

暗黒物質直接探索の展望

東京大学宇宙線研究所
森山茂栄

2011年7月29日

高エネルギー将来計画小委員会
タウンミーティング@IPMU柏

暗黒物質直接探索の重要性、現状
国内実験のサーベイ・大型実験の将来計画

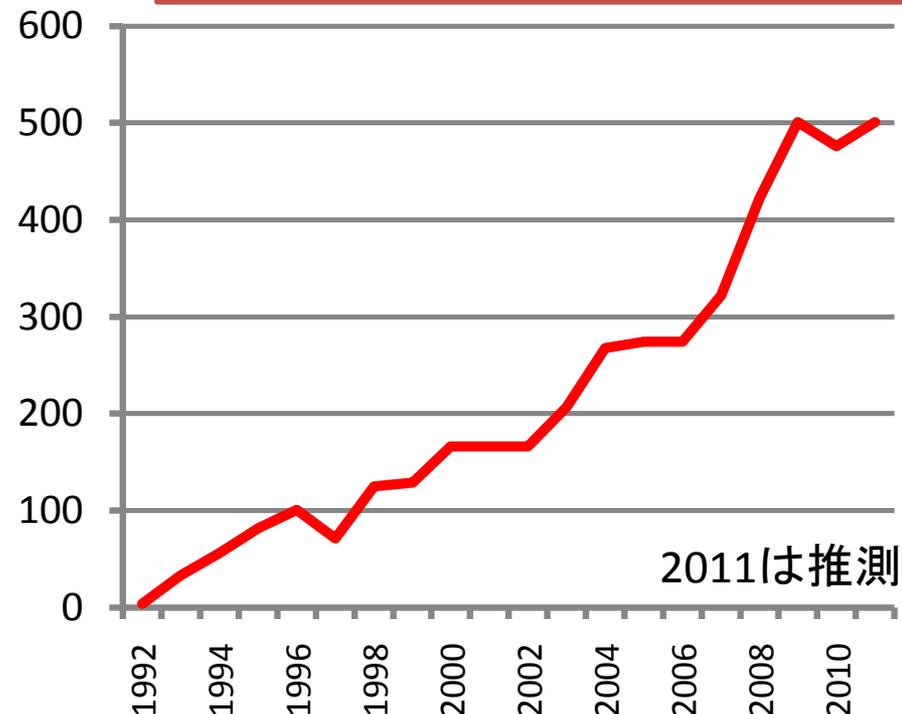


暗黒物質直接探索の重要性と役割

- 重力相互作用の影響に基づく観測から、存在が確実。未知の素粒子以外の解は縮んできた。
 - 「量」と「冷たい性質」についてはコンセンサス有
 - 「動機づけ」のある素粒子？

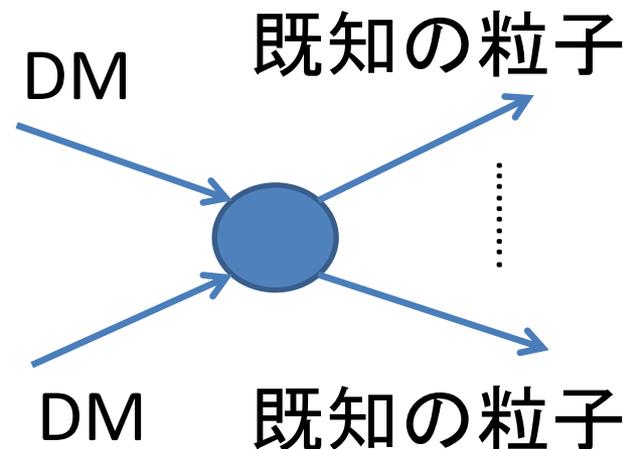
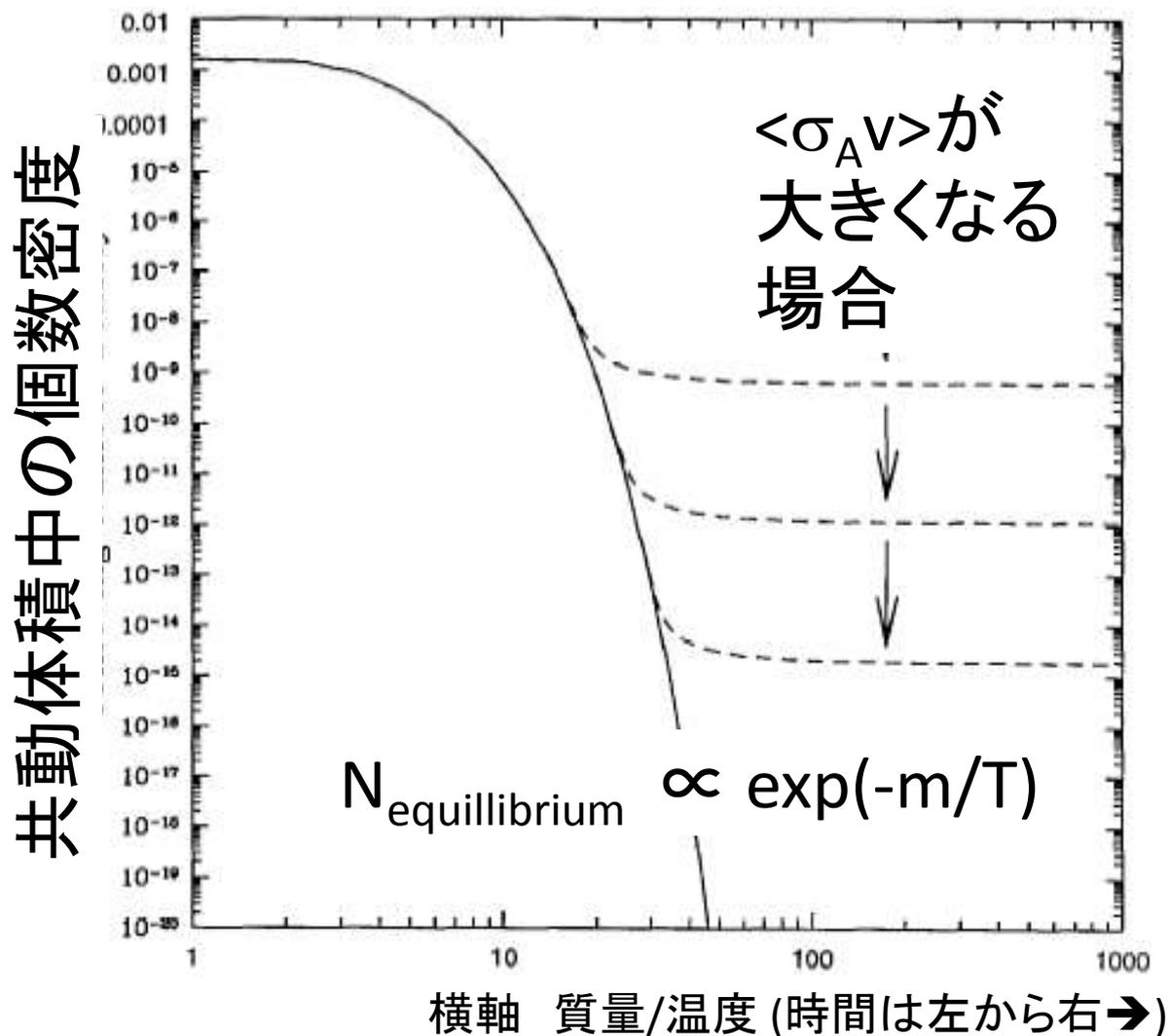
- 素粒子物理学的に「発見」できる可能性。その性質を解明するには、コントロールできる実験室の標的との相互作用を見るのが適切

arXiv:astro-phのタイトルに“dark matter”とある論文数



発生時期と相互作用の結びつき

- 宇宙初期、熱的に作られた場合



現在の暗黒物質の量を説明するには、(対)消滅し、あるところで一定になることが必要
→ 既知粒子との相互作用が予言

Nuclear recoil実験の端緒

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 31, NUMBER 12

15 JUNE 1985

Detectability of certain dark-matter candidates

Mark W. Goodman and Edward Witten

Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

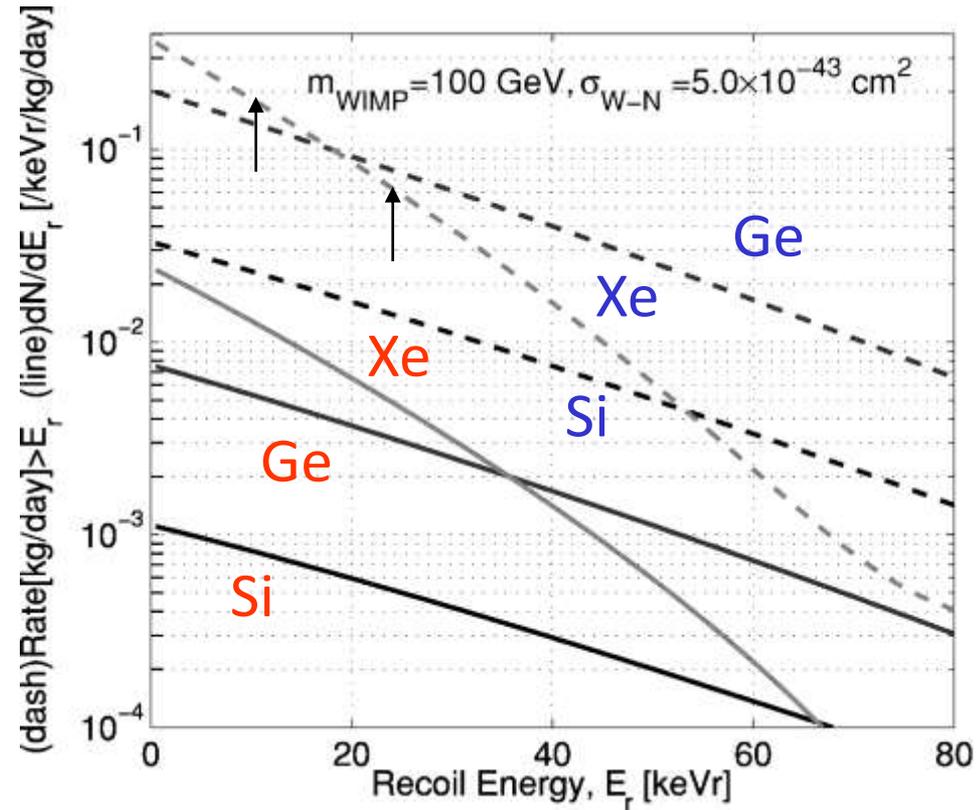
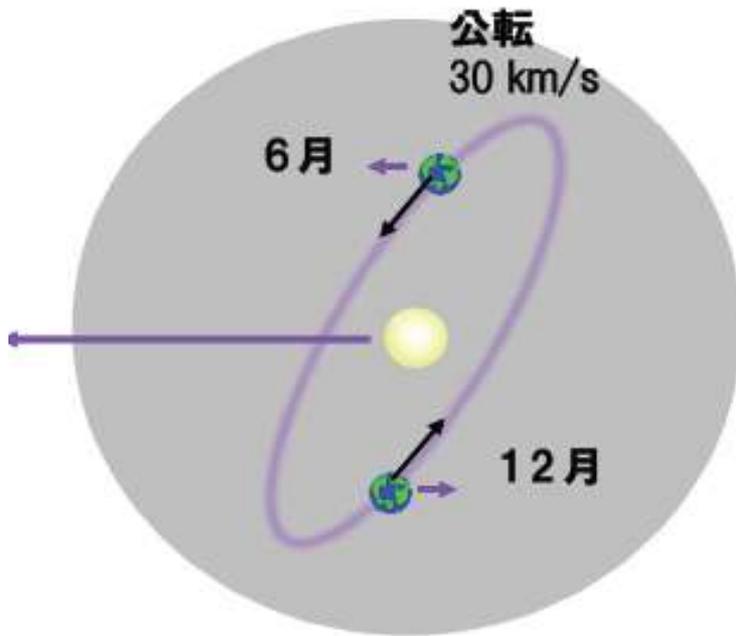
(Received 7 January 1985)

We consider the possibility that the neutral-current neutrino detector recently proposed by Drukier and Stodolsky could be used to detect some possible candidates for the dark matter in galactic halos. This may be feasible if the galactic halos are made of particles with coherent weak interactions and masses $1-10^6$ GeV; particles with spin-dependent interactions of typical weak strength and masses $1-10^2$ GeV; or strongly interacting particles of masses $1-10^{13}$ GeV.

- 1985年、ニュートリノの中性カレントを測定する検出器が提案されていたが、それを応用して暗黒物質を検出しようとの提案。
- 質量範囲、相互作用についても議論。
- 超対称性粒子であろうとなかろうと、感度の範囲内の相互作用があれば探せる。

暗黒物質の信号とその特徴

- 低エネルギー、指数関数的スペクトル
- 季節変動、方向偏り



Red: differential, Blue: integrated

R.J.Gaitskell, Ann. Rev. Part. Sci., 54 (2004) 315.

- SI/SD
- 「発見」の主張にはバックグラウンドを正しく理解することが必要とされる。

信号が？

- DAMA/NaI+DAMA/LIBRA:
13年, 1.17t y, 8.9σ の季節変動

中性子の影響？CR後のルミネッセンス？

- CRESSTII (CaWO₄):
酸素のバンド
50事象のうち39%が信号？

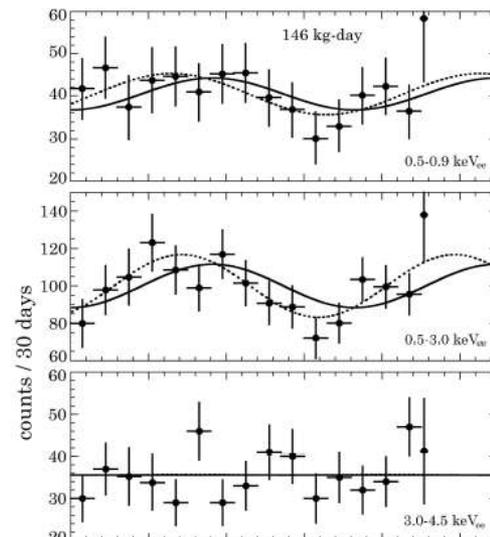
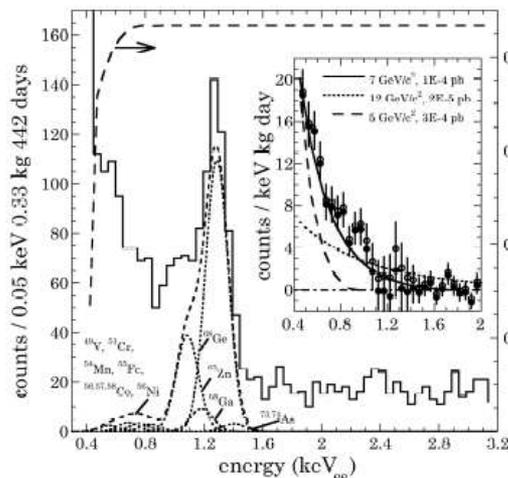
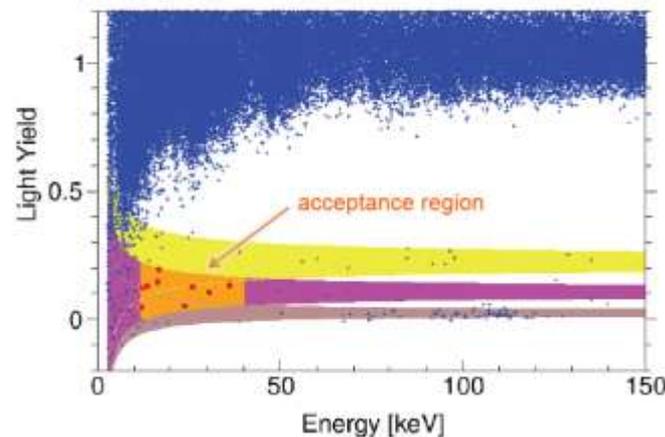
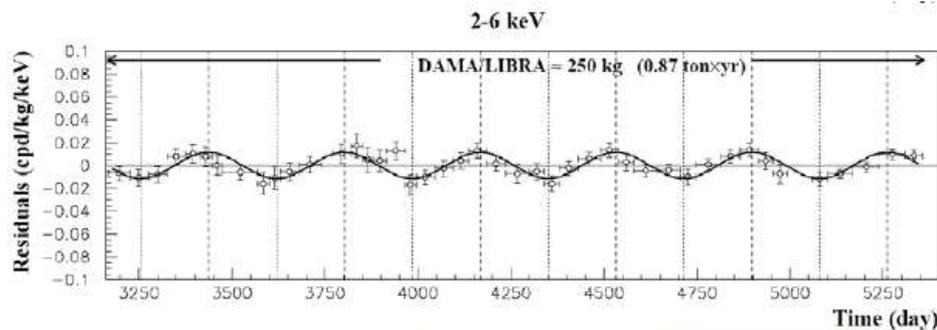
9月のTAUP2011で論文を出す

- CoGeNT(Ge):
説明できないexp的信号
僅かに(2.8σ)季節変動

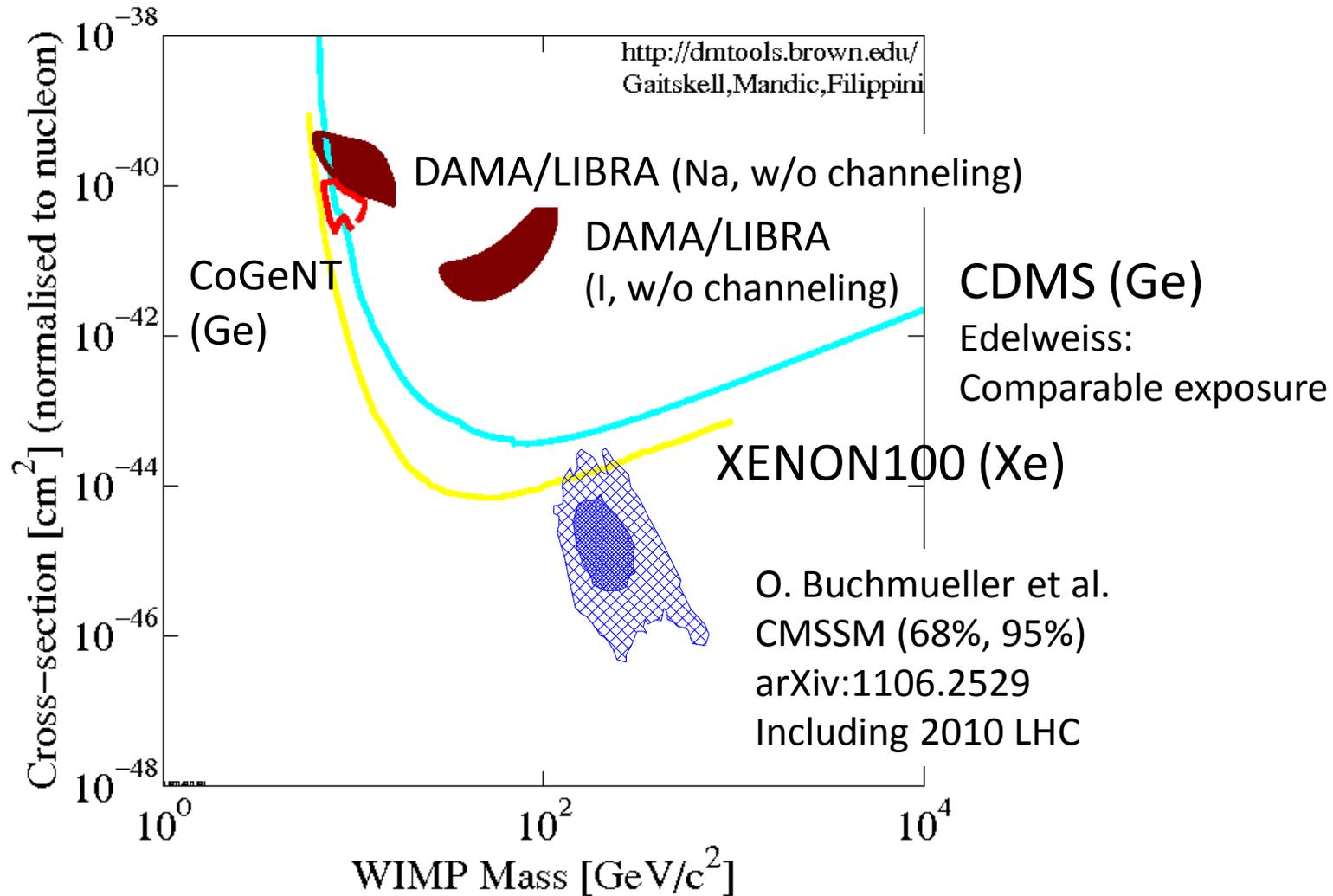
表面バックグラウンドのしみ込み？
中性子？

否定的な結果との論争

全てを軽いDMで説明？



探索の現状 (Spin independentの代表選手たち)



- 候補の一つである超対称性の領域に手が届く。

Nuclear recoilを見る4つの技術

希ガス液体 大型化に有利

半導体、
光学結晶



CoGeNT (Ge)



DAMA (NaI)



ZEPLIN



CDMS(Ge)

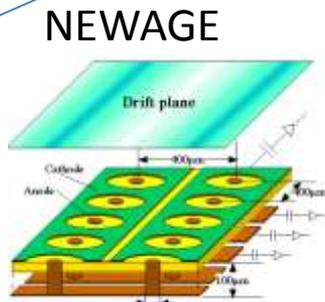


PICO-LON
(+KamLAND?)

DRIFT



WArP



NEWAGE

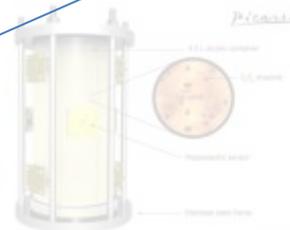
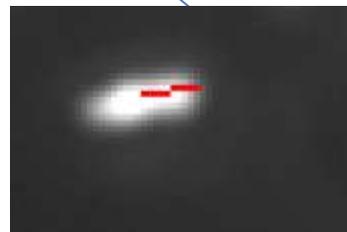
XMASS



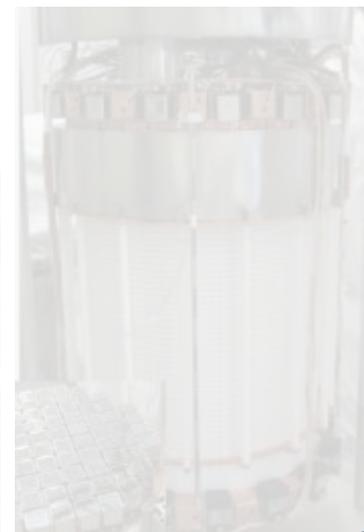
(c) 東京大学宇宙線研究所 宇宙宇宙素粒子研究施設

飛跡

NIT



Picasso



XENON100

バブル



COUPP

国内で行っている実験の方向性

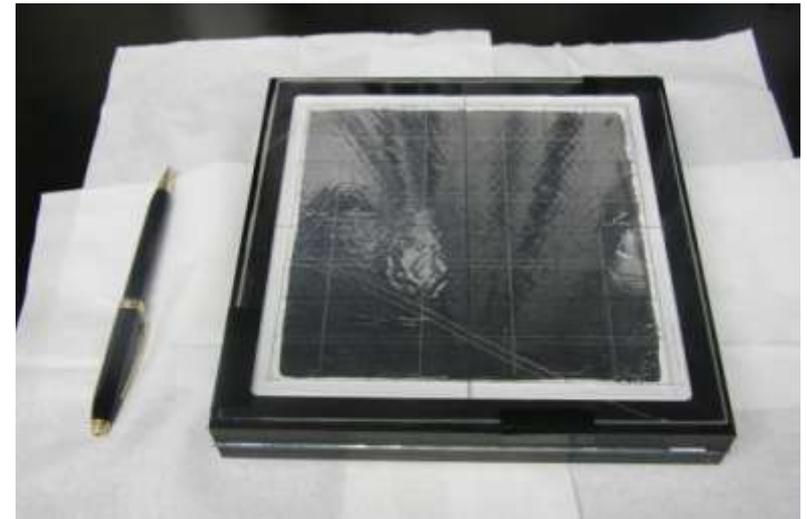
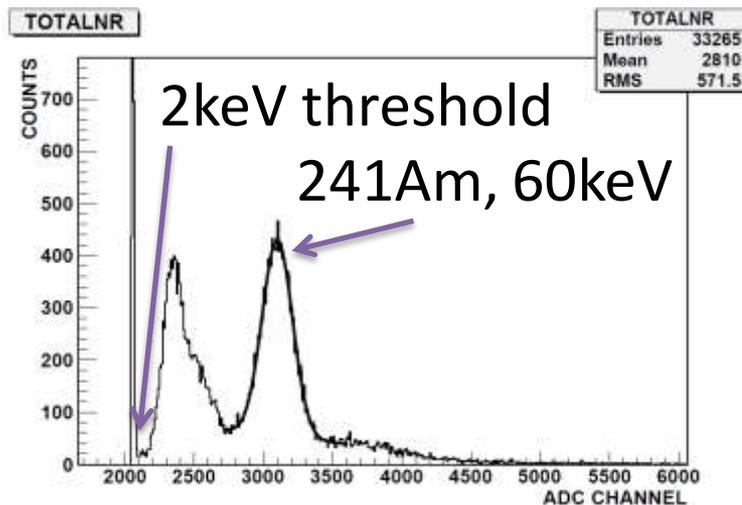
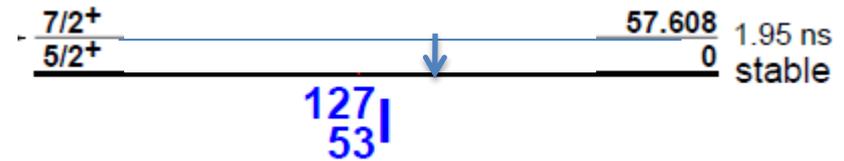
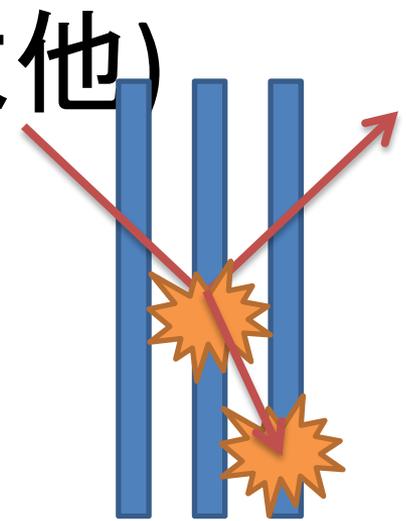
- XMASS: 大型ターゲットで一気に証拠をつかみたい。季節変動。同位体依存性。
→ まずは発見が必要。第一ステップ。力を注ぐべき。
- NEWAGE、NIT: 方向をとらせることにより季節変動とは異なるsystematicを持つ証拠も得たい。
→ 独自の発見＋大型の発見を掘り下げる準備を後押し。
- PICO-LON (+KamLAND): 原子核の励起を利用した高感度化。DAMAと同じNaI(Tl)で検証
→ 別手法によるアプローチ＋DAMAの検証は必須。
- 他実験の転用(CANDLES等)

現在までの規模は科研費レベル。世界的にも多種多様。騒がれている「軽いDM」へは、それぞれ工夫を検討。

個々の実験の状況と展望

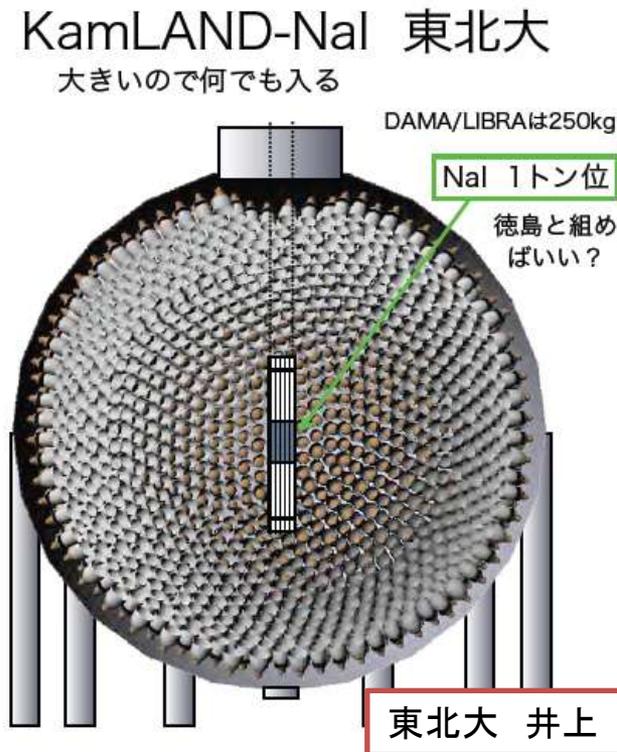
PICO-LON (NaI(Tl), 徳島大他)

- 原子核の非弾性散乱の後のガンマ線を検出し、同時計測を行いバックグラウンドを減らす。大型化とは別の切り口で攻める。
- 1mm以下の薄いNaI(Tl)を脇から読む
- エネルギー閾値 = 2keV, 内部BGも低減
 - DAMA/LIBRAと同程度
 - CoGeNTの質量領域の探索可
- ^{210}Pb は1/100必要。K除去は検討中。実証試験の後拡張。



PICO-LON 応用編

- DAMAのNaI(Tl)のバックグラウンドは、内部放射能が原因だが世界一綺麗。Exclusive contractを結んでいる。
- 徳島大は、阪大のELEGANTSからの経験で、より綺麗なNaI(Tl)を作れるかもしれない。内部RIと敷居値。

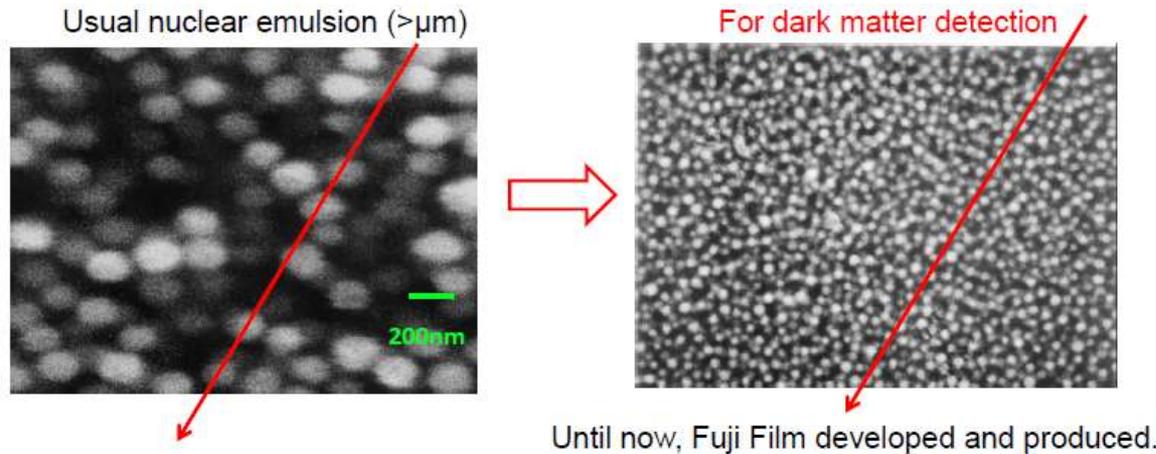


	U (ppt)	Th (ppt)	K (ppb)
DAMA	0.5-7.5	0.7-10	<20
PICO-LON	1.0+/-0.3	~0.6	?

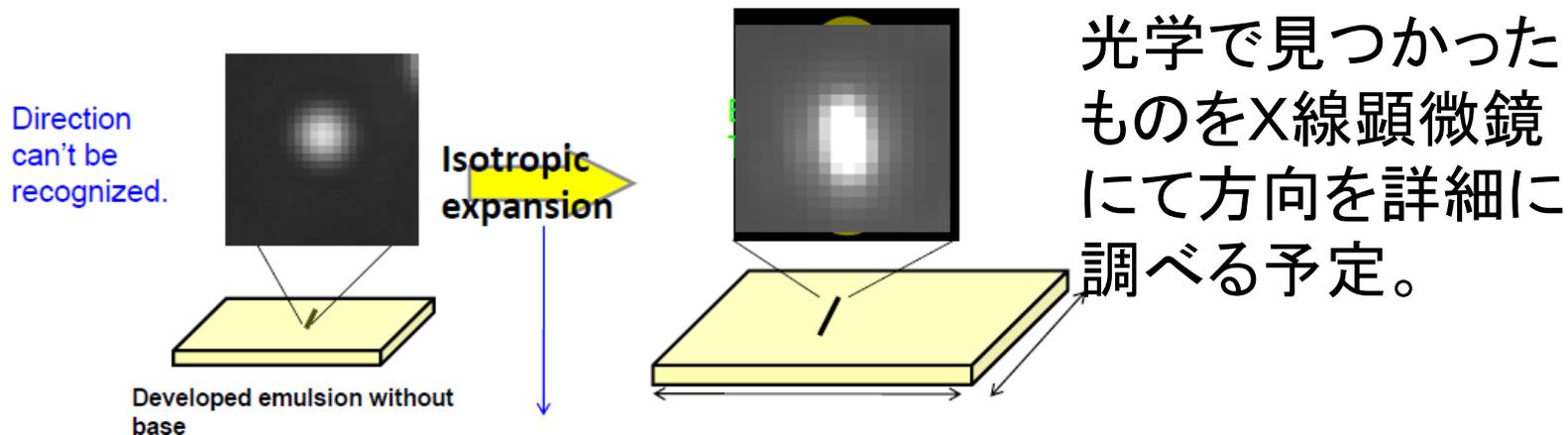
- 東北大と協力してDAMAの検証を行う可能性もあり。

Nano Imaging Tracker (Ag, Br, 名古屋大他)

- 原子核乾板中のAg, Brの反跳方向を見る。
- 400nm以下の飛跡を見るため粒を小さくした。

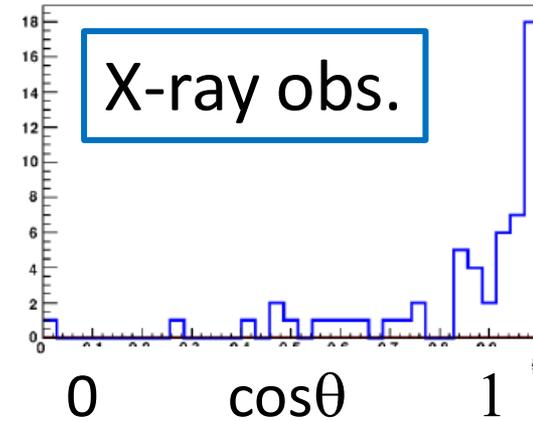
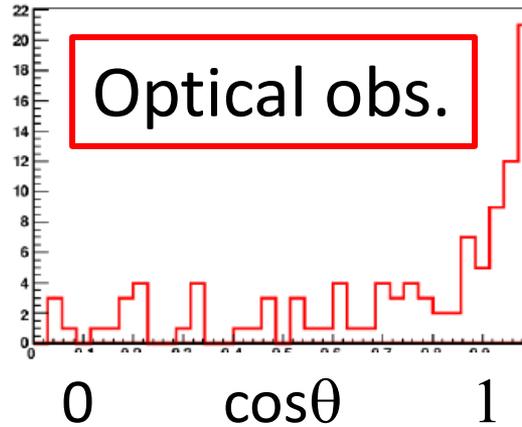


- さらに光学読み出しができるように膨張させる。

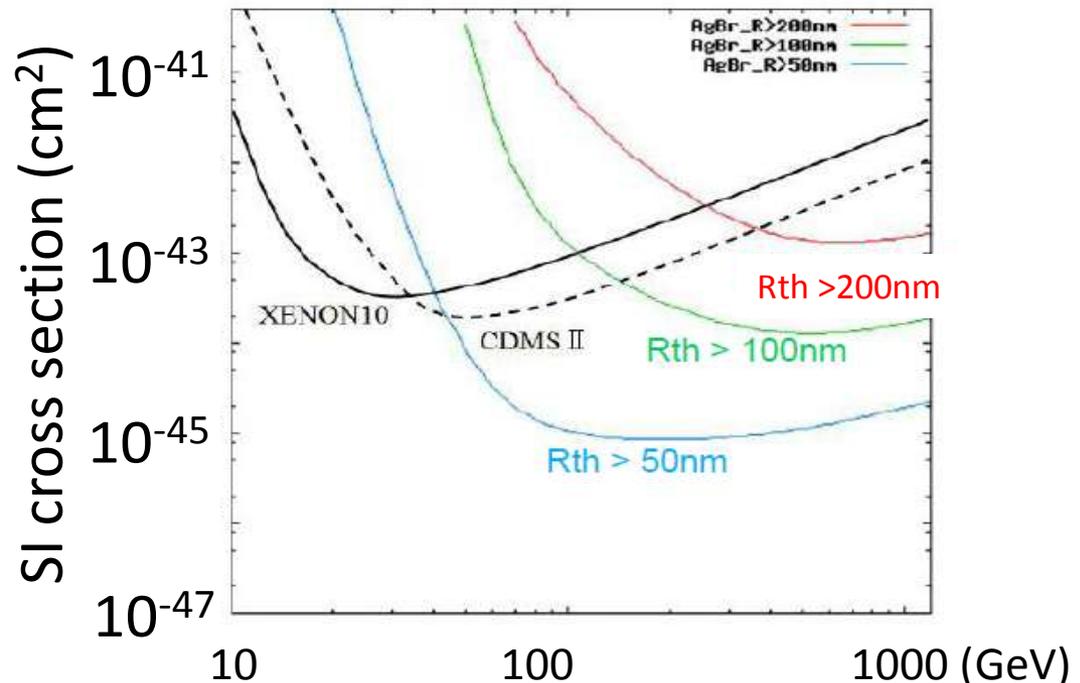


中性子照射による確認実験

- 14.8MeVの中性子を照射。光学読み出しをX線読み出しで詳しく調査した。
- 150nm以上のトラックは光学読み出しでも認識されていた。
- BGがコントロールできれば感度の高い実験が可能。



AgBr, 1000kg year, no BG, 90% C.L.



NEWAGE (CF₄, 京都大学他)

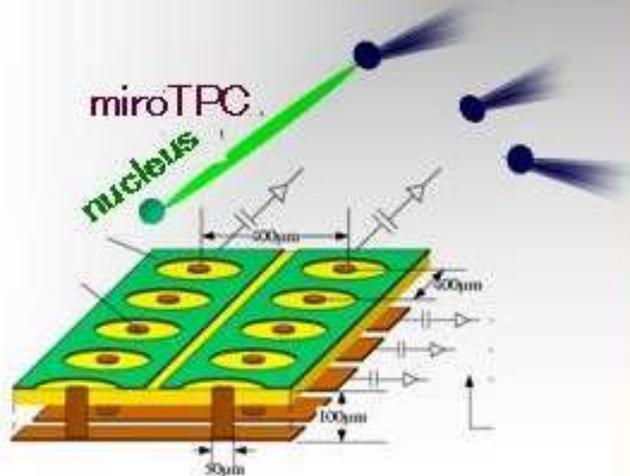
(New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)



SOLAR SYSTEM
220 km/s

WIMP
 $V_0 = 230 \text{ km/s}$

@EARTH "WIND" of WIMPs



The WIMP-wind

目的：

方向に感度を持つ
暗黒物質検出

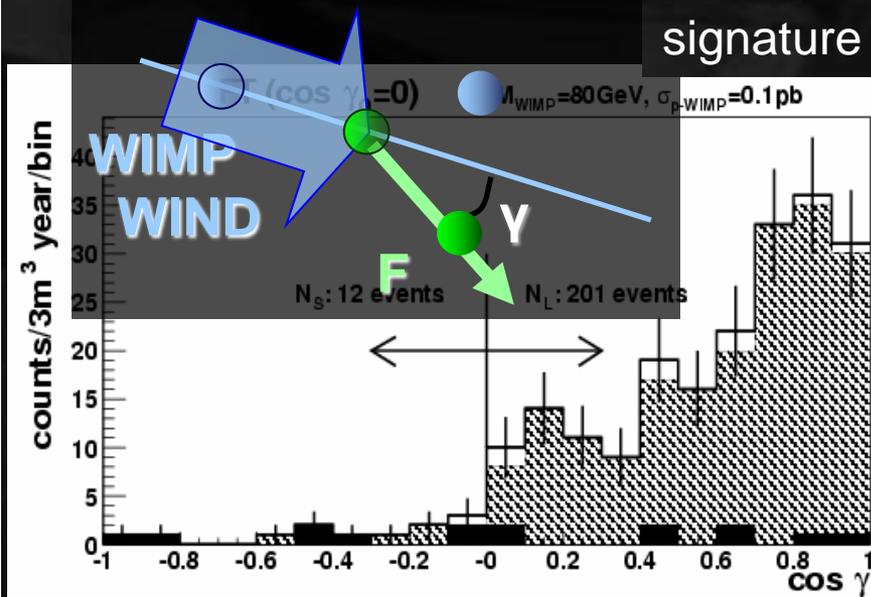
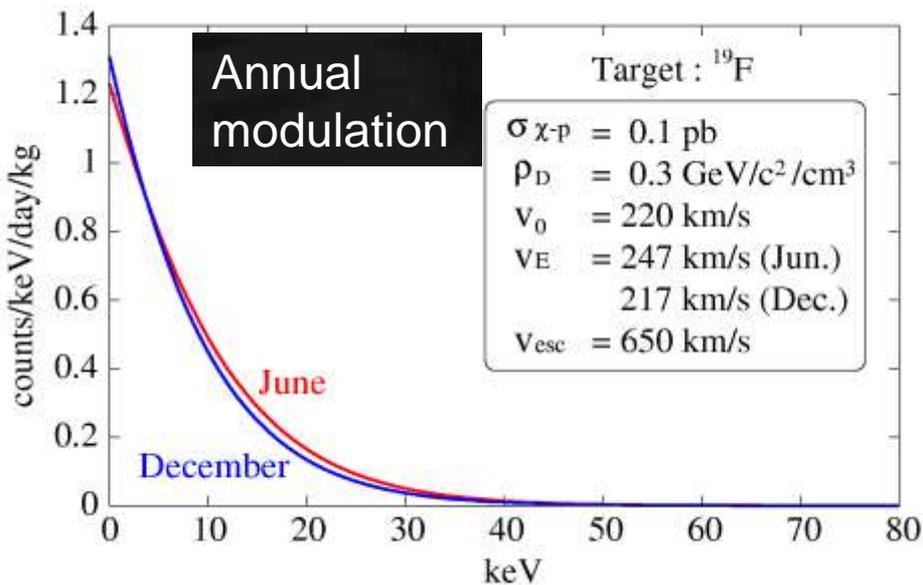
Direction Sensitive
WIMP-search
NEWAGE

「方向有感」のメリット

- 制限を更新：大質量検出器が有利
- 季節変化を検出する為には $O(10^4)$ 事象以上必要

● **方向有感** ⇒ **$O(10)$ 事象程度で検出**
約3桁の質量 に匹敵する情報

direction-sensitive signature



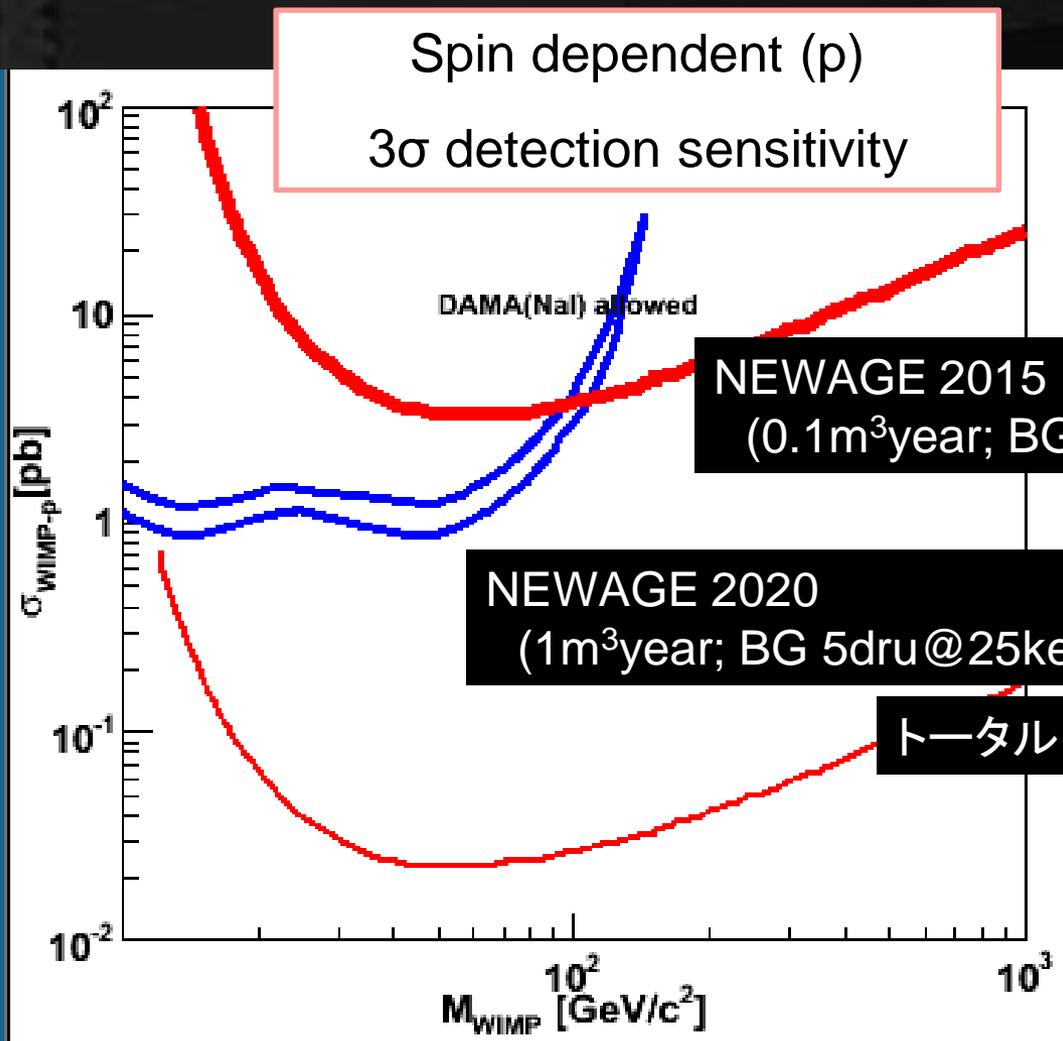
NEWAGE future

Current result: $(30\text{cm})^3=0.03\text{m}^3$, $E_{\text{th}}=100\text{keV}$

target mass=11.5g
 BG:50/keV/d/kg@ E_{th} ,

(DAMA ~1/keV/d/kg @ 2keV)

→ $\sigma < 5400\text{pb}$



NEWAGE 2015
 (0.1m³year; BG 20dru@35keV)

トータル 1億円

NEWAGE 2020
 (1m³year; BG 5dru@25keV)

トータル 数億円

急務：BGの低減
 敷居値低減
 質量の増大
 核の自由度



XMASS (xenon)

東大、神戸、東海、岐阜、横国、宮城教育大、名大、Sejong, KRISS



● XMASS

- ◎ **XENON MASSIVE DETECTOR FOR SOLAR NEUTRINO** (PP/7Be)
- ◎ **XENON NEUTRINO MASS DETECTOR** (DOUBLE BETA DECAY)
- ◎ **XENON DETECTOR FOR WEAKLY INTERACTING MASSIVE PARTICLES**
(DM SEARCH)

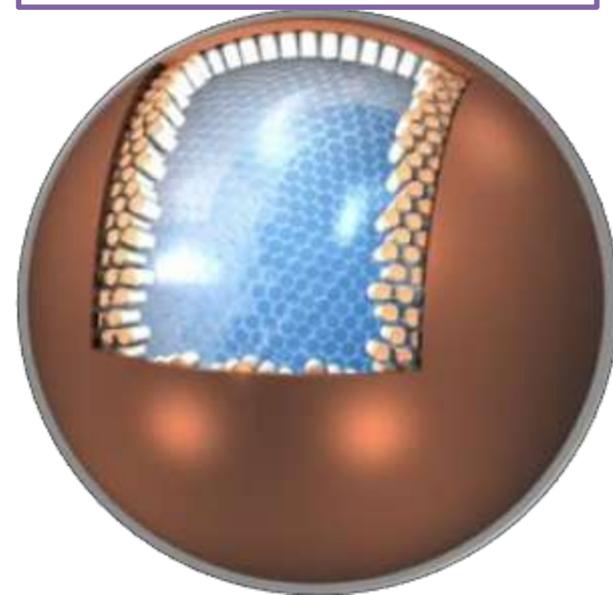
100kg FV (800kg)
0.8m, **DM**
最初のフェーズ
XMASS-I

10ton FV, 2.5m
Solar ν , $0\nu\beta\beta$, DM
目標の測定器
XMASS-II

- スケーラビリティと低バックグラウンドを兼ね備える標的: 液体キセノン

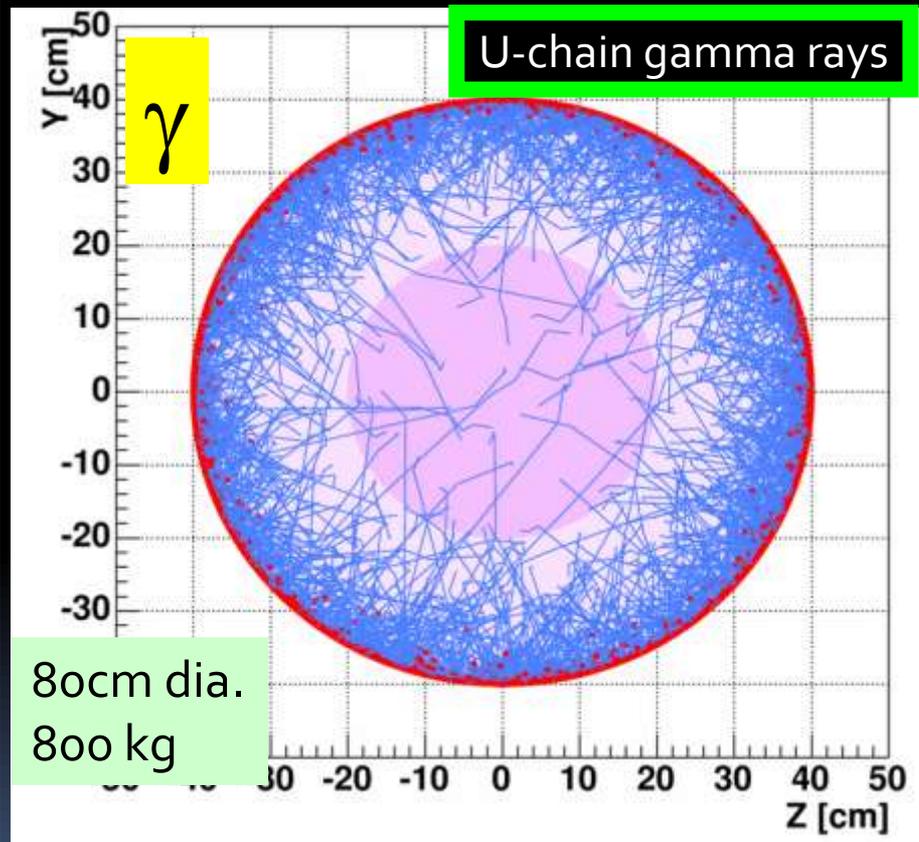
Y. Suzuki, hep-ph/0008296

- 最初のプロトタイプとして100kg FVの装置をくみ上げた。



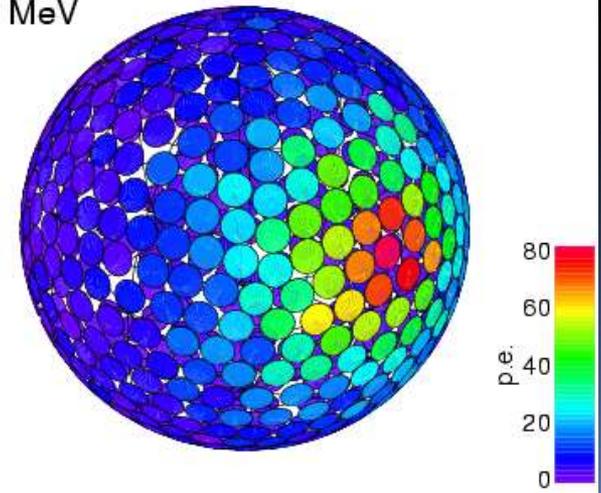
大型化と低バックグラウンド化の両立

- Zの大きなキセノンにて、外来放射線を自己遮蔽。
- 発光量が多く (~NaI(Tl)) マイナス100度で 3g/cm^3 の液体



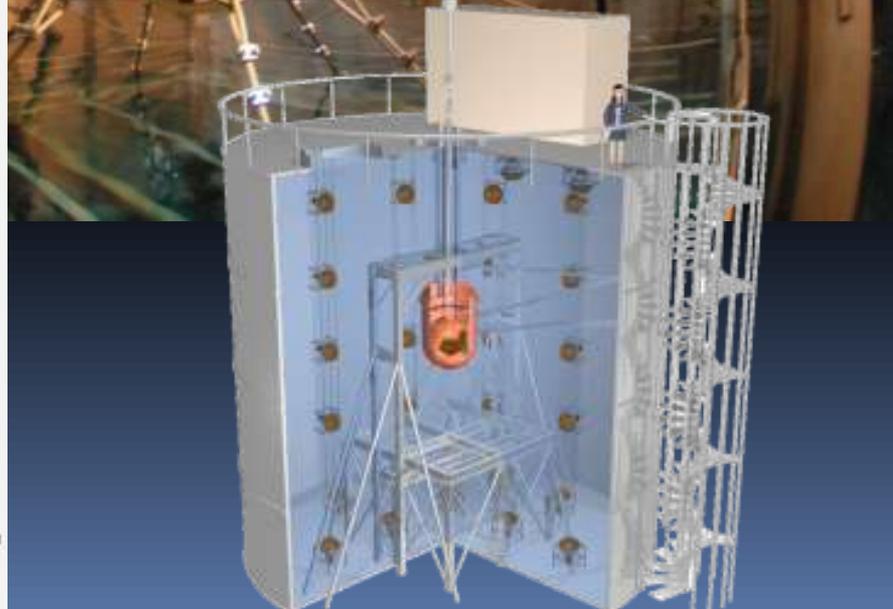
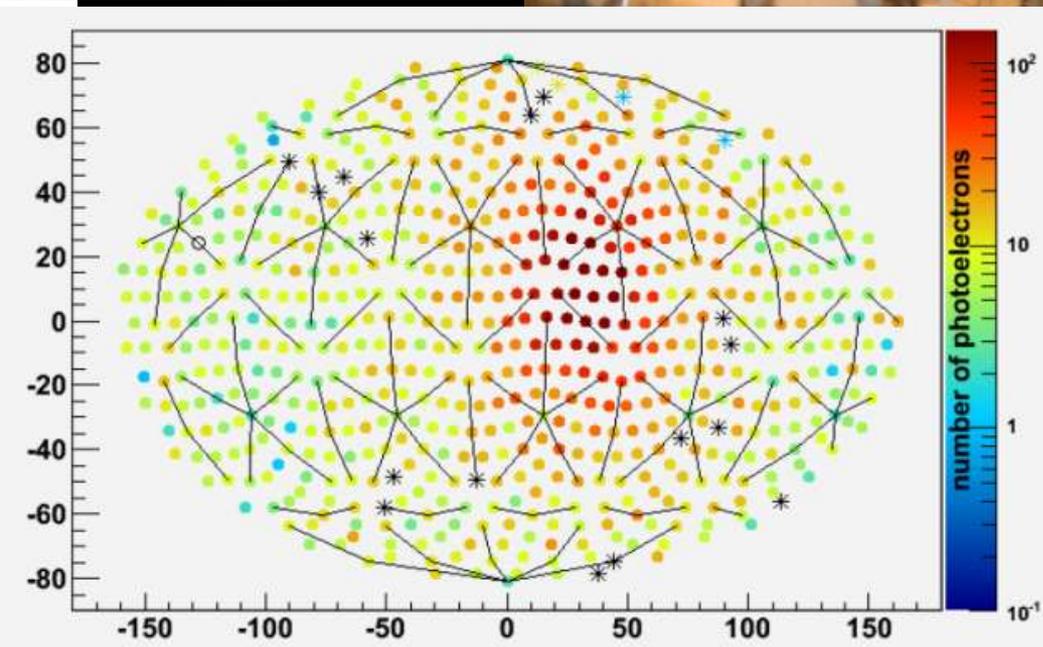
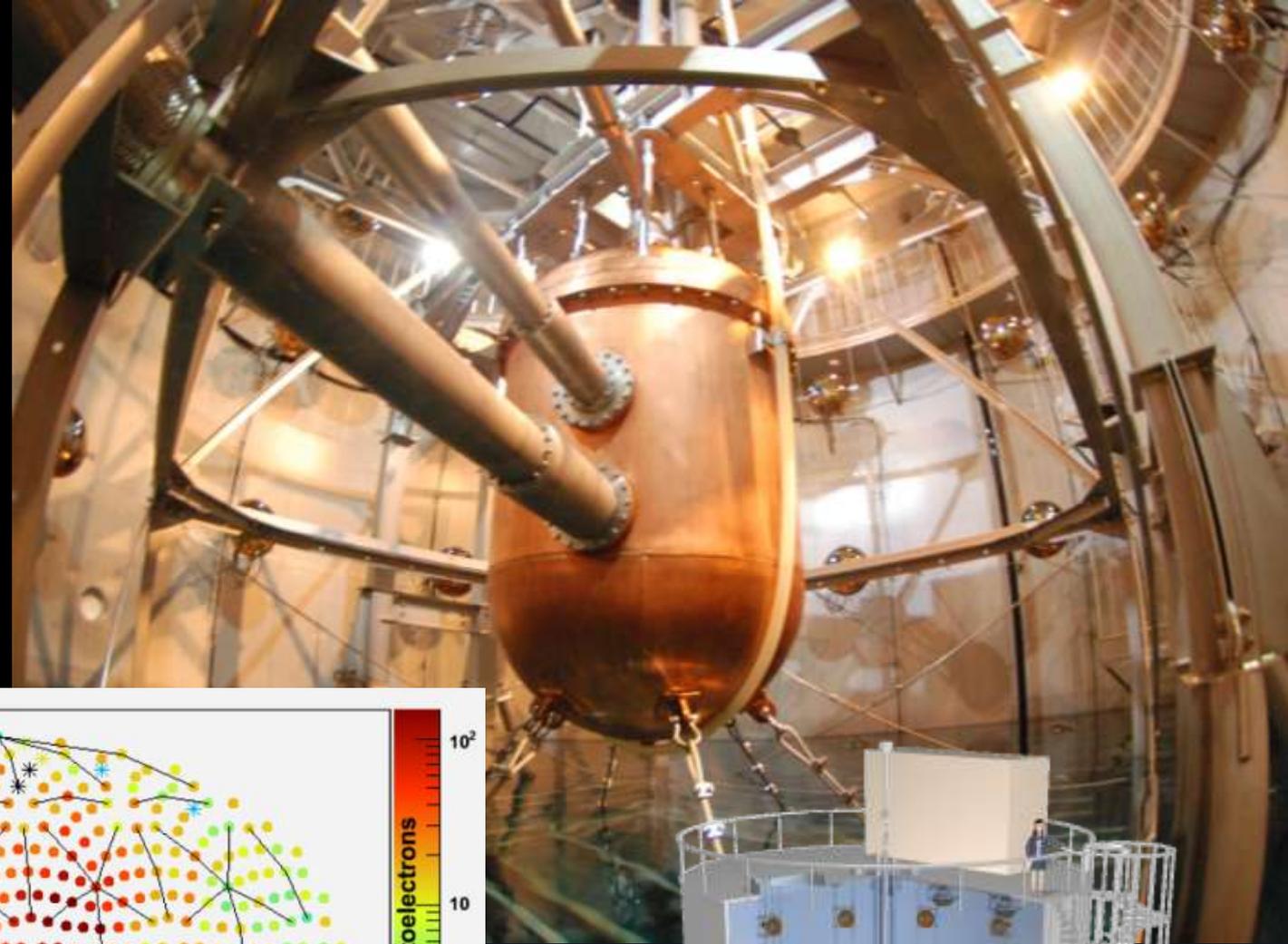
- 中心部の事象を選び出すことにより、BGの低減が可能。
- 大型化により外部由来放射線を強く低減できる。

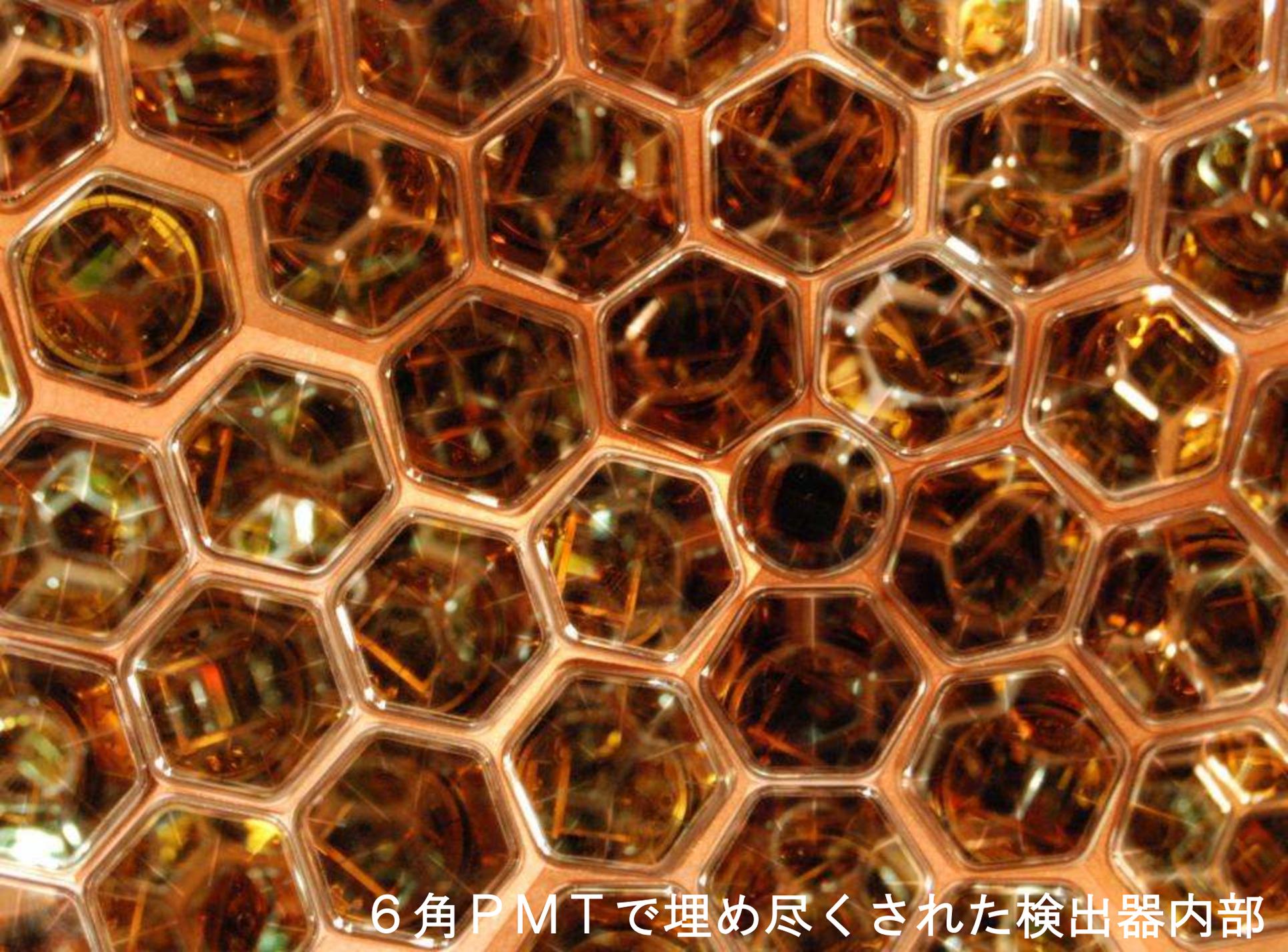
Pos: (20.0, -10.0, 10.0)
E: 1.00 MeV





(C) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設





六角PMTで埋め尽くされた検出器内部

XMASS-Iでのコミッショニングラン

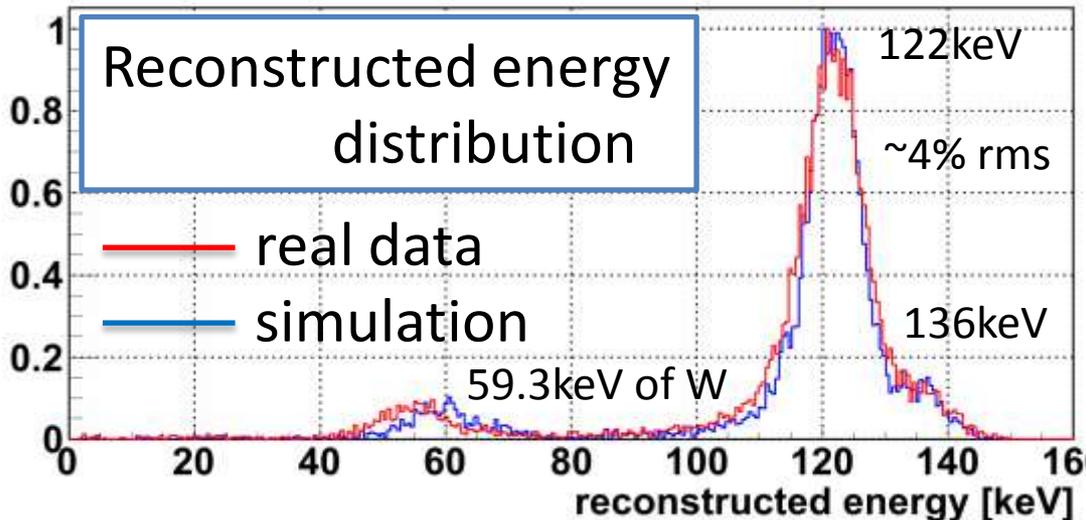
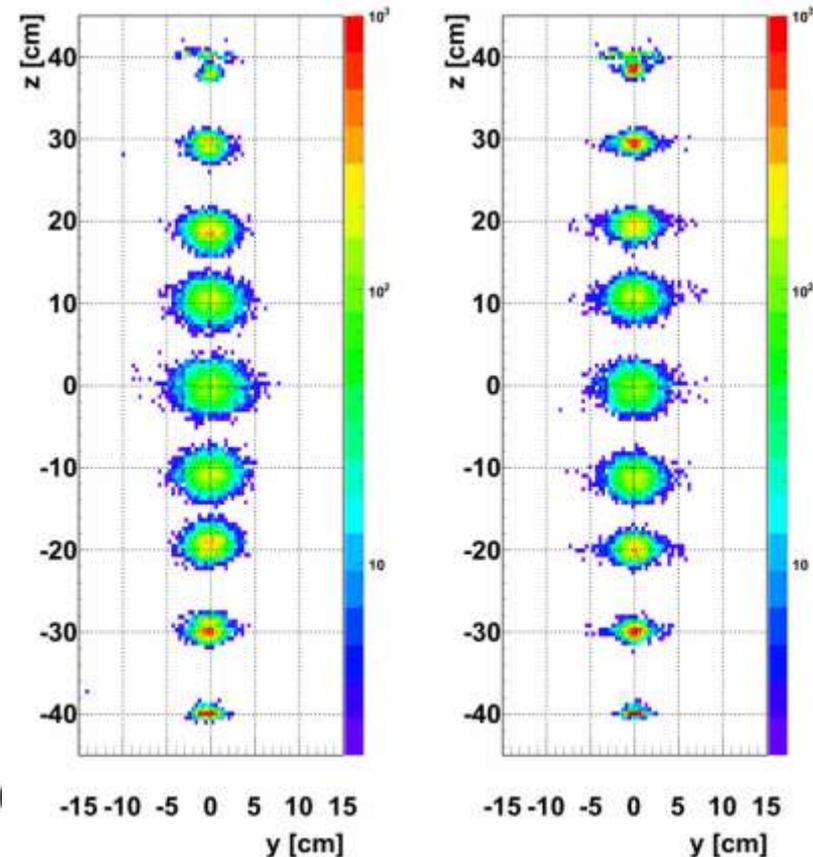
- 2010年の冬に建設完了。
- キセノン蒸留(Kr低減)と導入。
- 現在コミッショニングラン
 - キャリブレーションデータによる
検出器の理解。15+/-1.2p.e./keVの大光量。位置分解能等はシミュレーションとのよい一致を見た。
 - 内部バックグラウンド(Rn, Kr)の評価
 ^{222}Rn は期待値に近く、 ^{220}Rn は目標達成。



^{57}Co data at various positions

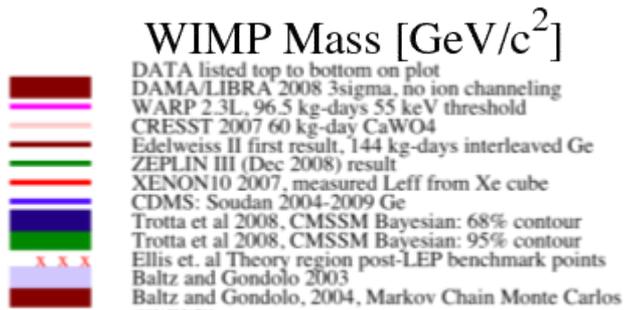
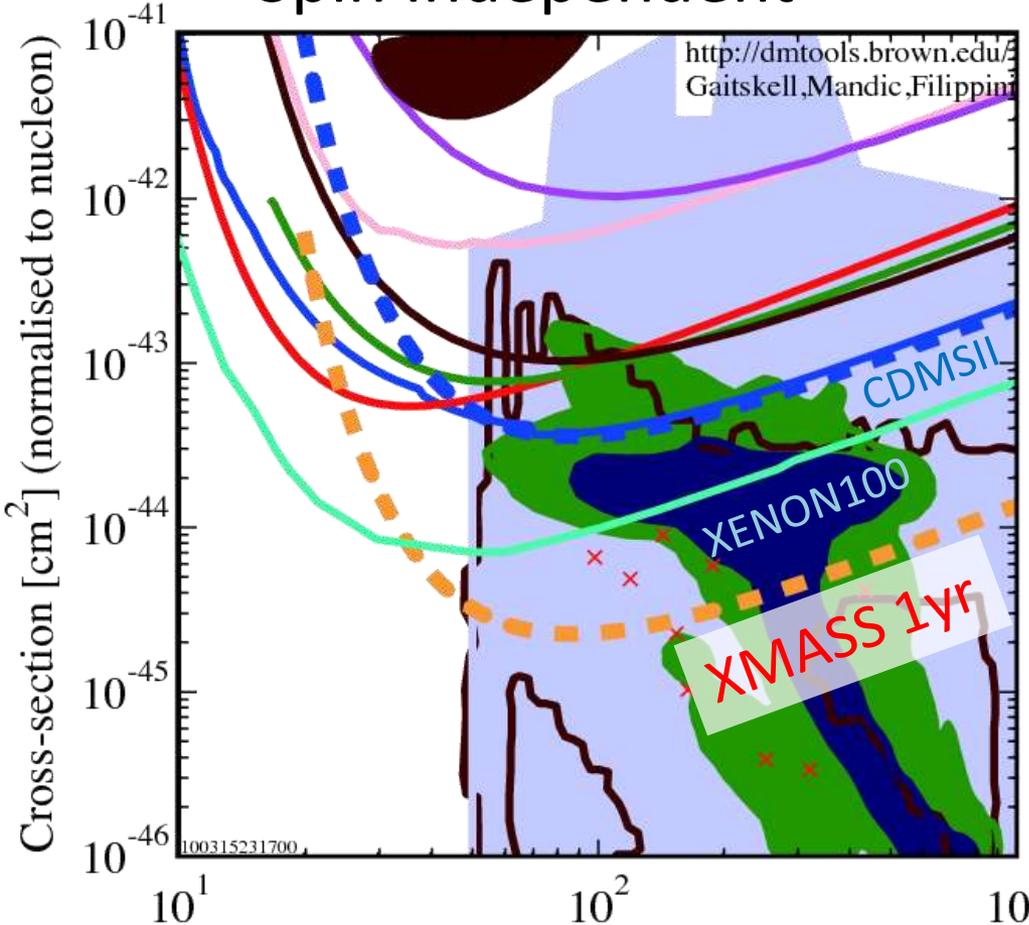
Real Data

Simulation



XMASS-Iで期待される感度

Spin Independent



$\sigma_{\chi p} > 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$
for 50-100 GeV WIMP,
90% C.L.

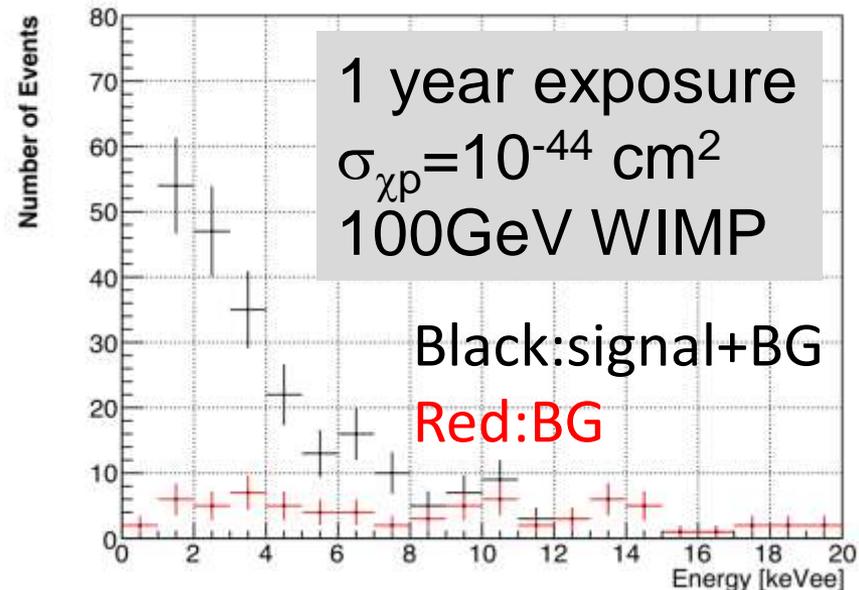
1yr exposure, 100kg FV

BG: $1 \times 10^{-4} / \text{keV/d/kg}$

5keVee threshold

Scintillation efficiency: 0.2

Expected energy spectrum



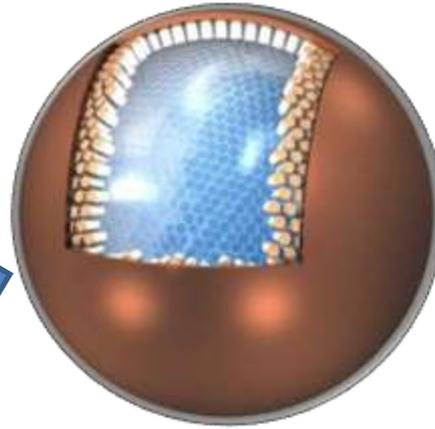
XMASS実験の将来計画

XMASS-I



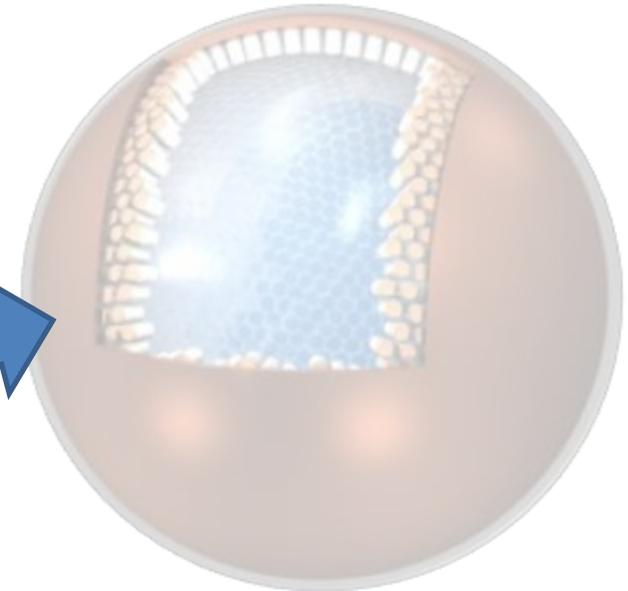
DMに特化
100kg FV (800kg)
642 PMTs
2007-
暗黒物質の発見

XMASS-1.5



DMに特化
早期の実現
1ton FV (5ton)
~1800 PMTs
最短2013-
15億円+1億円/yr
季節変動・スペクトル

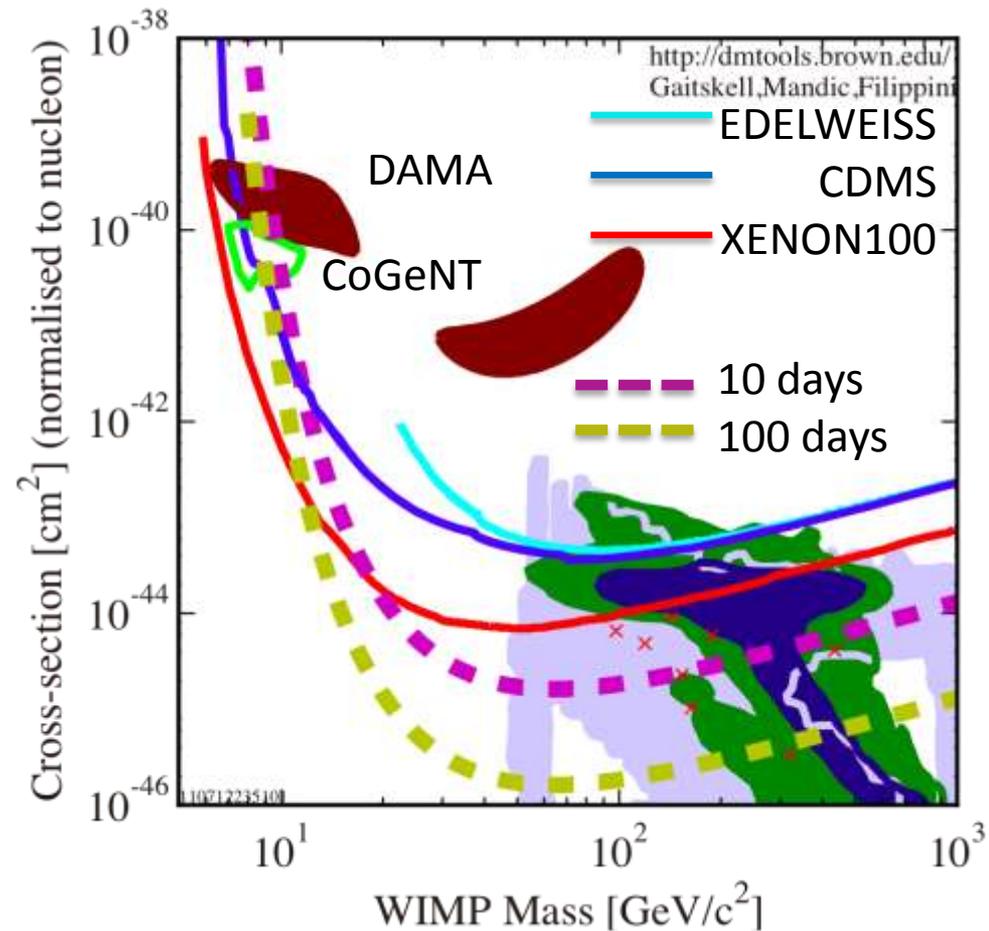
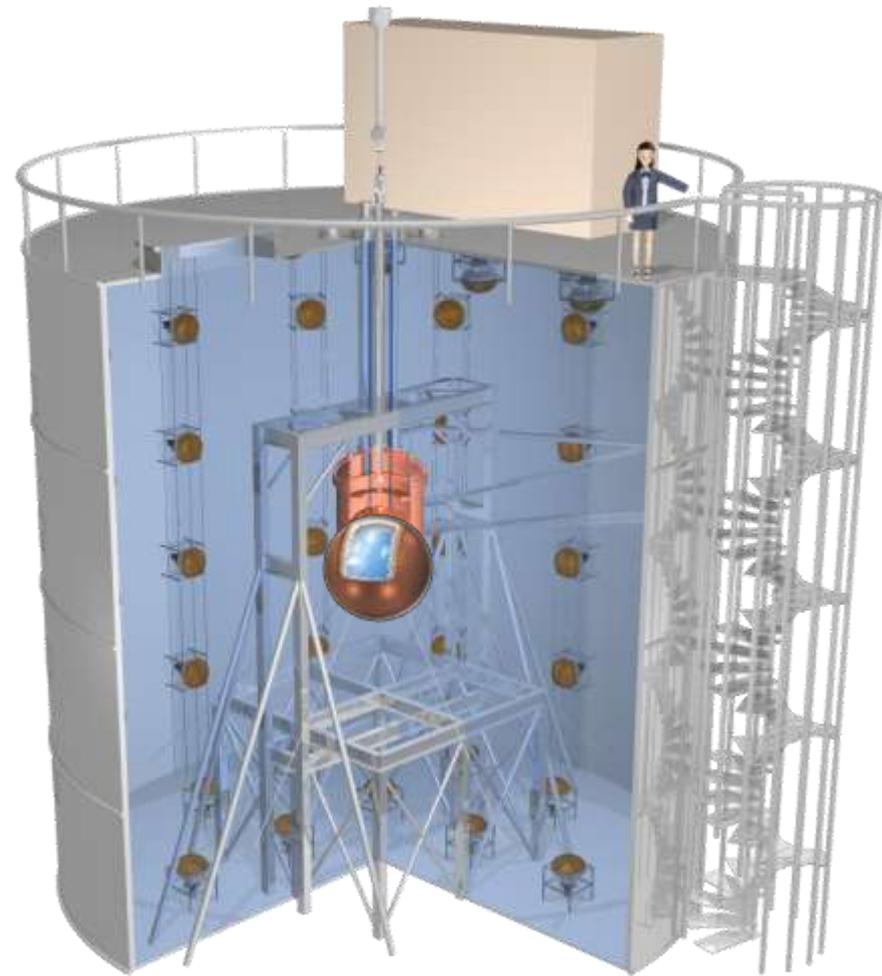
XMASS-II



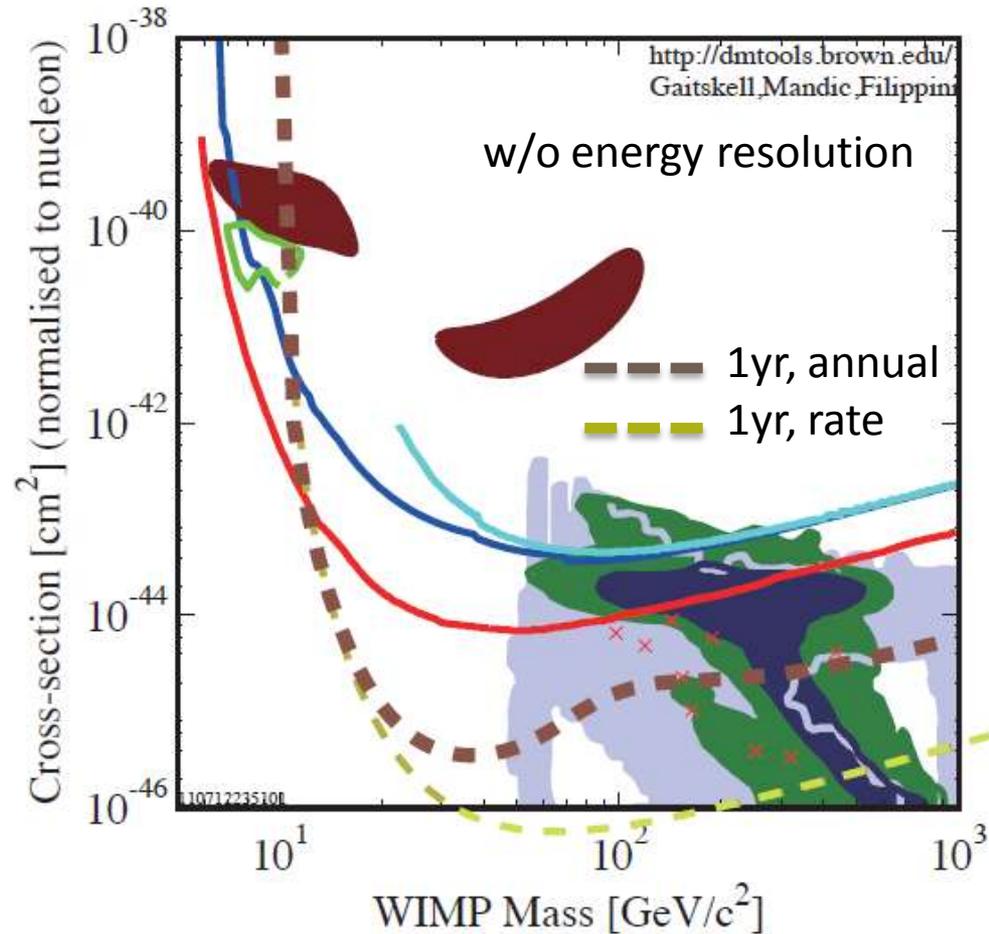
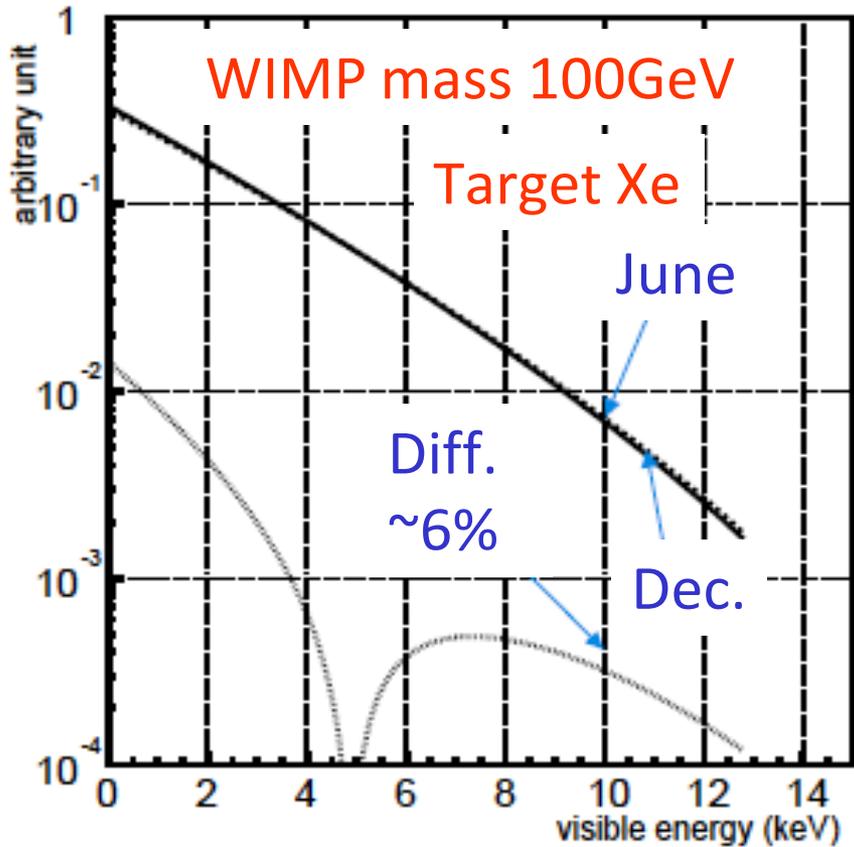
DM, solar, $\beta\beta$
10ton FV
最短2017-
96億円+6億円/yr
DMの詳細研究
pp Solar nu
 $\beta\beta \sim 30\text{meV}(\text{IH})$

XMASS-1.5(1ton FV)とその感度

- 水タンクや関連装置はほぼそのまま使える。
- 他の実験ではできない電子反跳事象の徹底的な低減
- 大発光量のため敷居値2keV_{ee}に下げ軽いDMにせまる。DAMA, CoGeNTと同様電子事象が見える。BGx1/10で 10^{-46}cm^2 を探索。



季節変動の観測 (2keVee, 1ton)



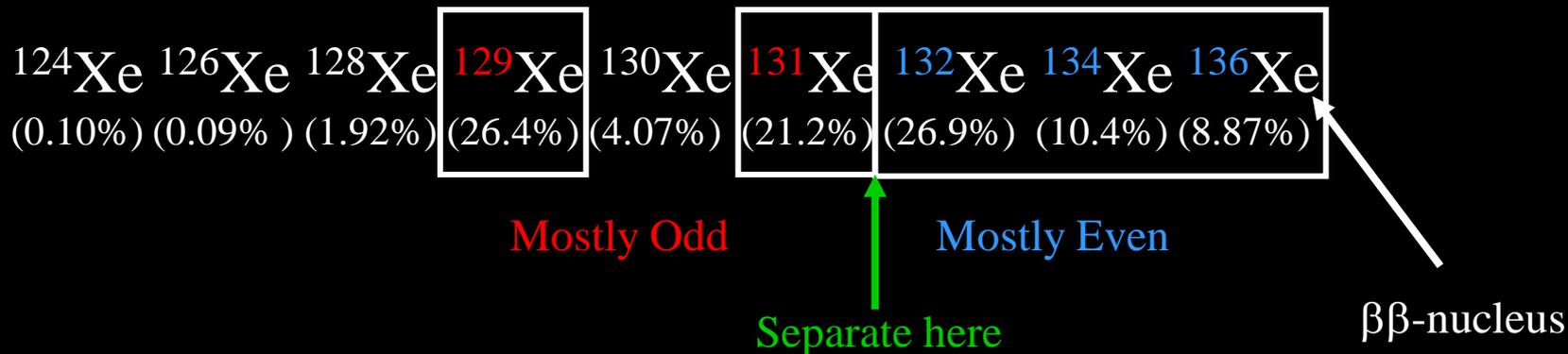
Assuming quenching factor of 0.2

- 季節変動すらもより高い感度で観測することができる。

XMASS-2での暗黒物質探索

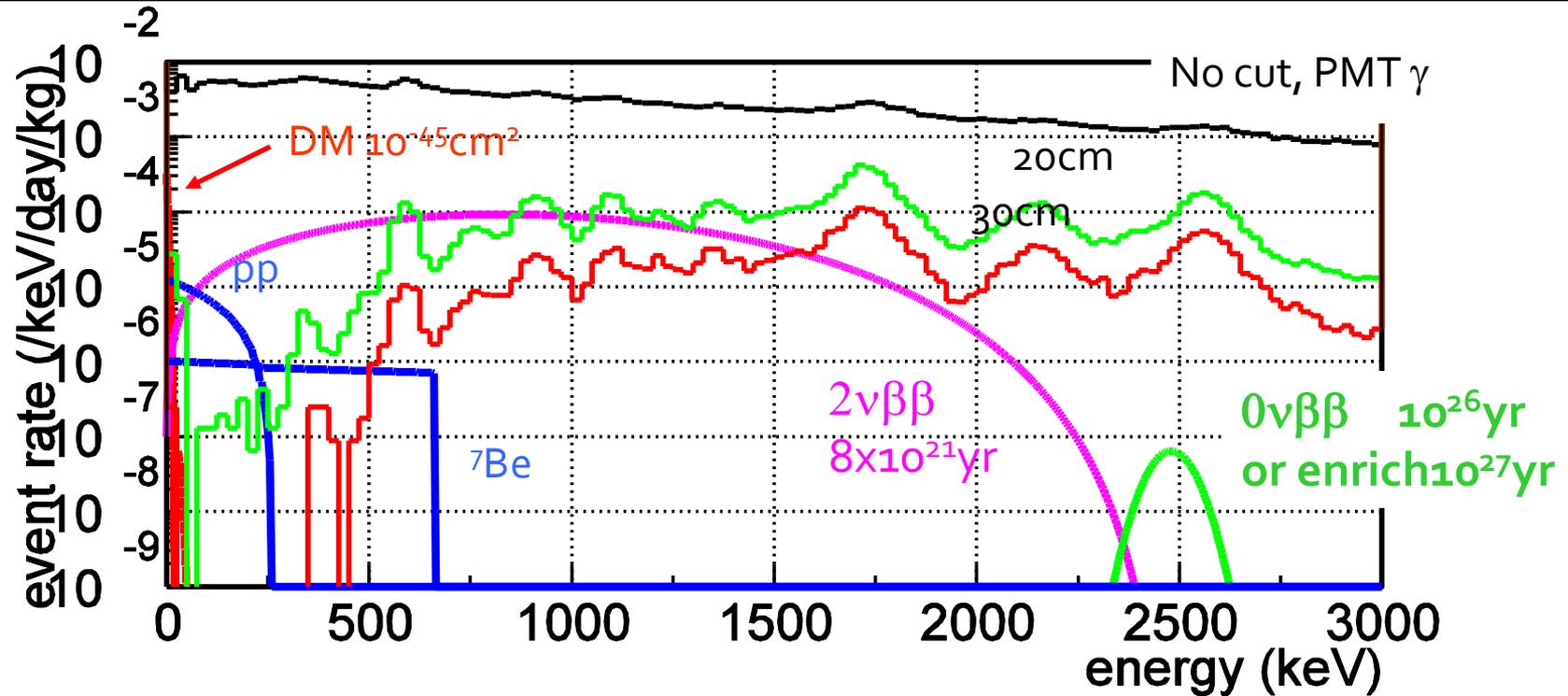
- 低エネルギーpp太陽ニュートリノの観測が可能な条件を整え、バックグラウンドは $1 \times 10^{-6} / \text{kg/keV/day}$ (MASS-1.5の目標の1/10)、ppvの信号は $\sim 1 \times 10^{-5} / \text{kg/d/keV}$ 程度。
- ppvのスペクトルを用いて信号の取り出しが可能。
- 後述の $\beta\beta$ 実験の性能向上のためデザイン詳細未決定。
- 10トン1年、2keVee、100事象程度の統計を想定し、 $10^{-46} \text{cm}^2 @ 100 \text{GeV}$ を上回る感度を出すことを目標。
- XMASS-1.5の成果をより高感度で確認する
 - 季節変動の詳細な観測を可能とする
 - 同位体分離へ進むオプションもある
 - 別原子核を用い、質量の決定?

検討すべきオプション キセノンの安定同位体



- Evenを用いて二重ベータ崩壊探索
- Oddを用いて太陽ニュートリノ観測
- EvenとOddを交換しながら暗黒物質探索
spin independent, spin dependent

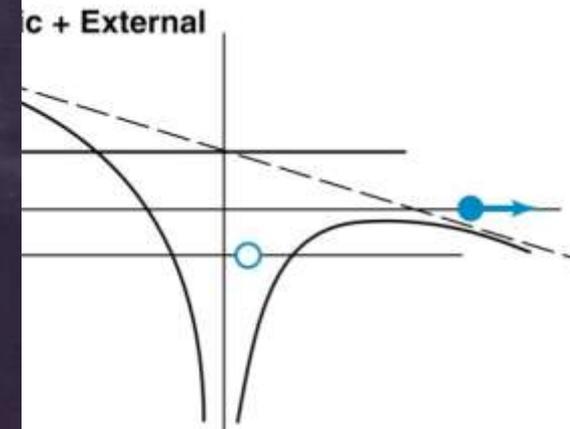
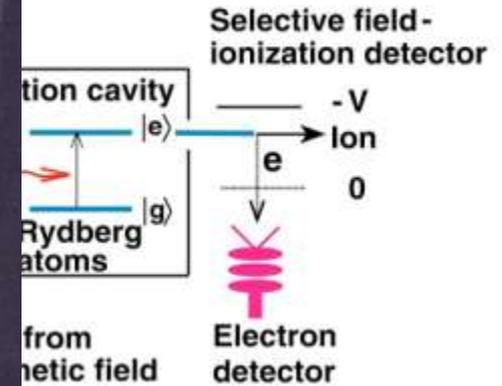
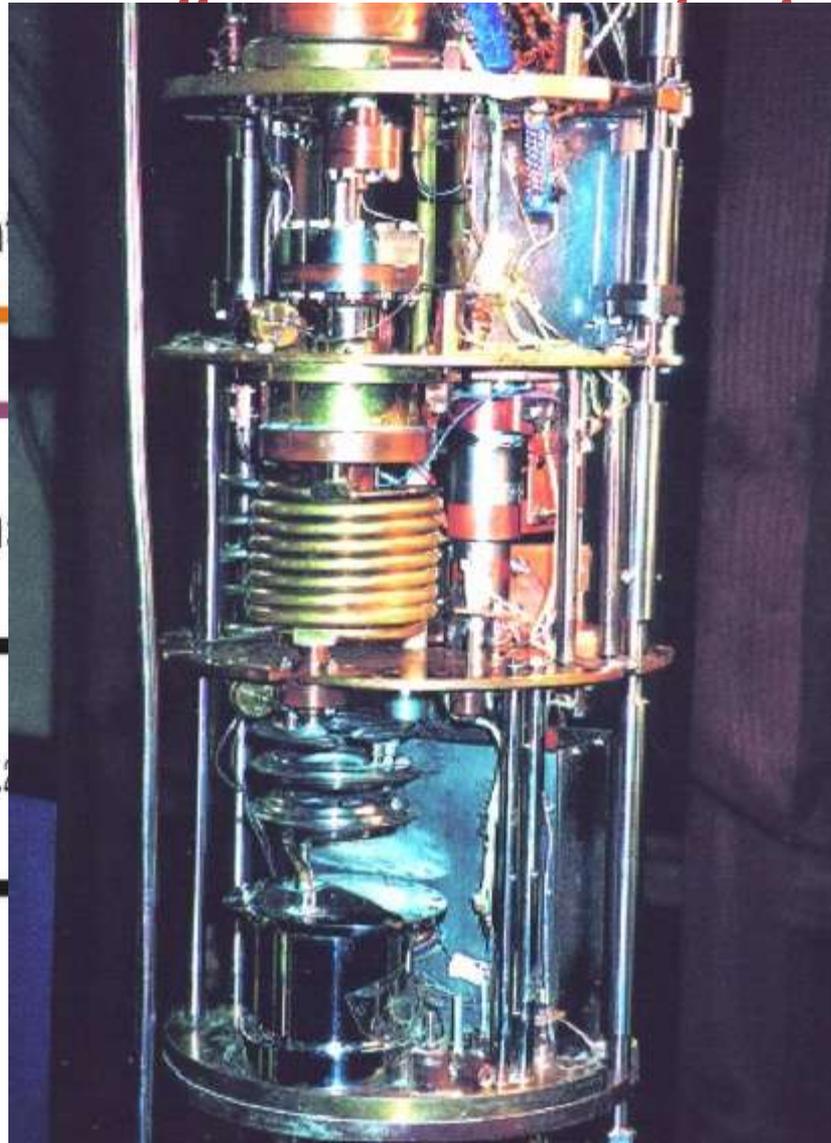
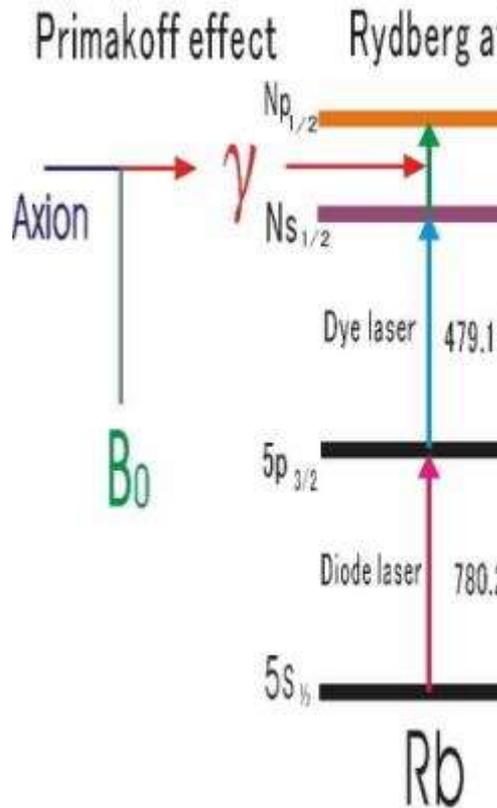
低エネルギー太陽νとβ崩壊探索



- 低Eは内部BG (Kr~0.1 ppt, U, Th~ 10^{-16} g/g)で決まる。
KamLAND, Borexinoより緩い。pp, DMが遂行できる。
 - 純化、事象再構成の改善、同位体分離、別技術の導入？
- 5年でppを10000事象以上得るために10トンの有効体積を持つ
- 高EはセンサのBG。構造、センサ改善、コンプトン除去でβの遂行

もうひとつの暗黒物質有力候補: axion

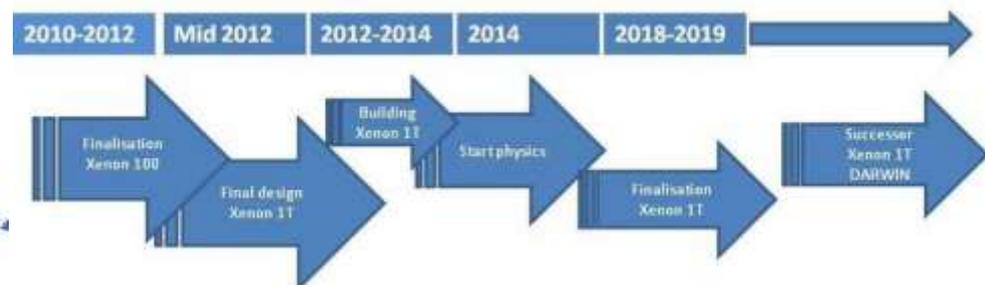
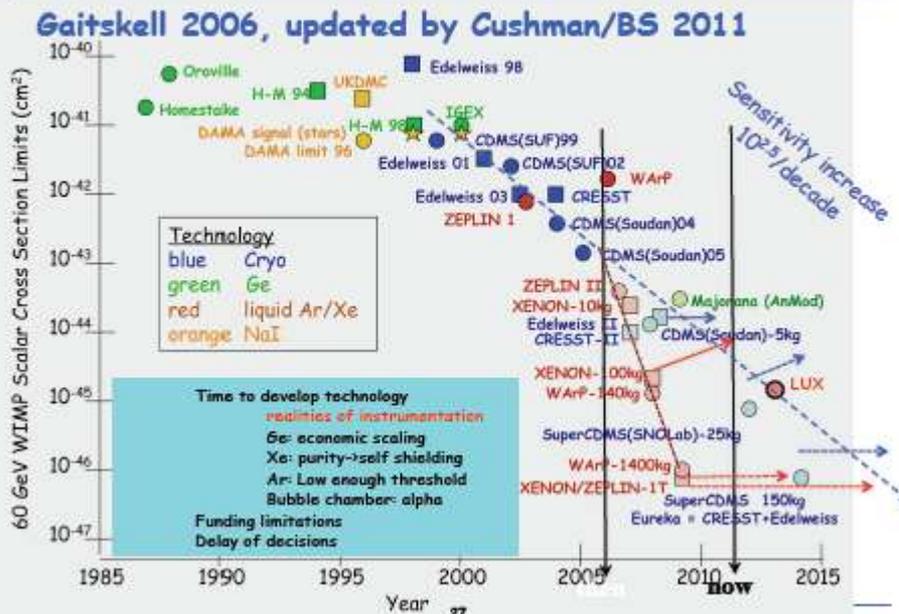
CARRACK (京都大)



国内実験の向かう方向

- それぞれの得意な技術を用いて発展してきた。
 - XMASS: SK@東京
 - NEWAGE: muPIC@京都
 - NIT: エマルジョン@名古屋
 - PICO-LON: NaI@元阪大
- 当面はこれを続けてよいが、この分野の国内の研究者は大変人数が限られている。素粒子分野と宇宙線分野にまたがる。XMASSが初めて大型化の入り口に立てた。
- 加速器での成果も横目で見ながら、着実に成果を出し種々の技術のR&Dをすすめてゆくことが肝要。
- 海外の動きの一つ: XENON1Tがどう進むか。
- ただし10年先の予見は困難。

B. Sadoulet **Hopes and Progress**



XENON1T: construction approved by INFN

Nuclear recoil探索 世界に30以上

	結晶(Ge,光学)	希ガス液体	飛跡	バブル等
北米	CDMS CoGeNT	DEAP/CLEAN LUX	DMTPC D ³	Picasso COUPP
欧州英国	Edelweiss DAMA/LIBRA CRESST ROSEBUD ANAIS DM-Ice	XENON ZEPLIN ArDM WARP	DRIFT MIMAC DARWIN	SIMPLE
中国台湾 韓国	TEXONO CDEX KIMS	PANDAX		
日本	POCO-LON (CANDLES)	XMASS	NEWAGE NIT(emulsion)	



完全なリストではない

まとめ

- この10年、暗黒物質への興味が大きく高まり、極めて活発な分野に成長してきた。「発見」の可能性のある魅力的な分野の一つ。
- 海外では「証拠」が出てきている。それらを検証することに加え、着実に超対称性等の予言に迫る努力が国内各チームによって進められている。
- 国内では、大型検出器による実験の成果が出次第、より感度の高い実験装置へと規模を上げる計画。スペクトル、異種原子核のオプション、低エネルギー太陽ニュートリノ、二重ベータ崩壊探索実験へと続く豊富な物理が期待される。

CDMS Plans

**SCDMS Soudan 10kg
interdigitated**

$\geq 15\text{kg}$ previous CDMS

2011-2013 \rightarrow 15? : 8 \rightarrow 5? 10^{-45} cm^2

Depends on neutron background

Similar to current sensitivity of Xenon 100
(100days)

Cross check

+ demonstration of technology for SNOLAB

SCDMS SNOLAB 100kg

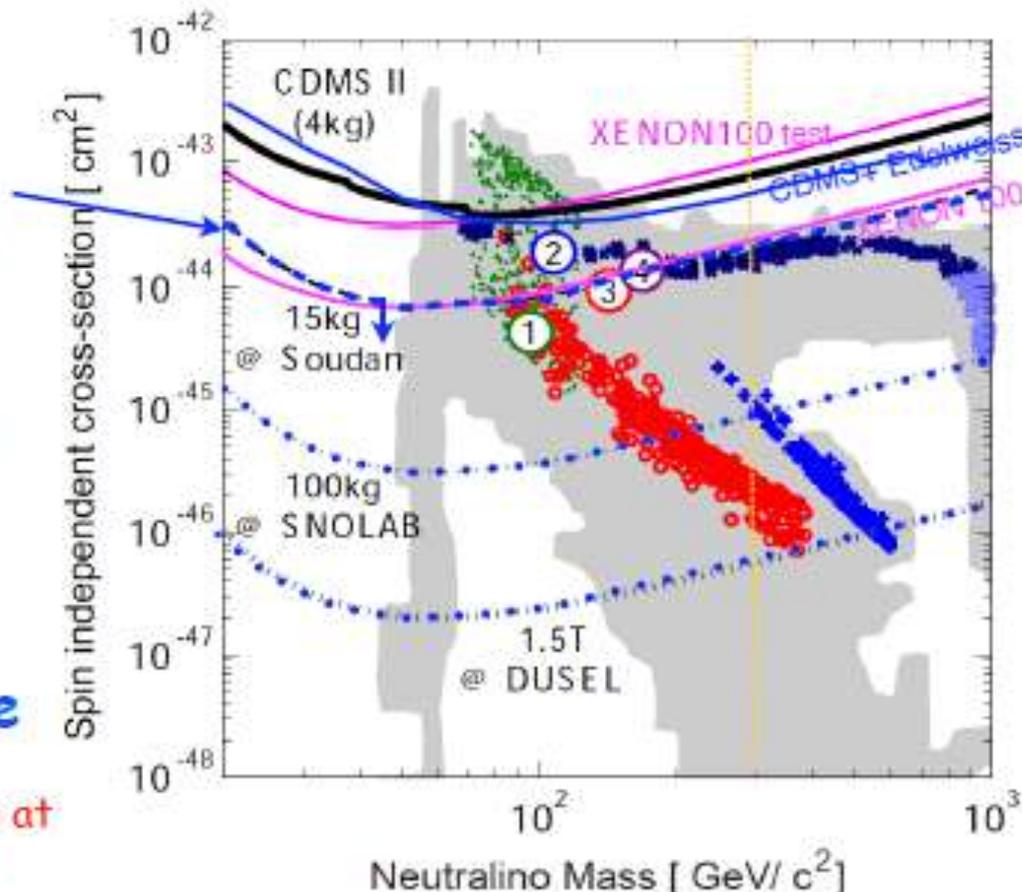
2015-2018 $3 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$

Part of Generation 2 competition

GEODM DUSEL 1.5 tonne

2018?-2022? $2 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$

Challenge is to produce detector at
low enough cost (\$50M + 50%
contingency)



DUSEL and Homestake

Deep underground Science and Engineering laboratory Being studied by NSF since ~2000

S1: scientific importance— site independent, multidisciplinary, nation wide study

S2-S3: => choice of Homestake

Preparation of MREFC (~\$50M NSF, ~\$110M South Dakota -including private donor)

Dec 2010: Collapse!

NSF National Science Board expresses reservation with implementation of the project: do not fund bridge funding... Unhappy about:

Costs \$850M in 2011 dollars

Balance: Too much infrastructure, not enough science

Stewardship model: NSF building infrastructure

But encourages to rethink the project

NSF/Office Management of Budget decide not to pursue development

Presidential budget of 2011

DOE comes to rescue!

Fortunately, the Department of Energy reacted rapidly:

- Formed a committee (the "Marx-Reichanadter Committee"= "Marx Committee") to consider cost effective options for implementing a world class underground science program.
- Funds are being provided by NSF (FY11) and DOE (proposed FY12) to keep the Homestake 4850 ft level dry and safe through September 2012, while decisions are being made.

Marx-Reichanadter Committee

Report at HEPAP Thursday June 23, 2011

The Marx committee strongly endorses the LBNE, Dark Matter and Neutrinoless Double Decay Science.

Deploying stand alone Dark Matter or double beta decay experiments at Homestake 4850 ft (or a fortiori at 7400) would not be not cost effective.

SNOLAB: likely not enough space at it is: would need extension!

However, in spite of a cost differential (estimated at \$100M, to be confirmed) in favor of SNOLAB:

The presence of LBNE at Homestake at 4850ft would make attractive the siting of dark matter and double beta decay experiments at the same level, "if the infrastructure needed can be shared in a cost effective manner".

A common facility is important for the training of the next generations of US scientists and "locating such a facility in the U.S. would help to promote U.S. leadership in these fields for the foreseeable future."

Marx-Reichanadter Committee

LBNE

The Marx Committee favors a location of the LBNE far detector at 4850ft and argues for a fast technology choice process.

It suggests that a two-phase approach with Water Cherenkov in a first phase and liquid argon in a second phase would be attractive, leading to richer physics and possibly lower cost of the first phase.

Fact not known to Marx committee

4850ft location of liquid Ar is comparable in terms of cost to 800ft better in terms of science and simplify coupling with dark matter and double beta decay => drop 800ft option?

Homestake rises from its ashes!

Much scaled down compared to DUSEL

Real interest at OSTP and in Congress

survival of Fermilab

low operation support costs: \$20-22M vs \$70-80M for DUSEL

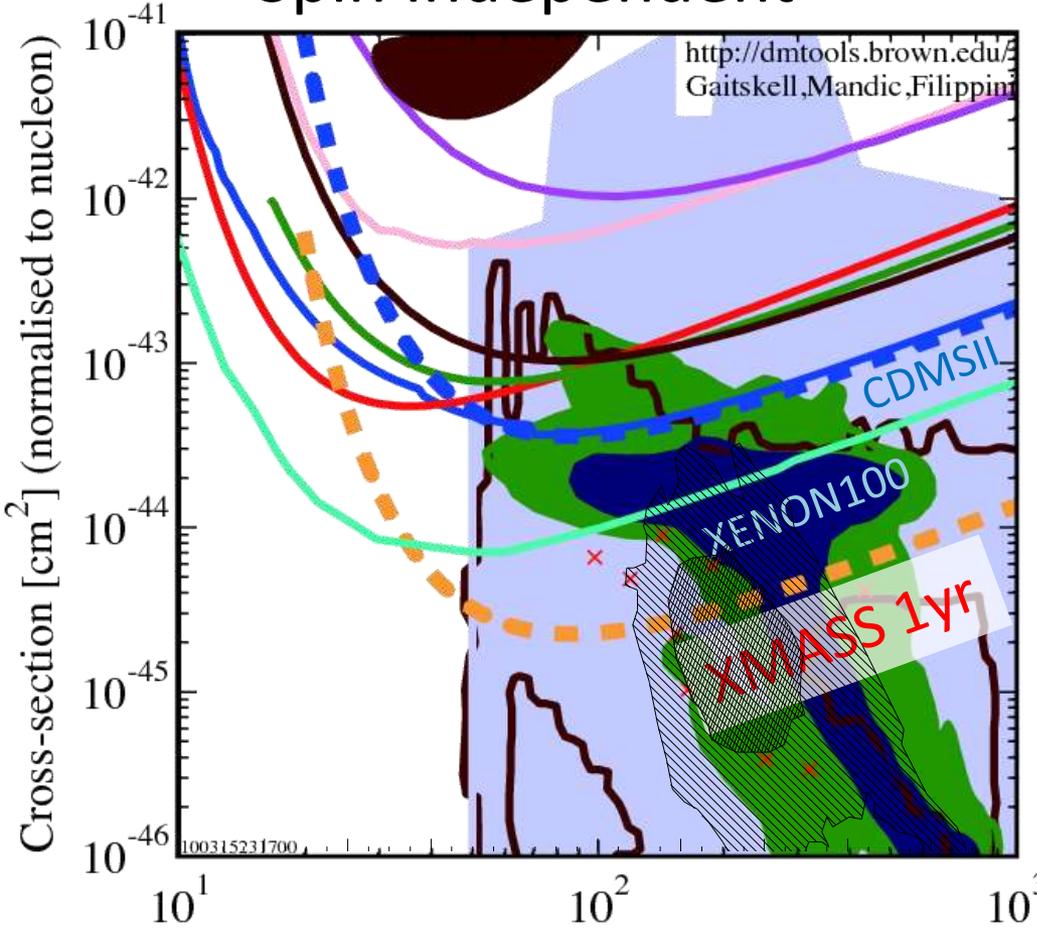
NSF now seems ready to play a scientific role

Contribution to experiments

Science MREFC? (e.g. Dark Matter + Double beta)

XMASS-Iで期待される感度

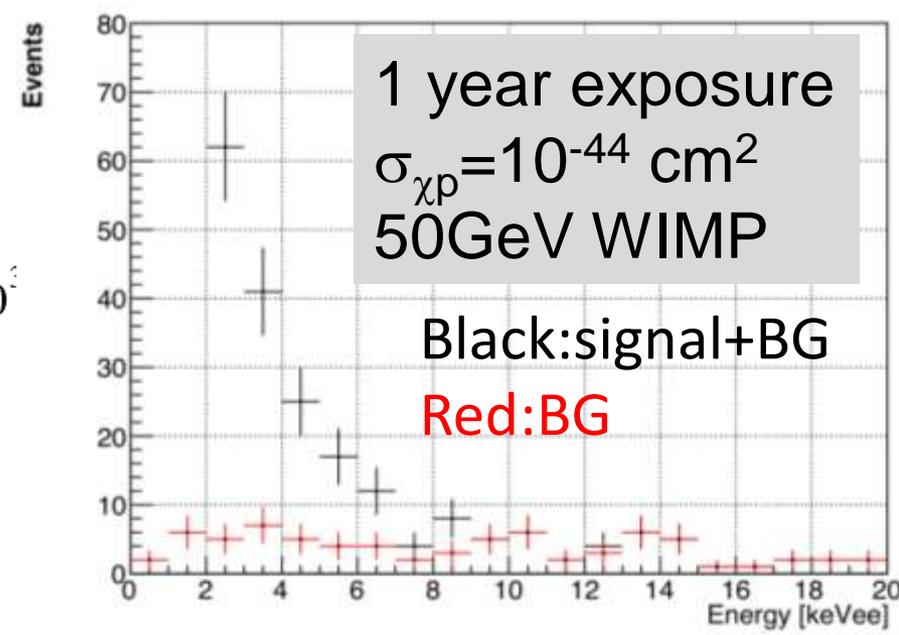
Spin Independent



- WIMP Mass [GeV/c²]
- █ DATA listed top to bottom on plot
 - █ DAMA/LIBRA 2008 3sigma, no ion channeling
 - █ WARP 2.3L, 96.5 kg-days 55 keV threshold
 - █ CRESST 2007 60 kg-day CaWO4
 - █ Edelweiss II first result, 144 kg-days interleaved Ge
 - █ ZEPLIN III (Dec 2008) result
 - █ XENON10 2007, measured Leff from Xe cube
 - █ CDMS: Soudan 2004-2009 Ge
 - █ Trotta et al 2008, CMSSM Bayesian: 68% contour
 - █ Trotta et al 2008, CMSSM Bayesian: 95% contour
 - █ Ellis et. al Theory region post-LEP benchmark points
 - █ Baltz and Gondolo 2003
 - █ Baltz and Gondolo, 2004, Markov Chain Monte Carlos

$\sigma_{\chi p} > 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$
 for 50-100 GeV WIMP,
 90% C.L.
 1yr exposure, 100kg FV,
 BG: $1 \times 10^{-4} / \text{keV/d/kg}$
 Scintillation efficiency: 0.2

Expected energy spectrum

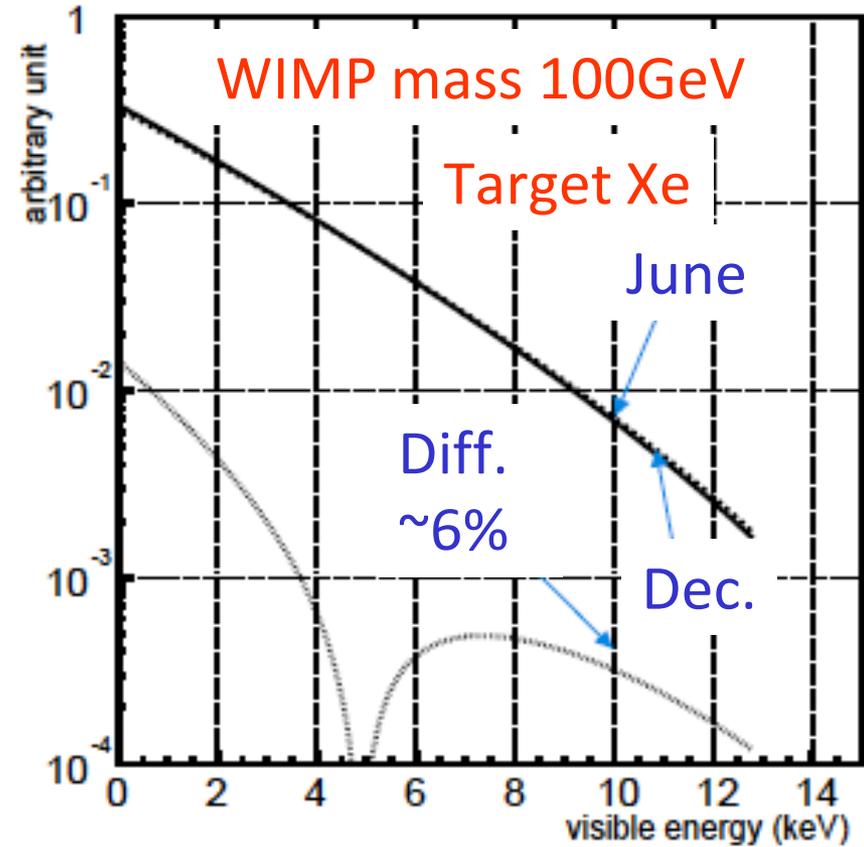
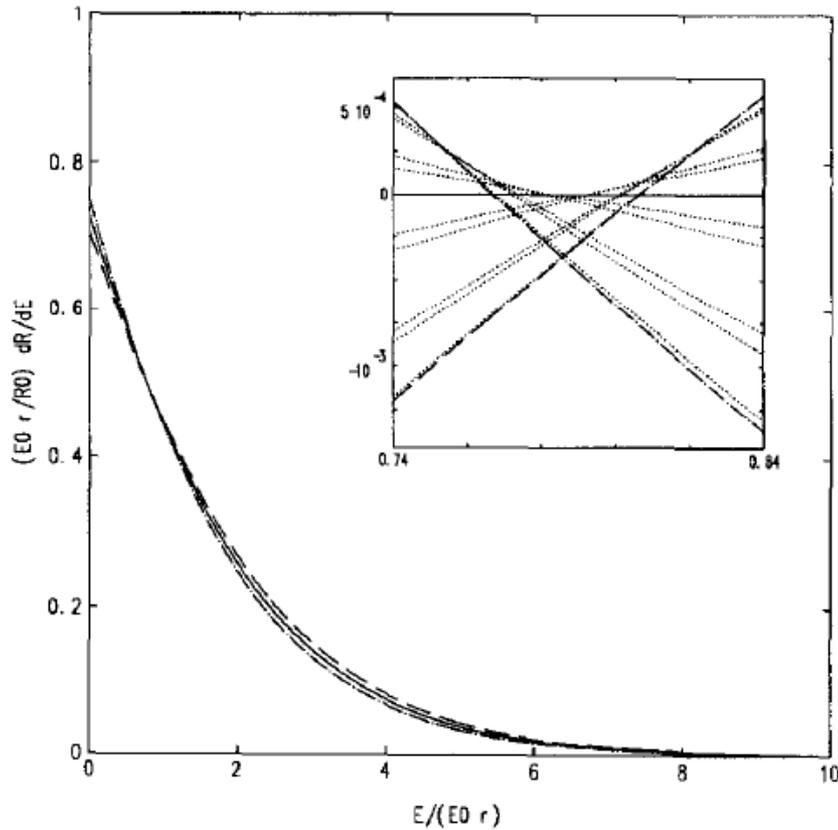


1 year exposure
 $\sigma_{\chi p} = 10^{-44} \text{ cm}^2$
 50 GeV WIMP

Black: signal+BG
 Red: BG

季節変動の振る舞い

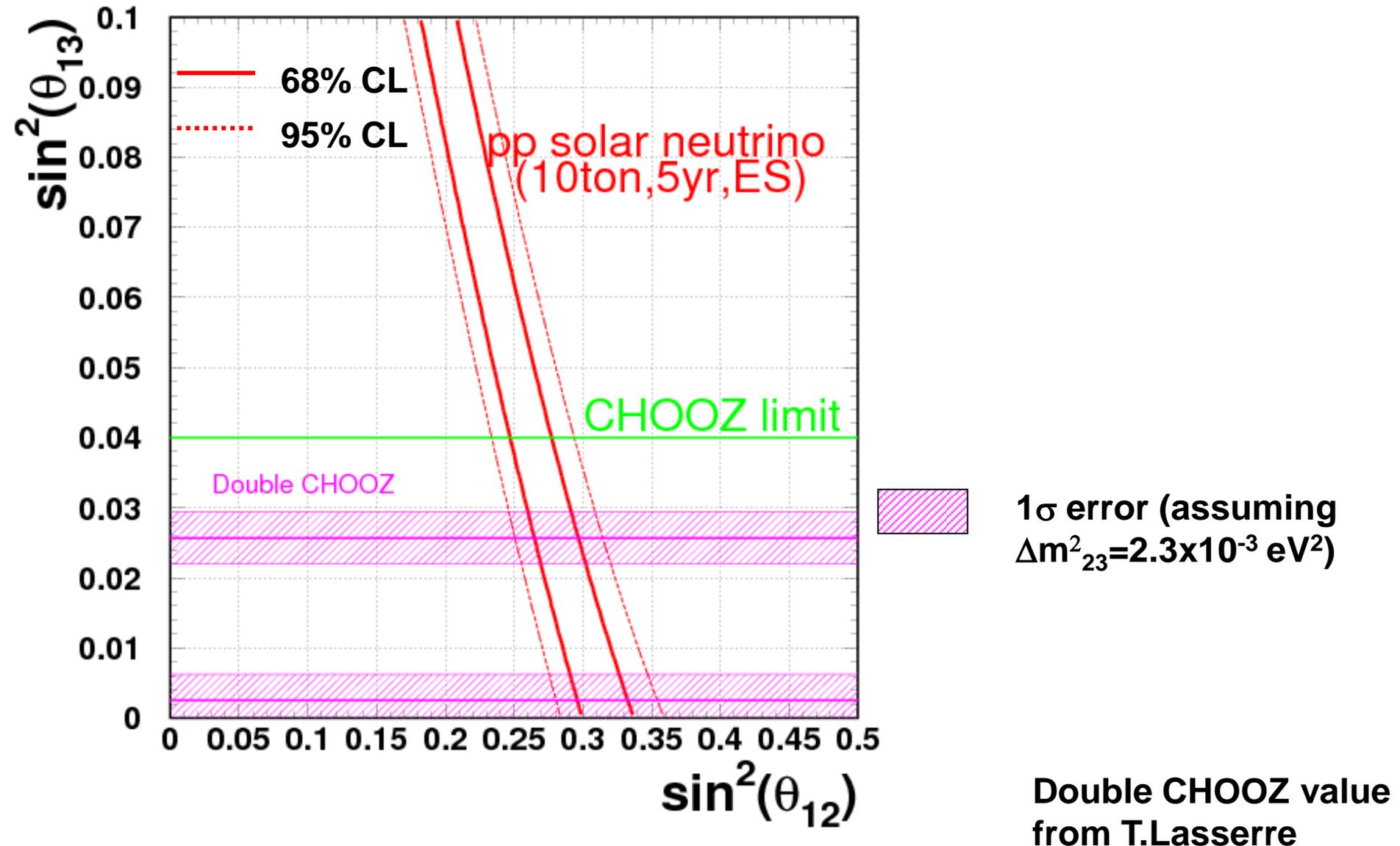
J.D. Lewin, P.F. Smith / *Astroparticle Physics* 6 (1996) 87-112



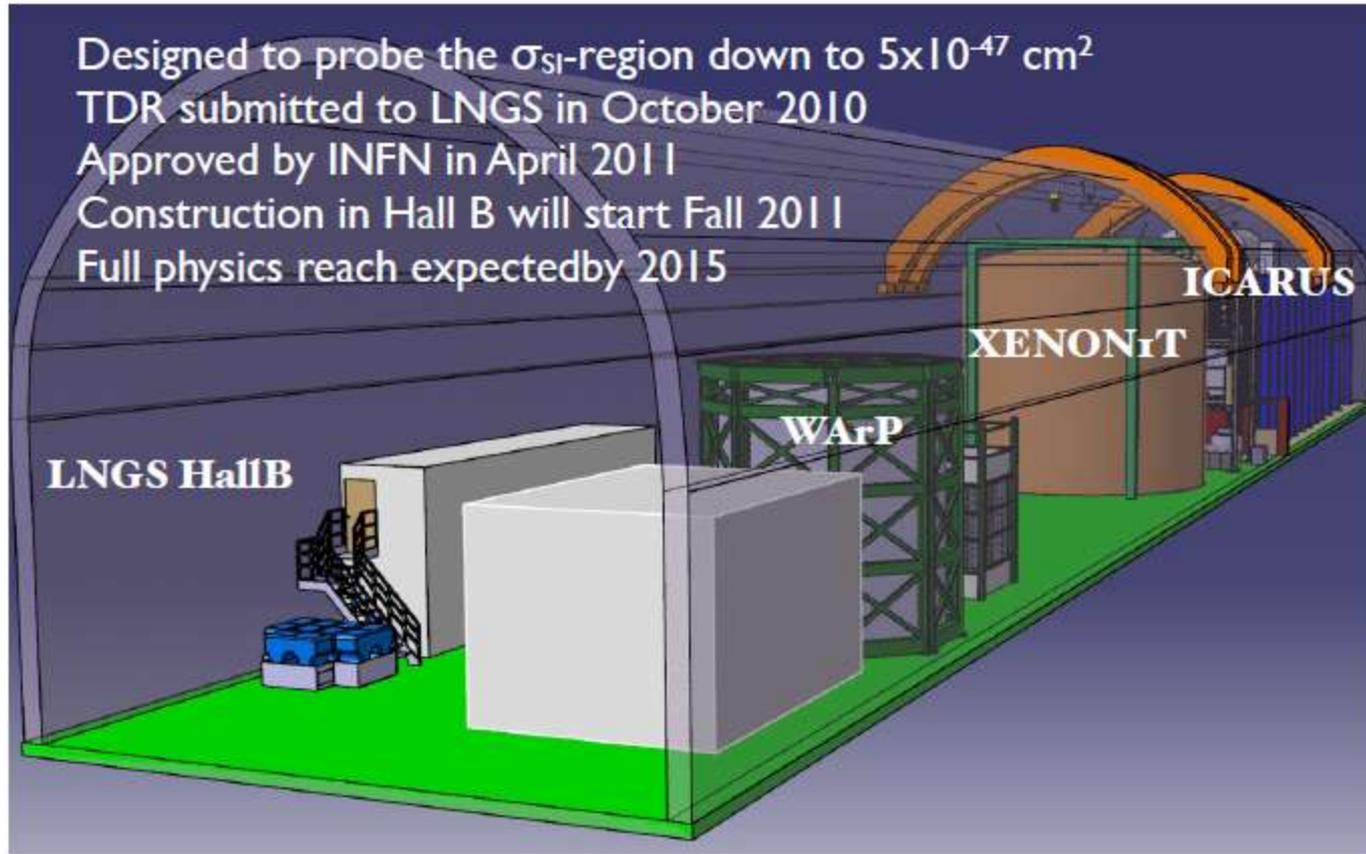
Assuming quenching factor of 0.2

Sensitivity of mixing angle by pp experiments

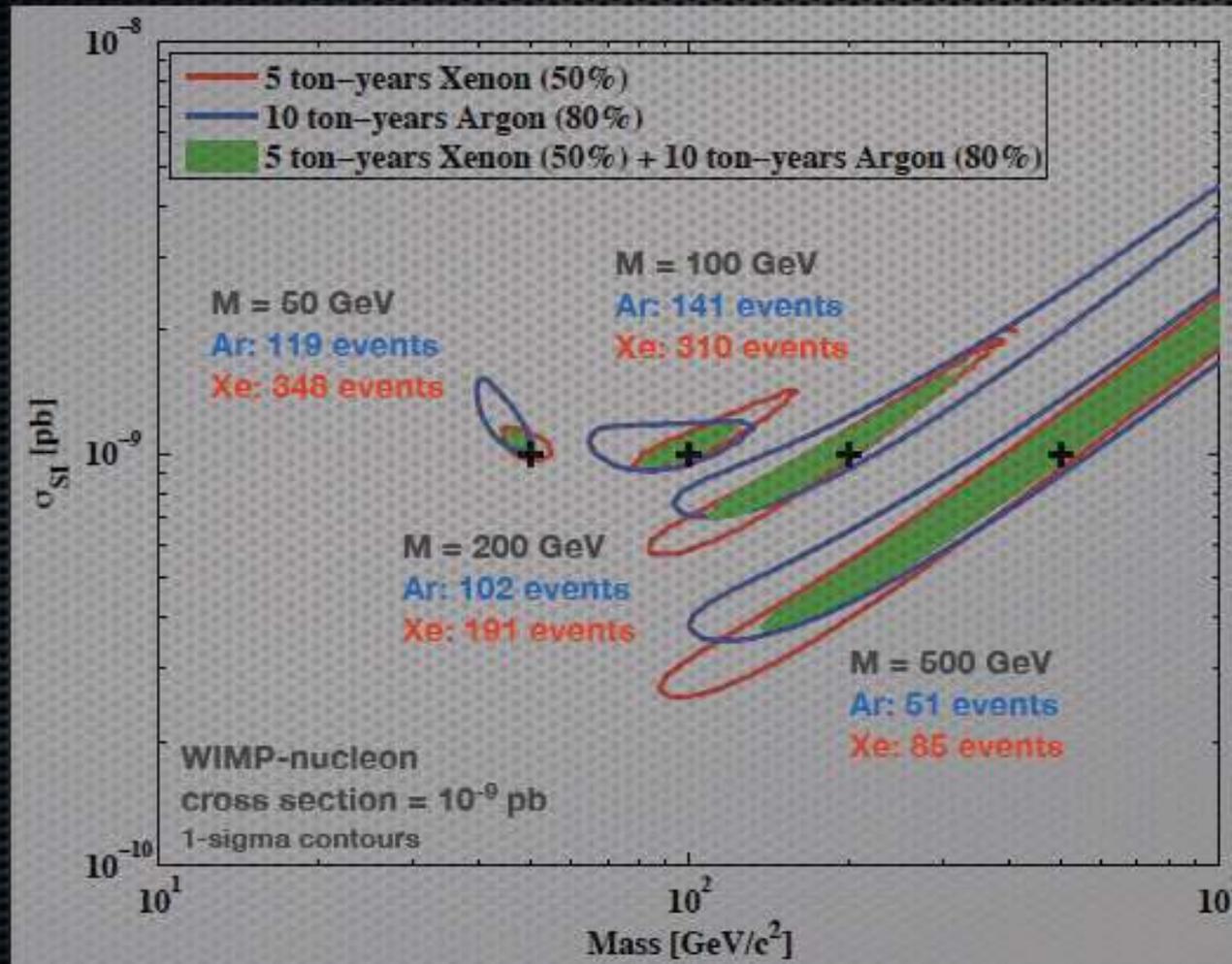
Future: with reactor θ_{13} experiments



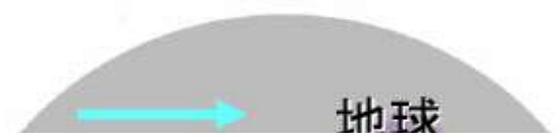
The XENON_{1T} Experiment



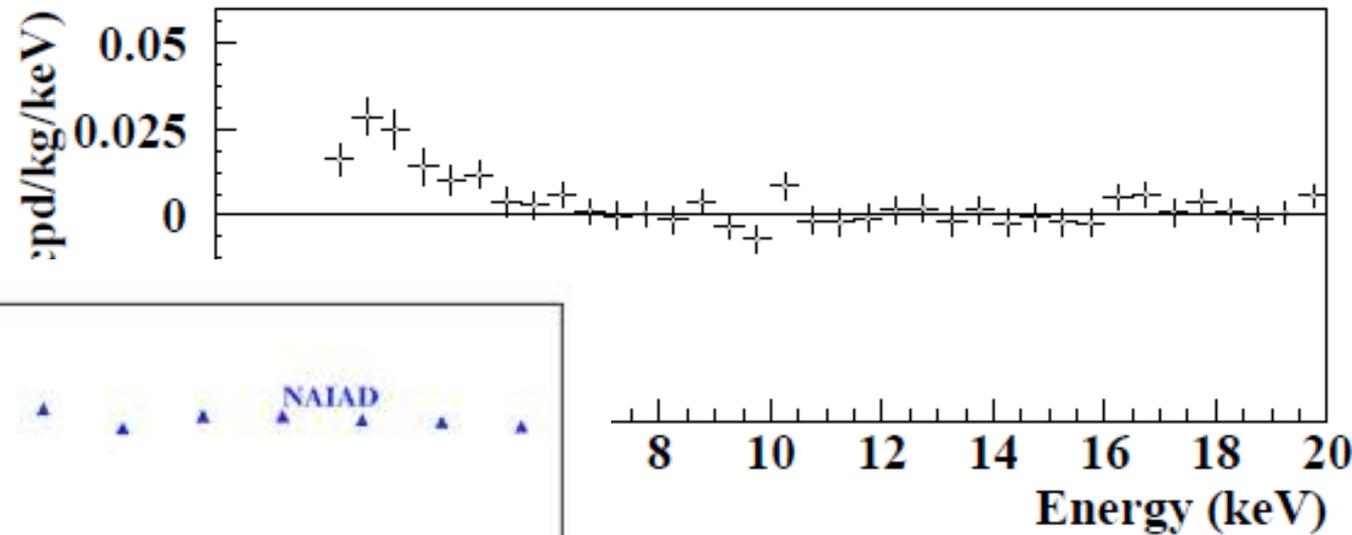
Complementarity between LAr and LXe



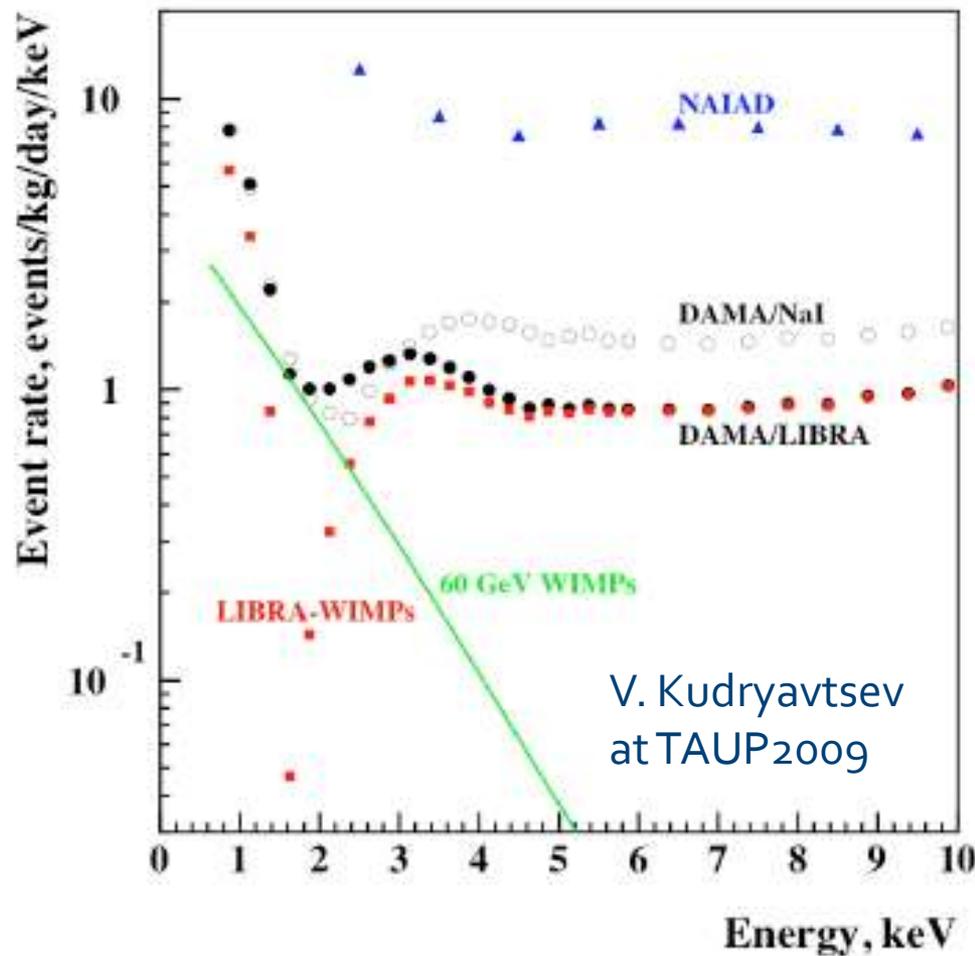
DAMA/NaI, DAMA/LIBRA @ GS



arXiv:0804.2741v1



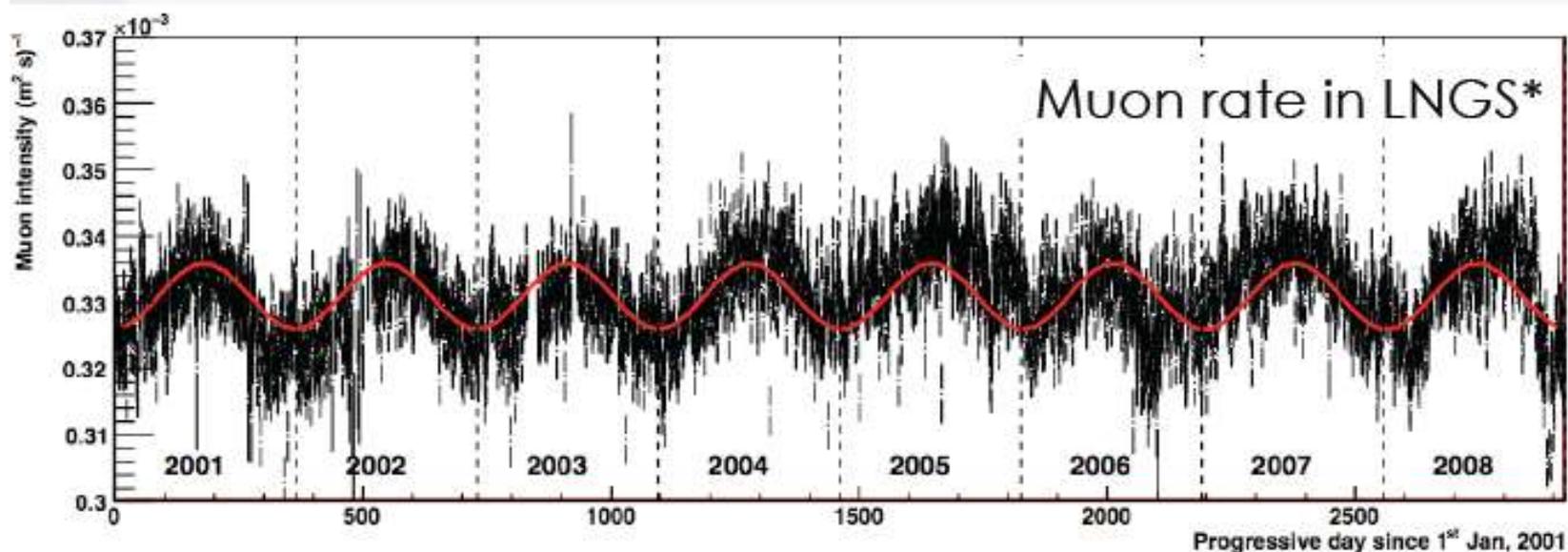
0.1
0.08
DAMA/NaI
stat set ml



- 季節変動を主張
- 8.2 sigma C.L. with 0.82 ton x year
- No BG rejection
- 通常ハローモデルの予言だと不思議なBG.
- High QEの玉を予定。

DAMA

David Nygren has pointed out [arXiv:1102.0815] that the muon rate measured at LNGS fluctuates annually (same period and phase as DAMA), and provides an explanation on how muons can produce delayed low-energy scintillation pulses, possibly mimicking a WIMP signal.



* M.Selvi et al., Proc. 31st ICRC, ŁÓDŹ 2009

CoGeNT

As an exercise, I have zoomed in with a magnifying glass and put a red dot over every ^{241}Am event that is leaking below the signal acceptance line.

The spectrum of these leaking events is in red, and doesn't seem to support their background model.

Keep in mind, I have picked out these data points by eye, so this spectrum is **only a qualitative assessment**, but it indicates an increasing degradation of surface rejection starting at ~ 1.3 keV and below.

