 0.013	815	727 $^{+14+5}_{-13-2}$	0.903 ± 0.001 ± 0.002
22	GD00D	3.5	y	IV-3	0.877 ± 0.013	813	723 $^{+13+5}_{-13-2}$	0.902 ± 0.001 ± 0.002
11	GD02A	2.5	y	III-0	0.877 ± 0.013	545	488 $^{+8+3}_{-8-2}$	0.893 ± 0.001 ± 0.002
2	GD02B	3.0		I-2	0.877 ± 0.013	625	553 $^{+10+4}_{-10-2}$	0.895 ± 0.001 ± 0.002
31	GD02C	3.5		VI-1	0.877 ± 0.013	788	700 $^{+13+5}_{-13-2}$	0.901 ± 0.001 ± 0.002
6	GD02D ^a	4.0	y	I-6	0.877 ± 0.013	662	552 $^{+11+0}_{-11-2}$	not defined, see remark
36	ANG1	4.0		VI-6	0.859 ± 0.029	958	795 $^{+43+26}_{-43-26}$	0.889 ± 0.018
27	ANG2	4.0	y	V-0	0.866 ± 0.025	2833	2468 $^{+121+80}_{-121-80}$	0.918 ± 0.018
10	ANG3	3.5	y	II-2	0.883 ± 0.026	2391	2070 $^{+118+60}_{-118-67}$	0.916 ± 0.018
29	ANG4	3.0	y	V-2	0.863 ± 0.013	2372	2136 $^{+116+69}_{-116-69}$	0.916 ± 0.018
8	ANG5	2.5		II-0	0.856 ± 0.013	2746	2281 $^{+109+74}_{-109-74}$	0.918 ± 0.018
9	RG1	5.0		II-1	0.855 ± 0.015	2110	1908 $^{+109+62}_{-109-62}$	0.915 ± 0.018
28	RG2	4.0		V-1	0.855 ± 0.015	2166	1800 $^{+99+58}_{-99-58}$	0.912 ± 0.018
38	GTF32	3.5	y	VII-1	0.078 ± 0.001	2321	2251 $^{+116}_{-116}$	0.92 ± 0.018
39	GTF45_2	3.5		VII-2	0.078 ± 0.001	2312	1965	0.92 ± 0.018
37	GTF112	3.5	y	VII-0	0.078 ± 0.001	2965	2522	0.92 ± 0.018

ベイズ推定

- x_1 となる確率 $P(x_1)$ を求めたい。
- (現段階では何も手がかりがない)
- x_2, \dots, x_n を観測した (あるいは事前知識を持つていた)。
 $P(x_1 | x_2, \dots, x_n)$ を求めるこ^(一様分布だと、最尤法に一致)とにする。

事前分布

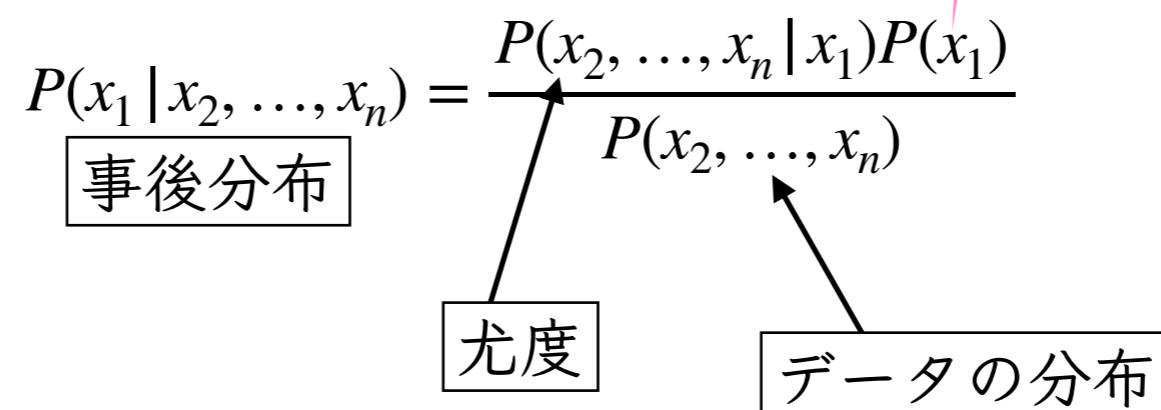
$P(x_1)$: ひとまず仮定しておく
(一様分布だと、最尤法に一致)

$$P(x_1 | x_2, \dots, x_n) = \frac{P(x_2, \dots, x_n | x_1)P(x_1)}{P(x_2, \dots, x_n)}$$

事後分布

尤度

データの分布



- 事後分布 $P(x_1 | x_2, \dots, x_n)$ を最大にするような



Fig. 14 The fiber curtain: height ~ 1 m, diameter ~ 0.5 m, 405 fibers read out on both ends by 90 SiPMs.