

暗黒物質探索

森山茂栄 東京大学宇宙線研究所

2013年7月22日

加速器・物理ILC夏の合宿2013@富山 呉羽

もくじ

1. 「暗黒物質」が欲しい理由のいくつか
2. 候補の一つ WIMPs
3. 検出の方法
4. 世界で進む直接探索実験
 - 直接検出: DAMA, CeGeNT, CDMSII(Si), XENON100
 - 神岡で進められている直接検出実験XMASS

1. 暗黒物質が欲しい理由

小規模

大規模



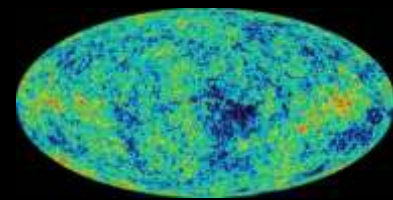
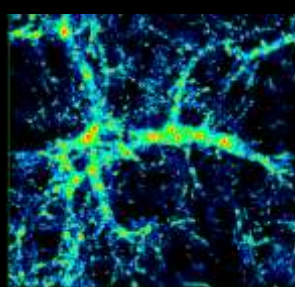
銀河の回転速度

衝突する銀河

銀河大規模構造

暗黒物質地図

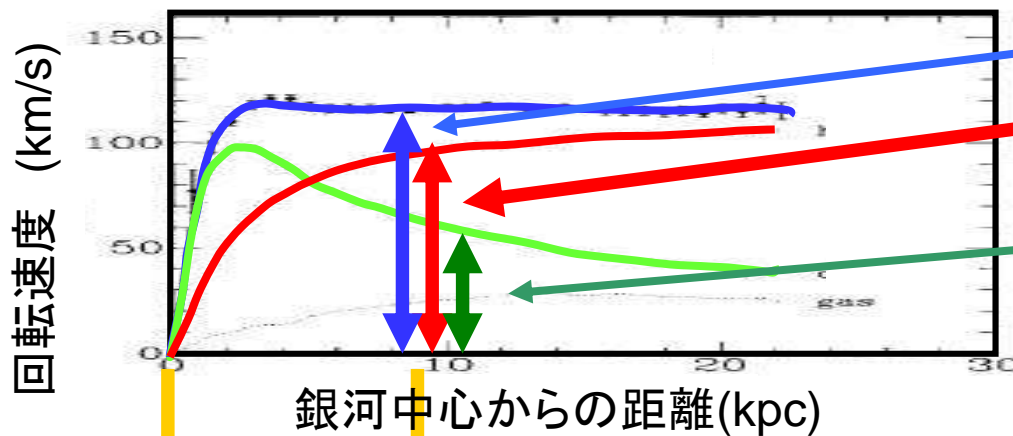
宇宙背景輻射



実は宇宙のどこを見ても、暗黒物質がないと困る事態。名前がつくと分かったような気がするが正体不明。重力相互作用で「見える」、透明な物質のはず。この左端と右端を簡単に説明。

銀河の回転曲線

物質が多いと
回転が速い

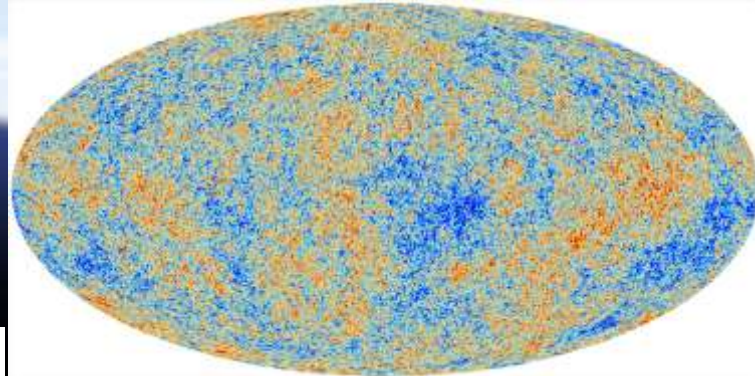
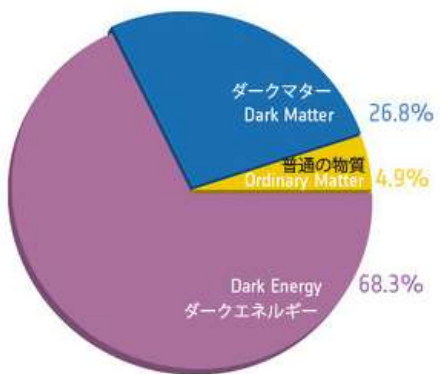
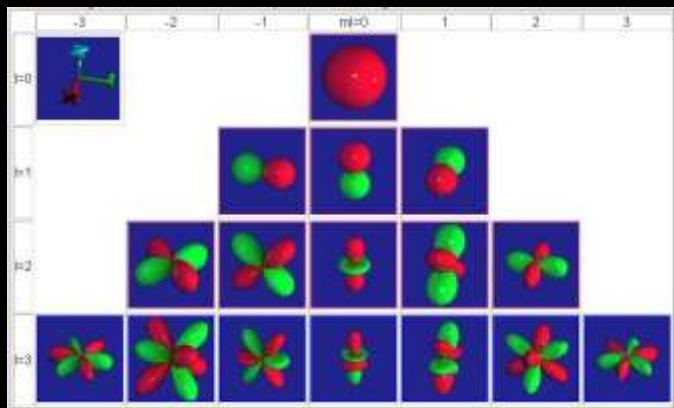


- 観測結果によると、銀河には、目に見える物質では説明できない
- 「ダークマター」
- が確かにある！！

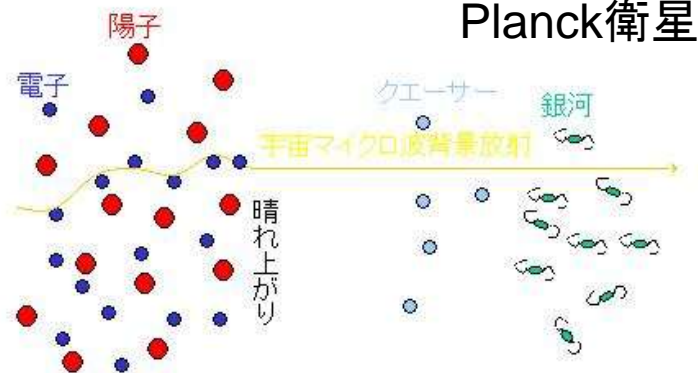
太陽系のあるようなところにも沢山ある！！

宇宙背景放射

- 球面調和関数による展開

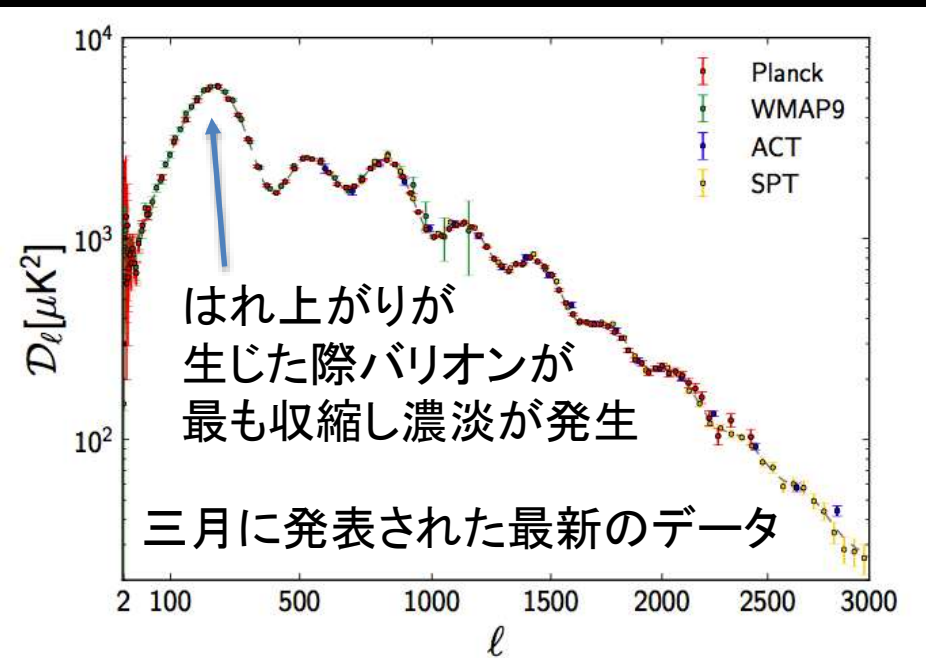


Planck衛星



宇宙の始まり 40万年 10億年 100億年 現在
時間

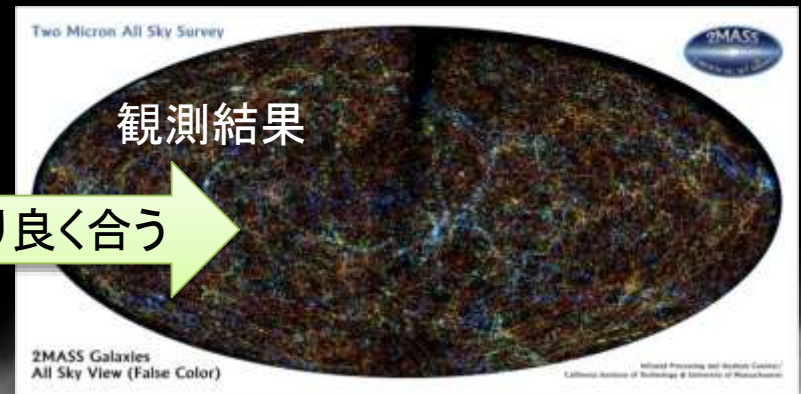
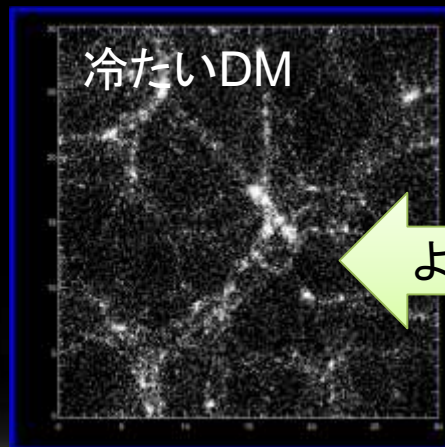
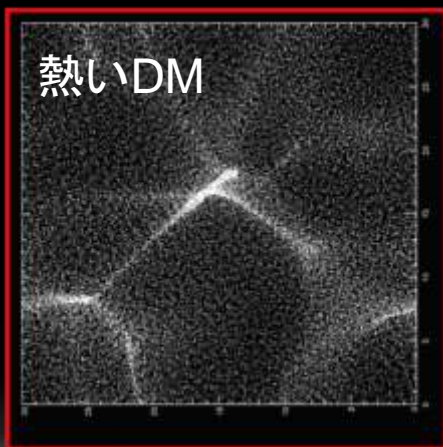
http://www.nao.ac.jp/nao_news/data/NASA_030211/background.html



晴れ上がり前のバリオンと光は結合しており流体として振舞うが、暗黒物質と光は相互作用しないため、その効果はない。その違いで通常物質と暗黒物質の切り分けが可能

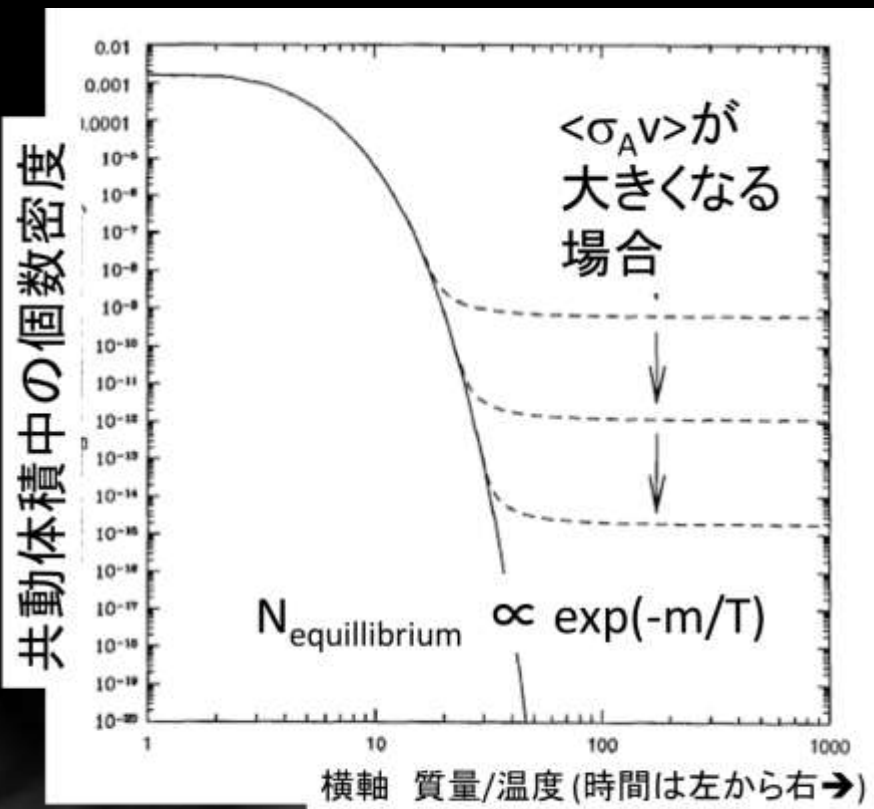
冷たい暗黒物質

- 銀河にトラップされるためには、暗黒物質のスピードは銀河中の太陽の速度くらい。
 - 向心力 = $ma = mv^2/r$ であるので、 v の条件は m によらないため。おおよそ $230\text{km/s} \sim 10^{-3}c$
- ほかに、光速に近いと銀河の大規模構造の成長を妨げる。→ 冷たい暗黒物質(CDM)



2. 候補の一つWIMPs

宇宙初期に熱的に作られた暗黒物質が今も残っていると考える。
→ 生成消滅を繰り返すため「残存量」は温度に依存。 $\exp(-m/T)$
→ 冷え切ってしまうとゼロになるはずだが、宇宙の膨張が大きく反応できなくなると消滅できなくなる:「フリーズアウト」



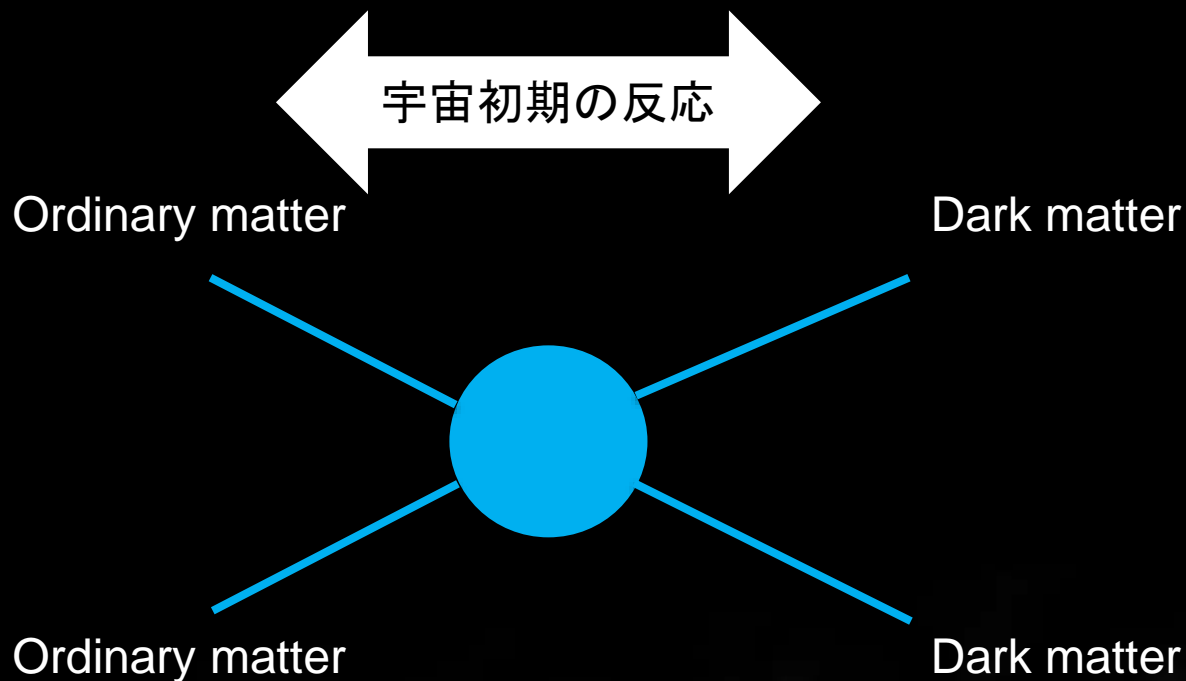
- ちょうど良い程度の残存量が得られる対消滅断面積は、 $\langle\sigma v\rangle\sim 3\times 10^{-26}\text{cm}^3/\text{sec}$
- 次元解析により

$$\sigma_{Av} = k \frac{g_{\text{weak}}^4}{16\pi^2 m_X^2} (1 \text{ or } v^2),$$

- 弱い相互作用程度で、100GeV程度の媒介粒子だとぴったり！
- Weakly Interacting Massive Particlesとよばれる粒子。
- SUSY粒子でなくても良い。

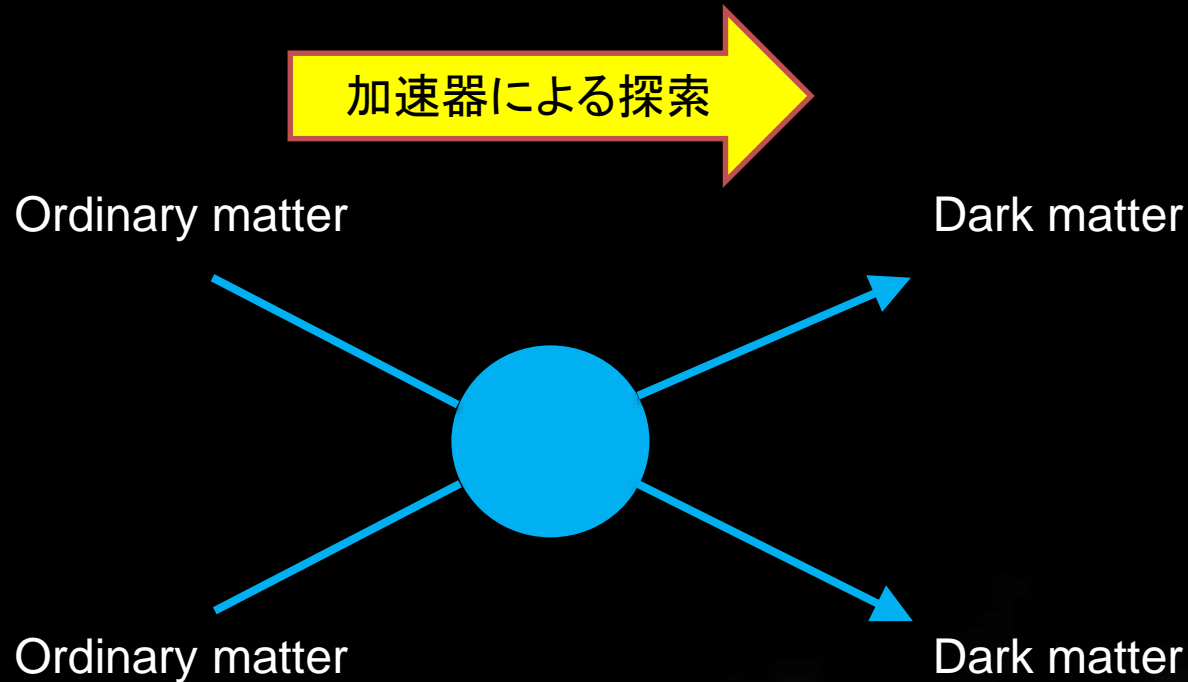
3. 検出の方法

- 暗黒物質が熱的に作られて通常の物質と熱平衡になっていたとするならば、通常の物質との相互作用があるはず。
- 下の図にあるような、通常の物質との相互作用により「検出」ができるはず。



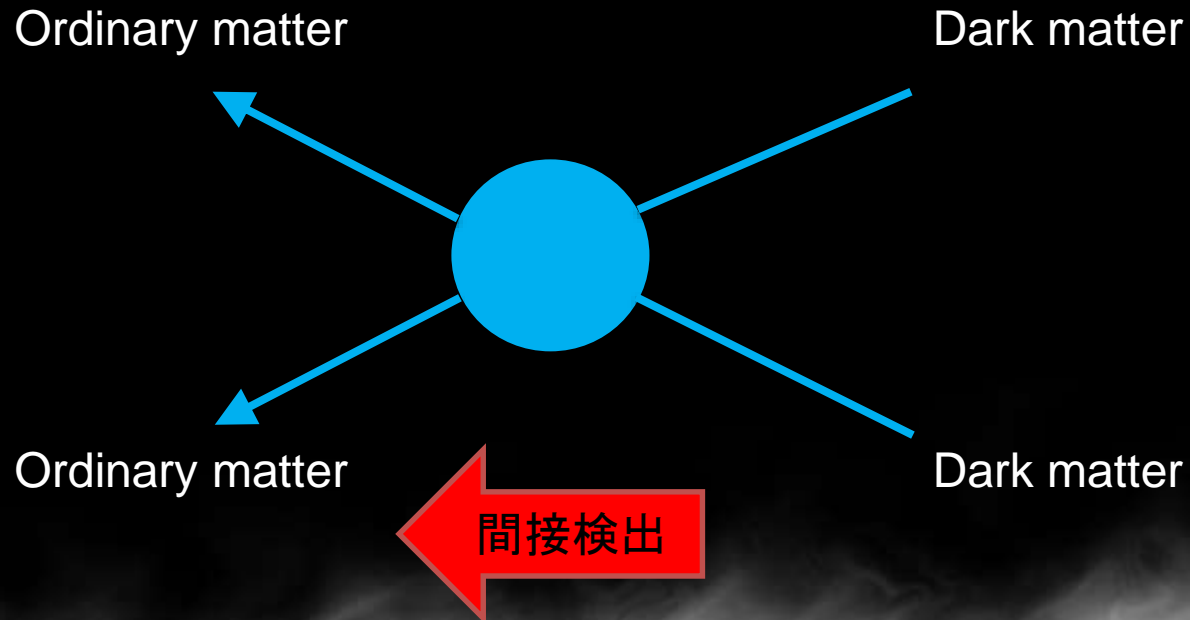
3. 検出の方法

- 暗黒物質が熱的に作られて通常の物質と熱平衡になっていたとするならば、通常の物質との相互作用があるはず。
- 下の図にあるような、通常の物質との相互作用により「検出」ができるはず。



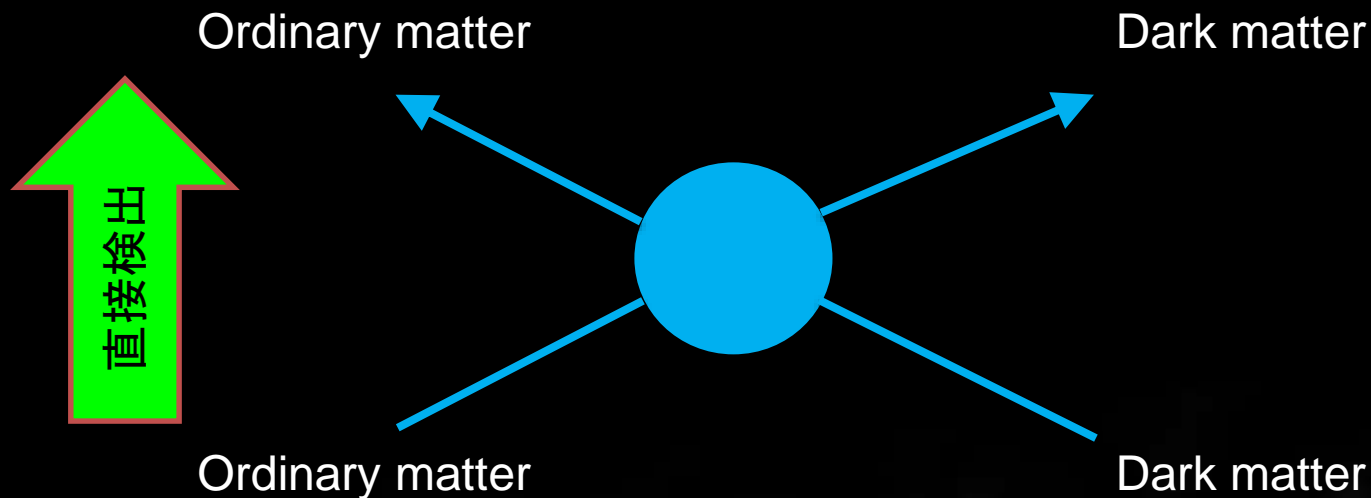
3. 検出の方法

- 暗黒物質が熱的に作られて通常の物質と熱平衡になっていたとするならば、通常の物質との相互作用があるはず。
- 下の図にあるような、通常の物質との相互作用により「検出」ができるはず。



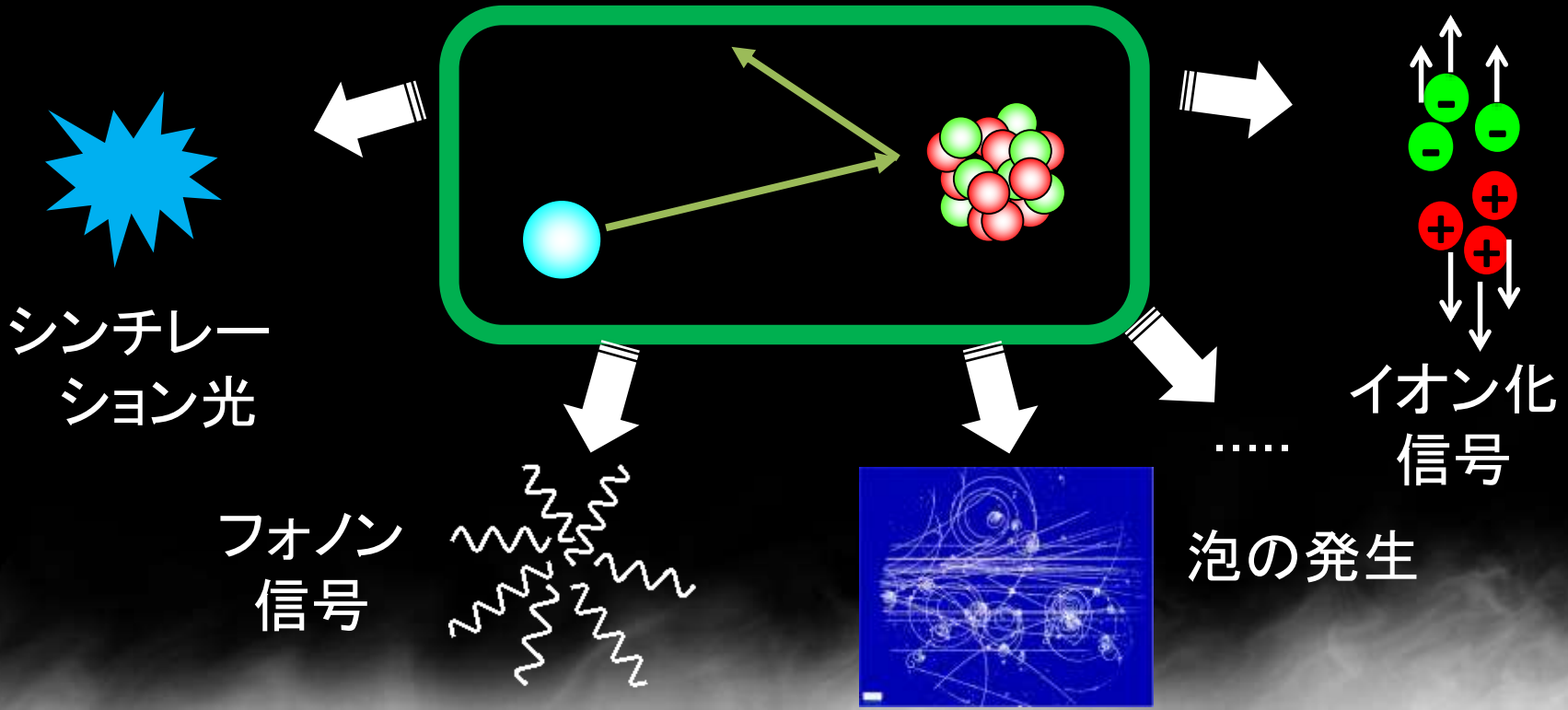
3. 検出の方法

- 暗黒物質が熱的に作られて通常の物質と熱平衡になっていたとするならば、通常の物質との相互作用があるはず。
- 下の図にあるような、通常の物質との相互作用により「検出」ができるはず。

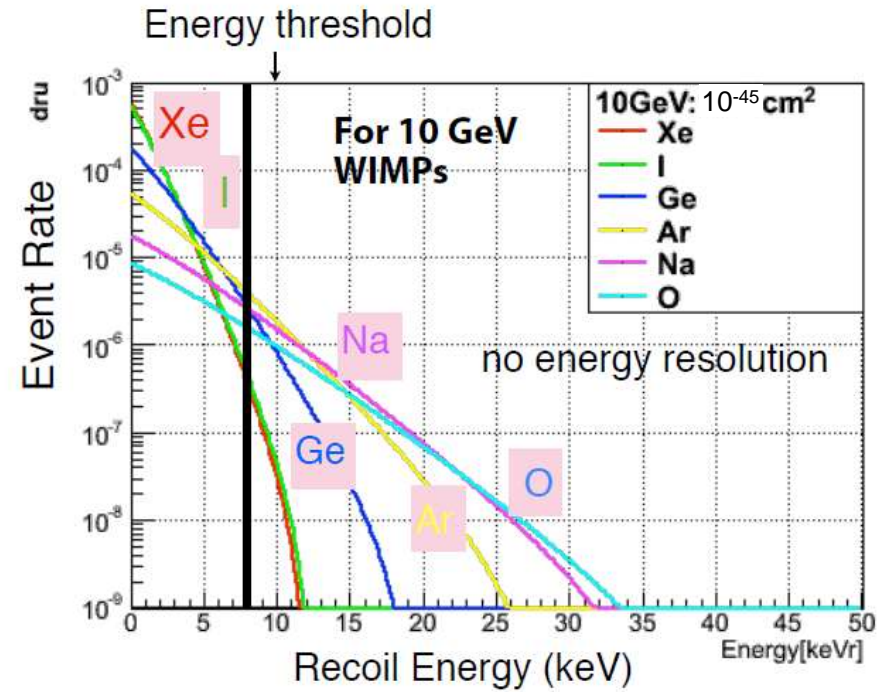
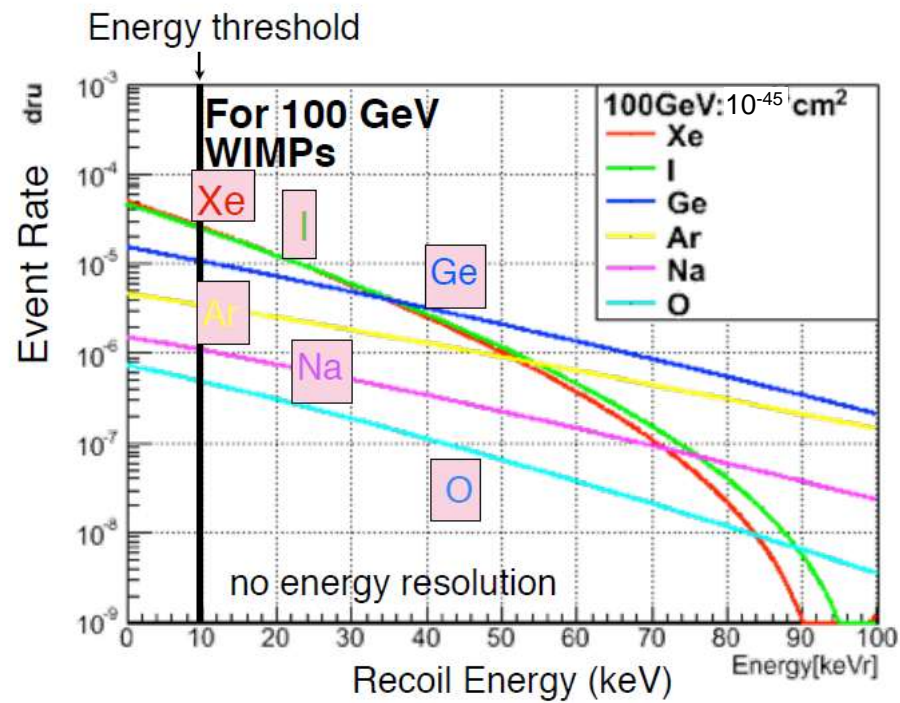


直接検出の方法

- 速度 $10^{-3}c$ で衝突 $\frac{1}{2}m10^{-6}$ は原子核でも $\sim keV$
- 自然に存在する放射性不純物の影響を受ける。
- 様々な種類の信号が得られる可能性がある。
- 複数の方法を使ったBG低減可能だが複雑。



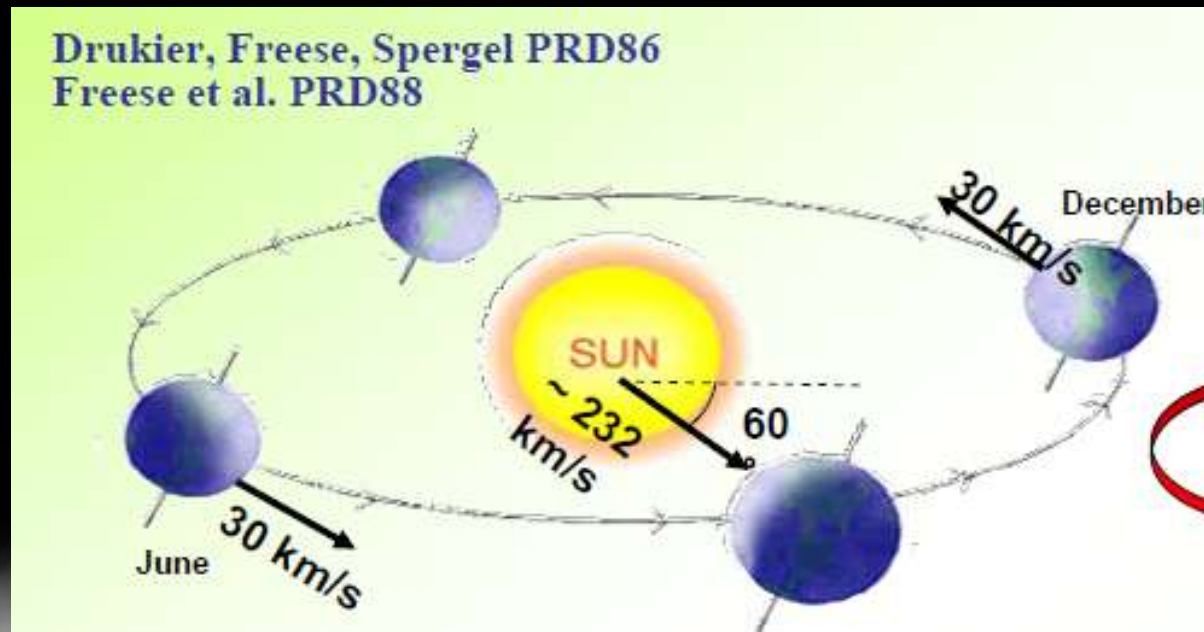
原子核反跳のスペクトル



- 暗黒物質の質量と同程度の標的がエネルギーをもらいやすい。発光量・電荷量等は電子と異なる
- 原子核の散乱がコヒーレントに起こると振幅の和の2乗になるので質量数の2乗になる効果あり。

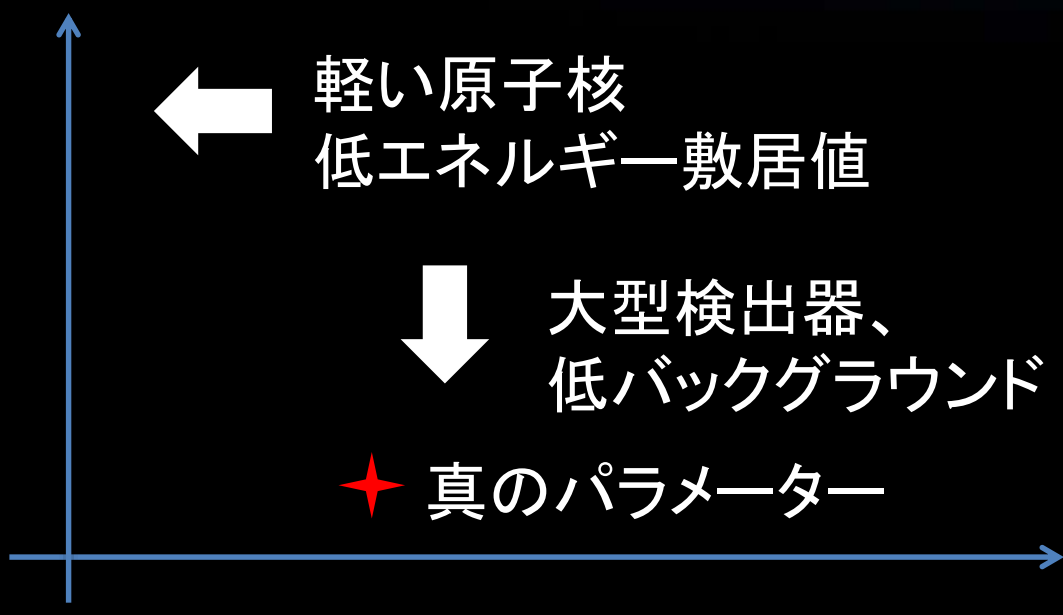
もう一つの特徴：季節変動

- 太陽系が銀河系内で運動し、地球が太陽を公転している。季節によって銀河系=暗黒物質との相対速度が変動する。
- これにより事象数の変動、スペクトルの変動が期待される。



分かっていないもの：質量と断面積

核子に対する
断面積
不明



軽い原子核
低エネルギー一敷居値



大型検出器、
低バックグラウンド

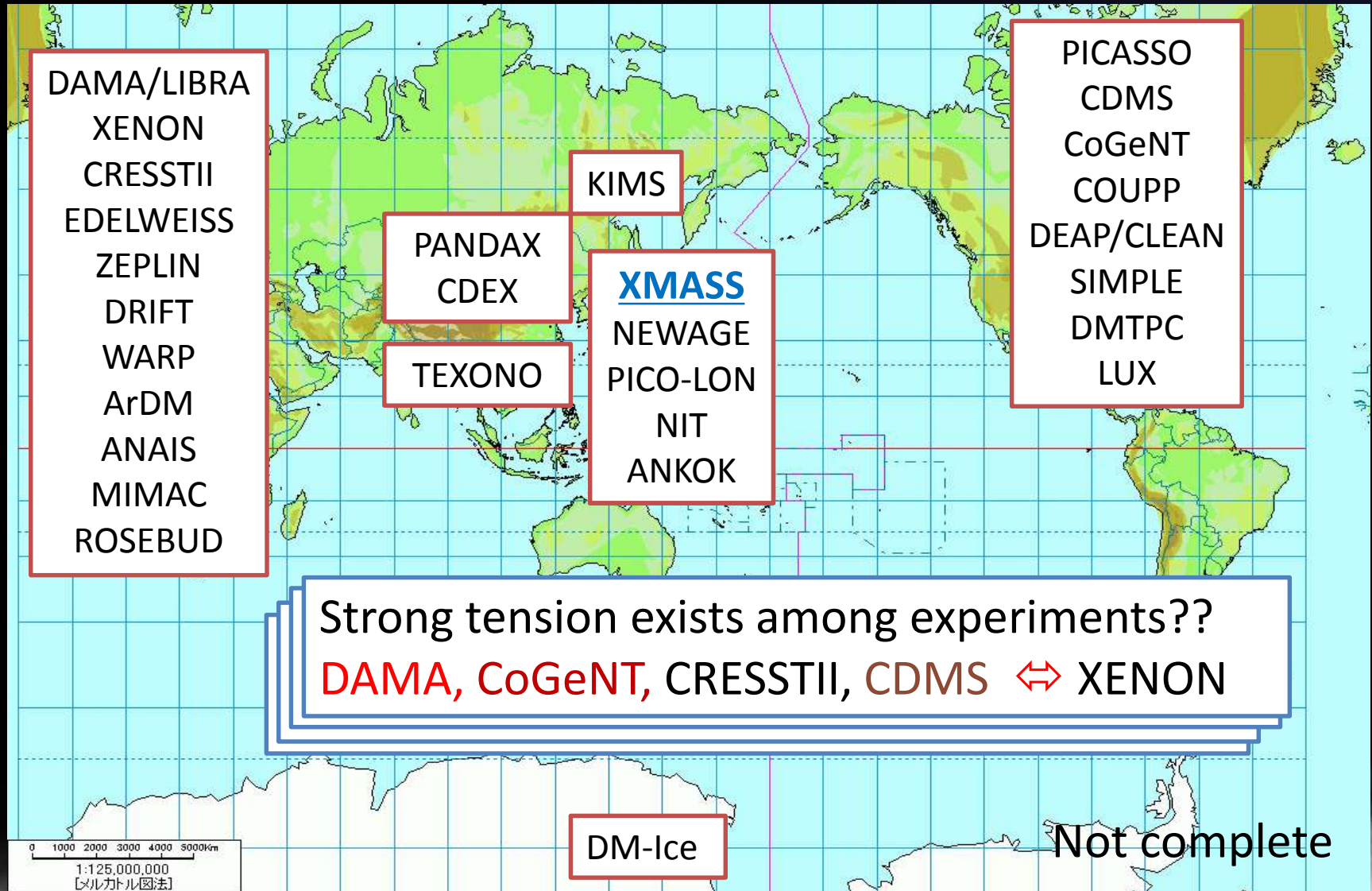


真のパラメーター

暗黒物質の
質量
不明

- 小質量暗黒物質: 低エネルギー一敷居値、軽い原子核 $\sim O(\text{GeV}/c^2)$
- 小さい断面積: 大型でかつ低バックグラウンド検出器 $\sim O(1/\text{day}/\text{ton}) \rightarrow 15$ 年で4桁の改善!

世界中の実験 >30!



直接検出DAMA (綺麗なNaI(Tl)) 430t day

Installing the DAMA/LIBRA set-up ~250 kg ULB NaI(Tl)



Residual contaminations in the new DAMA/LIBRA NaI(Tl) detectors: ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K at level of 10^{-12} g/g

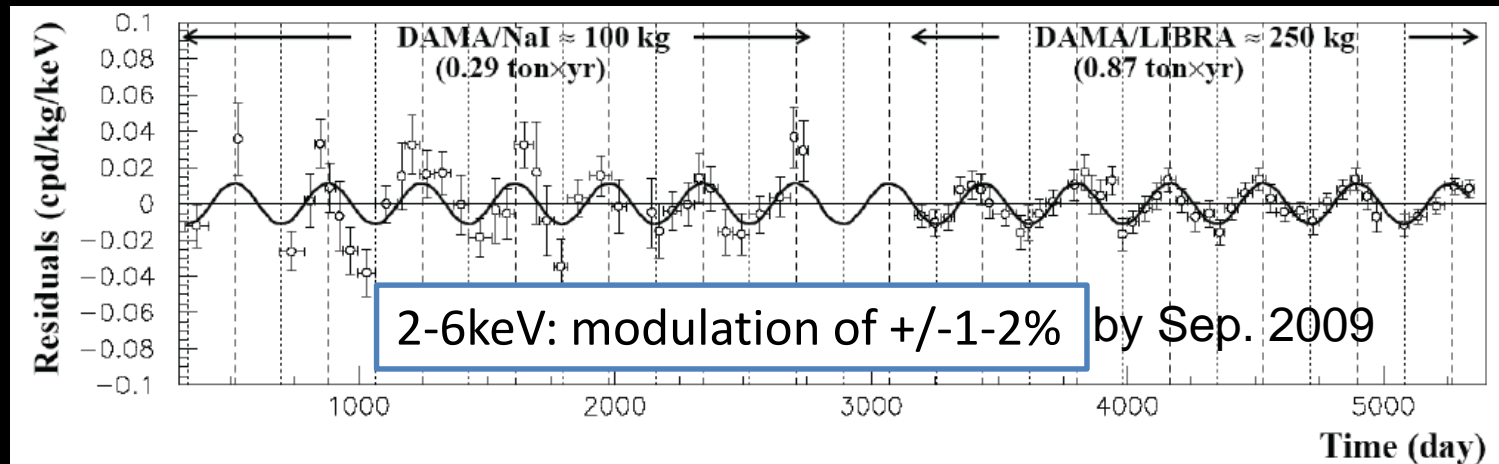
- Radiopurity, performances, procedures, etc.: NIMA592(2008)297
- Results on DM particles: Annual Modulation Signature: EPJC56(2008)333, EPJC67(2010)39
- Results on rare processes: PEP violation in Na and I: EPJC62(2009)327

250kgの
NaI(Tl)

直接検出には大型で低バックグラウンドの検出器が本質的

季節変動の証拠？

- 放射性不純物の少ないNaI(Tl) 粒子弁別なし
- $>8\sigma$ もの統計的に有意な季節変動を観測

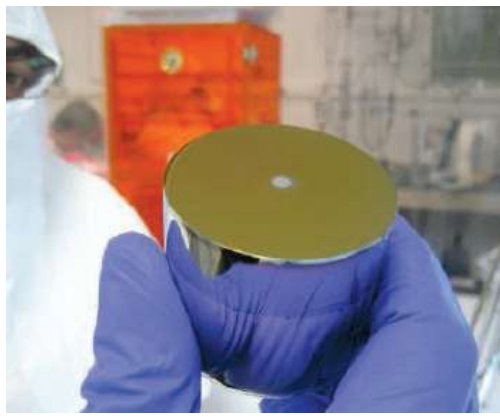


- 最初は沢山の批判があったが、段々真剣に研究・考察の対象となってきた。(light DM, inelastic DM).
- 宇宙線ミュオン・の季節変動？位相が違うようだ。
- 南半球(南極)での追試DM-IceもあるがBG多い？

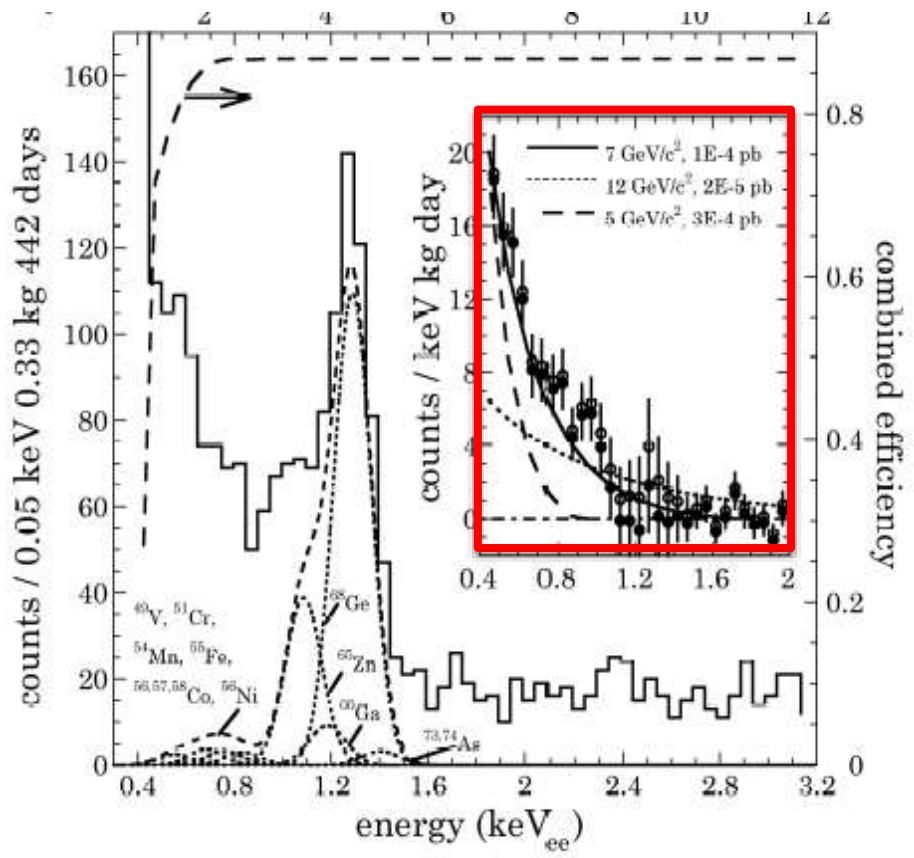
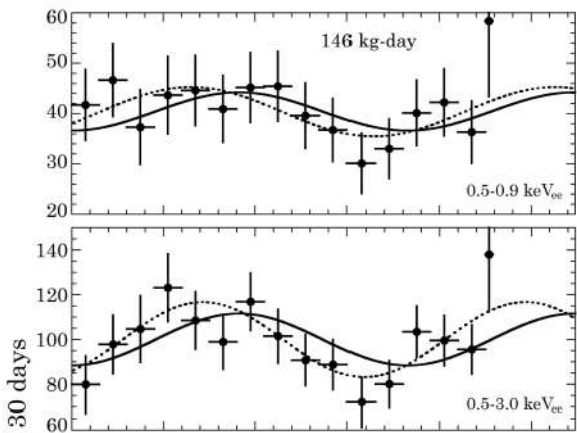
他にも肯定的(示唆?)な結果:いずれも軽いDM

CoGeNT実験 Ge

Science 332 (2011)
1144



PRL 107,
141031
(2011)

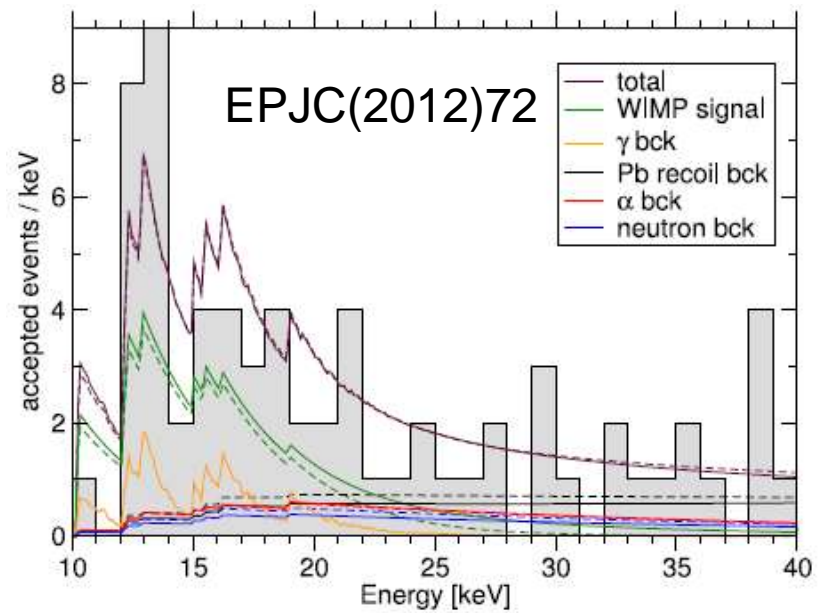
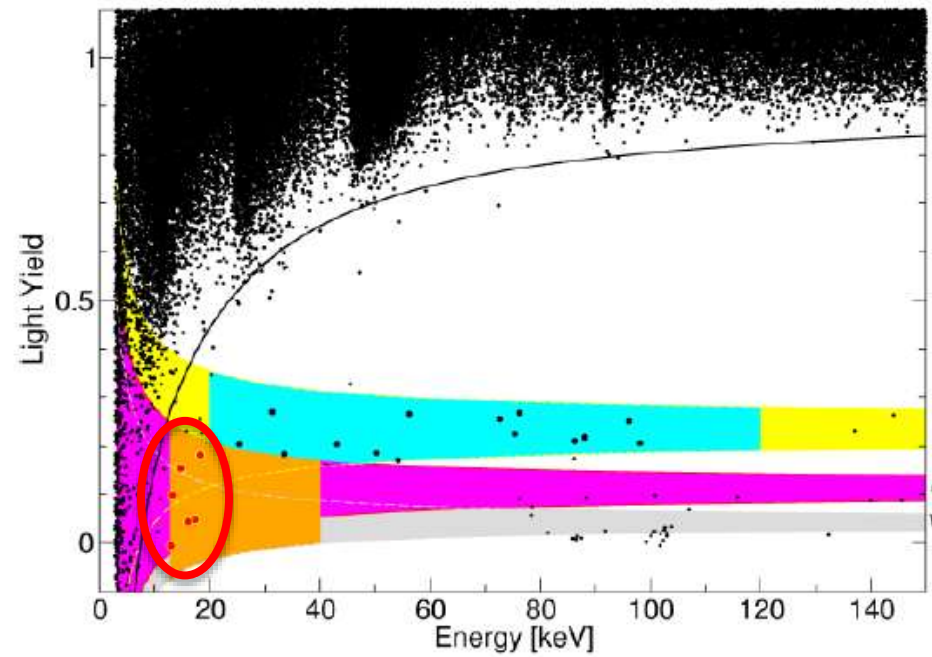


電気容量の小さい検出器を用いて
低ノイズ=低敷居値ゲルマニウム検出器による
探索。季節変動が見えているというが、

他にも肯定的(示唆?)な結果:いずれも軽いDM

CRESSTII実験 CaWO_4

発光と温度上昇を比較

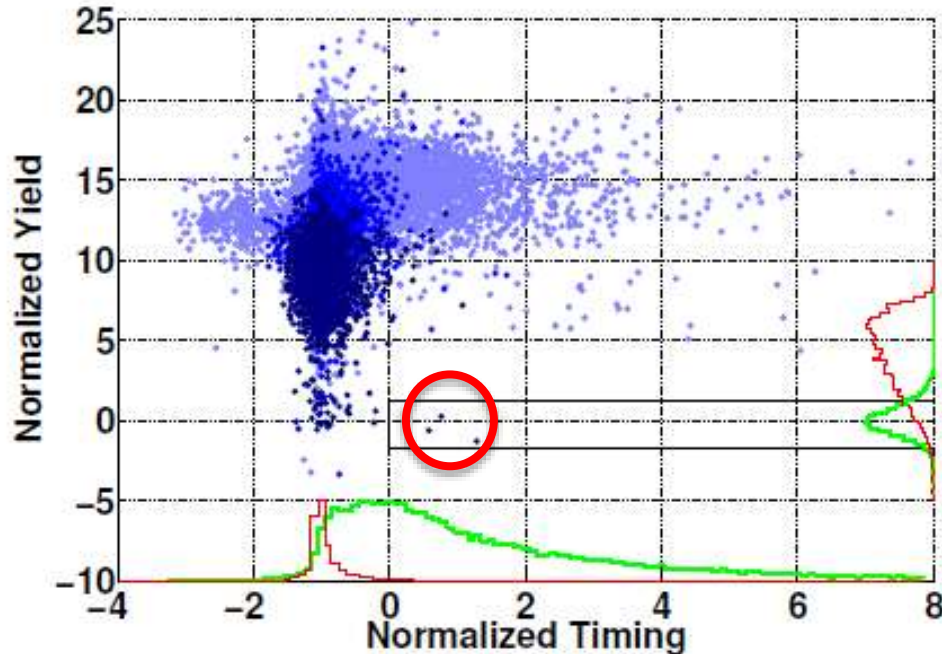


スパッタリングと表面粗度で説明?

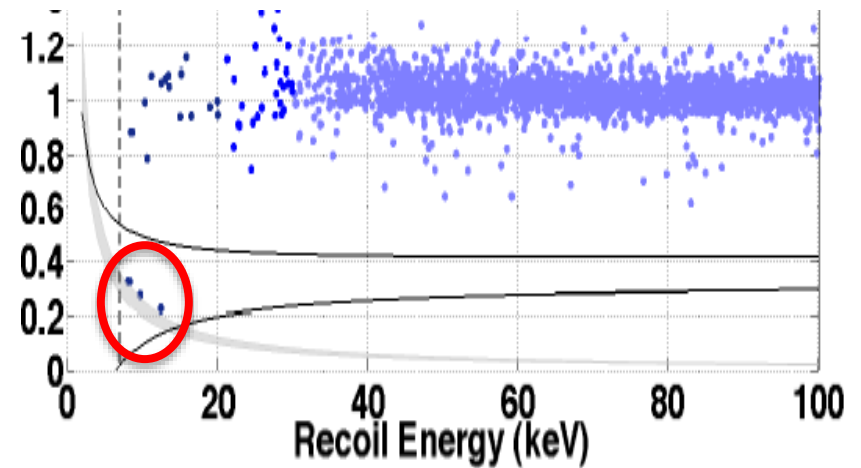
他にも肯定的(示唆?)な結果:いずれも軽いDM

CDMS II (Si)

電荷とフォノン信号を使用して
電子・ガンマ線BGを落とす



arXiv:1304.4279

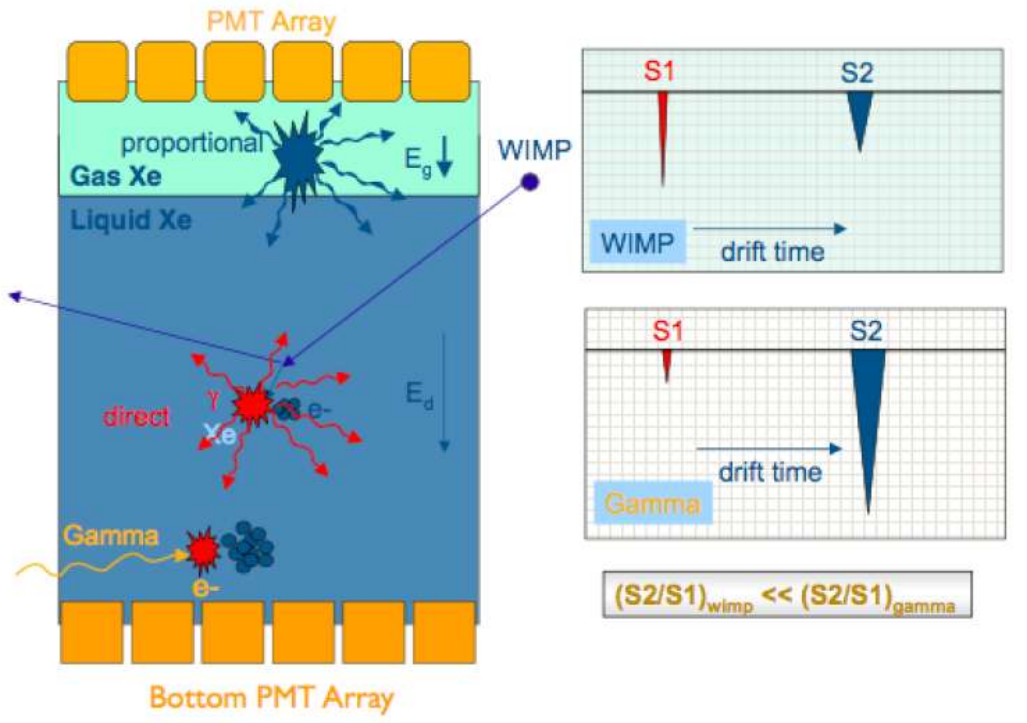


Probability ≥ 3 events 5.4%
低エネルギーに集中:スペクトル
を用いると、「信号がある」解釈の
方が当然はるかに好ましい。

CDMSII実験のSiによるデータ待ちわびられていたら、

XENON100, 7.6td

XENON100



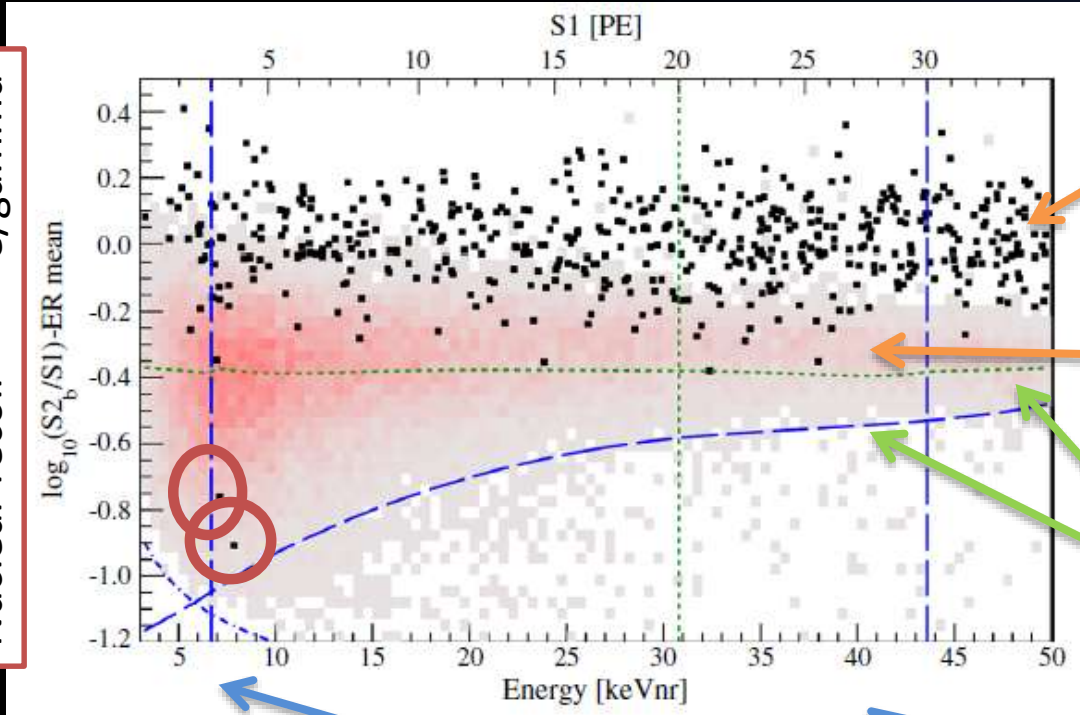
Rafael,
TAUP2011

$$\left(\frac{S2}{S1} \right)_{n,\chi} \ll \left(\frac{S2}{S1} \right)_{e,\gamma}$$

- BGはe/g →トラックが長く、取り出せる電離電子多
- 原子核反跳 →トラックが短く電離電子取出にくい
- NRでもS2が見え、低Energyで分離能力低下小。

観測データと中性子による擬似データ

Nuclear recoil \leftrightarrow e/gamma



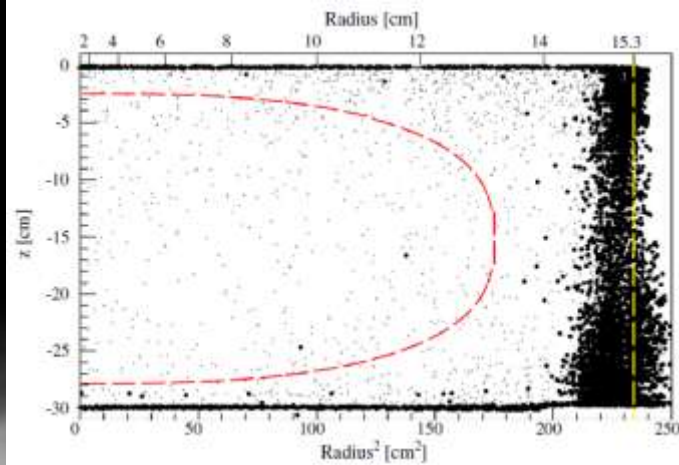
Observed data

Neutron source
(causes nuclear recoil)
calibration data

99.75% rejection line and
97% contour of NR

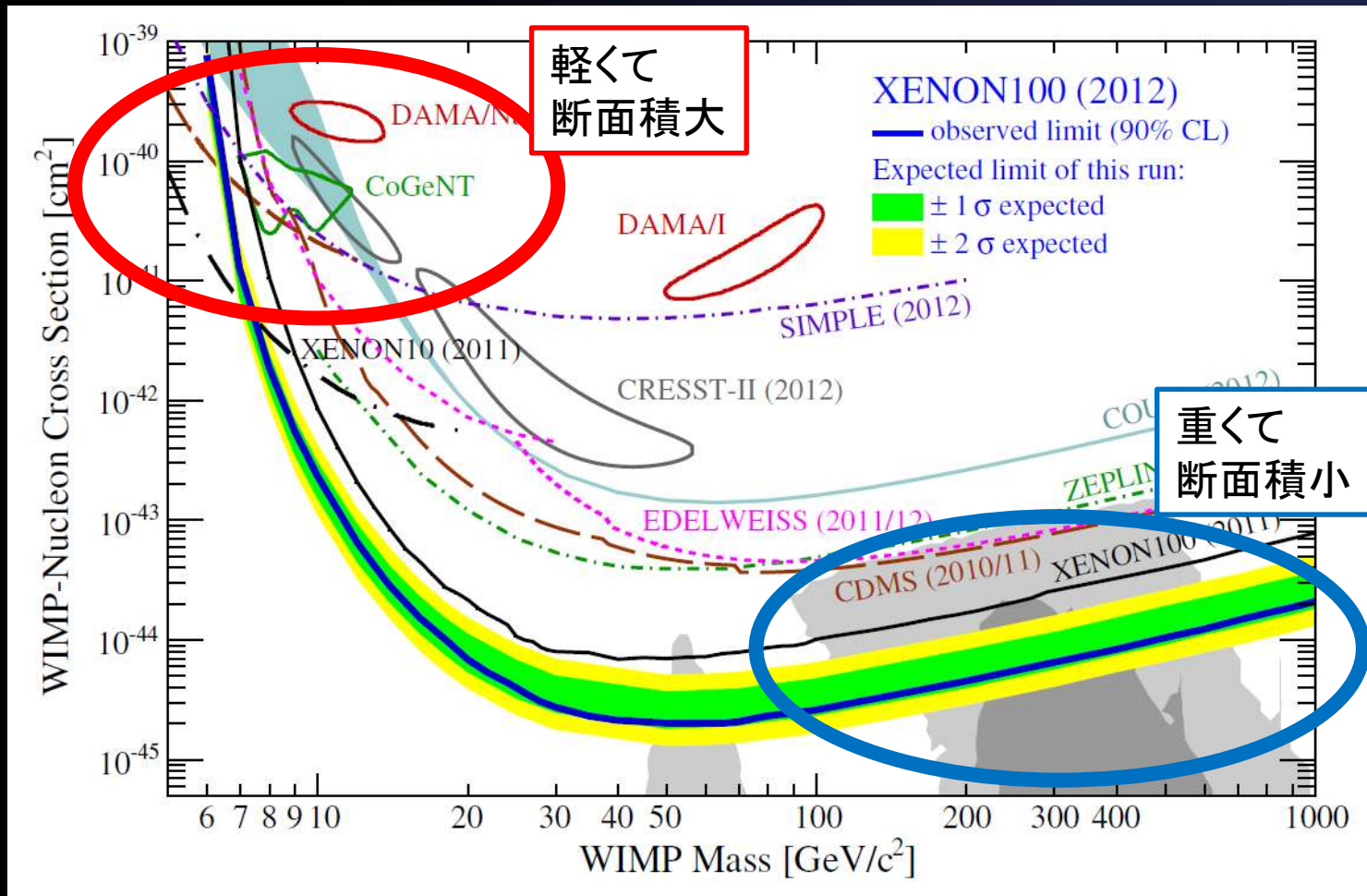
DM search window
(6.6-43.3keVnr)

- 2 events remained
- 1.0+/-0.2BG expected



直接探索の現状

E. Aprile et al., PRL 109, 181301 (2012)



軽いDM:矛盾の無い解がある可能性？実験的に難。
重いDM:15年で4桁の感度向上。いよいよか。

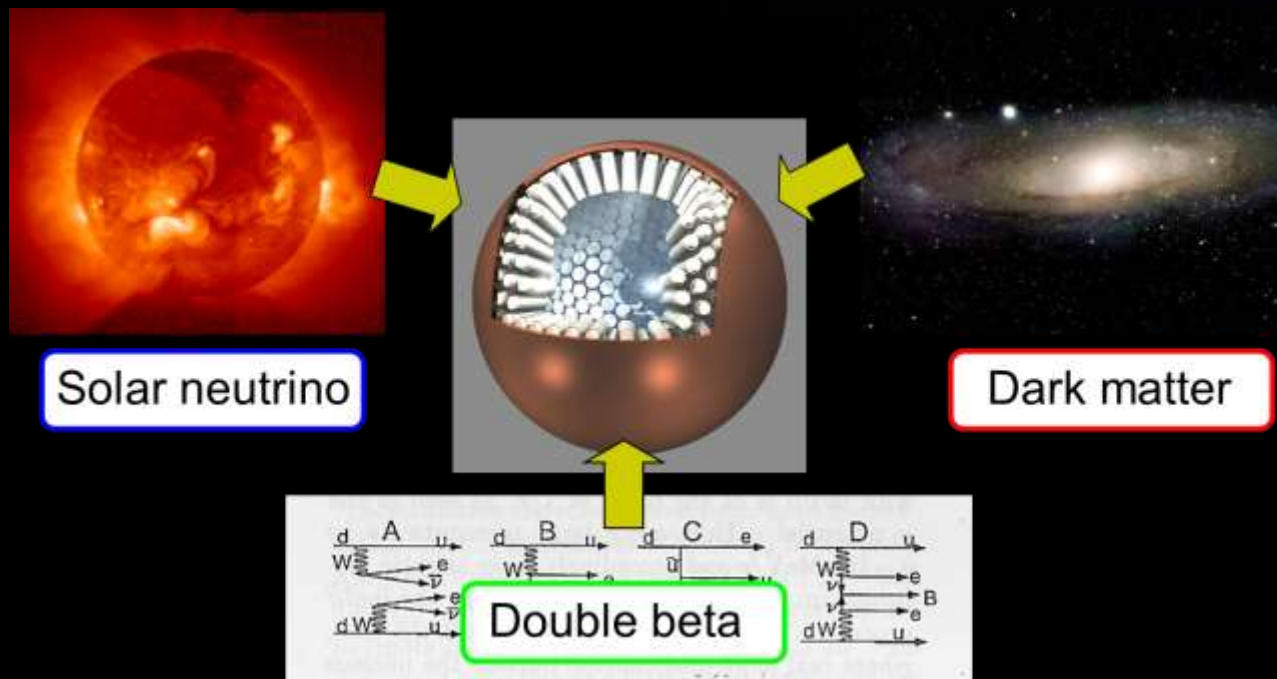


XMASS experiment

● 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)

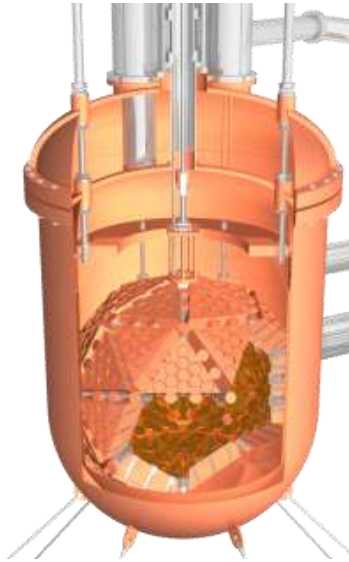
Y. Suzuki, hep-ph/0008296



- 液体キセノンを用いた、大型化のしやすい低バックグラウンドの検出器を提案。キセノンは大気から集めるので、原子炉から発生する希ガスの仲間クリプトン(⁸⁵Kr)が混入するため忌避されていたが、独自の蒸留装置で解決。

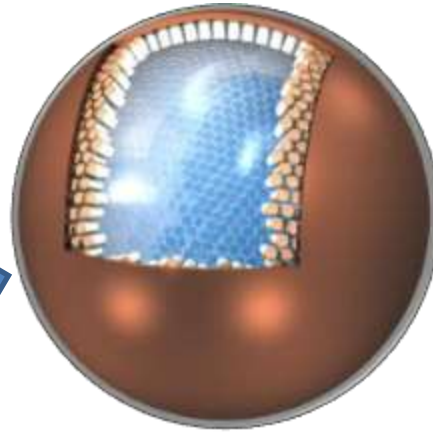
最終目標と暗黒物質探索

XMASS-I



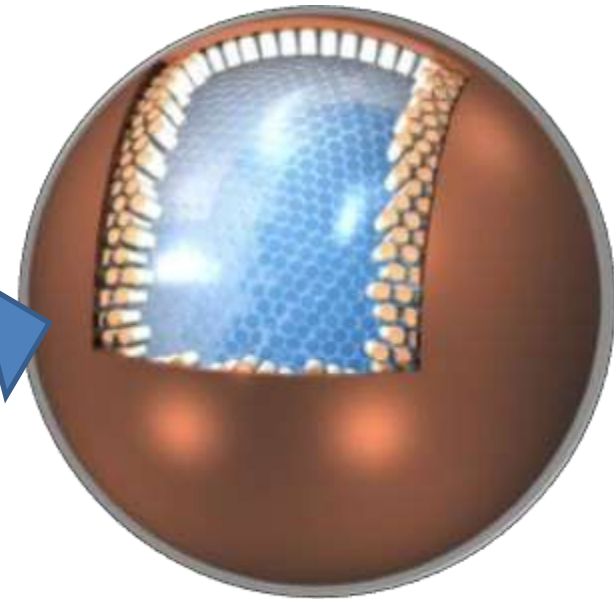
DMに特化
0.1t有効質量(0.8t)
642 PMTs
2007-
暗黒物質の発見

XMASS-1.5



DMに特化
早期の実現
1ton (5ton)
2015年に開始したい
暗黒物質の発見
季節変動・スペクトル

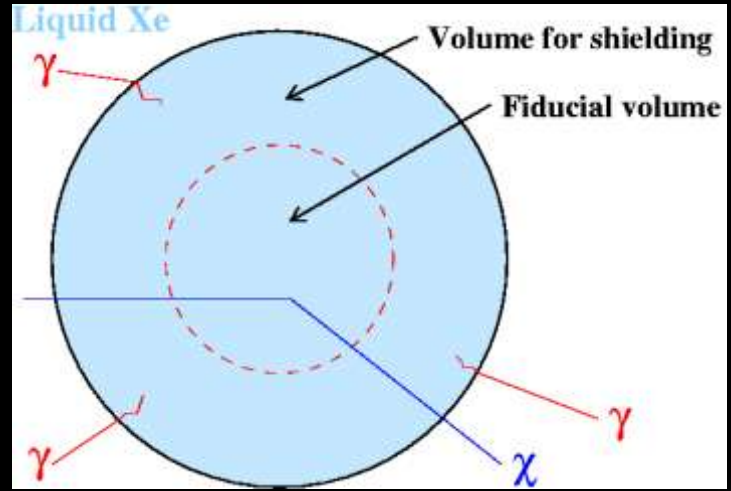
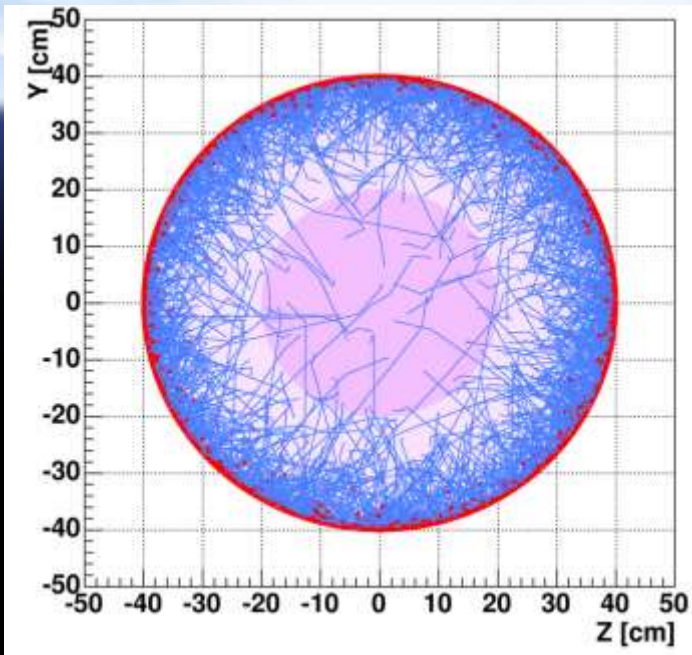
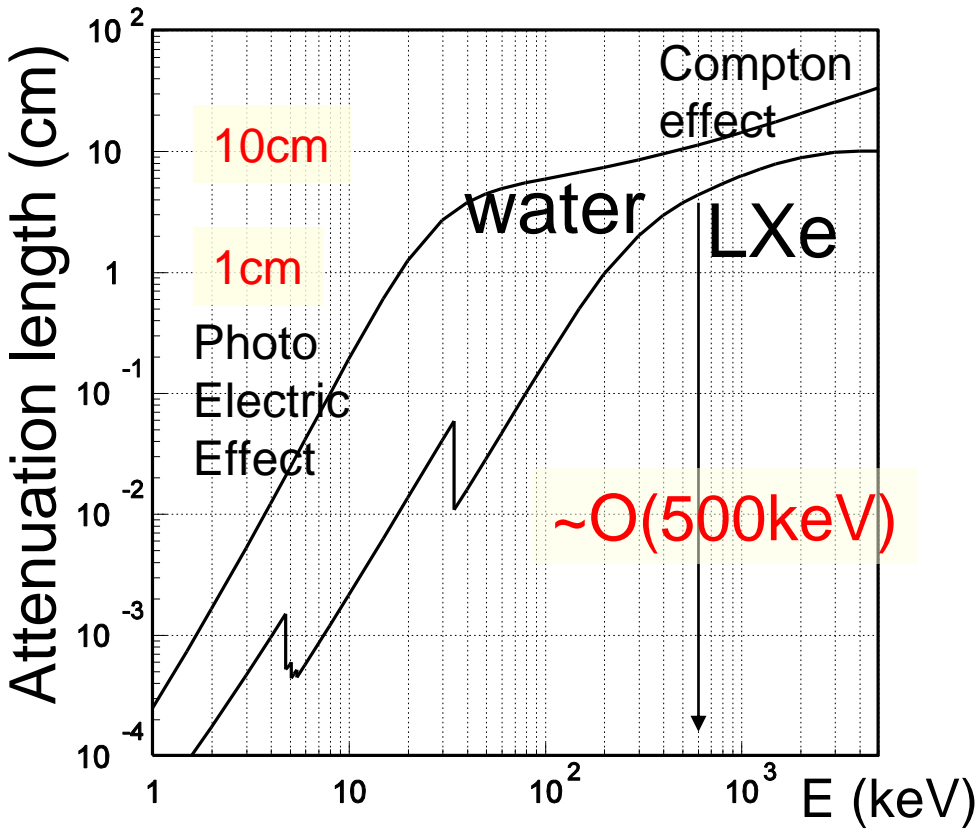
XMASS-II



DM, solar, $\beta\beta$
10ton (25ton)
DMの詳細研究
pp Solar nu
 $\beta\beta \sim 30\text{meV}(\text{IH})$

現在はXMASS1.5の設計を行いながらXMASS-1の改造作業進行中

自己遮蔽($Z=54, 3\text{g/cc}$) による低バックグラウンド化

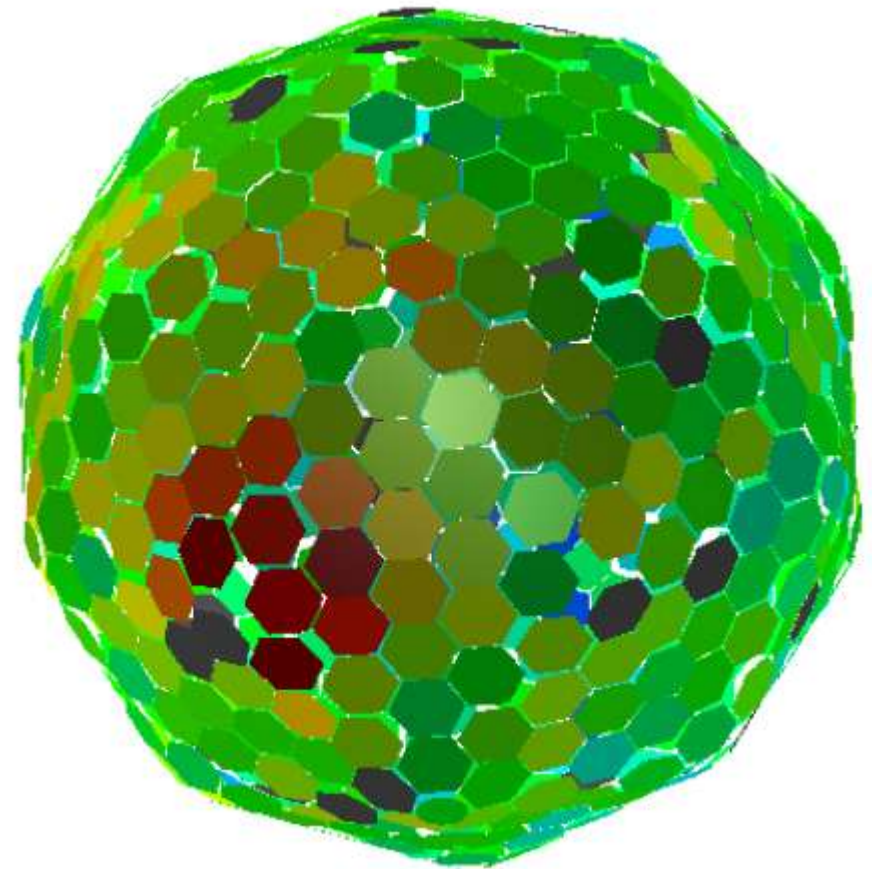


- 500keVでも光電効果が優勢: 低エネルギーの放射線に対しては自分自身で強力な遮蔽の効果が期待される。究極BG中性子も遮蔽。
- 暗黒物質は相互作用が弱いので検出器内一様→深い内部で探索

事象再構成

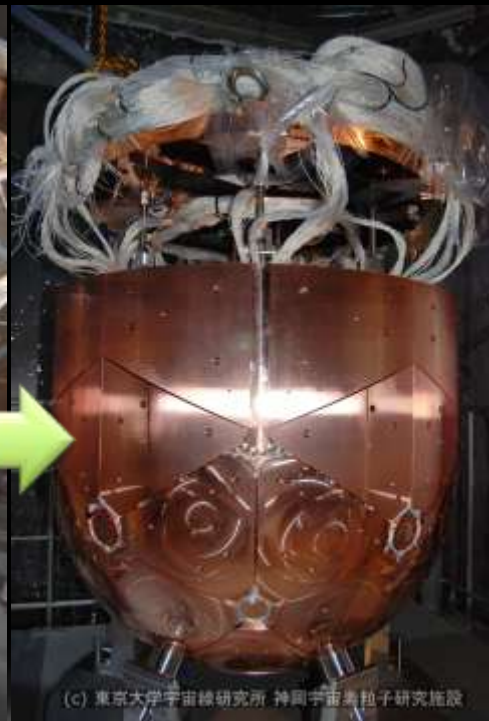
Colored photo cathodes
indicating number of p.e.
(photoelectrons)
recorded by PMTs

Interaction point (vertex)
can be reconstructed from
the PMT hit pattern.



100kg検出器の構造

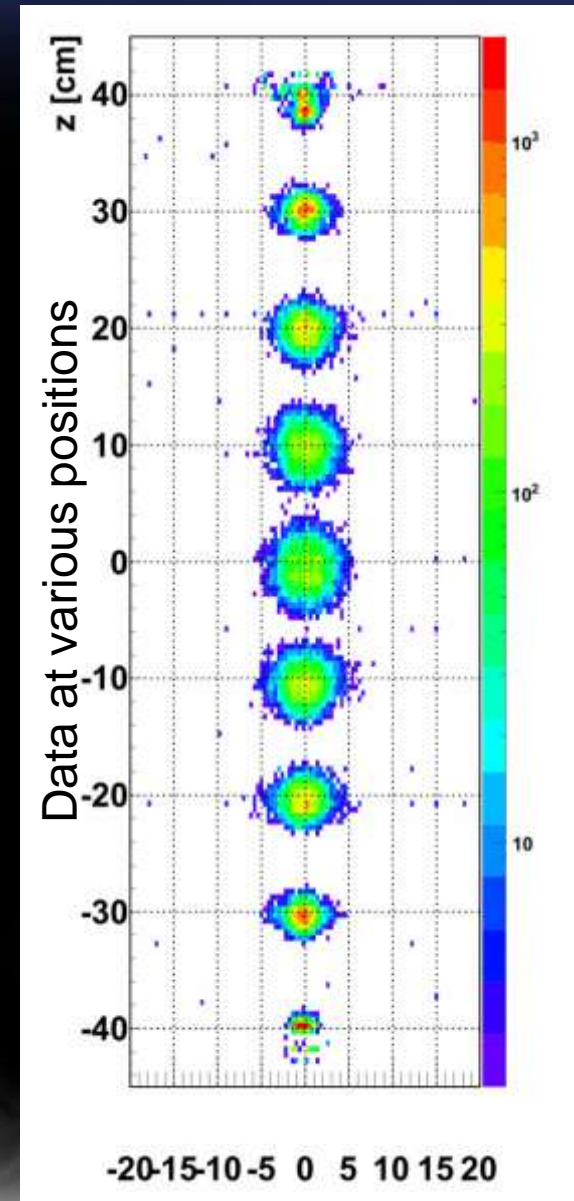
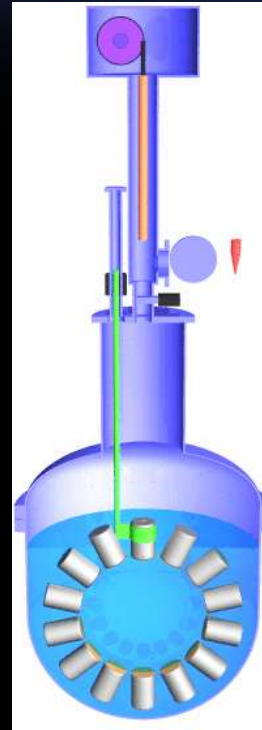
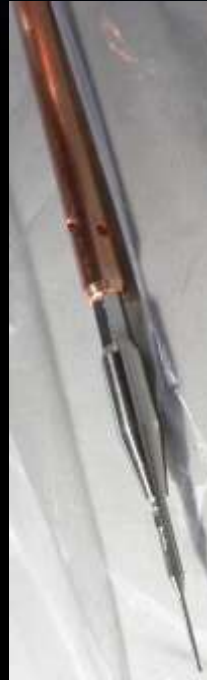
- 1層型液体キセノン検出器 (-100°C, ~0.065MPa)
 - 液体キセノン835kg, 有効質量100kg, 642 PMTs
 - NaI(Tl)よりも良く光るシンチレーター。175nmの透過率も抜群。
 - 14.7光電子/keVで、5keV_{elec equiv.} (~25keV_{nuclear recoil}) 解析敷居値





高い光電子数と事象再構成能力

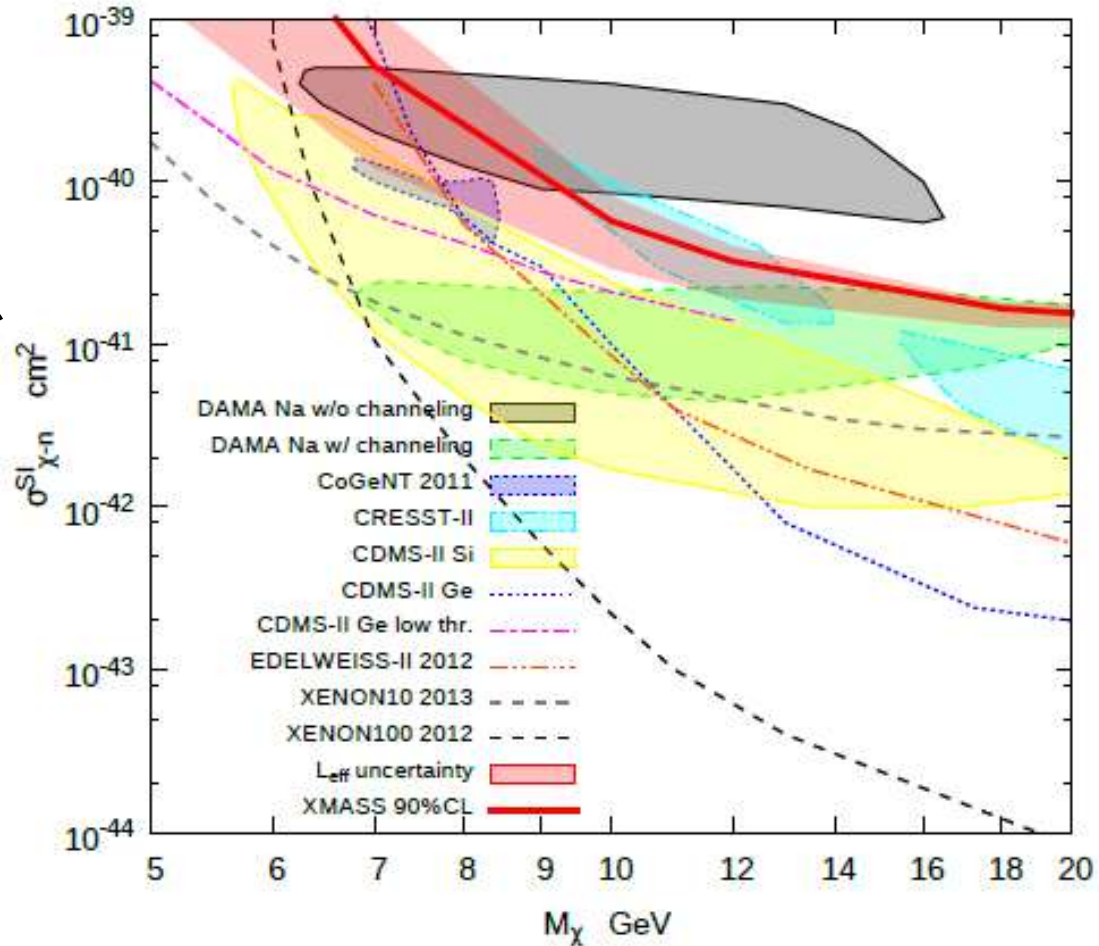
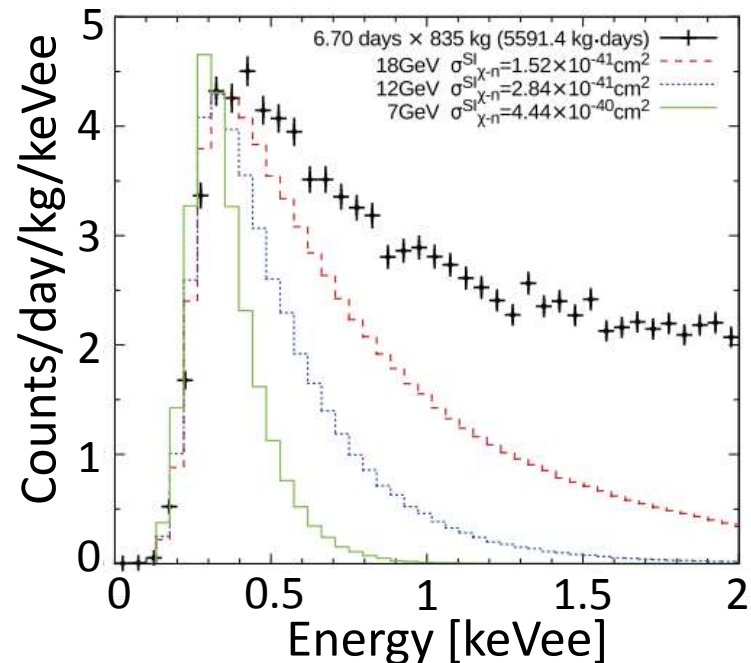
- 中心に細い⁵⁷Co線源
14.7p.e./keV
世界最大。
- 光電子数分布はMCで再現。
- 一分解能~1cm



低質量の暗黒物質探索

PLB 719 (2013) 78-82

- 全体積 (835 kg) の解析
- 敷居値 0.3 keVee
 - 事象再構成は敷居値高くなる → 大質量向け。現在解析中。
- 6.80日分 5591.4 kg day
- 1年でDAMAに相当する exposureによる季節変動も解析中。大型検出器の利点

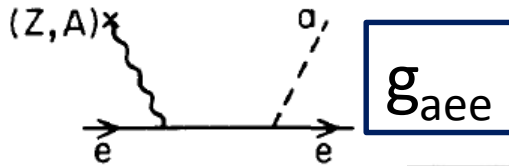


太陽アクシオン探索

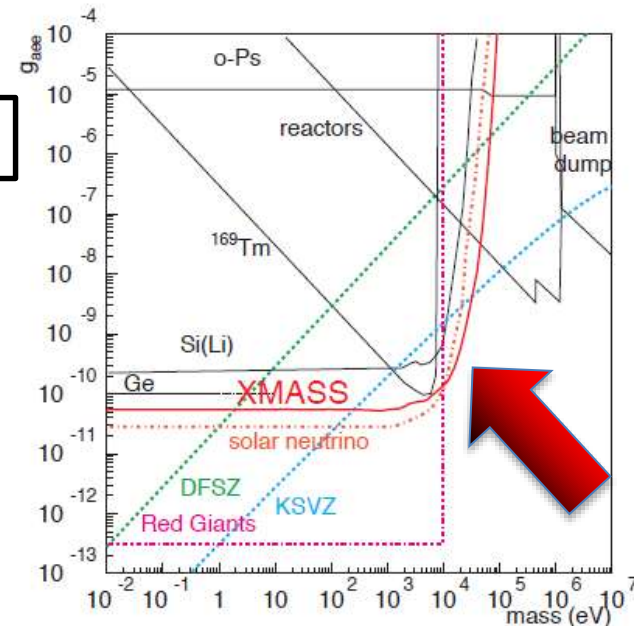
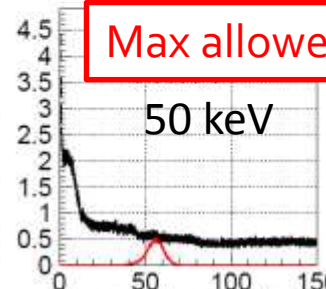
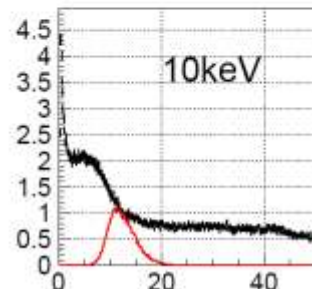
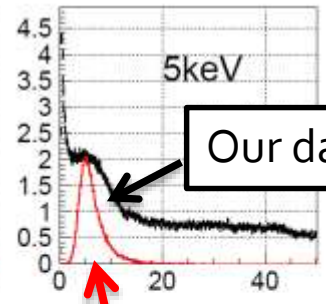
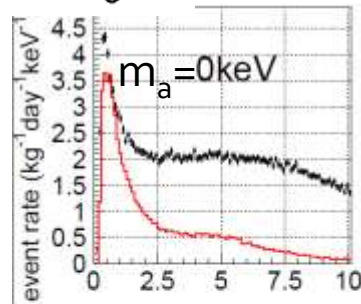
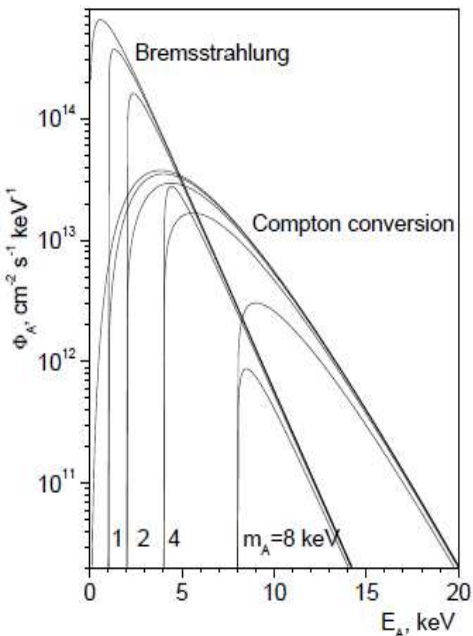
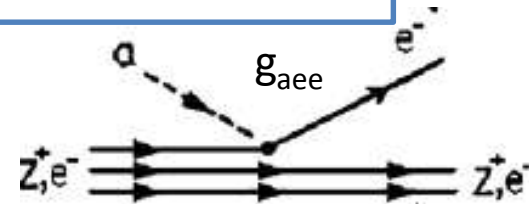
PLB 724 (2013) 46-50

- 強い力のCP問題を解決するアクシオンとその類似粒子
- 太陽中で発生し、光電効果と類似の反応で検出ができる。全体積。
- 大型で低敷居値はぴったり。→ 太陽地球距離での季節変動？

Bremsstrahlung and Compton effect

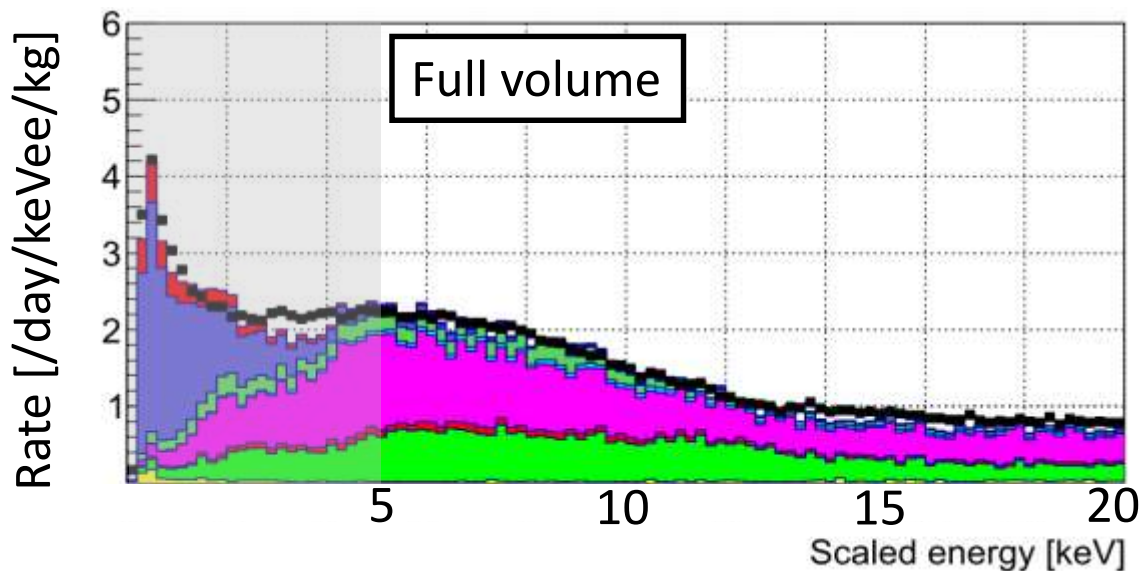
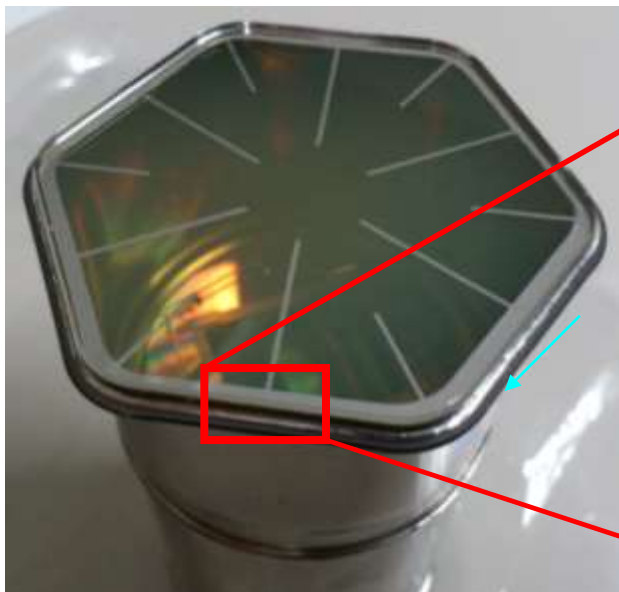


Axio-electric effect



現在の検出器のバックグラウンド源

主要な原因はシール用のアルミ。≥5keVの大部分が説明できる。

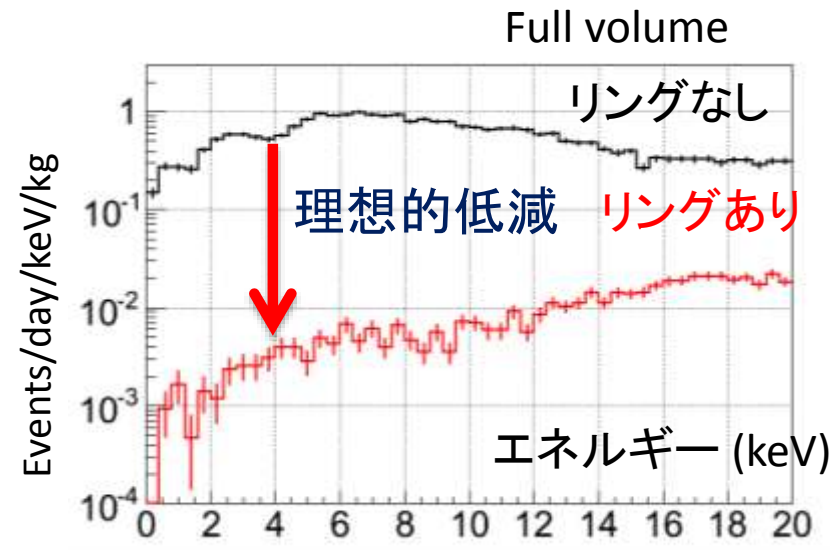


- 黒線: 実データ
- 色つきヒストグラム: BG (MC)
 - 銅表面付着 210Pb
 - PMT アルミ 235U-231Pa
 - 210Pb
 - 232Th
 - 238U-230Th
 - PMTガンマ線
 - Gore-Tex 210Pb (未確定)
 - Gore-Tex 14C (未確定)

現在進行中の改修作業

- 改修作業の目的
 - バックグラウンドの理解の確認
 - 表面付着のラドン娘核の低減技術の確立
- 低減目標レベル
 - アルミは除けない。当初予定の感度は難。
 - 1桁以上低減期待→DM探索感度向上
- 次世代検出器用には、十分綺麗なアルミが存在する。

銅リングで放射線を遮蔽
電解研磨で放射能を除去



設計中のXMASS-1.5

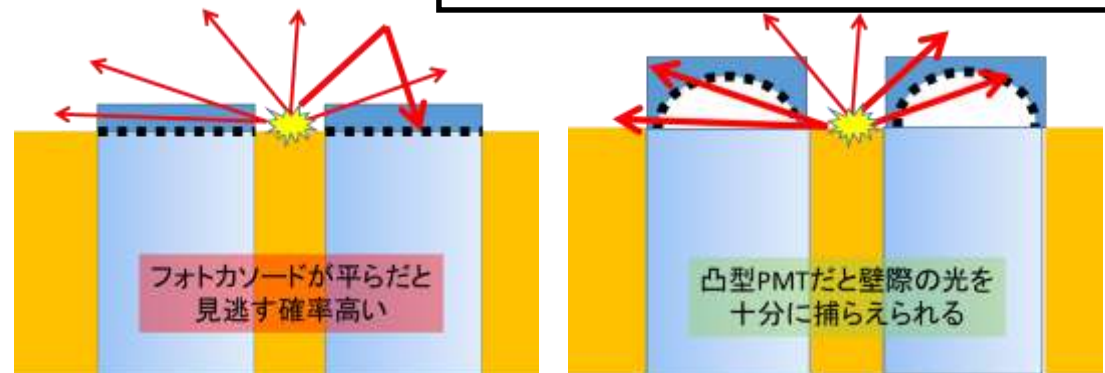
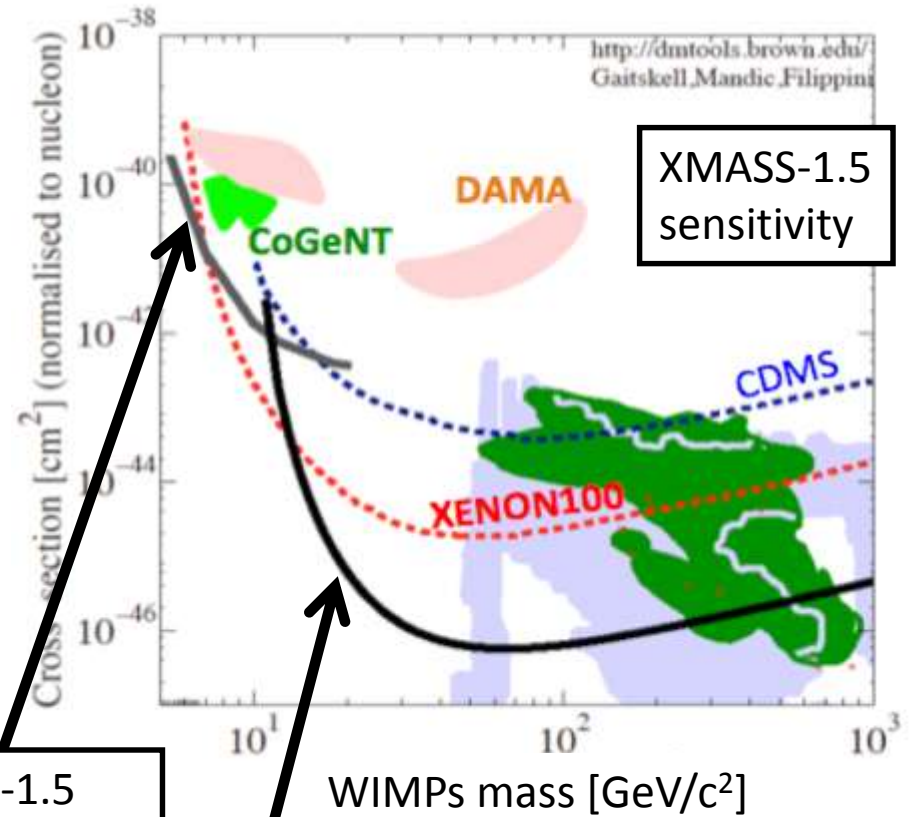
- 全体5 ton (有効質量1 ton)
- BG低減のため:
 - 汚いアルミは使わない
 - 疑わしいGORETEXは使わない
 - 表面 ^{210}Pb を低減 (< 1/100)
- 表面事象を容易に同定できる
新型PMTを製作中。量産可能。
最適化を行っている。

凸型光電面
もっとでっばら
せる予定。



XMASS-1.5
全体積データ

XMASS-1.5 FV cut, 2keVthre, 1yr



世界の状況と競争

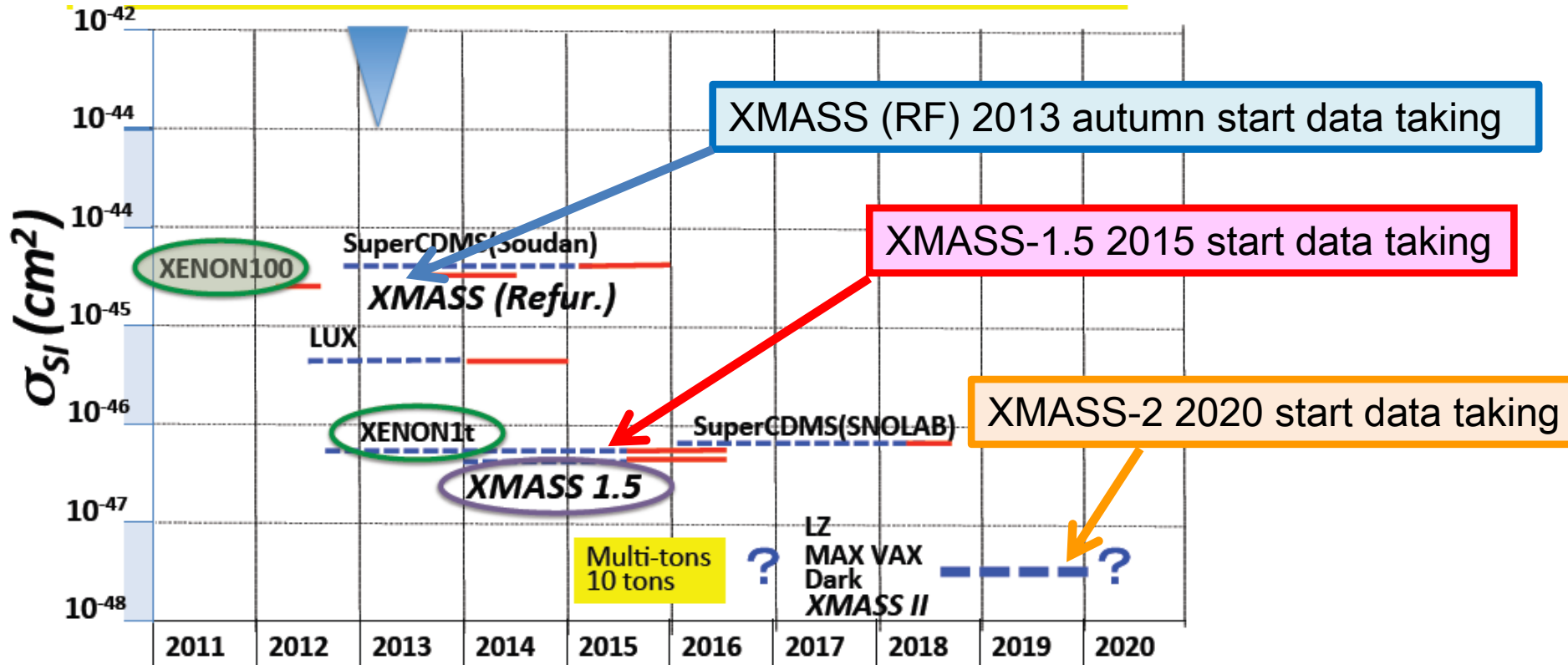
液体希ガス検出器

低温半導体
検出器

世界中でトンスケールの実験が計画されている(XENON1t, LUX, DEAP, SuperCDMS)

- 2013秋: XMASSの改修作業が完了し、データ収集再開
- 2014: XMASS-1.5建設開始予定
- 2015: XMASS-1.5の完成とコミッショニングラン開始予定
- 2016–2018: XMASS-1.5物理データラン
- 2020: XMASS-2物理データラン

核種を変えた探索や方向に感度のある検出器はさらにその先に来るでしょう。



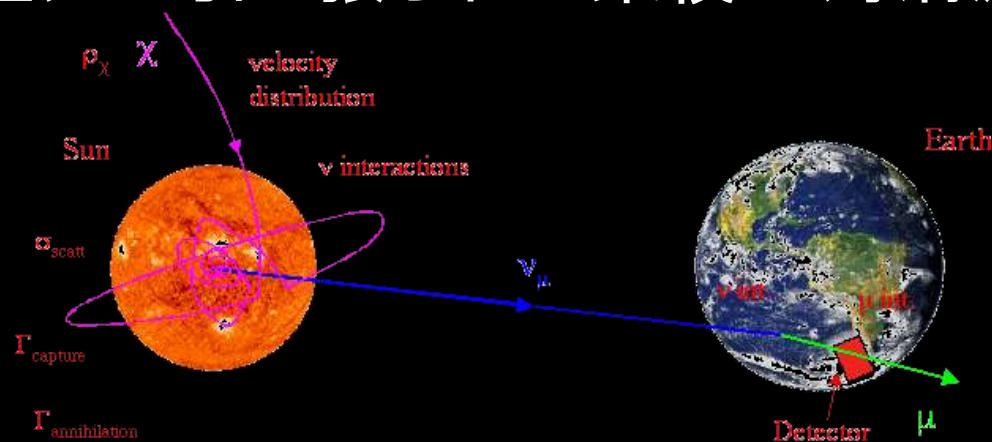
まとめ

- 素粒子物理学として暗黒物質の正体解明は緊急の課題
- 直接検出では、DAMAやCoGeNTが比較的軽い($\sim 10\text{GeV}$)暗黒物質の信号を捕らえたと主張。CDMSII Siでもそれらしき事象？ただし敷居値付近の検出器は性能ぎりぎりでもあり、十分な検証が必要。
- XMASS実験は大型になるほどメリットが大きい。表面バックグラウンドのコントロールに見通しがついてきた。世界中でトンスケールの大型の検出器が予定されている中、我々の次世代検出器で世界のほかの実験に先んじて結果を出したい。2015年ころから 10^{-46}cm^2 まで探索を目指す。

間接検出の方法

図: ニュートリノを観測する場合の例

太陽の重力で引っ張られて集積 → 対消滅 → ニュートリノ



対消滅は密度の2乗に比例するので、密度が高いところを見るのが有利。銀河中心が良いが、密度分布は良く分かっていない。信号があればいいが、ないと他と比較しづらい。

陽電子、反陽子、反重水素など、普通では発生しづらい粒子の探索も面白い。BESS, PAMELA, AMS...