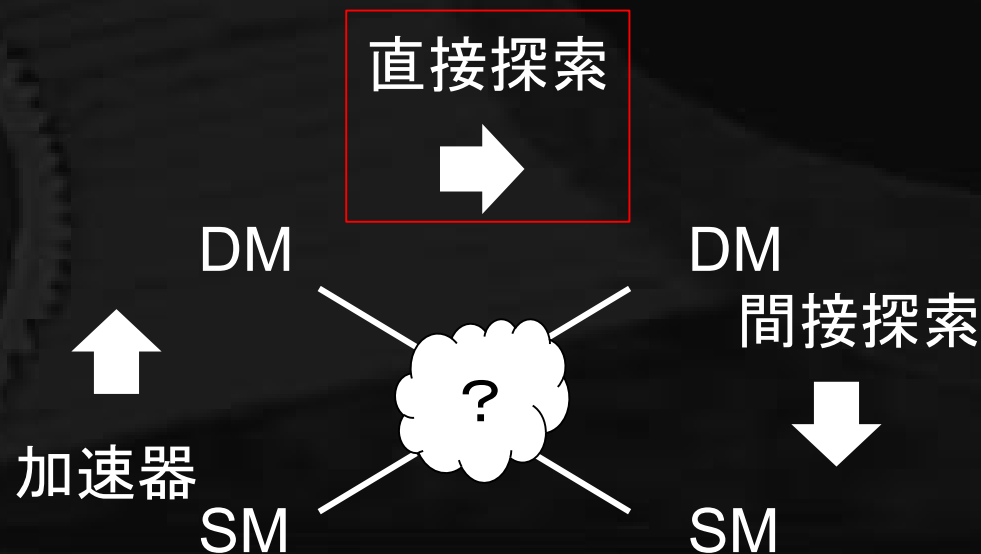


暗黒物質直接探索実験の現状

神戸大学 身内賢太郎

2017年9月12日日本物理学会2017年秋季大会
シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」

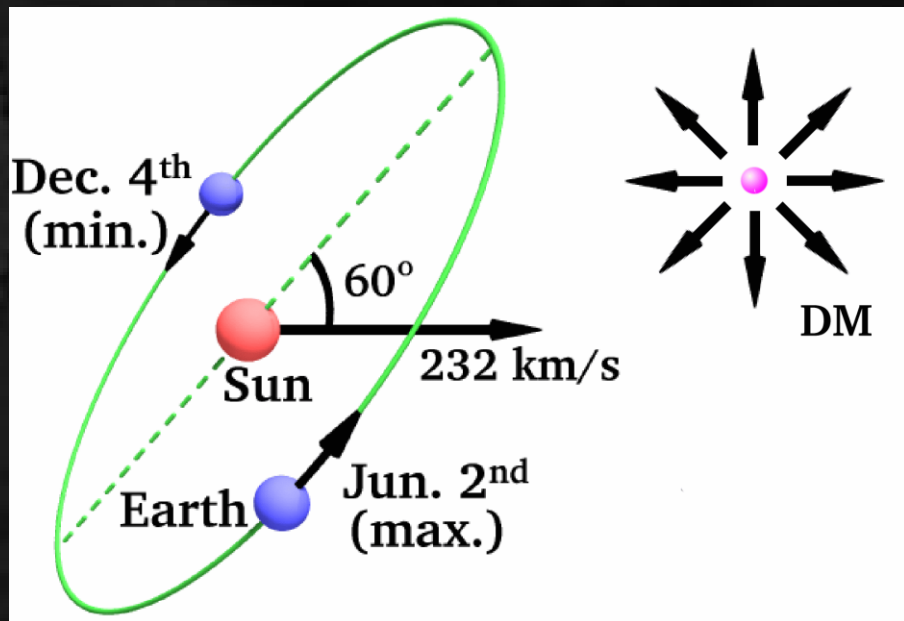


流れ

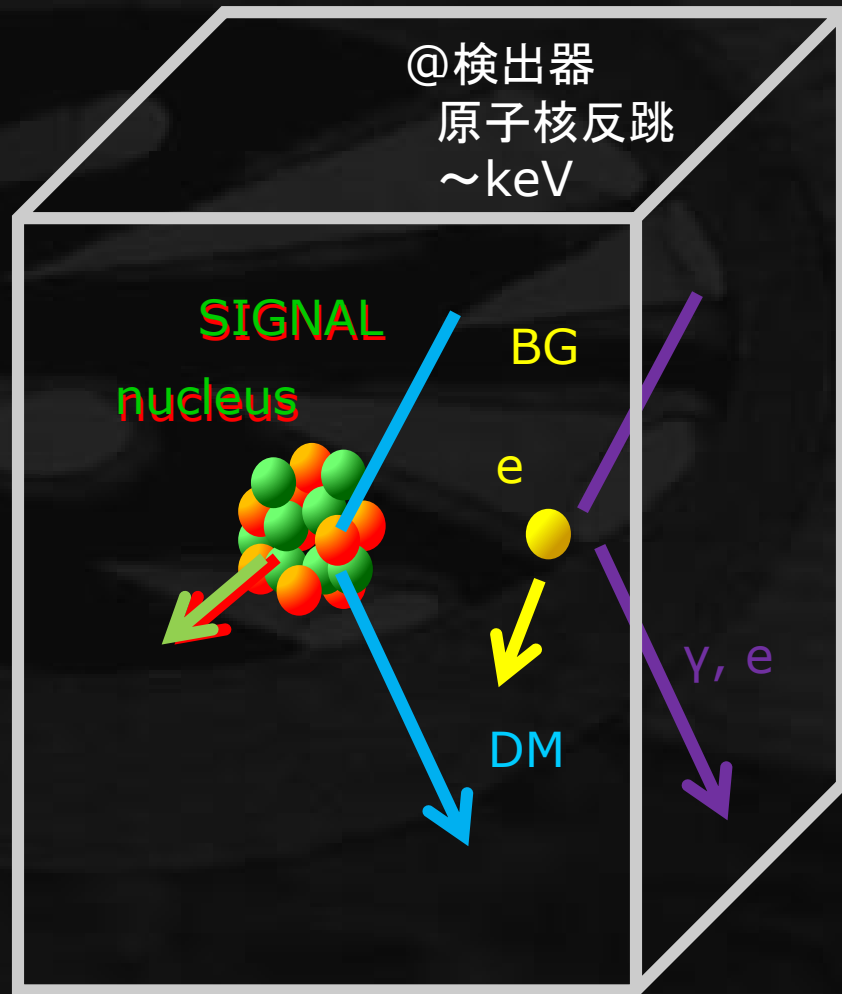
- 概観
- 現状
- 展望
- 日本の戦略

概観

直接探索 (主にWIMP探索)

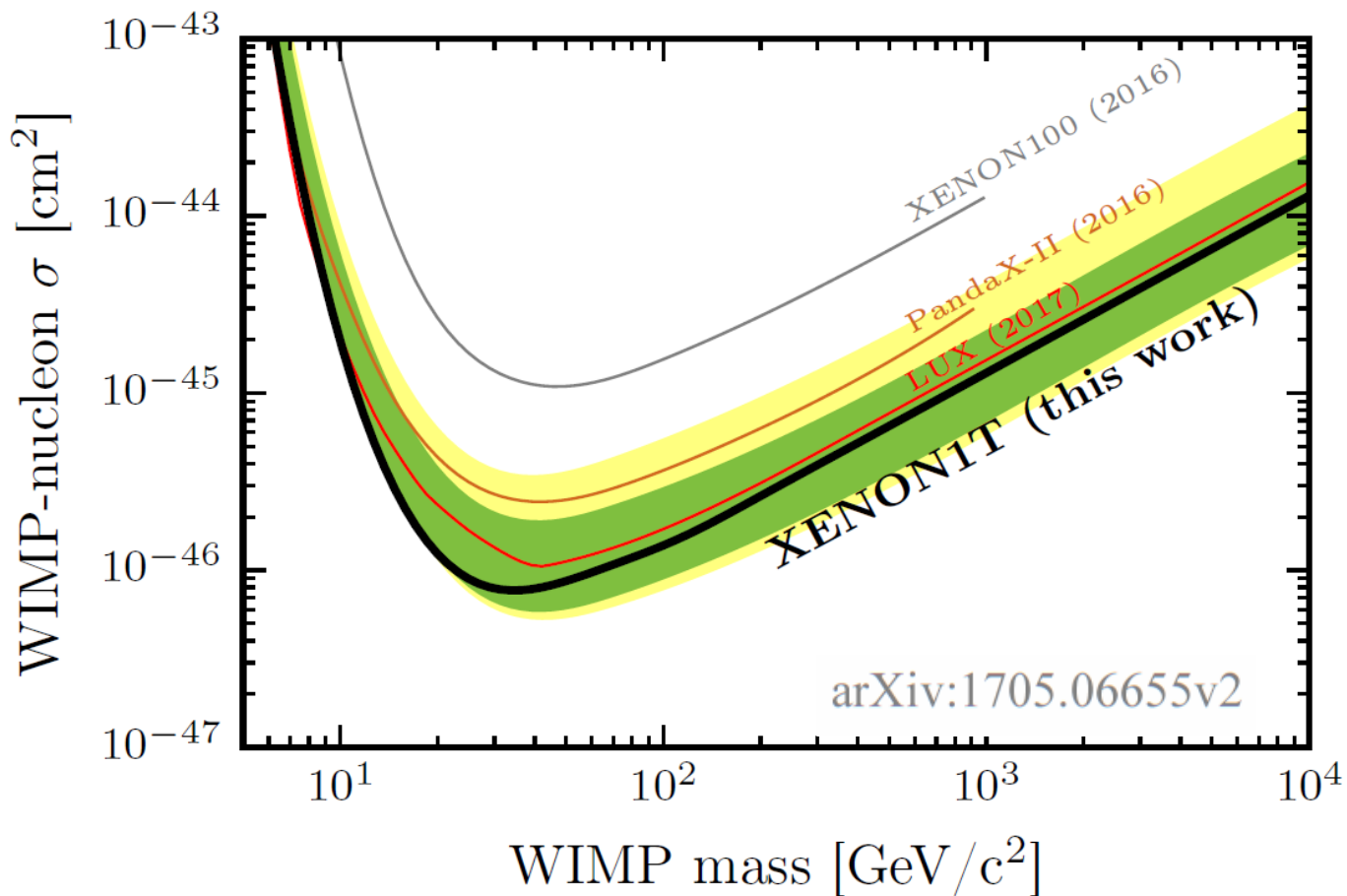


@銀河
 $\sim 0.3 \text{ GeV/cc}$
 $v_0 \sim 220 \text{ km/s}$



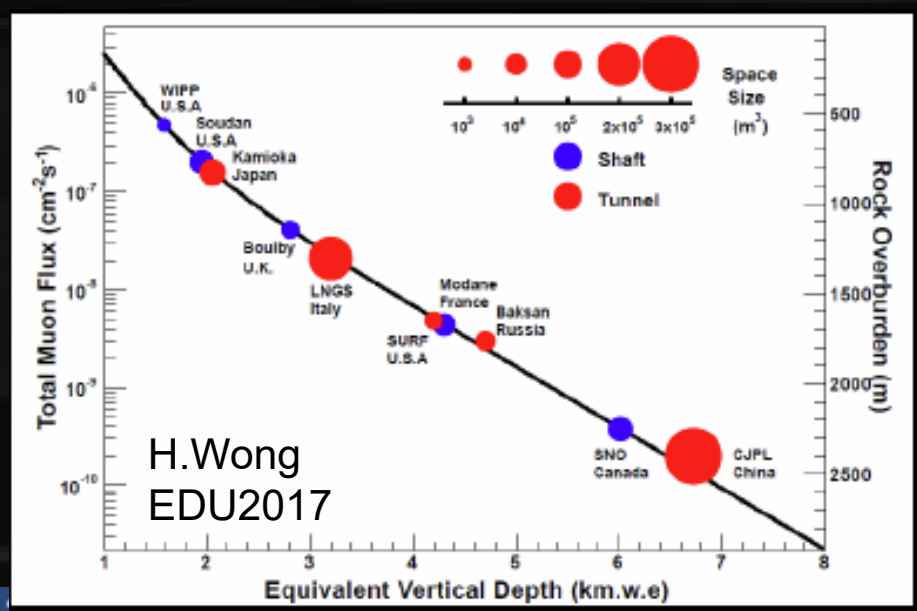
直接探索の現状(2017)

- $10^{-46} \text{cm}^2 \rightarrow \text{O}(1) \text{ 事象/月/1ton(Xe)}$
- 低バックグラウンド \rightarrow 地下実験



世界の地下実験室

- 宇宙線BGを防ぐ
- 残りのBG：
γ線・中性子・内部
・ニュートリノ



Underground facilities (a partial list)

It has been proven that underground facilities are very important for varieties of science!
For scientific reasons, It would be very nice if there is (at least) one in the Southern hemisphere...



T.Kajita
(TAUP2017)



Stawell
(2018-)

WHAT'S NEW :

ニュートリノコヒーレント散乱

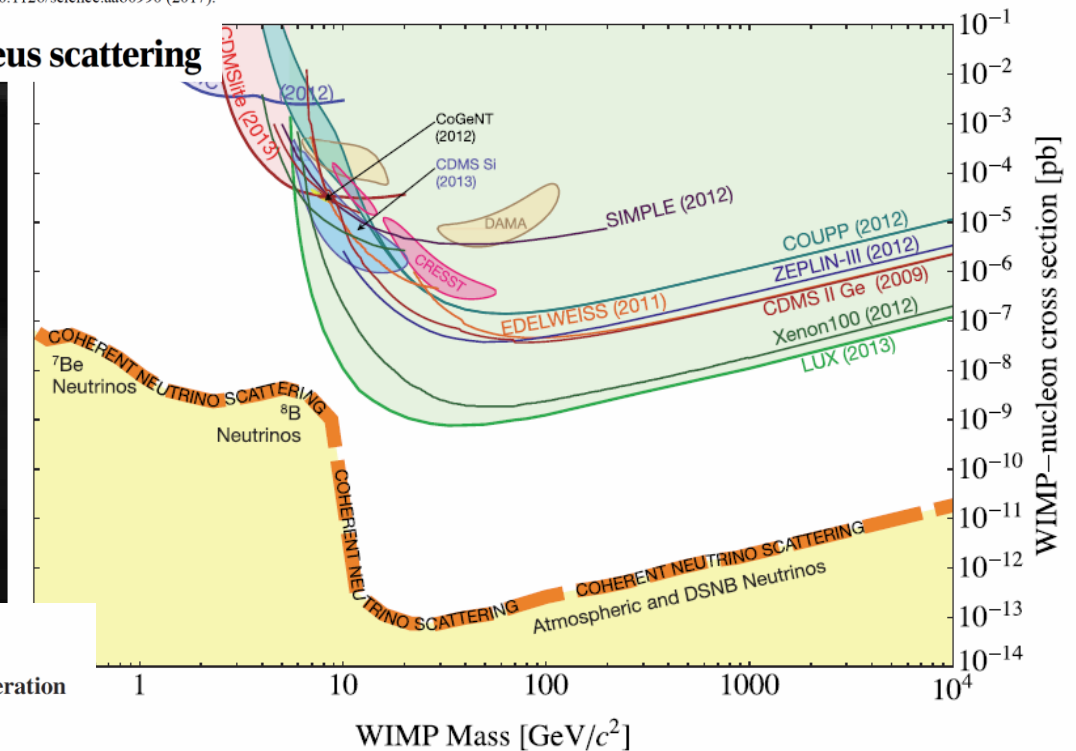
- 2017年初観測された
- 「固い」BG (=ニュートリノフロア) になる

Science

REPORTS

Cite as: D. Akimov *et al.*, *Science*
10.1126/science.aao0990 (2017).

Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering



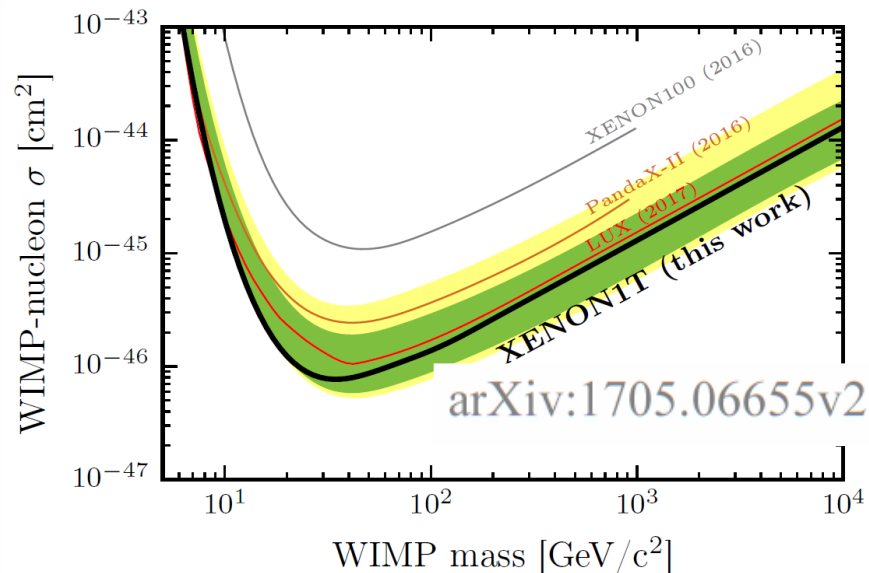
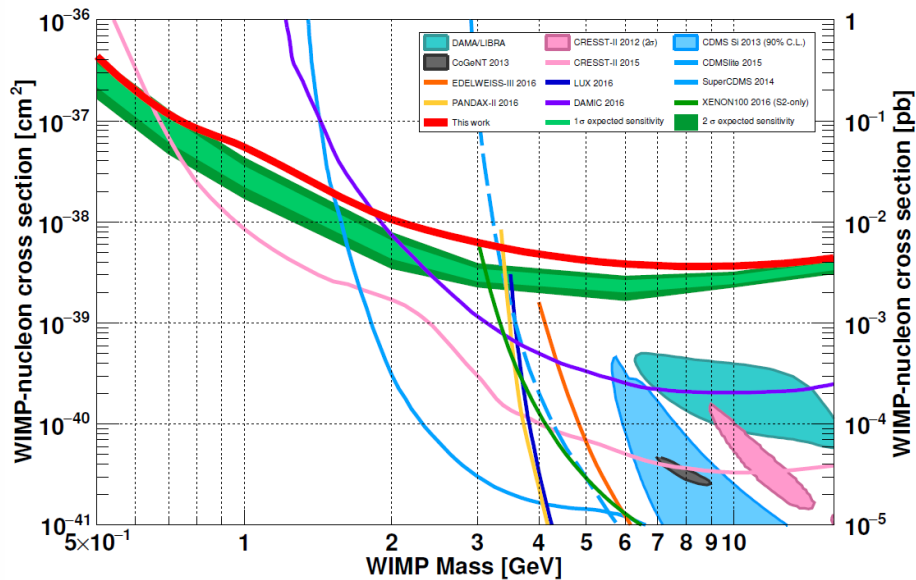
PHYSICAL REVIEW D **89**, 023524 (2014)

Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments

J. Billard,* and E. Figueroa-Feliciano

戦いの歴史

- 1997~ DAMA : 「検出」を主張 ~50GeV
- 2000~ CDMS等に否定される
- 2008年 LIBRAで再現!
- 2009年 CDMS 2事象
- 2010年~ その他の実験も (BGだろうが)
「**事象」を報告 light WIMP?
- 2012年~ XENON, LUX excluded
- そして今 王道Xe 低mass低温 SD見るならSDD 忘れちゃいけないNaI





現状

ERの捉え方

E_R (photon)

DAMA, DM-ICE
COSINE, SABRE, ANAIS (NaI)
DEAP
XMASS (Xe)

(photon + charge)

XENON, LUX, PANDA-X, LZ
(Xe)
DarkSide (Ar)

(photon + heat)

CRESST
(CaWO₄)

E_R (heat)

PI-CO, SIMPLE (CxFx)

E_R (charge)

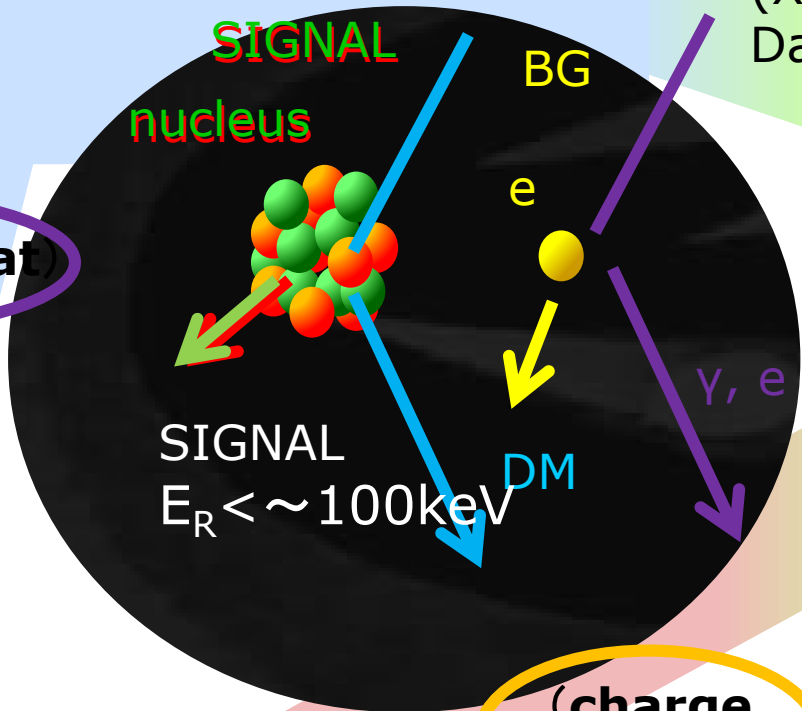
CoGent
DAMIC (Ge)
NEWS-SNO (Ne)

E_R + DIRECTION

DRIFT, NEWAGE,
DMTPC, MIMAC,
NEWS (emulsion)

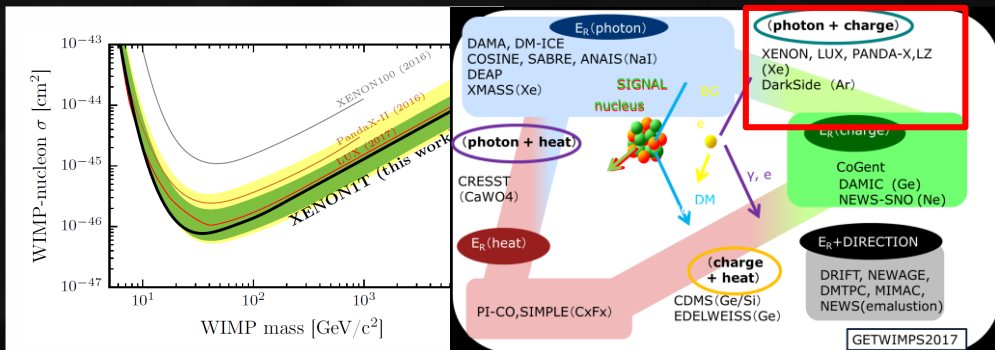
(charge + heat)

CDMS (Ge/Si)
EDELWEISS (Ge)

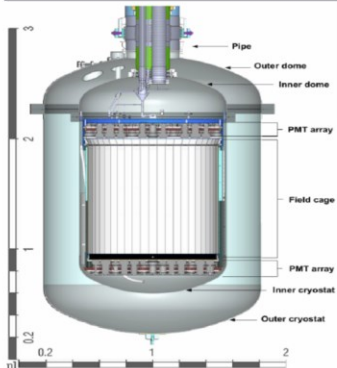


2相式液体キセノン

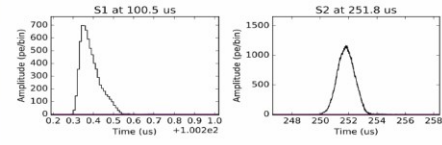
- XENON 1T : 2T active
- LUX : 370kg
- pandaX-II 500kg
- ガンマ線除去



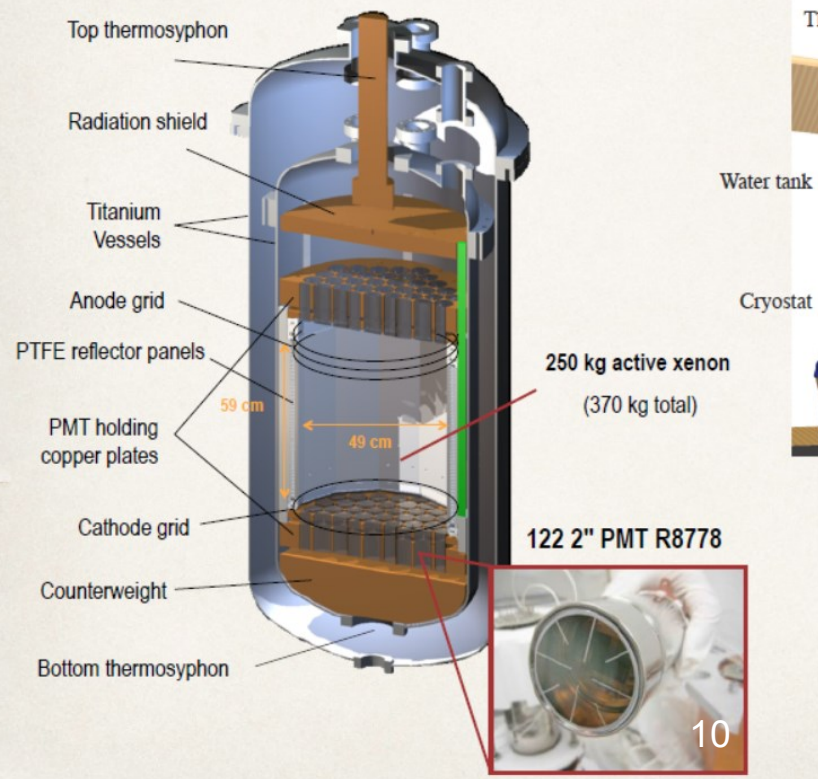
The Time Projection Chamber (TPC)



- 248 3" low-bkg PMTs
- 1 m drift × ø1 m
 - 2 tons active LXe
 - largest LXe TPC built
- filled and functional since May 2016

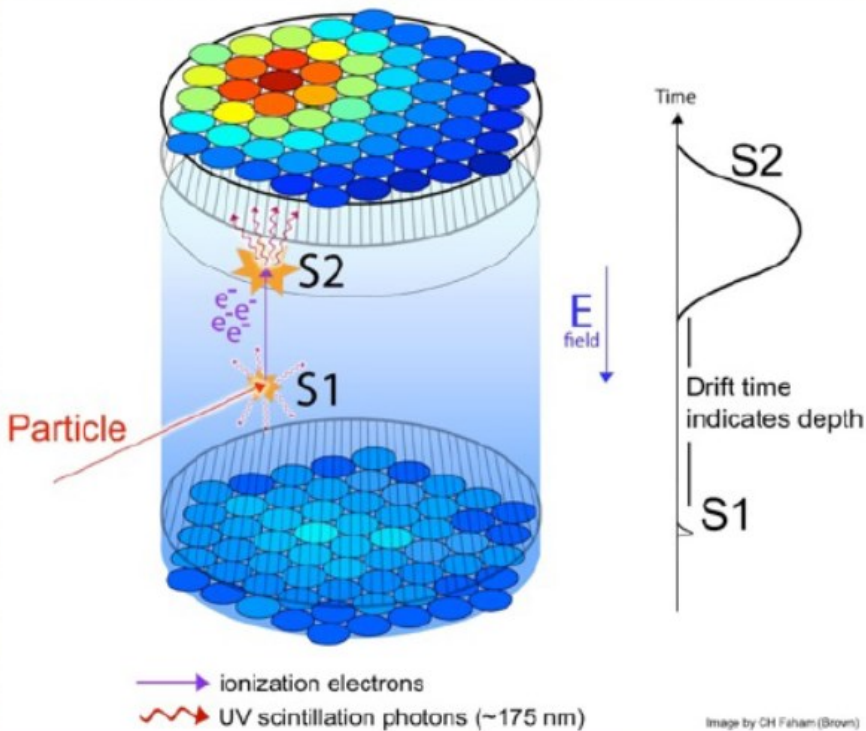


The LUX Detector



2-phase Liquid Xenon

γ rejection



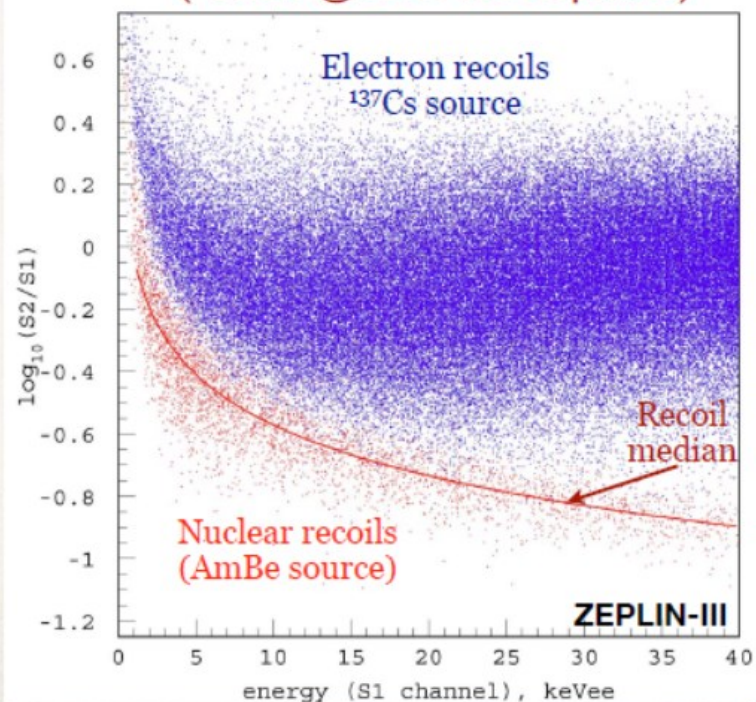
3D Position Reconstruction

- Z from time difference between S1 and S2 (1.5 mm/ μs @ 181 V/cm)
- XY reconstructed from light pattern (resolution of a few mm in WIMP search region)

Discrimination technique

- WIMPs and neutrons interact with nuclei short, dense tracks
- γ s and e^- interact with atomic electrons longer, less dense tracks

S2/S1 used for discrimination
($>99.5\%$ @ 50% NR acceptance)

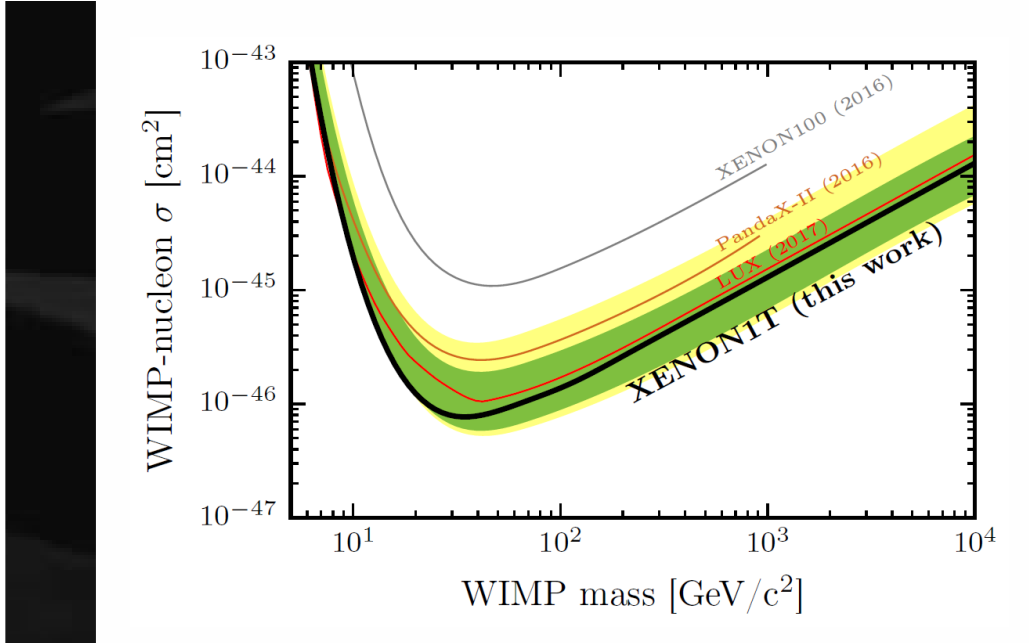
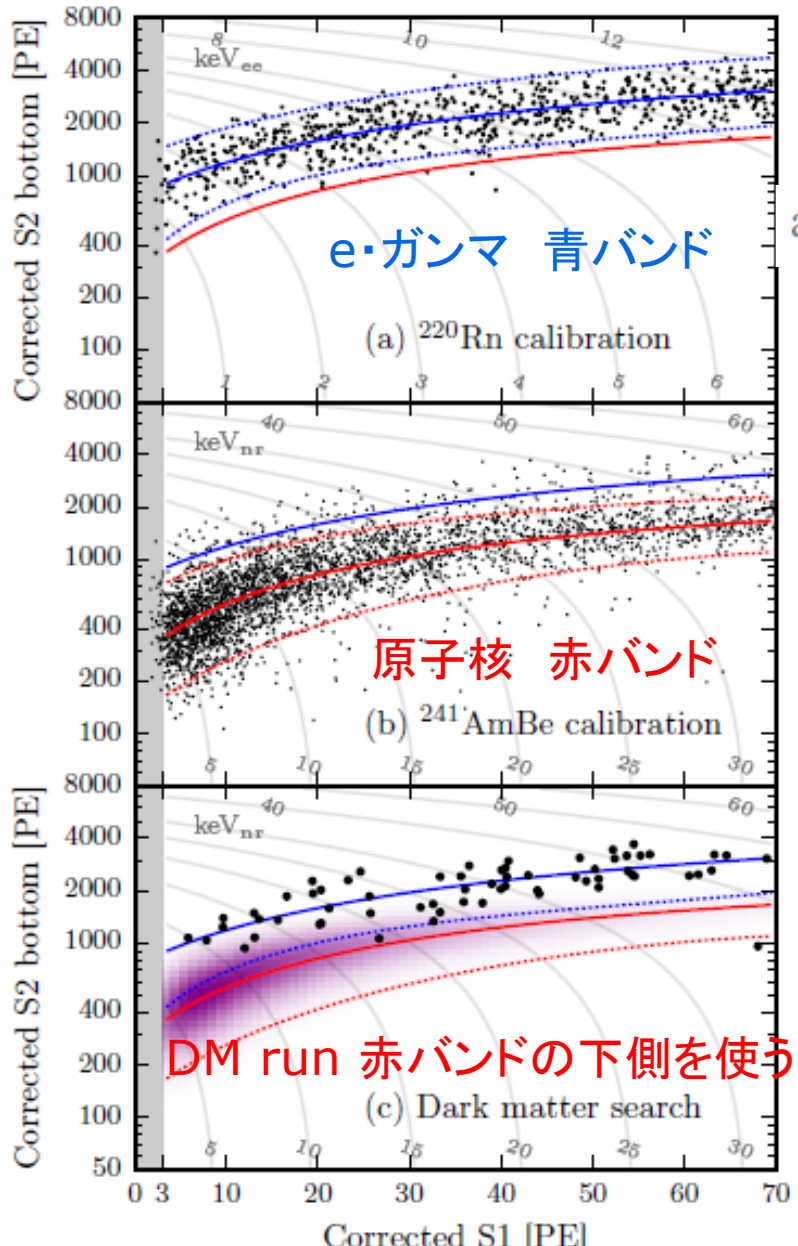


Xenon 1T 2017結果

34.2 live-days
1042kg fiducial mass

$7.7 \times 10^{-47} \text{cm}^2$

arXiv:1705.06655v2



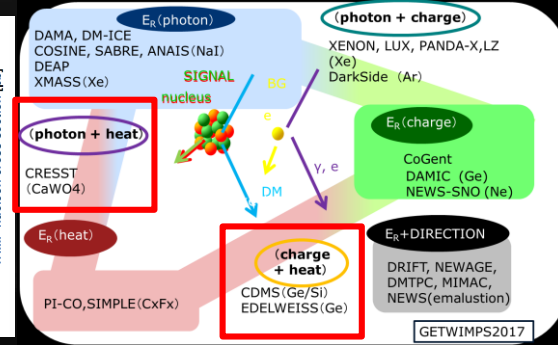
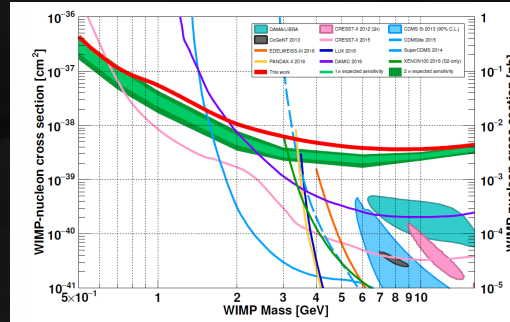
赤線より下はBGフリー

今後：上からの染み出しもありうる (^{214}Pb , ^{85}Kr)

低mass低温

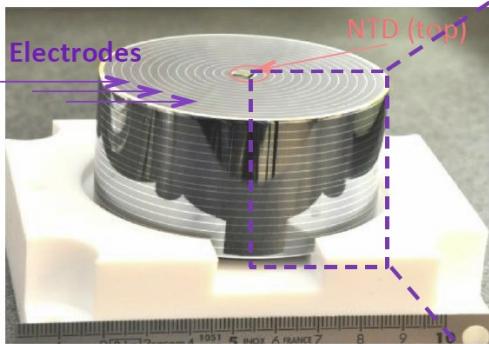
■ 閾値を下げて低質量WIMPに特化

- SuperCDMSlite (Ge) 閾値 56eVee 600g
- EDELWEISS (Ge) 閾値 900eVnr 800g
- CRESST-III (CaWO4) 閾値 100eVnr 24g

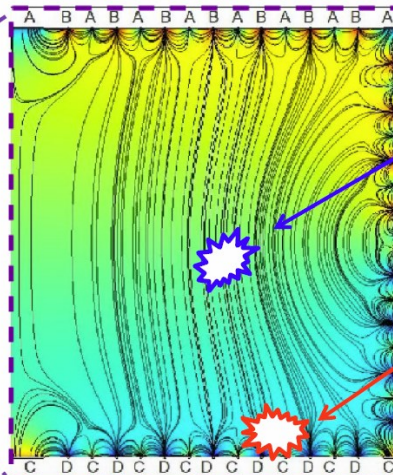


Edelweiss EDELWEISS-III: FID Ge-bolometer

Full InterDigitized (FID) detectors: 820-890 g, h = 40 mm,



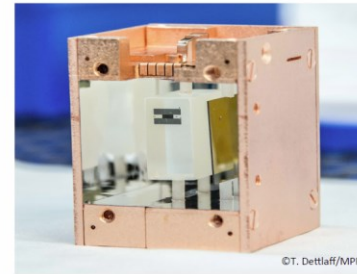
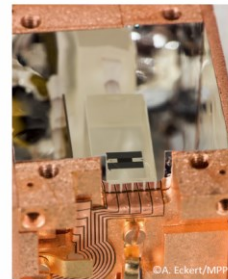
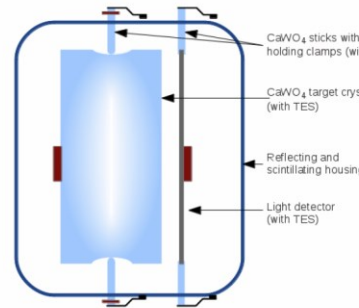
Simultaneous measurement of heat and ionization signals



CRESST-III low threshold detectors

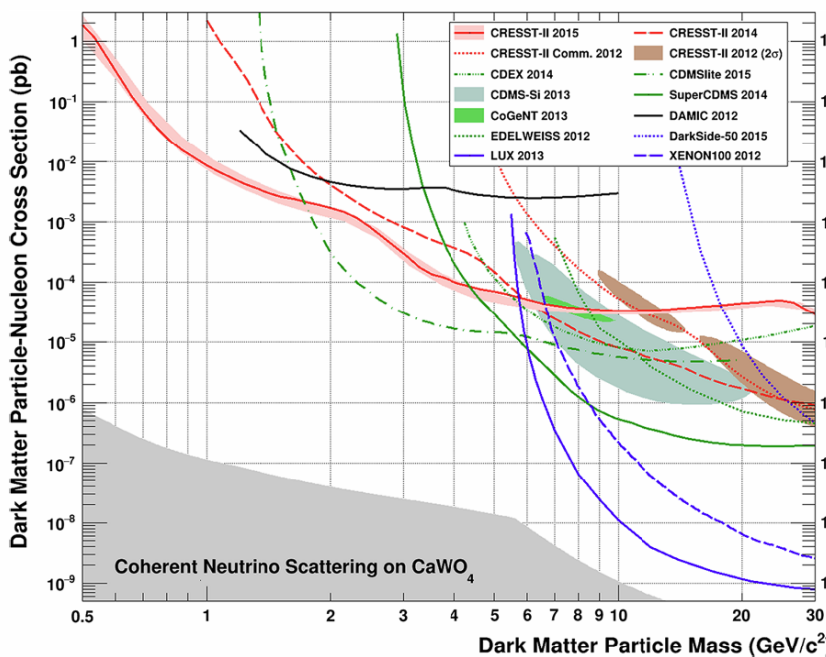
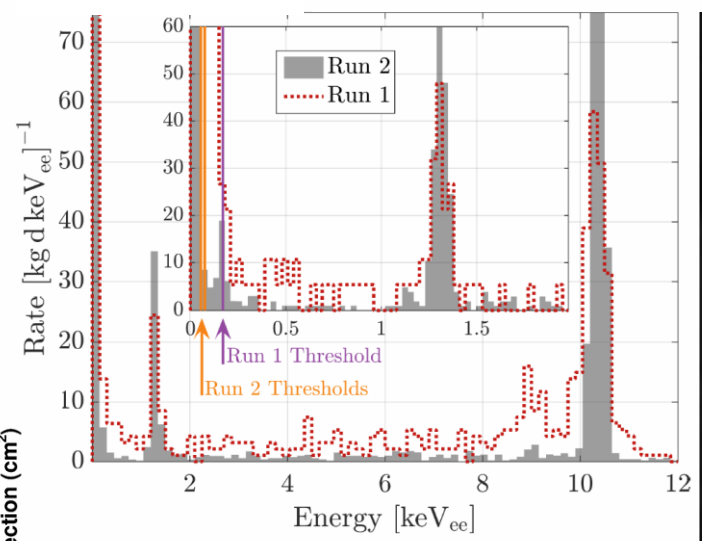
Detector layout optimized for low mass dark matter
Radical reduction of dimension

- Cuboid crystals of (20×20×10)mm³ (≈24g)
- Self grown crystals ≈3 counts/(keV kg day)
- **100 eV threshold**
- Fully scintillating housing
- Instrumented sticks } Veto surface related background



BG free?

- 3実験とも、0事象ではない。
- が低質量では十分良い探索能力。
- conservativeに制限をつけているが、、、



Eur. Phys. J. C (2016) 76:25

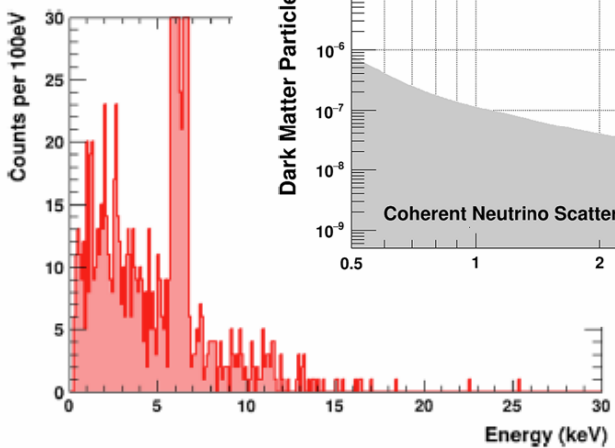
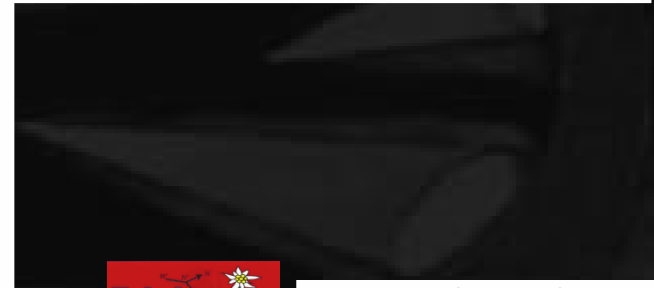
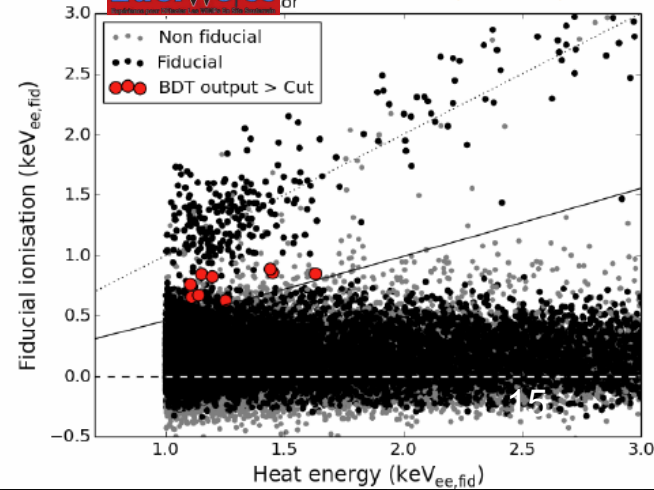


Fig. 6 Energy spectrum of all events in the acceptance region (307 eV–40 keV, see Fig. 5) truncated at a bin content of 30 for reasons of clarity. For the final result all events are conservatively considered as potential signal events to extract an exclusion limit using Yellin's optimum interval method



Edelweiss

JCAP05 (2016) 019



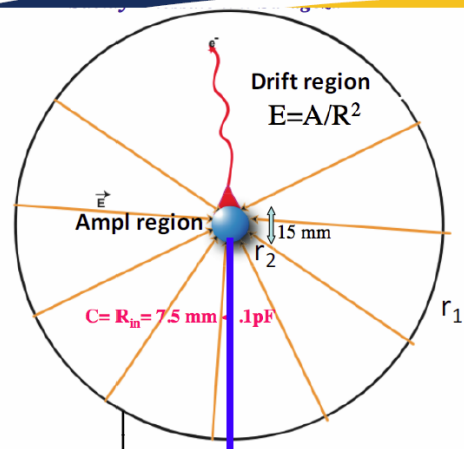
CRESST

低mass ダークホース

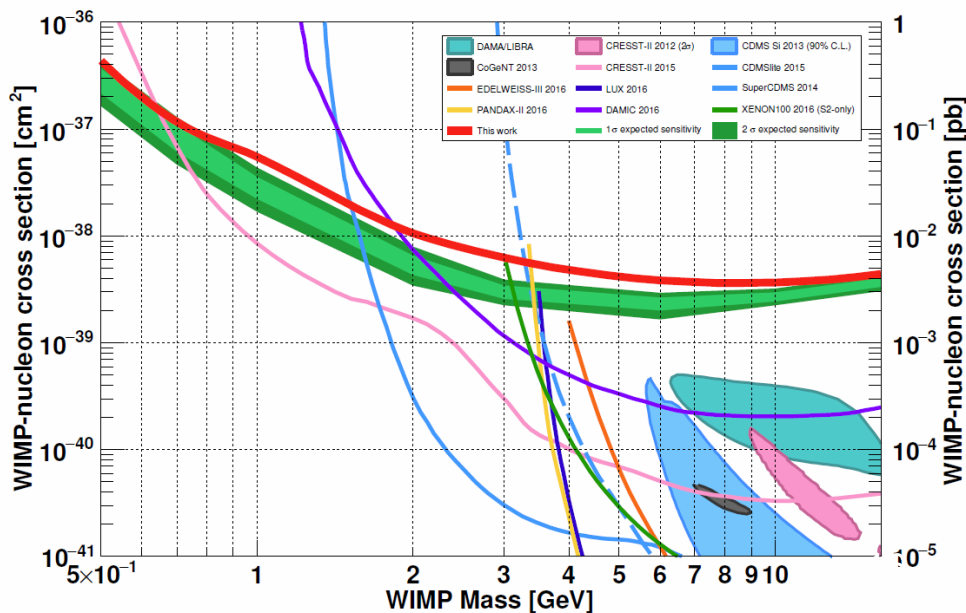
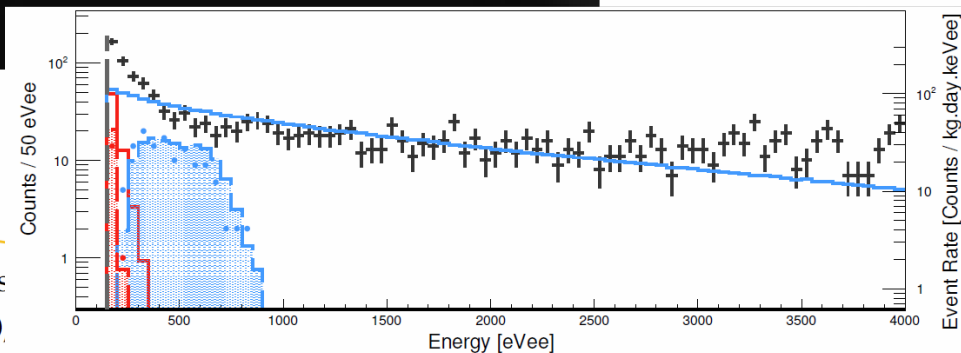
- 閾値勝負ならガスでもできる：NEWS-G
- 球状TPC
- Ne/CH4 3気圧
- 閾値50eV

arXiv:1706.04934v1

Spherical gas detectors New Experiments With Spheres



- Sphere cavity + spherical electrode
- => Low threshold (low C)
- Fiducial volume selection
- Flexible (P, gaz)
- Large mass / large volume
- Simple, sealed mode
- 2 LEP cavity 130 cm ϕ
- 1 low activity 60 cm



SDみるならSDD : PICO

- 過熱状態(superheated droplet) C_3F_8 バブルチェンバー
- 閾値型検出器 (エネルギースペクトル情報はなし) 3.3keV
- 安価に大質量 60リットル
- ガンマには感度なし
- 音と泡でカット → 0事象/ 1167kgdays

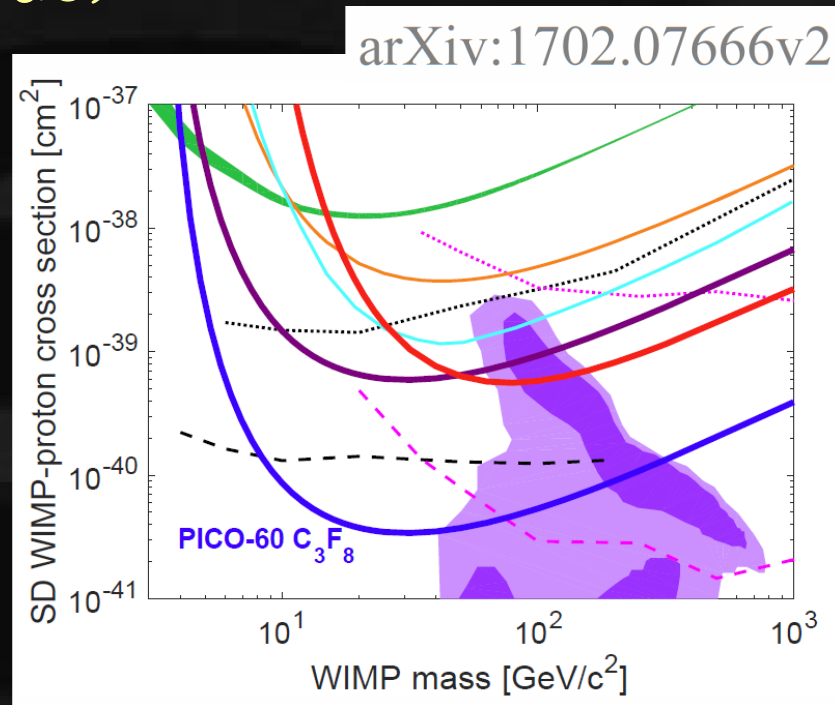
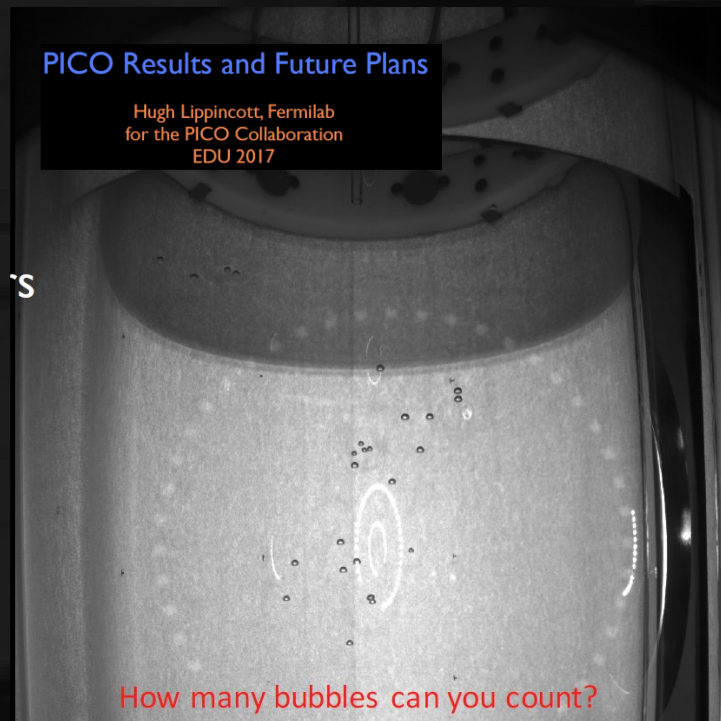
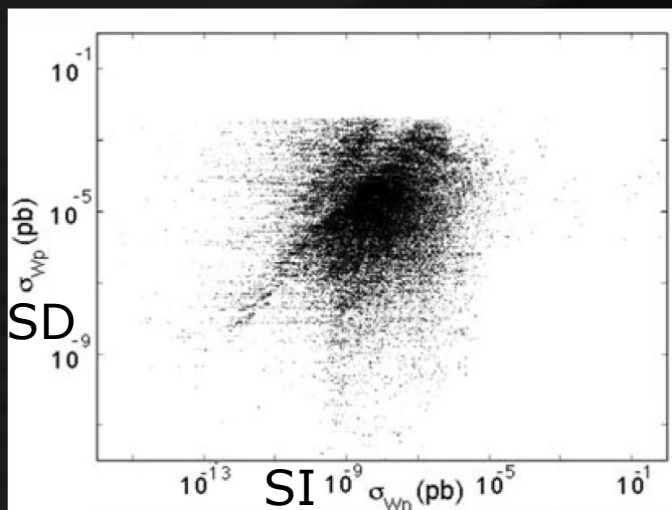


FIG. 3. The 90% C.L. limit on the SD WIMP-proton cross section from PICO-60 C_3F_8 plotted in thick blue, along with limits from PICO-60 CF_3I [10], PICO-2L [9], PICASSO (green band) [14], SIMPLE (orange) [34], PandaX-II (cyan) [35], IceCube (dashed and dotted pink) [36], and SuperK (dashed and dotted black) [37, 38]. The indirect limits from IceCube and SuperK assume annihilation to τ leptons (dashed) and b quarks (dotted). The purple region represents parameter space of the constrained minimal supersymmetric model of [39]. Additional limits, not shown for clarity, are set by LUX [40] and XENON100 [41] (comparable to PandaX-II) and by ANTARES [42, 43] (comparable to IceCube).

Fの特徴： SD/SI F/Xe 相補性

- SDとSIの大きさは独立
- SDでの探索では ニュートリノフロアがXeより下
- 発見の先の物理へのリーチ

New Journal of Physics 2 (2000) 14.1–14.14

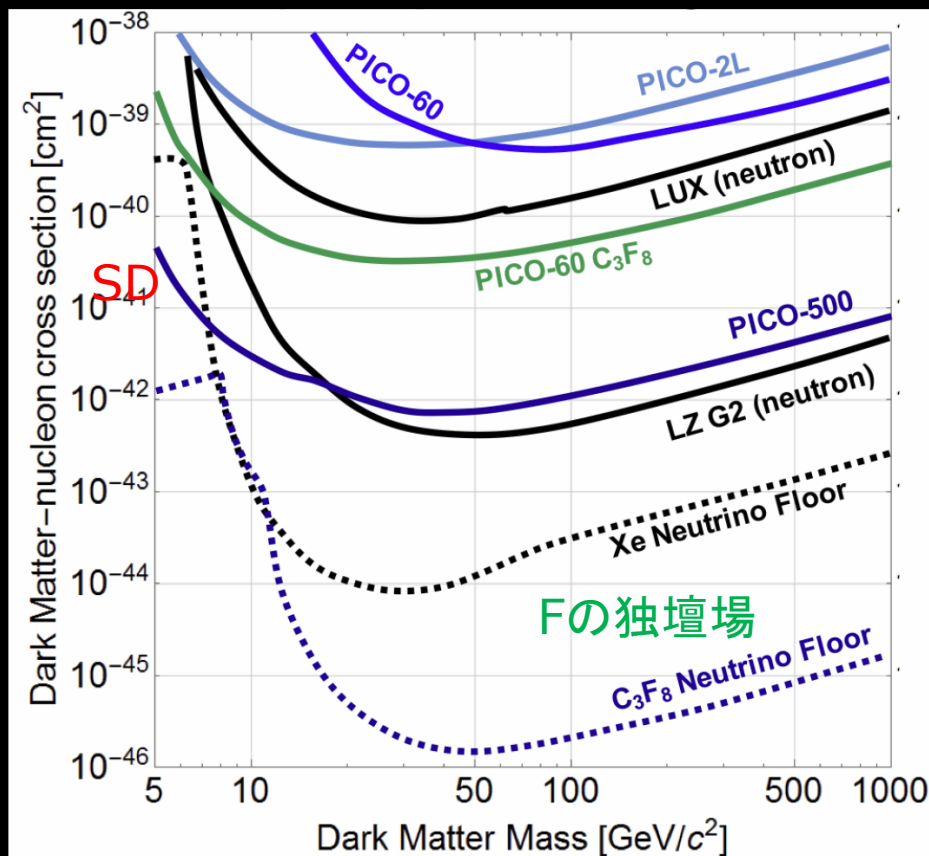


- 個人的見解：SDDはスペクトル見えない。スペクトルのとれるFの入った検出器はこの先有望。
- ガス ボロメータ 液体、、、

PICO Results and Future Plans

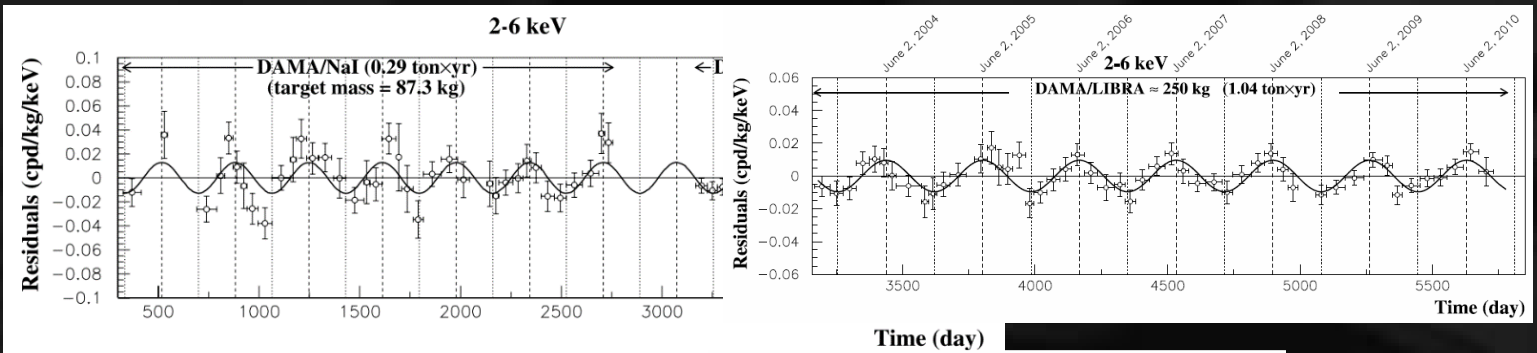
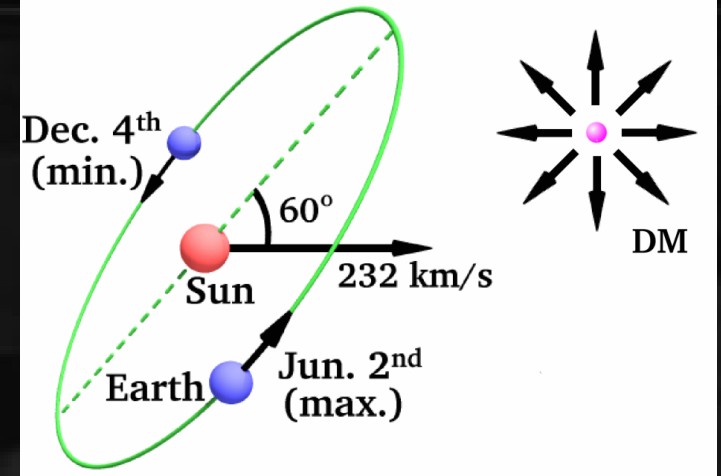
Hugh Lippincott, Fermilab
for the PICO Collaboration
EDU 2017

Scaling to PICO-500



忘れちゃいけないNaI

- DAMAにまつわるエトセトラ
- 250kgのNaIシンチレータ
- 1.33ton・年の観測
- 14サイクルの季節変動 (9.3 σ)



Eur. Phys. J. C (2008) 56: 333–355
DOI 10.1140/epjc/s10052-008-0662-y

Eur. Phys. J. C (2013) 73:2648

PRL 113, 081302 (2014)

PRL 114, 151301 (2015)

Eur. Phys. J. C (2014) 74:3196

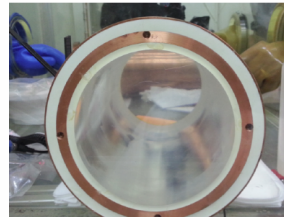
- 中性子、太陽ニュートリノなどでの説明が試みされた
⇒ 結局十分なモデルは構築されず。
- キセノンなどの実験では排除 ↔ NaI実験では未試験
- DAMAはまだ生きている。 今年か来年あと7年分ではずだが。。。

他のNaI実験

- DAMAの結晶は綺麗だった。
- COSINE、SABRE、ANAIS、PICOLON などが10年近くかけて開発

COSINE-100 NaI(Tl) Crystals

- 8 crystals, total 106 kg
- Culmination of R&D program with Alpha Spectra
- U/Th/K below DAMA, ^{210}Po very close
- Light yield ~ 15 p.e./keV
- Challenge: putting it all together
- Total Background: 2 - 4 x DAMA's avg.

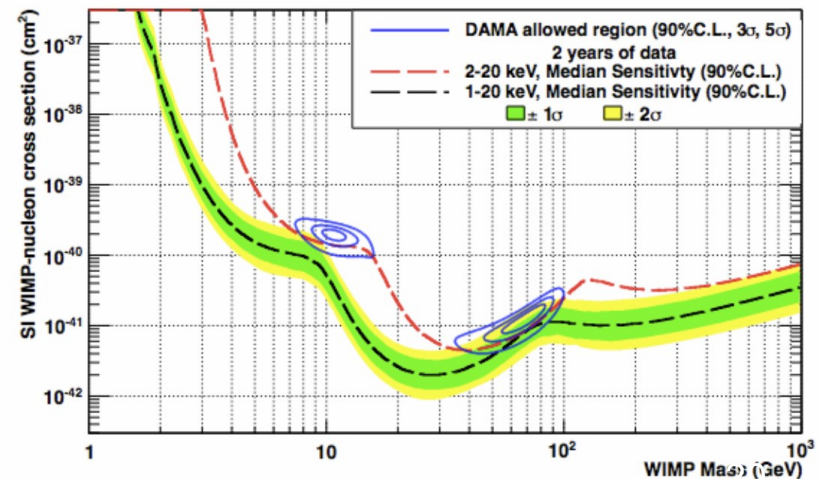


Preliminary

	Mass (kg)	Powder Type	^{40}K (ppb)	^{238}U (ppt)	^{232}Th (ppt)	^{210}Po (mBq/kg)	Light Yield (npe/keV)
Crystal 1	8.26	Powder B	34.74±4.74	<0.02	1.31±0.35	3.20±0.04	14.67±0.69
Crystal 2	9.15	Powder C	60.64±4.64	<0.12	<0.63	2.06±0.03	14.67±0.69
Crystal 3	9.16	WIMPScint-II	34.34±3.10	<0.04	0.44±0.19	0.76±0.02	14.67±0.69
Crystal 4	18.01	WIMPScint-II	33.32±3.50	<0.04	<0.3	0.74±0.02	14.67±0.69
Crystal 5	18.28	Powder C	82.33±5.49	<0.04	2.35±0.31	2.06±0.03	14.67±0.69
Crystal 6	12.5	WIMPScint-III	16.79±2.46	<0.018	0.56±0.19	1.52±0.02	14.67±0.69
Crystal 7	12.5	WIMPScint-III	18.69±2.79	<0.018	<0.6	1.54±0.02	14.67±0.69
Crystal 8	18.28	Powder C	54.25±3.82	<0.04	<0.9	2.05±0.02	14.67±0.69
DAMA			<20	0.7 - 10	0.5 - 7.5	<0.5	

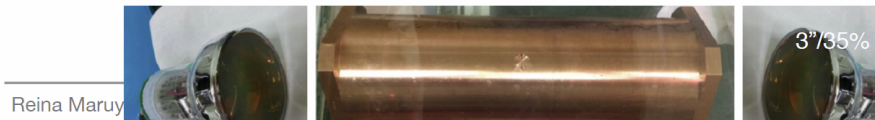
- COSINE running in YangYang(Korea)
- 2016秋～
- 来夏 結果を公表予定

Expected Sensitivity of COSINE-100



* Assumed 2 dru or 4 dru flat backgrounds depending on crystals.

Sensitivity comparable with DAMA's allowed region.



メッセージ
「その先」はすぐそこ

JEDIs, equipped with their WEAPONS,
are ready to attack the dark side.
JEDI: Japanese Experimental Dark matter Investigators

身内賢太郎
2013年秋学会シンポジウム

日本の戦略

CRCでは、現在検討中の将来計画についての検討を行い、研究者のコンセンサスを形成するためにタウンミーティングを開催してゆきます。
*なお、本タウンミーティングは、専門の研究者を対象としており、一般市民向けの講演会ではありません。

これからの開催

NEW!2017年度CRC将来計画タウンミーティング (通算第12回)

日時：2017年6月24日(土), 25日(日)
場所：東京大学 総合研究棟6F大会議室 (柏キャンパス)
(交通案内 [柏アクセスマップ](#))
[案内文](#)・[プログラム](#)

ダークマターの懇談会

2017年1月27, 28日
於：神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ

Information

- 趣旨
- 場所
- 参加登録
- 締め切りなど
- プログラム
- 世話人
- 連絡先

趣旨

世界的に感度向上が加速している暗黒物質の直接探索について、国内の暗黒物質探索についてこれまでを振り返り、将来(10年、20年くらい)について議論することを目的とします。その際に各プロジェクトのこれからの戦略を示していただき、議論を行い戦略の向上の可能性を探りたいと考えております。

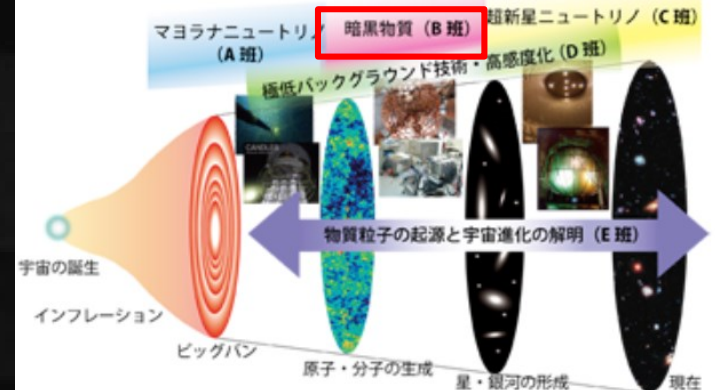
研究会形態

講演は世話人からの依頼を基本とし、単なる技術的な進捗報告ではなく、世話人からある程度お願いする内容(物理や戦略など)に基づいた報告としたいと思います。それらを踏まえて、議論の時間も十分と予定します。当事者間での厳しい議論を行うため、関係者に優先して連絡、登録を予定しております。

18トーク(含レビュー)

宇宙の歴史をひもとく 地下素粒子原子核研究

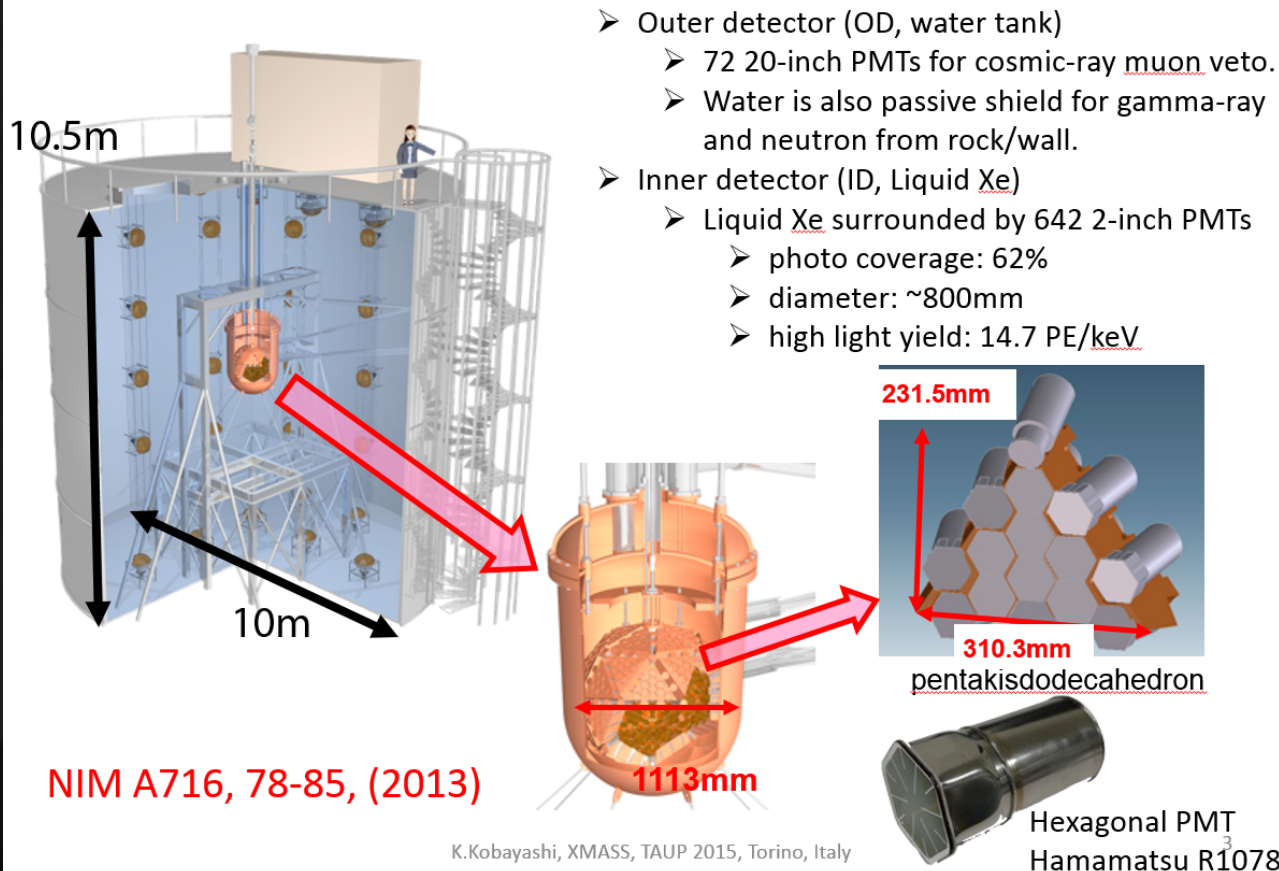
文部科学省研究費補助金 新学術領域 領域番号2603 (平成26年~30年度)



XMASS

- 液体キセノン 835kg 世界最大
- 1 相式 電子散乱事象にも感度
- DAMAと同等の観測量

XMASS detector



XMASS : 特徴を生かした物理結果

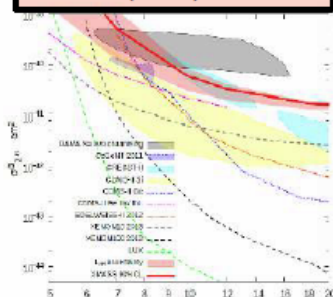
森山茂栄

CRCタウンミーティング(2017年6月)

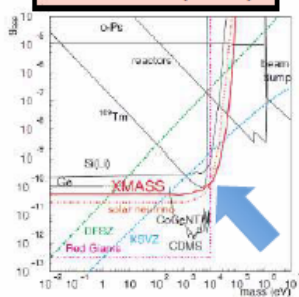
XMASSがもたらし、開拓した物理

Takeda@XeSAT2017

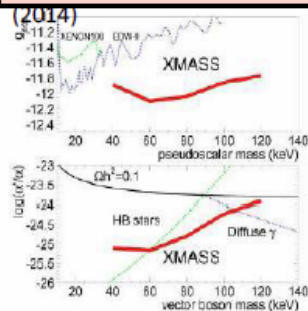
Low mass WIMPs search, PLB 719 (2013) 78



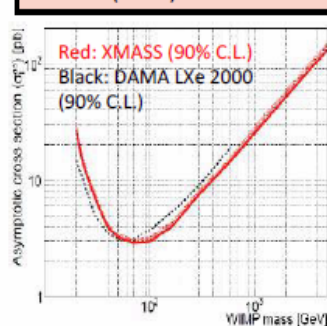
Solar axion search, PLB 724 46 (2013)



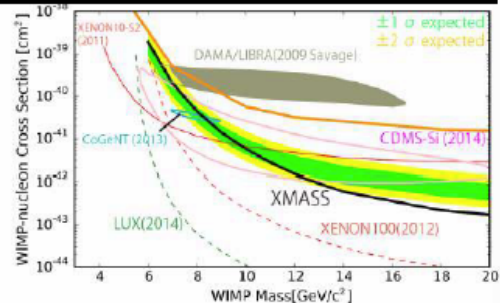
Bosonic super-WIMPs search, PRL 113, 121301 (2014)



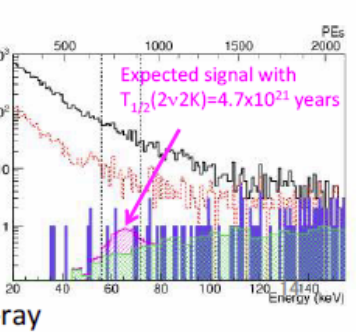
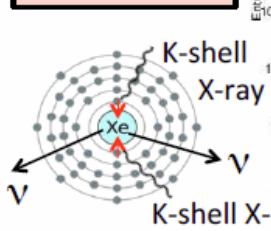
Inelastic WIMP nucleus scattering search, PTEP 063C01 (2014)



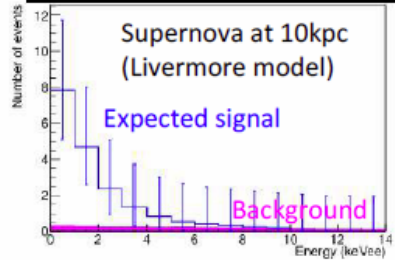
Annual modulation, PLB 759 (2016) 272



Search for 2ν 2EC on 124Xe, 126Xe PLB 759 (2016) 64



Possibility of supernova neutrino detection, Astropart. Phys. 89 (2017) 51



DAMAの検証、非弾性散乱、太陽アクシオン、電子を反跳する暗黒物質、二重電子捕獲、超新星バースト、、WIMP探索

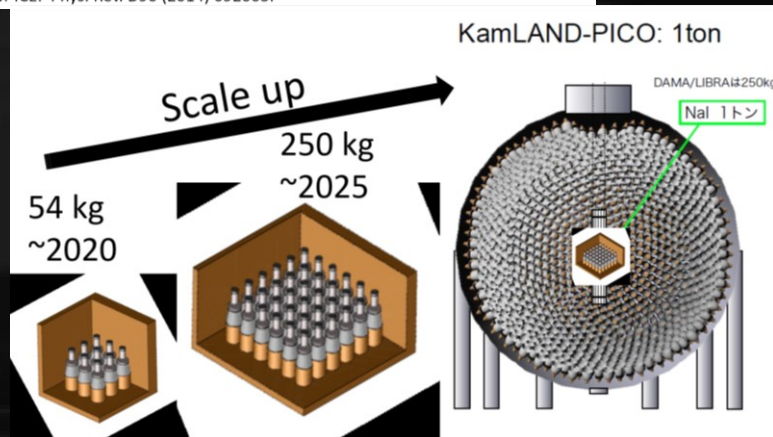
PICO-LON

- NaIによるDAMA追試
- 国内の技術で純度の高い結晶製作
- 小型結晶で地下でBG測定
→ 大型結晶で季節変動
- 将来) 「非弾性散乱」という特徴的な信号

現状1: Purity of NaI(Tl) 伏見 ダークマターの懇談会2017

	DAMA	DM-Ice	Ingot 26~37 (2016)	Goal of PICO-LON	
natK (ppb)	<20	660	~80	<20	☹️
²³² Th (ppt)	0.5-0.7	2.5	0.3±0.5	<4	😊
²³⁸ U (ppt)	0.7-10	1.4	4.7±0.3	<10	😊
²¹⁰ Pb (μBq/kg)	5-30	1470	29.4±6.6	<5	😊

- U-chain: 1ppt= 12.3μBq/kg
 - Th-chain: 1ppt= 4.0μBq/kg
 - ²¹⁰Pb: 1ppt=2.5kBq/kg
- DAMA: NIM A592 (2008) 297.
DM-ICE: Phys. Rev. D90 (2014) 092005.

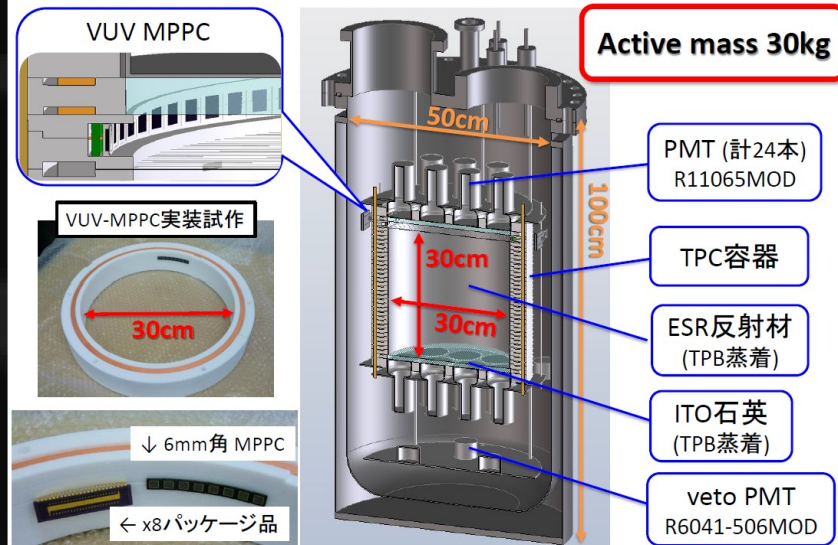


ANKOK

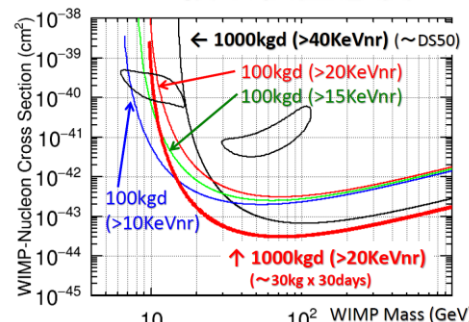
- 2層式液体アルゴン
- 低質量WIMP領域をアルゴンで初探索を目指す

寄田 ダークマターの懇談会2017

本検出器の構築状況



DAMA領域検証感度

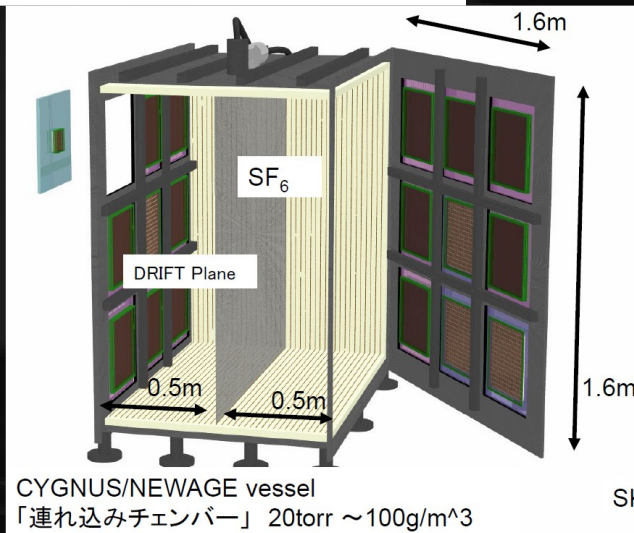
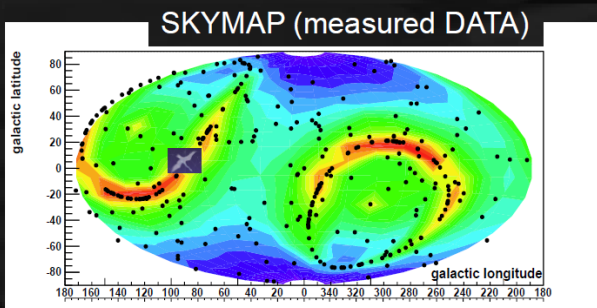


★ Fiducial制限 → 低閾値化の実現 (z方向~1mm以下、XY平面VUV-MPPC)

NEWAGE

- ガスによる方向感度探索
- リアルタイム検出器
- 質量が少ない
- @神岡 方向感度探索で世界を牽引
- 低BG化

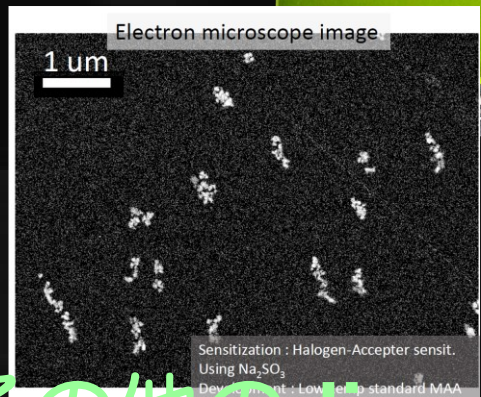
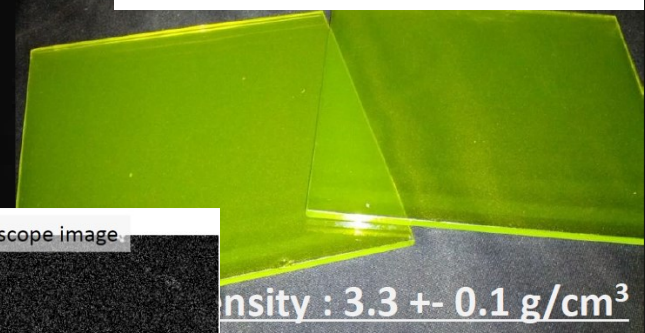
将来)暗黒物質の性質
(銀河中での運動・物質との反応)解明 への展開



NEWdm (emulsion)

- 原子核乾板による方向感度探索
- 大質量化が可能
- 時間情報がない
- グランサッソで予備実験開始
- 低BG化

中 ダークマターの懇談会2017



ensity : 3.3 +/- 0.1 g/cm³

その他のdirectionalな
R&Dも世界を牽引

展望・まとめ

2, 3年で:

- XENON1t → ^8B neutrino shoulder
- “thresldino!?”

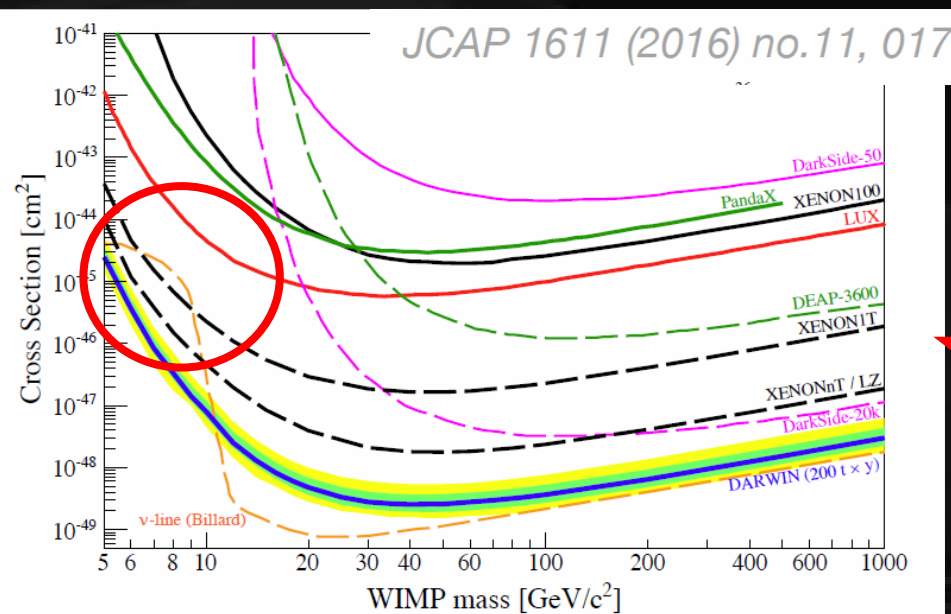
J. Hisano
K. Ishiwata
N. Nagata
1504.00915

5年程度:

- XENON nT, LZ “WINO-DM” $\sim 10^{-47} \text{cm}^2 3 \text{TeV}$

10年程度:

- DARWIN → atmospheric neutrino floor
- (主観に満ちたキーワード) : F、方向感度



SD

