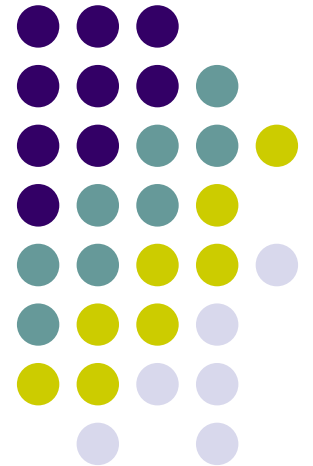


XMASS実験

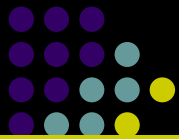
東京大学宇宙線研究所
森山茂栄 及び
宇宙ニュートリノ研究部門スタッフ
2006年6月29日
宇宙線研究所将来計画勉強会

液体キセノンを用いた XMASS実験が目指す物理

暗黒物質探索を中心に
世界情勢を交える



低バックグラウンド 多目的検出器



●XMASS

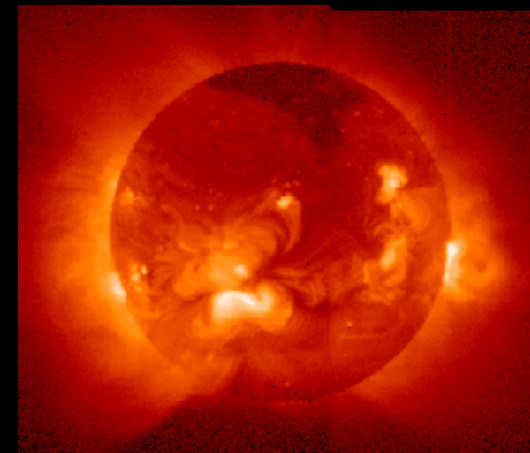
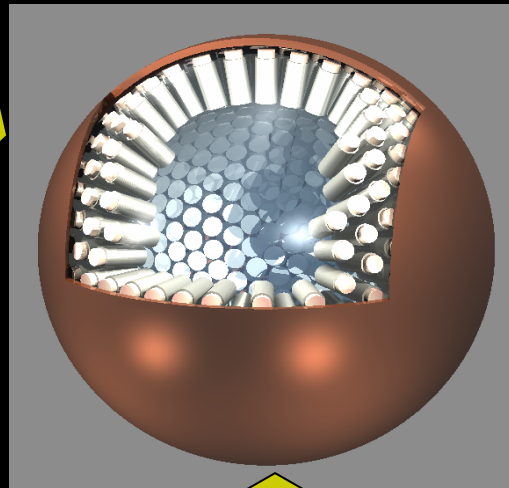
◎ **X**ENON DETECTOR FOR WEAKLY INTERACTING **MASS**IVE PARTICLES (DM SEARCH)

◎ **X**ENON **MASS**IVE DETECTOR FOR SOLAR NEUTRINO (PP/ ^7Be)

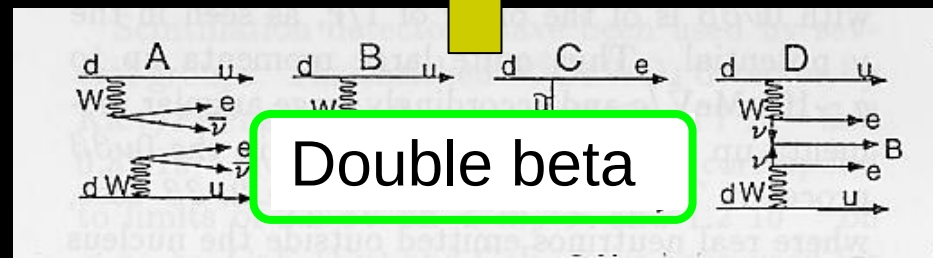
◎ **X**ENON NEUTRINO **MASS** DETECTOR (DOUBLE BETA DECAY)

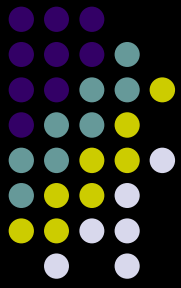


Dark matter



Solar neutrino

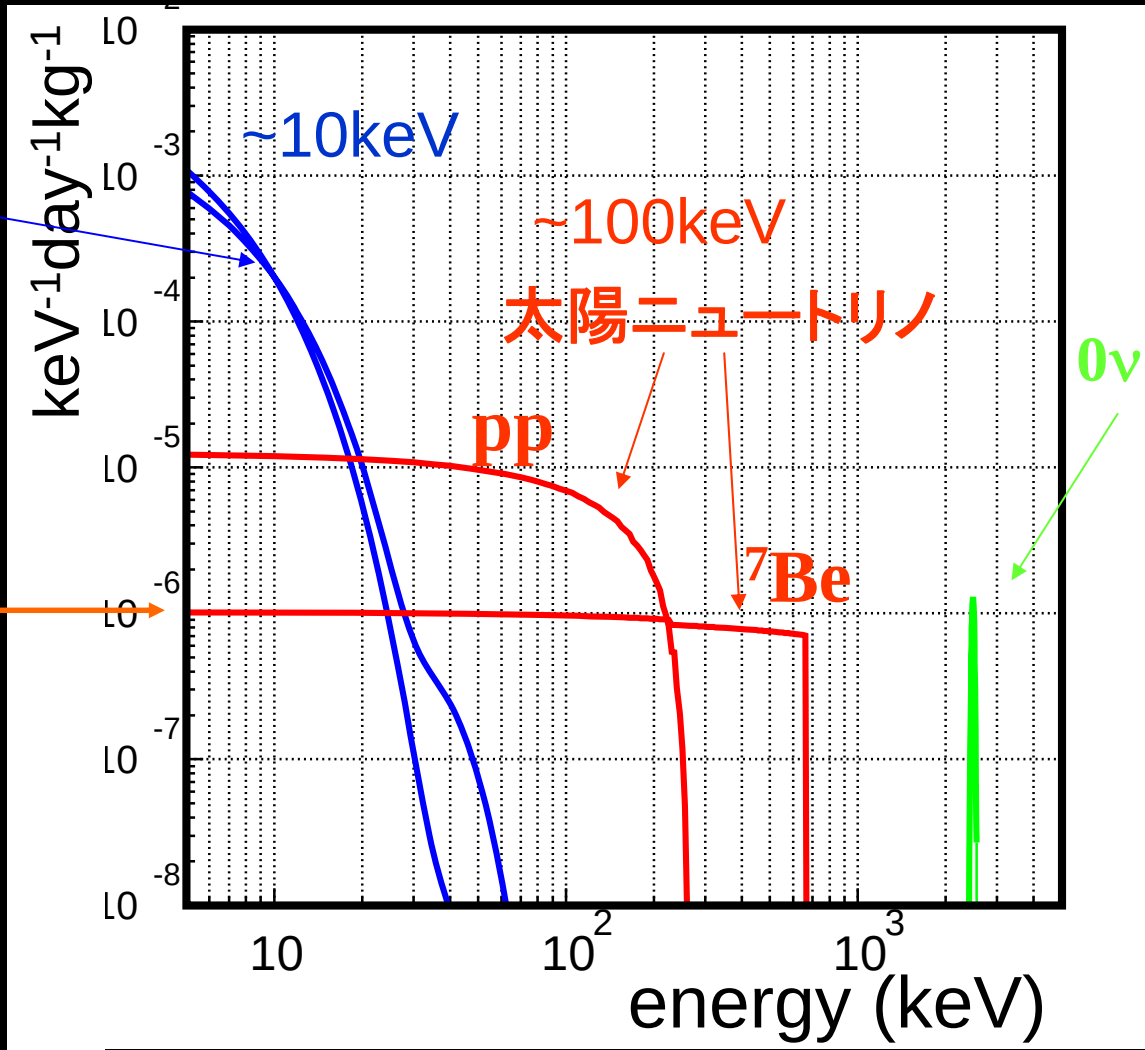




それぞれの物理から期待される信号

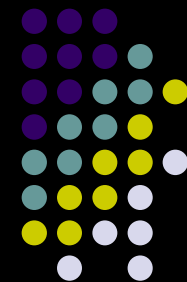
暗黒物質
例: 10^{-44} cm^2
(50,100GeV)

1トン
1日1MeV幅
1事象



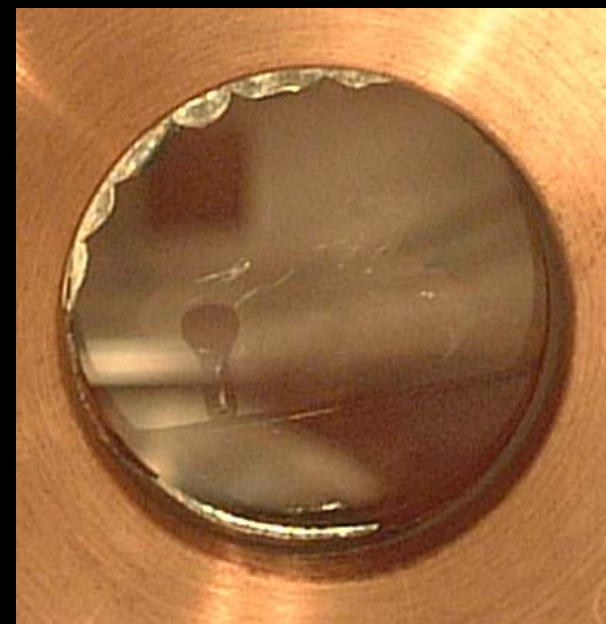
$0\nu 2$ 重ベータ崩壊
~1000keV

低エネルギー、低バックグラウンドのフロンティア



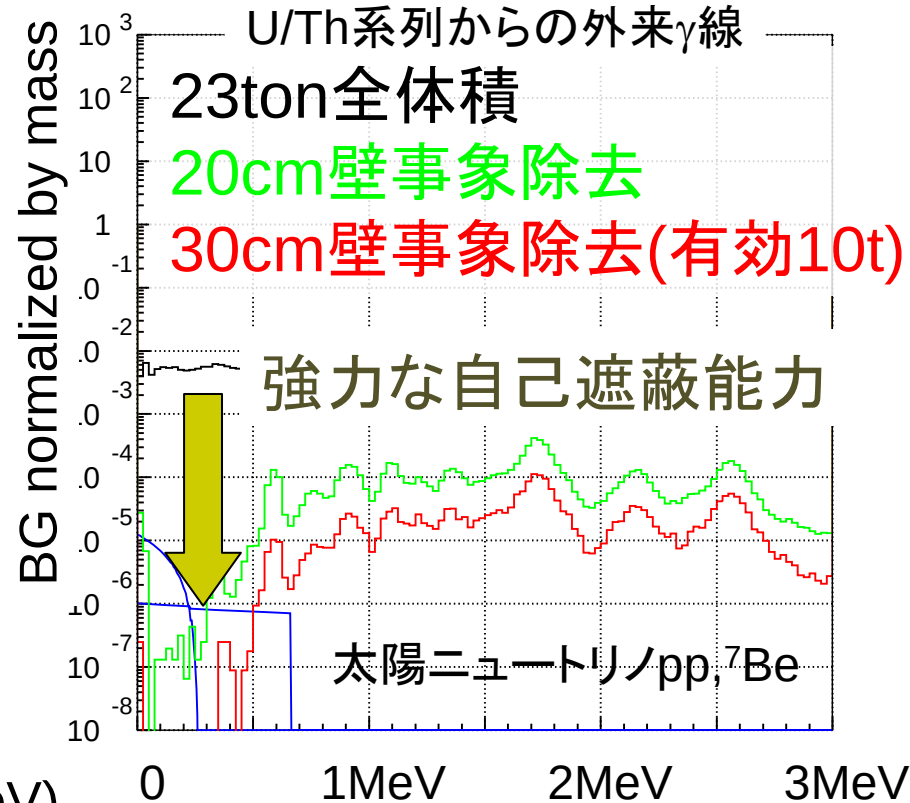
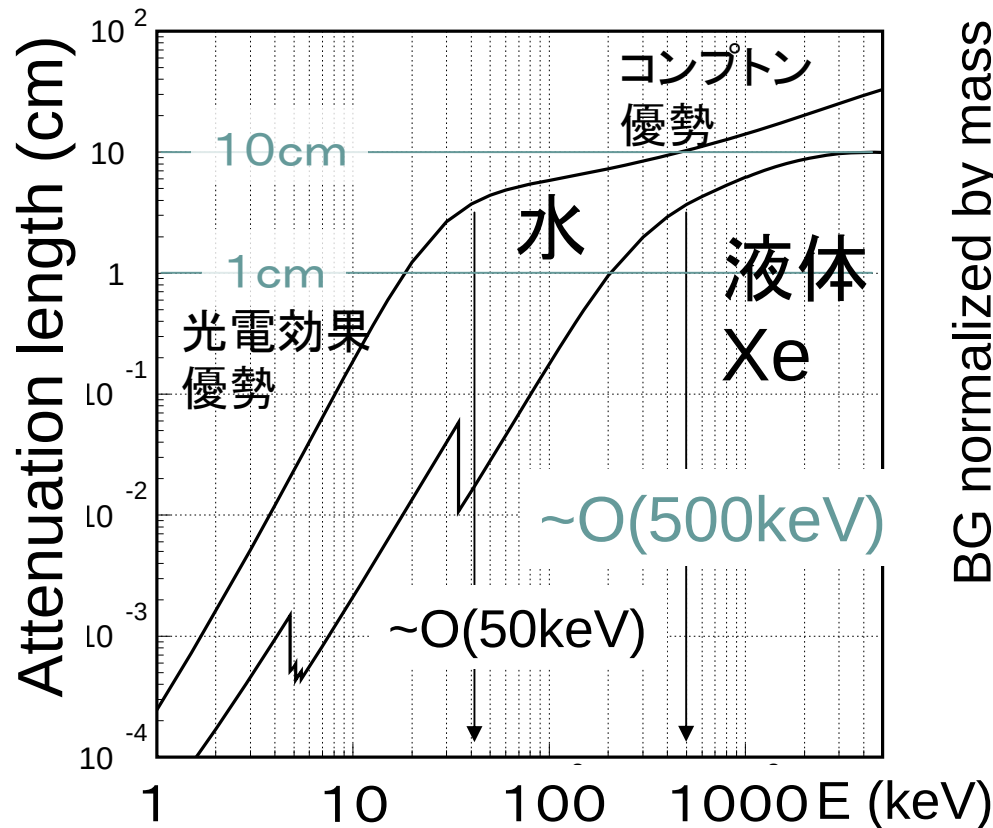
何故液体キセノンか

- **大光量** (~ 42000 photons/MeV: NaI(Tl)相当の光量)
- **小型** ($\rho=3\text{g/cc}$, 10t 測定器は直径 1.9m)
- **外部バックグラウンドは**
自己遮蔽 ($Z=54$, $\rho=3\text{g/cc}$) で減衰させる
- **内部バックグラウンド**
純化 (蒸留, コラムなど): 実験開始後も可能
長寿命Xe同位体がない
同位体分離も必要なら可能
 ^{14}C がない: 低エネルギーまで測定可能
- 発光波長 (175nm, 光電子増倍管で読出せる)
- 運転温度 ($\sim 165^\circ\text{K}$, 液体ネオン $\sim 27^\circ\text{K}$, 液体ヘリウム $\sim 4^\circ\text{K}$)
- ^{136}Xe (自然存在比8.86%) は、2重ベータ崩壊核



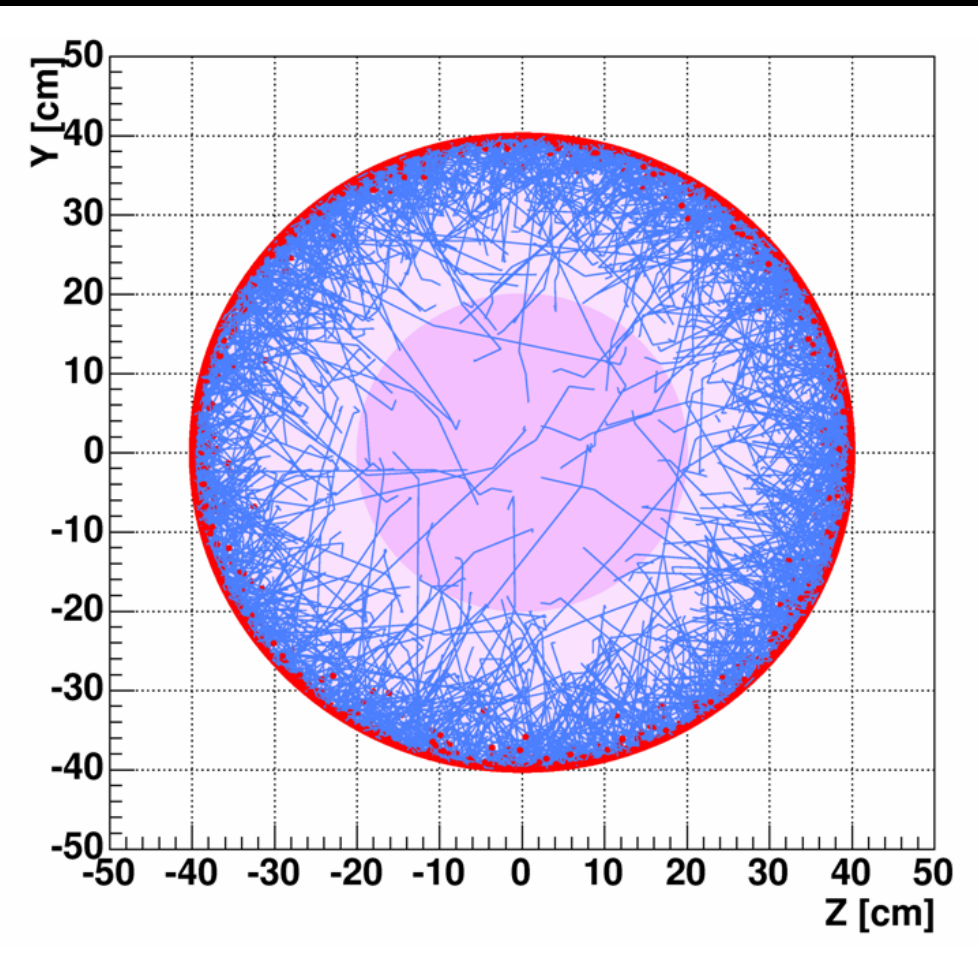
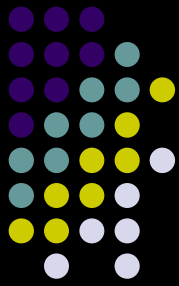


自己遮蔽能力による低バックグラウンド化



1. 大光量 (42 photon/keV ~ NaI(Tl))による高精度な事象再構成能力
2. 大きな原子番号のおかげで強力な自己遮蔽→コンパクト
自己遮蔽により低いバックグラウンドが得られる

自己遮蔽効果の視覚化してみる



液体キセノンの外から、
ガンマ線が入射する様子。

青線: ガンマ線の飛跡

濃ピンク: 有効体積

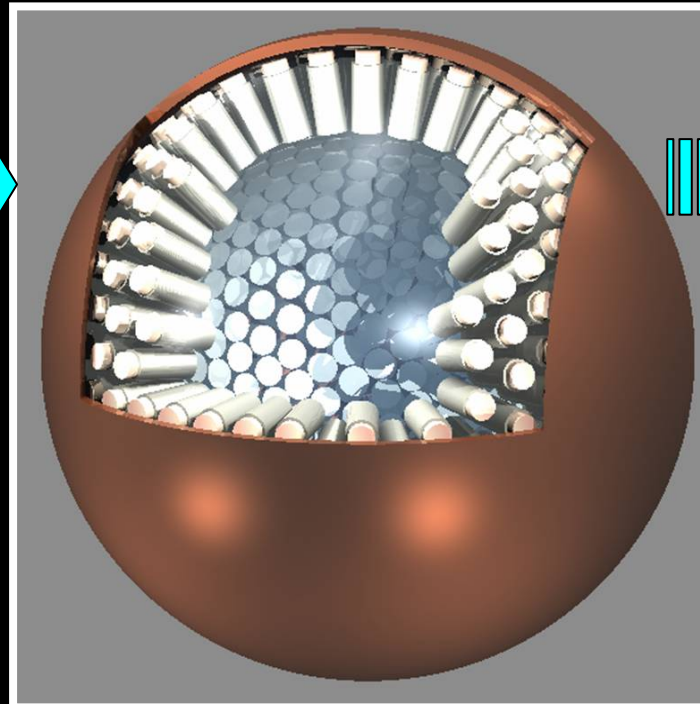
外来ガンマ線の殆どは
外殻で吸収され、
有効体積内部には殆ど
入射してこない。
入射したものも、エネルギー
が高いものだけ。

- <500keVの低エネルギーにおいて、有効体積中のバックグラウンドを低くできる理由となる。

検出器デザイン、サイズ、戦略



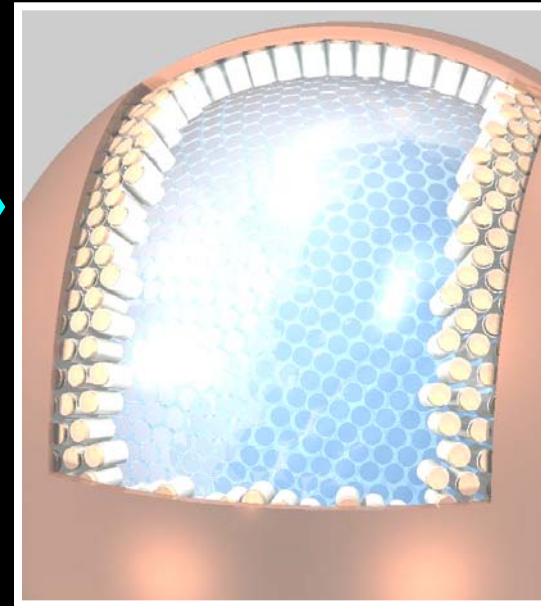
現状; 100kg実験装置による開発研究



次期計画:

約1トンの液体キセノン
による暗黒物質の探索

今までの観測と比べて100倍以上の感度を持つ。今後5年ほど
でデザイン、建設、データ収集、
解析を行いたい。



将来計画:

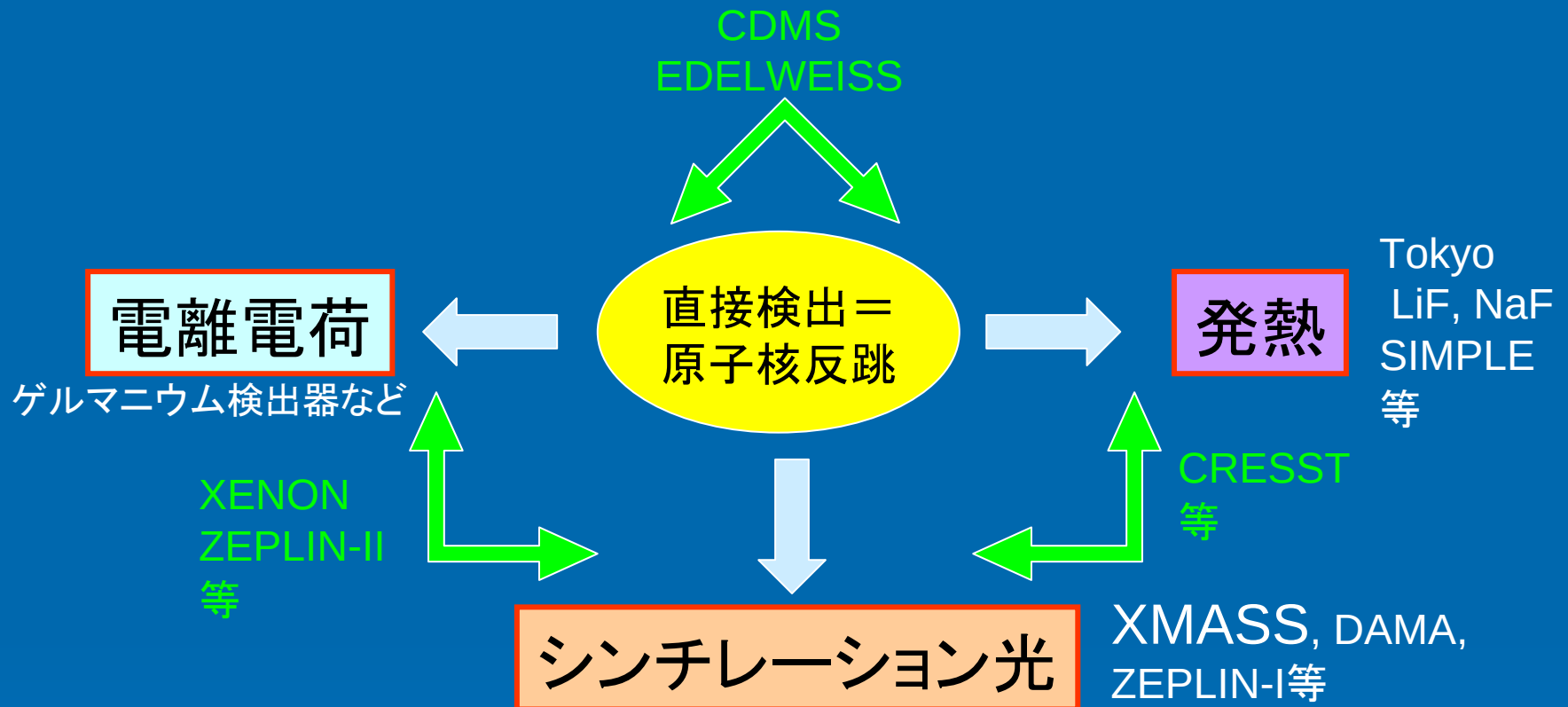
2重ベータ崩壊による
ニュートリノ絶対質量の
測定や低エネルギー太陽
ニュートリノ観測も視野
に入れたO(10トン)
クラスの大型実験装置。
2重ベータ崩壊探索実
験の具体案は検討中。

暗黒物質探索

(今後5年の主たる目標)

=WIMPs

ダークマター直接検出の方法、実験の種類

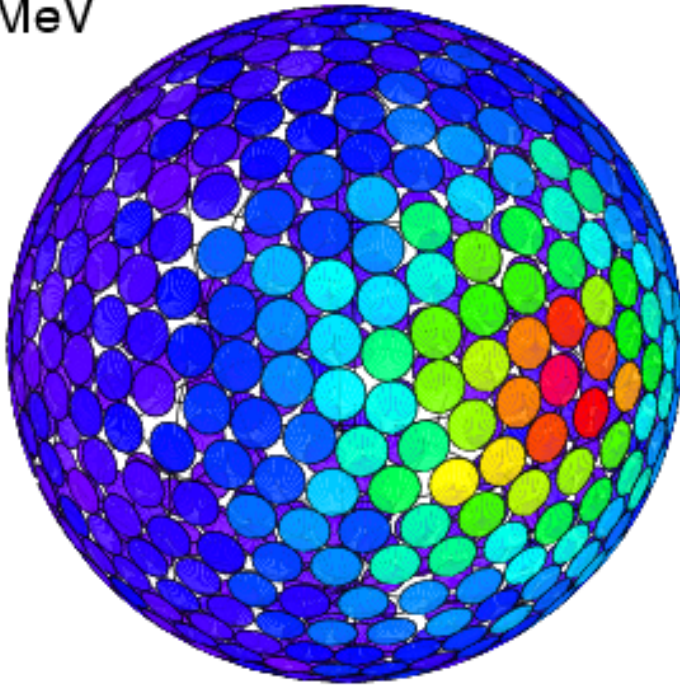


「電離電荷」、「発熱」、「シンチレーション光」を測る実験が進められている。

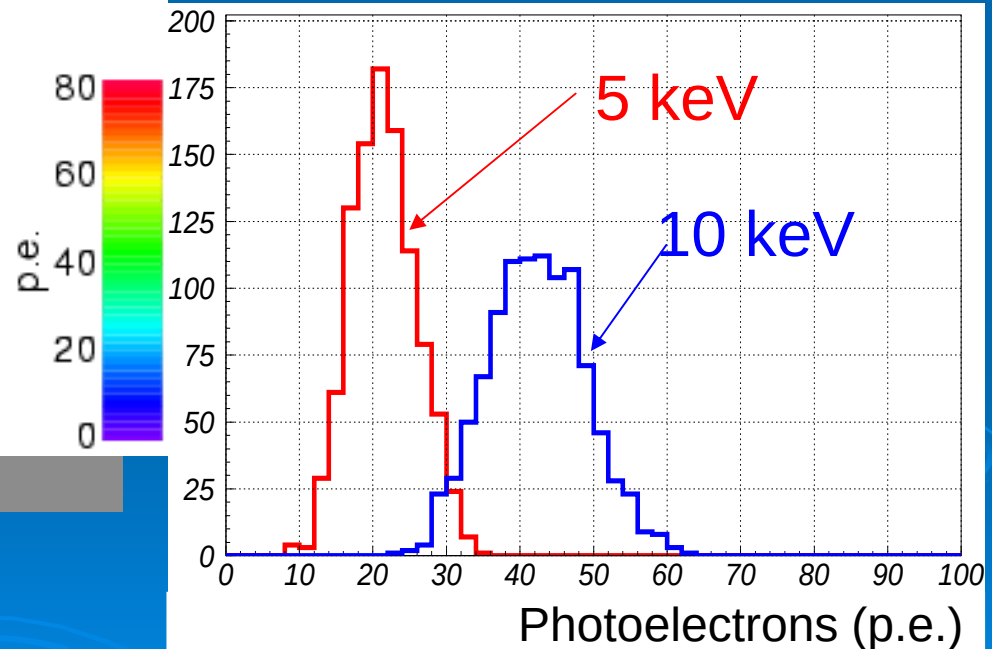
バックグラウンドを減らすために、これらの方法を組み合わせたり、大型装置による自己遮蔽効果を使う。

XMASS 800kg実験装置

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

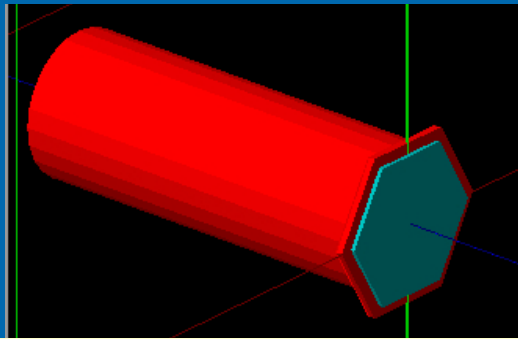


- 800kg 液体キセノン
- 約800本のPMT
- ~70% 光電面被覆
- ~4 p.e./keV



光の密度分布によって衝突点を求め、光の大きさからダークマターによる反跳エネルギーを求める。

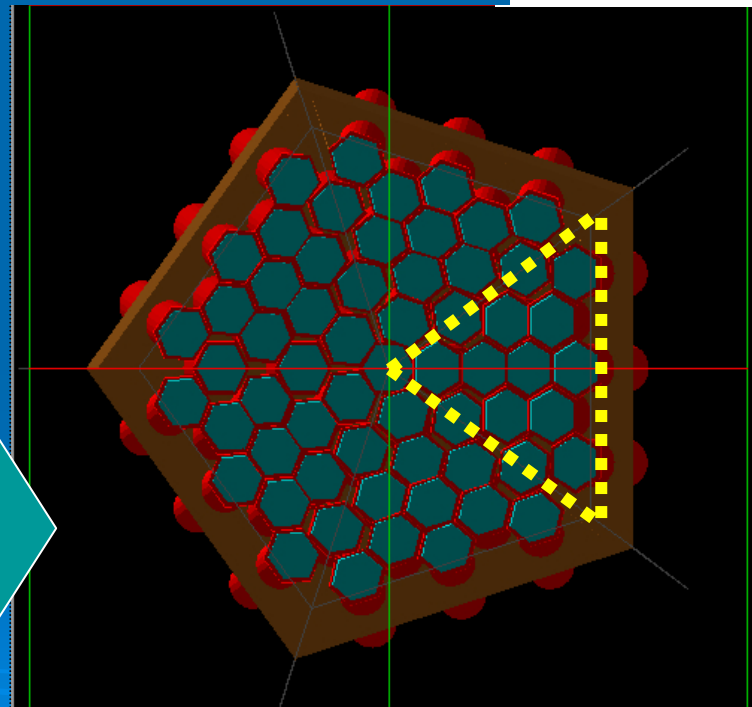
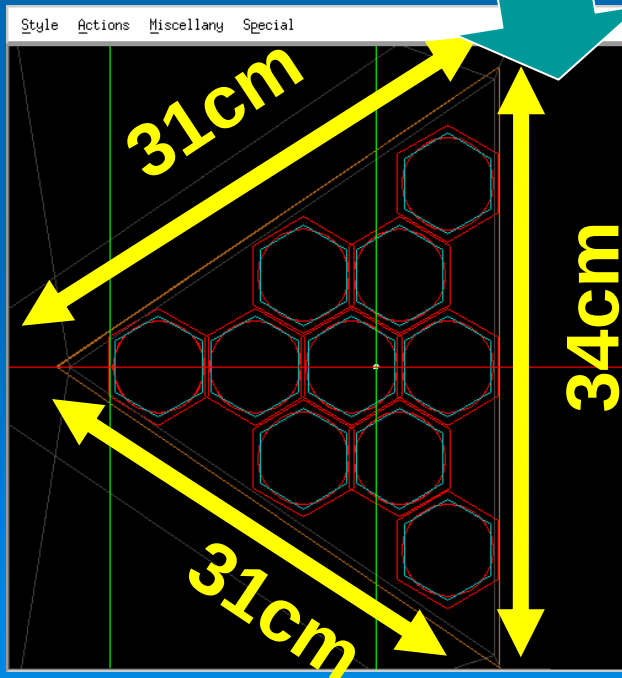
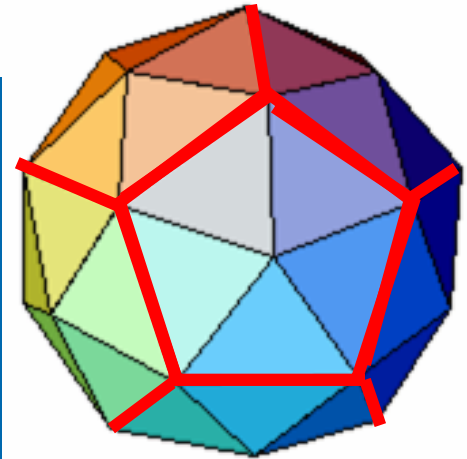
800kg測定器構造



3角形あたり10本の
PMT

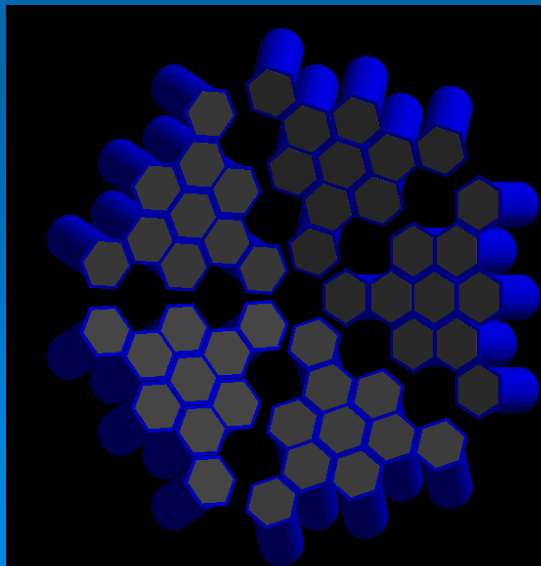
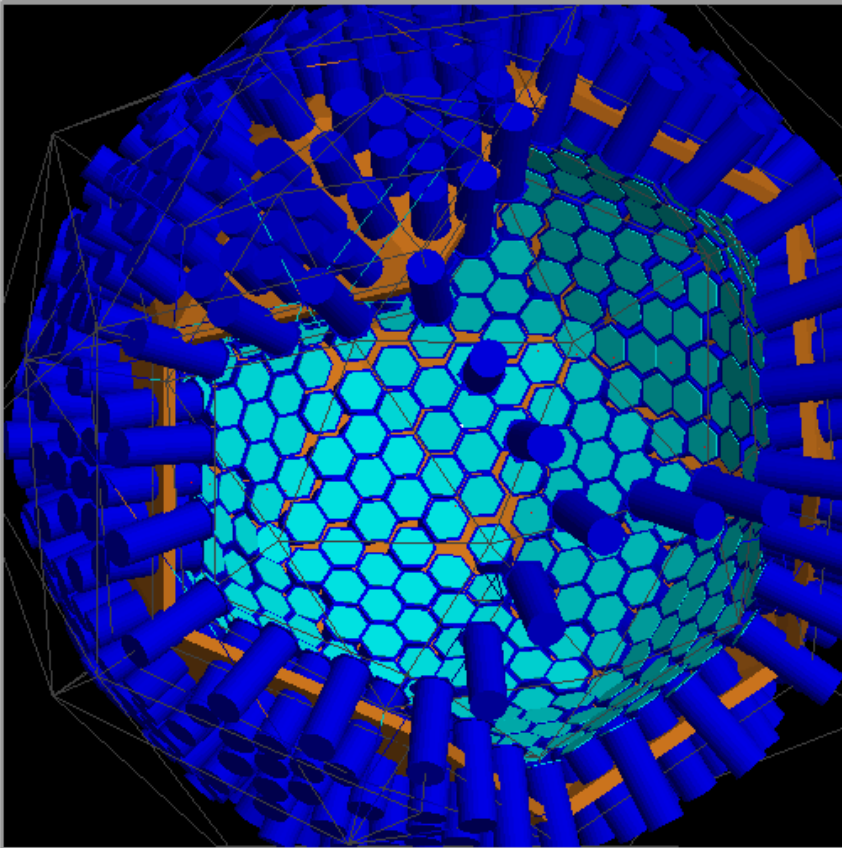
1. 基本は12面体
2. 12面体の一つの5角形に
5つの三角形がついている

$$12 \times 5 = 60 \text{ 面体}$$



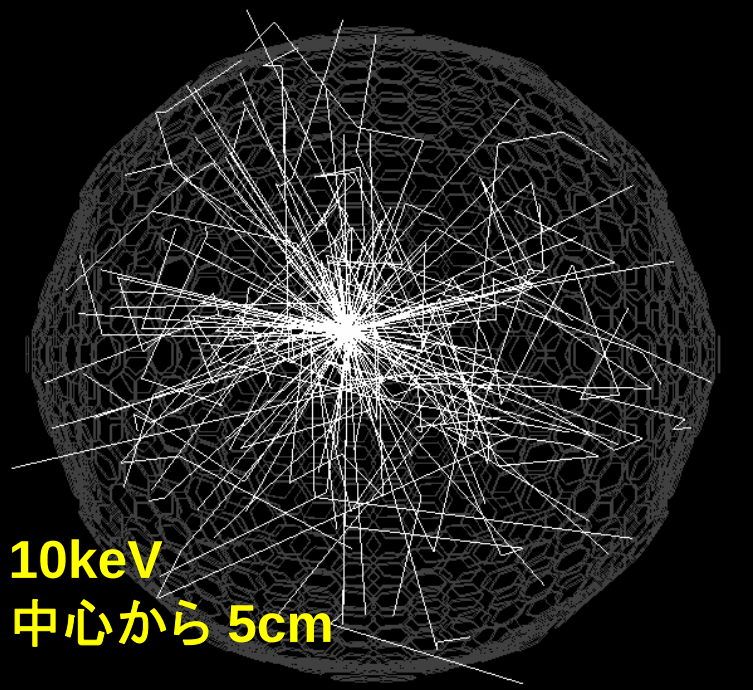
5つの3角形で12面体の
一つの面にあたる部分を構成

測定器構造

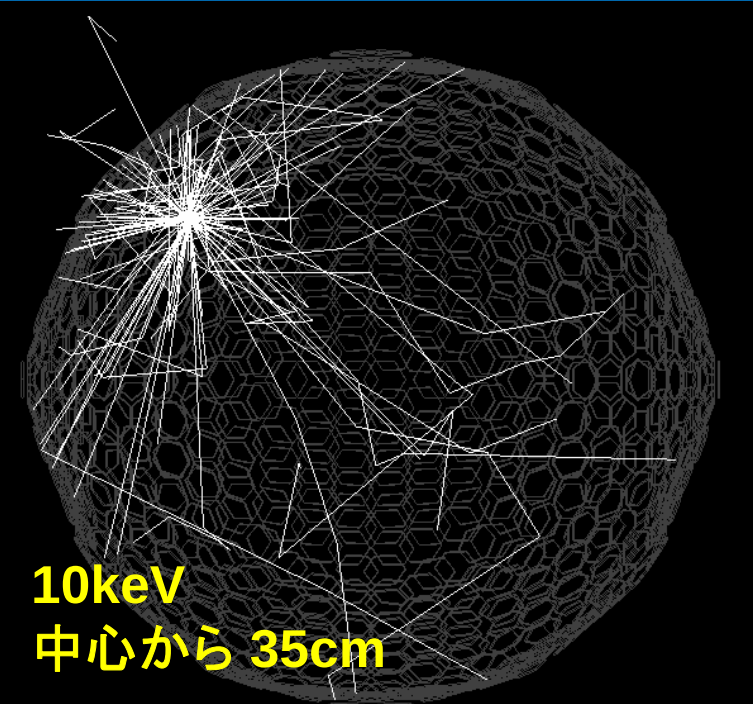


- 合計60面
- 10PMT/三角形×60面
=600、隙間に212、
計812PMT
- Photo coverage ~70%
- 中心から光電面まで
~44cm
- PMTは液体キセノンに
浸っている

- シンチレーション光のトラッキングを行い、検出器の性能評価を進めている。
- 重要な点は「**壁効果**（事象再構成のミス）」が十分に低減出来ているか。シミュレーションからデザインへフィードバックを行い設計中。
- 同時に、具体的製作方法についても検討を開始している。



10keV
中心から 5cm

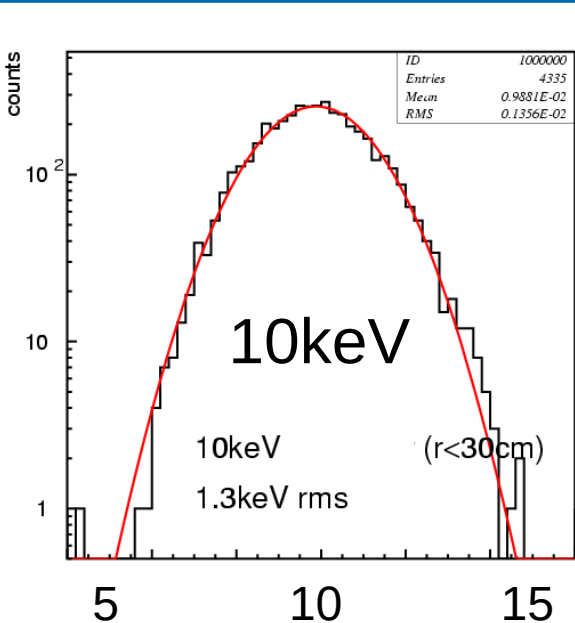


10keV
中心から 35cm

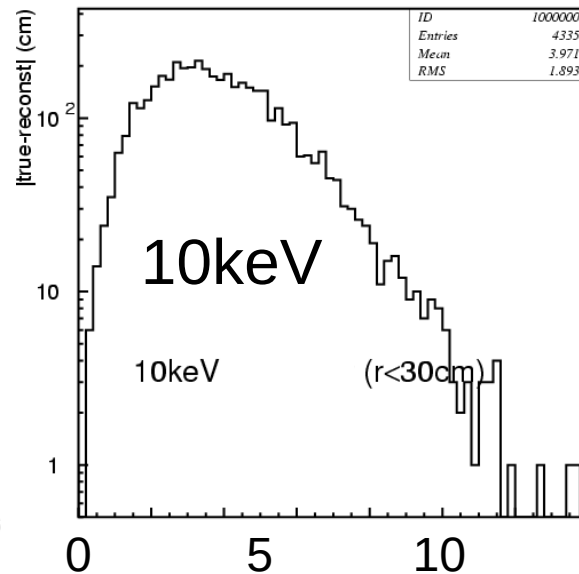
ダークマターの信号はどう見える？

➤ 暗黒物質の原子核反跳による発光はおよそ10keV程度

半径30cm以内に点状の事象を発生してMC study

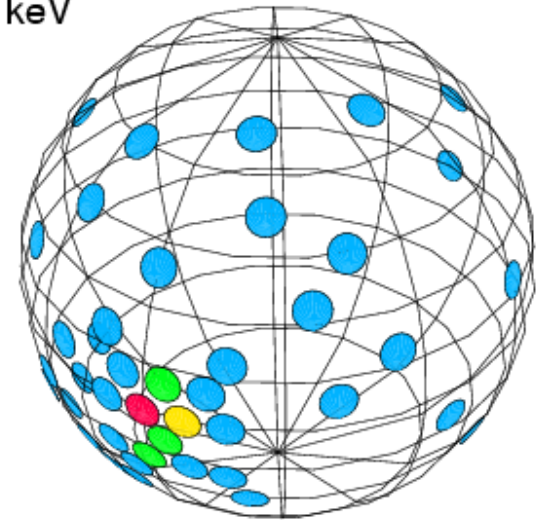


再構成後のエネルギー(keV)



真の位置とのずれ(cm)

Pos: (0.0, -30.0, 0.0)
E: 10.0 keV



10keVでも事象の再構成が十分に可能
➔ 5keV程度のthresholdを狙う

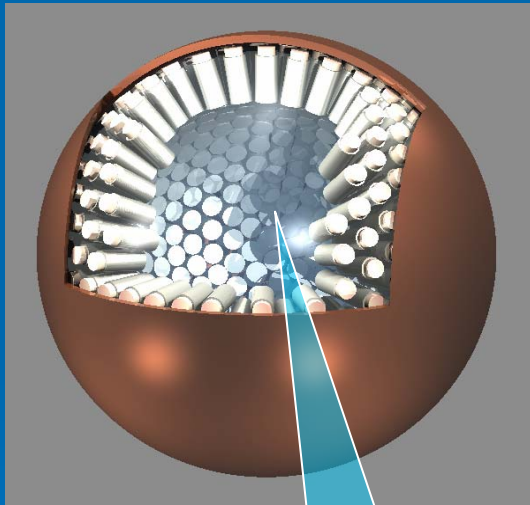
バックグラウンド源の 同定と低減

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

Self
shield

μ

No long
life RI



H₂O
shield

Distillation
etc.

neutron
 γ from rock

α, β, γ rays from
 ^{85}Kr , ^{42}Ar , U/Th

- 液体キセノンの回りには、様々なバックグラウンド源があり、それらを必要とするレベルまで低減できる見通しを得てきた。

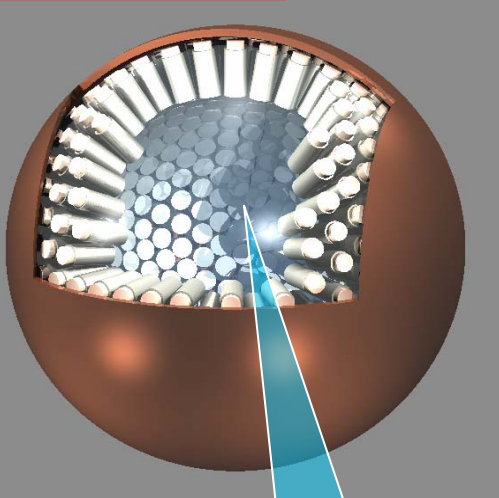
バックグラウンド源の 同定と低減1

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

Self
shield

μ

No long
life RI



H₂O
shield

Distillation
etc.

neutron
 γ from rock

α, β, γ rays from
 ^{85}Kr , ^{42}Ar , U/Th

- 液体キセノン最近傍にあるPMTからのガンマ線は、キセノンの自己遮蔽により低減できる。(自己遮蔽はプロトタイプ検出器で実証済み)

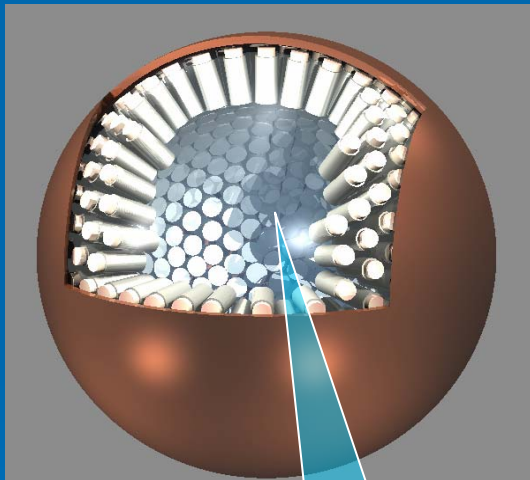
バックグラウンド源の 同定と低減2

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

Self
shield

μ

No long
life RI



H₂O
shield

neutron

γ from rock

Distillation
etc.

α, β, γ rays from
 ^{85}Kr , ^{42}Ar , U/Th

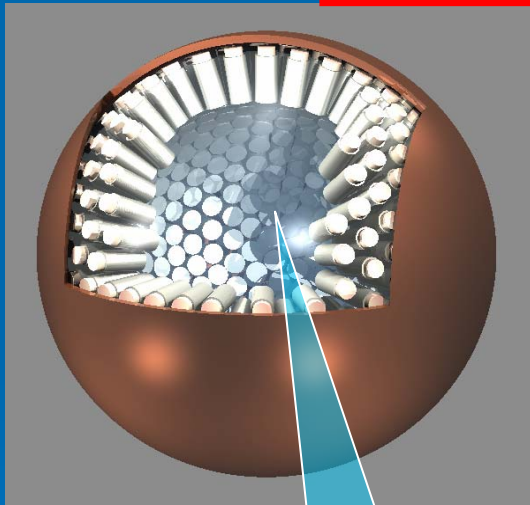
- 岩盤からの高速中性子やガンマ線は、250cmの厚みの水遮蔽体で低減。
- ガンマ線は50cmの厚みで1/10に低減できる。
- 高速中性子は200cmの水で2次ガンマ線も含めて十分低いレベルにできる。

バックグラウンド源の 同定と低減3

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

Self
shield

μ
No long
life RI



H₂O
shield
neutron
 γ from rock

Distillation
etc.

α, β, γ rays from
 ^{85}Kr , ^{42}Ar , U/Th

- ミューオンによる核
破砕は、神岡では
暗黒物質探索には
問題にならないレ
ベルだと見積もら
れている。(太陽
ニュートリノの場
合は調査が必要)
- 長寿命アイソトプ
がない強みがある。

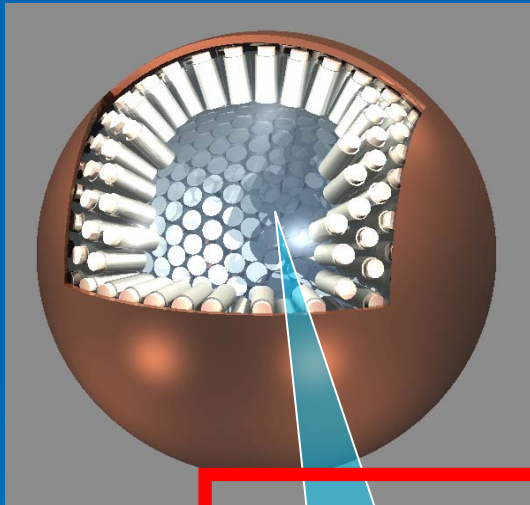
バックグラウンド源の 同定と低減4

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

Self
shield

μ

No long
life RI



H₂O
shield
neutron
 γ from rock

Distillation
etc.

α, β, γ rays from
⁸⁵Kr, ⁴²Ar, U/Th

➤ 液体キセノン中の放射
性不純物について
プロトタイプ実験装置
での結果

クリプトン: 蒸留塔で目標
の5倍(再度蒸留す
れば達成可能)

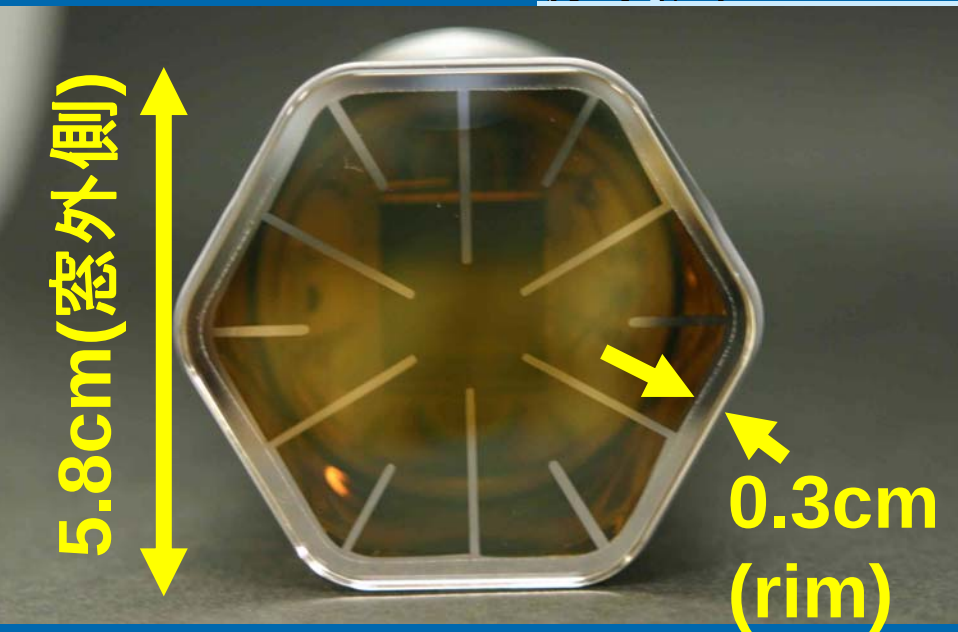
ウラン系列: ラドンが目標
まで30倍だが、崩壊
して減少する可能性
あり。

トリウム系列: 目標の30
倍の上限値が得られ
ている。

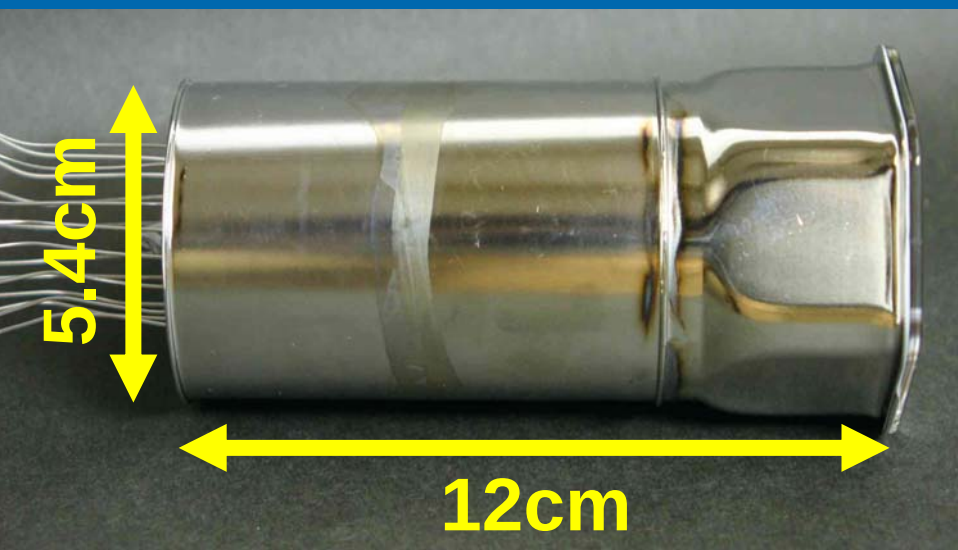
➔ 蒸留サイクルで低減。

PMTの開発状況は好調

浜松R8778MOD(hex)



- 六角形Quartz window
- 有効面積:50mm ϕ (min)
- QE 28~30% (target)
- さらなるバックグラウンドの低減を適用した



- **試作品完成**
- 現在PMTの特性調査中、その後バックグラウンドレベルを確認予定

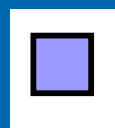
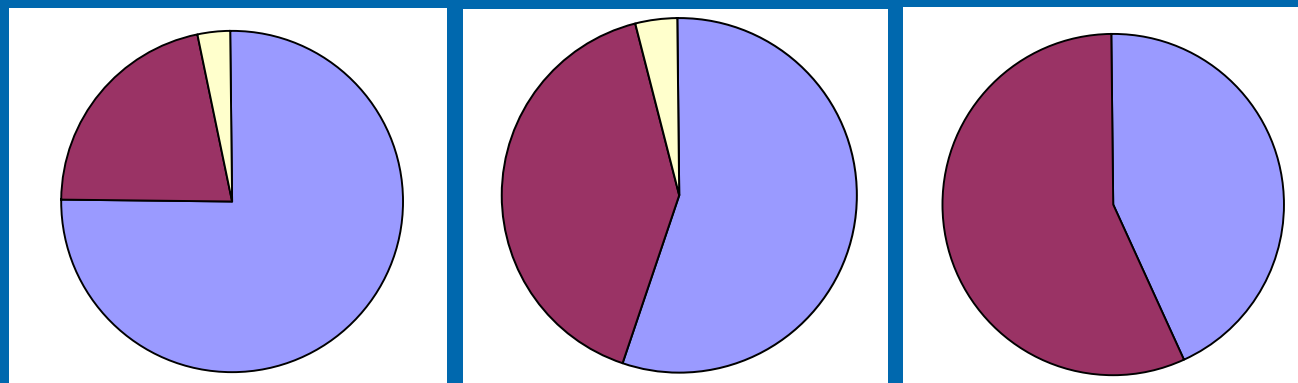
改良前のPMTの放射能の評価と対策

有限値を与えたものだけを表示(上限値のみの部品は再測定)

ウラン系列

トリウム系列

^{40}K

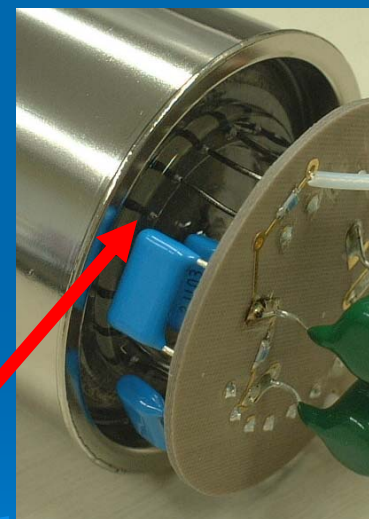


ダイノードを固定しているセラミックの絶縁部品
→ 石英を用いてセラミックを放逐し動作成功



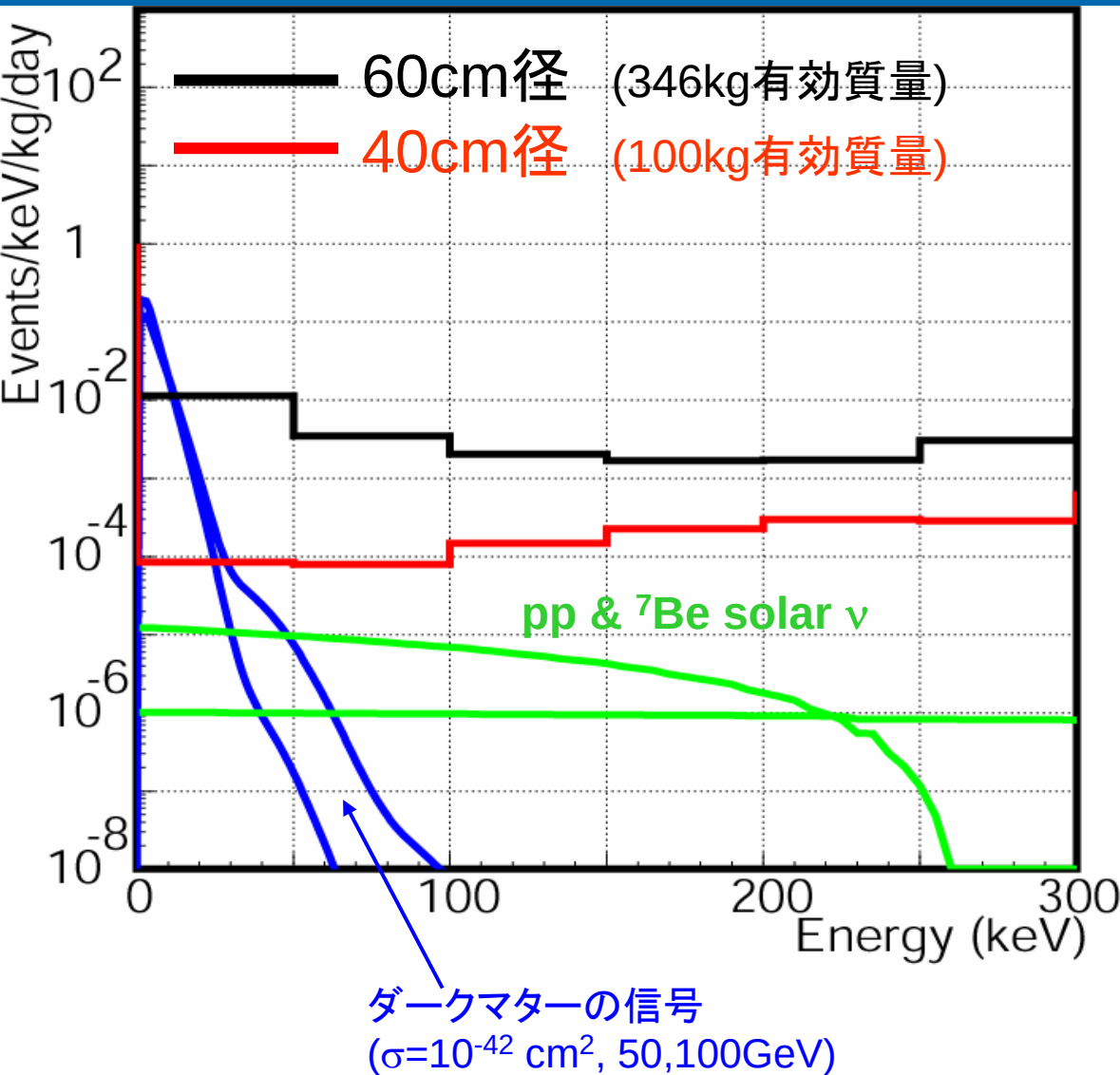
導線を出したり、封じきりのためのガラス部分

→ ガラスを必要な少量分しか使用しないように工夫し成功



これらの改善を行った試作PMTが完成、本作が可能となった

XMASS: 800kg検出器でのBGLレベル



主たるバックグラウンド源は増倍管。

外部由来ガンマ線は無視できる程度。

内部バックグラウンドは、各成分を増倍管由来の1/4づつに押さえるように要求。

左の図はガンマ線の寄与。

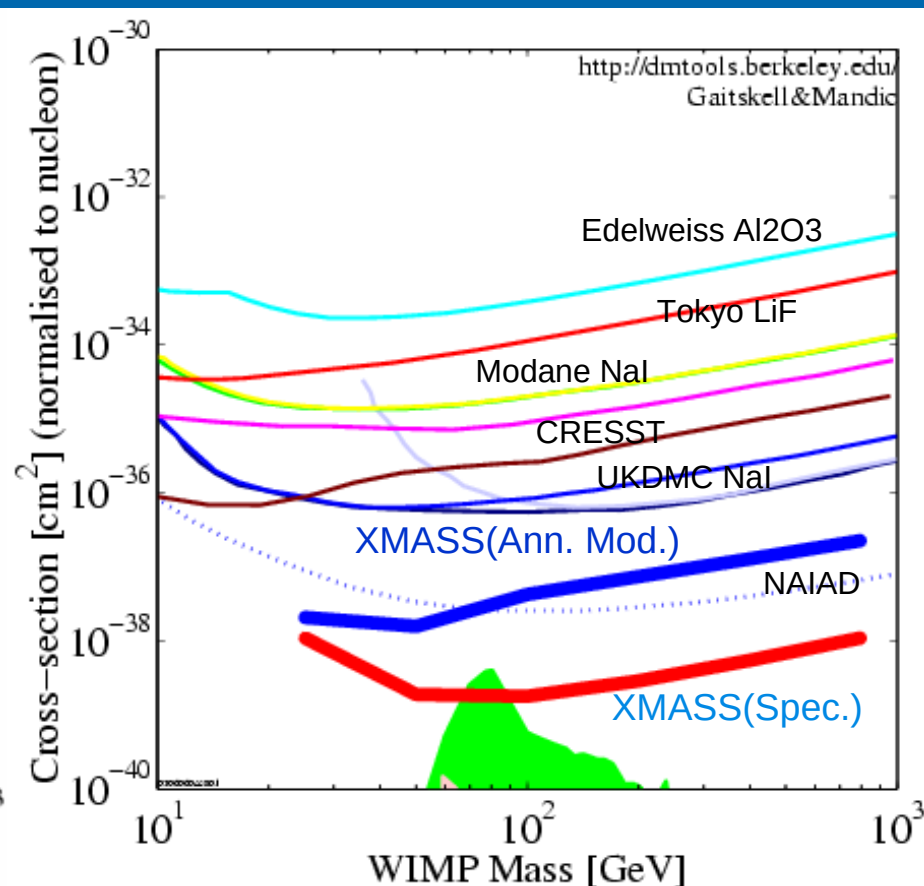
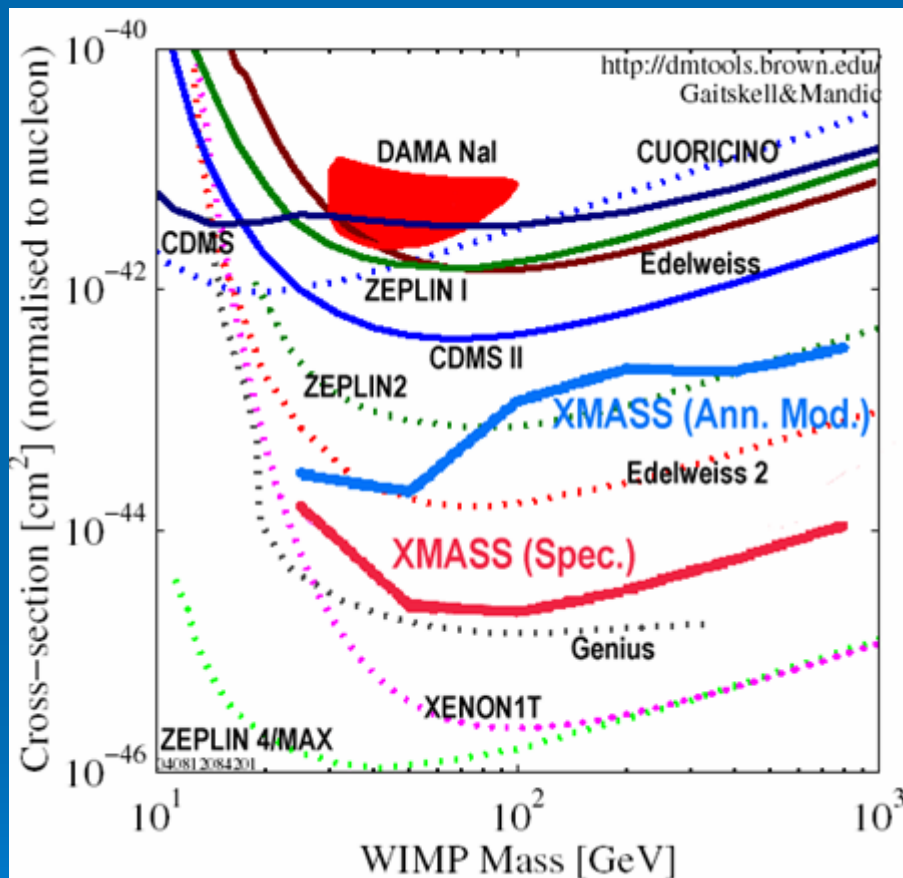
XMASSの感度

内部バックグラウンドの寄与も考慮

データ量: 0.5 ton year (5年)

$E_{th} = 5$ keVee, 3σ discovery

(パルス波形解析はまだ入れずに)



➤ 予想達成感度

スピンに依存しない相互作用 10^{-45} cm^2

スピンに依存する相互作用 10^{-39} cm^2

Plots except for XMASS:
<http://dmtools.berkeley.edu>
Gaitskill & Mandic 23

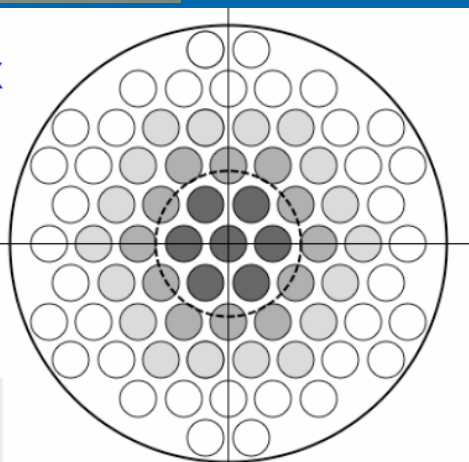
暗黒物質探索の世界情勢

SuperCDMS

- Ge & Si crystal
- phonon-charge
- CDMSII reported lowest limit $1.3 \times 10^{-43} \text{cm}^2$
- Soudan $\rightarrow$ SNO lab
- A27kg (5yr) $\rightarrow$ B145kg (+3y) $\rightarrow$ C1100kg
- Target $\sim 10^{-45} \text{cm}^2 \rightarrow \sim 10^{-46} \text{cm}^2 \rightarrow \sim 10^{-47} \text{cm}^2$



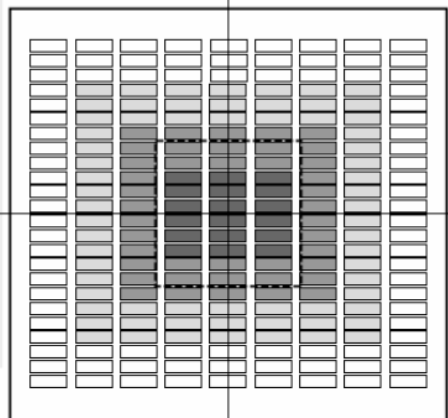
1000 kg (100x
the detector
volume)
in 30x the
volume



SuperCDMS - Phase A:
3"x1" => 0.64 kg Ge
7 x 6-Det Towers =
42 Dets => to 26.7 kg Ge
Soudan -> SNOLAB
SUF testing (2 batches)

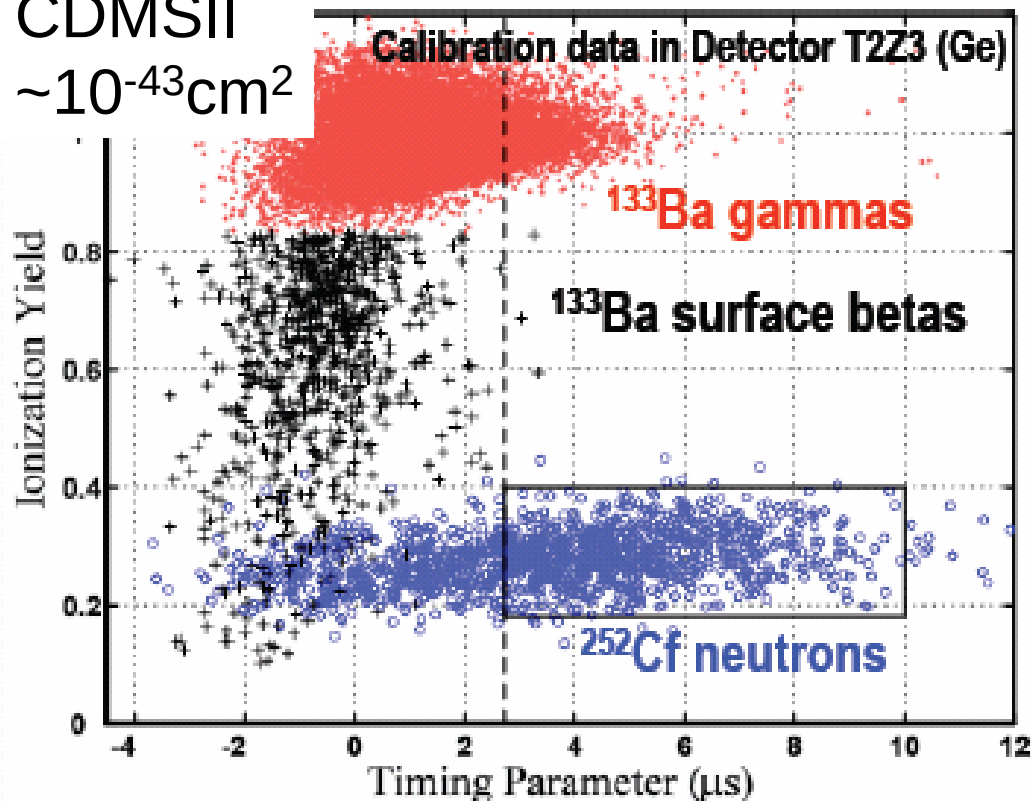
SuperCDMS - Phase B:
3"x1" => 0.64 kg Ge
19 x 12-Det Towers =
228 Dets => to 145 kg Ge
Soudan/SUF testing
(6 batches)

SuperCDMS - Phase C:
3"x1" => 0.64 kg Ge
73 x 24 Det Towers =
1752 => to 1,113 kg Ge
Soudan/SUF testing
(45 batches)

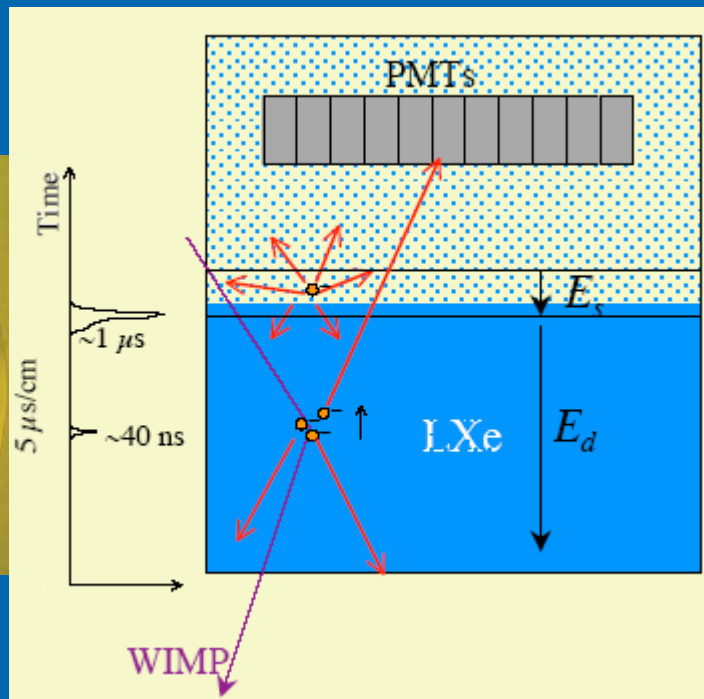
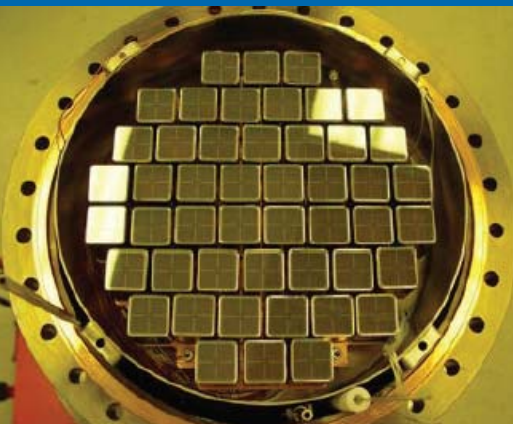


CDMSII

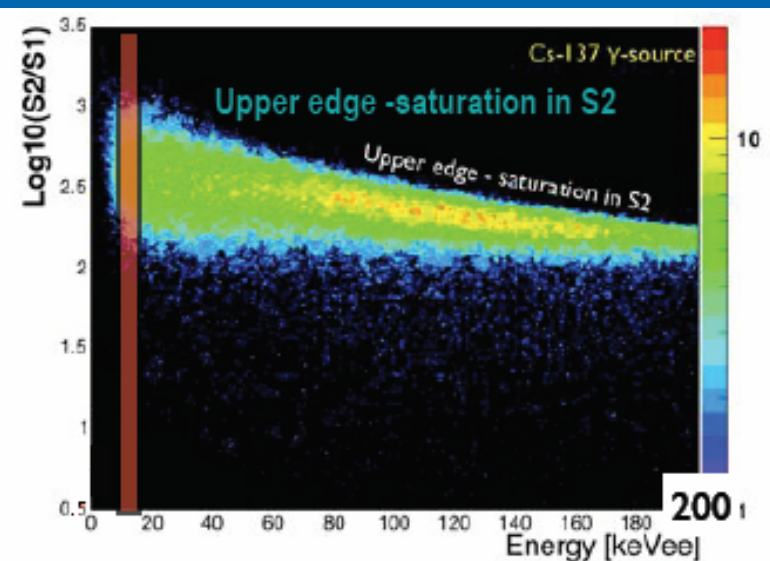
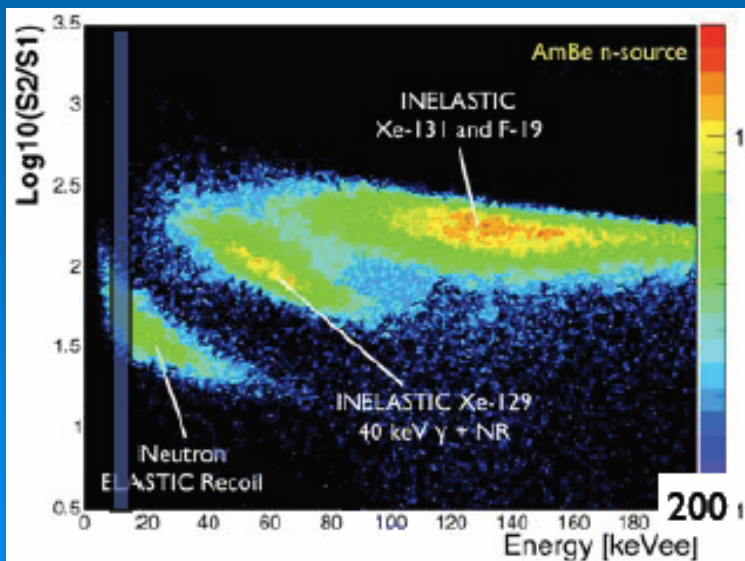
$\sim 10^{-43} \text{cm}^2$

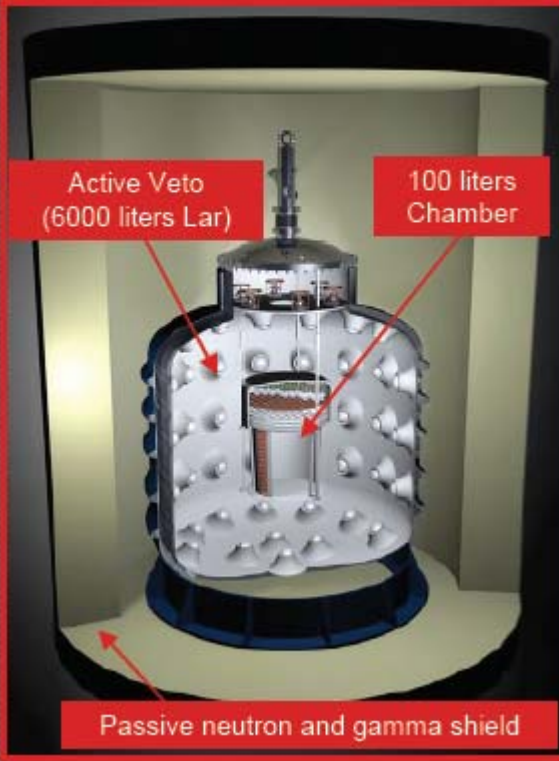


XENON



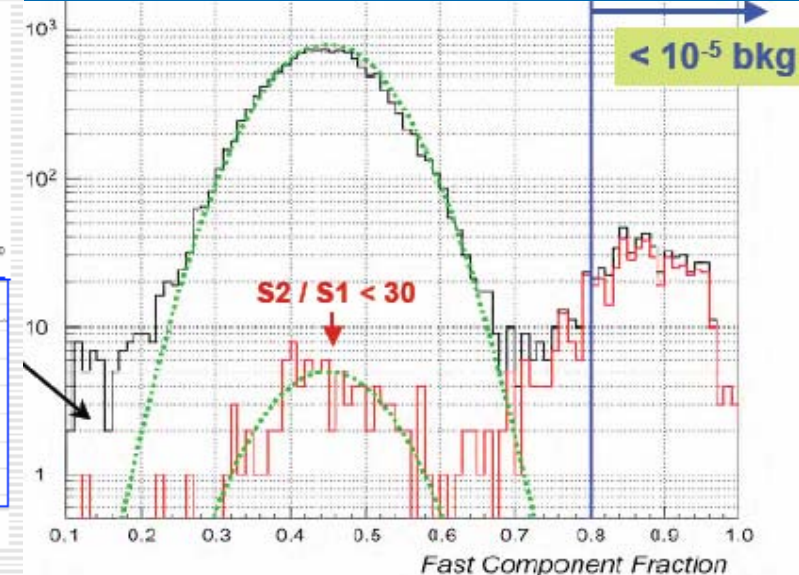
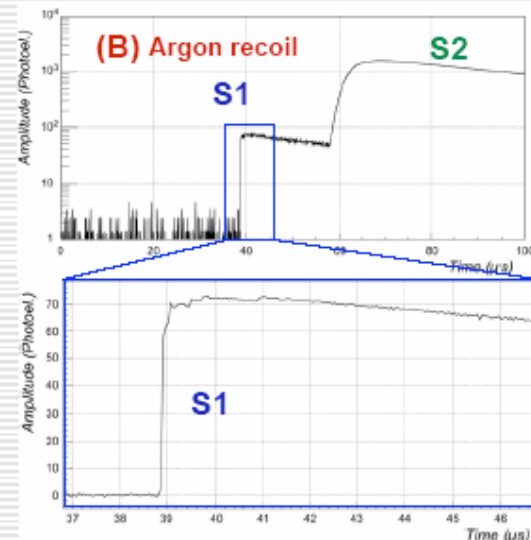
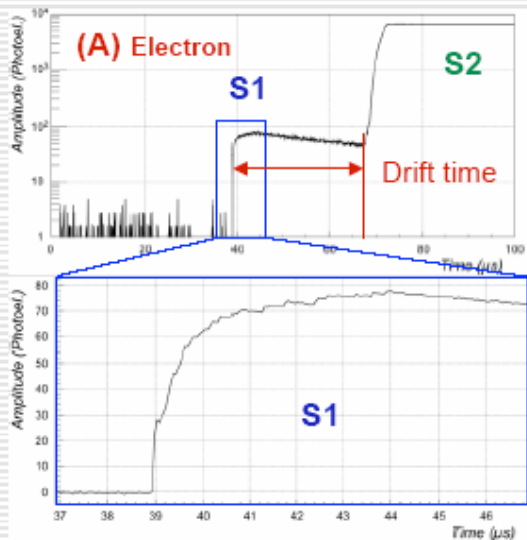
- Liquid Xenon
- Gran Sasso
- Use two phase
- scintillation-ionization
- 10kg (this month) → 100kg (+3yr) → 1ton
- Target $\sim 10^{-46} \text{ cm}^2$





WARP

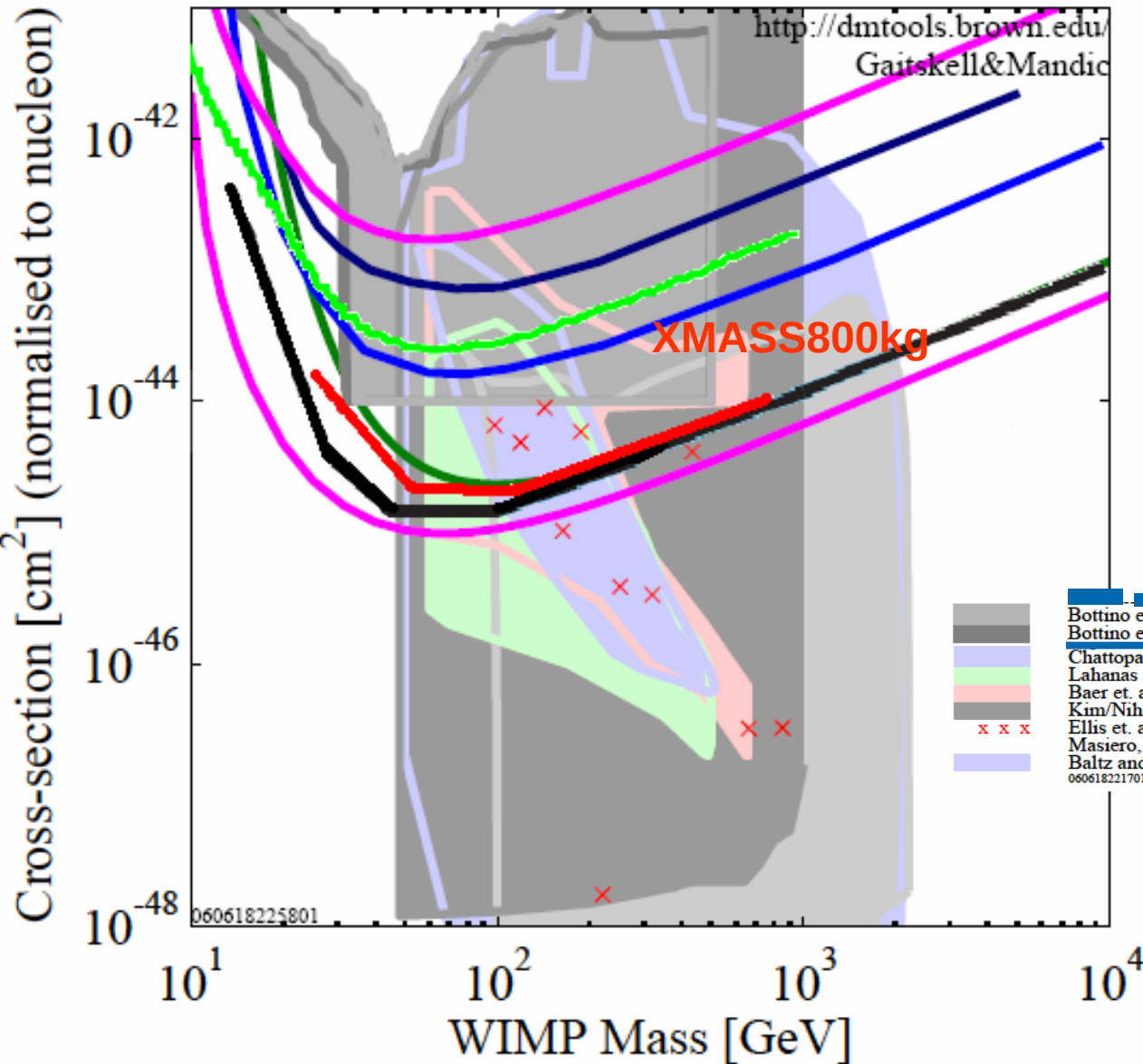
- Liquid Ar at Gran Sasso
- Use two phase
- scintillation-ionization discrimination
 - Scinti/ionization
 - Rise time of scintillation
- Need to reject 10^8 decays of ^{39}Ar ! (0.87Bq/kg)
- 3kg(done)→140kg (2006-)→1ton
- Target $\sim 10^{-42} \rightarrow \sim 10^{-45} \rightarrow \sim 10^{-46} \text{cm}^2$



➔ S1 = primary (prompt) scintillation signal

➔ S2 = secondary (delayed) scintillation signal (proportional to ionization)

Target sensitivity in near future (~5years from now)



CDMSII current
lowest limit

ZEPLINI

CRESTII

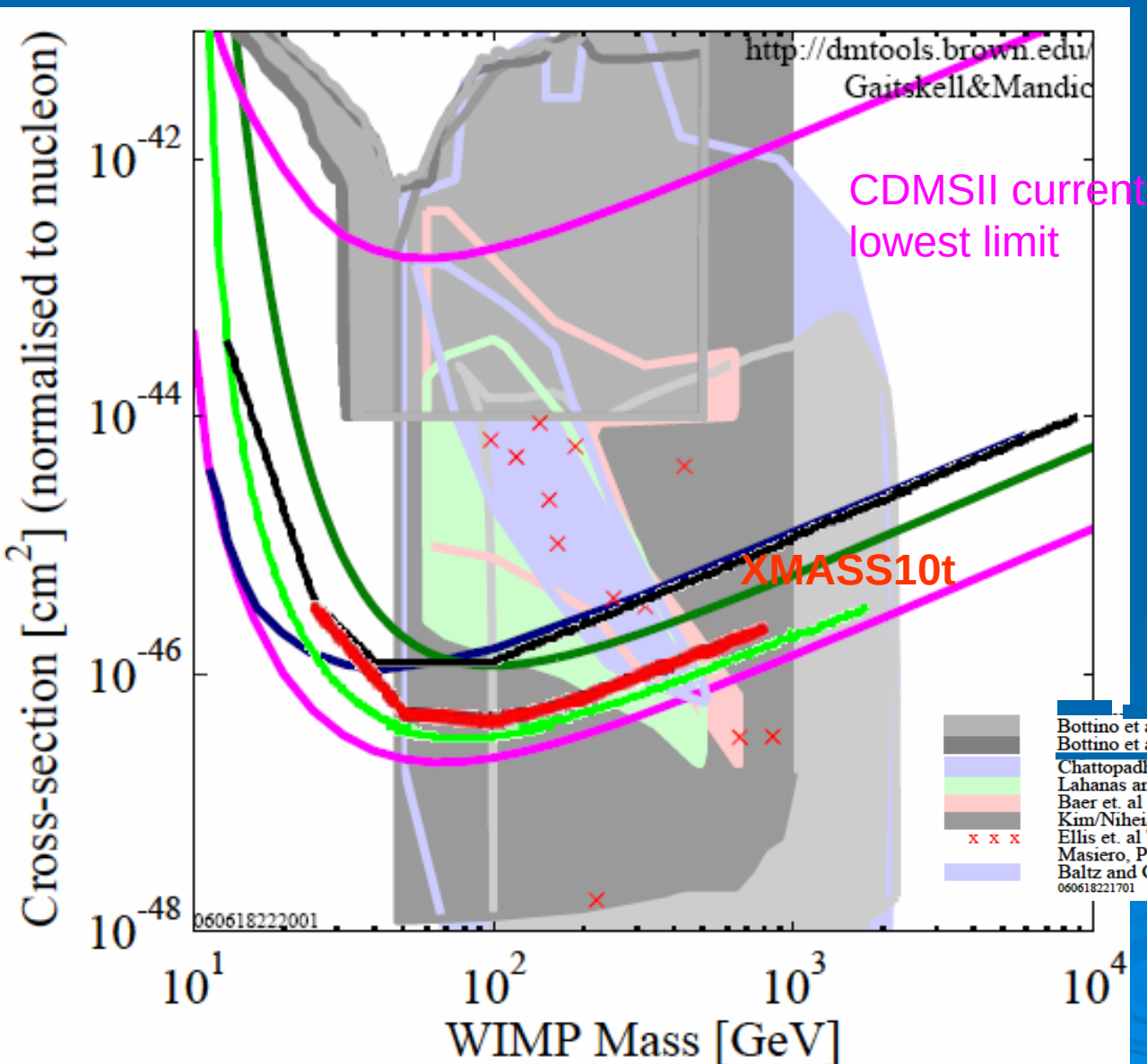
EDELWEISSII

XENON100kg

WARP140kg

SuperCDMS
phase A

Target sensitivity of future projects



テクニック:
Cryogenicか希ガスか

WARP1400kg
ZEPLIN MAX
XENON1t
EURECA
SuperCDMS
phase C

暗黒物質探索のまとめ

- 原子核反跳事象を見ることにより暗黒物質探索を行う。
- 水遮蔽体によるガンマ線・高速中性子遮蔽、自己遮蔽によるPMTガンマ線遮蔽、蒸留による内部バックグラウンド低減
- これらの技術により、暗黒物質探索をこれまでより100倍高い感度で実験を行う準備ができている。
- 世界的に近い感度を持つ実験が提案されている。すぐにでも実験を開始したい。

低エネルギー太陽ニュートリノ

motivations

➤ 太陽ニュートリノは、ニュートリノ振動が生じていると示されたが、全スペクトルを観測することにより、

v { 1, 太陽ニュートリノの99%はpp, ${}^7\text{Be}$ ニュートリノであるが、放射化学の方法でしか計られていない。 θ_{12} の1%オーダーの精度の高い測定。

2, 現在の理解(LMA解)が正しく反映されているか。

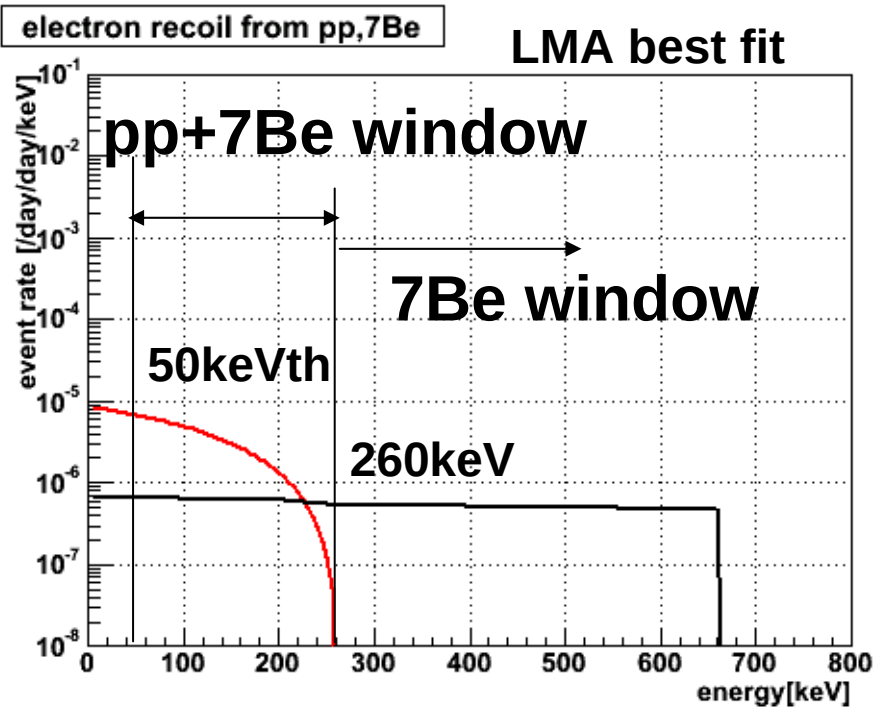
3, ニュートリノの他のnon standardな特性がないか。

astro4, 核融合によるエネルギーが太陽の全出力を与えているか(Ga実験のppの寄与は半分程度)。

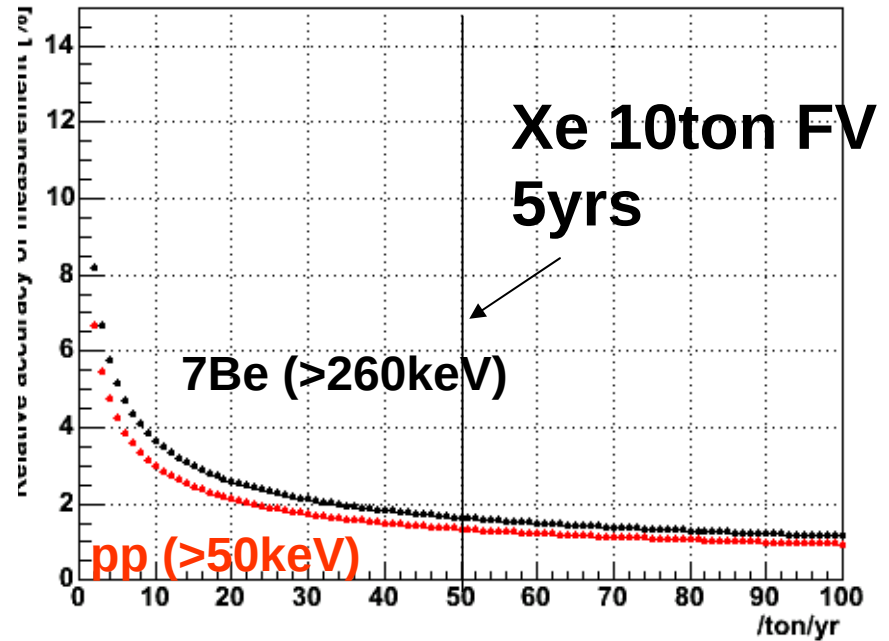
など、まだ太陽ニュートリノは重要な役割を果たす。

pp, ${}^7\text{Be}$, pep neutrinoの測定が明らかにする。

pp, ^7Be neutrino accuracy @ XMASS



pp, ^7Be neutrino accuracy



Expected event rate :LMA, 1/10ton/yr

pp (>50keV)	2350ev	} → 3570ev
^7Be (>50keV)	1220ev	
^7Be (>260keV)	750ev	

7Be : stat event rate

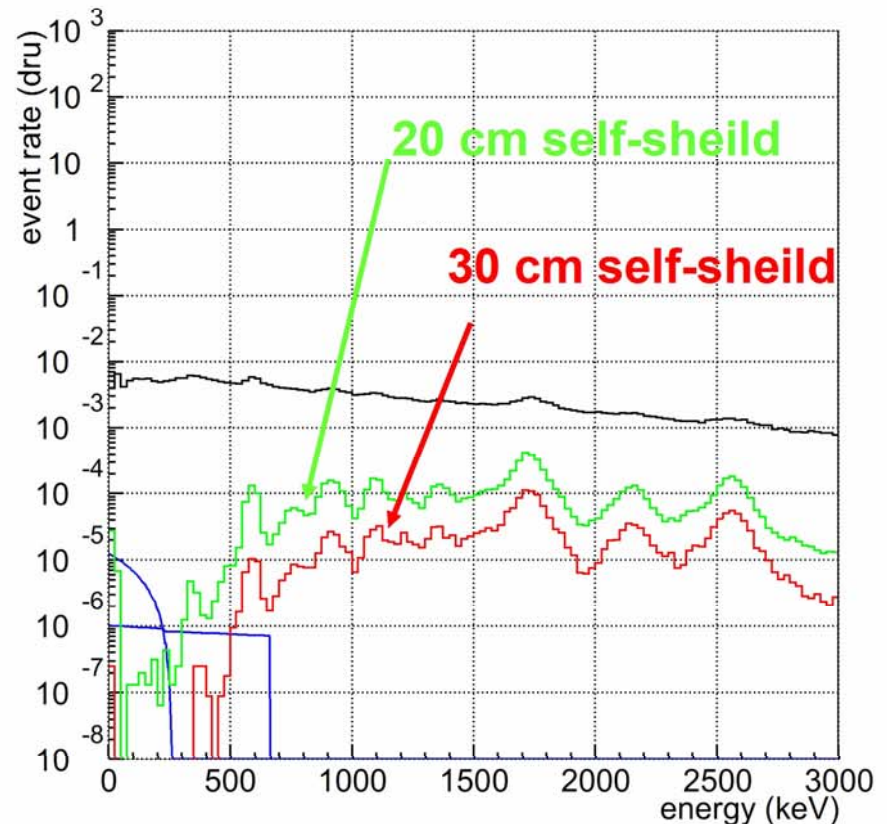
pp : stat event rate +
stat of ^7Be (50<E<260keV)
subtraction

/ton/yr

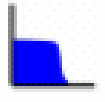
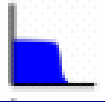
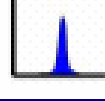
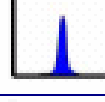
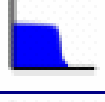
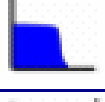
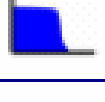
50ton*year : ppで1.3%, ^7Be で1.6%の決定精度

太陽ニュートリノ観測のためのバックグラウンド条件

- External BG
- Internal BG
 - ^{85}Kr :
 $\text{Kr/Xe} < 4 \times 10^{-15} \text{g/g}$
 $\rightarrow 1/250$
 - U/Th:
 $\text{U,Th/Xe} < 1 \times 10^{-16} \text{g/g}$
 $\rightarrow 1/100 \sim 1/200$
 - Rn:
 $\text{Rn(in Liq)} < 10 \mu\text{Bq/m}^3$
- need isotope separation
if $\tau_{1/2}(2\nu\beta\beta) < 8 \times 10^{23} \text{y}$



暗黒物質探索に比べ、およそ二桁の
バックグラウンドの低減で実現が可能となる。

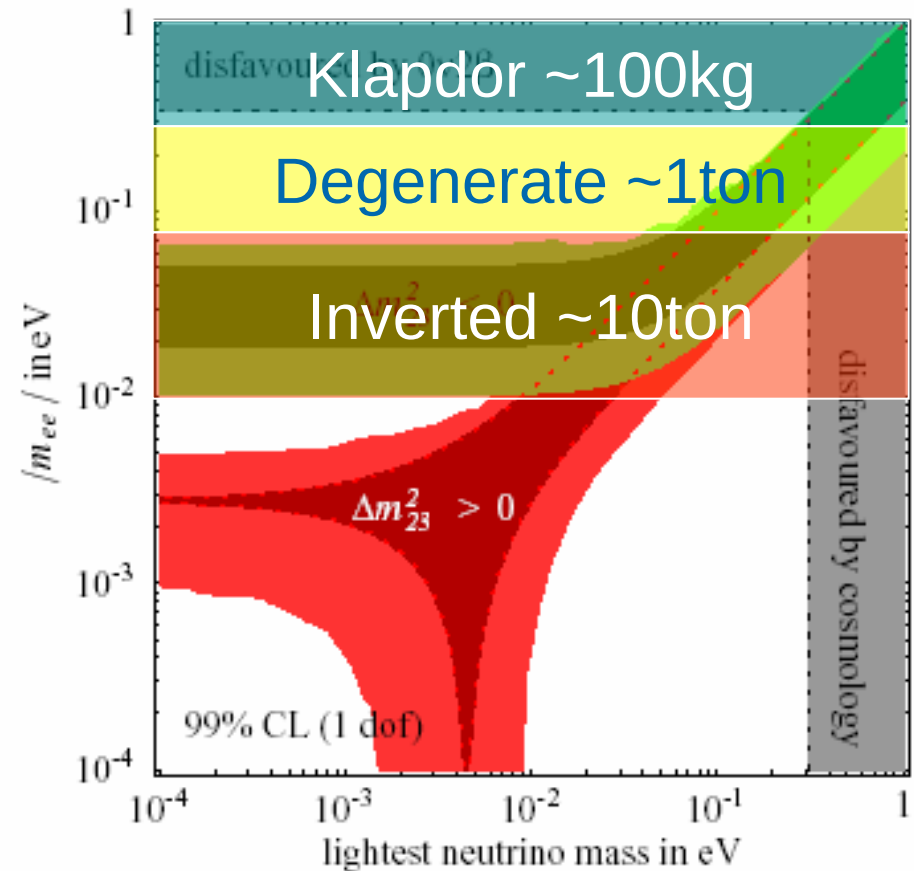
Experiment	mono-energetic ν response	Solar ν Sensitivity	%pp 5 yr	% ^7Be 5 yr	Status
Borexino		^7Be , pep?		5	results in a few years
KamLAND		^7Be , CNO?		5	results in a few years
LENS		pp $\Leftrightarrow$ CNO	3	5	ready to prototype
MOON		pp $\Leftrightarrow$ CNO			r&d only (for now)
CLEAN		pp $\Leftrightarrow$ ^7Be	1	< 3	ready to prototype
HERON		pp $\Leftrightarrow$ ^7Be	1.5	5	r&d only (for now)
TPC		pp $\Leftrightarrow$ ^7Be			r&d
XMass		pp, ^7Be			100 kg prototype
SNO+		^7Be , pep	1.5(pep)		TDR Fall 06, construct 07

0v2重ベータ崩壊

0ν2重ベータ崩壊の重要性

- 0νββが存在すれば、neutrinoがMajorana particleであることが分かる $\nu=\bar{\nu}$
 - 発見されれば高精度の測定・違う原子核によるstudyが必要
- 逆に0νββが見つからない場合、どのような結論が出せるか。ヒエラルキーと関係する。

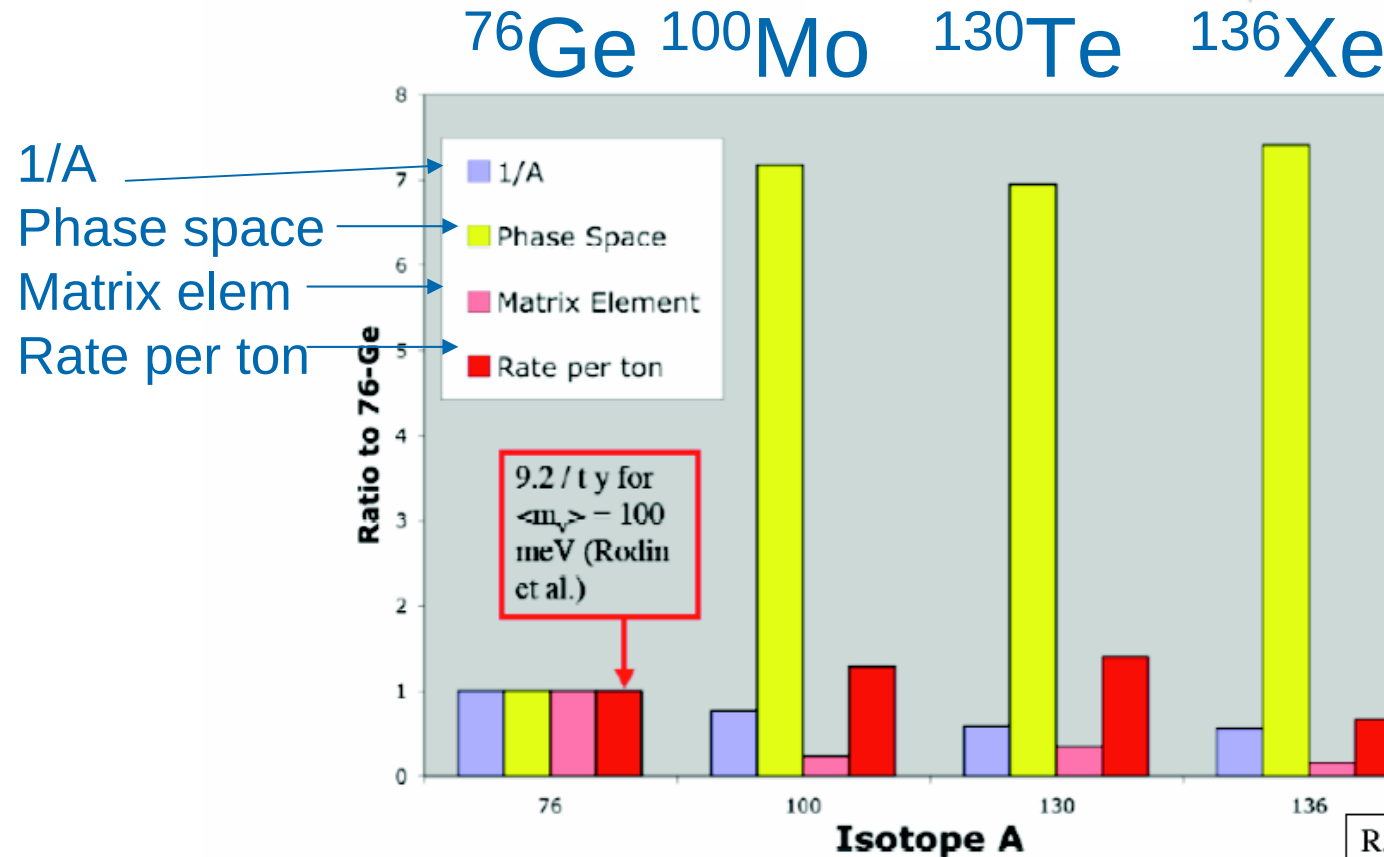
もし、スペクトルがinvertedであり、 $m_{\beta\beta}$ が十分に10meV ($<\Delta m_{23}$)より低かったらニュートリノはDiracであるといえる。



原子核は？

“Relative” Sensitivities

Using Rodin et al. Nucl. Matrix elements



RQRPA: Rodin et.al,
(P. Vogelと共著)
nucl-th/0503063

Quasiparticle
Random Phase
Approximation

Renormalized QRPA

Wilkerson
APS/JPS 05
meeting

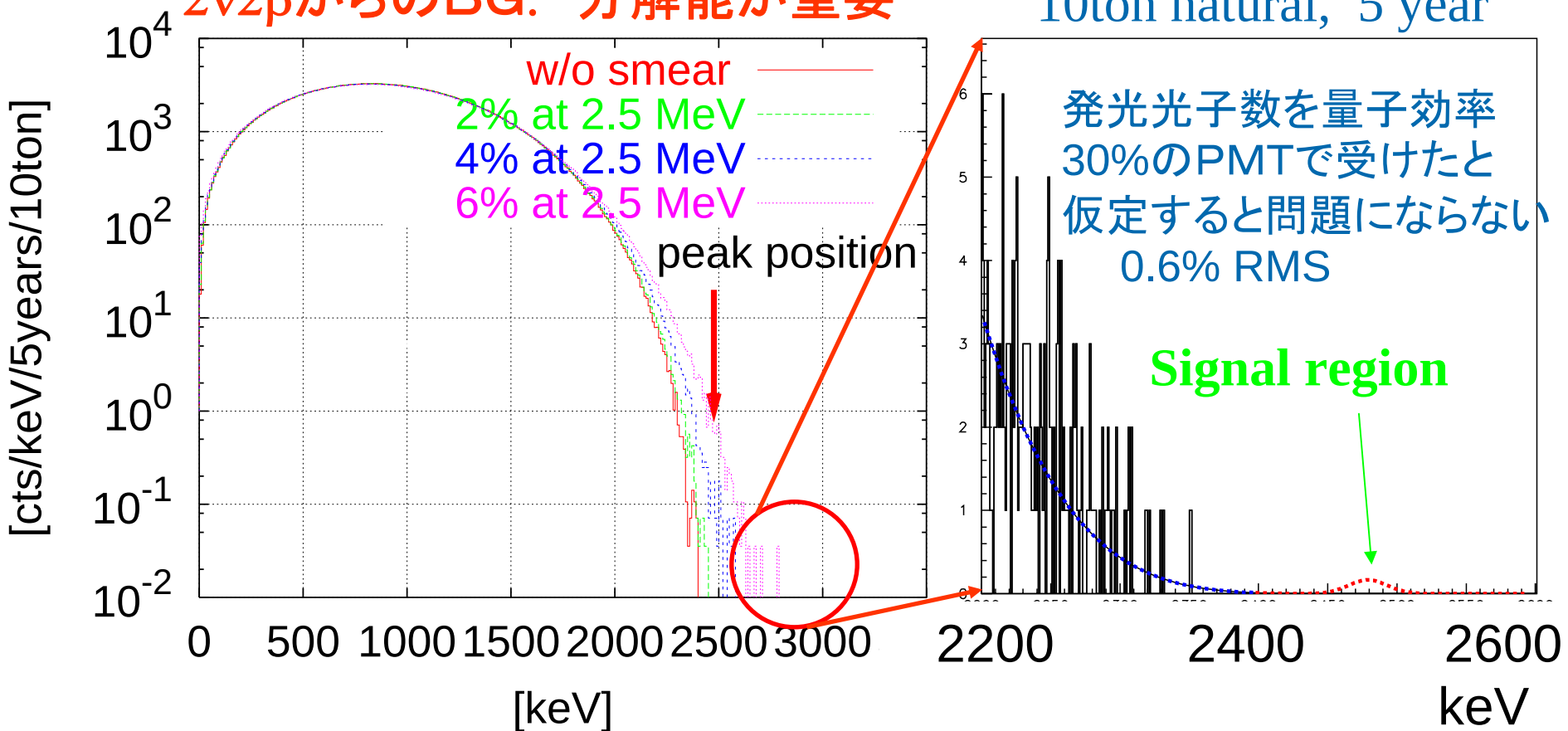
- Ge, Mo, Te, Xeはほぼ似たようなもの。ただし古い文献だとXeはTeに比べて一桁以上悪いという人もいる。
- 今後理論計算も系統誤差を正しく評価する必要がある。

XMASSでinvertedを攻める場合: $0\nu2\beta$ に対する $2\nu2\beta$ BG

^{136}Xe のQ値は2.48MeV

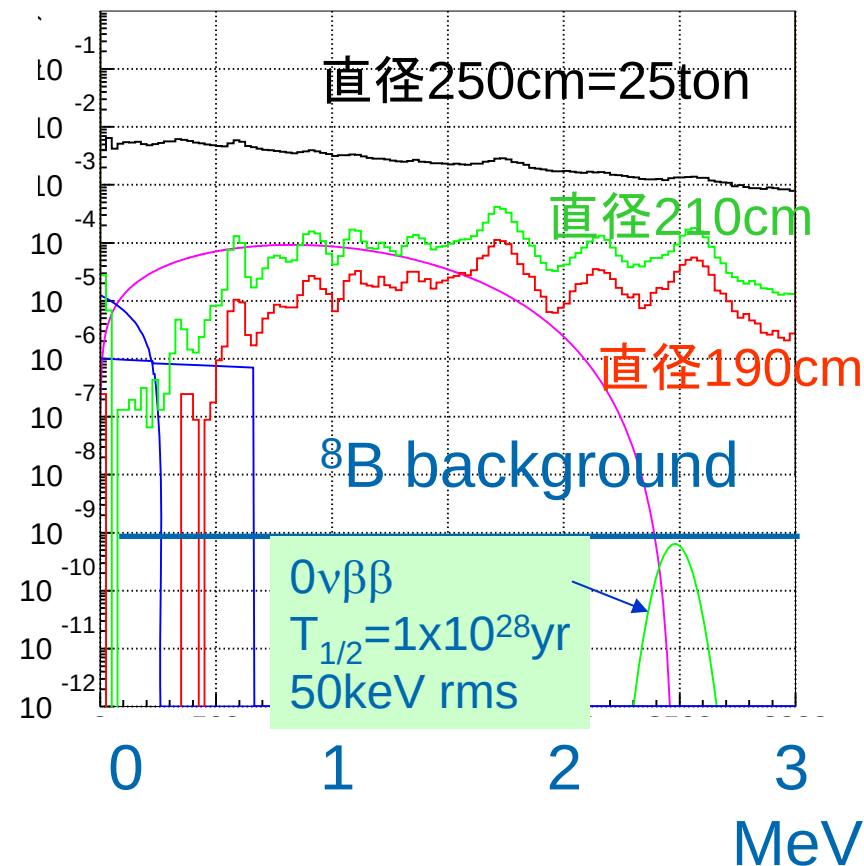
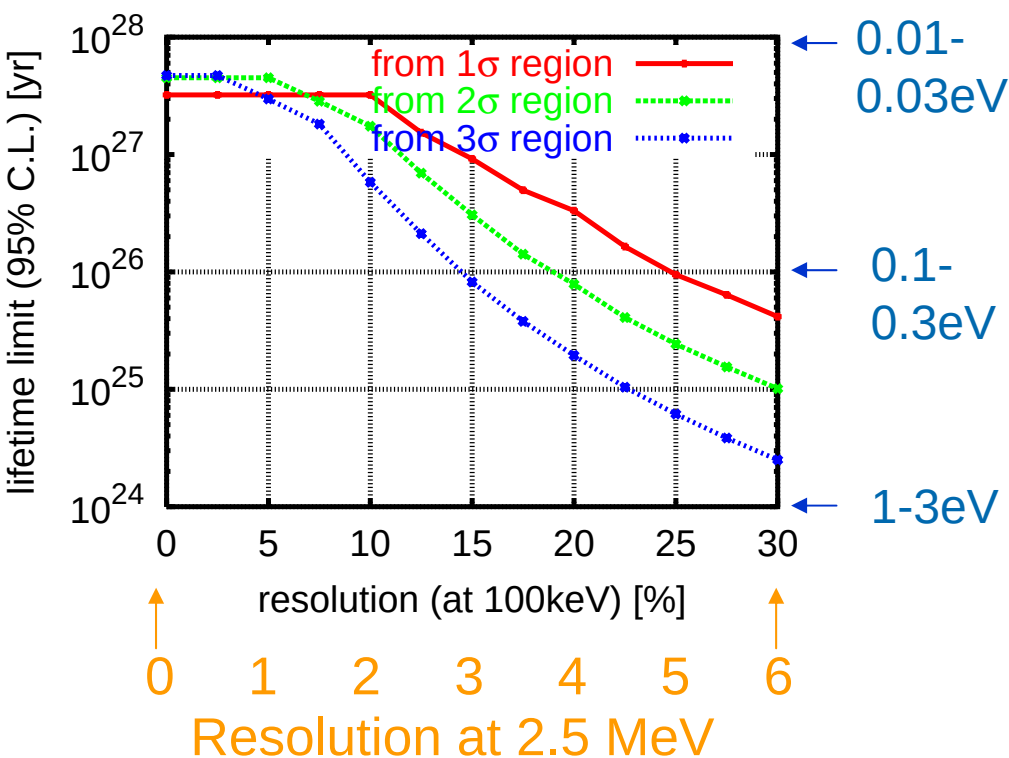
$2\nu2\beta$ からのBG: 分解能が重要

10ton natural, 5 year



XMASS: $0\nu 2\beta$ への感度

10ton natural, 5 year



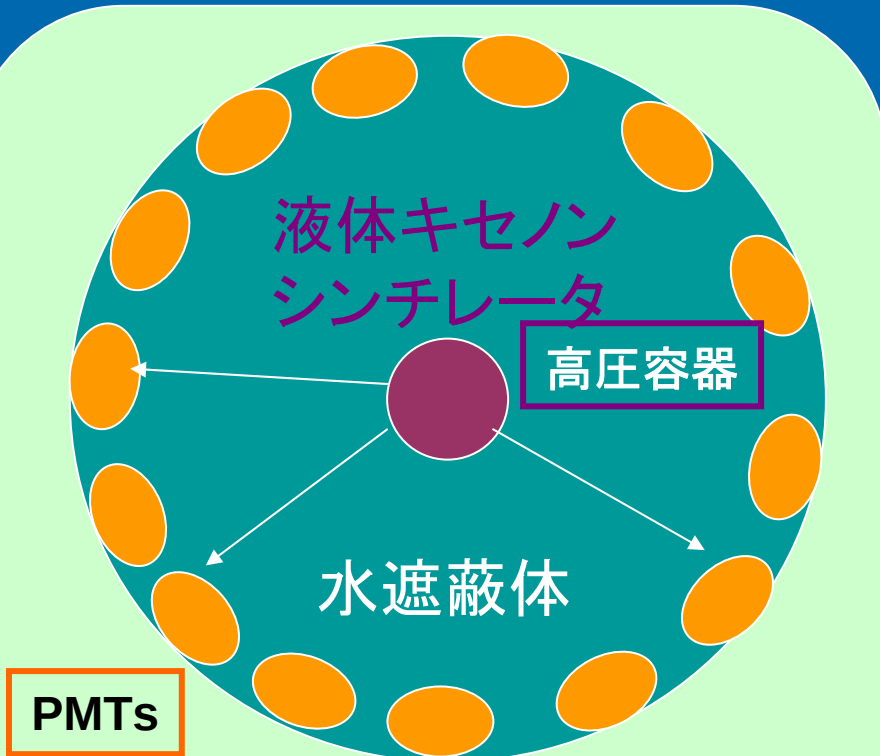
$0\nu 2\beta$ 寿命に対する感度 $\text{several} \times 10^{27} \text{ years}$ を達成可能
 m_{eff} に対する感度 0.02 – 0.05eVまではシンチレータで可能
100トンあれば自己遮蔽も十分とれるが調達方法の検討必要
invertedに感度のある具体的デザインを検討中

案の一つ:ただしBGの低減に限度

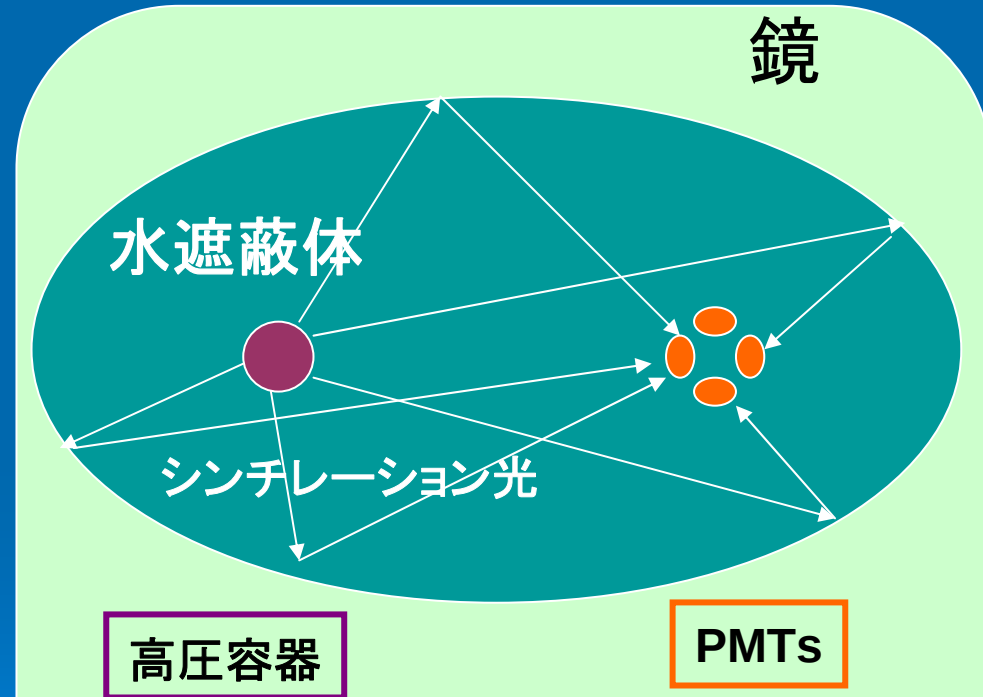
PMTを使わず、トラックを見る(Gotthard実験)

or

シンプルにシンチレータとして利用し、
岩盤・PMTを遠くに離す(岩盤・PMTからのガンマ線を水で遮蔽)

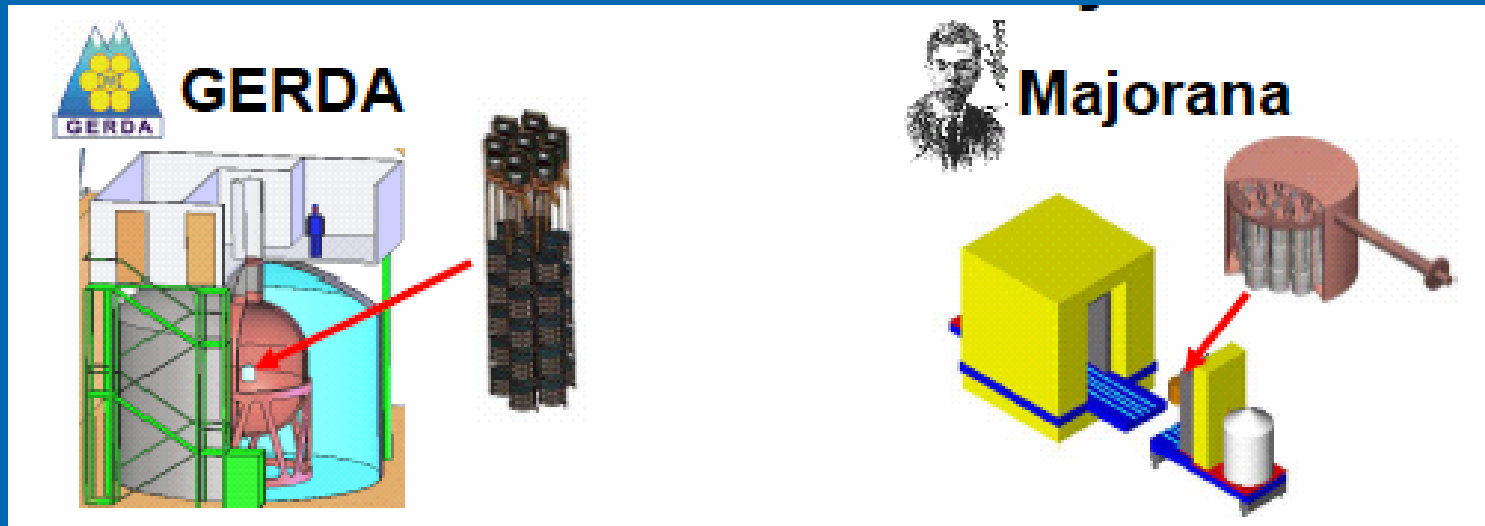


良く使われる方法
PMTが沢山、値段が高い



楕円鏡型検出器
PMTの個数が抑えられる

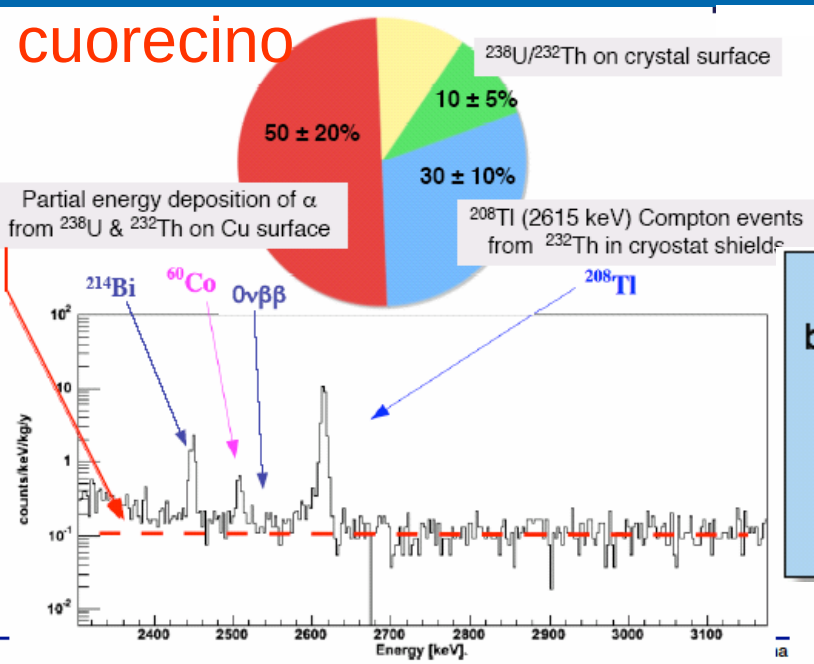
ゲルマニウム検出器: GERDA(欧)/Majorana(米)



- 高分解能、低バックグラウンドが達成可能、遮蔽に違いがある
GERDA: 低温の液体で遮蔽を行う(LAr, LN₂)
Majorana: electroformによる高純度銅
- 波形弁別、マルチコンプトンなどの方法によりバックグラウンドを低減してゆく。これから3年ほどで、90-200meVあたりを探索。
- GERDAはGran Sasso Hall Aのインフラ整備開始
phase I: 18kg enriched Ge (IGEX/HM) Klapdorの結果の正否
phase II: add 20kg enriched Ge (materialは既にある) 90-290meV
将来は一体化してトンスケールの実験を行う

ボロメータ: cuorecino/cuore

- 低温(ボロメータ)検出器 CUORECINO/CUORE (LNGS Hall A)
TeO₂結晶を低温に冷却し、温度上昇を測定。
- CUORECINO: BGが高いが1年で $<0.2-1.1\text{eV}$ を達成。4年走る。
- CUORE: スケールアップ($\sim 1\text{t}$)を狙うが、バックグラウンドの改善(1/20)が急務。2010年から4年ほどで($200\text{kg } ^{130}\text{Te}$)、BG下がれば20–100meVまで到達する。



CUORE

Goal

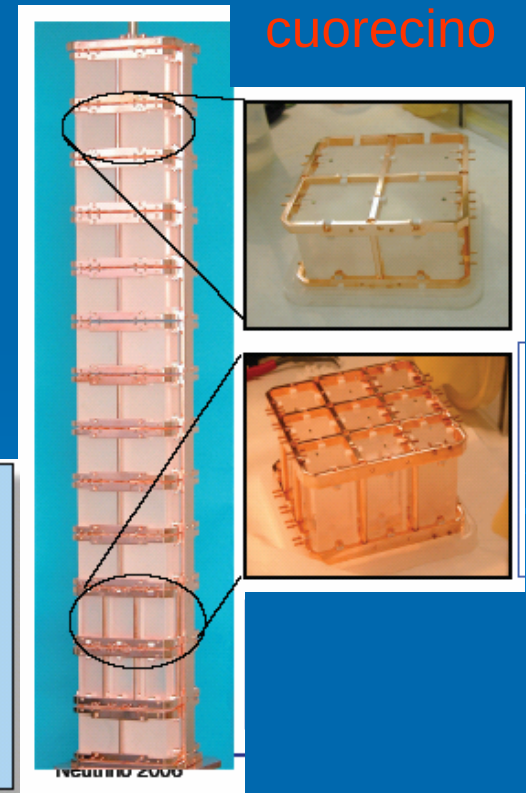
background $< 0.01\text{ cnts/keV/kg/y}$

Resolution = 5 keV

5 year sensitivity

$F^{0\nu} > 2.1 \times 10^{26}\text{ y}$

$m_{ee} < \sim 19 - 100\text{ meV}$

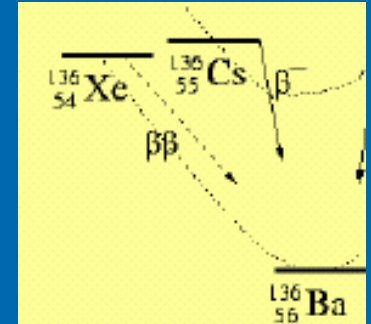


2νββの結果がない。

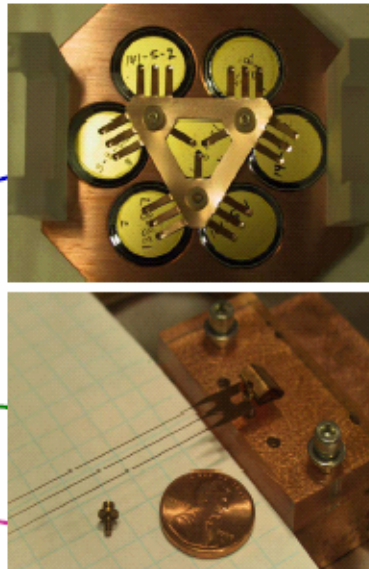
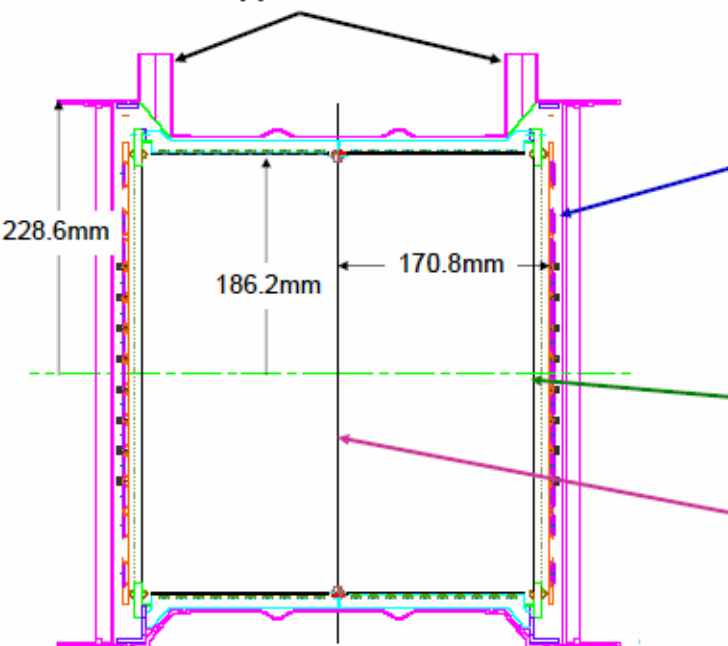
液体キセノン:EXO実験

- もともとは $\text{Xe} \rightarrow \text{Ba}$ のバリウム原子をIDし、BGを低減するアイディア
- 200kgの ^{136}Xe を使うEXO-200はIDなし

APDによるシンチレーション検出と、TPCを組み合わせ
て、位置分解能を持つ検出器を組む。2006/7 @WIPP



Mechanical supports and cable/Xe conduits



Klapdorシグナルが正しいと、
EXO-200, 2yrで (BG 40ev)
最悪 19 events, 2.6σ
最良 159 events, 11.2σ

neutrino2006 Pipke

まとめ

- XMASS実験は現在暗黒物質探索に集中して検出器の設計を行っている。800kg検出器は既存の実験の100倍の感度を持ち、 10^{-45}cm^2 近くまで探索が出来る。
- 低エネルギー太陽ニュートリノ観測は、暗黒物質探索用検出器が運転できればその延長上にあるため見通しが大変良くなる。ppニュートリノに対して1-2%程の精度を目指す。
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊検出実験は、エネルギーが高いため自己遮蔽効果が少ない。invertedを狙うための特別なデザイン等を検討中。
- DM探索のR&Dはほぼ完了し800kg検出器の建設へ向かっている。上記の物理を進めてゆくためにも、世界の競争相手より早く検出器の建設及び観測を開始したい。



end