

最先端研究II 暗黒物質

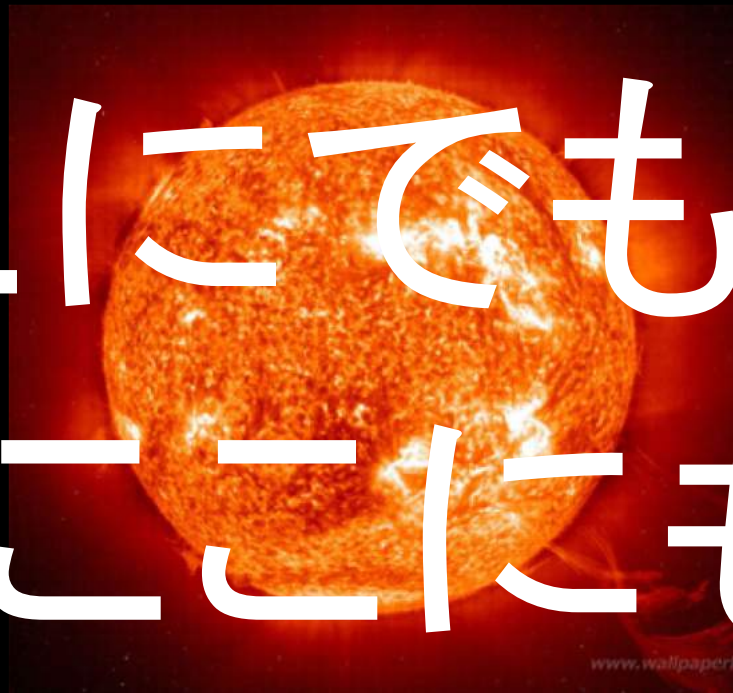
宇宙線研究所 森山茂栄(しげたか)

実験室で
暗黒物質を
直接検出し
その正体を解明する

暗黒物質

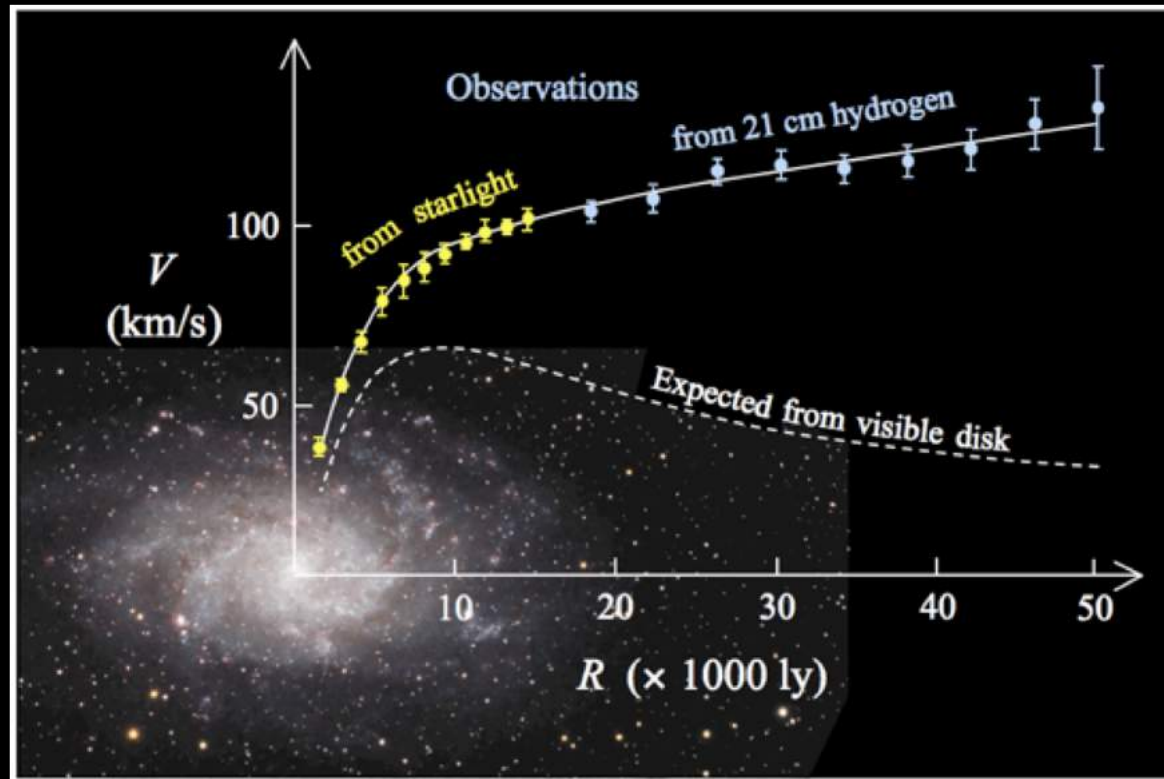
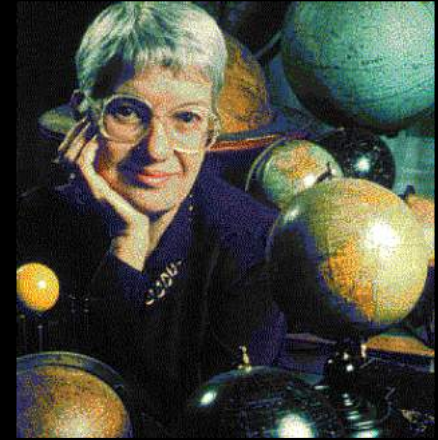
- どこにある？

どこにもでもある
いまここにもある



なぜ有る事がわかる？

- ないとおかしなことが多すぎる
- たとえば銀河の回り方

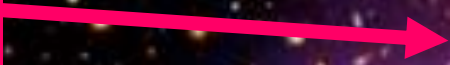


この方法で、太陽系近傍に 0.3 GeV/cc の密度で存在することが判明


- 衝突する銀河

The bullet cluster (弾丸銀河団) 衝突中

通常の物質
摩擦のため
中心に残る



暗黒物質
ぶつからない
ので素通り
(観測は重力
レンズ効果、
色は仮)

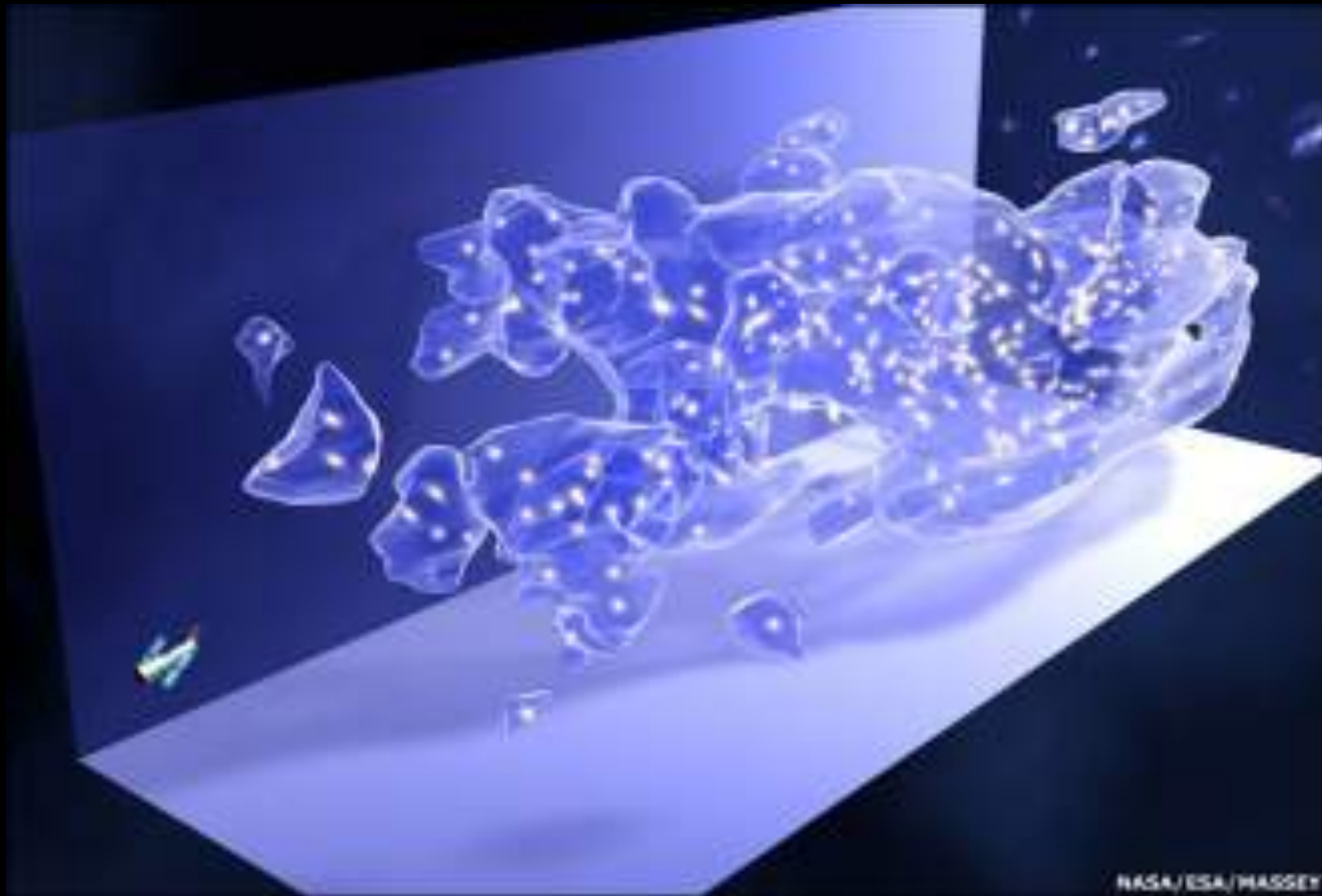


Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.;
Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.;
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/
U.Arizona/D.Clowe et al.

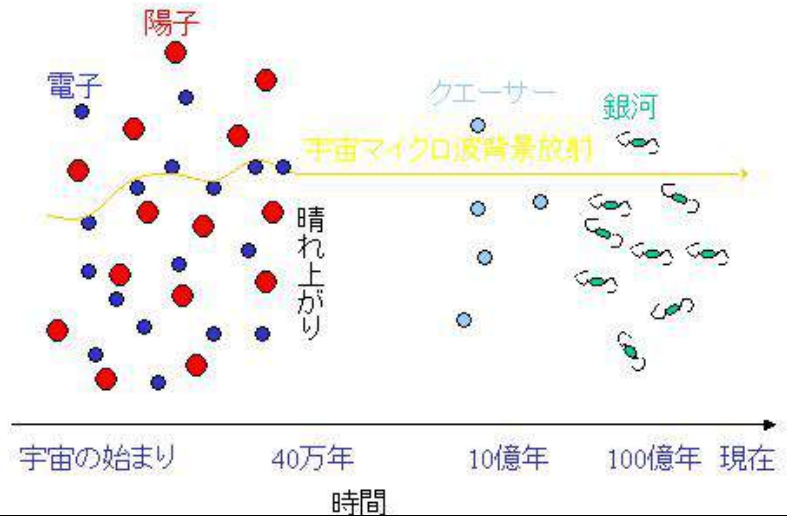
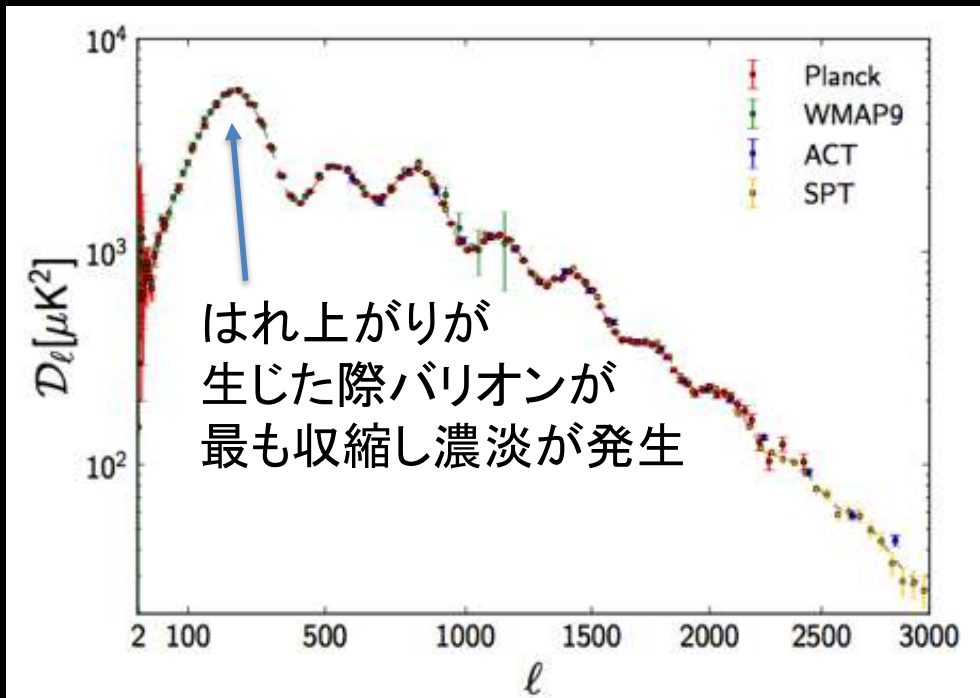
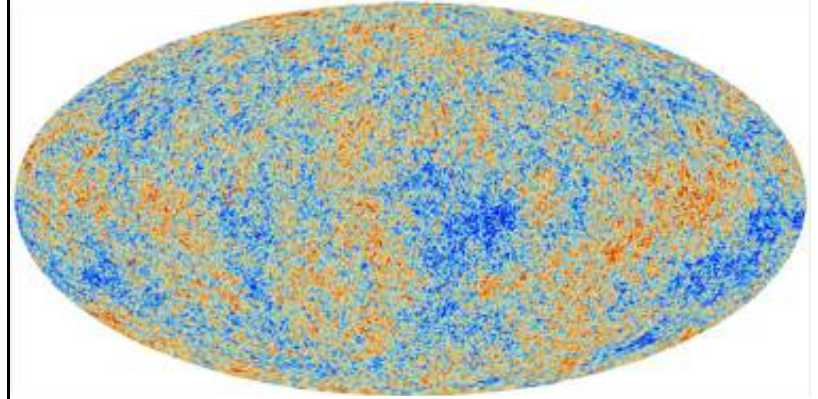
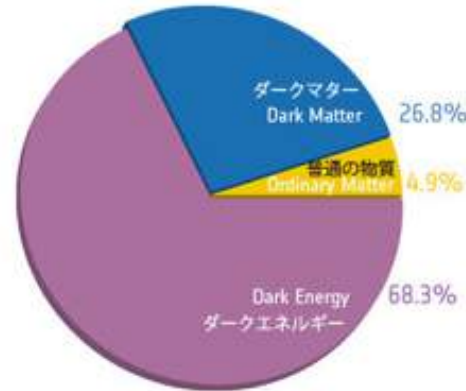
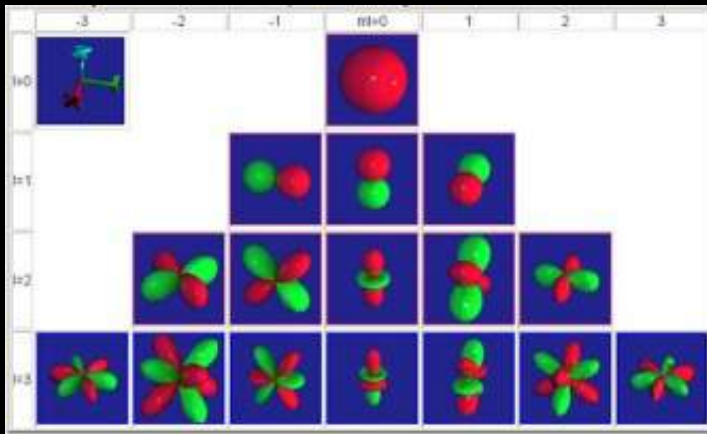
動画でわかりやすく



- 宇宙論的な深さでの質量分布



宇宙開闢時に発生した電波の解析



小規模

大規模

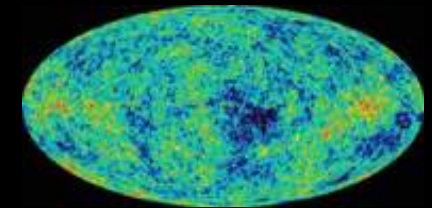
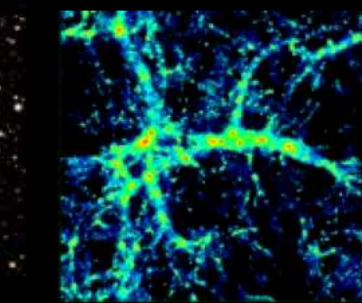
銀河の回転速度

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



これら沢山の「おかしなこと」が
「たった一つの未知粒子」
を仮定すれば美しく説明できる！

暗黒物質の同定

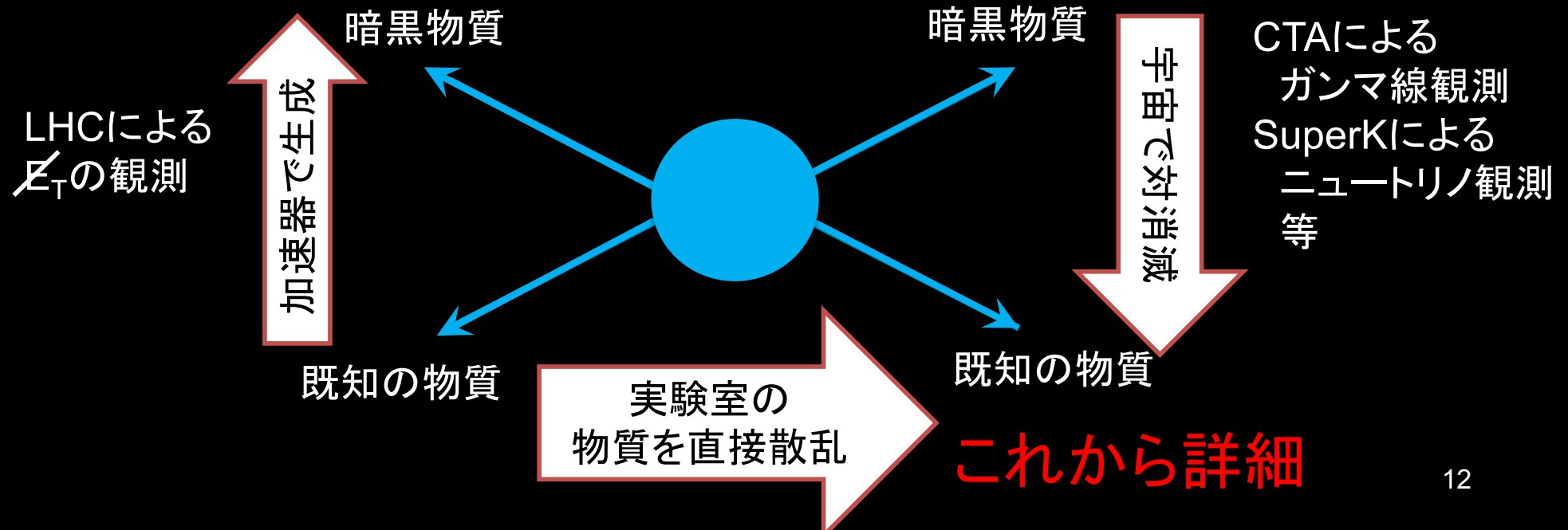
素粒子物理としても垂涎の的

- 新しい粒子＝新しい物理学の入り口
- ヒッグス粒子が見つかった
 - －ただでは済まされないことがはっきりした
 - －絶対になにか隠れた理屈がある
 - －新しい粒子が見つければ、、、



探索の具体的方法

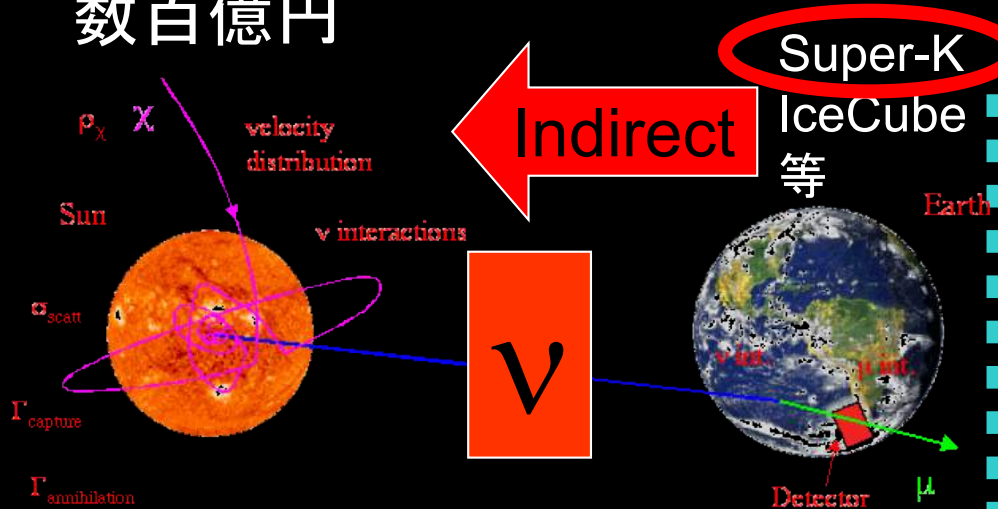
- 電荷を帯びていない、安定な粒子：既知粒子はX。
- 宇宙初期に作られたとすれば既知物質と相互作用
- 素粒子の性質を理解する素過程：3つのアプローチ



暗黒物質研究の方法

数百億円

数千億円



Graphic from Joakim Edsjo

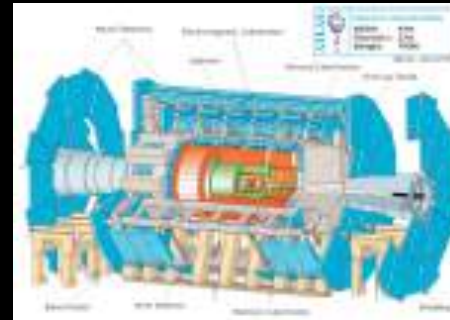
Indirect

Super-K
IceCube
等

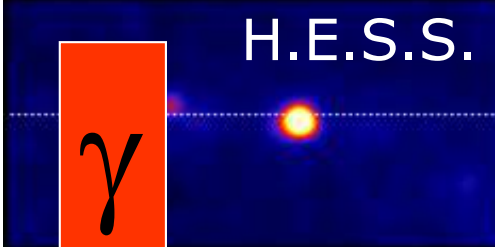
Collider

ATLAS

LHC 2008-



Direct



H.E.S.S.

GLAST
CANGAROO
BESS等



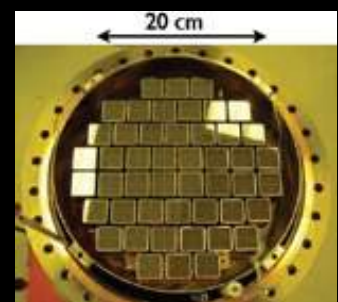
ILC

\bar{p}, e^+, \dots

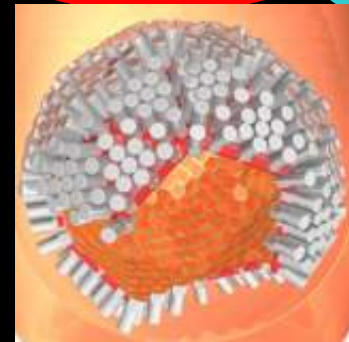
CDMS

XMASS

E_{dep}



XENON10



U. Tokyo
Osaka, Kyoto
Waseda, ...

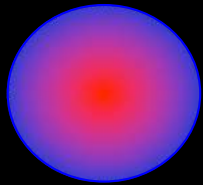
十数億円

高い技術とアイデアで未知の素粒子を掴む

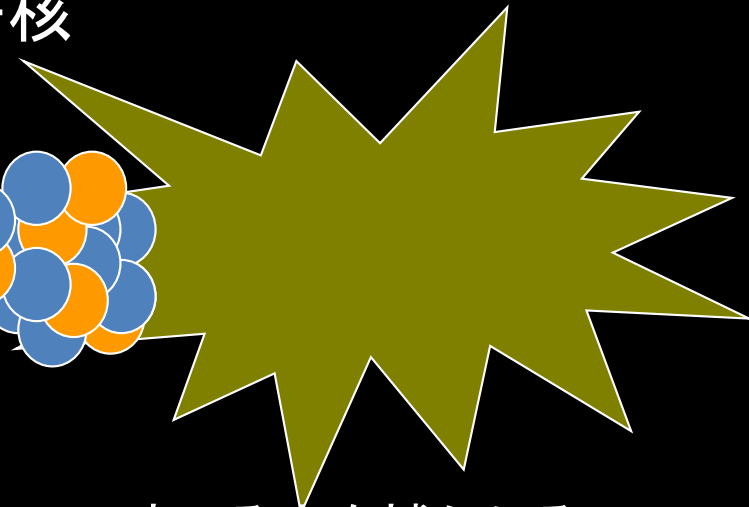
暗黒物質を目の前へ引きずり出す方法

- 普通の「物質」を跳ね飛ばすところを見る

暗黒物質が飛んでくる



原子核



またどこかへいってしまう

この時でる光を捕らえる！！

数keVから数10keVのエネルギー付与

- 最も直接的で、発見後に詳しい研究が可能。
- これができればニュートリノ研究と同じレベルに¹⁴！

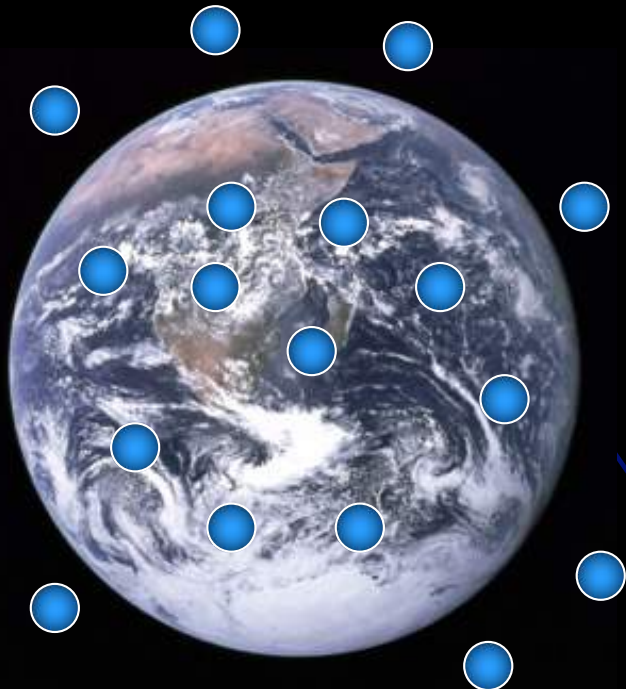
どのくらい存在するか

銀河の回転のスピードから
光る物質から

推測される
質量

3ccに水素原子1個分の差

物にぶつからないので
地球でもスカスカ

A yellow balance scale is shown. The right pan is lower and contains a clear plastic water bottle with a blue label that says "500g". The left pan is higher and contains a small red sphere. The scale is tilted to the right, indicating the bottle is heavier.

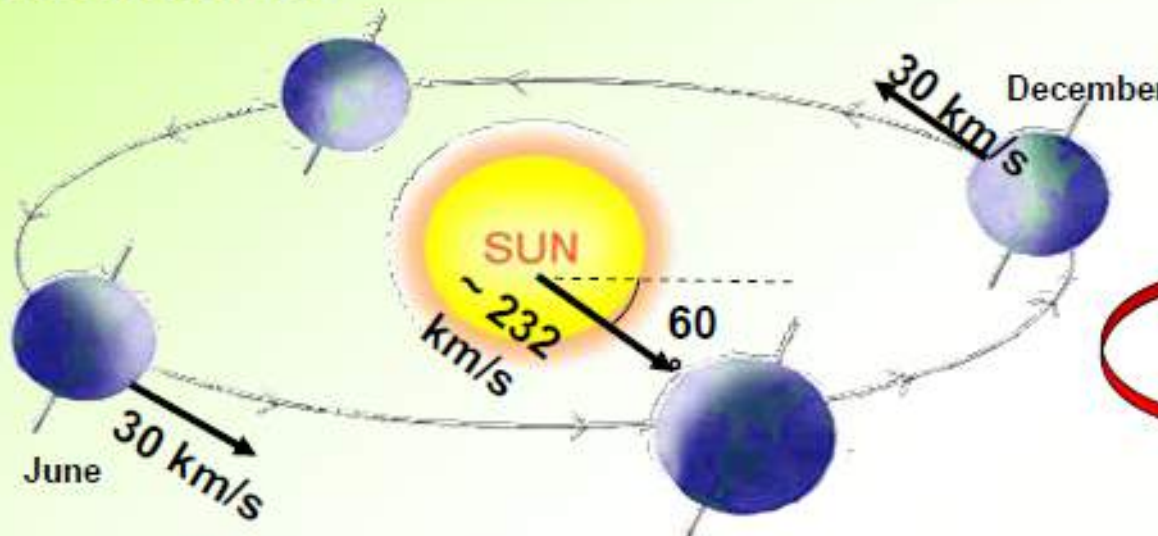
地球の体積の中にも
たった500g程度だが
宇宙のサイズになると
影響が大変大きい(サイエンスゼロ)

<http://www.kab-studio.biz/Programing/Codian/Pointer/01.html>

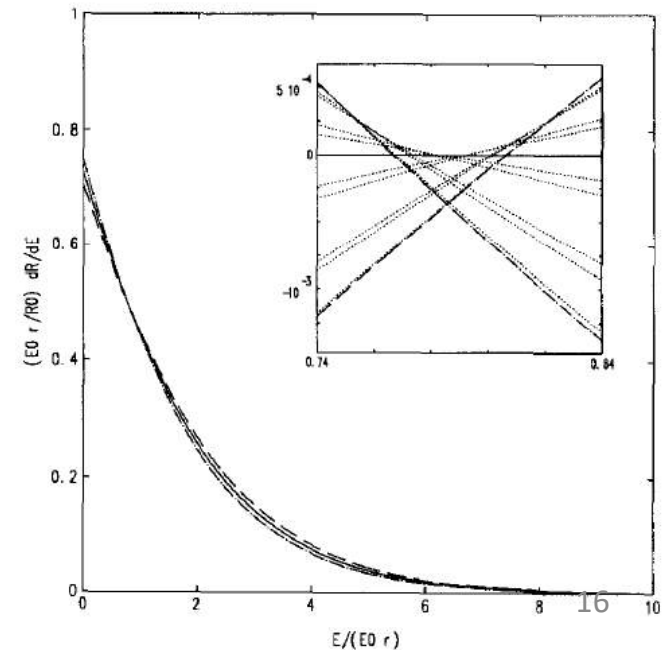
もう一つの特徴：季節変動

- 暗黒物質が飛び交う銀河の静止系に対して太陽系が運動。公転する地球に乗っていると暗黒物質の「風」の強度が季節により振動。
- これによって反跳する頻度が変化する！

Drukier, Freese, Spergel PRD86
Freese et al. PRD88



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



実は「振動」が見えている実験がある

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

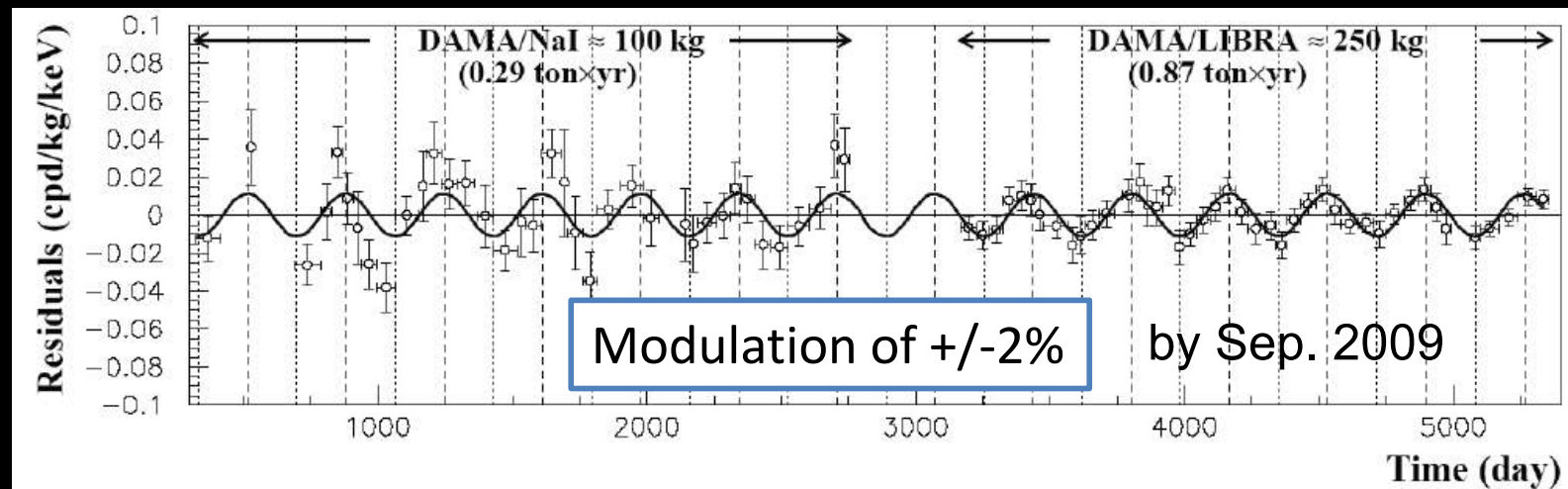


Residual contaminations in the new DAMA/LIBRA NaI (Tl) detectors: ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K at level of 10^{-12} g/g

- 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

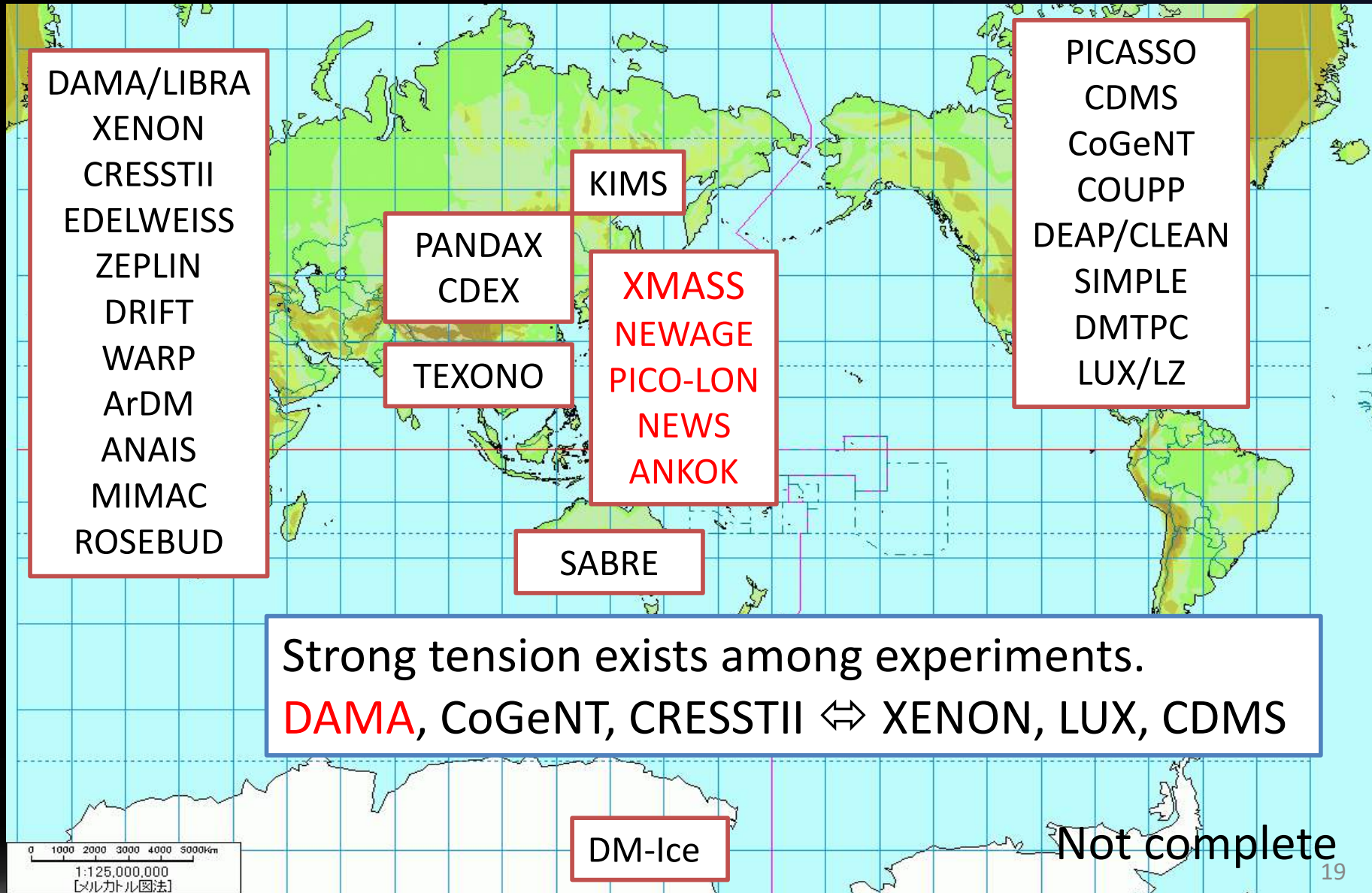
季節変動の信号：暗黒物質由来？！

- 放射性不純物の少ないNaI(Tl)結晶を利用
- $\sim 9\sigma$ もの有意度をもった変動信号：位相もあってる

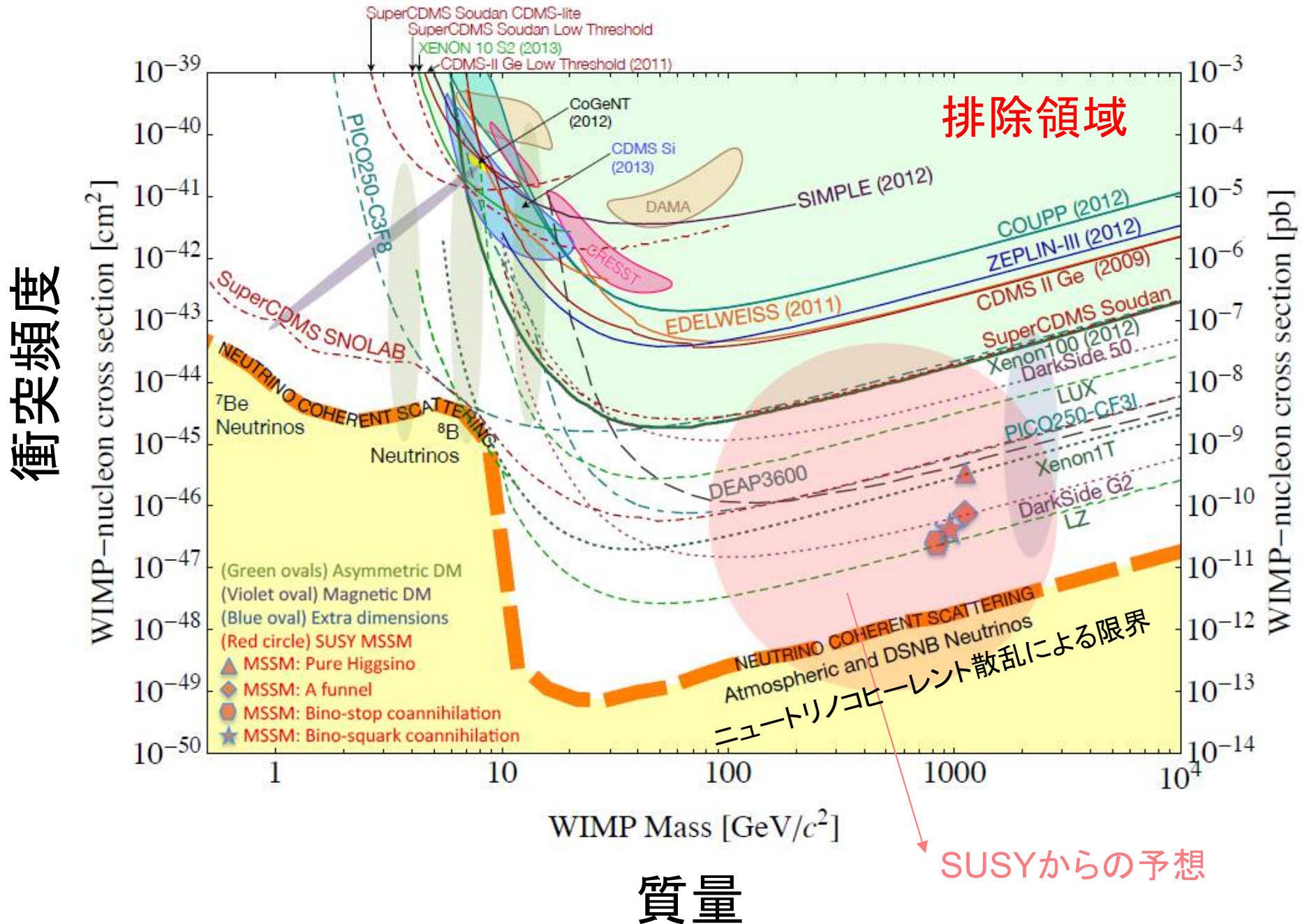


- 最初は沢山批判もあったが真剣に検討を始めた (light DM, IDM, 単なる原子核反跳でない場合、.)
- **ただし現在のところ他の実験では振動はおろか衝突する事象もほとんどない。変わった粒子？**

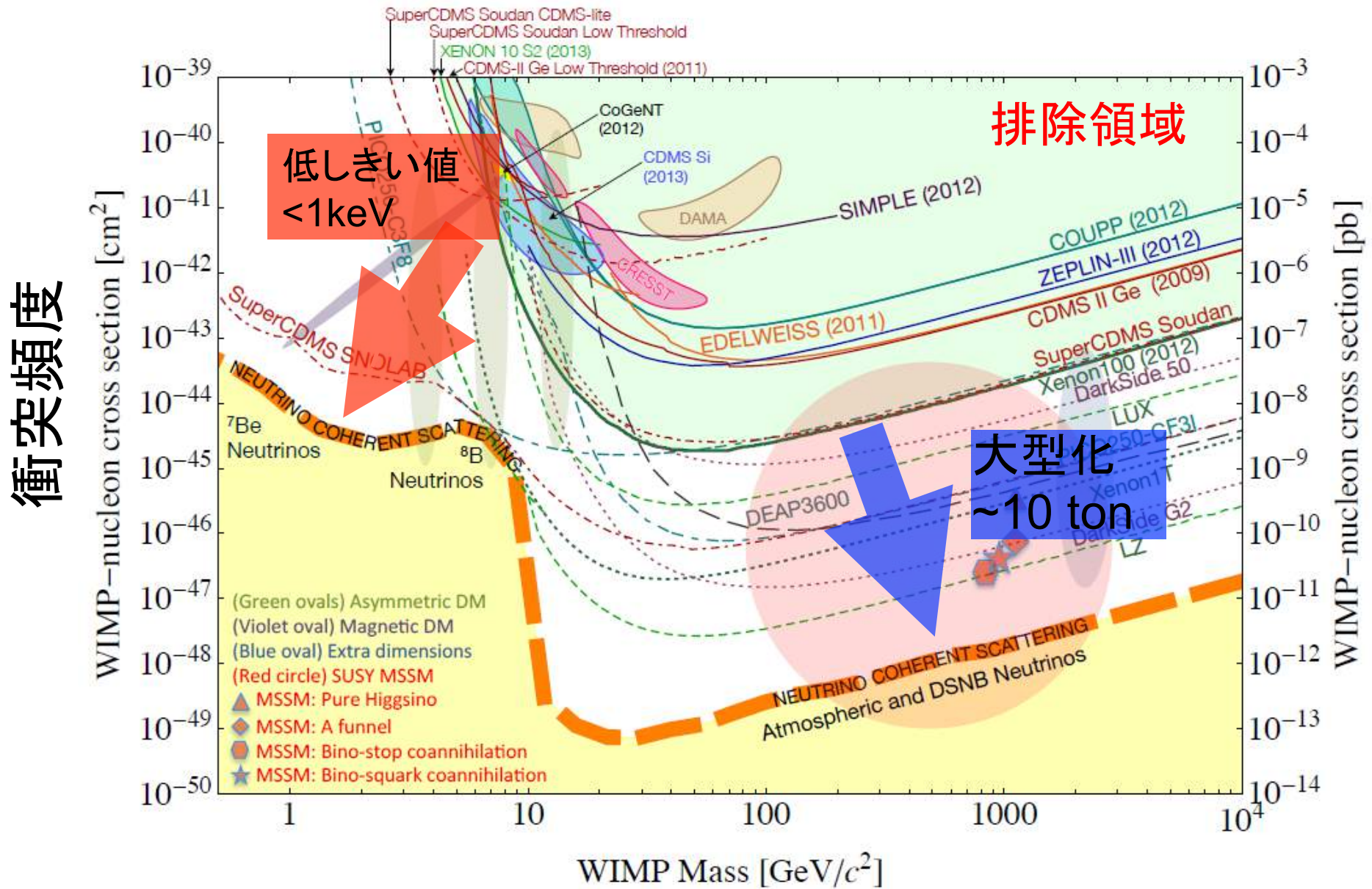
世界中で30以上の実験！



暗黒物質候補の代表例：ウィンプス



将来の方向性



国内外で行われている実験の紹介

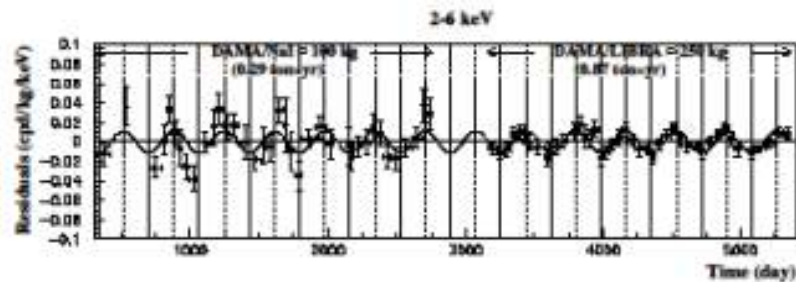
- 研究開発
 - 徳島大: PICOLON
 - 名古屋大: NEWSdm
 - 早稲田大: ANKOK
 - 福井大、京都大、東北大、岡山大等も研究開発中
- 小型装置で実験中
 - 神戸大: NEWAGE
- 大型装置で実験中
 - 東京大他: XMASS
- 超大型・世界最高感度で実験予定
 - 東京大・名古屋大・神戸大: XENONnT実験に参加

PICOLON計画

Pure Inorganic Crstal Observatory for LOw-energy Neutr(al)ino

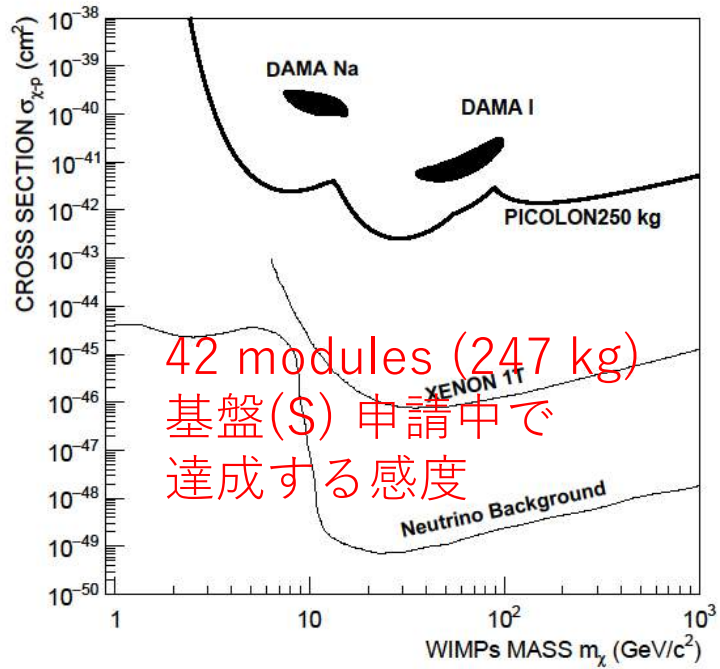
- 超高純度の無機結晶を用いる
- 宇宙暗黒物質の直接探索
- タリウム添加ヨウ化ナトリウム結晶 [NaI(Tl)] を使用
 - NaI(Tl)は宇宙暗黒物質に対する感度が高い
 - DAMA/LIBRAの検証
- 現在、NaI(Tl)検出器では世界2～3位の低バックグラウンド
- 純度向上により世界最高感度を目指す。

徳島大
大阪大
東北大
東大IPMU
大産大
I.S.C.Lab.



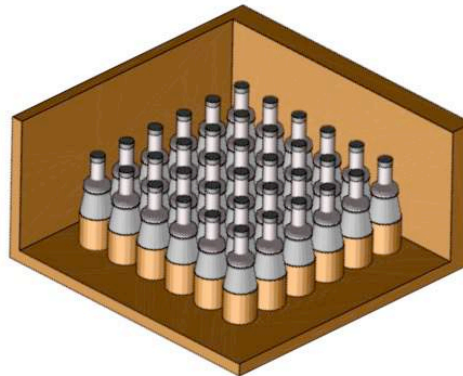
- DAMA/LIBRA R.Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2648 : 250 kg NaI(Tl)
- 他のグループによる検証ができていない。





SCALE UP

247 kg NaI(Tl)
~2021
基盤(S)

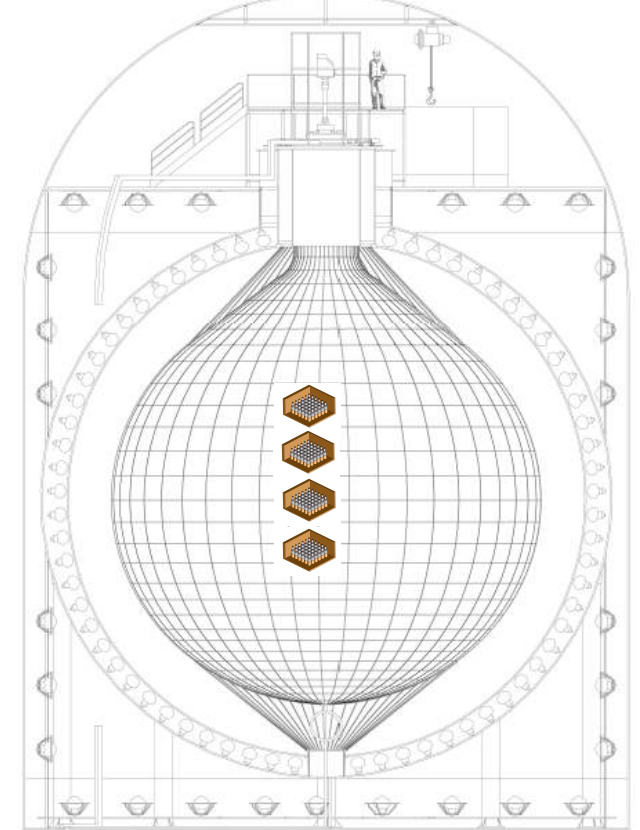


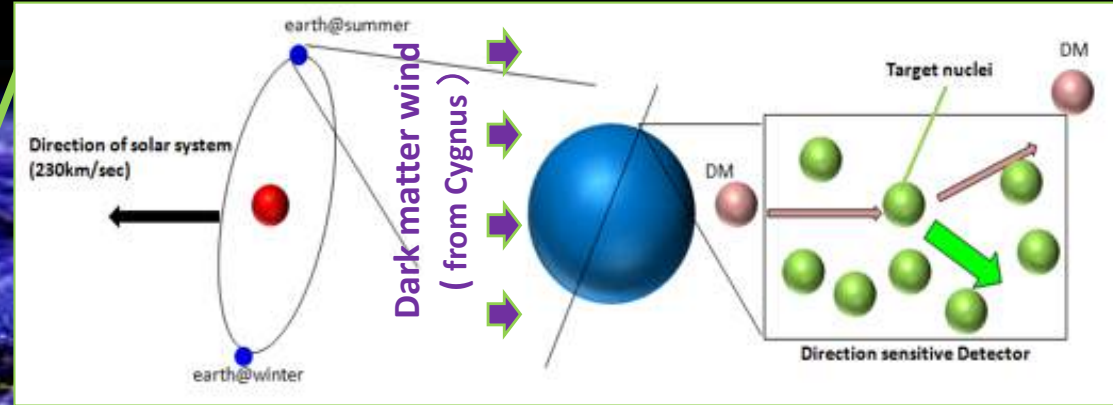
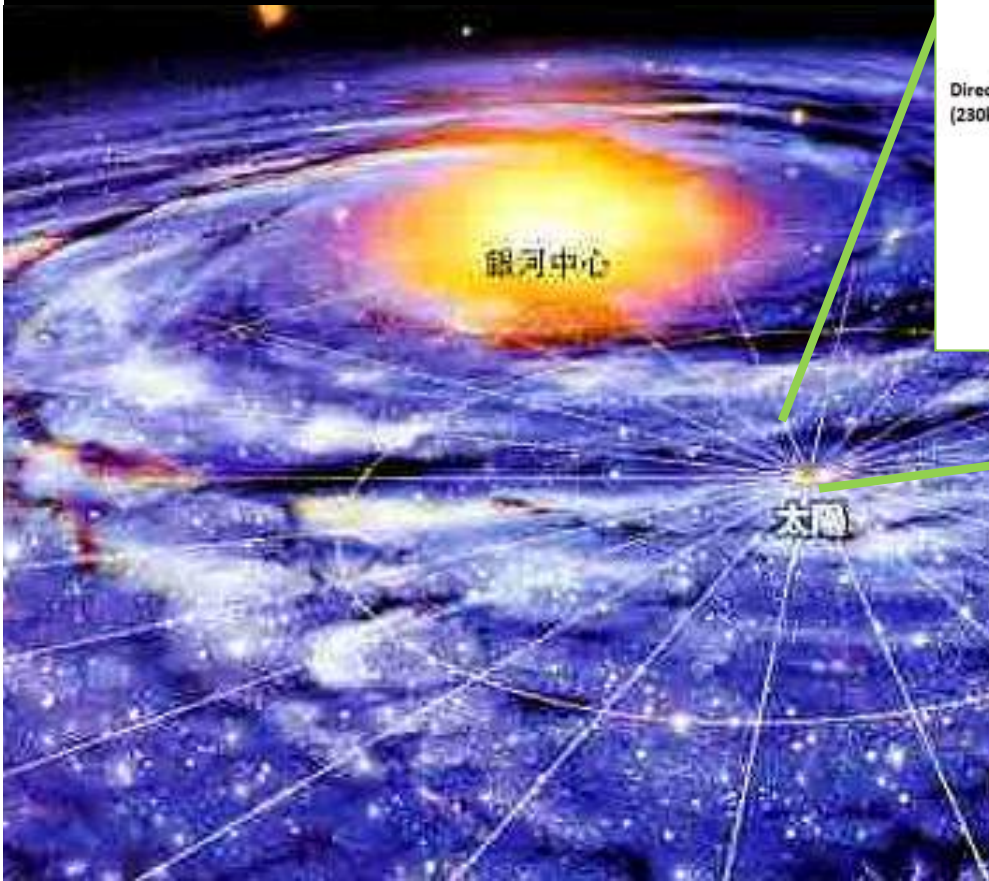
54 kg NaI(Tl)
~2019
基盤(A)



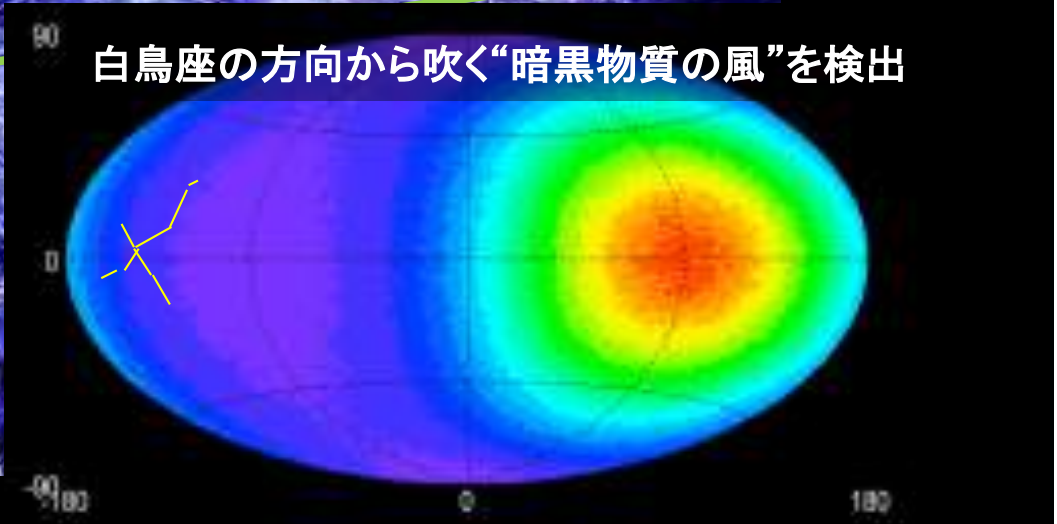
DAMA/LIBRAを黙らせるにはこの質量

KamLAND-PICO
1000 kg NaI(Tl)
~2025 特別推進





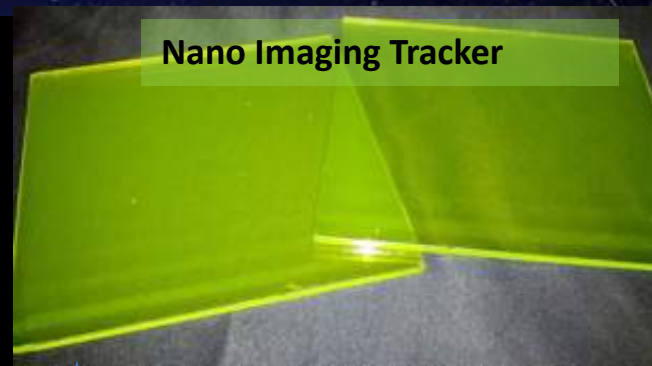
白鳥座の方向から吹く“暗黒物質の風”を検出



名古屋大学
中村先生
中先生



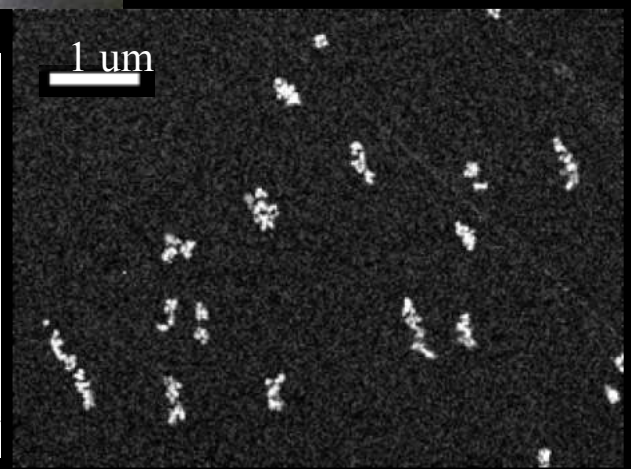
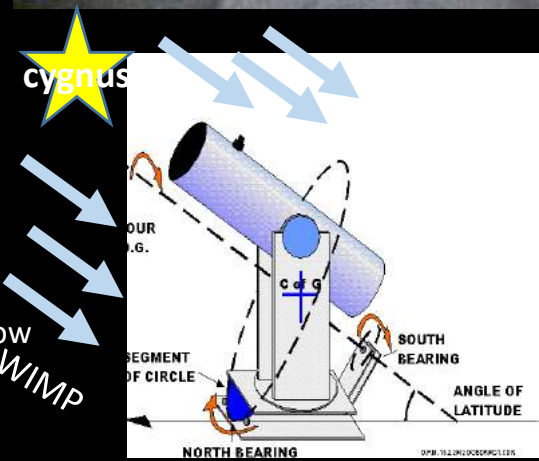
Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement



Nano Imaging Tracker

独自に開発した新型デバイス Nano Imaging Tracker (NIT)

→ 従来の検出器にはないナノメートルの空間分解能を持つ飛跡検出器



Nagoya
Chiba



LPI RAS Moscow
JINR Dubna
SINP MSU Moscow



Bari
LNGS
Naples
Rome



METU

ANKOK実験(早大グループ)

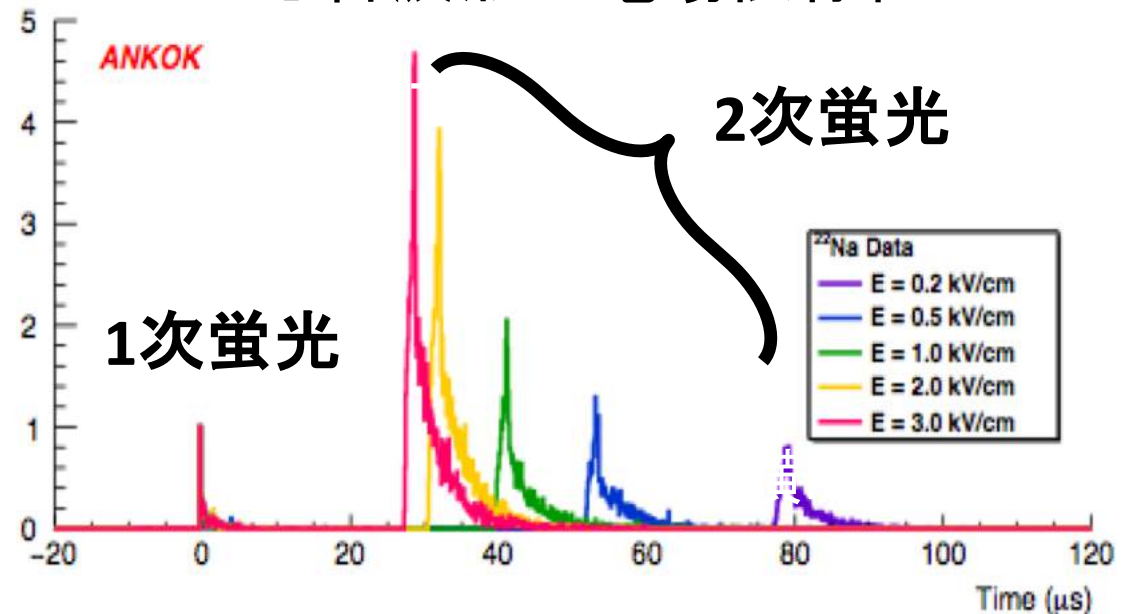
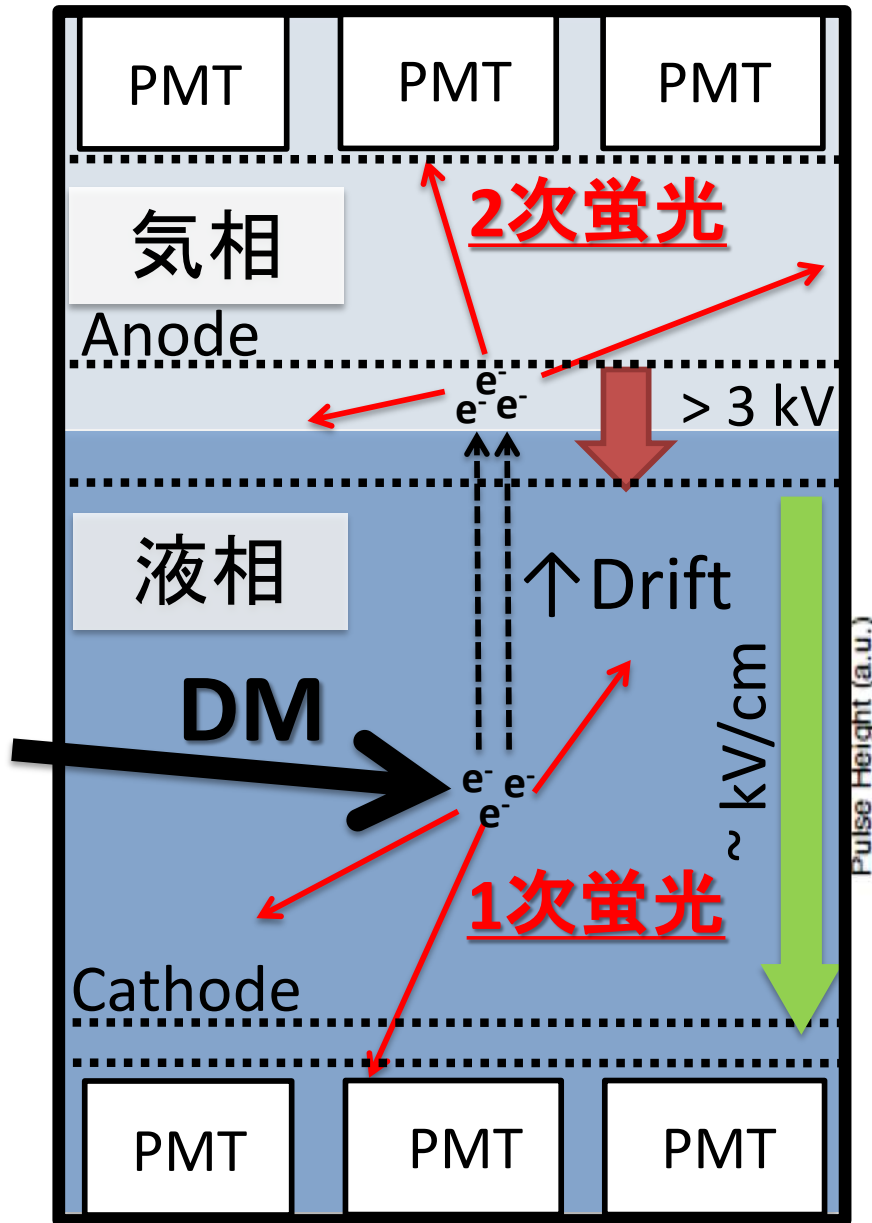
◆ アルゴン気・液2相型 → 蛍光と電離電子の両方検出

◆ アルゴンの特徴:

原子番号18: 比較的軽い希ガス
 沸点 -186°C 、波長 128nm (VUV)
 安価→大型化○・迅速性○

強力な事象識別能力(γ 線 vs DM信号)

★ 応答波形の電場依存性



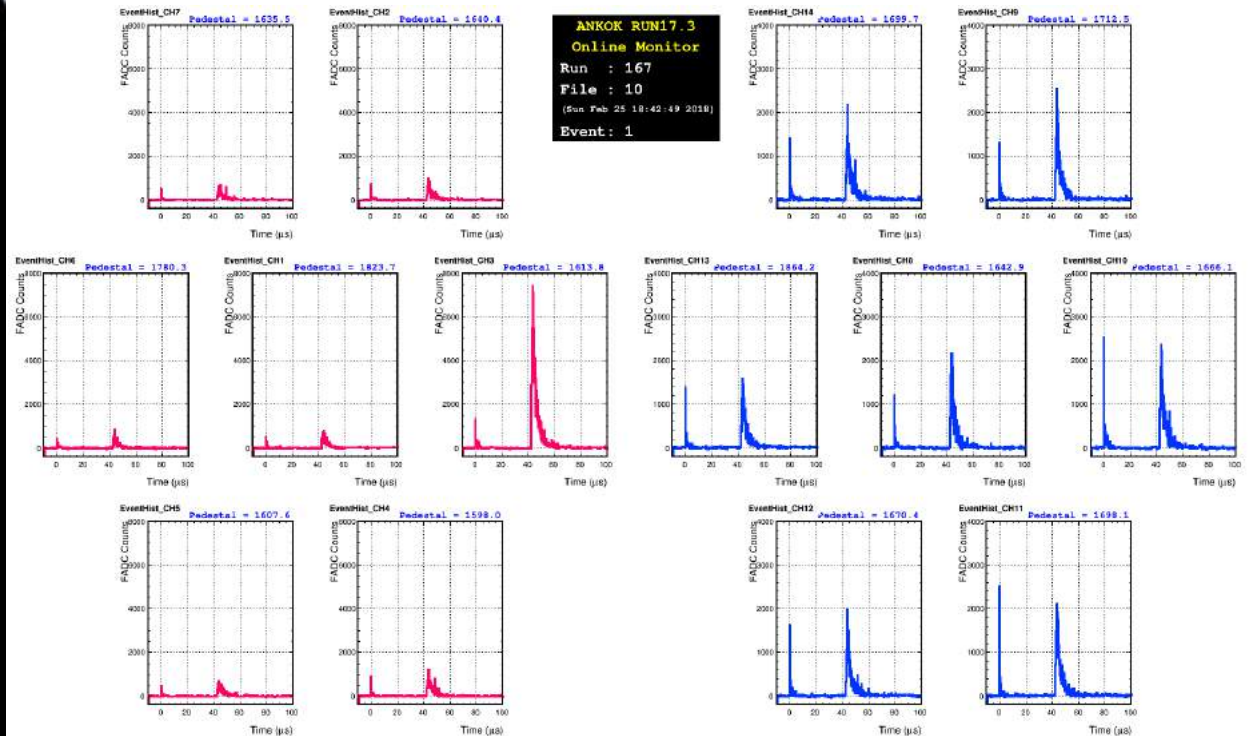
ANKOK実験の現状

◆ 検出器本体(上下7本、有効質量5kg)



上PMT(7本)

下PMT(7本)



◆ コンパクト・高感度検出器(学生主体)で低質量WIMPの検証を行うことが目標!

NEWAGE実験

神戸大学 身内先生



<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/>

- 神戸大学主導（研究代表者：身内賢太郎）
- 方向に感度を持った暗黒物質直接探索
- 「方向感度」の重要性：「ニュートリノ天文学」でも



Raymond Davis Jr.
Prize share: 1/4

2002年ノーベル物理学賞の賞状



Masatoshi Koshihba
Prize share: 1/4

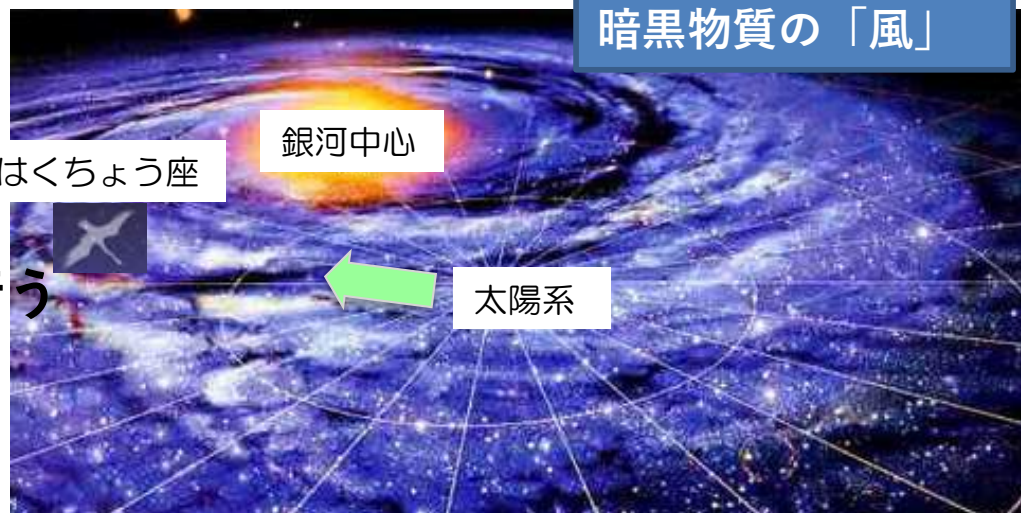
NEWAGE実験 (概要)

神戸大学 身内先生



- 三次元飛跡検出器で銀河に付随する暗黒物質の「風」を捉える
- 暗黒物質検出の決定的証拠,
その後の性質解明へ

太陽系に吹き付ける
暗黒物質の「風」

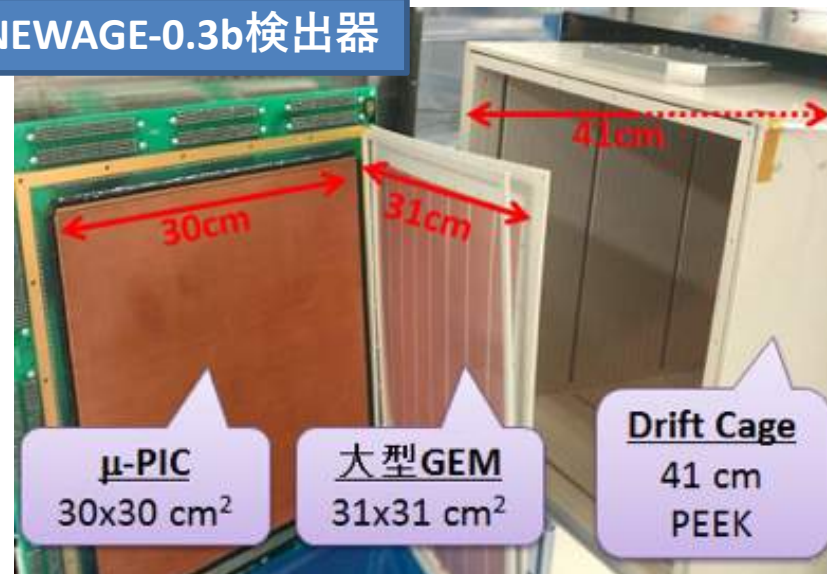


- 立案, 検出器製作, 測定, 解析,
論文執筆, 実験プロセスをすべて行う
→ オールマイティーな人材の育成
- 自らの力で世界と競争

- 小型器で観測中 & 感度向上へ

- NEWAGE-0.3b: 観測中
(2017年11月~)@神岡
- 次世代検出器の開発 @神戸

NEWAGE-0.3b検出器



東京大学他: XMASS実験(神岡)

東京大森山 他

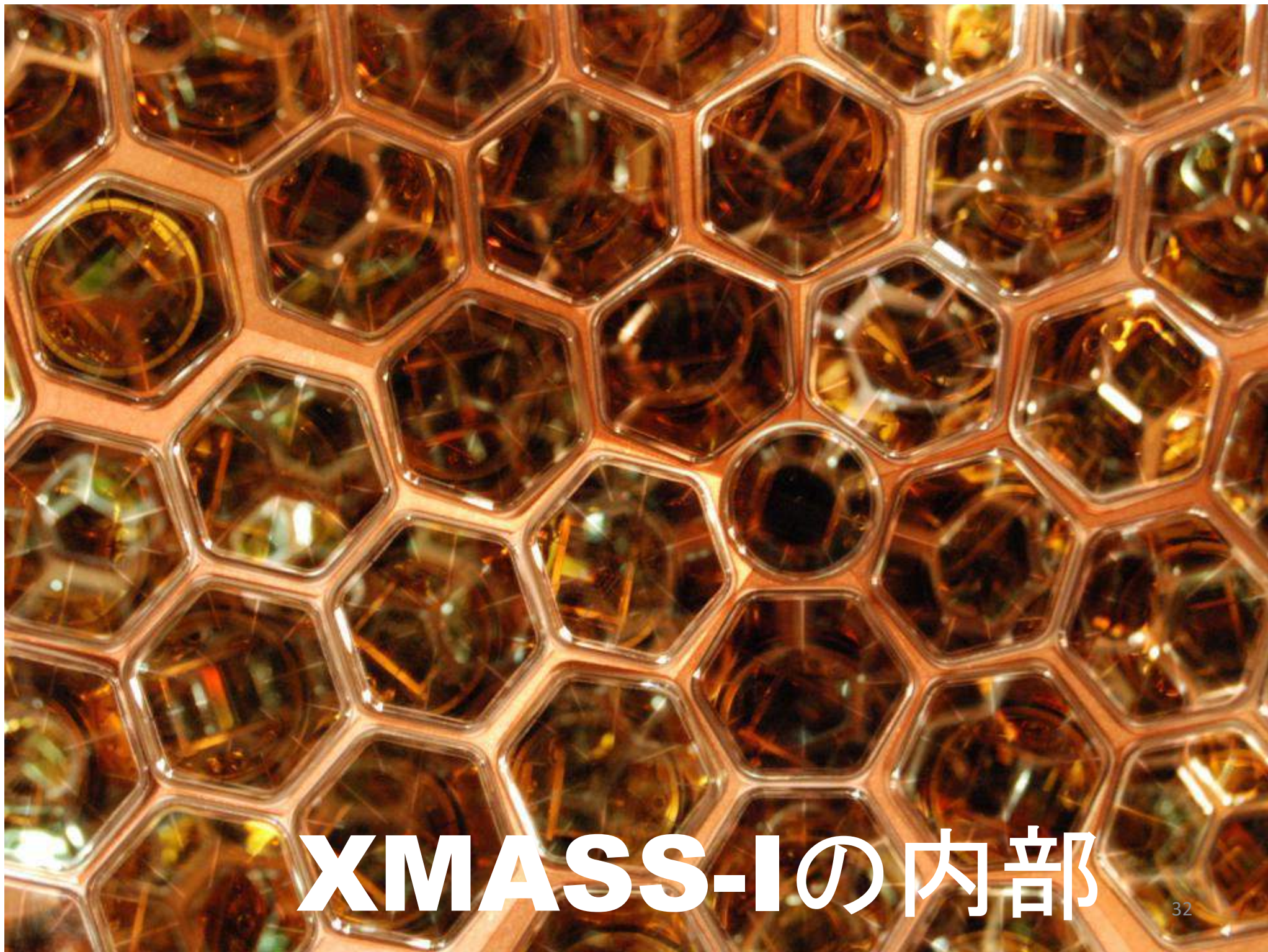
1トンの液体キセノン

キセノンは希ガスの仲間です。冷却すると液体になり、粒子がぶつかると光ります。

多数の光電子増倍管によって蛍光を捕らえる。

直径80cm



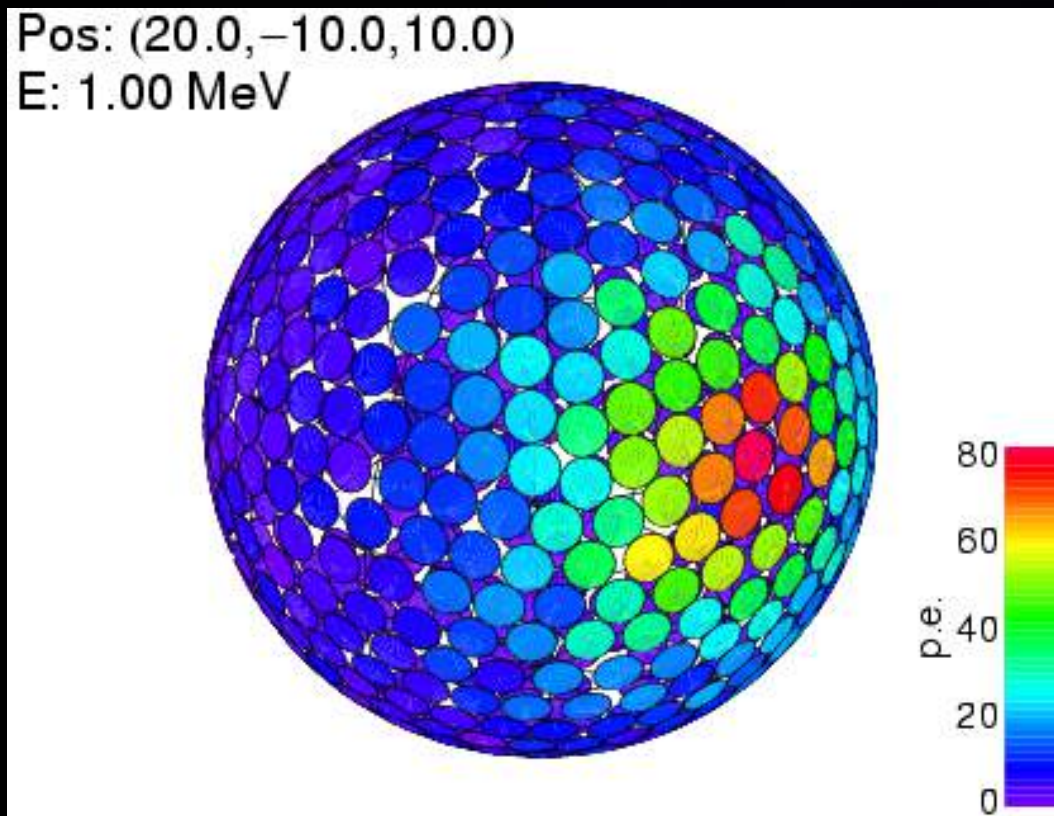


XMASS-Iの内部

光った位置をパターンで決める技

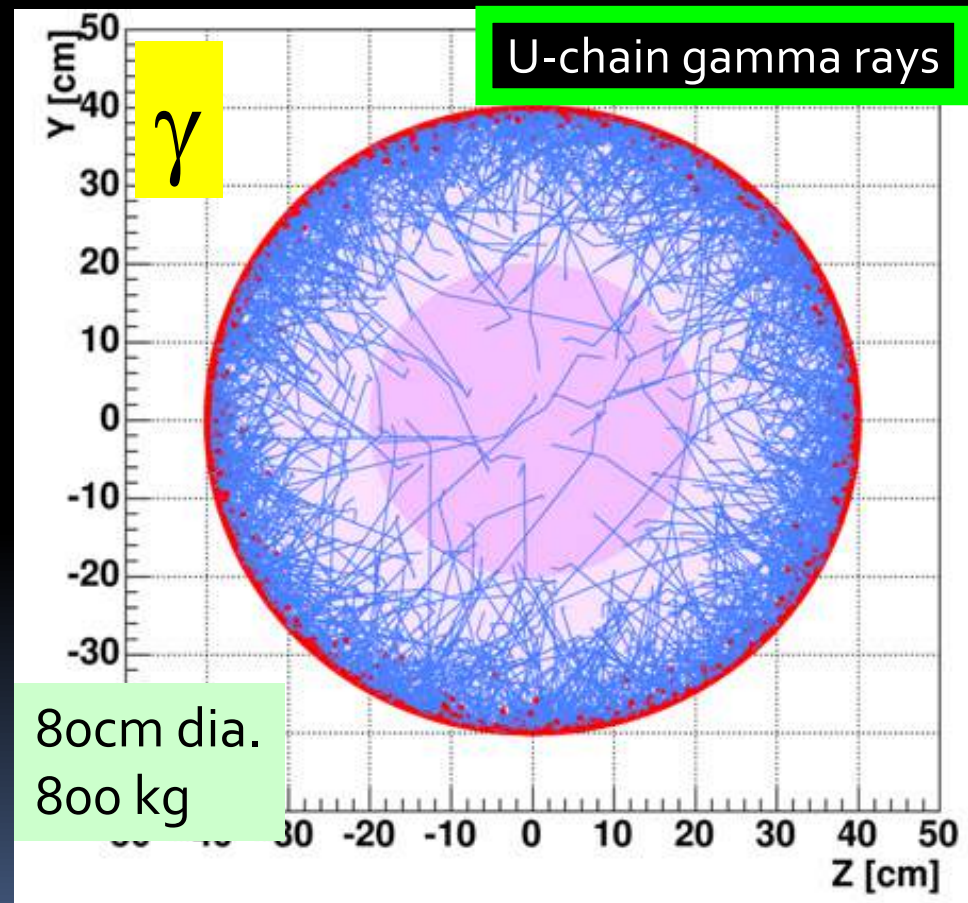
色は光電子数を示し、発光点はこれらのヒットパターンから決定される。

$$L(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{642} p_i(n_i)$$



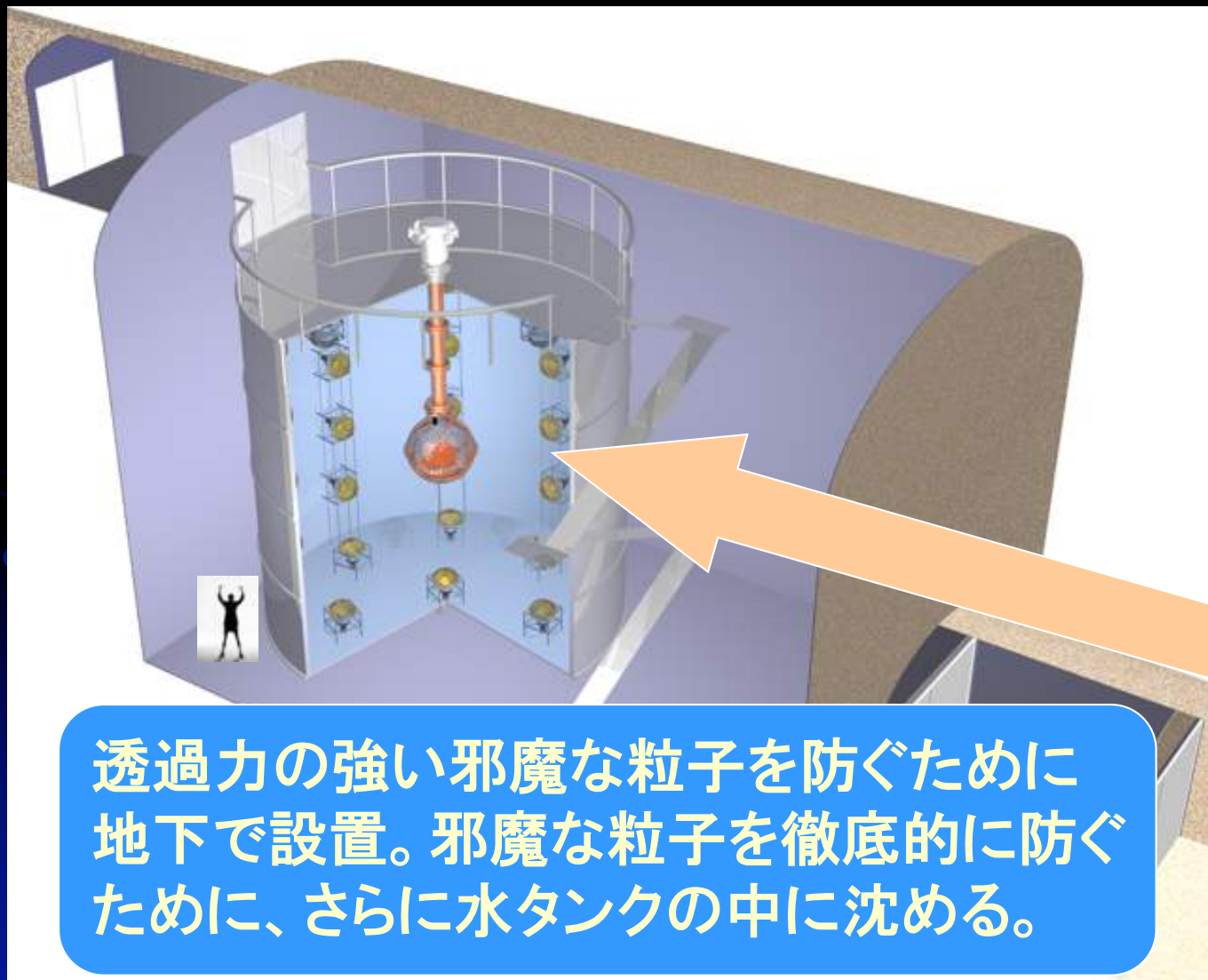
大型化と低バックグラウンド化の両立

- 外から入ってきたものはすぐに吸収
- 真ん中のあたりは殆どノイズがない状況が作れる！



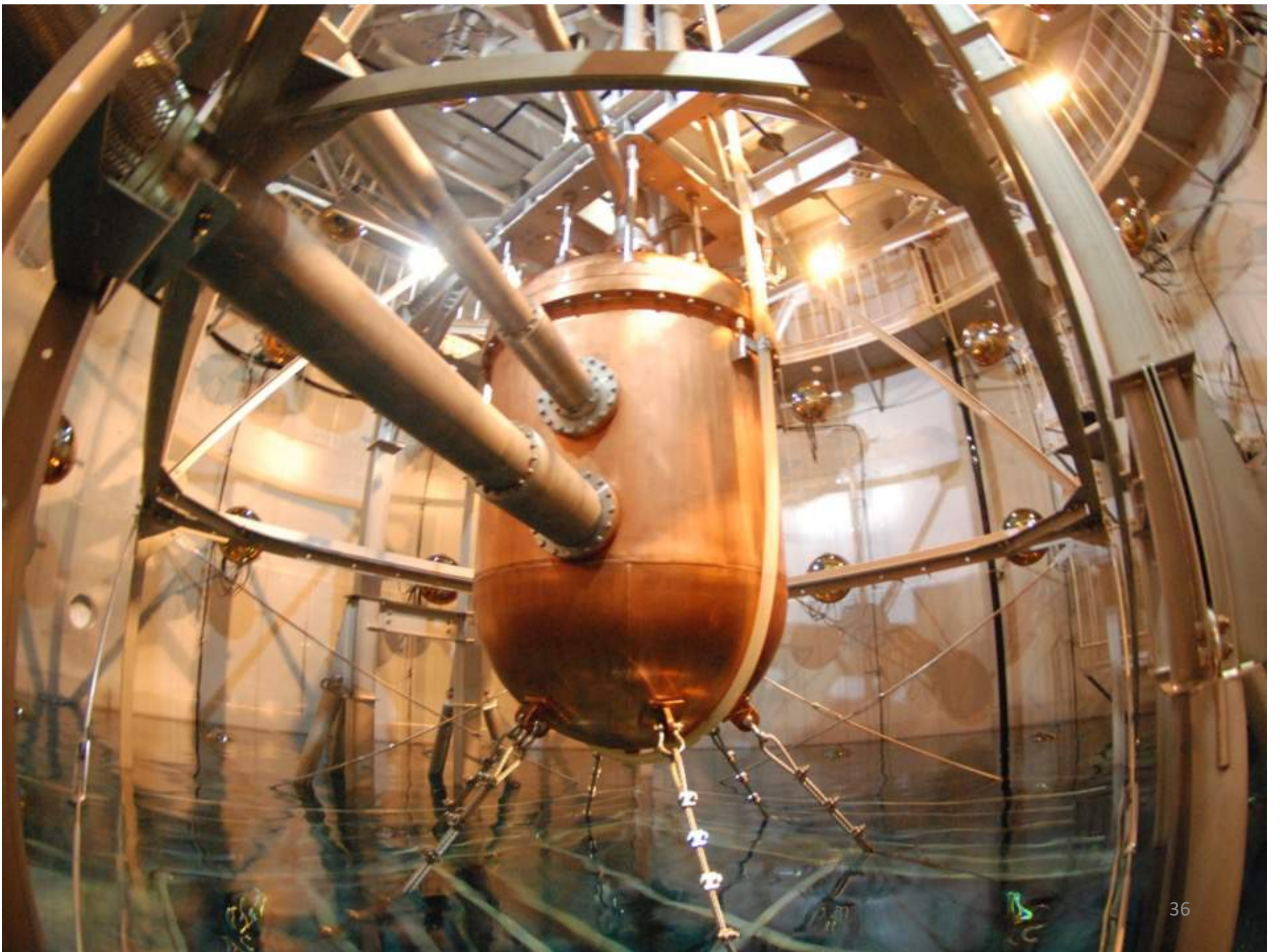
XMASS-I 運転継続中

「直接」発見
を目指して



透過力の強い邪魔な粒子を防ぐために
地下で設置。邪魔な粒子を徹底的に防ぐ
ために、さらに水タンクの中に沈める。





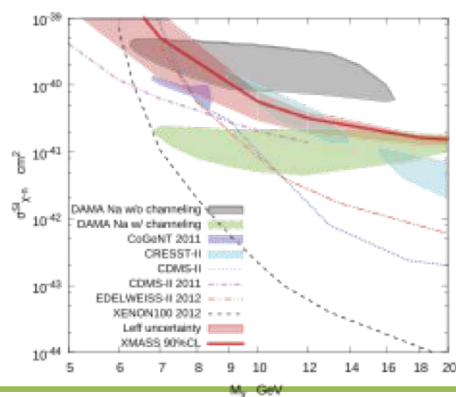
岐阜県飛騨市神岡町 神岡鉱山

ニュートリノ物理のメッカ:

カミオカンデとスーパーカミオカンデ



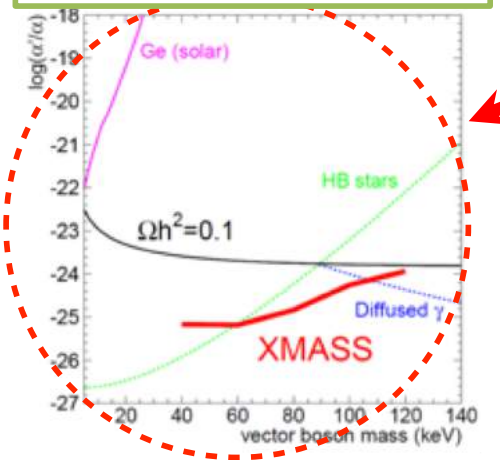
XMASS-I: 暗黒物質等の探索結果



軽い暗黒物質の探索

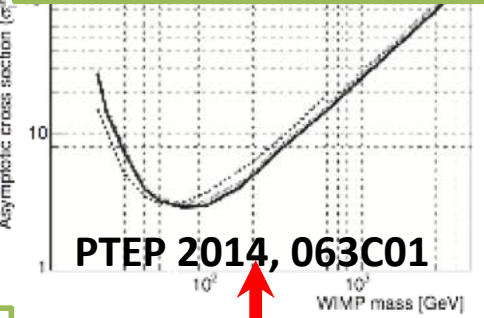
Phys. Lett. B 719 (2013) 78

スーパーウィンプス

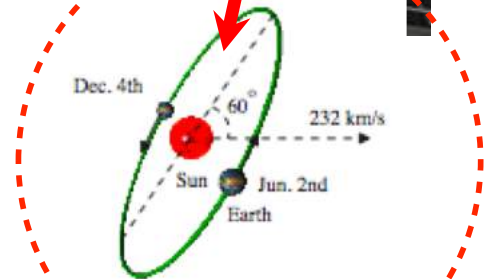


Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 121301

非弾性散乱による探索



PTEP 2014, 063C01



季節変動の探索

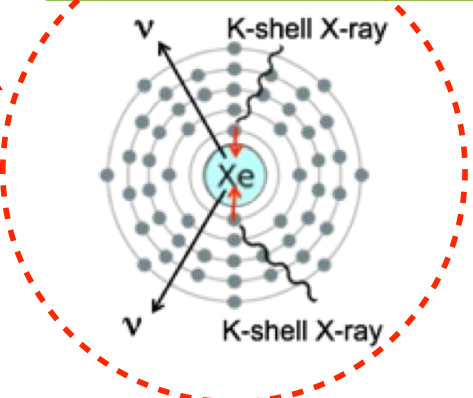
Phys. Lett. B 759 (2016) 272

太陽アクシオン



Phys. Lett. B 724 (2013) 46

二重電子捕獲現象の探索



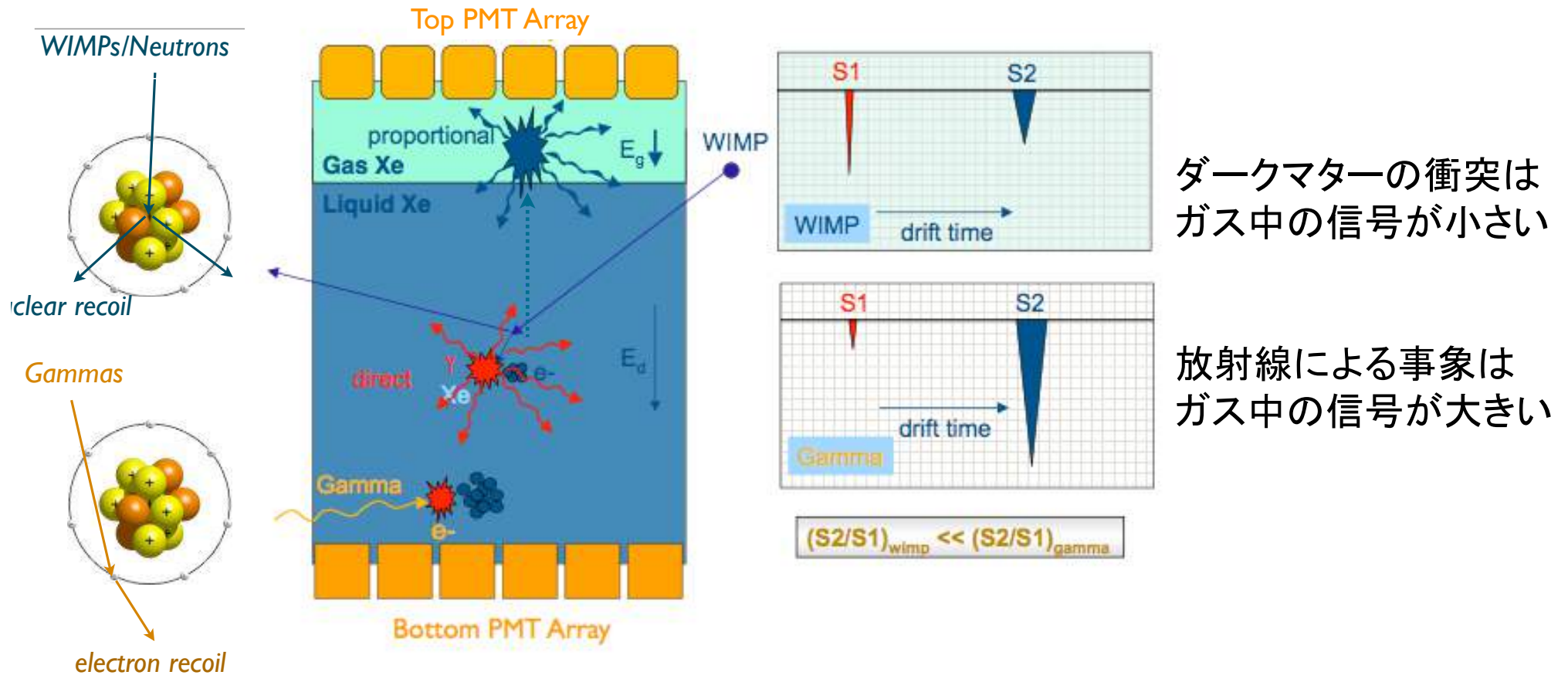
Phys. Lett. B 759 (2016) 64

- 当初予定したものより広い種類の暗黒物質を探索
- 貴重なデータの中に新たな信号を探索中

XENON実験@イタリア

東京・名古屋・神戸大

- 世界最高感度でしのぎを削っている代表的実験



ダークマターの衝突は
ガス中の信号が小さい

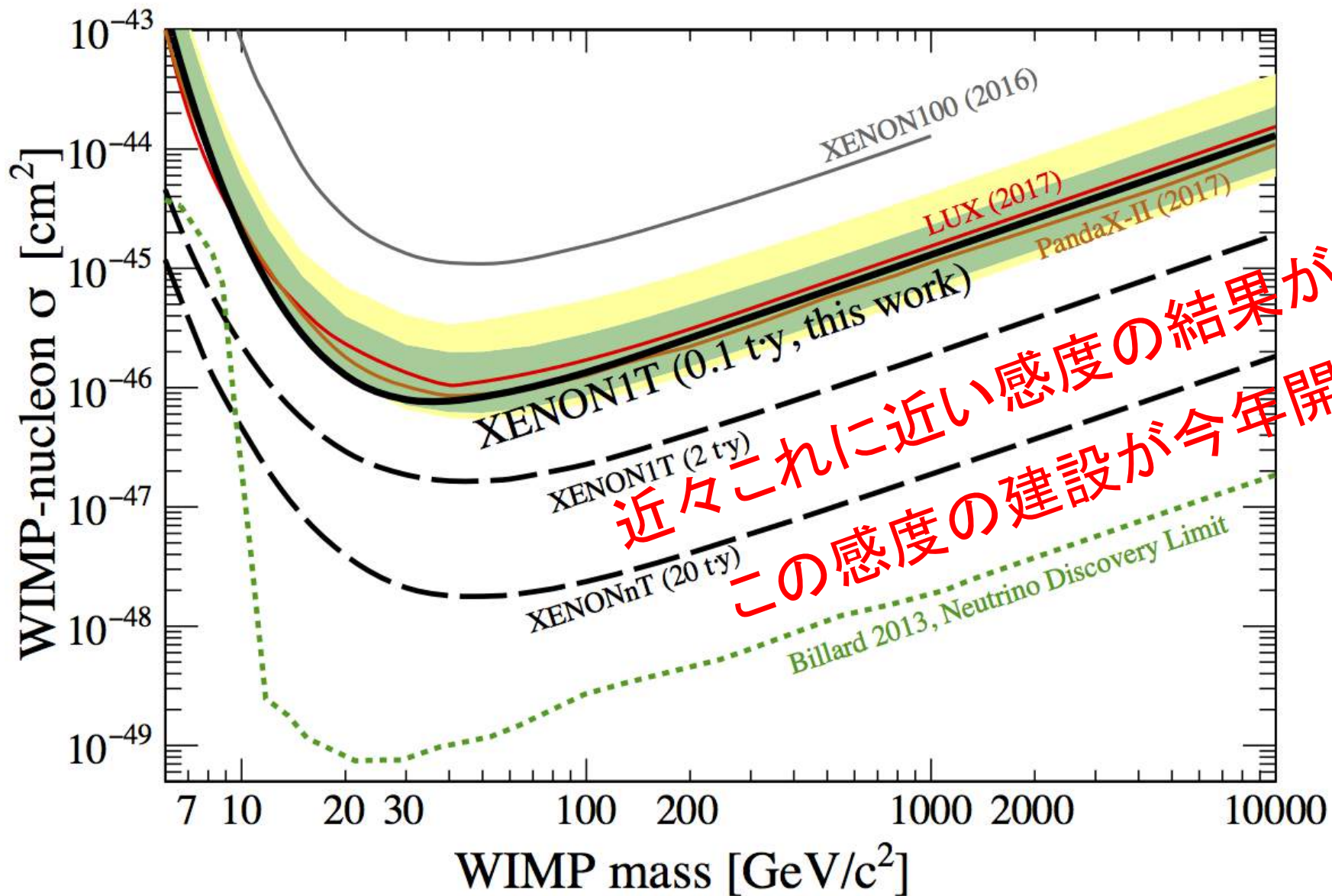
放射線による事象は
ガス中の信号が大きい

XMASS-Iの持つ大型検出器の利点に加え、
暗黒物質が衝突した現象以外のノイズを低減
できる方法を持つ。→ より高感度の探索が可能

XENON実験@イタリア

東京・名古屋・神戸大

- 世界最高感度でしのぎを削っている代表的実験



近々これに近い感度の結果が出る
この感度の建設が今年開始

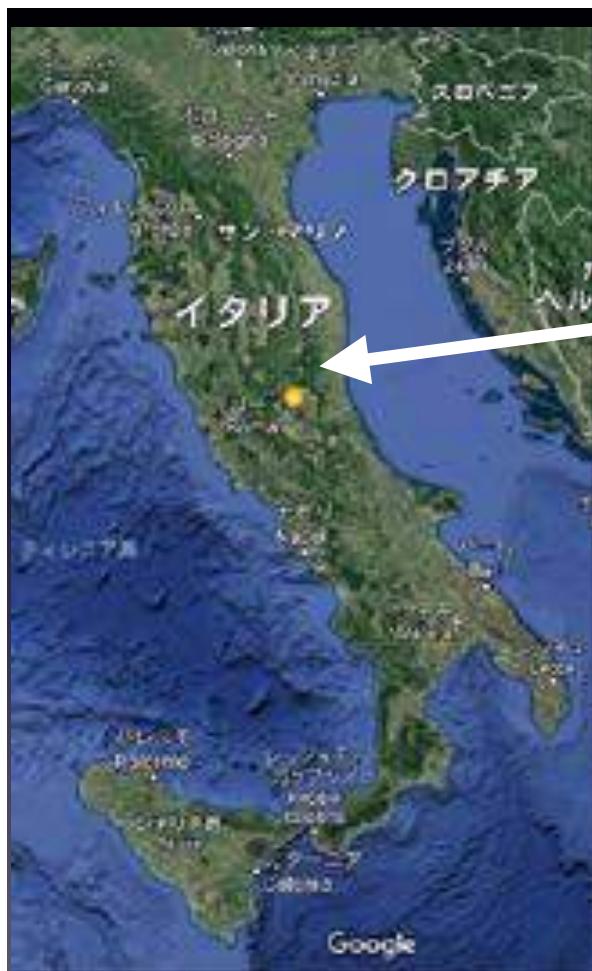
XENON collaboration



~160 scientists, from 25 institutions

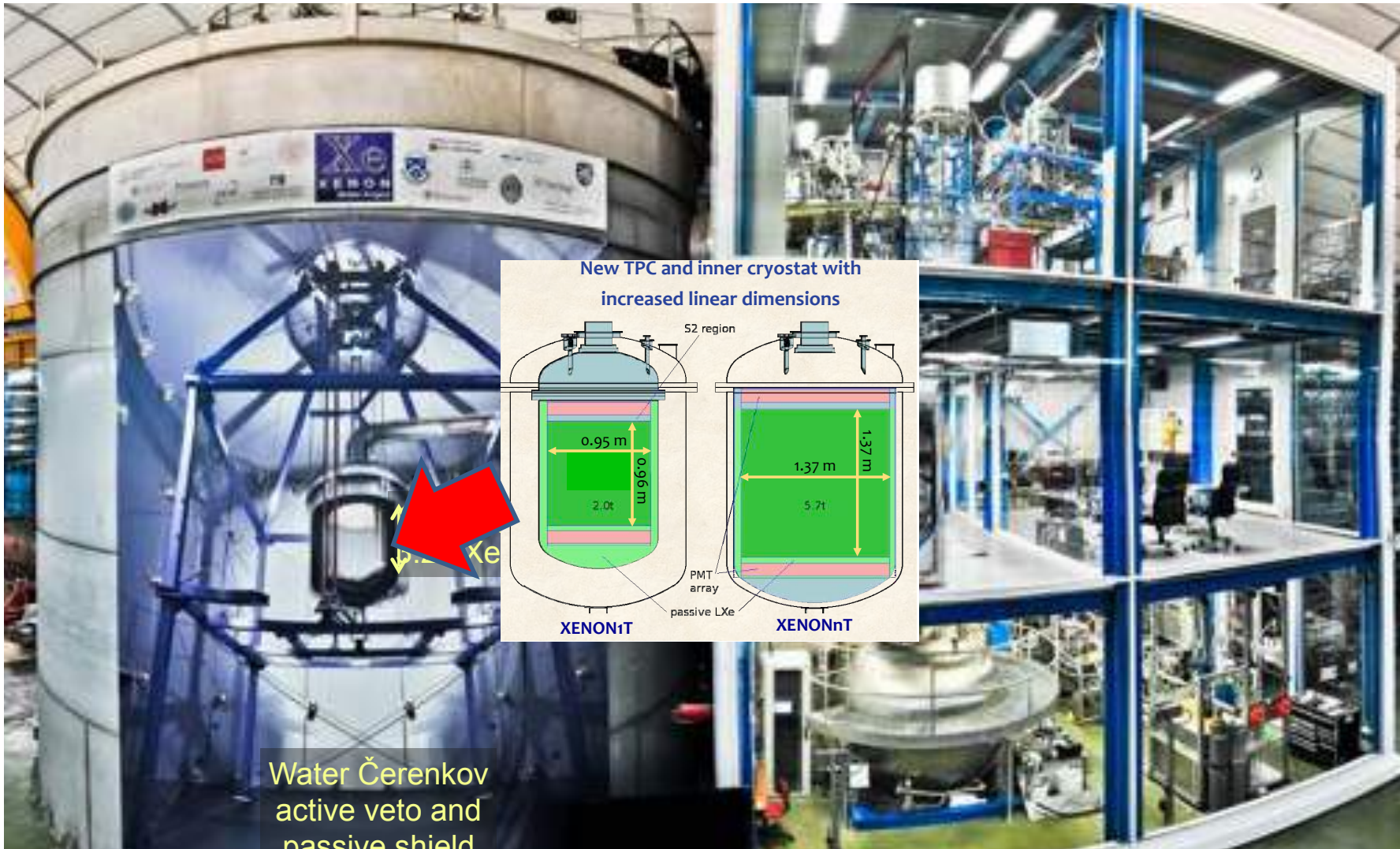
すでに東大から学生 (M1) が1名参加開始している。

実験場所：イタリア グランサツソ研究所



迅速なupgradeの理由

- 検出器本体部分だけを拡張。周辺機器の大部分はそのまま使える。



The XENON1T Time Projection Chamber



LXeを用いた大型実験 競争状況

- XENON実験(キセノン~10トン使用)
 - XENON1t検出器による長期間データの観測結果が間もなく発表される。
 - この夏から検出器を分解し、容器を大型化。
 - XENONnT検出器を組み上げ、**2019年運転開始予定**。
- LZ実験(キセノン~10トン使用)
 - **2020年に実験開始予定**(アメリカ)。
- PANDA-X実験(キセノン~4トン使用?)
 - 中国で検出器の建設・運転計画中。



まとめ

- 暗黒物質が存在するのは確実。
- 新粒子として「発見」されると、そこから「性質を調べる」研究フェーズに入る。
- 世界中で競争の激しい直接検出実験の中で、国内で様々な研究開発と、大型実験が推進されている。ユニークなアプローチで新粒子の発見を狙って研究を進めています。
- 外国での世界最高感度の探索にも参加開始。
- 発見の現場で是非一緒に研究しましょう！

moriyama@icrr.u-tokyo.ac.jp