

最先端研究II 暗黒物質

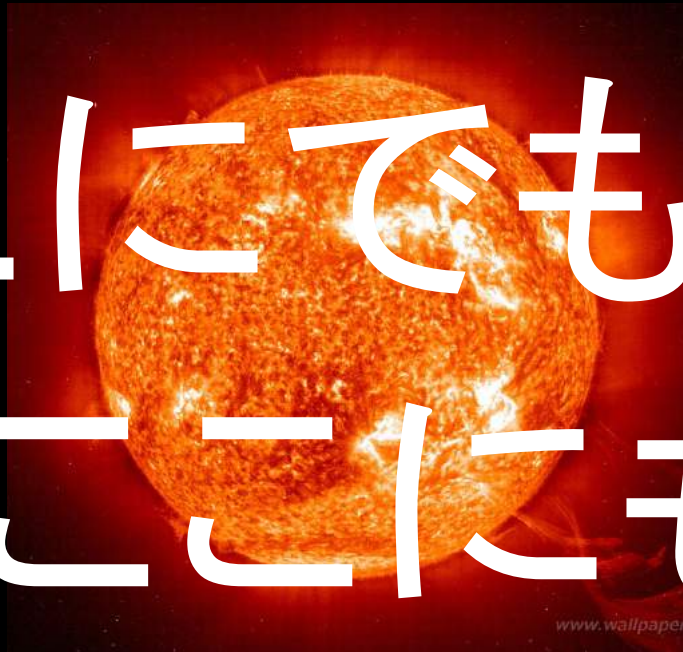
宇宙線研究所 森山茂栄(しげたか)

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

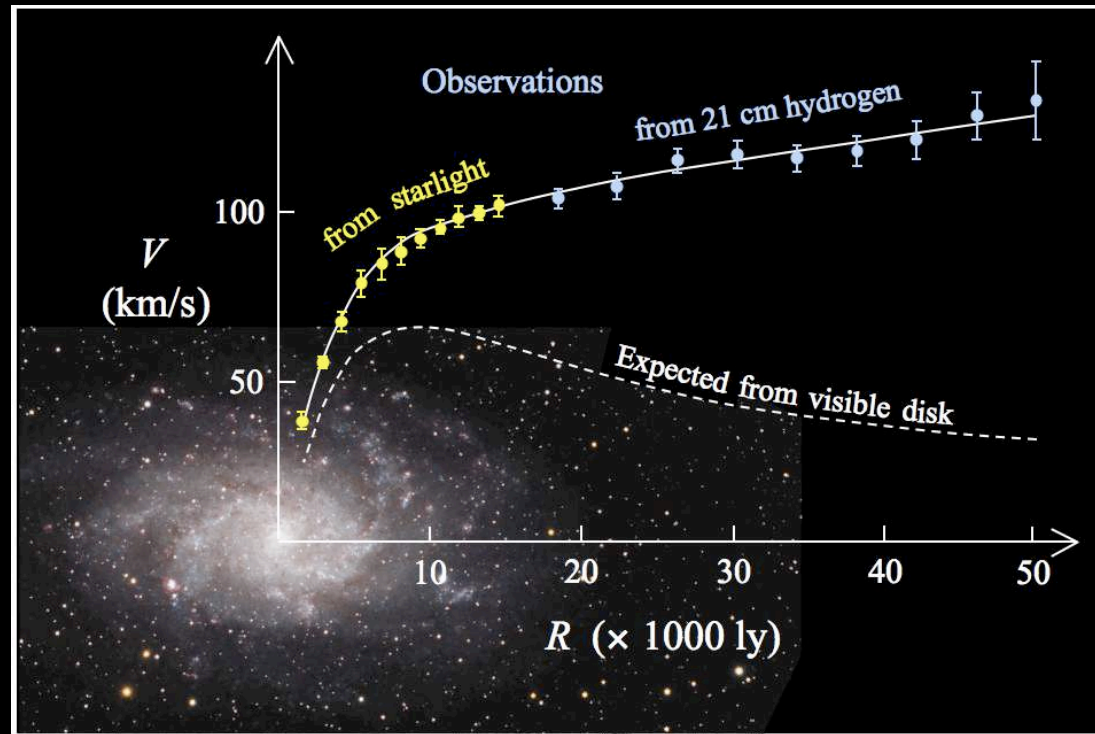
- どこにある？

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



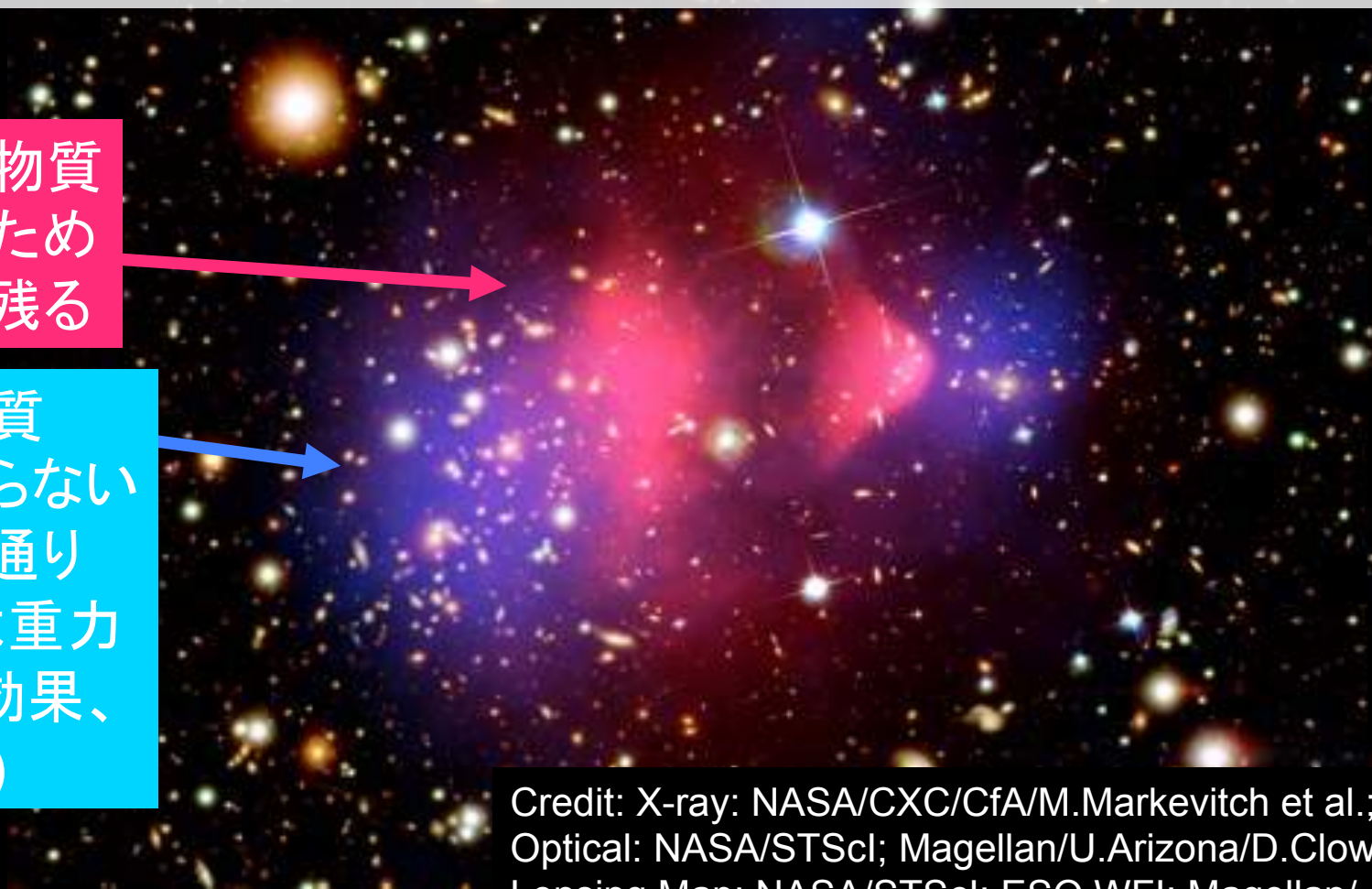
この方法で、太陽系近傍に 0.3 GeV/cc の密度で存在することが判明

- 衝突する銀河

The bullet cluster (弾丸銀河団) 衝突中

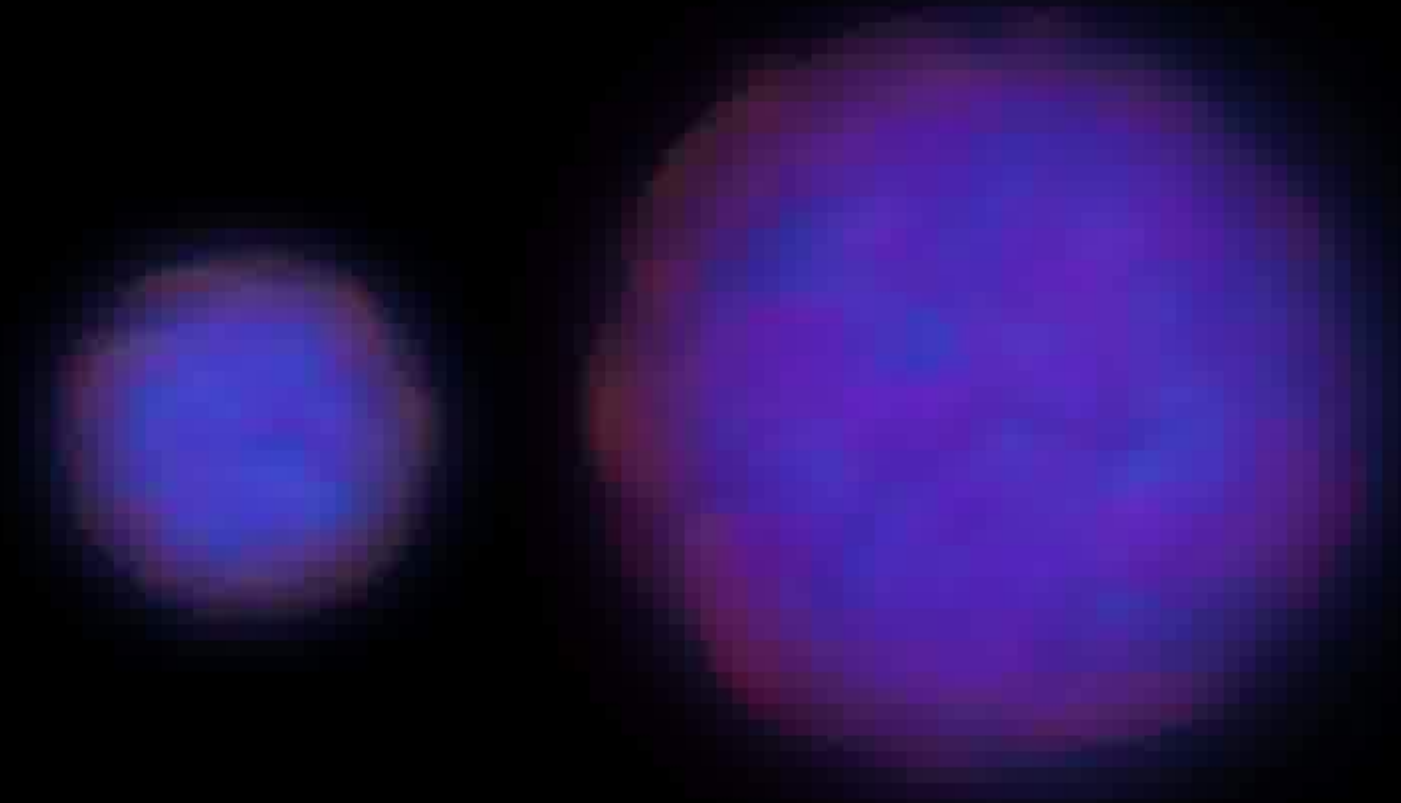
通常の物質
摩擦のため
中心に残る

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)

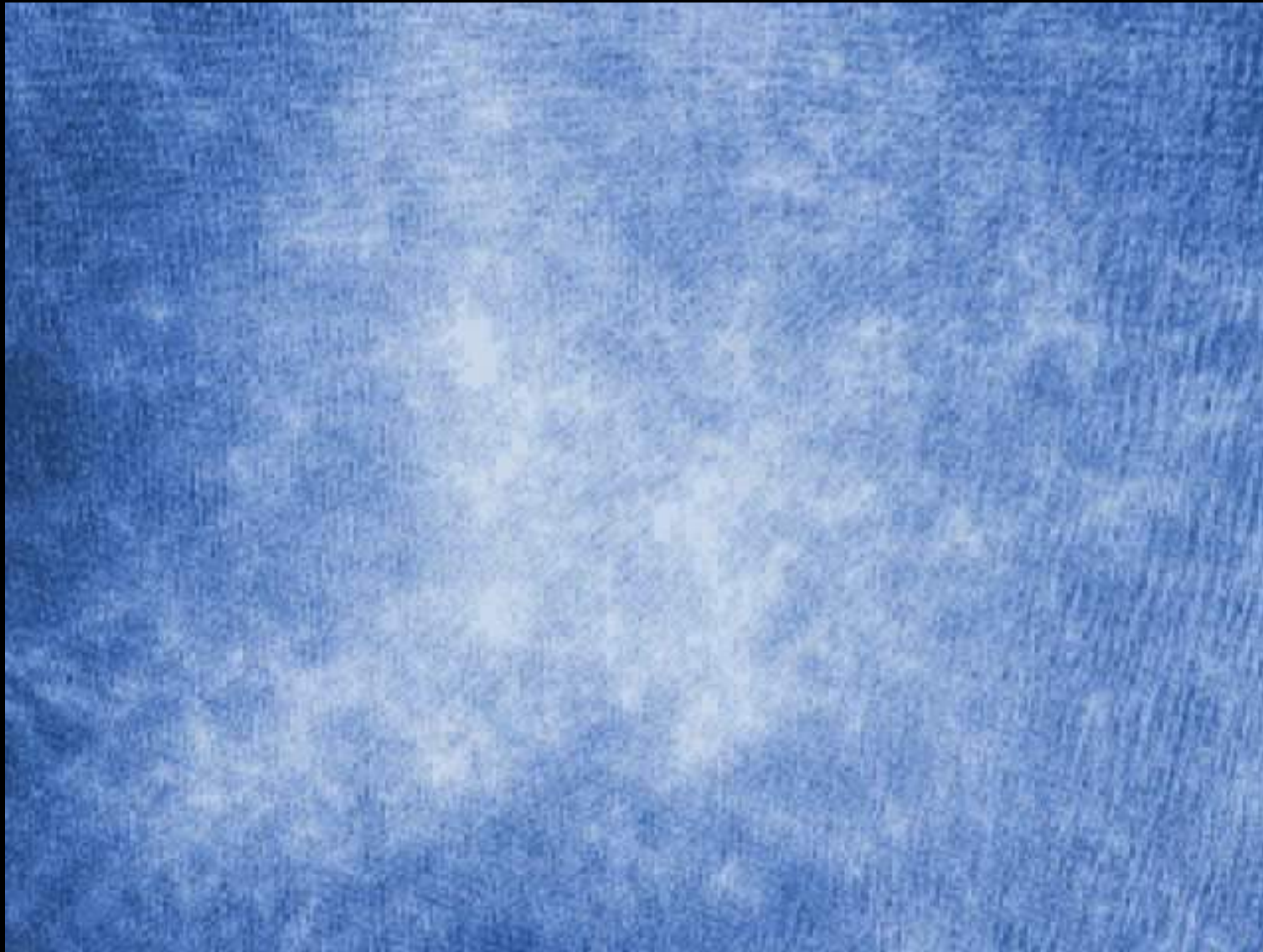


Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.;
Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.;
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/
U.Arizona/D.Clowe et al.

動画でわかりやすく

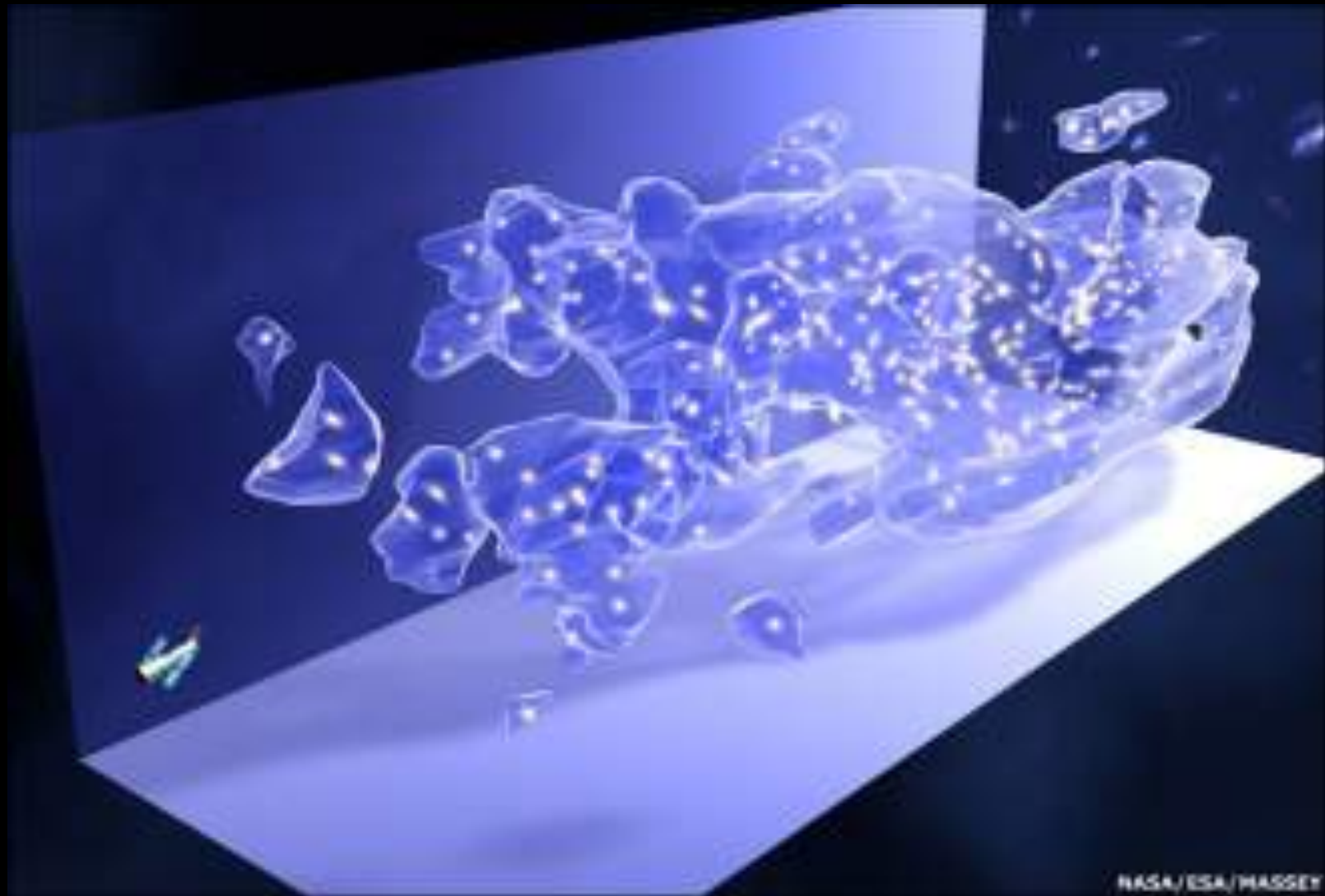


- 銀河団のフィラメント

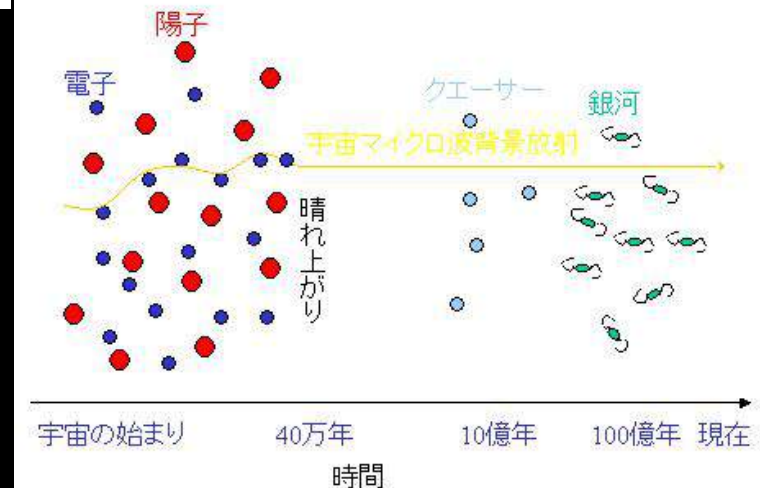
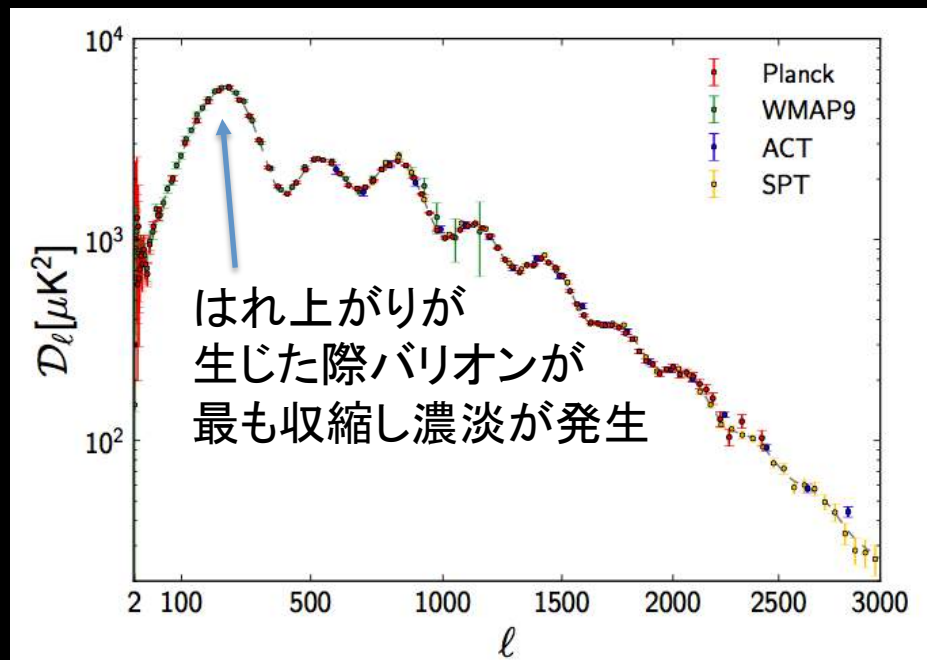
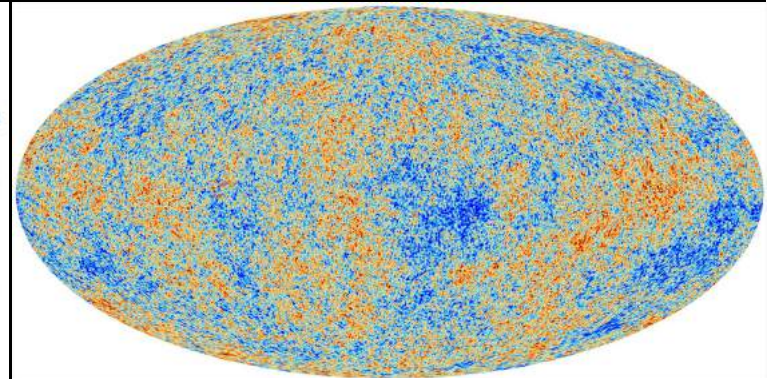
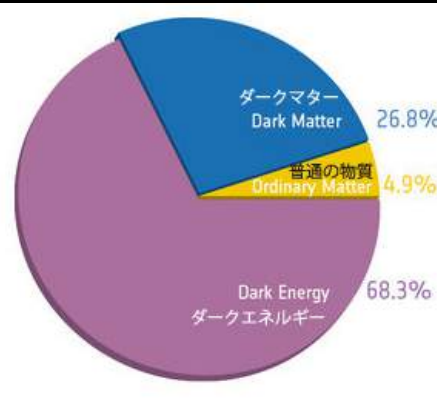
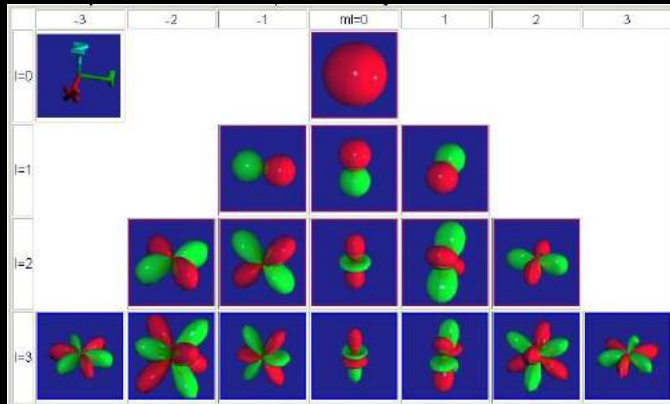


吉川 耕司、
樽家 篤史、
景 益鵬、
須藤 靖

- 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



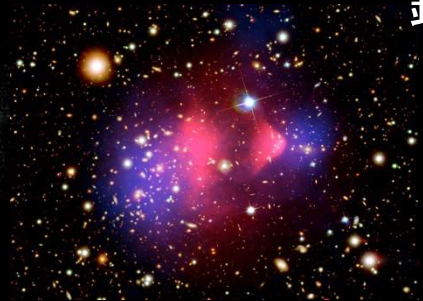
小規模

大規模

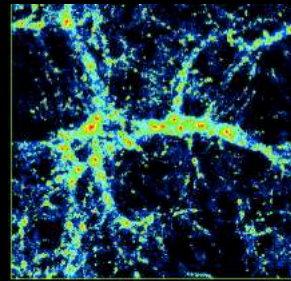
銀河の回転速度



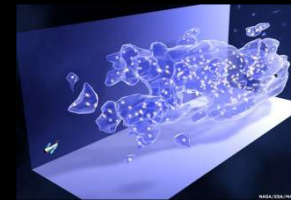
衝突する銀河



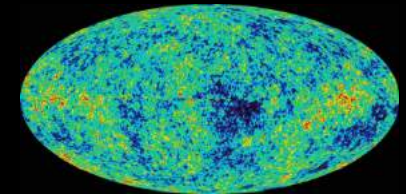
銀河大規模構造



暗黒物質地図



宇宙背景輻射



これら沢山の「おかしいこと」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

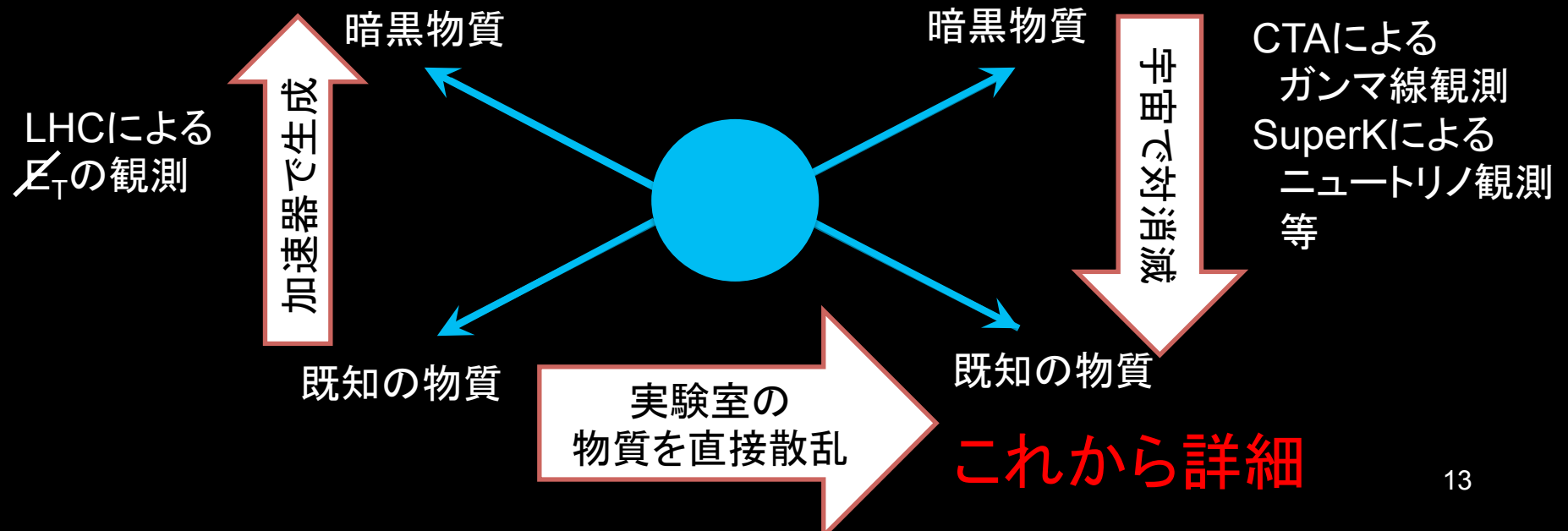
素粒子物理としても垂涎の的

- 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

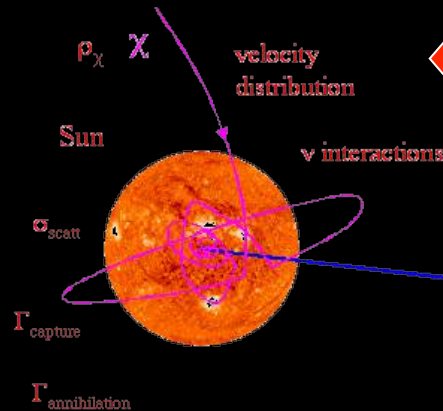
数百億円

数千億円

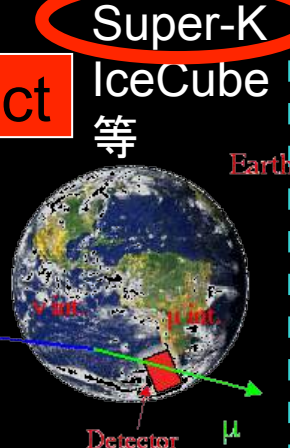
Indirect

Collider

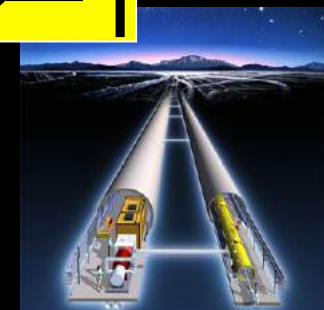
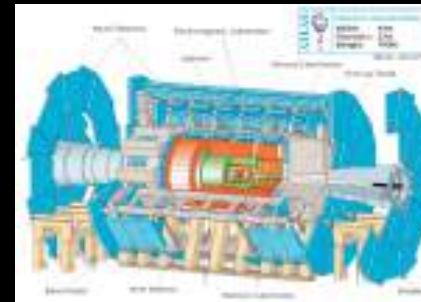
LHC 2008-



Graphic from Joakim Edsjo



ATLAS



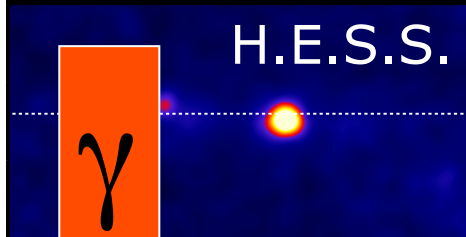
ILC

Direct

XMASS

E_{dep}

十数億円



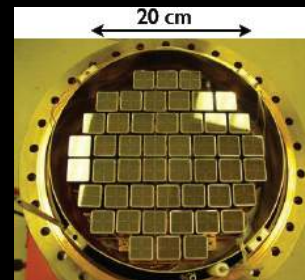
H.E.S.S.

GLAST
CANGAROO
BESS等

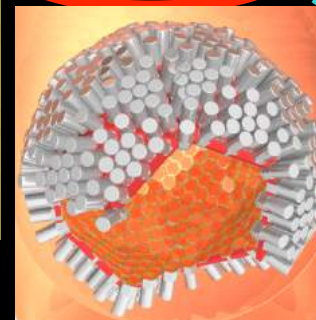
CDMS

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

U. Tokyo
Osaka, Kyoto
Waseda, ...



XENON10

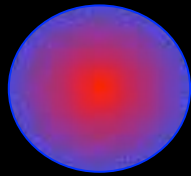


高い技術とアイディアで未知の素粒子を掴む¹⁴

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¹⁵！

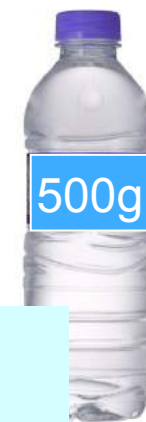
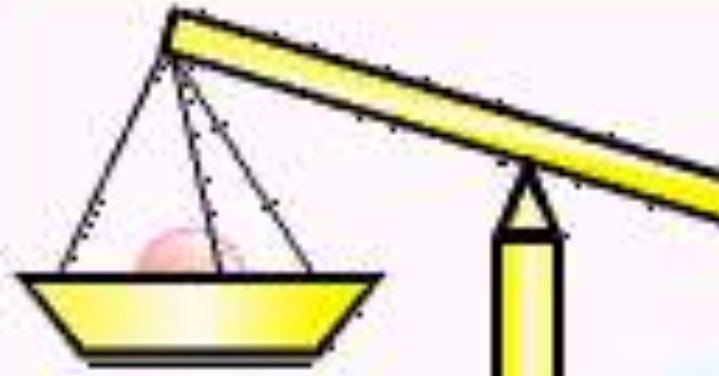
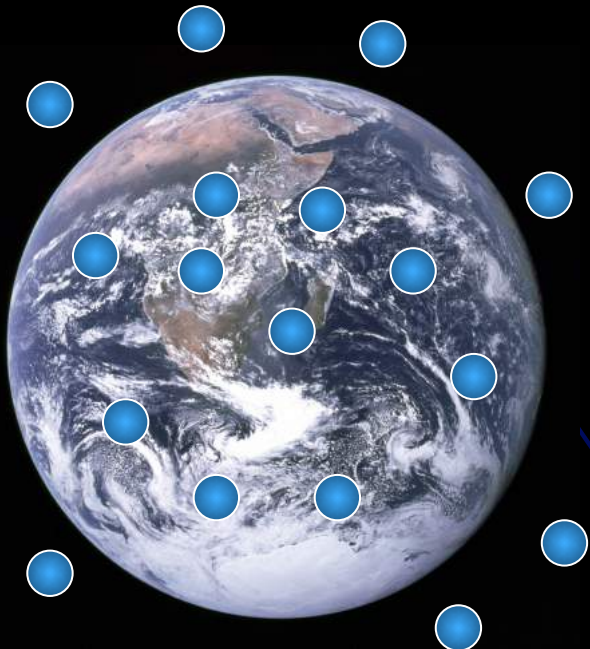
どのくらい存在するか

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



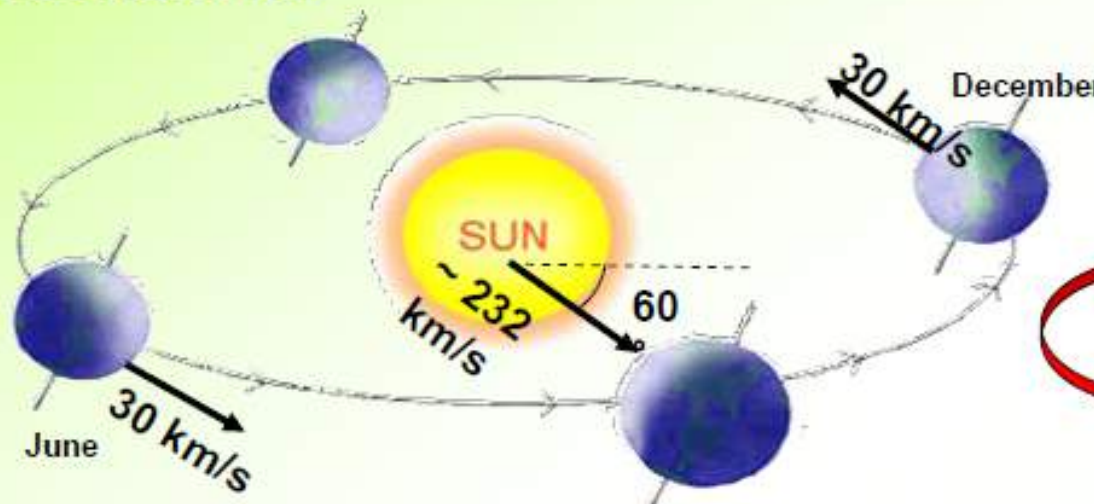
地球の体積の中にも
たった500g程度だが
宇宙のサイズになると
影響が大変大きい(サイエンスゼロ)

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

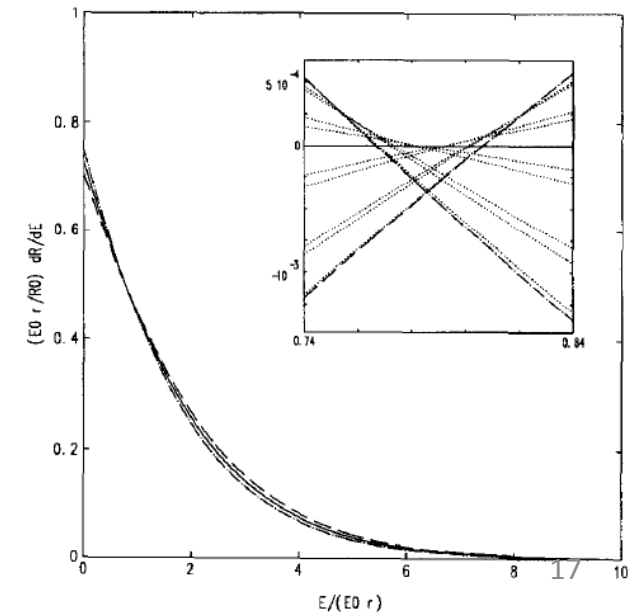
もう一つの特徴：季節変動

- 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)

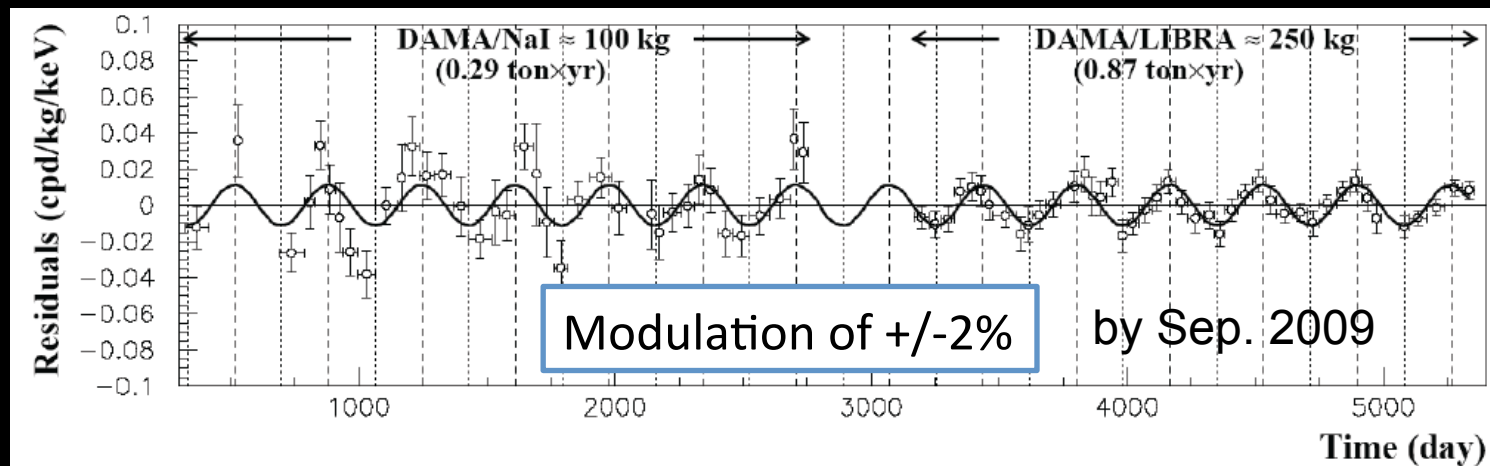


Residual contaminations in the new DAMA/LIBRA NaI(Tl) detectors: ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K at level of 10^{-12} g/g

- 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

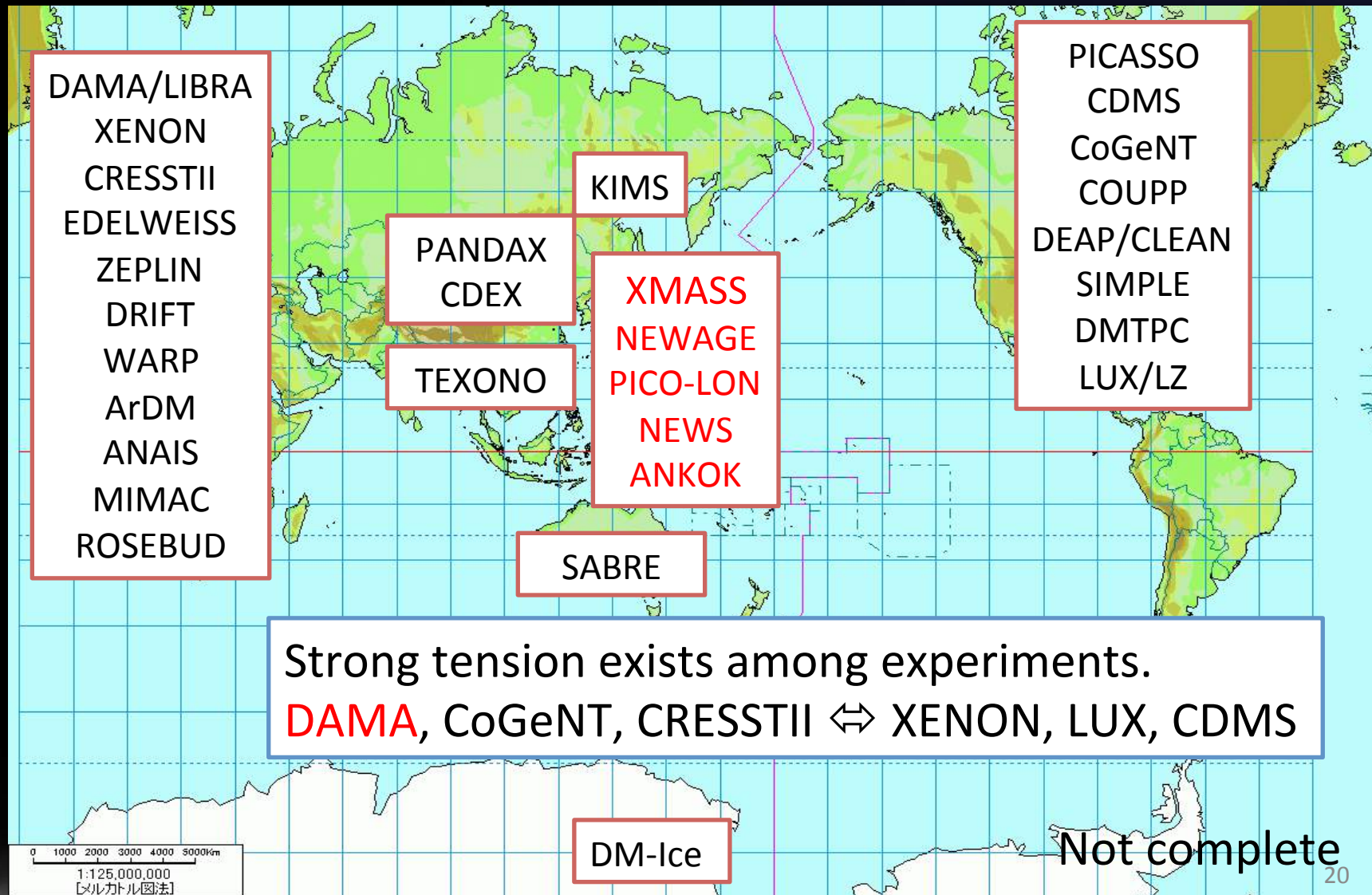
季節変動の信号：暗黒物質由来？！

- 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

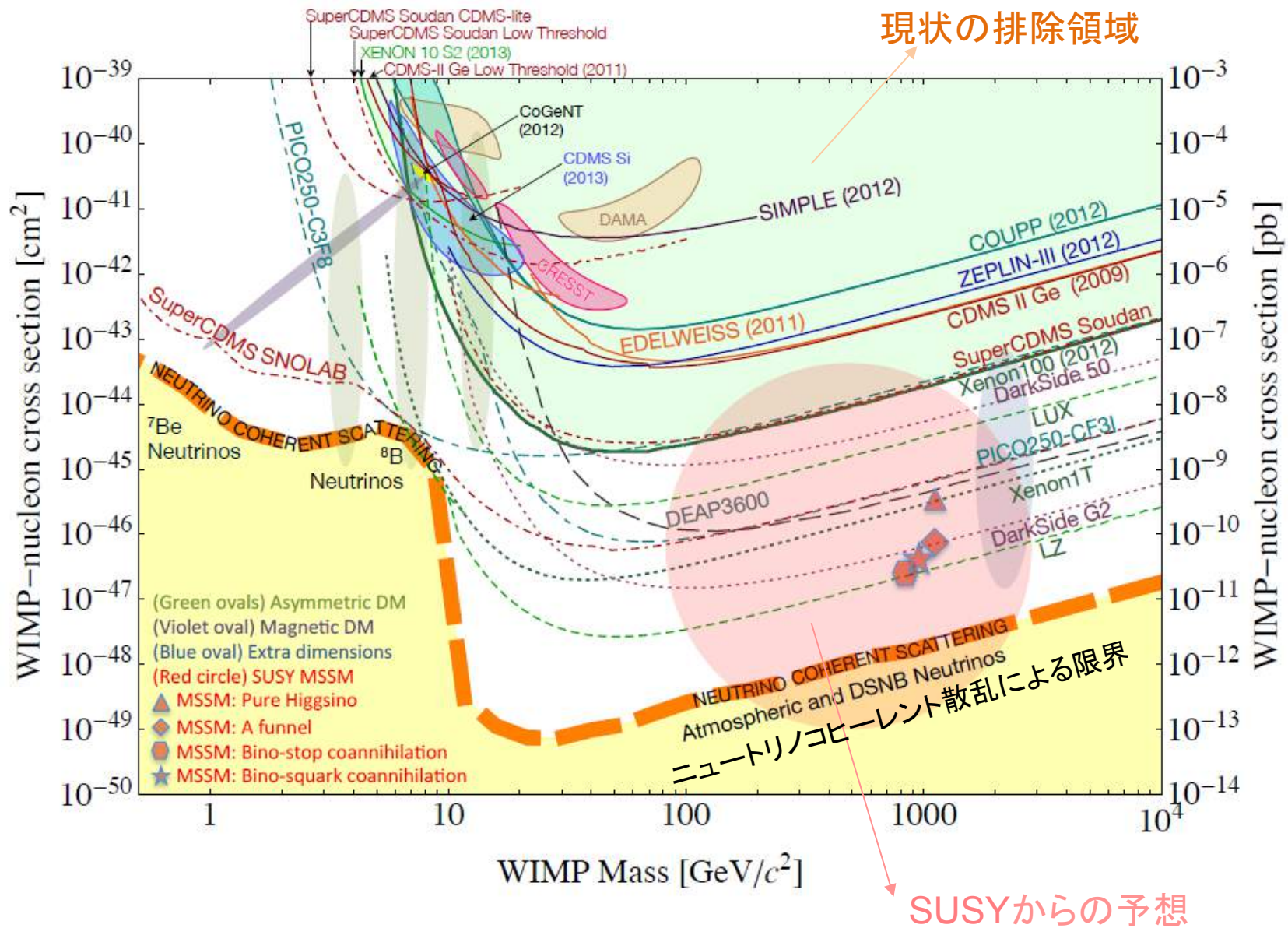


- 最初は沢山批判もあったが真剣に検討を始めた (light DM, IDM, 単なる原子核反跳でない場合、、).
- ただし現在のところ他の実験では振動はおろか衝突する事象もほとんどない。変わった粒子？

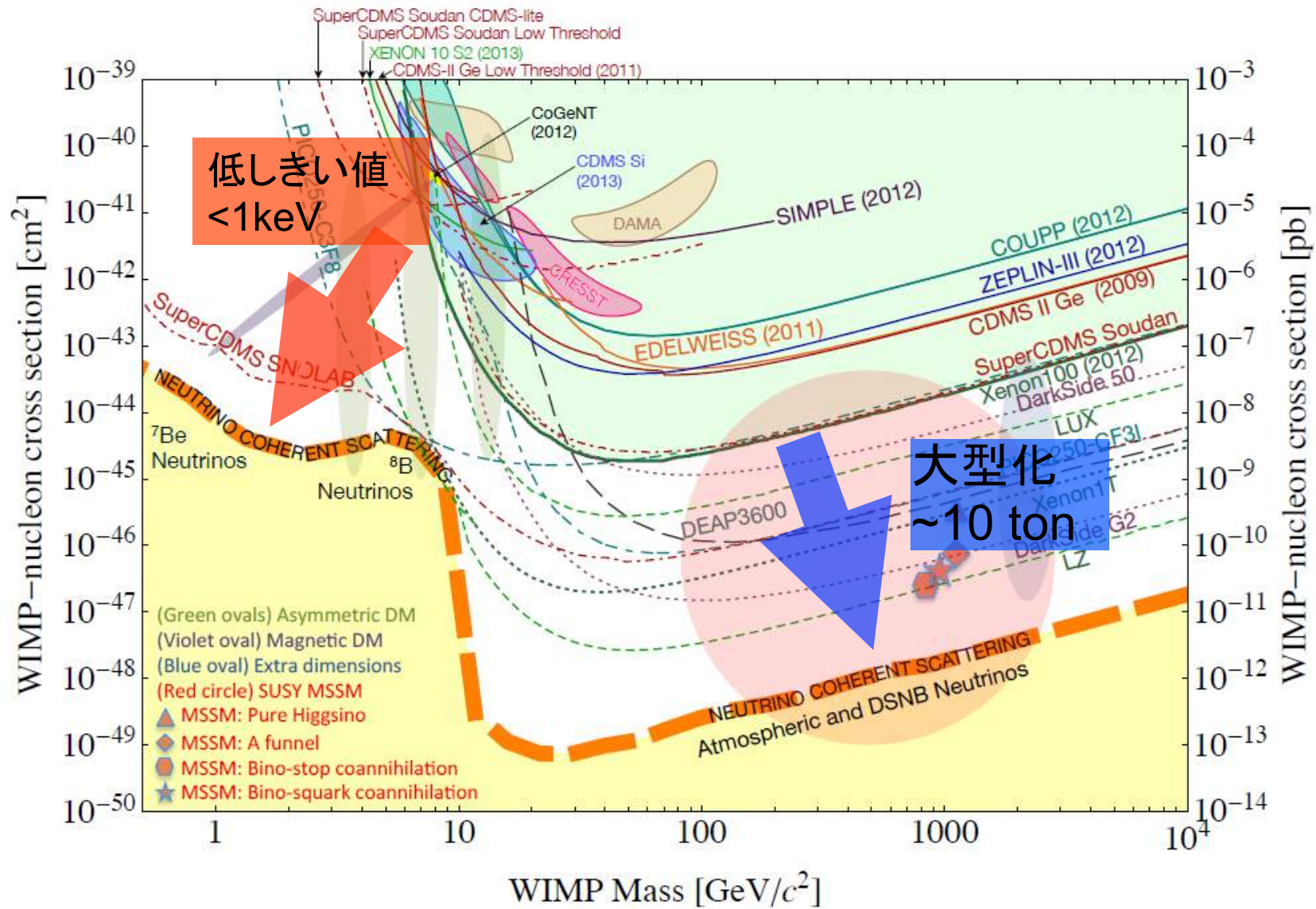
世界中で30以上の実験！



世界の他の実験の現状と将来計画



将来の方向性

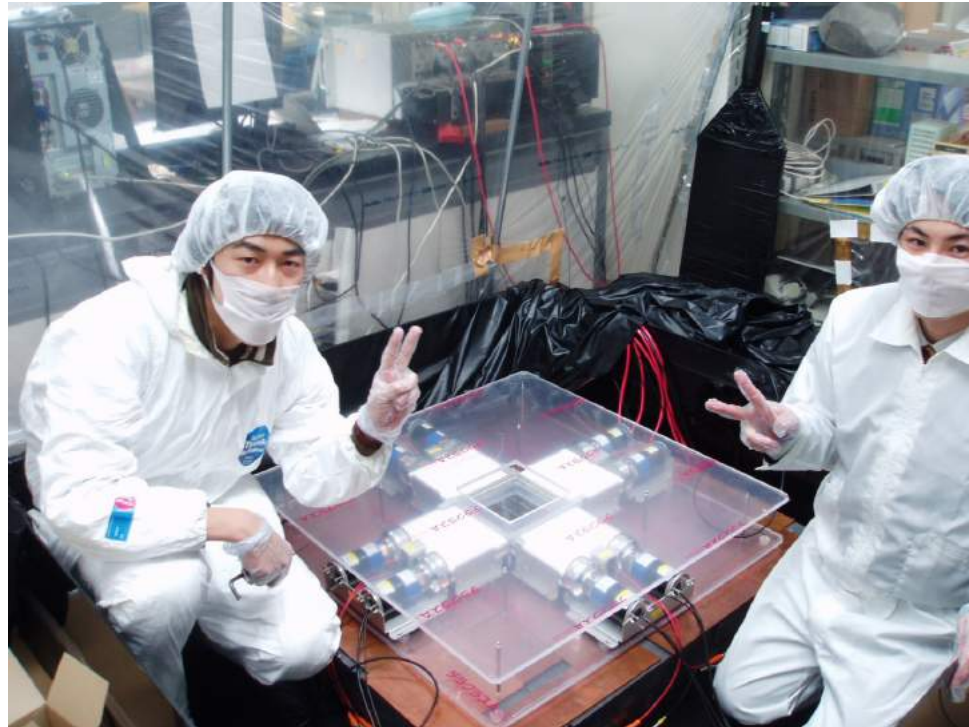


国内で行われている実験の紹介

- 研究開発
 - 徳島大:PICO-LON
 - 名古屋大:NEWS
 - 早稲田大:ANKOK
- 小型装置で実験中
 - 神戸大:NEWAGE
- 大型装置で実験中
 - 東京大:XMASS

PICO-LONプロジェクト

- 宇宙暗黒物質を探そう
- 我々にしかできない技術で攻めよう
- 徳島大が中心
- 大阪大学
- 大阪産業大学
- 東大カブリIPMU
- 東北大



PICO-LON薄型試作機を作った大学院生²⁴

世界最高感度を目指して開発中 一つ一つ部品を確認しながら作ります

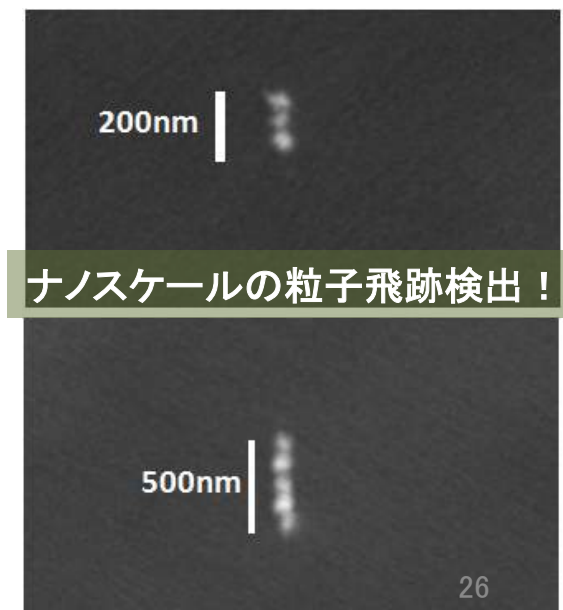
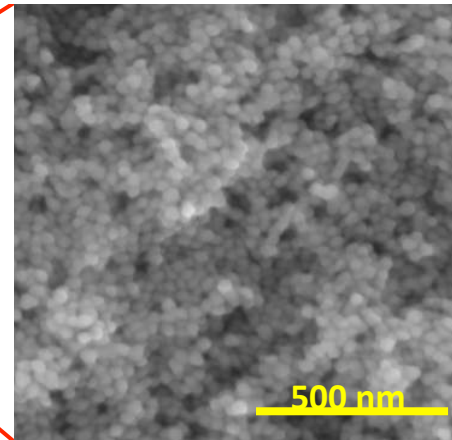
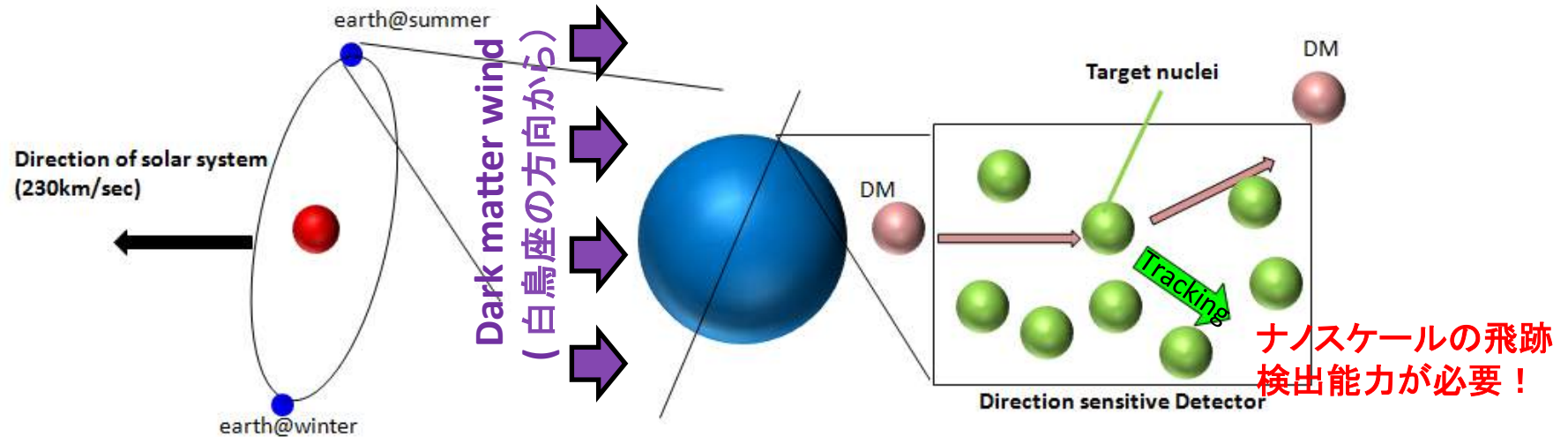


- 世界最高純度のヨウ化ナトリウム結晶を開発中
- ヨウ化ナトリウムは宇宙暗黒物質と良く反応する
- 良く性質が知られている検出器
- 大容量の検出器を作ることができる→ 感度がさらに向上！

NEWS: Nuclear Emulsion for WIMPs Search

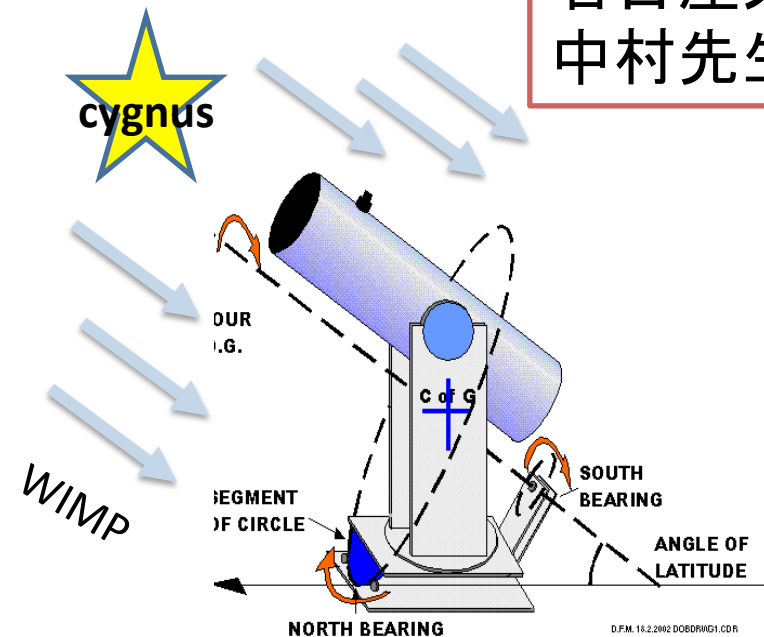
名古屋大学
中村先生

独自開発した超高分解能原子核乾板 (Nano Imaging Tracker : NIT) による暗黒物質の到来方向検出 → スケーラビリティを持った方向情報取得可能な検出器

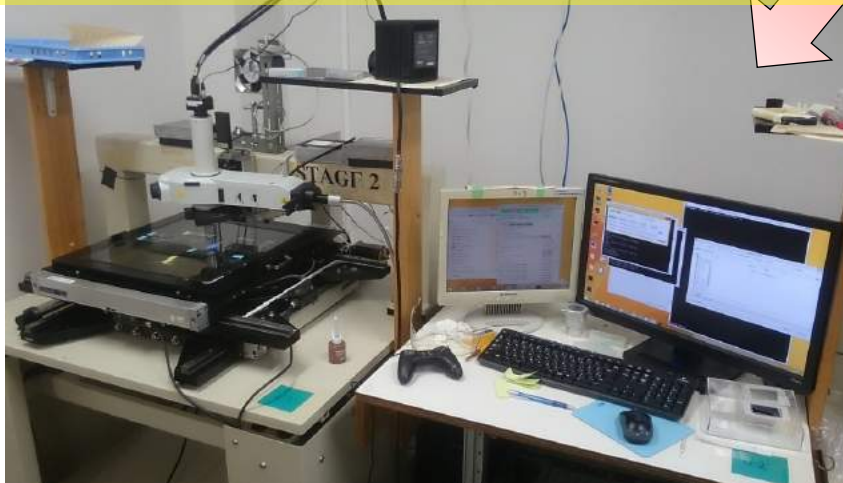


約40nmのAgBr 結晶敷き詰めた超高分解能粒子飛跡検出器
※ このハロゲン化銀結晶一つ一つがセンサーの役割 (CCDカメラの10-100倍の解像度)

イタリア・グランサツソ研究所にて最初
の実験を計画中



特殊な顕微鏡システムによって事象解析



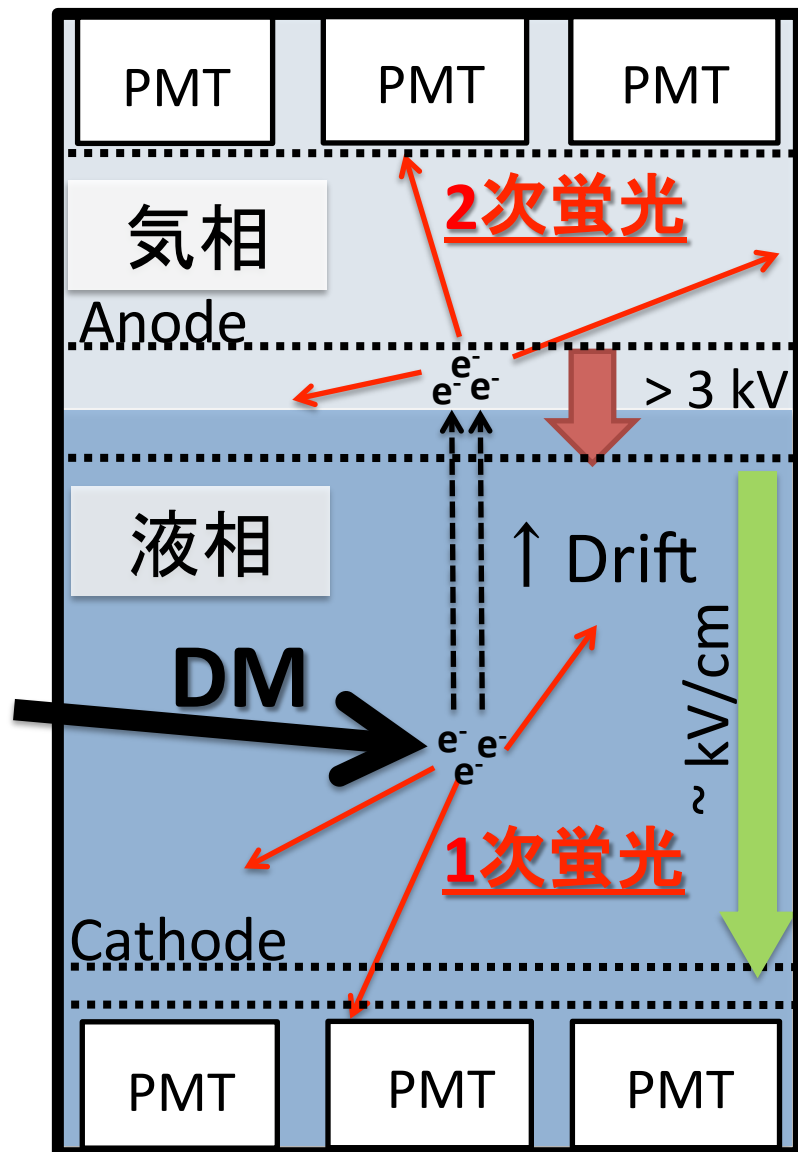
地下に赤道儀を設置し、CYGNUSの方向を追尾

- ✓ 2015年にグランサツソ研究所への実験提案
- ✓ 名古屋大学、イタリアグループを中心とした国際共同グループ
- ✓ 現在、小スケールのテスト実験の準備と背景事象研究を進行中
 - 2,3年程度: 1kgスケールの実験を提案 (DAMA領域を季節変動とは異なる情報で探索)
 - 10年: 10-100kgスケール実験へ

ANKOK実験(早大グループ)

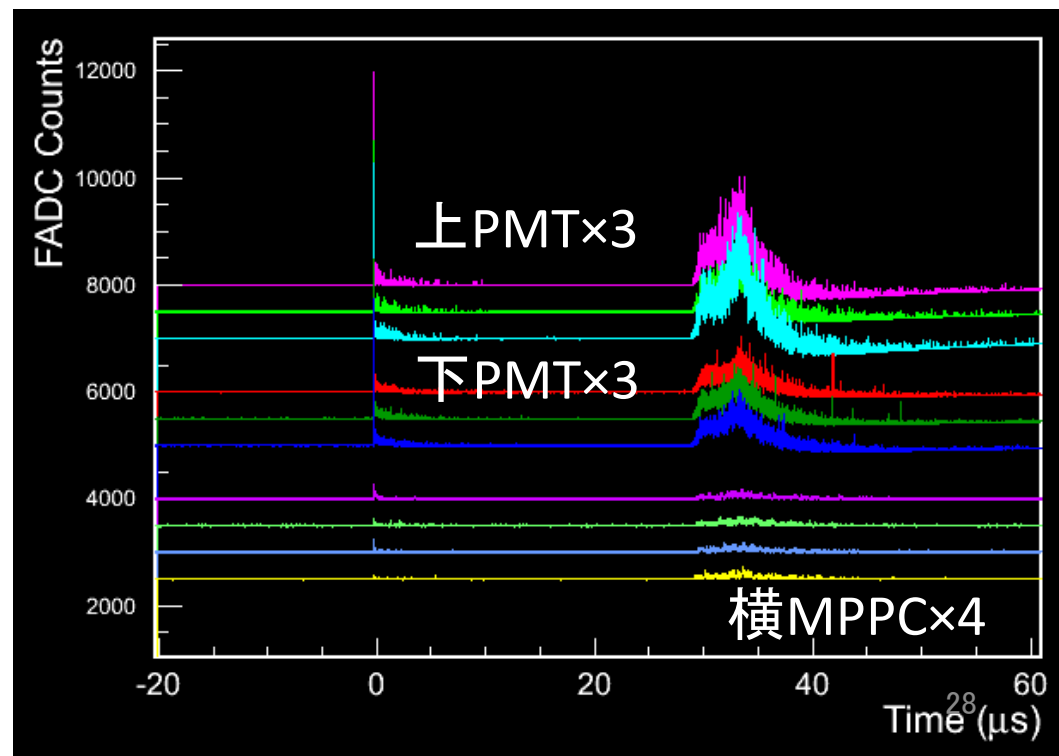
早稲田大学 寄田先生

◆ 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:

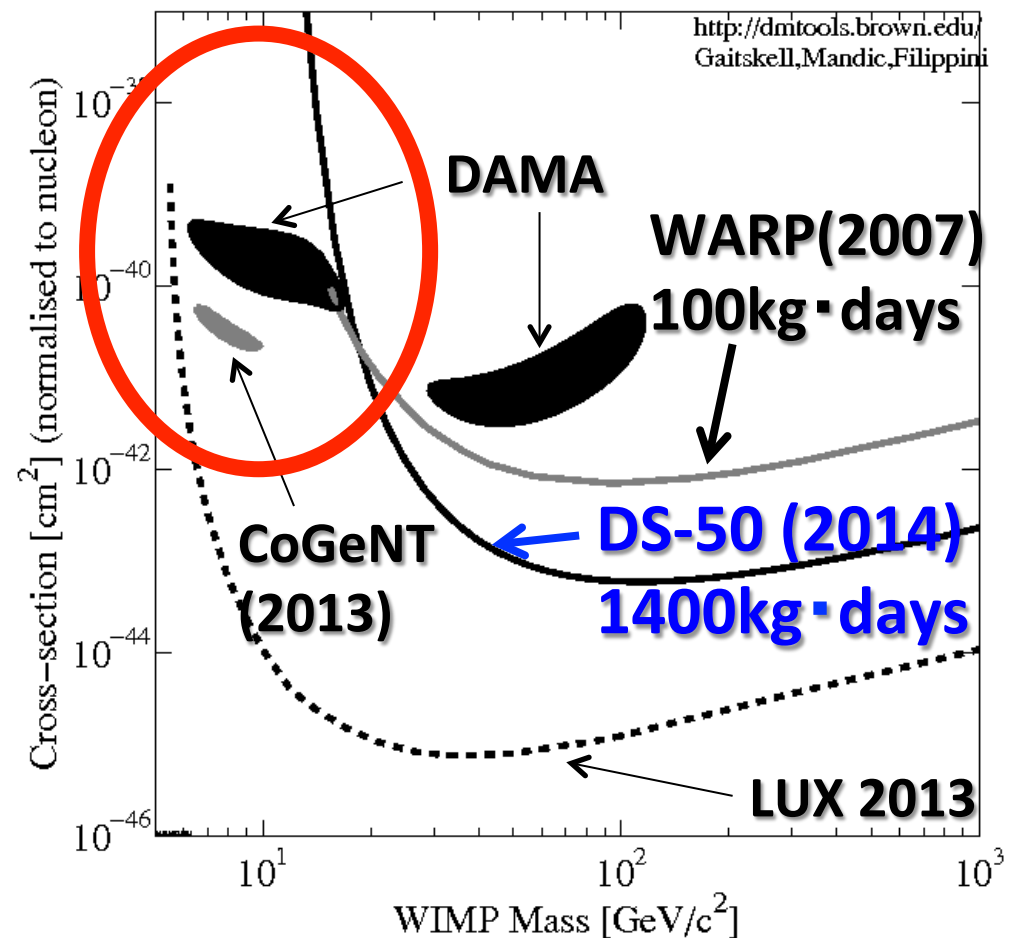
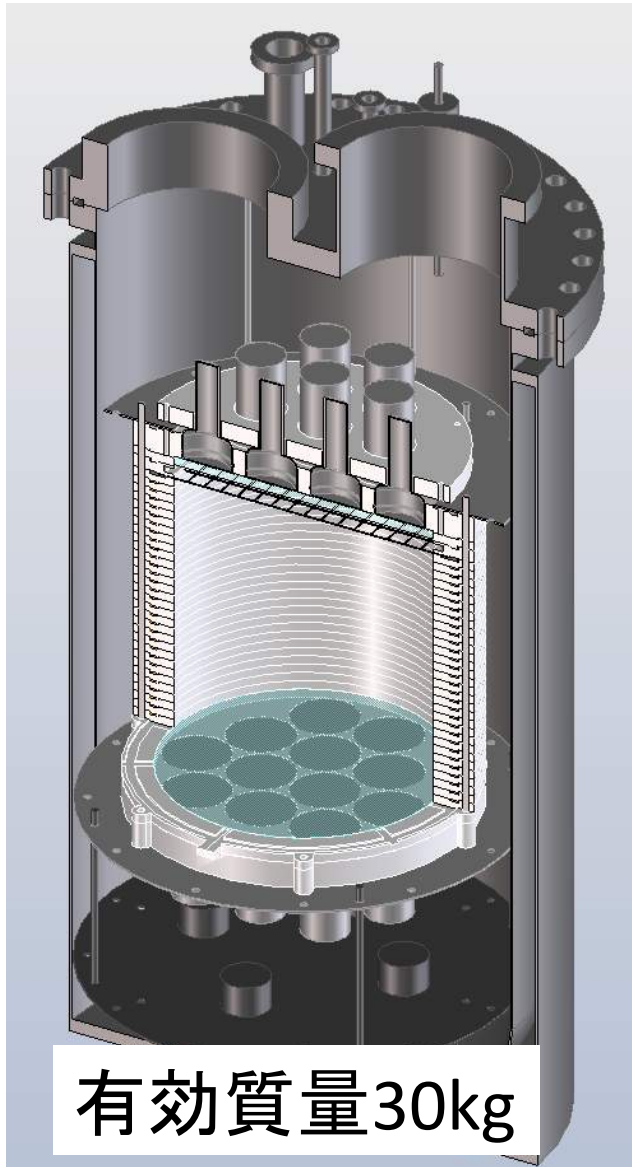
原子番号18: 比較的軽い希ガス
沸点 -186°C 、波長 128nm (VUV)
安価→大型化○・迅速性○



ANKOK実験の今後

早稲田大学 寄田先生

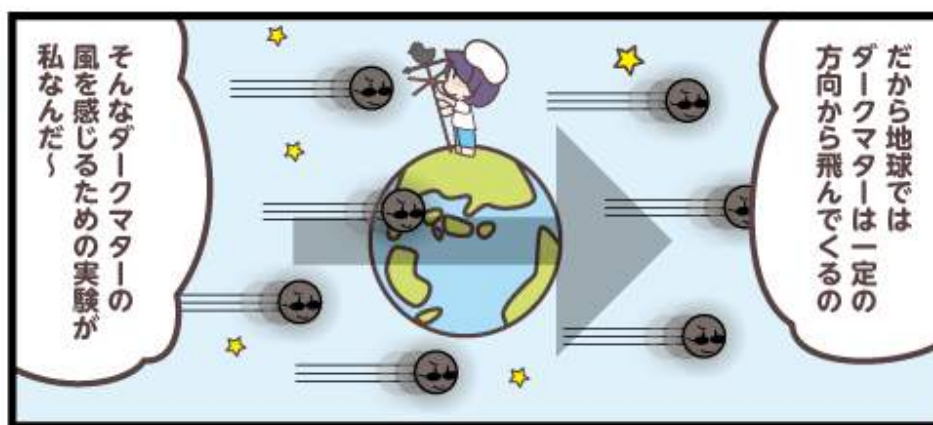
本実験検出器(製作中)



- ◆ コンパクト・高感度検出器(学生主体)で、
まず低質量WIMP(DAMA領域)の検証
→ 数年以内にArで世界初の結果を目指す

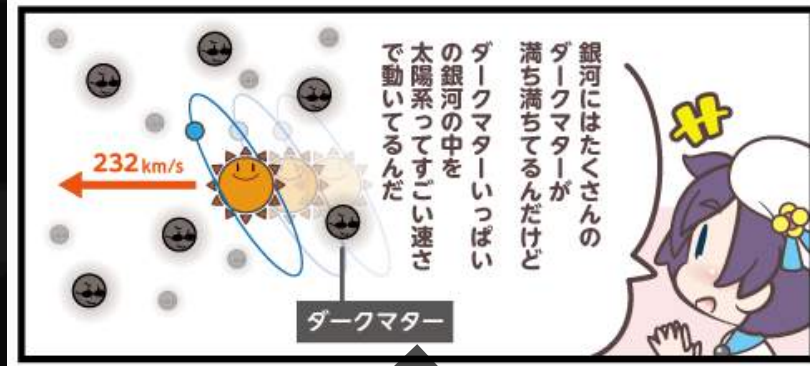
◆ ニューエイジ(神戸大+)

- ダークマターの「風」を捉える！
- ダークマター検出の決定的証拠へ

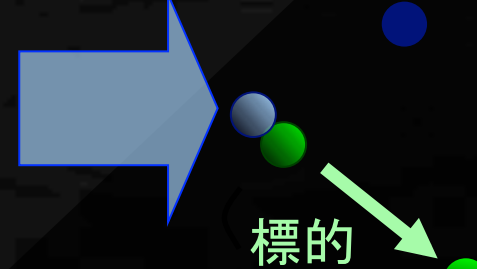


©Yuki A. higestan.com

ダークマターの風



ダークマター



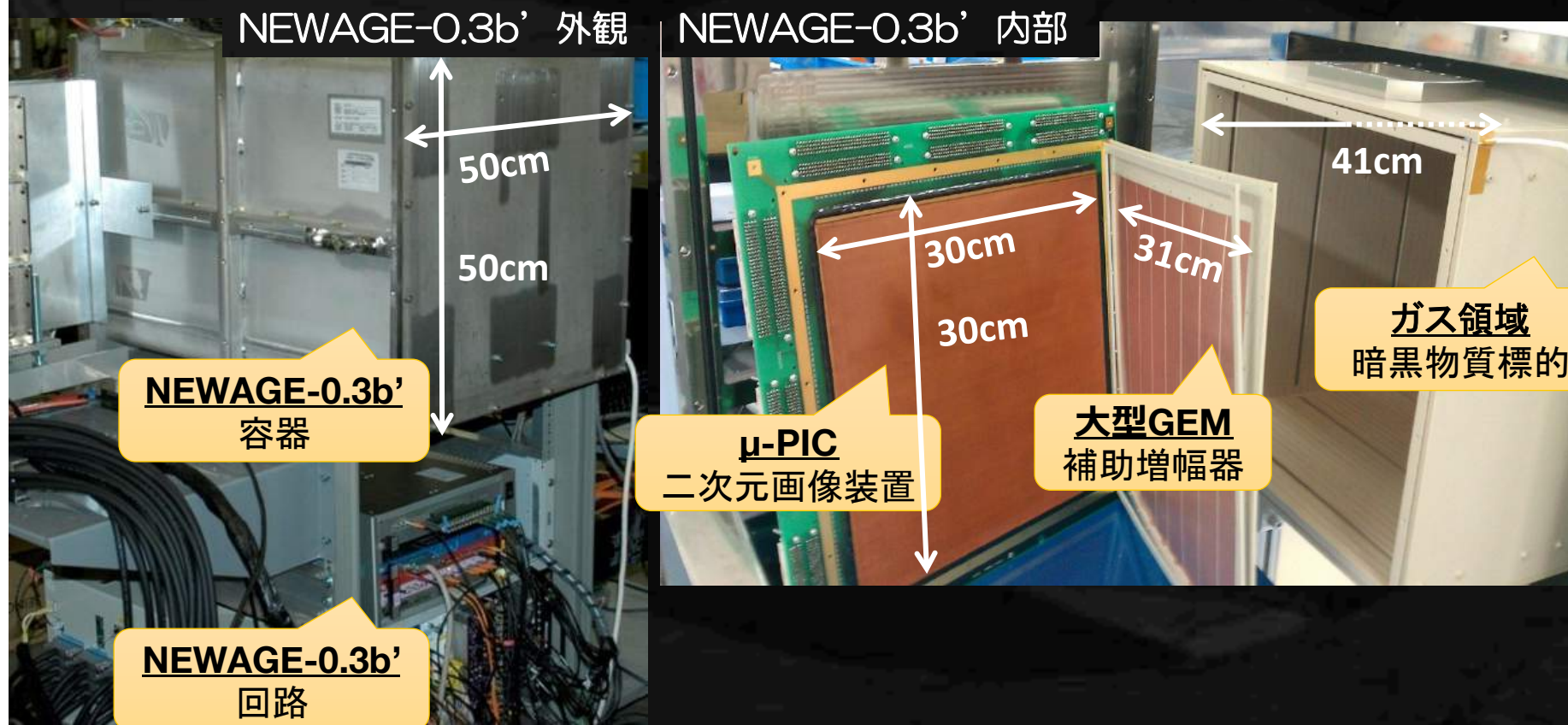
ニューエイジ(NEWAGE)ちゃん
岐阜県飛騨市神岡町在住、神岡鉱山に山ごもり中
地下深くでダークマターの風を探検中。



ニューエイジちゃんの帽子の飾り
実はこれにダークマターをぶつけて、
飛ばされていった方向を見て、風上を探しています。

◆ ニューエイジ装置

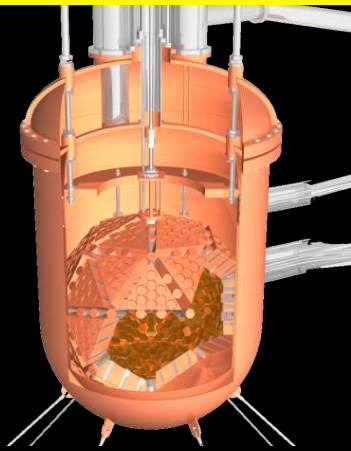
● NEWAGE-0.3b' : 三次元ガス飛跡検出器



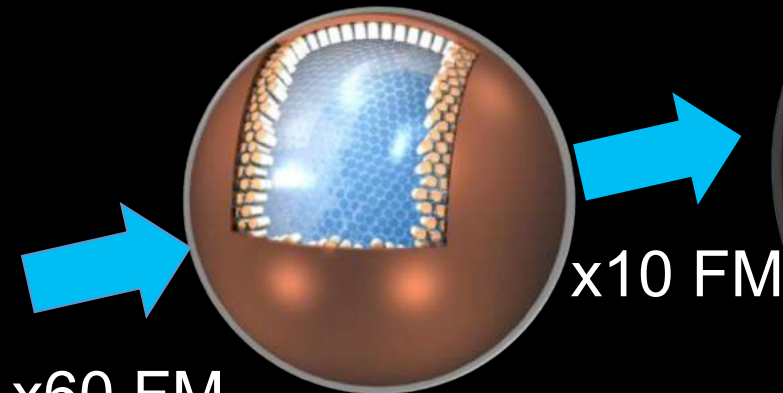
- 国産画像装置「μ-PIC」を使用
- 神岡地下実験室で観測中
- 装置の大型化も計画

東京大他：XMASSプロジェクト

XMASS-I
現行装置



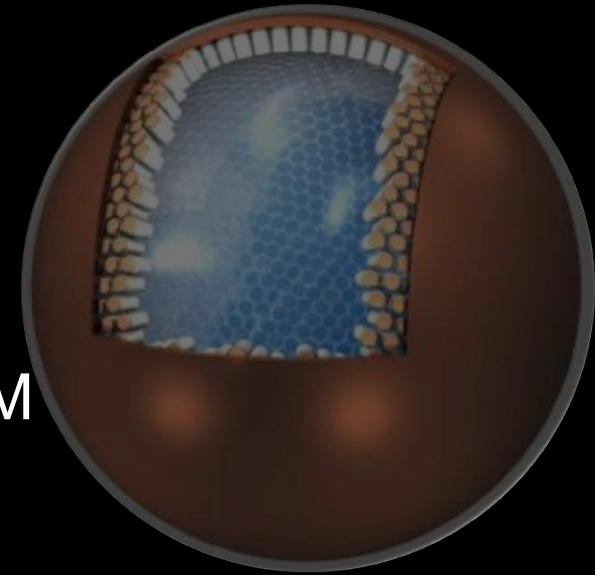
XMASS-1.5



x60 FM

3ton有効質量
(全体 6ton)
 $\sim 10^{-47} \text{cm}^2$

XMASS-II



x10 FM

最終目標: 10t有効質量
(全体 24t)

- 暗黒物質の発見に必要な以下を極める！
 - 大型であり
 - ノイズが小さい

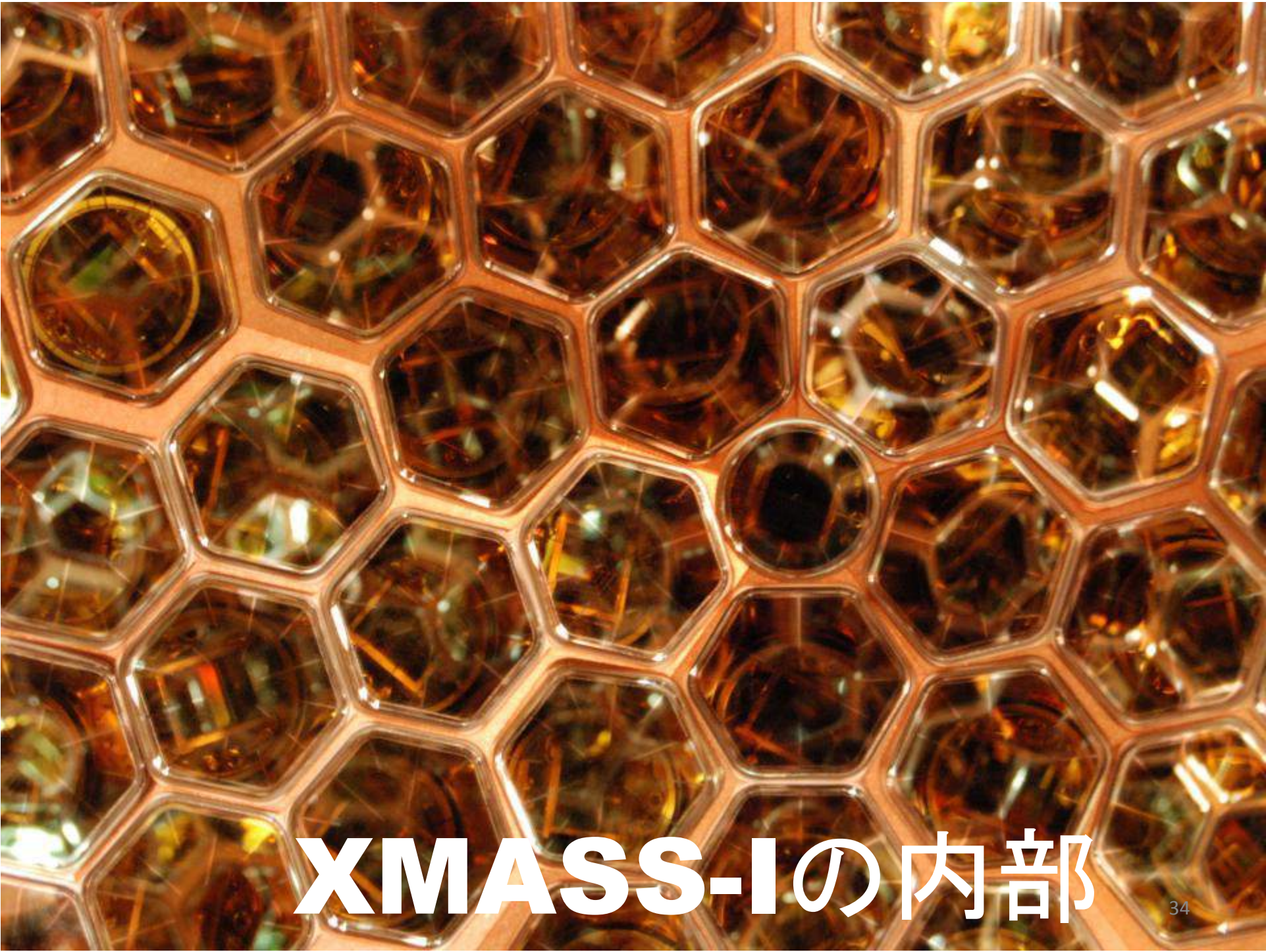
神岡で運転中のXMASS-I検出器



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。

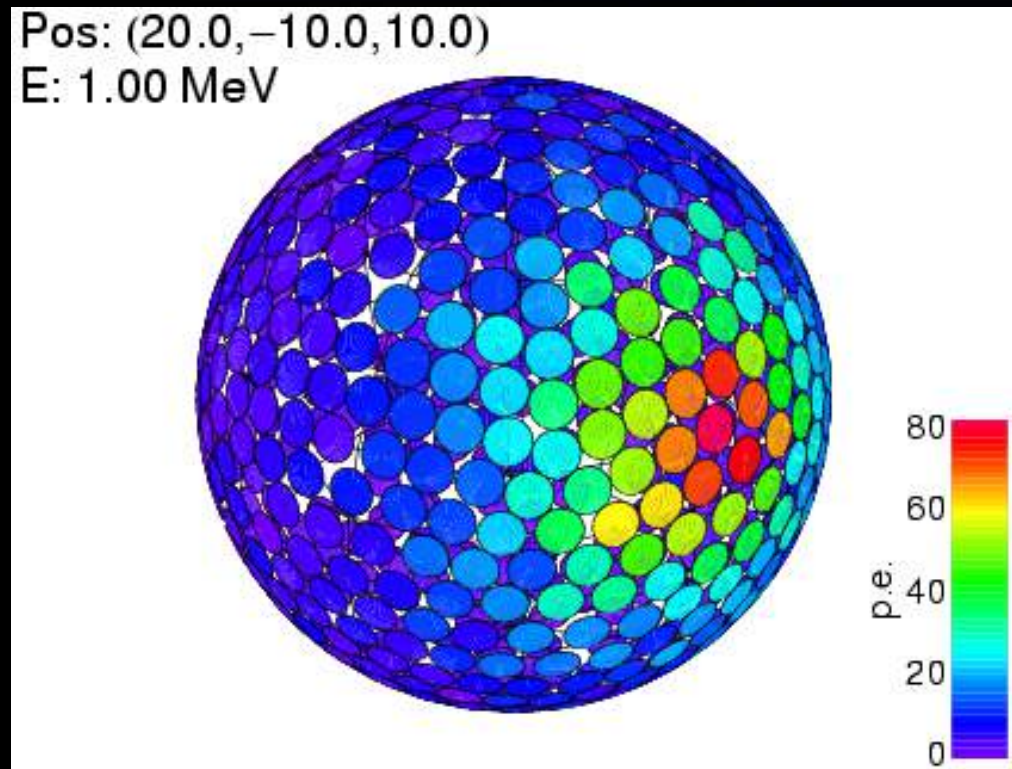


XMASS-Iの内部

光った位置をパターンで決める技

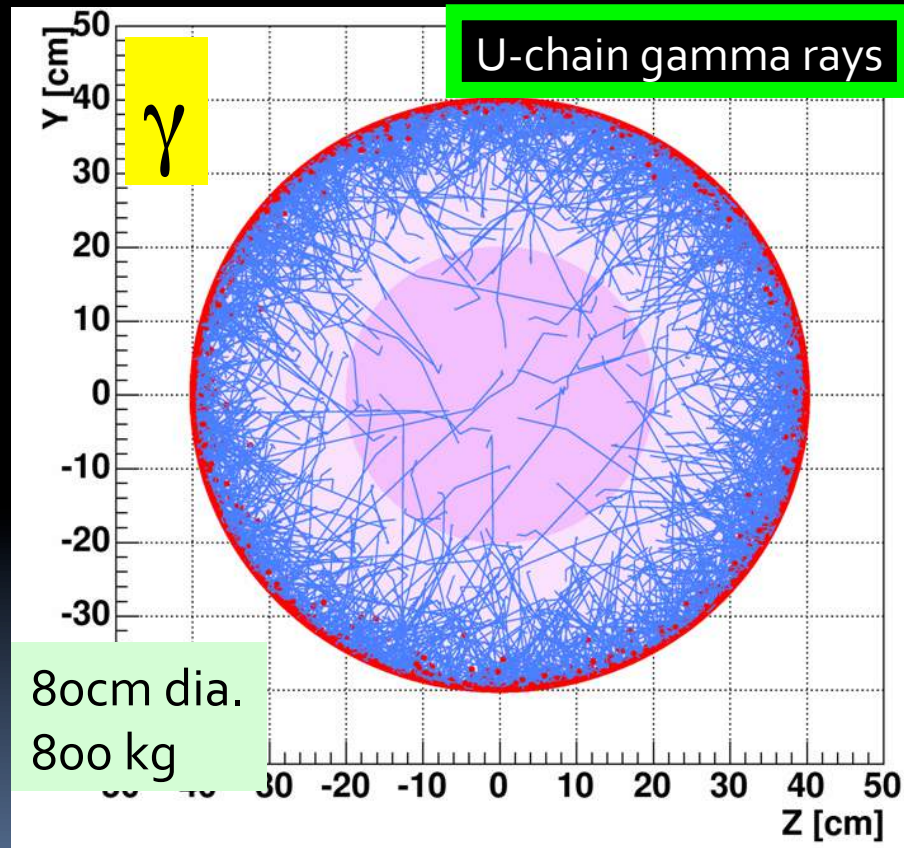
色は光電子数を示し、発光点はこのらのヒットパターンから決定される。

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



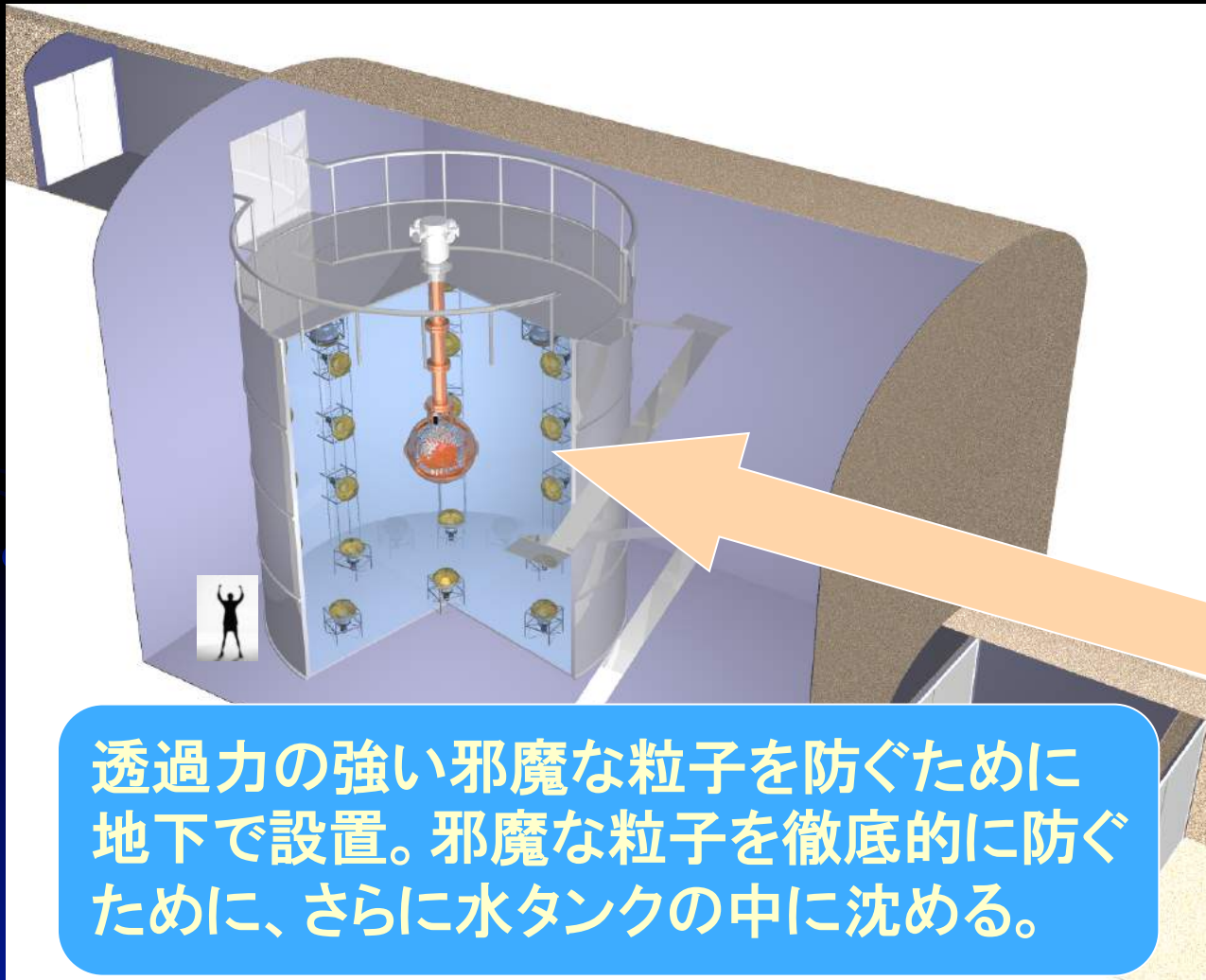
大型化と低バックグラウンド化の両立

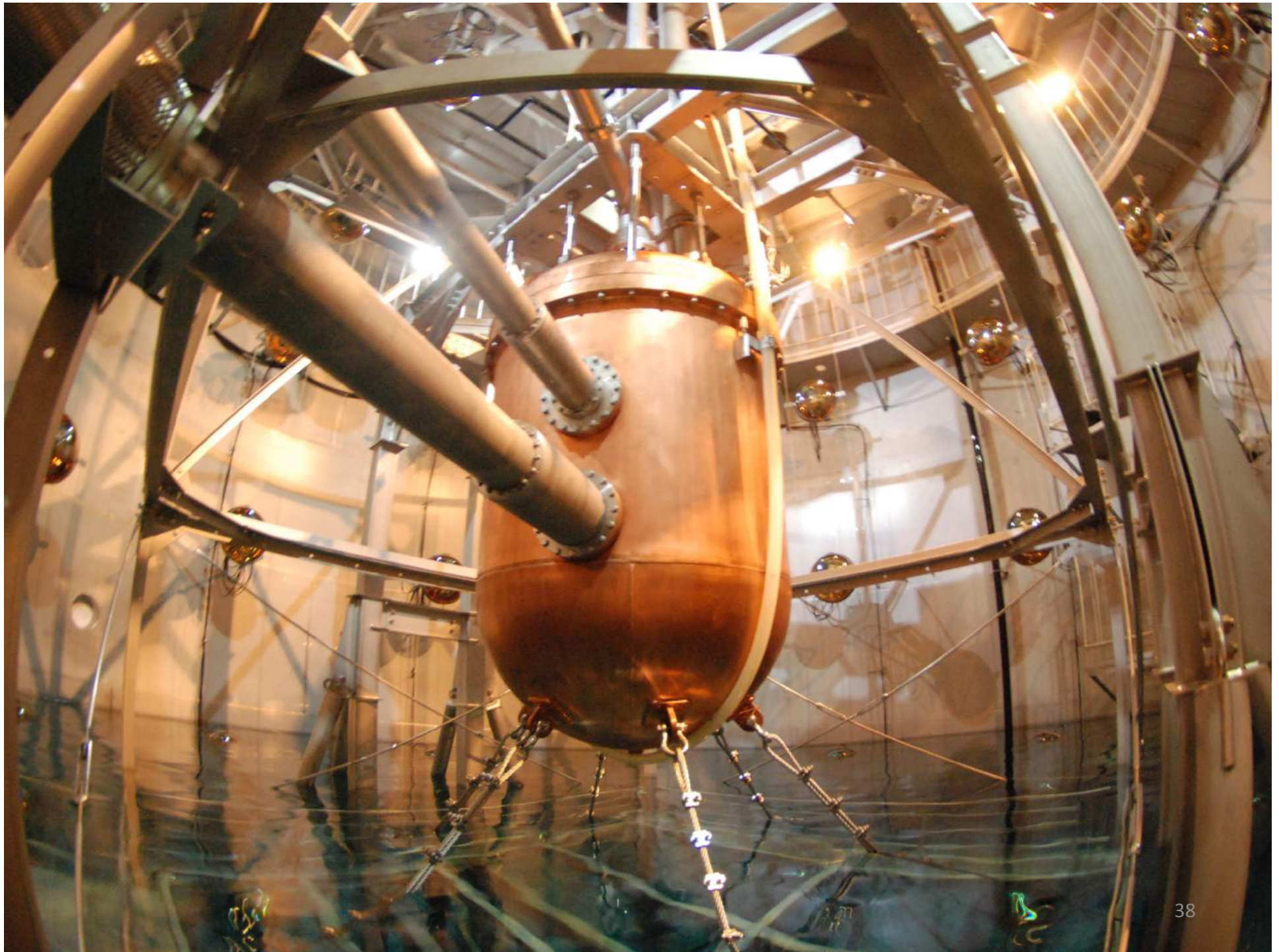
- 外から入ってきたものはすぐに吸収
- 真ん中のあたりは殆どノイズがない状況が作れる！



XMASS-I 現在運転中

「直接」発見
を目指す





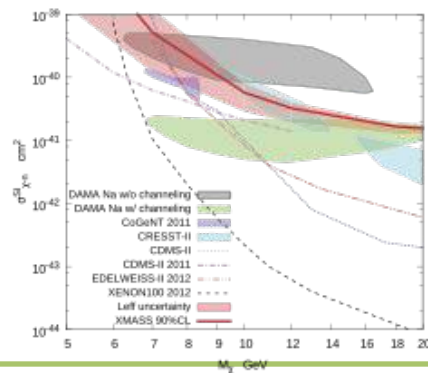
岐阜県飛騨市神岡町 神岡鉱山

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



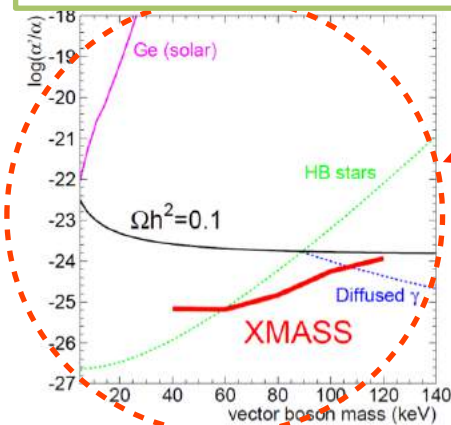
XMASS-1: 暗黒物質等の探索結果



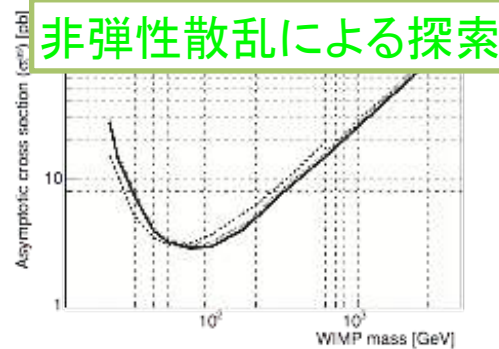
軽い暗黒物質の探索

Phys. Lett. B 719 (2013) 78

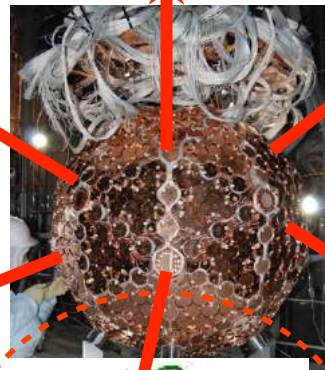
スーパーウィンクス



Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 121301



PTEP 2014, 063C01



季節変動の探索

arXiv:1511.04807v1

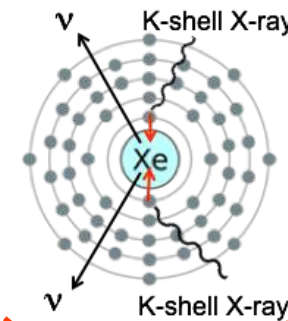


太陽アクシオン



Phys. Lett. B 724 (2013) 46

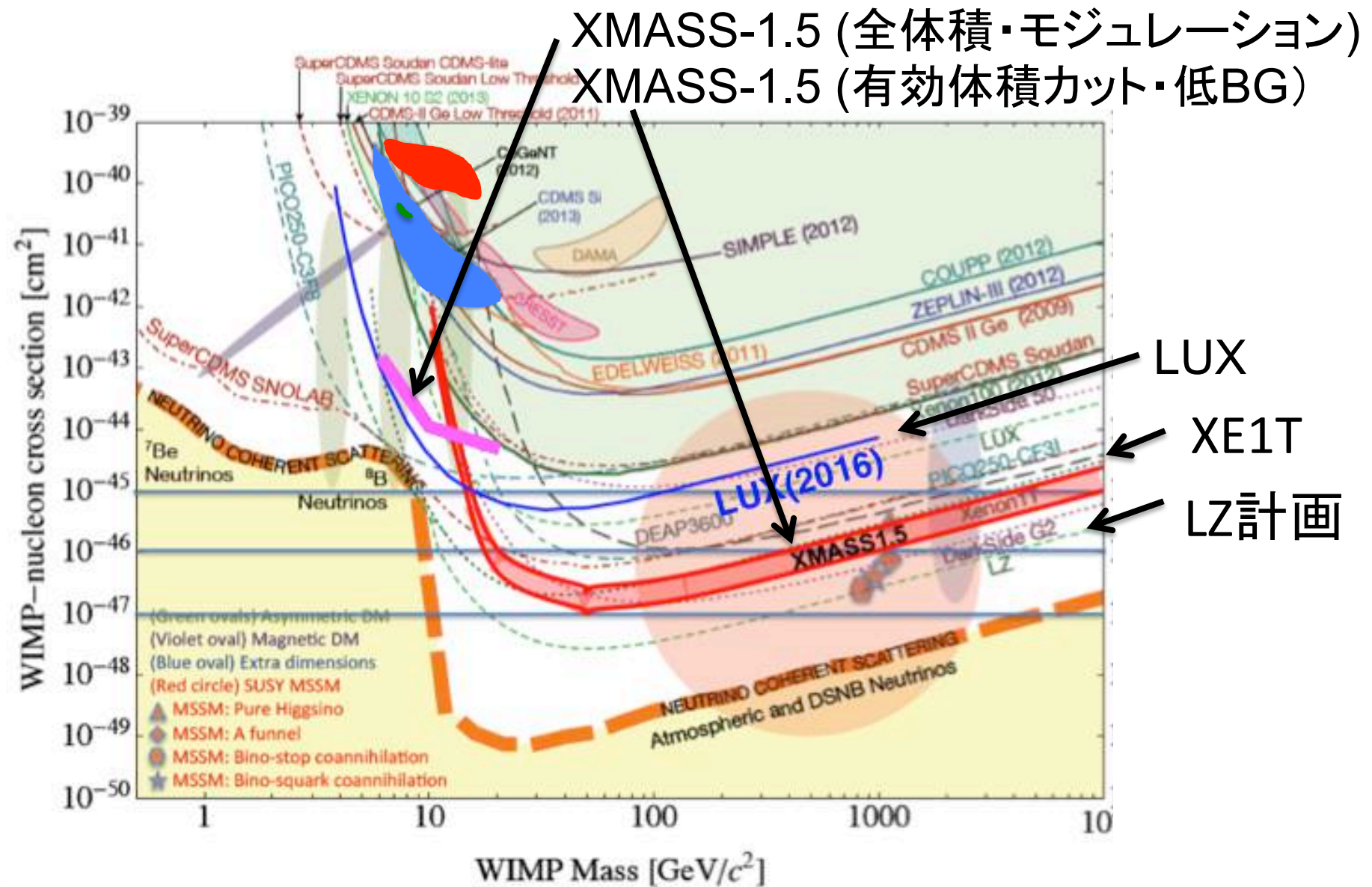
二重電子捕獲現象の探索



arXiv:1510.00754

- 当初予定したものより広い種類の暗黒物質を探索

高感度化で発見を目指す次期XMASS-1.5

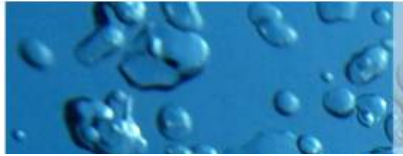


- 原子核反跳だけでなく電子散乱事象にも高感度。

XMASS-1.5の鍵となる光センサー



次期計画では
これまでにない特別な形状
これまでにない低放射能
の光電子増倍管を用いて画期的に性能を向上予定。



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、神岡では国内唯一大型のXMASS-Iが進行中。将来的計画の準備が整っている。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。
- 是非一緒にやりましょう！

moriyama@icrr.u-tokyo.ac.jp