液体キセノン検出器を用いた暗黒物質探索

平成29年度 ICRR 共同利用研究成果発表会

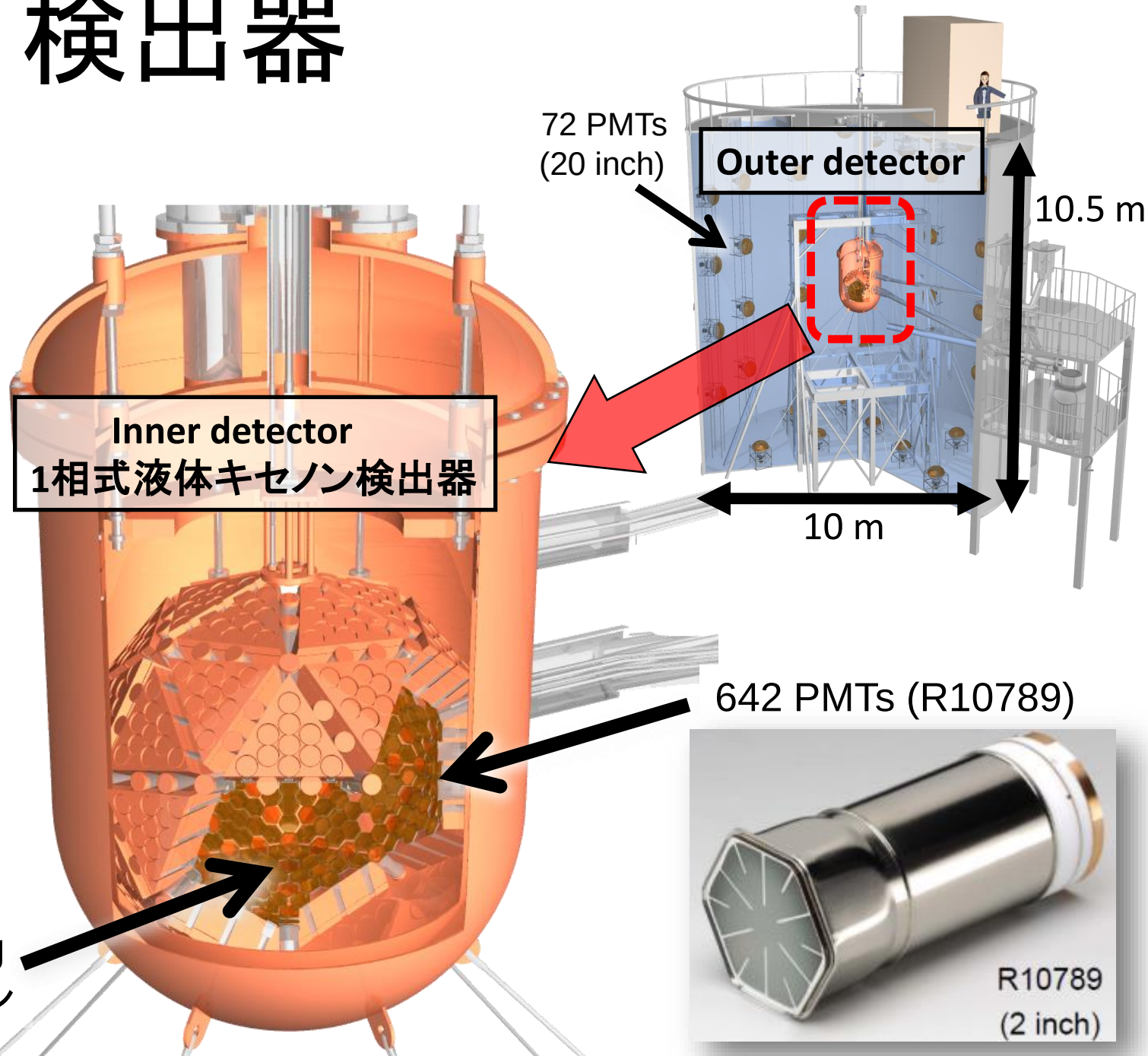
2017年12月8日 13:15-35

東大宇宙線研　竹田敦

XMASS-I 検出器

- **1相式液体キセノン検出器**
  - 832 kg の液体キセノン
  - 642 本の低バックグラウンド (BG) 光電子増倍管 (光電被覆率 > 62%)
  - 高い光電子収量: ~15 PE/keV
    → 低エネルギーしきい値

- **Outer detector**
  - 72本の20インチ光電子増倍管
  - 宇宙線ミューオンの active veto
  - 環境ガンマ線・中性子の遮蔽



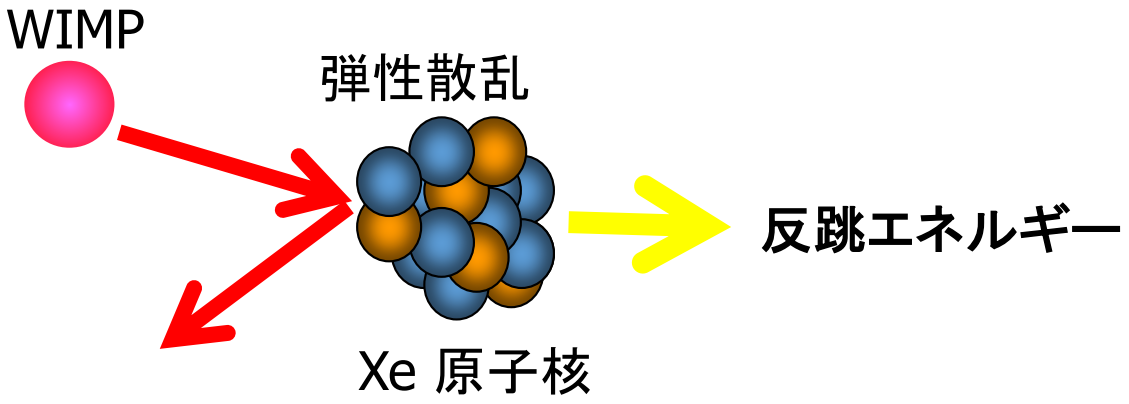
平成29年度の主な活動と成果

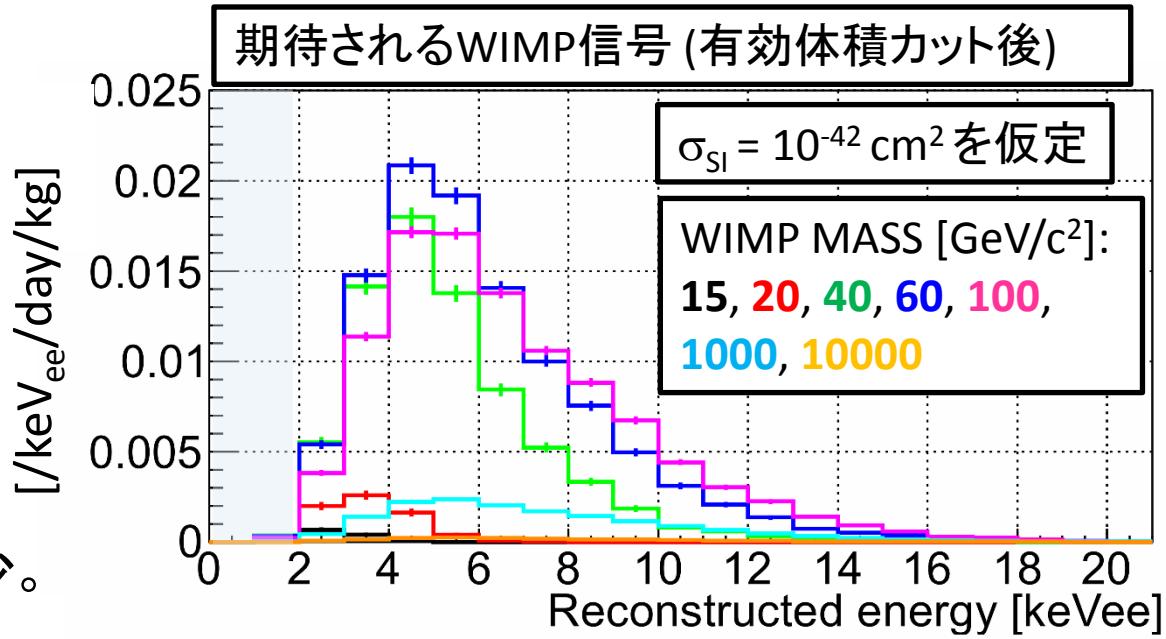
- **発表論文**
  - KK アクシオン探索 — *PTEP (2017) 103C01*
  - 低BG αカウンターによる銅バルク中の^{210}Pb, ^{210}Po の測定 — *accepted in NIM A, arXiv:1707.06413*
- **投稿準備中の論文**
  - 有効体積解析による WIMP 探索
  - 季節変動を用いた暗黒物質探索
  - ^{124}Xe, ^{126}Xe の2ν二重電子捕獲の探索
  - Hidden photon 及び axion-like 粒子の暗黒物質探索
  - 低BG PMT (R10789) の開発
  - 原子核反跳事象の発光時定数の測定

- **データ収集・解析・R&D**
  - 2013年11月から安定したデータ収集を継続中
  - 様々な物理解析を遂行中
    - 低しきい値化した季節変動探索、高感度化した^{129}Xeとの非弾性散乱による暗黒物質探索、
    - 重力波事象に関連する事象の探索, etc.
  - 小型液体キセノンチェンバーによる将来計画の R&D

- 共同利用研究費: 物品費 20万円、旅費 20万円

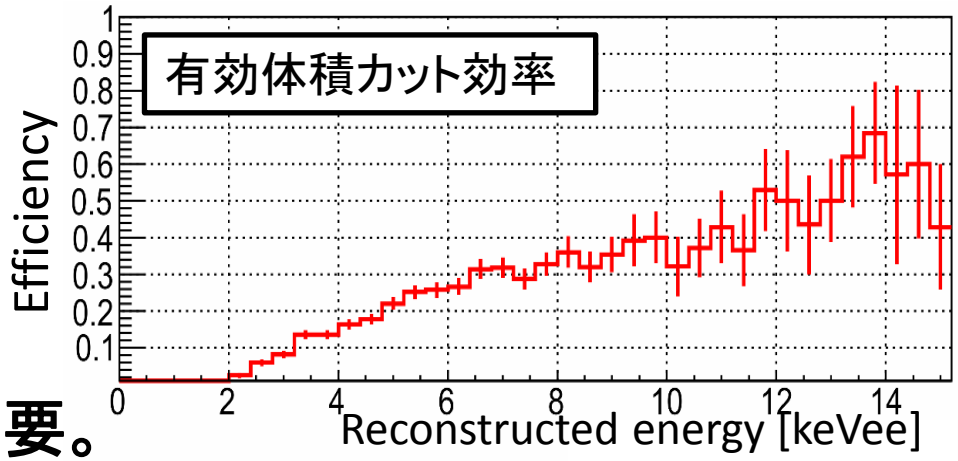
有効体積解析によるWIMP探索 (1/5)





- WIMP とキセノン原子核の弾性散乱を探索する。
- 弾性散乱 → エネルギースペクトルは指数関数で単調減少。
- 期待されるエネルギースペクトル（右上図）。
  検出器応答、有効体積カット効率 (右下図) 等が反映された形状になっている。

- より高感度な探索の為、バックグラウンド (BG) 事象を見積もり、そこからの excess を信号とする解析を行う。

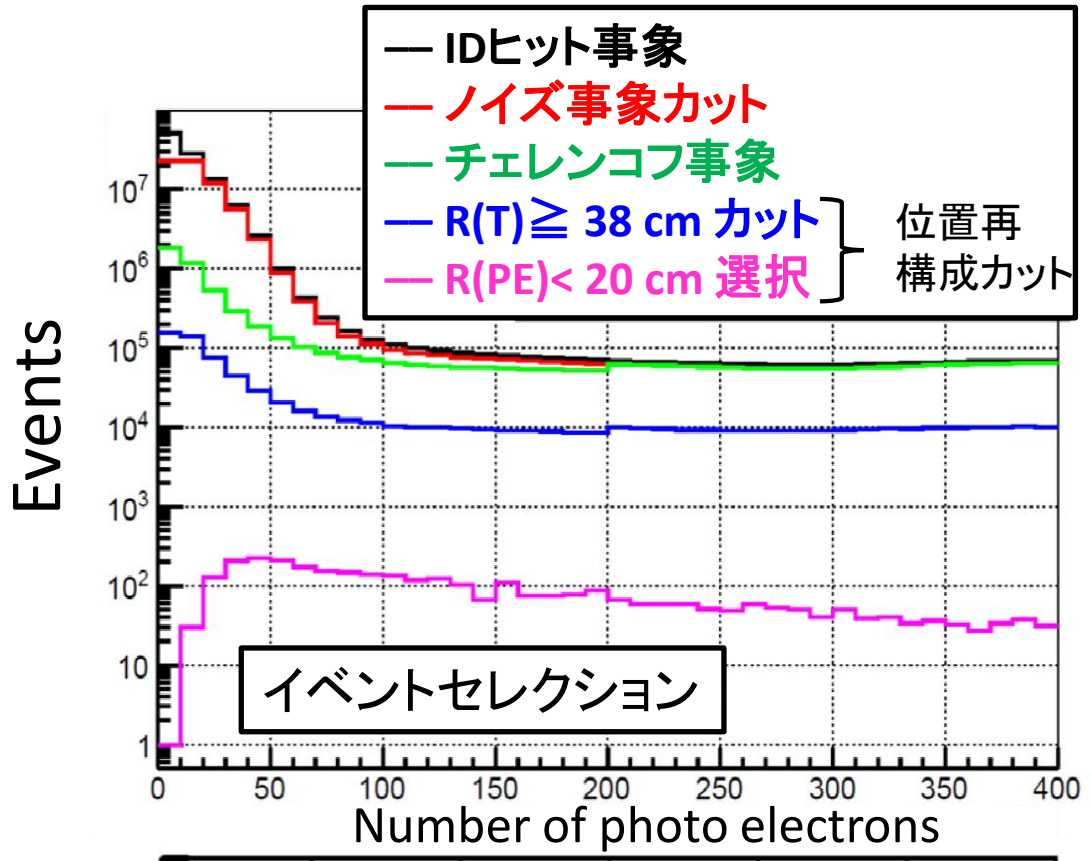


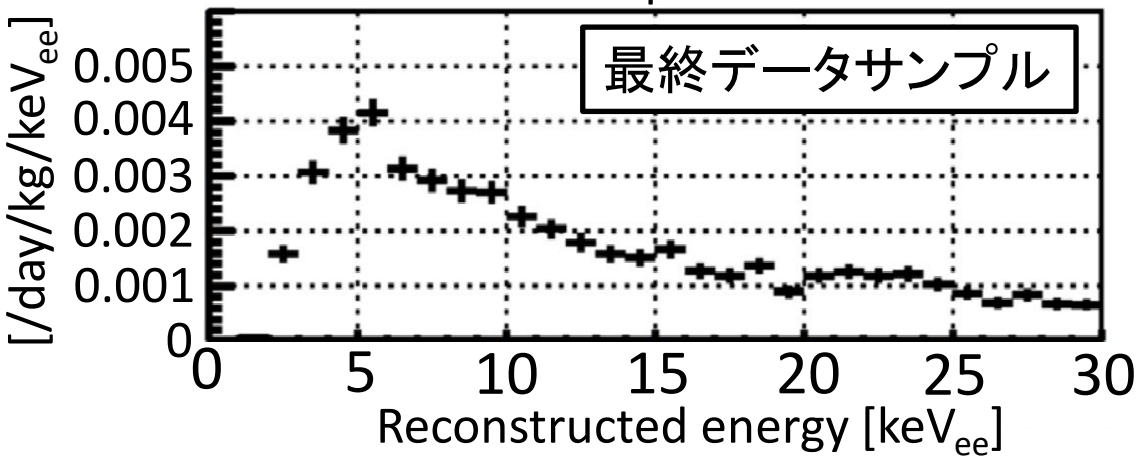
→ BGの高精度な見積もり及び系統誤差の評価が重要。

有効体積解析によるWIMP探索(2/5)・データセット

- 2013年11月–2016年3月 (705.9 live days)
- **有効質量**: 97 kg
- イベントセレクション
  - **ノイズ・チェレンコフ事象カット**:
    PMT ヒットの時間情報を利用。
    チェレンコフ事象の主な源は、PMTフォトカソード内の^{40}K からのベータ線。
  - **位置再構成カット**:
    時間と光量のそれぞれから事象の位置を再構成し、検出器表面付近事象の除去

- 最終データサンプルのレートは、
  ~4 × 10^{-3} /day/kg/keV_{ee} @5–5.5 keV_{ee}

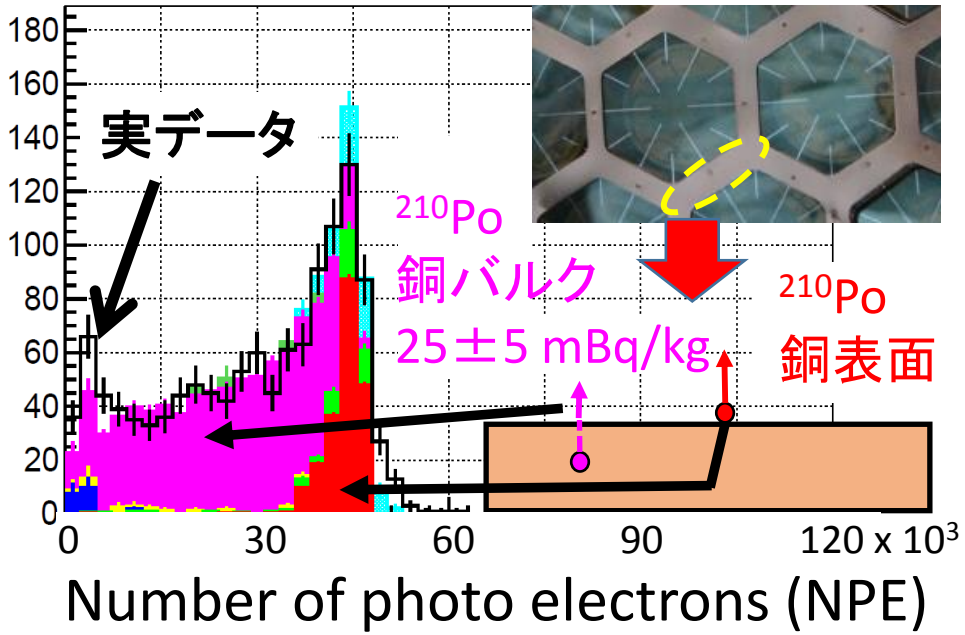




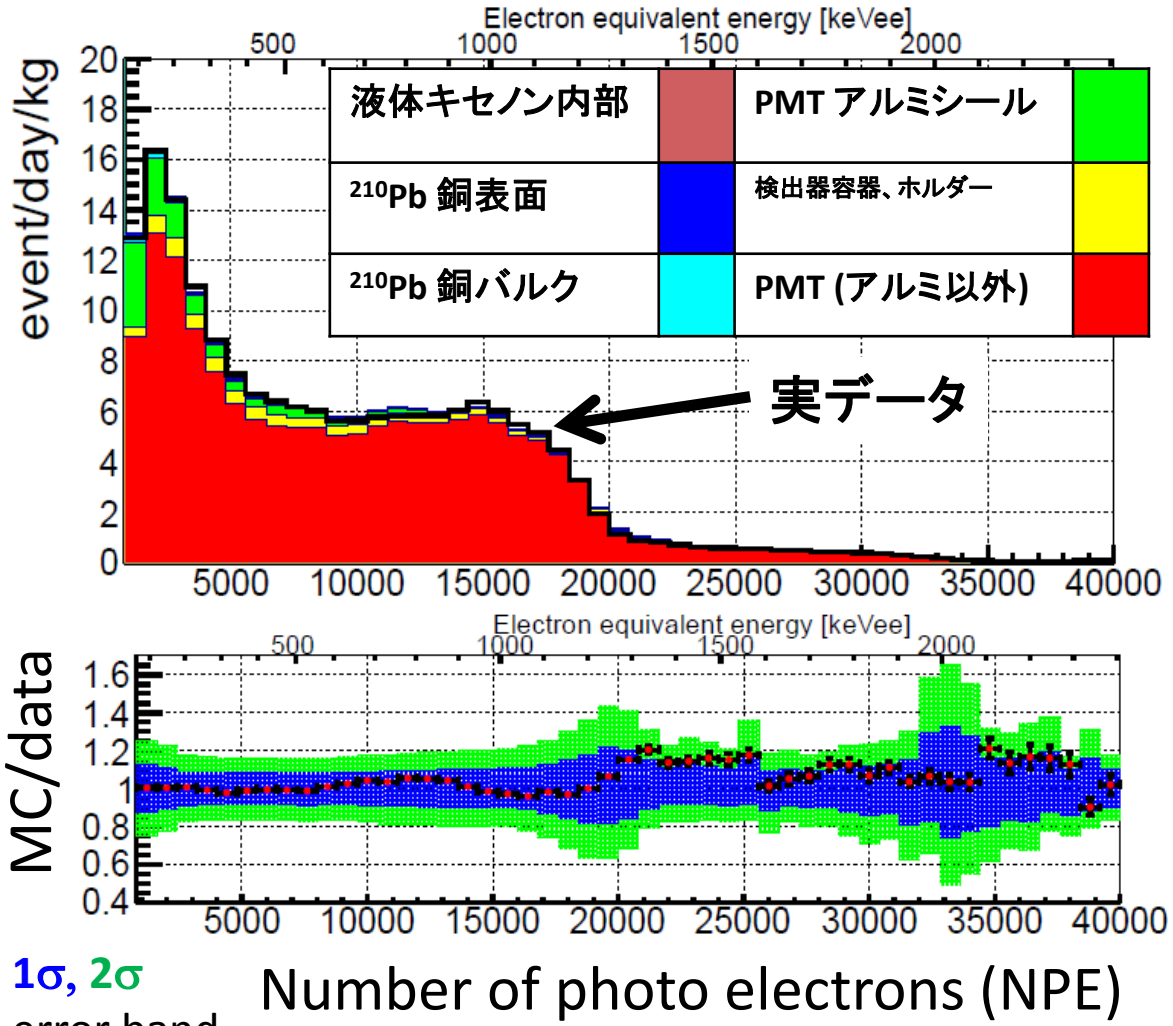
有効体積解析によるWIMP探索(3/5)・BGの見積もり

- WIMP探索のエネルギー領域以外で見積もり。
- 検出器部材からのガンマ線: 400 PE (~30 keV_{ee}) 以上のNPE分布データをMCでフィッティング (右図)。
- 無酸素銅中の^{210}Pb: α線事象の解析(左下図)。
- キセノン内部不純物: ^{222}Rn, ^{85}Kr, ^{39}Ar, ^{14}C.
- 中性子起源の影響は小さい。

有効体積カットなし・α線のNPE分布 (波形弁別より)



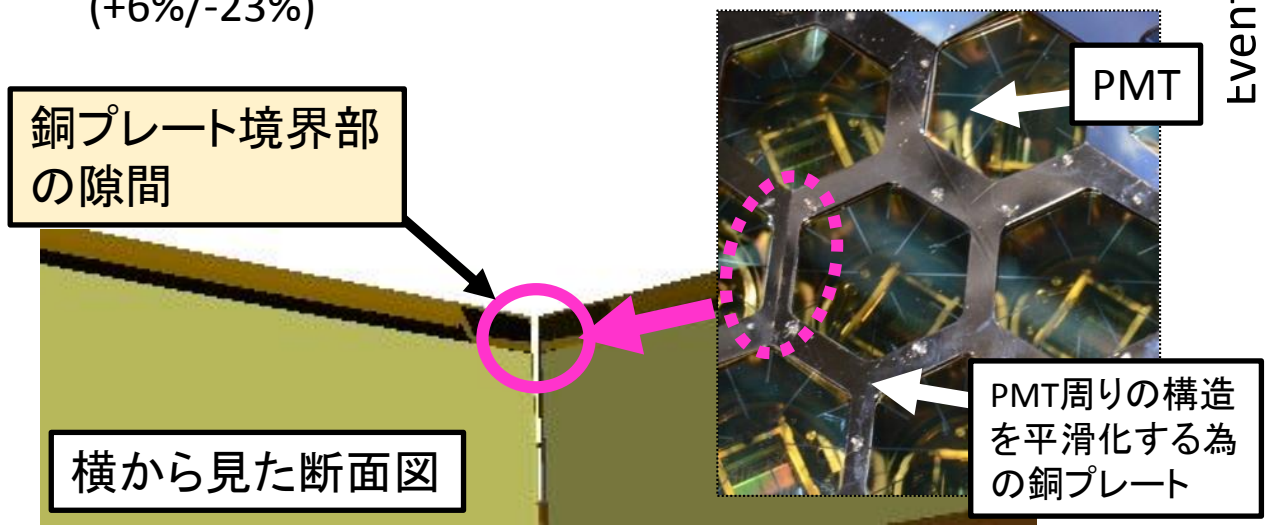
有効体積カットなし、全体積データ

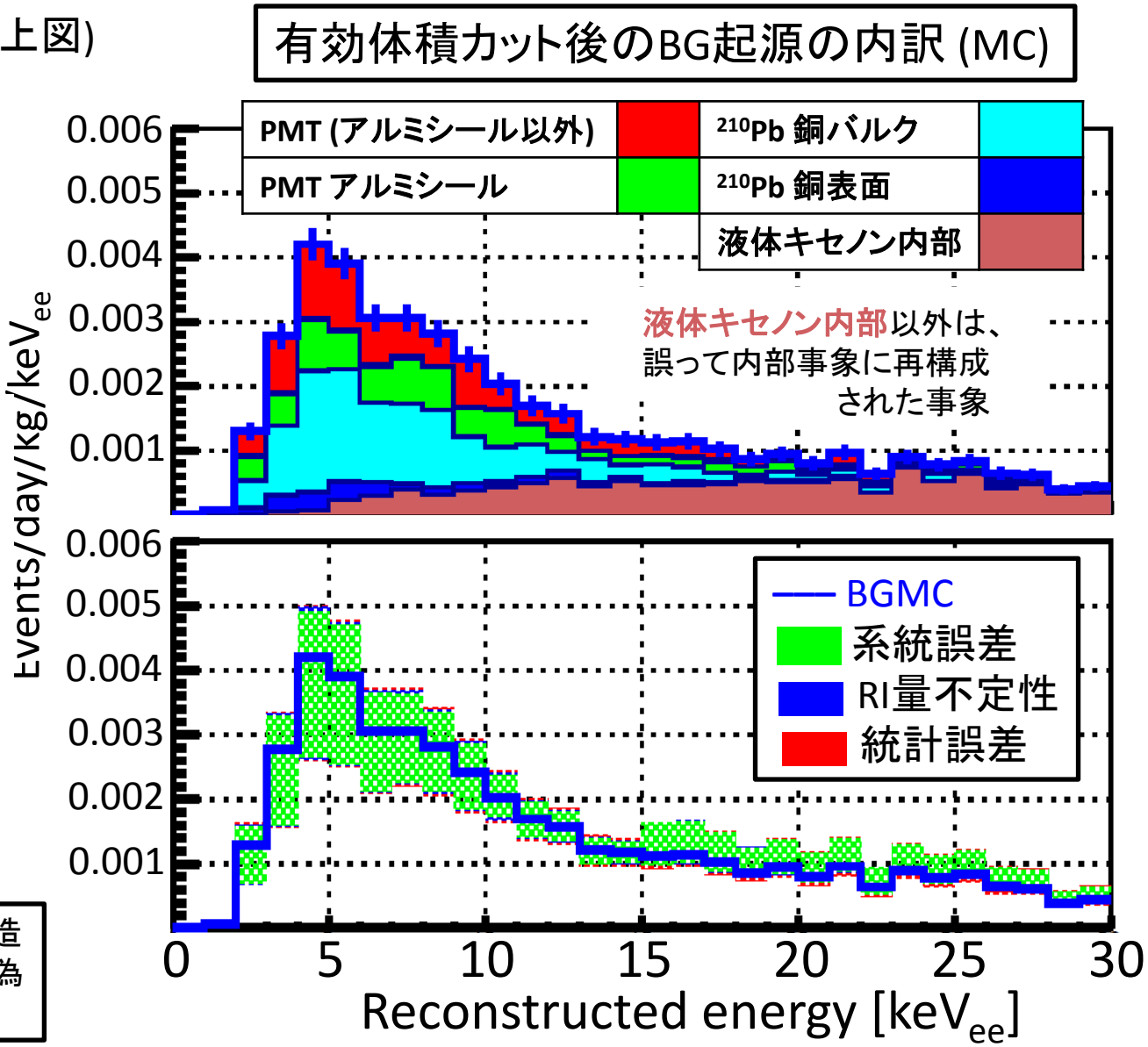


有効体積解析によるWIMP探索(4/5)・系統誤差の評価

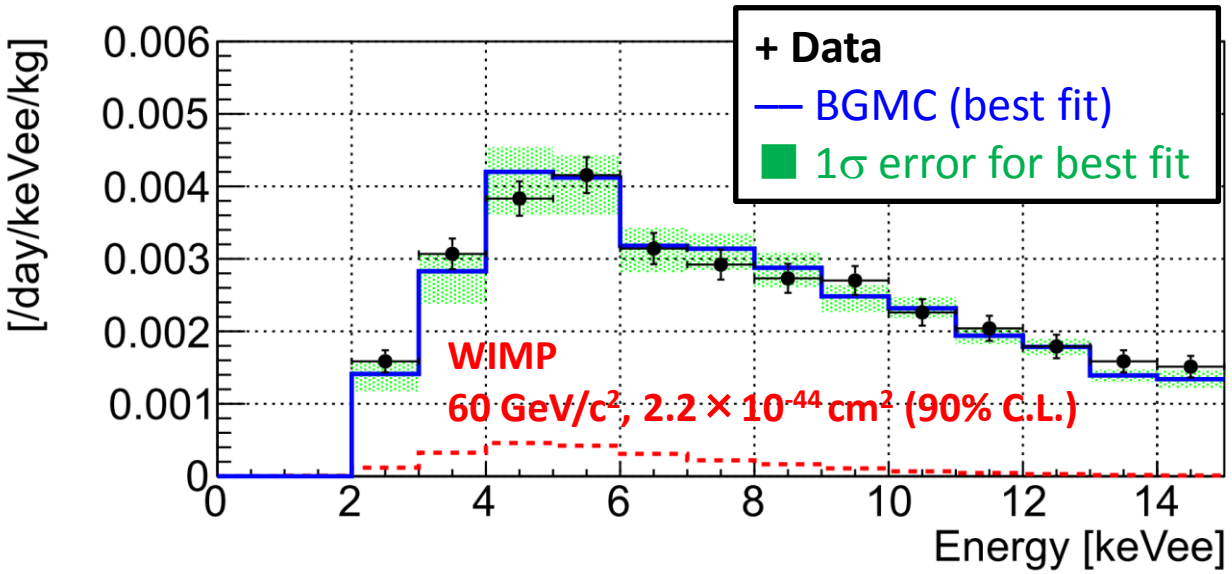
- 有効体積内に残った事象の~90%が、検出器表面起源 (右上図)
  → PMT死角で起こった事象を誤って内部事象に再構成。
  → 最も大きな寄与は、銅バルク中微量^{210}Pb(25±5mBq/kg)
  PMT アルミシールの寄与は検出器改修の努力により、
  銅バルクの寄与よりも小さく抑えられた。

- 系統誤差は、検出器形状、応答、キセノン特性の不定性
  計11種類を考慮。それぞれの不定性によって有効体積
  内事象がどのように変化するかをMCにより見積もった。
  → 最も大きい寄与は、検出器表面の銅プレート境界部
  のわずかな隙間 (85±55 μm) の不定性によるもの
  (+6%/-23%)





有効体積解析によるWIMP探索(5/5)・結果

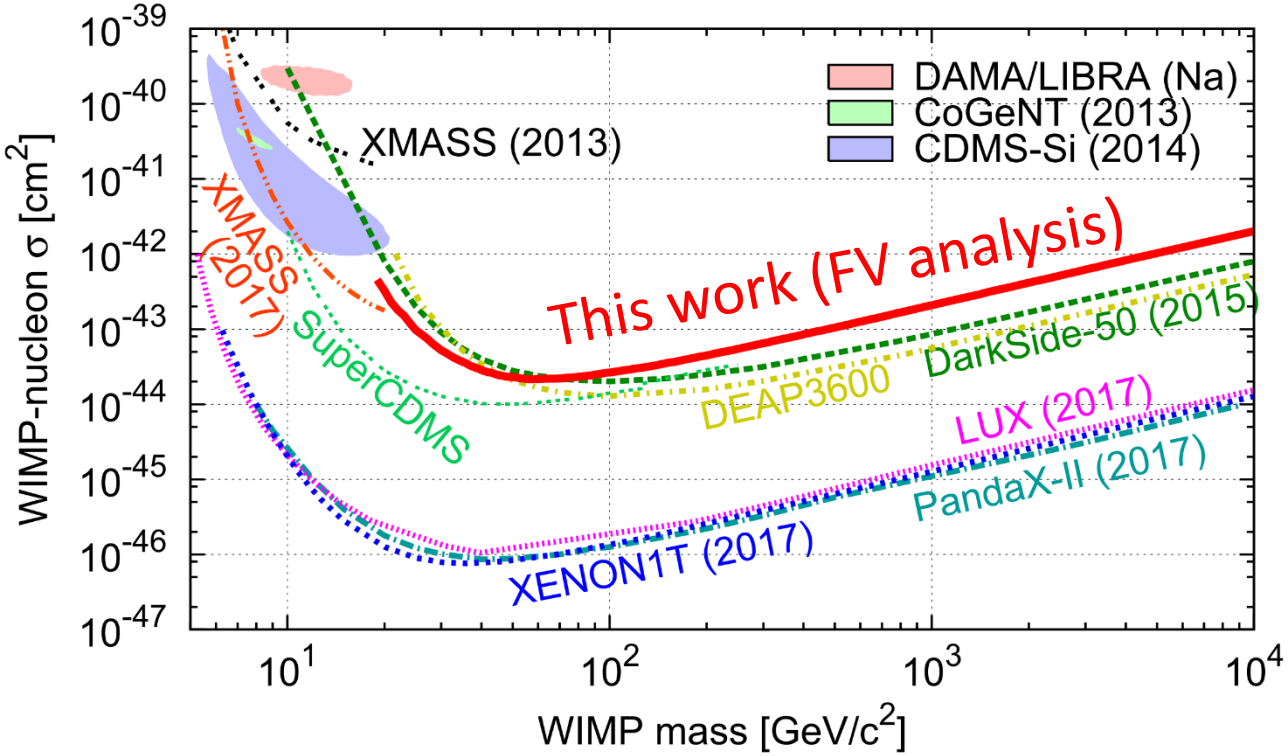


- 青線: best fit (WIMP = 0) を与える BG MC
- 緑領域: fitting で得られる best fit の χ^2 の値を 1 変化させる誤差の領域

- 90% C.L. 上限値: **2.2×10^{-44} cm² (60 GeV/c²)**

→ BG MC と WIMP 信号を合わせて fitting することで BG の寄与が差し引かれ、緑領域で示されているエラーの大きさと同程度のWIMP signal が上限値として求められた。

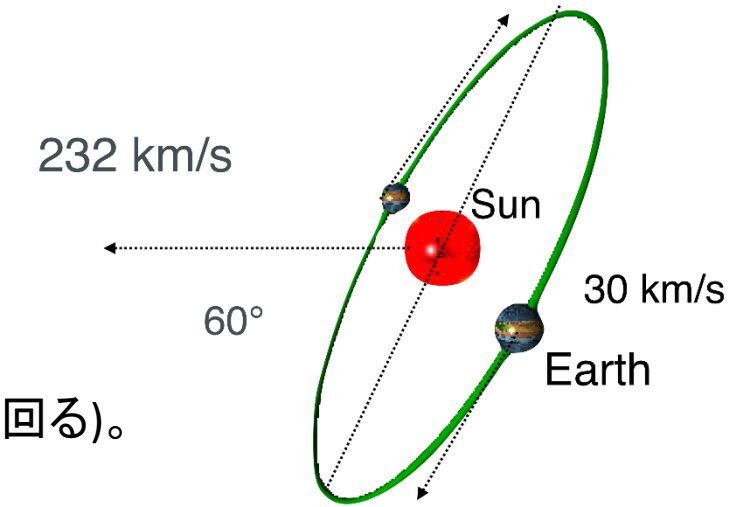
→ WIMP 探索において BG が残った場合でも高感度に探索を遂行することができた。

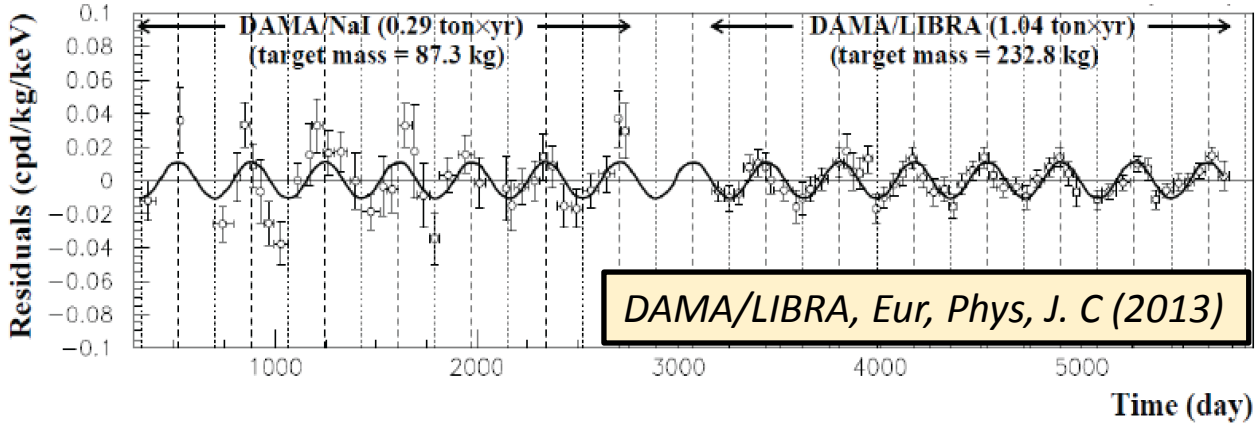


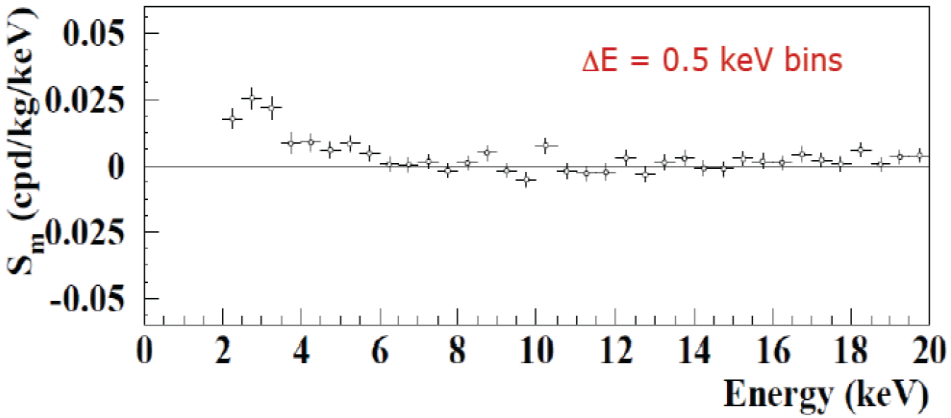
季節変動解析 (1/2)

- 地球の公転による暗黒物質との相対速度の変動が、イベントレートの1年周期の変動を起こすと考えられる。
  - 相対速度は、6月に最大、12月に最少になる (±7% の効果)
- DAMA/LIBRA 実験が 9.3σ で季節変動を観測 (下図, *Eur. Phys. J. C (2013) 73:2648*)
  - 1.33 ton × year (14 cycles).
  - 粒子識別 (電子事象・原子核反跳) は無し。

- XMASS-I により、2013年11月–2015年3月 に取得された
  832 kg × 359.2 live days のデータを用いた解析で、DAMA/LBRAの許容領域
  のほぼ全てを棄却 (***Phys. Lett. B 759 (2016) 272–276***).
- 平成29年度はさらに以下の更新を行った。
  - 統計量が、832 kg × 800.0 live days = **1.82 ton × year** に増加 (DAMA/LIBRAを上回る)。
  - より光量を安定化させた測定で系統誤差を小さく。







季節変動解析 (2/2)

- 2013年11月–2016年7月 (800.0 live days)
- 全体積 (832 kg) を用いた解析
- エネルギーしきい値: 1.0 keV_{ee}

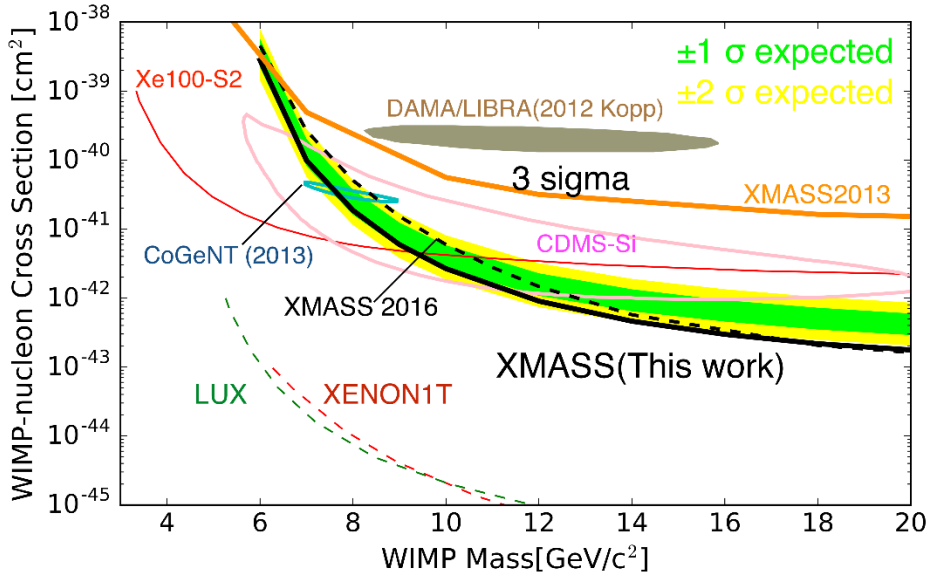
- **暗黒物質モデルに依存しない探索**
  - Phase: t_0 = 152.5 日 (6月2日), T = 1 年
  - P-value: 0.11 (1.6 σ)

  → 2-6 keV_{ee} において、最も厳しい制限を与えた (右図)

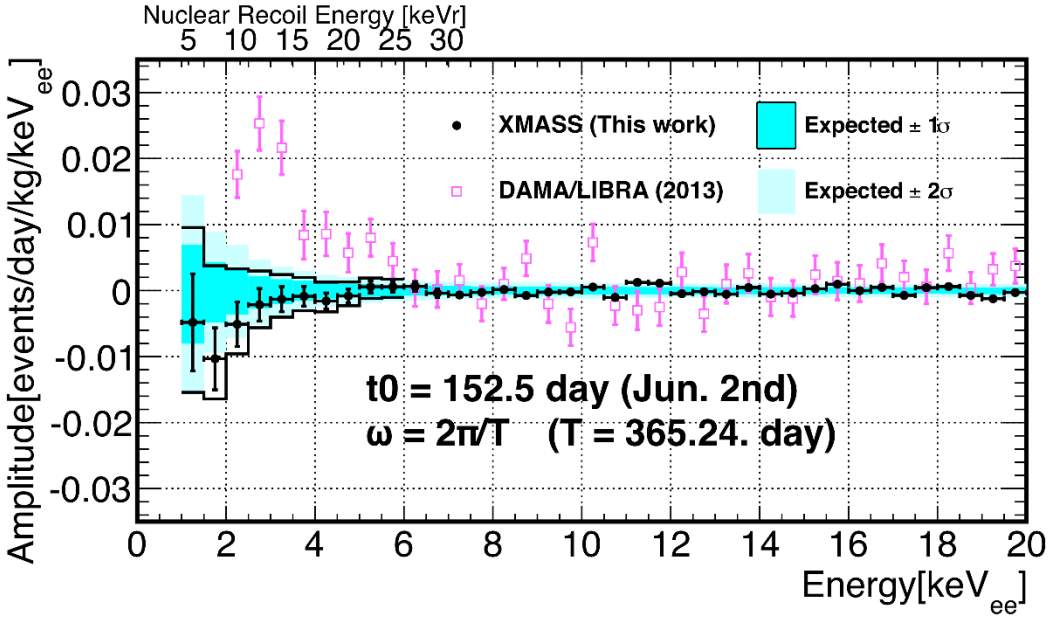
- **WIMPs を仮定した探索**
  - DAMA/LIBRA の許容領域を排除 (左下図)

  < 1.9 ×10^{-41} cm^2 (90% C.L.) @ 8GeV

WIMP 探索



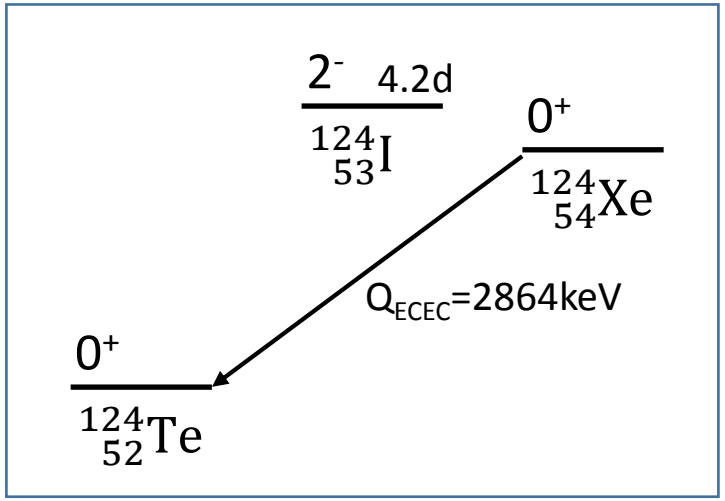
モデルに依存しない探索



Experiment	Amplitude ×10^{-3} (counts/day/kg/keV_{ee})
DAMA/LIBRA (2013)	25 @2.75 keV_{ee}
XENON100 (2017)	1.67±0.73 (2.0-5.8 keV_{ee}) < 3.1 (90% C.L.)
XMASS-I (2017)	**< 1.3-3.2 (2-6 keV_{ee})**

^{124}Xe, ^{126}Xe の2ν二重電子捕獲の探索

- 二重電子捕獲
  - 2つの軌道電子が同時に捕獲される: (Z, A) + 2e$^-$ → (Z-2, A) + 2ν_e
  - これまでに、^{78}Kr, ^{130}Ba のみで観測されている。
  - νを伴わない崩壊モードが観測されれば、レプトン数非保存、マヨラナニュートリノの証拠となる。



- これまでに、XMASS コミッショニングデータ (132.0 live days、41 kg天然キセノン) を用いて、^{124}Xe, ^{126}Xe の半減期に対する世界最高感度の制限をつけている。

  $T_{1/2}^{2\nu 2K}$ (^{124}Xe) > 4.7 × 10^{21} yrs

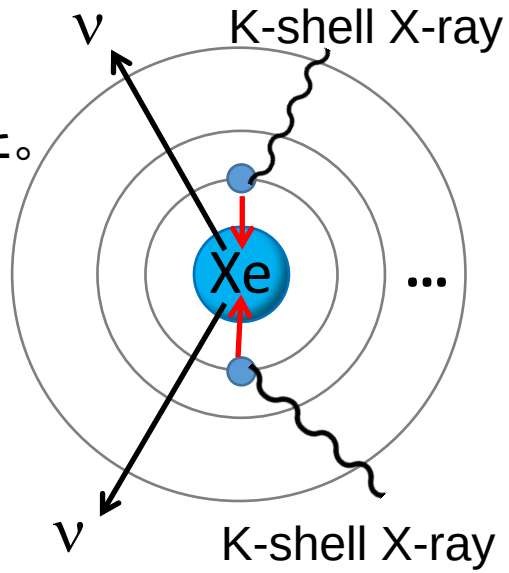
  $T_{1/2}^{2\nu 2K}$ (^{126}Xe) > 4.3 × 10^{21} yrs (90% C.L.) ***Phys. Let. B 759 (2016) 64–68***

- 平成29年度は、検出器改修後の低BG・大統計のデータを解析して感度の更新を行った。
  - 800.0 live days
  - 有効質量 327 kg
  - FADC データによる波形解析

$T_{1/2}^{2\nu 2K}$ (^{124}Xe) > 2.1 × 10^{22} yrs

$T_{1/2}^{2\nu 2K}$ (^{126}Xe) > 1.9 × 10^{22} yrs (90% C.L.) ***Preliminary***

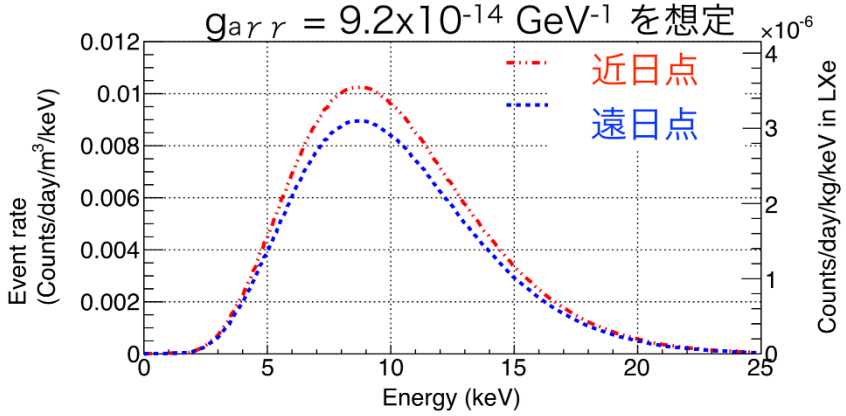
×4.5 の向上



季節変動による KK アクシオンの探索

- 余剰次元を伝播するカルツァ=クライン(KK)アクシオンが、太陽中で主にフォトンコアレッセンス反応 (γγ→a)で生成され、太陽重力でトラップされた後、検出器内部で2光子に崩壊する事象を探索する。
- KKアクシオンの数密度は、太陽との距離$1/r^4$にほぼ比例するため、2光子への崩壊レートは、近日点で最大、遠日点で最少の季節変動を起こすと考えられる。
- 太陽コロナ過熱問題がアクシオンからのX線で説明できる可能性。

単位体積・時間あたりのKKアクシオン崩壊数



- データセット (2013年11月–2015年3月)
  - 359 live days
  - 832 kg (0.288 m^3)

- 結果
  - 有意な振幅は見られなかった
  - 季節変動が無いという仮定の下での p-value = 0.62

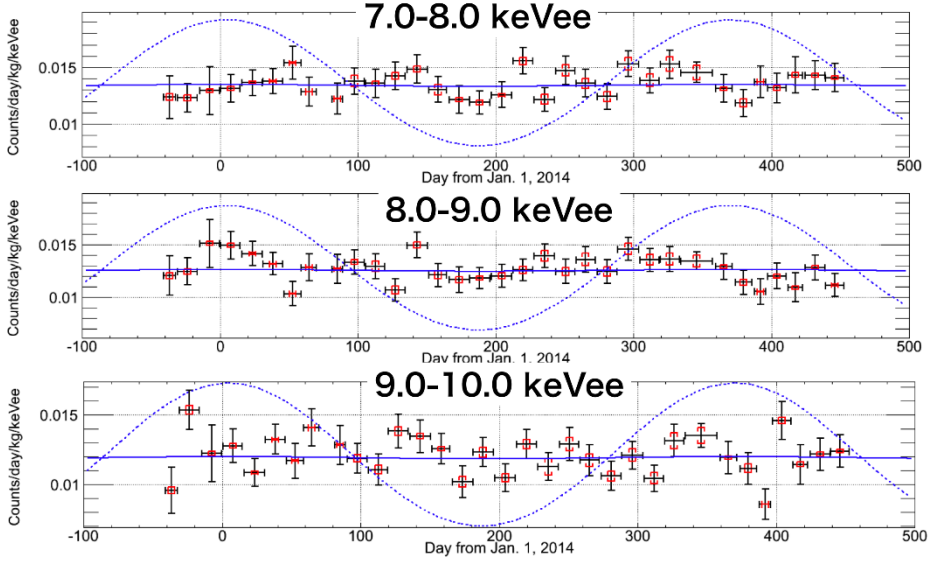
KK axion-photon coupling への制限

$g_{a\gamma\gamma} < 4.8 \times 10^{-12}$ GeV^{-1} (90% C.L.)

太陽コロナ過熱問題を説明するモデルには届かなかったが、世界初の実験的制限を与えた。

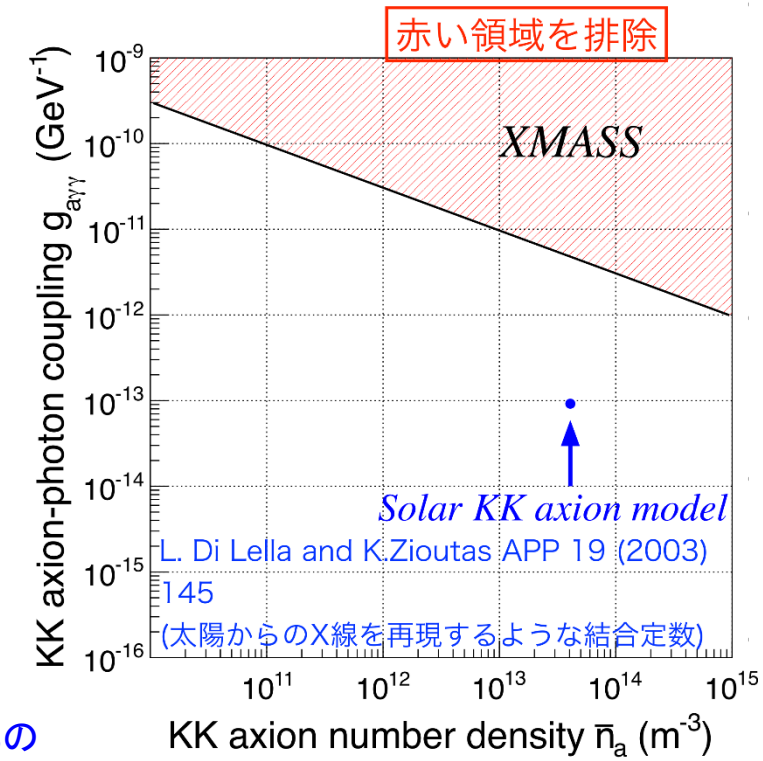
PTEP (2017) 103C01

各エネルギー領域のイベントレートの時間変動



黒: データと統計誤差, 赤: 系統誤差

青実線: ベストフィット結果, 青点線: 90% C.L. 上限値を20倍したもの



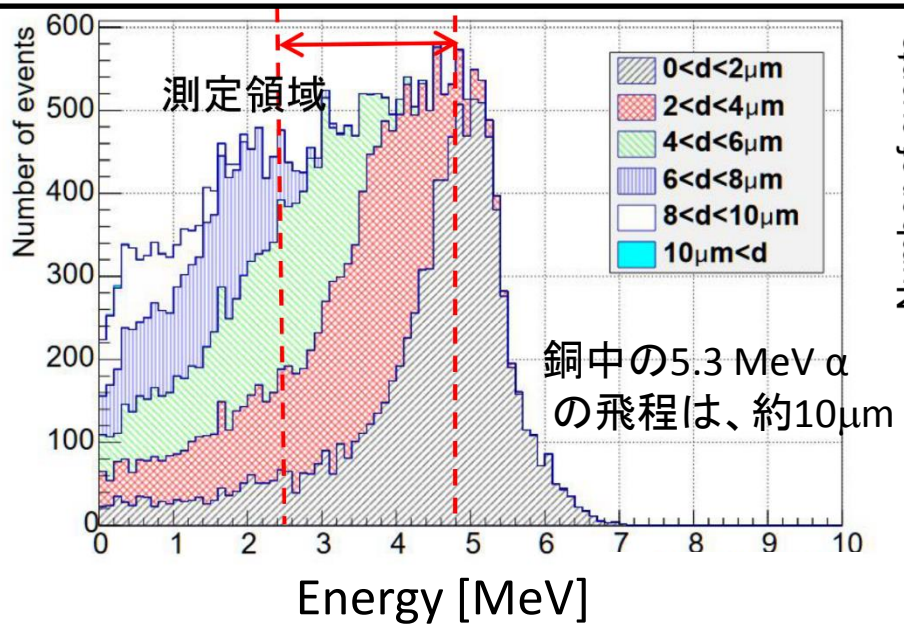
低BGアルファカウンタによる銅バルク中の微量^{210}Pb, ^{210}Poの測定

- 銅などのバルク中の^{210}Pb/^{210}Po含有量を調べる新しい方法を確立した。
  → ^{210}Pb スクリーニングとしては世界最高感度 (数mBq/kg) を達成。
- この手法を用いて、無酸素銅バルク中の微量 ^{210}Pb/^{210}Po の測定に世界で初めて成功 (^{210}Pb:17-40 mBq/kg)。
  → XMASS-I に用いられた無酸素銅サンプルについても測定し 24±10 mBq/kg と、XMASS-Iから見積もられた値と一致。
- 銅製造過程のサンプルをそれぞれ測定することで、粗銅中の^{210}Pbは電解製錬ほとんど除かれるのだが、わずかに残存するという知見を得た。
- この手法は銅以外の物質にも適用可能であり、稀事象探索検出器に必須な^{210}Pbスクリーニングの改良が期待される。
- 以上の結果を、NIMA 論文として発表。***Accepted in NIMA arXiv:1707.06413***

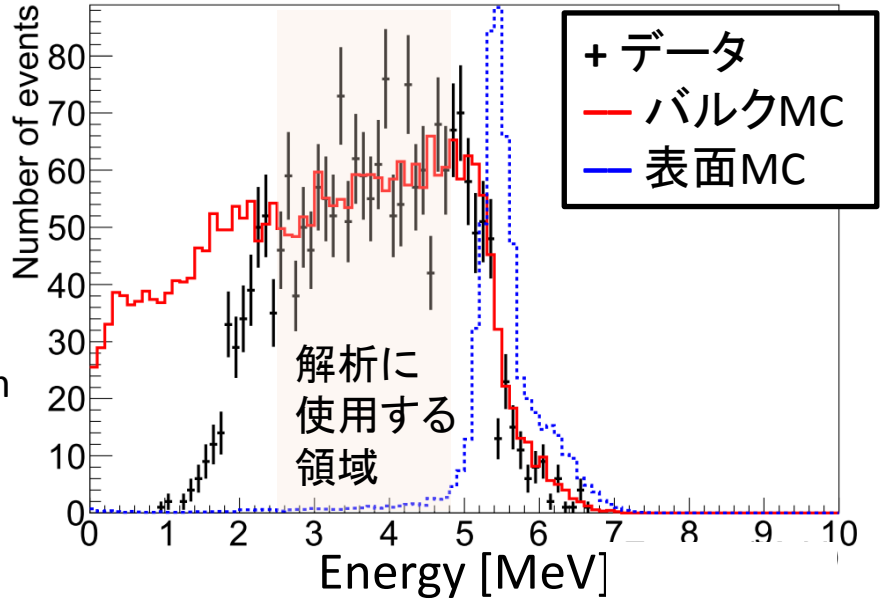
低BGアルファカウンタ
(XIA Ultra-Lo-1800)

2015年1月に神岡地下
クリーンリームに導入

バルク事象のエネルギー分布 (シミュレーション)



測定結果(^{210}Pb含有量の多い粗銅)



今後の展開

- XMASS-I データ解析の継続
  - 低しきい値化した季節変動による暗黒物質探索
  - 光子発生を伴う低質量 WIMP探索
  - ^{129}Xe の励起を伴う暗黒物質の高感度化した探索
  - etc.
- 2018年12月頃まで、超新星モニター等としても XMASS-I の運転を継続

- 第2世代実験(有効質量~5トン)である XENONnT 実験への参加 → 詳しくは CRCタウンミーティングで報告予定
  - 液体キセノン純化をこれまでの経験・資産を生かして開発
  - 中性子 veto の開発

- 第3世代実験 (有効質量 ~30トン) 実現に向けた2相式検出器高感度化の R&D を神岡で継続
  - Rn 等の内部放射能の低減
  - 放電、液面安定化
  - キセノン捕集の研究

まとめ

- XMASS-I 検出器は、約1トンの液体キセノンを用いて暗黒物質の直接探索を行っている。
  - 有効質量解析で、バックグラウンドを考慮した WIMP探索。
  - 季節変動による暗黒物質探索では2016年の結果を更新し、DAMA/LIBRAが主張する季節変動を彼らを上回る統計量を用いて排除した。

- 数10~100 keV 領域において、e/γ を含めた低バックグラウンドの特徴を生かして様々な物理解析を展開。
  - KKアクシオン探索で、初めて実験的制限をつけた。
  - ^{124}Xeの2ν二重電子捕獲の探索で、2016年度に発表した世界最高の制限をさらに更新。

- 平成29年度は、2本の論文を発表し、6本の論文が投稿準備中である。

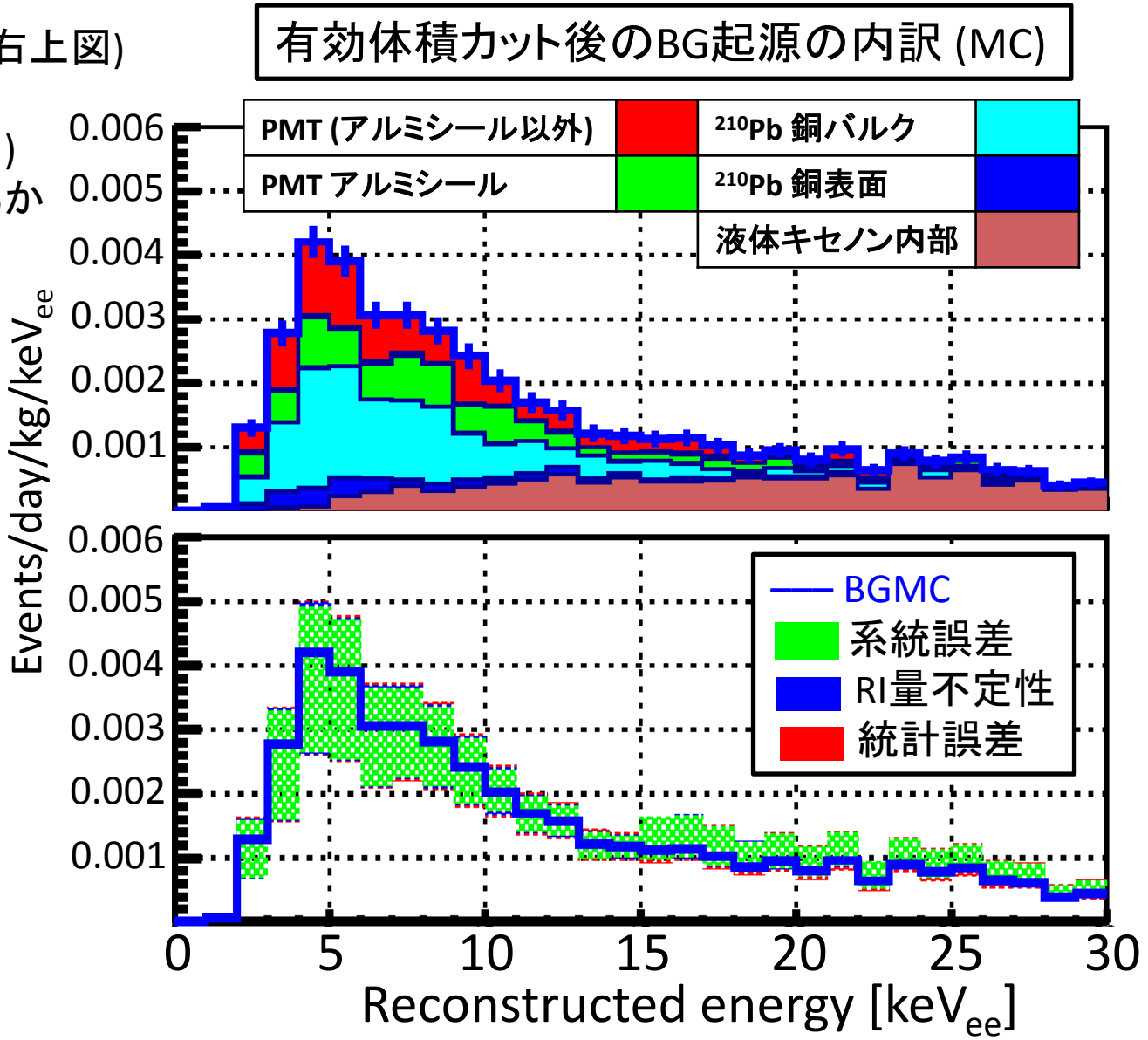
- 今後は、第2世代実験への参加、第3世代を見据えたR&D を神岡地下にて進めてゆく。

Backup

有効体積解析によるWIMP探索(4/5)・系統誤差の評価

- 有効体積内に残った事象の~90%が、検出器表面起源 (右上図)
  → PMT死角で起こった事象を誤って内部事象に再構成。
- 系統誤差は、計11種類の系統誤差を考慮(下表、右下図)
  → 不定性によって有効体積内事象がどのように変化するか
  をMCにより見積もった。

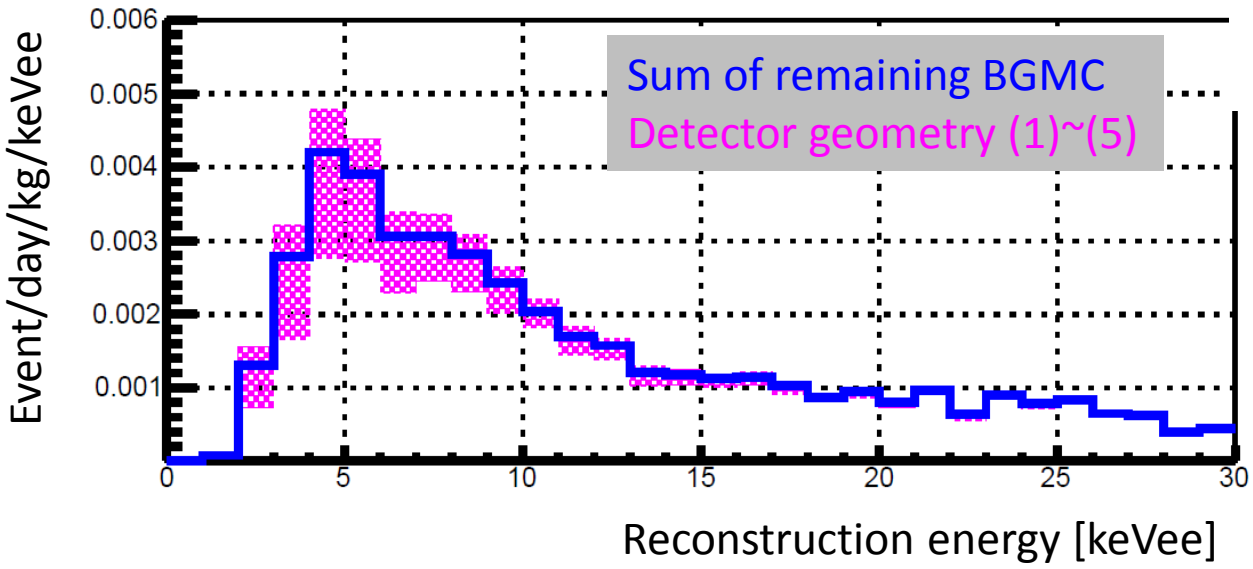
	内訳	系統誤差	
		2-15 keVee	15-30 keVee
検出器表面構造	(1) Plate gap dependence	+6.2/-22.8%	+1.9/-6.9%
	(2) Ring roughness	+6.6/-7.0%	+2.0/-2.1%
	(3) Cu ref dependence	+5.2/-0.0%	+2.5/-0.0%
	(4) Plate floating	+0.0/-4.6%	+0.0/-1.4%
検出器応答	(5) Al seal dependence	+0.7/-0.7%	+0.0/-0.0%
	(6) 再構成に関係	+3.0/-6.2%	+0.0/-0.0%
	(7) タイミング (時定数等)	+4.6/-2.9%	+0.4/-5.3%
	(8) タイミング(表面応答)	+0.0/-8.0%	+0.0/-0.0%
	(9) Dead tube origin	+10.3/-0.0%	+45.2/-0.0%
キセノン特性	(10) 吸収長&散乱長	+0.7/-6.7%	+1.5/-1.1%
	(11) 原子核反跳	+0.7/-0.7%	+0.0/-0.0%

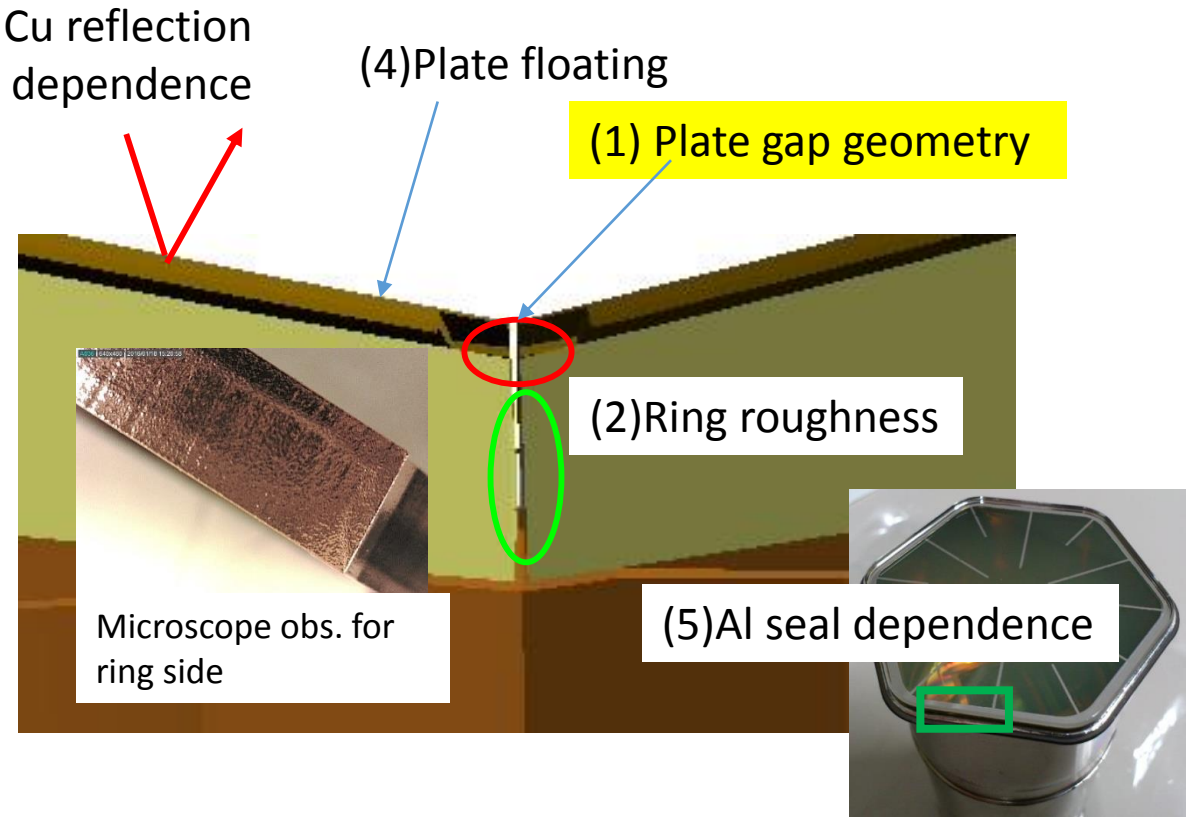


小川、物理学会 2017年秋

Backgroundの系統誤差:
(a)検出器表面のgeometry依存

- (1)銅プレートの隙間による誤差が最も大きい。
  - 隙間見積もり:85+/-55um
  - 銅プレートサンプルのサイズ測定、検出器組み付け時の隙間測定より求められた。

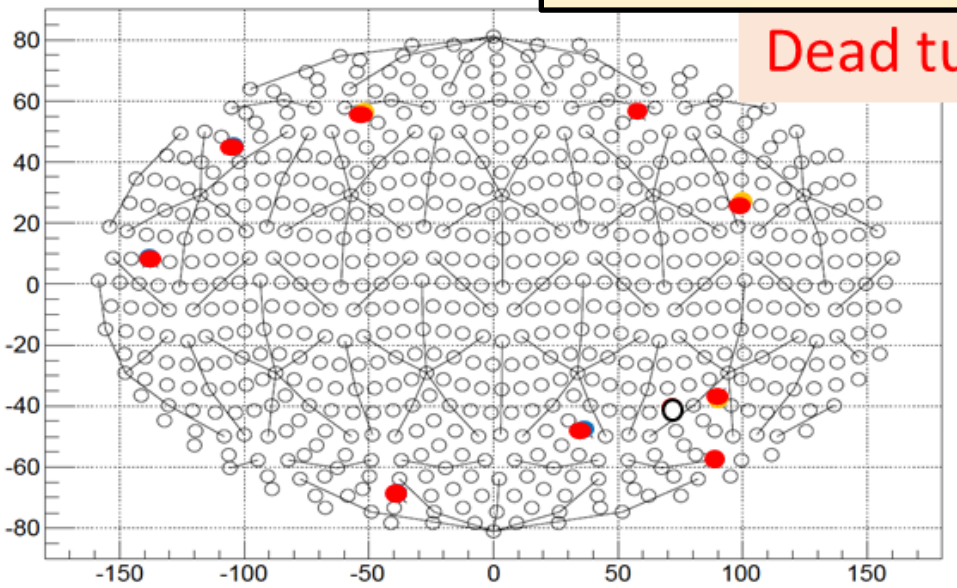


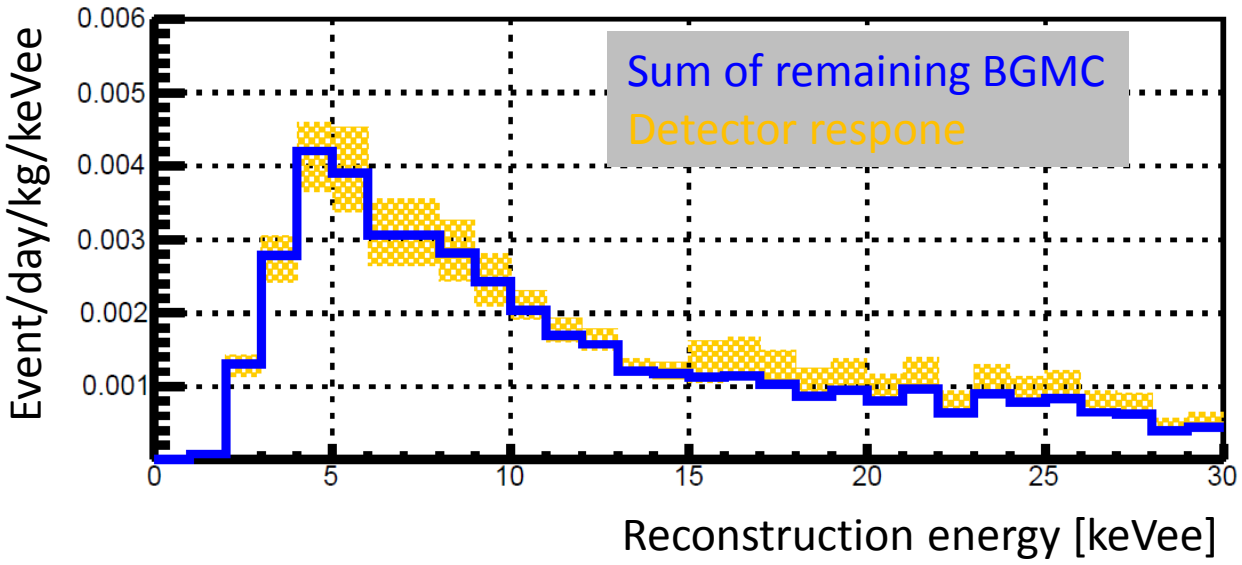


小川、物理学会 2017年秋

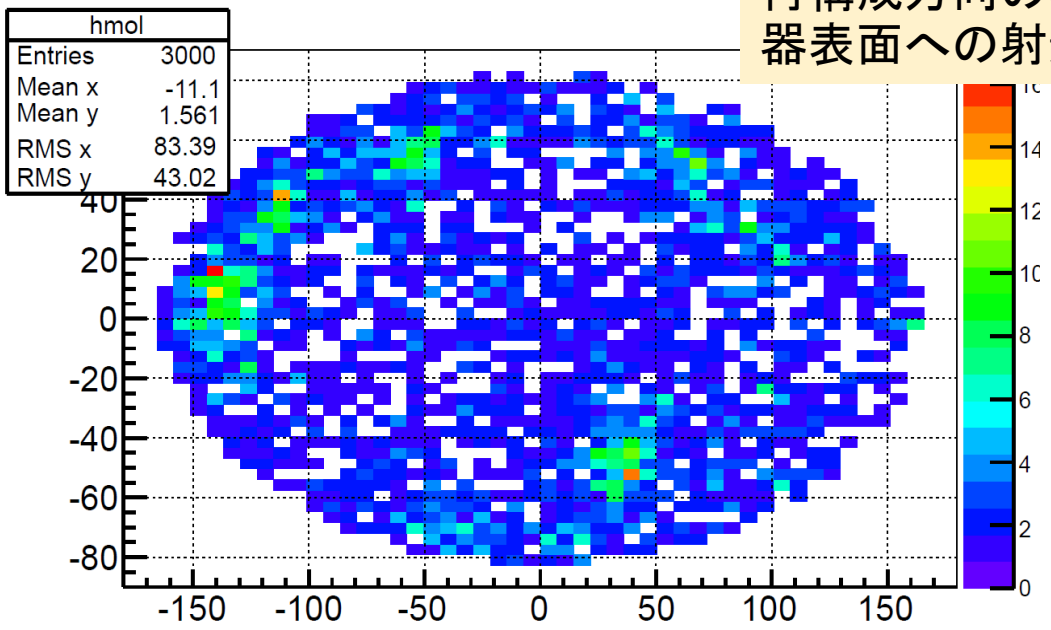
Backgroundの系統誤差：(b) 検出器のレスポンス

- 再構成のパフォーマンス、時間情報依存、dead tube依存
- もっとも大きいのは(9) dead tube 依存
  - Dataset間で9本/642のdead tube発生
  - 付近で起こる事象が誤って有効体積内に再構成される。
  - この“誤り”程度がデータとMCで違っている。Dead PMTからの距離から、違いの分布を求めた。

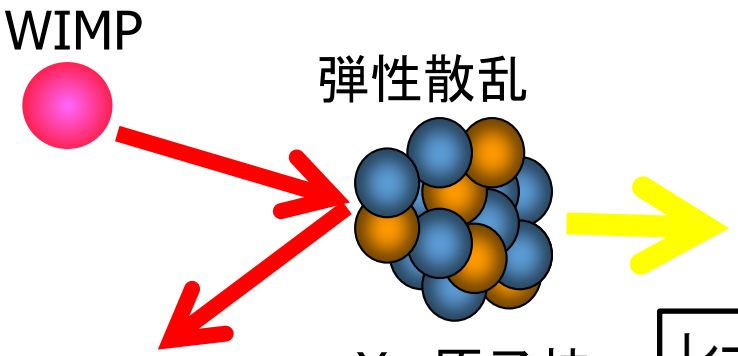




再構成方向の検出器表面への射影図

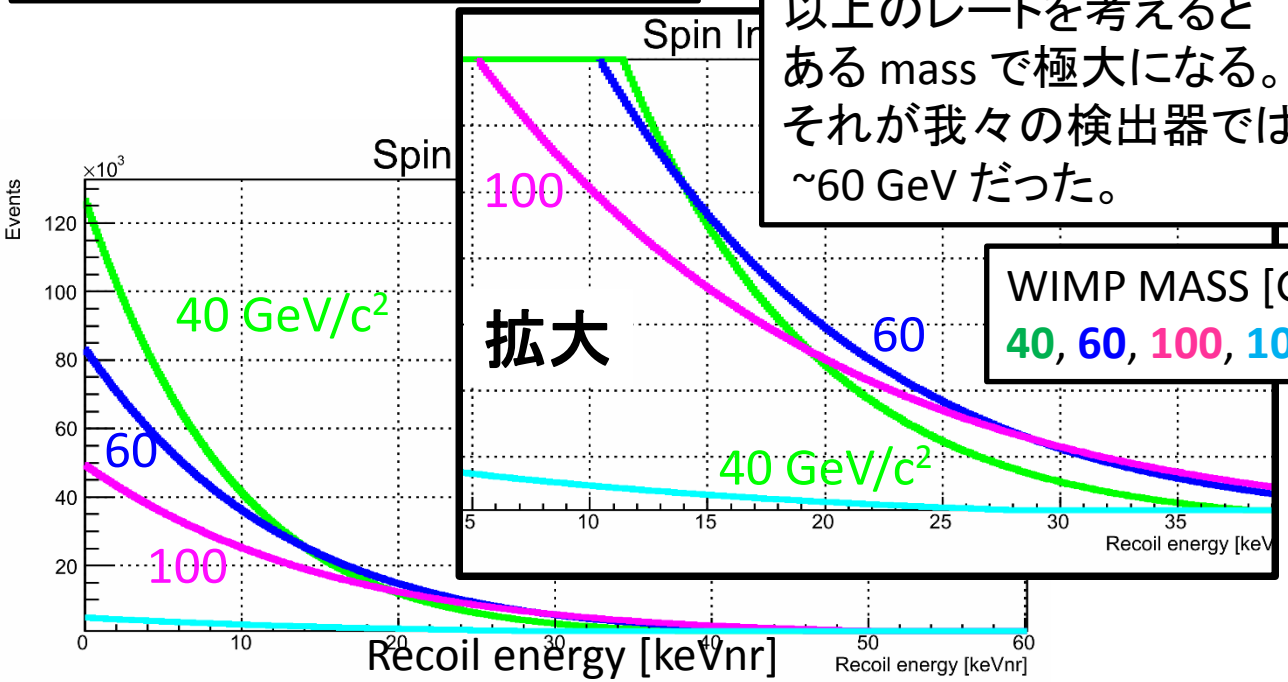


期待されるWIMP信号 (WIMP MC)



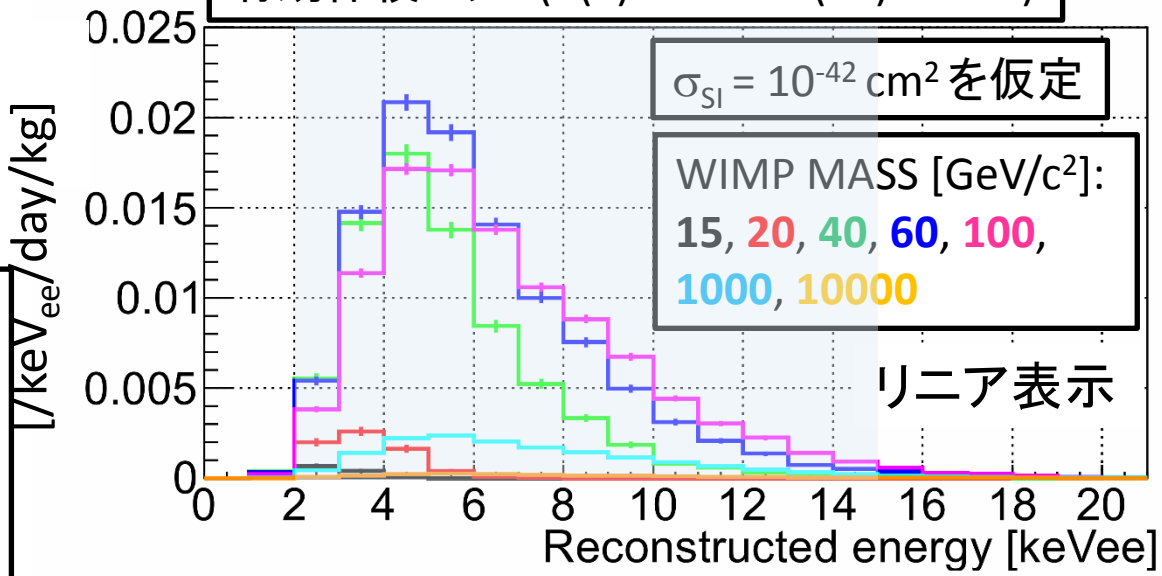
検出器MC にいれる前の計算値

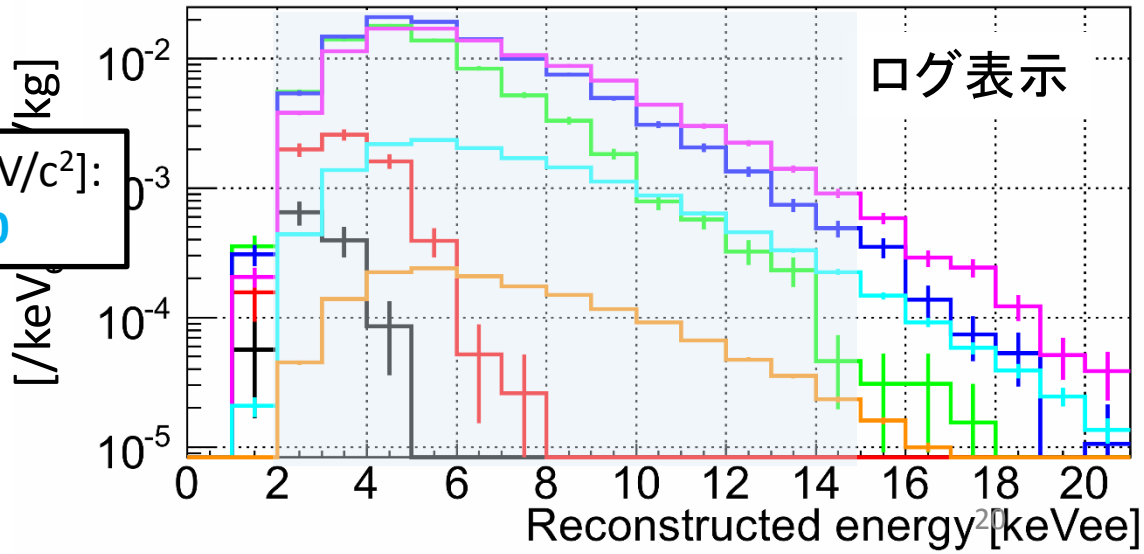
レート積分値はmass
の減少とともに増加。
あるエネルギーしきい値
以上のレートを考えると
ある mass で極大になる。
それが我々の検出器では
~60 GeV だった。



WIMP MASS [GeV/c²]:
40, **60**, **100**, **1000**

有効体積カット (R(T)<38cm+R(PE)<20cm)





BG を考慮した WIMP探索フィッティング

竹田、物理学会 2017年秋

- 2–15 keVee のエネルギー領域で、BG MC と WIMP MC の寄与を合わせてデータにフィッティングさせた。
- BG MC における RI 放射能量の不定性、BG MC 及び WIMP MC の系統誤差はエネルギーに強く相関しているため その効果をペナルティタームに入れてフィッティングを行った。

$$x_i^2 = \sum_i \frac{\left(D_i - \sum_j p(j)\left(B_{ij} + \sum_k \boldsymbol{\sigma(sys)_{ijk}}\cdot q(k)\right) - \alpha\cdot\left(Wi + \sum_l \sigma(Wsys)_{il}\cdot r(l)\right)\right)^2}{\left(D_i + \sum_j p(j)^2\cdot \boldsymbol{\sigma(stat)_{ij}^2} + \alpha^2\sigma(Wstat)_i^2\right)} + \underbrace{\sum_j \frac{(1-p(j))^2}{\boldsymbol{\sigma(RI)_j^2}} + \sum_k \frac{(q(k))^2}{1} + \sum_l \frac{(r(l))^2}{1}}$$

ペナルティターム

D_i	データの事象数
B_{ij}	BG MC 事象数
σ(sys)	BG MC の系統誤差
σ(stat.)	BG MC の統計誤差
σ(RI)	BG MC のRI量の不定性
W_i	WIMP MC の事象数
α	WIMP 信号の大きさ
σ(Wsys)	WIMP MC の系統誤差
σ(Wstat)	WIMP MC の統計誤差

705.88 live days

小川 (15aT11-2) の結果を用いる

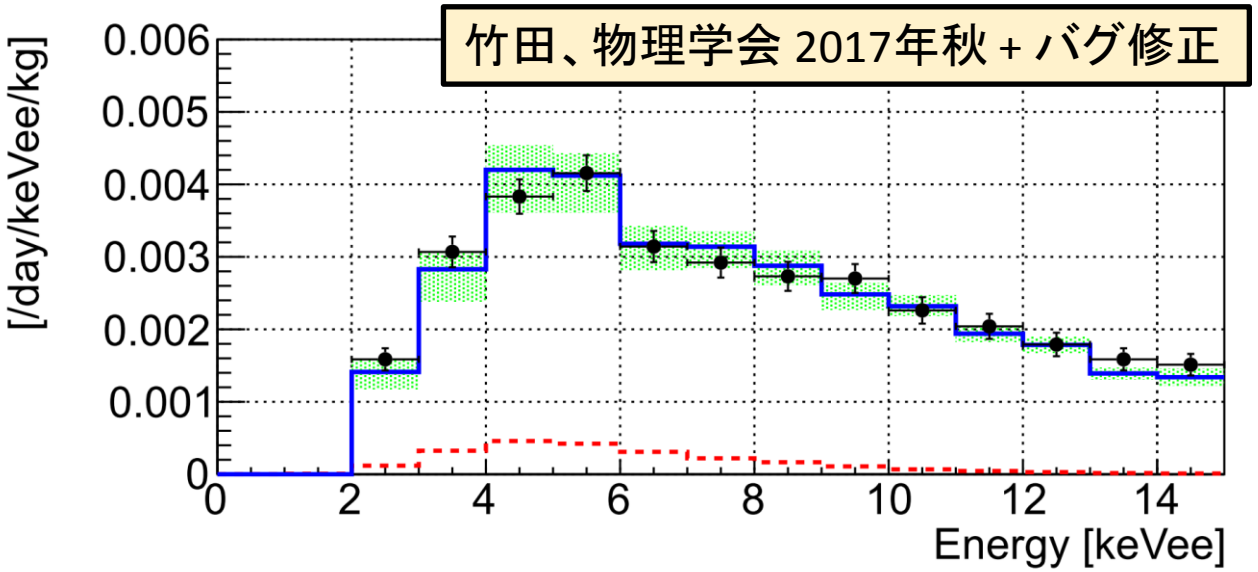
フリーパラメータ。本 fitting から求める

Page 4 より

p(j)	BG MC のRI量の変化量
q(k)	BG MC の系統誤差の変化量
r(l)	WIMP MC の系統誤差の変化量

i = 1–13	エネルギービン、1keVee ステップ
J = 1–30	BG MC の系統誤差の変化量
K = 1–11	WIMP MC の系統誤差の変化量
l = 1–4	WIMP MC の系統誤差の変化量

SI相互作用断面積に対する 90% C.L. 上限値

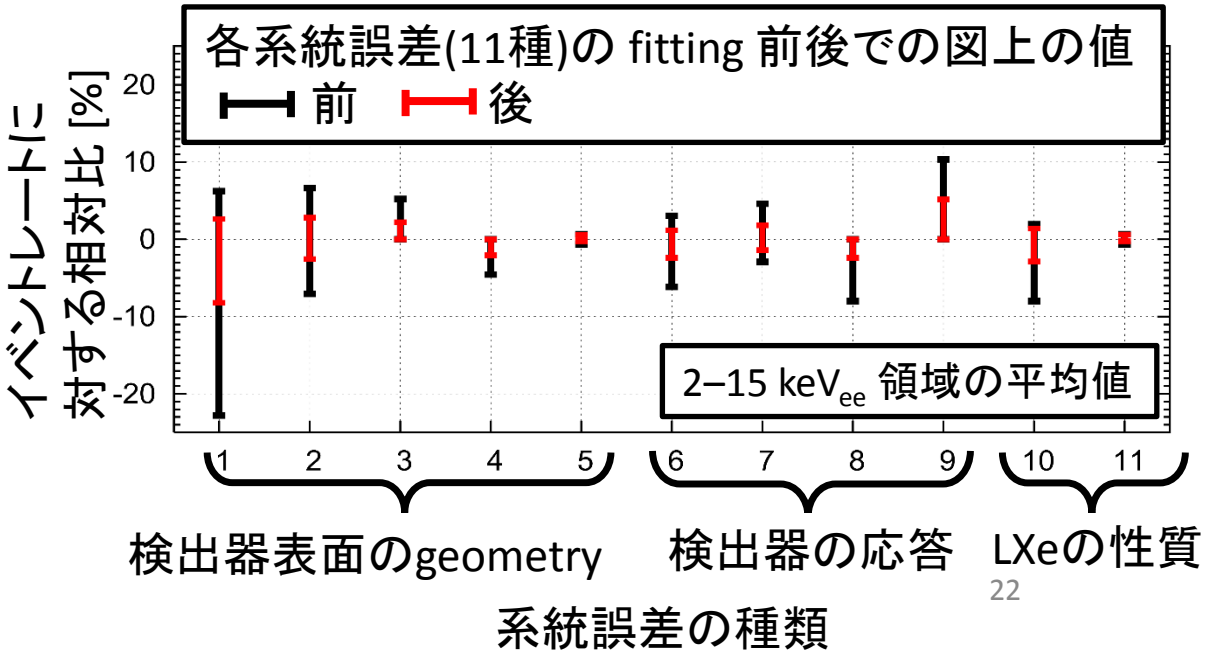


- 青線: best fit (WIMP = 0) を与える BG MC
- 緑領域: fitting で得られる best fit の χ^2 の値を 1 変化させる誤差の領域

(＊) 系統誤差のエネルギー相関を fitting 過程の pull termで考慮することで得られた左図の緑領域は、fitting 前に相関を考慮せずに図示したものより小さくなっている。

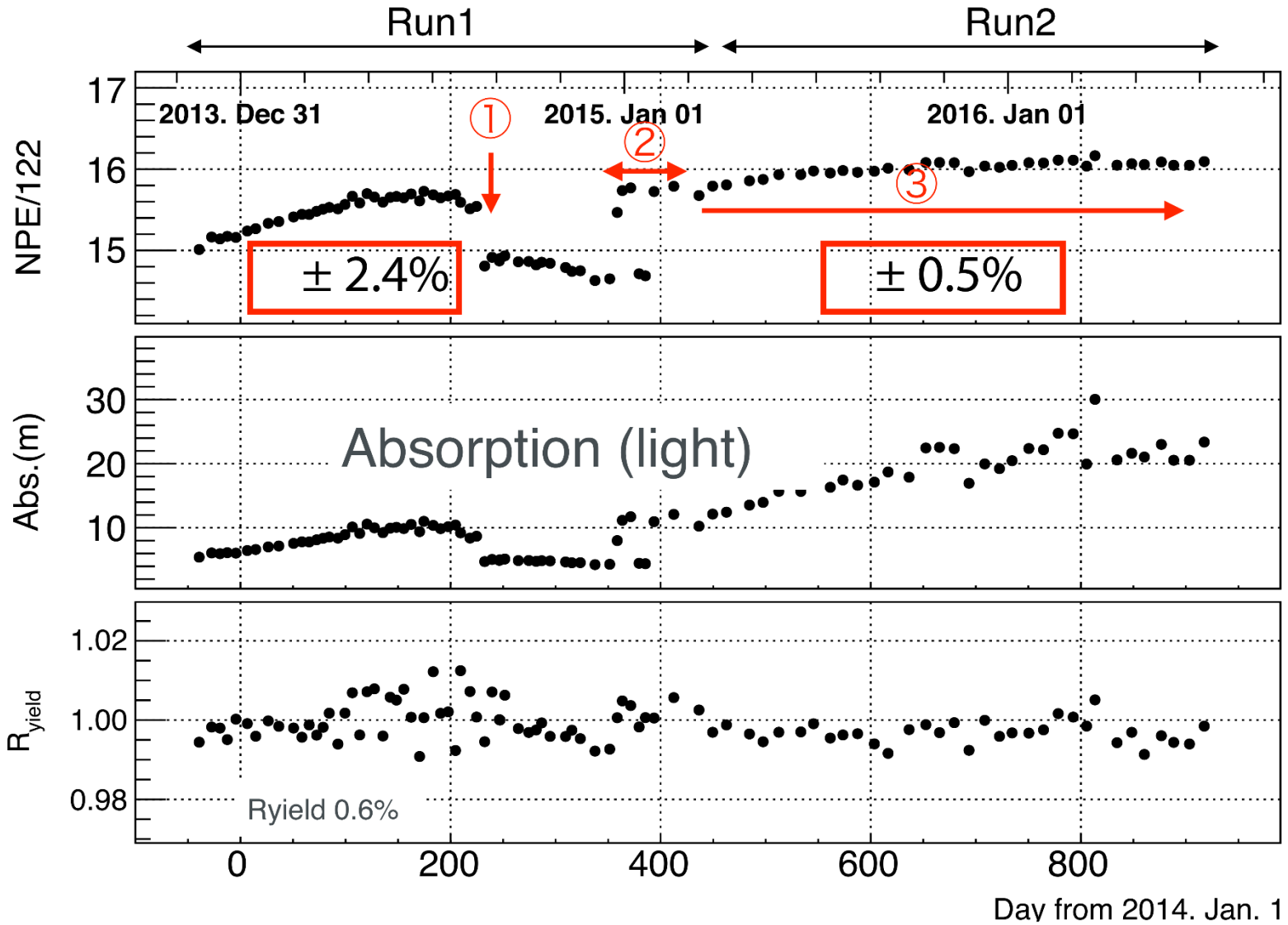
- 90% C.L. 上限値: **2.2×10^{-44} cm^2 (60 GeV/c^2)**

→ BG MC と WIMP 信号を合わせて fitting することで BG の寄与が差し引かれ、緑領域で示されているエラーの大きさと同程度のWIMP signal が上限値として求められた。



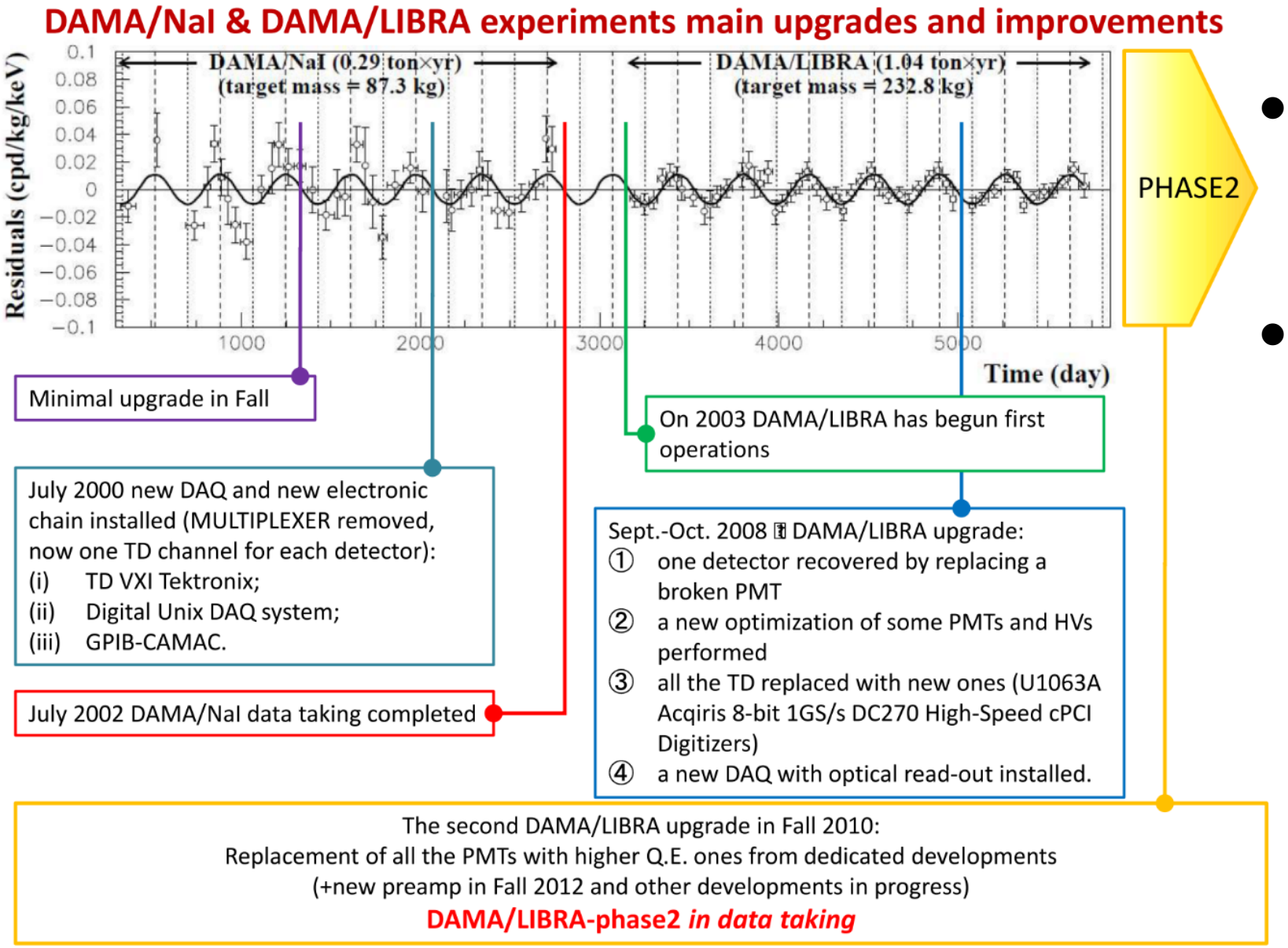
季節変動解析・光量安定性

- 光量変化を Co-57 線源でモニター
- 大光量: ~15 PE/keV @ 122 keV
- 低しきい値: 1.0 keV_{ee}
- 吸収長 4-30 m, 散乱長 ~52 cm
- 光量の安定性:
  - Run1 : ±2.4%
  - Run2 : ±0.5%



① Power failure (2014/08/17x)
② Purification work
③ Continuous gas recirculationx

DAMA/LIBRA



- これまで、
  - DAMA/NaI: 0.29 ton × yr
  - DAMA/LIBRA phase 1: 1.04 ton × yr

  → 総計 1.33 ton × yr, 14 cycles
- 2010年秋より、DAMA/LBRA phase 2 の測定が始まっている。
  - 全ての PMT を High QE PMT に交換し、低しきい値が期待されている。

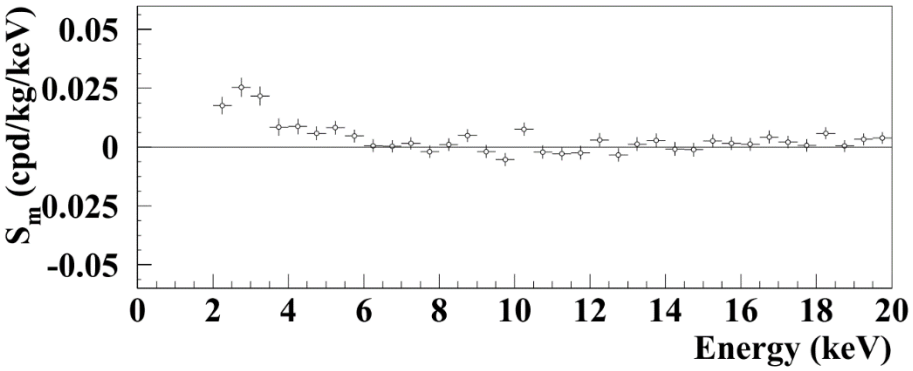
Nuclear and Particle Physics Proceedings 273–275 (2016) 321–327

DAMA/LIBRA

- 中性子、ミューオン、太陽ν の影響の見積もり。
- 2–6 keV_{ee} の振幅 S_m [/day/kg/keV_{ee}] と比較した値 (表の右端の値)は、全て 1 より十分小さく、無視できる。

	Source	$\Phi_{0,k}^{(n)}$ (neutrons cm^{-2} s^{-1})	η_k	t_k	$R_{0,k}$ (cpd/kg/keV)	$A_k = R_{0,k}\eta_k$ (cpd/kg/keV)	A_k/S_m^{exp}
SLOW neutrons	thermal n (10^{-2} – 10^{-1} eV)	1.08×10^{-6}	$\simeq 0$ however $\ll 0.1$	–	$< 8 \times 10^{-6}$	$\ll 8 \times 10^{-7}$	$\ll 7 \times 10^{-5}$
	epithermal n (eV-keV)	2×10^{-6}	$\simeq 0$ however $\ll 0.1$	–	$< 3 \times 10^{-3}$	$\ll 3 \times 10^{-4}$	$\ll 0.03$
FAST neutrons	fission, $(\alpha, n) \rightarrow$ n (1-10 MeV)	$\simeq 0.9 \times 10^{-7}$	$\simeq 0$ however $\ll 0.1$	–	$< 6 \times 10^{-4}$	$\ll 6 \times 10^{-5}$	$\ll 5 \times 10^{-3}$
	$\mu \rightarrow$ n from rock (> 10 MeV)	$\simeq 3 \times 10^{-9}$	0.0129	end of June	$\ll 7 \times 10^{-4}$	$\ll 9 \times 10^{-6}$	$\ll 8 \times 10^{-4}$
	$\mu \rightarrow$ n from Pb shield (> 10 MeV)	$\simeq 6 \times 10^{-9}$	0.0129	end of June	$\ll 1.4 \times 10^{-3}$	$\ll 2 \times 10^{-5}$	$\ll 1.6 \times 10^{-3}$
	$\nu \rightarrow$ n (few MeV)	$\simeq 3 \times 10^{-10}$	0.03342*	Jan. 4th*	$\ll 7 \times 10^{-5}$	$\ll 2 \times 10^{-6}$	$\ll 2 \times 10^{-4}$
	direct μ	$\Phi_0^{(\mu)} \simeq 20\ \mu\ m^{-2}d^{-1}$	0.0129	end of June	$\simeq 10^{-7}$	$\simeq 10^{-9}$	$\simeq 10^{-7}$
	direct ν	$\Phi_0^{(\nu)} \simeq 6 \times 10^{10}\ \nu\ cm^{-2}s^{-1}$	0.03342*	Jan. 4th*	$\simeq 10^{-5}$	3×10^{-7}	3×10^{-5}

* The annual modulation of solar neutrino is due to the different Sun-Earth distance along the year; so the relative modulation amplitude is twice the eccentricity of the Earth orbit and the phase is given by the perihelion.



η_k : modulated contribution

R. Bernabei, et al., arXiv:1409.3516

カルツァ=クライン (KK) 粒子

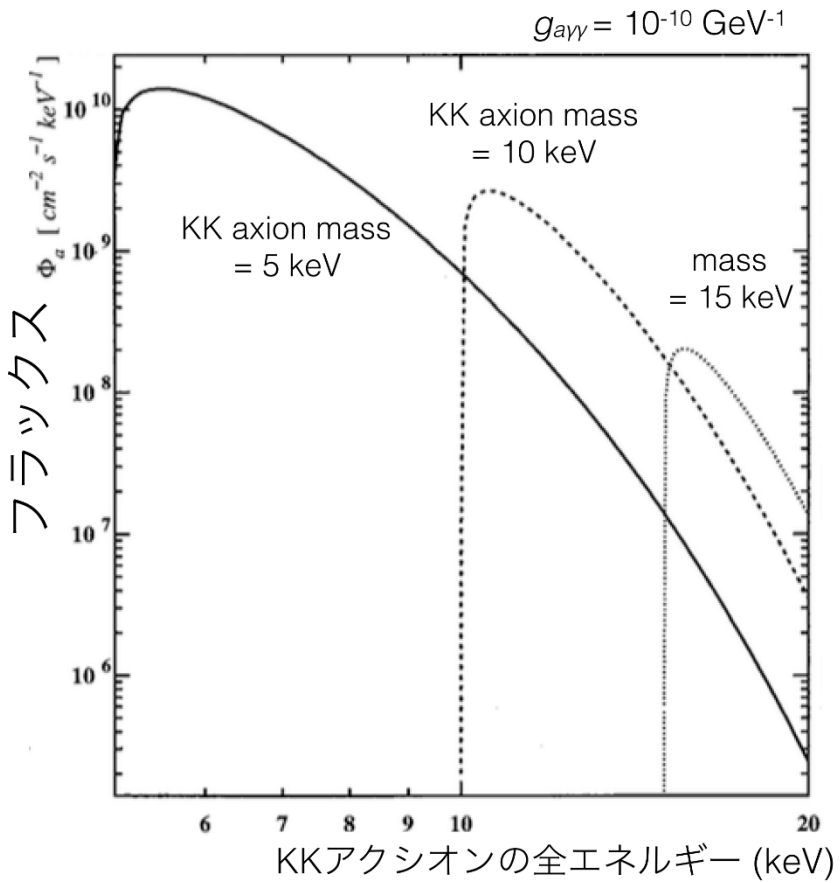
- 階層性問題の解決のために、mm スケールの大きな余剰次元模型が提唱 (ADD 1998)
- 重力場が余剰次元を伝播して、コンパクト半径 R にコンパクト化される。

- 余剰次元方向の振動は、4次元空間では質量 (KK励起状態) として見える。
- KK 粒子は無限に続く励起状態のタワーを持つ。
- M_F = 100 TeV, 余剰次元数 n= 2, コンパクト半径 $R=10^3$ keV^{-1} = 0.1 μm の場合を仮定。
  - これまでの観測で、コンパクト半径は、30 μm まで検証されている。

- アクシオンは、ゲージ電荷をもたないため、余剰次元を伝播しうる。→ KK アクシオンが存在できる。

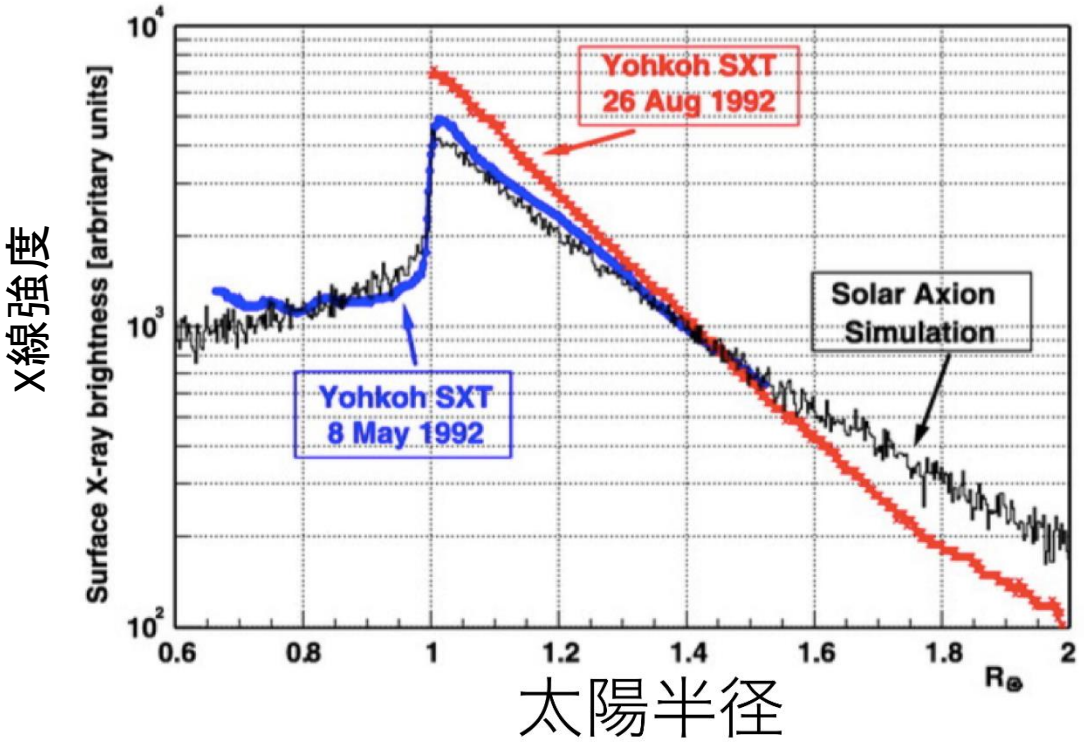
太陽起源 KK アクシオン

- 様々な質量の KK アクシオンが太陽の中で主に
  フォトンコアレッセンス (γγ → a) で作られて放出される。
- 一部が太陽重力でトラップされ、太陽近傍に蓄積される。



from Di Lella et al., *PRD* **62** (2000) 125011

- 太陽からのX線を再現するように KK アクシオン
  の結合定数を決めると、
  $g_{a\gamma\gamma} = 9.2 \times 10^{-14}$ GeV $^{-1}$



K. Zioutas et al., ApJ 607 (2004) 575

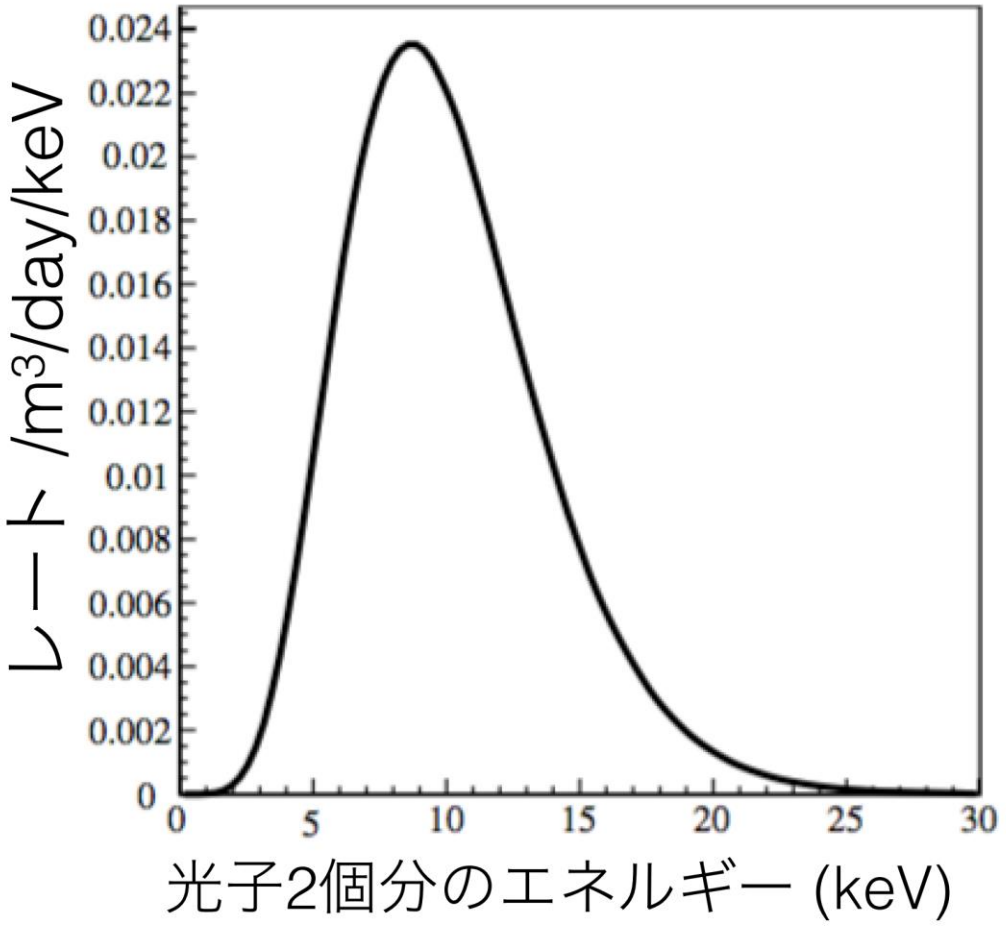
太陽起源 KK アクシオン

- 期待される信号は、検出器内の KK アクシオンが、2光子に崩壊する事象で、10 keV 程度のブロードな分布になることが予想される。

- 結合定数が、9.2e-14 /GeV の時、
  - 期待される事象頻度は、
    0.21 events/m^3/day
  - 液体キセノン中のkg あたりでは、
    7×10^{-5} events/kg/day
  - 本当は、体積が大きくて2光子が見れるガス検出器が有利。

地球近傍のKKアクシオン
の崩壊スペクトル

from Morgan et al., *Astropart. Phys.* **23** 287 (2005)



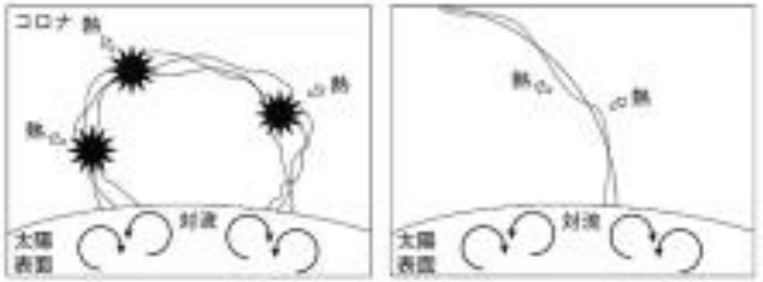
太陽のコロナ過熱問題

- コロナ過熱問題
  - 太陽表面 ~6000度
  - コロナ ~100万度

- **ナノフレア説**
  - 観測にかからない小さなフレアが温めている。
- **アルベーン波説**
  - 磁力線がエネルギーを運んでいる。
  - アルベーン波の波動エネルギーが熱エネルギーに変換され得るという証拠が、太陽観測衛星「ひので」、「IRIS」によってとらえられている。***Astroph. J 809 (2015) 72***

  → まだ完全解明には至っていない。

- 太陽近傍にトラップされた KK アクシオンの崩壊X線が、コロナを温めるというシナリオで説明できる可能性がある。



【図22】

ナノフレア説
小さなフレア（ナノフレア）がエネルギー源となってコロナを加熱しているという説。

アルベーン波説
太陽表面（光球）から伸びた無数の磁力線が対流などによって揺さぶられ、エネルギーをコロナに運ぶという説。

常田佐久『太陽に何が起きているか』