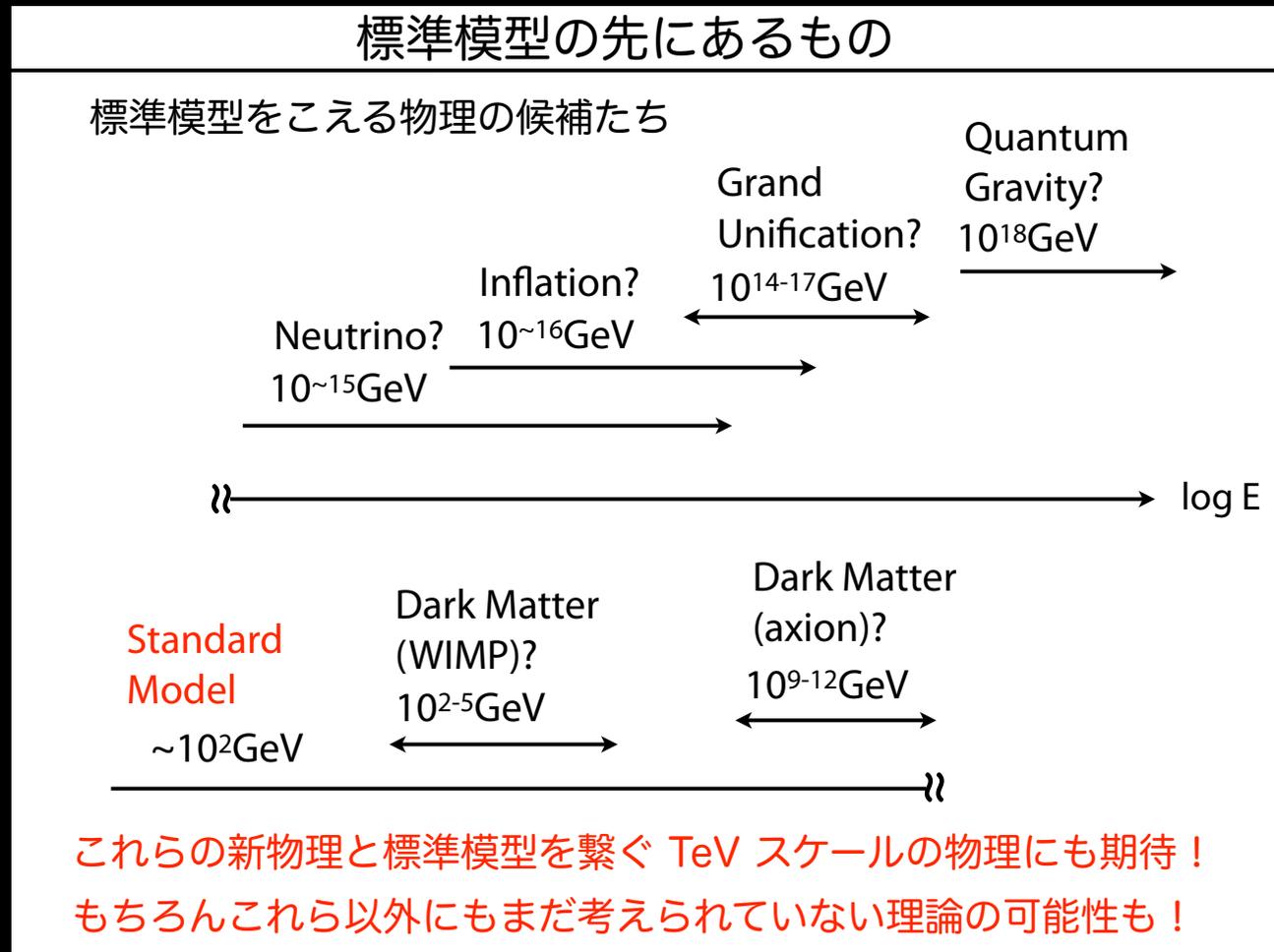


最先端研究 | 暗黒物質

東京大学
宇宙線研究所/Kavli IPMU
森山茂栄(しげたか)

暗黒物質研究の動機

1. 素粒子物理学：標準理論、ヒッグス発見の先



これまでの成功：
人類は自然を深く
理解できそうだ、
という強い期待。

伊部先生のスライド

暗黒物質の理解は
素粒子の理解を
はるかに広げて
くれる「鍵」だろう。

暗黒物質研究の動機

2. 宇宙の誕生と発展、運命を司る法則の理解

– 暗黒物質は既に「発見」済

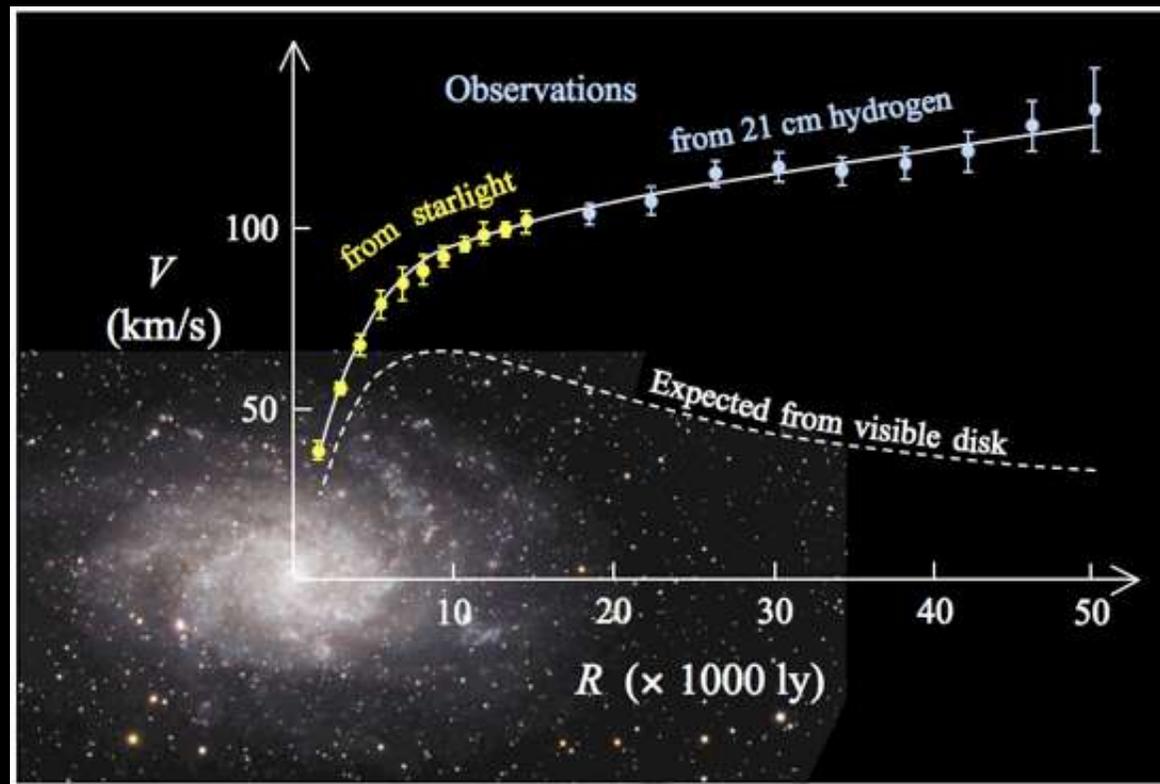
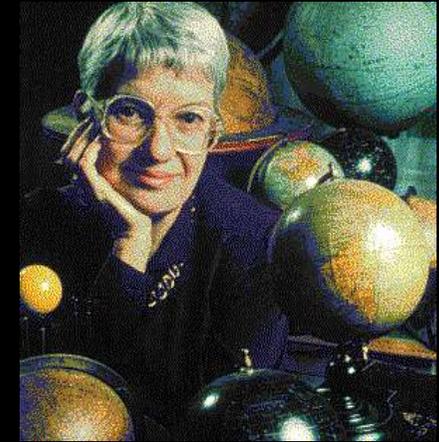
– 但し「正体」不明

- 暗い星、原始ブラックホール等、既知物質か
- 未発見の素粒子か

素粒子の大発見と、宇宙に関する大発見が
交互に起こることで物理学が発展してきた。
いまボールは「素粒子物理学」側にある！

暗黒物質存在の証拠

- 宇宙のあらゆるスケールに証拠
- 最小スケールの証拠：銀河の回転曲線

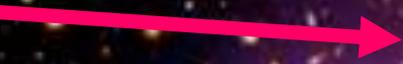


この方法で太陽系近傍に陽子1個分/3ccの密度で存在することが判明

- 衝突する銀河

The bullet cluster (弾丸銀河団) 衝突中

通常物質
摩擦のため
引き摺り効果

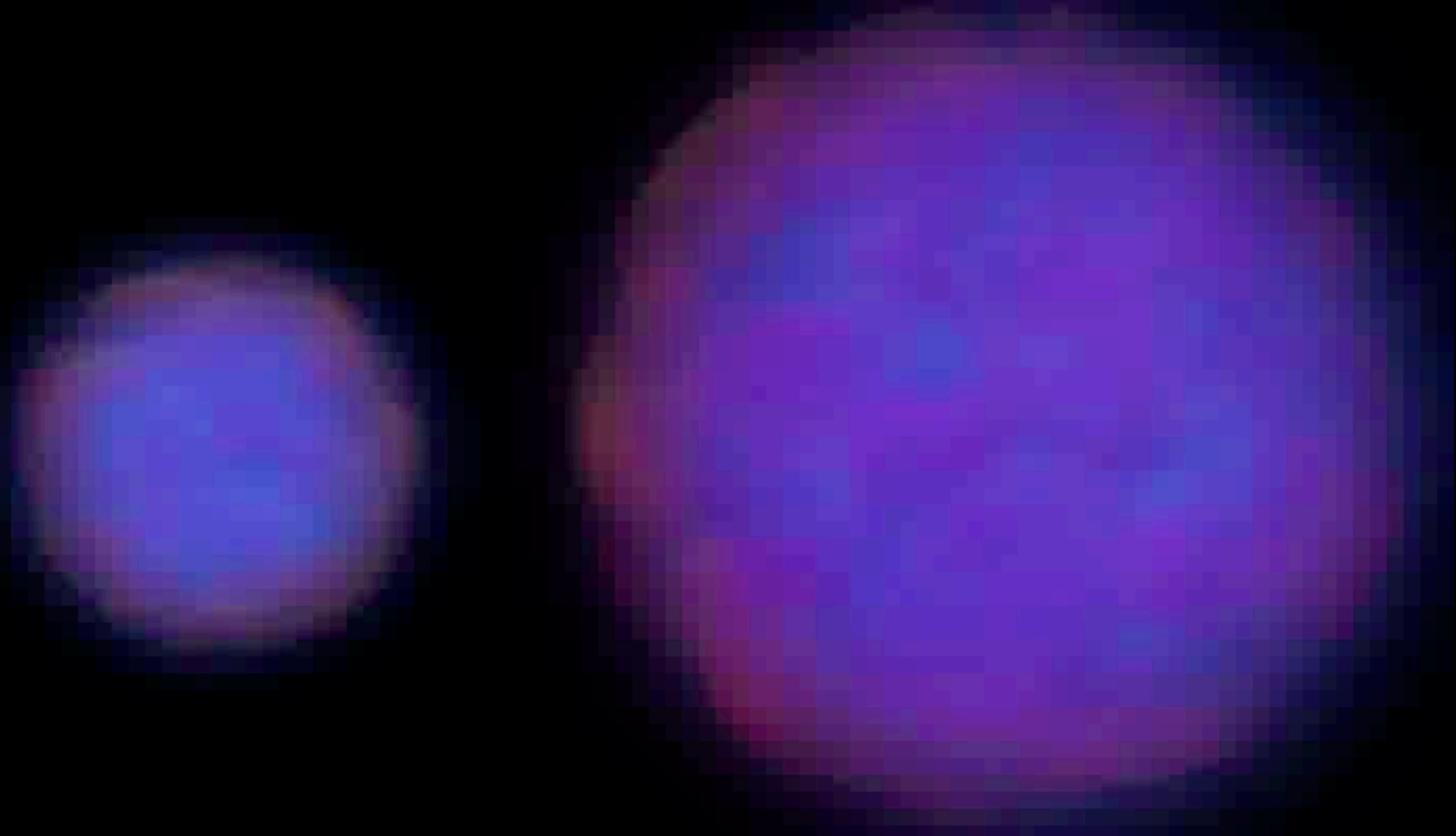


暗黒物質
非衝突性
(観測は重力
レンズ効果、
色は仮)



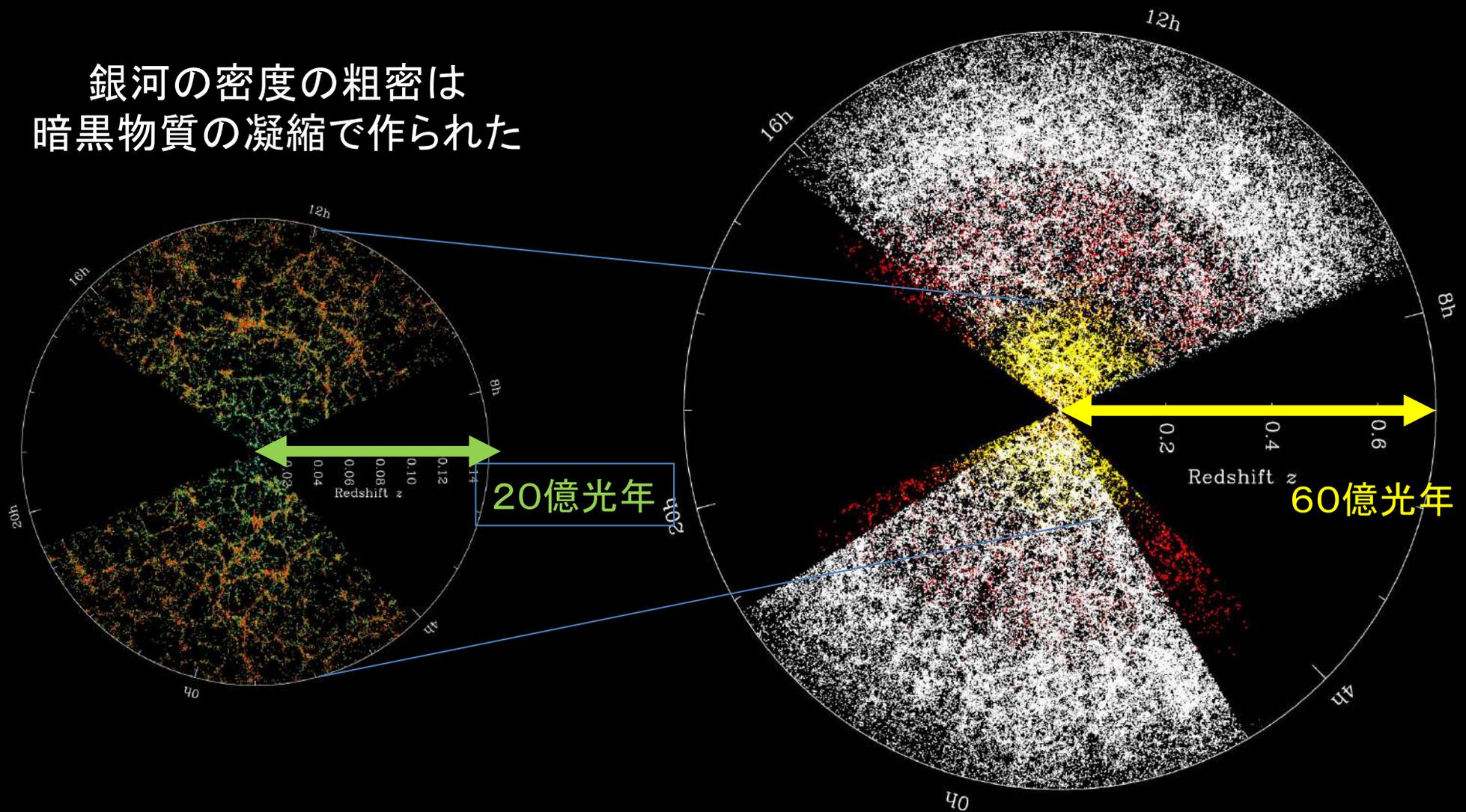
Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.;
Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.;
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/
U.Arizona/D.Clowe et al.

想像動画



大規模構造の成長

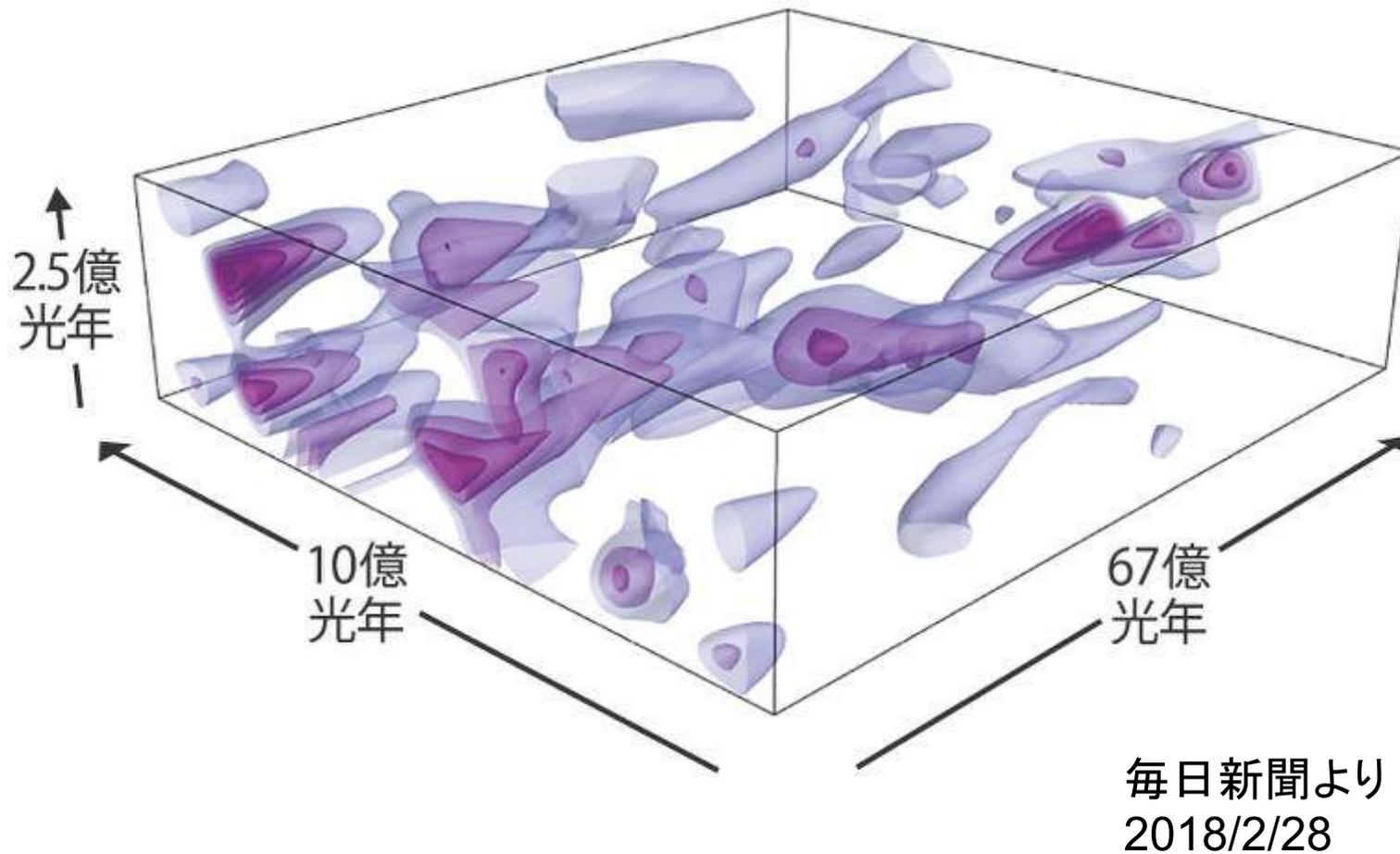
銀河の密度の粗密は
暗黒物質の凝縮で作られた



重力レンズ効果：宇宙論的深度での質量分布

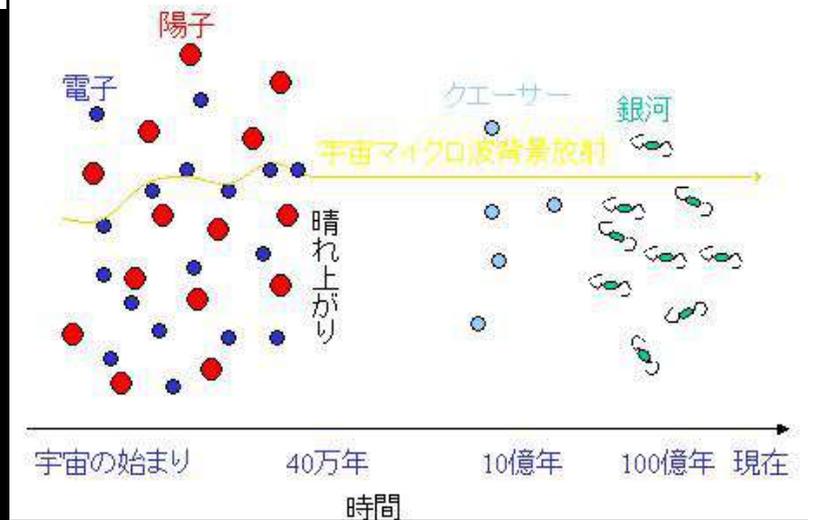
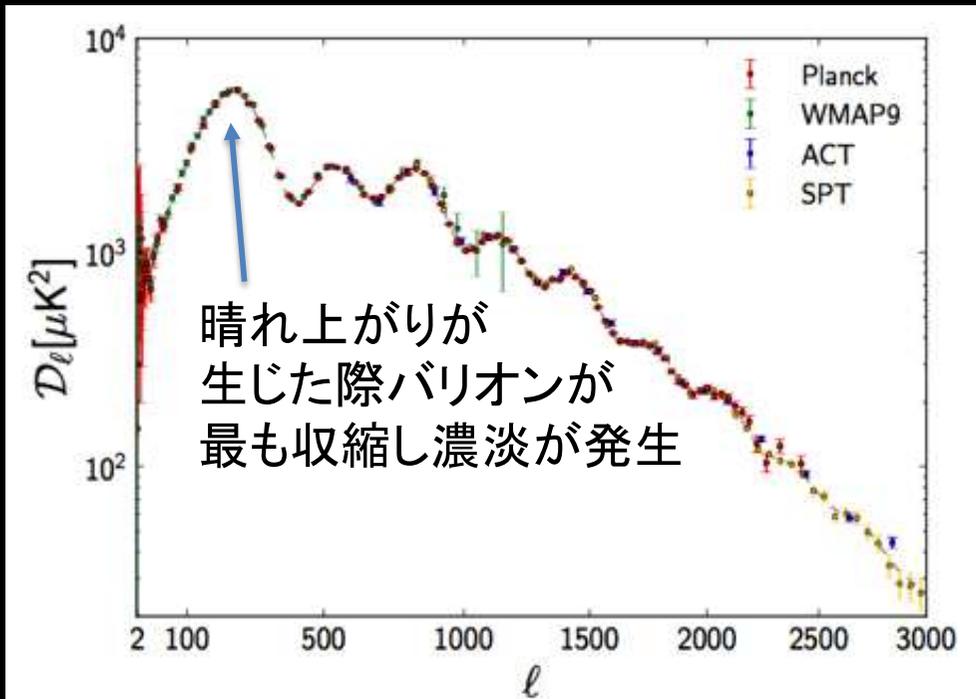
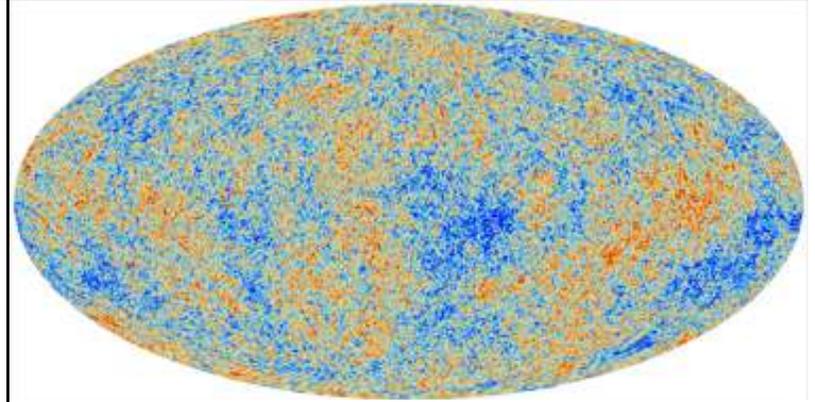
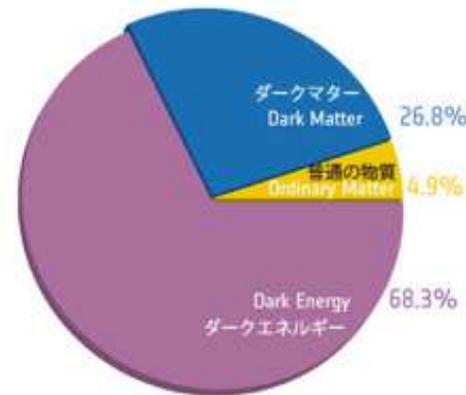
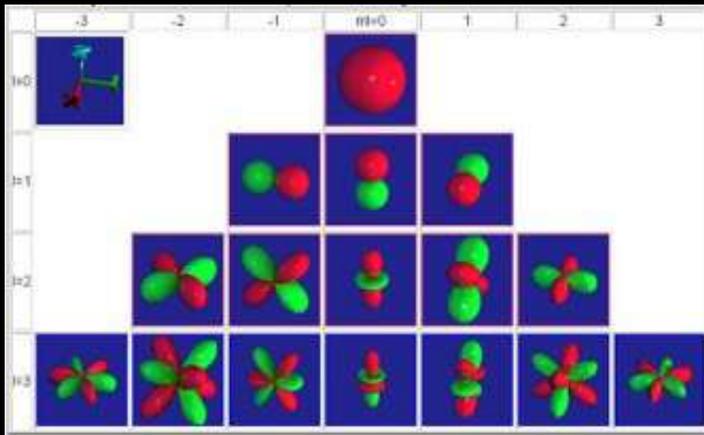
暗黒物質の三次元分布図

※国立天文台と東京大提供



太陽の5千兆倍に及ぶ塊を65個観測、理論より2割少ない、との精度

宇宙開闢時の電波の解析



小規模

大規模

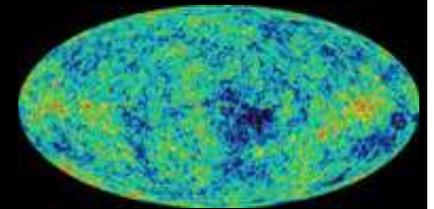
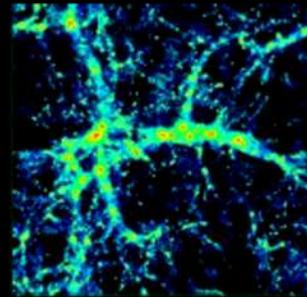
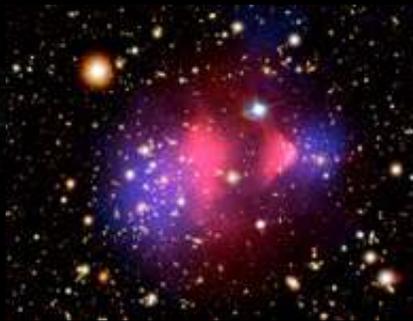
銀河の回転速度

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

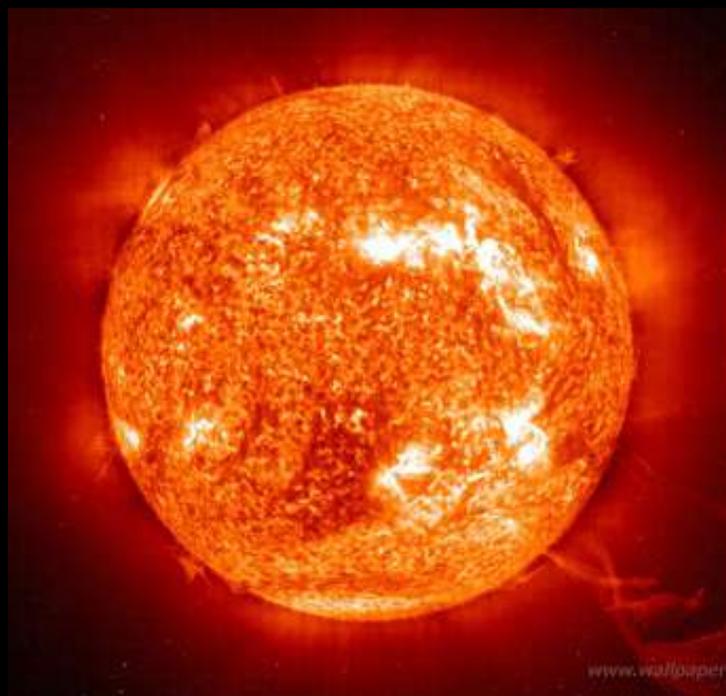


各スケールの未解決問題が
「たった一つの未知粒子」
の発見で一気に解決の可能性

現代物理の大きな課題の1つ

人類への課題

- 我々の隣に飛交う素粒子を同定せよ



暗黒物質の同定

素粒子としての「毛」＝特徴

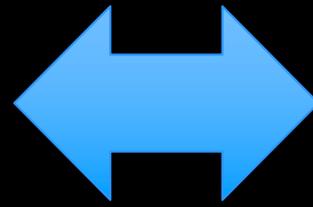
- 質量：90桁の範囲でわかっていない
- スピン：未知
- 相互作用の強さ：重力以上

すべてにおいて実験的決定が必要

暗黒物質の質量と同定方法

質量による分類

- 古典場(波)
- 軽い粒子
- 弱く相互作用する質量のある粒子(WIMP)
- 重い粒子
- 天体等



観測手法による分類

- レーザー干渉
- 天体観測
- 宇宙X/ γ 線等観測
- 直接検出
- 加速器
- ニュートリノ観測
- 重力レンズ
- CMB観測

幅広いアプローチが期待
本講義ではオレンジを主

WIMPの代表的候補 超対称性粒子ニュートラリーノ

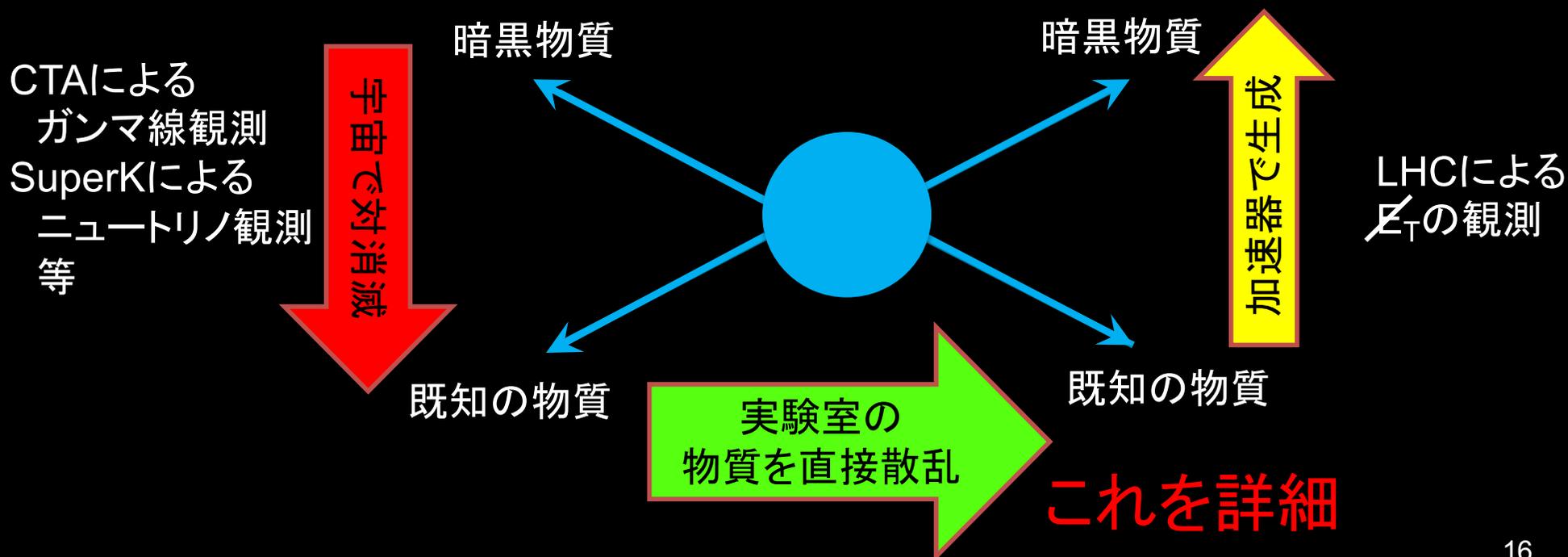
	SM particles	SUSY particles
Quark	u d c s t b	\tilde{u} \tilde{d} \tilde{c} \tilde{s} \tilde{t} \tilde{b}
Lepton	e ν_e μ ν_μ τ ν_τ	\tilde{e} $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\mu}$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_\tau$
Higgs	H^+ H^- H_1^0 H_2^0 A^0	\tilde{H}^+ \tilde{H}^- \tilde{H}_1^0 \tilde{H}_2^0
Gauge particles	g W γ Z	\tilde{g} \tilde{W} $\tilde{\gamma}$ \tilde{Z}^0

ニュートラリーノ

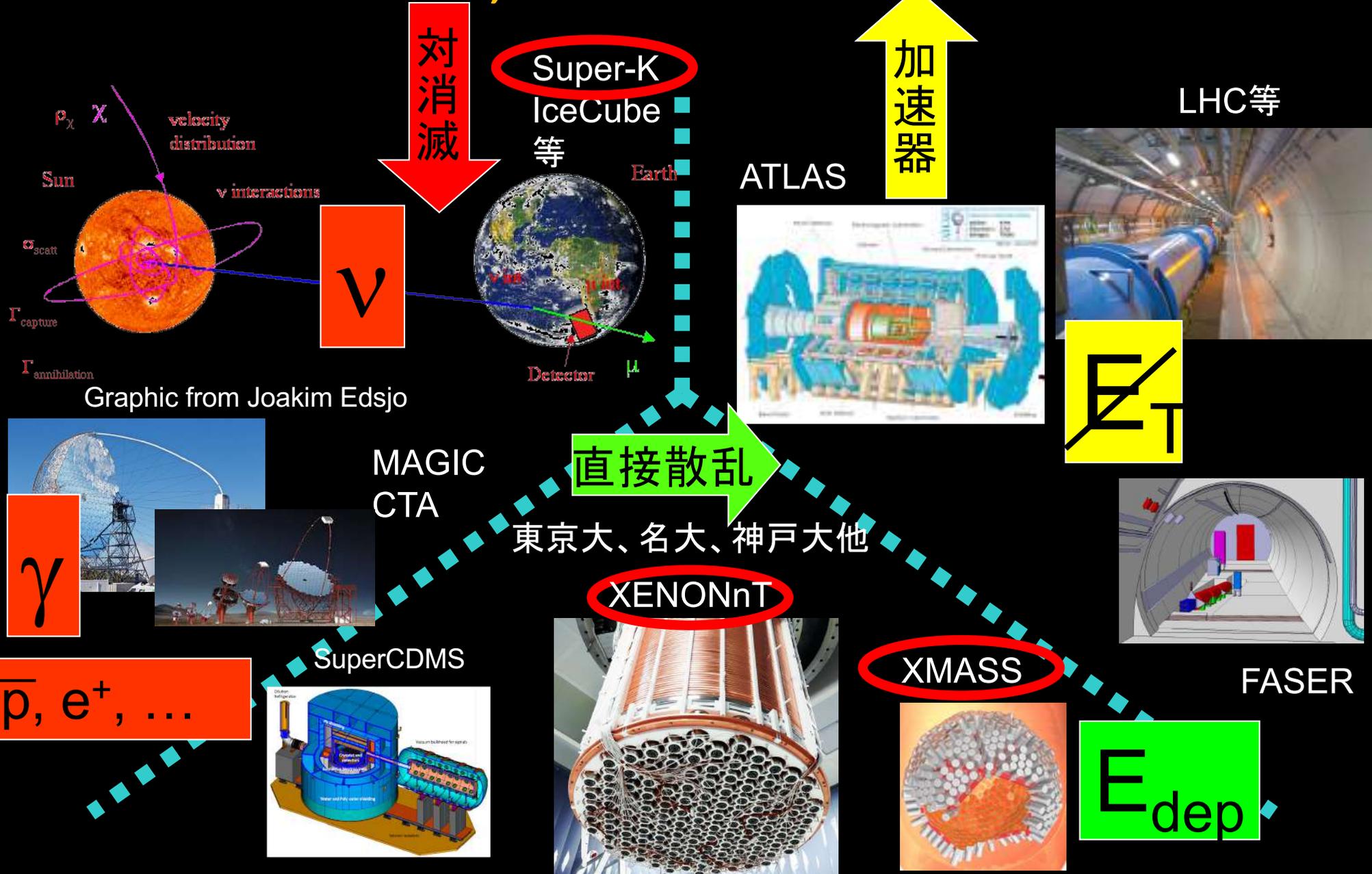
超対称性は素粒子の様々な問題を解決する魅力的な性質。暗黒物質の正体は不明だが、有力で重要な候補の一つ。

暗黒物質(WIMP、軽い粒子)の探索法

- 電荷ゼロ(光と相互作用なし)、ほぼ安定。
- 唯一の知識: 宇宙初期に生成 = 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



WIMP, 軽い粒子の方法



Graphic from Joakim Edsjo



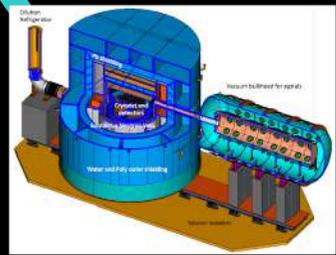
MAGIC
CTA

直接散乱

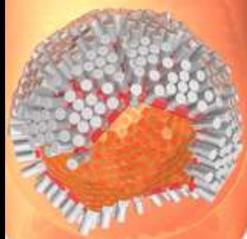
東京大、名大、神戸大他

XENONnT

SuperCDMS



XMASS



FASER

E_{dep}

高い技術とアイデアで未知の素粒子を掴む

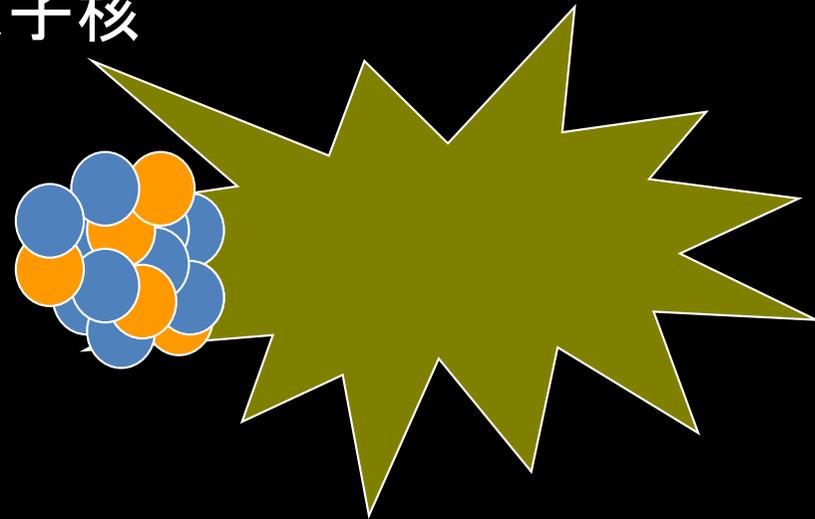
直接散乱の検出の方法

- 通常物質が反跳される現象を測定

暗黒物質が飛来



原子核



宇宙の彼方へ

反応時の信号を検出

- 最も直接的で、発見後に詳しい研究が可能。
- 新研究分野の扉が開く

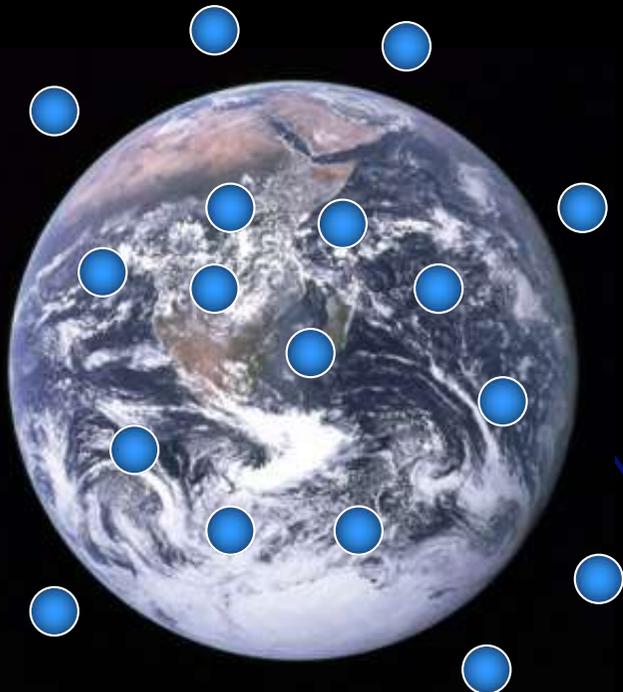
存在量

銀河の回転速度
光る物質の量

推測される
質量

3ccに水素原子1個分の差

非衝突性のため
地球はスカスカ

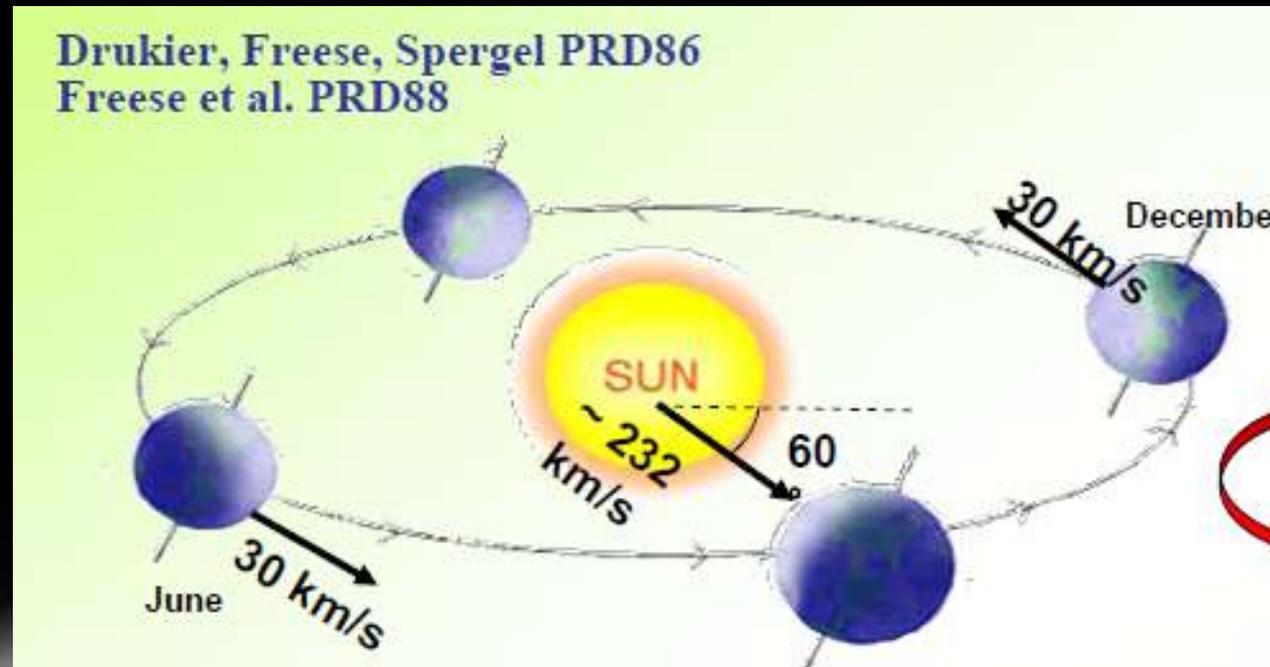


地球の体積の中にも
たった500g程度だが
宇宙のサイズになると
影響が大変大きい(サイエンスゼロ)

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

もう一つの特徴： 暗黒物質の「風」と季節変動

- 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。
- 反跳原子核に方向性有、衝突する頻度が変化



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)

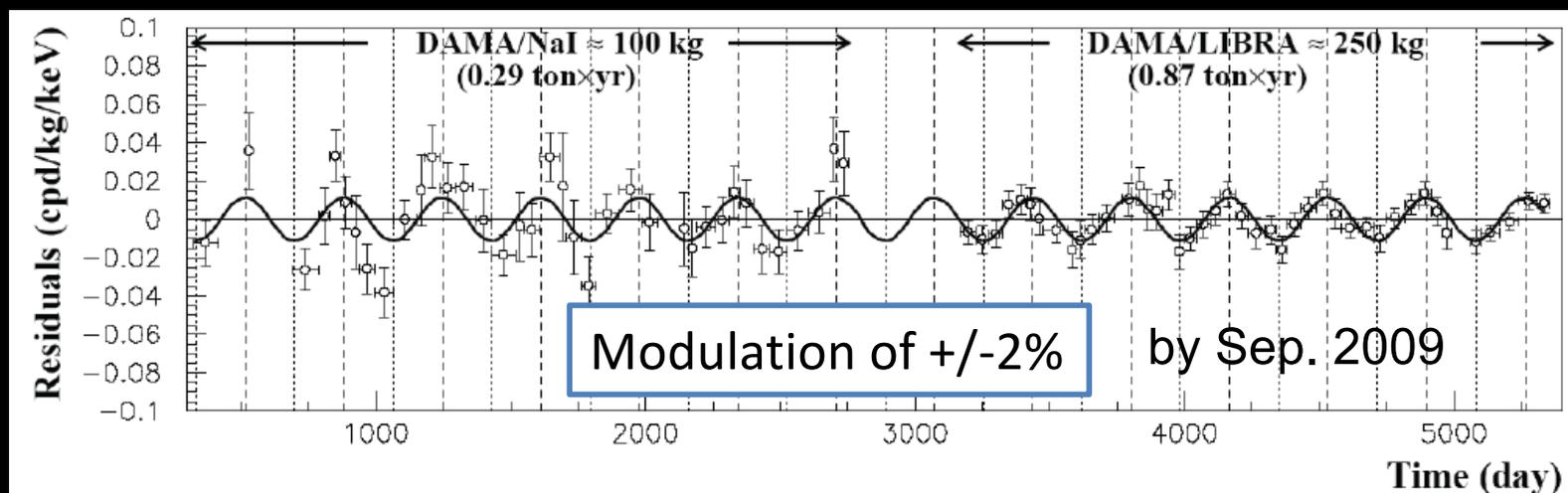


Residual contaminations in the new DAMA/LIBRA NaI (Tl) detectors: ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K at level of 10^{-12} g/g

- 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

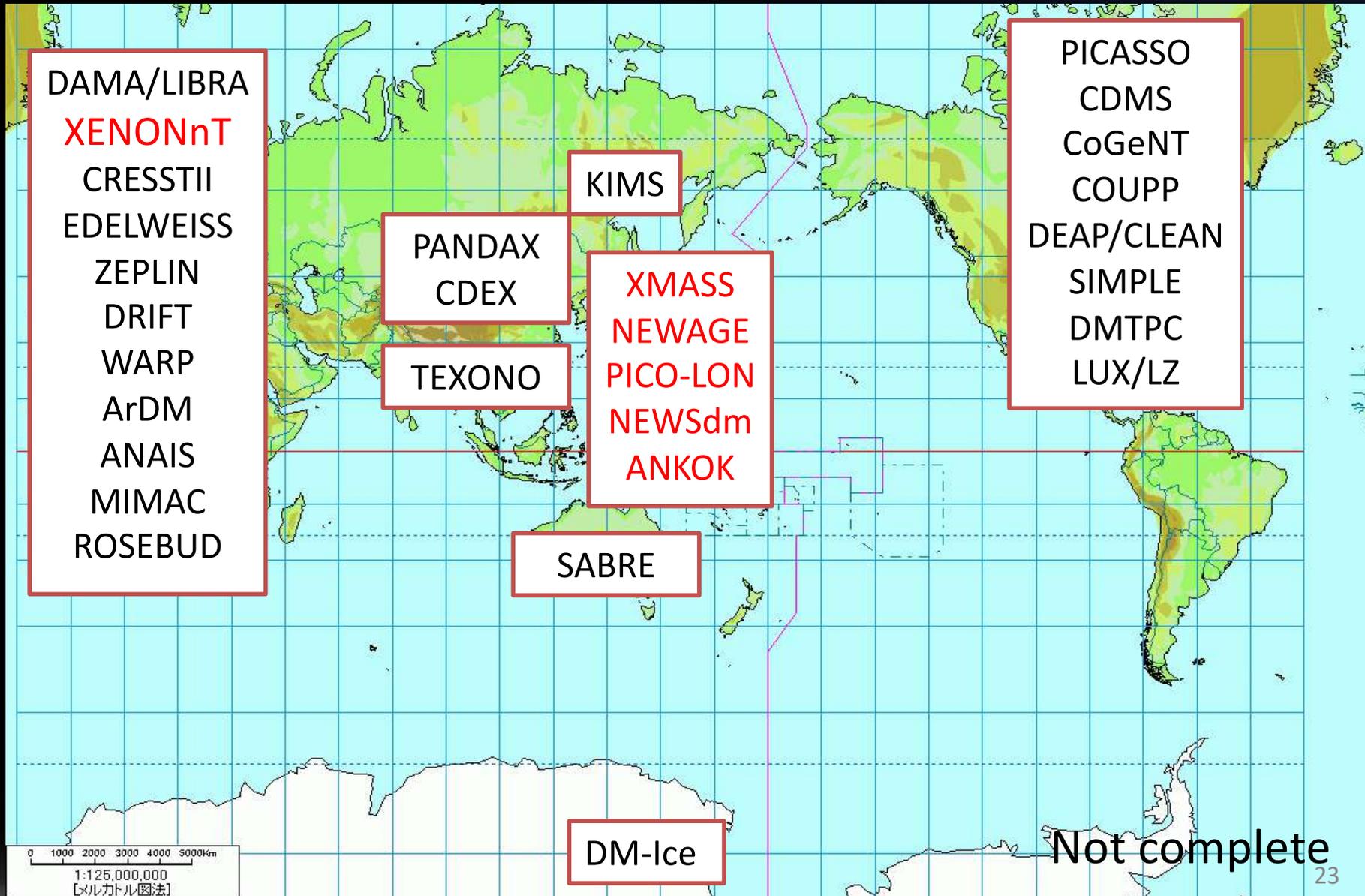
季節変動の信号：暗黒物質由来？！

- 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



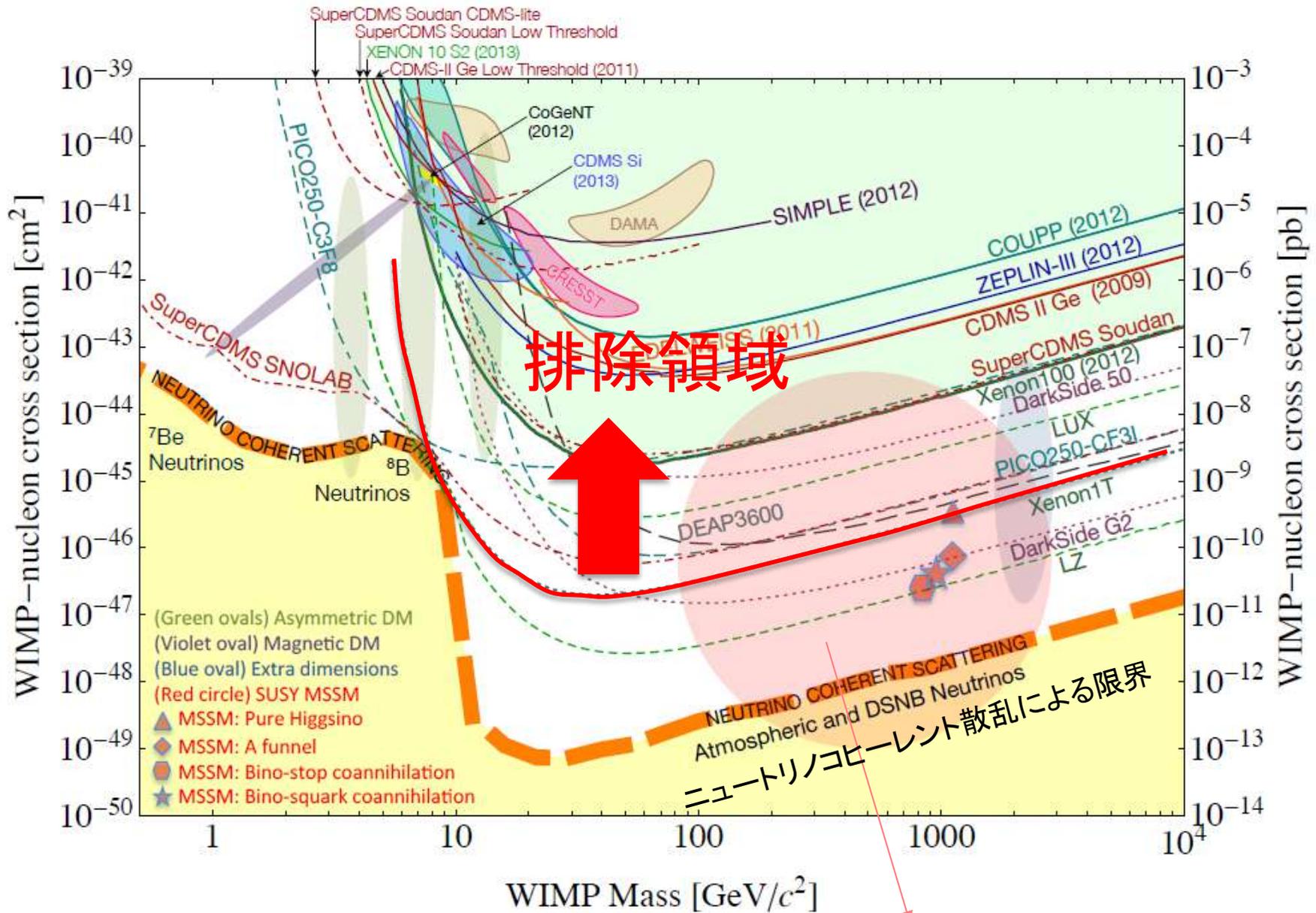
- 最初は沢山批判もあったが真剣に検討を始めた (light DM, IDM, 単なる原子核反跳でない場合、.)
- **ただし現在のところ他の実験では振動はおろか衝突する事象もほとんどない。変わった粒子？**

世界中で30以上の実験！



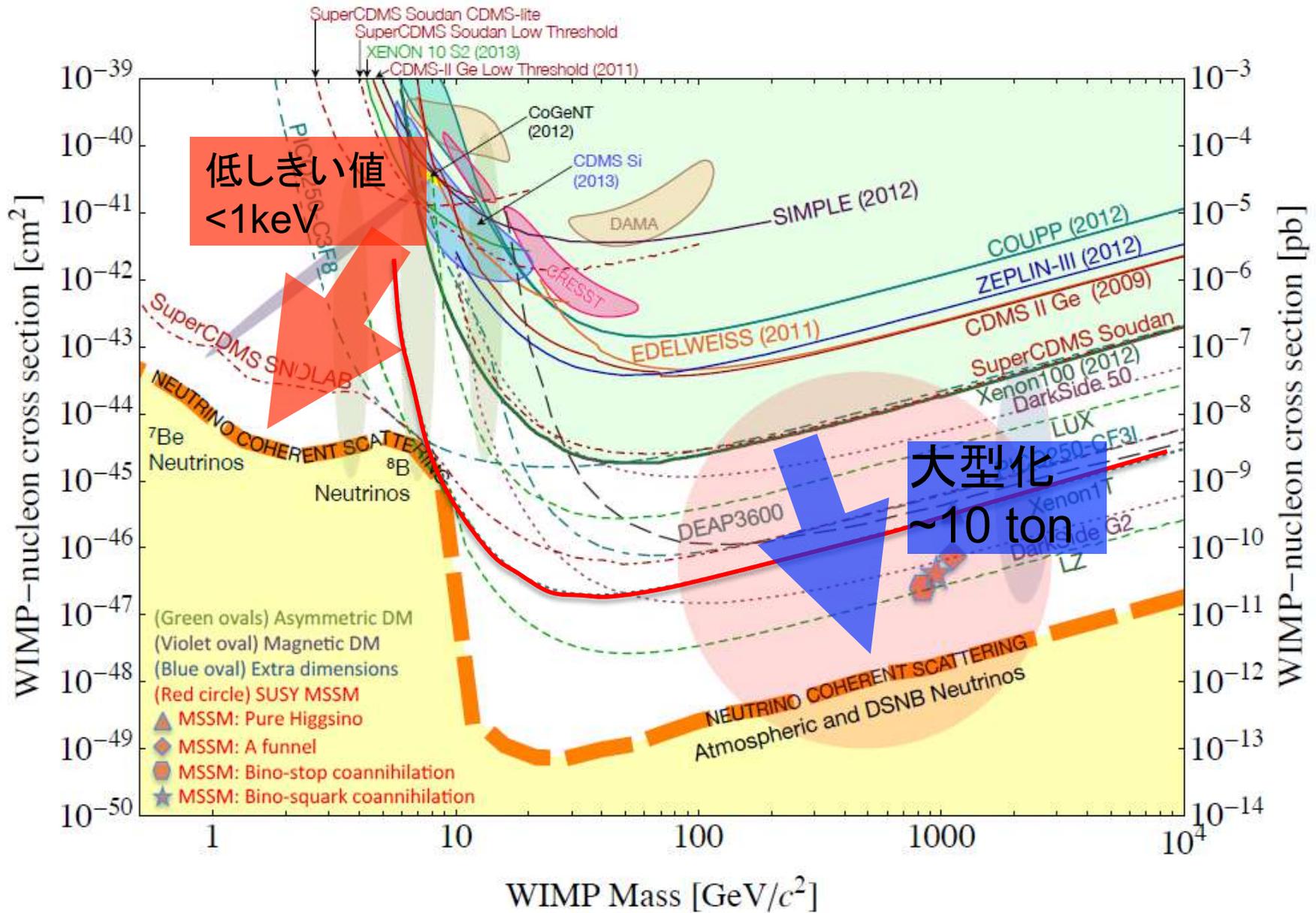
WIMPs、軽い粒子の探索状況

衝突頻度



将来の方向性

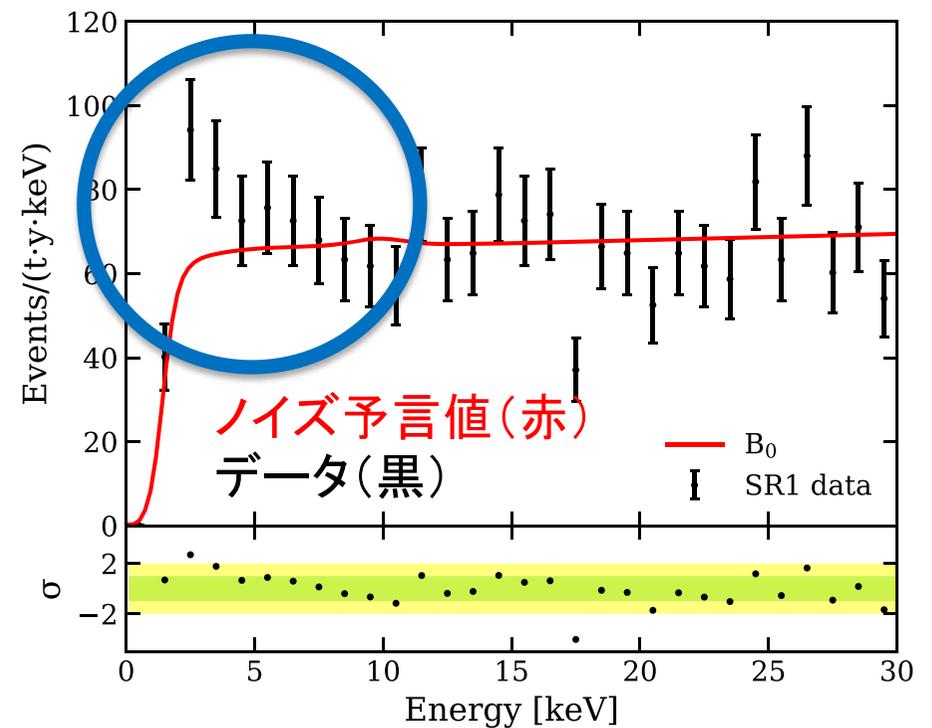
衝突頻度



質量

軽い未知粒子 発見か？

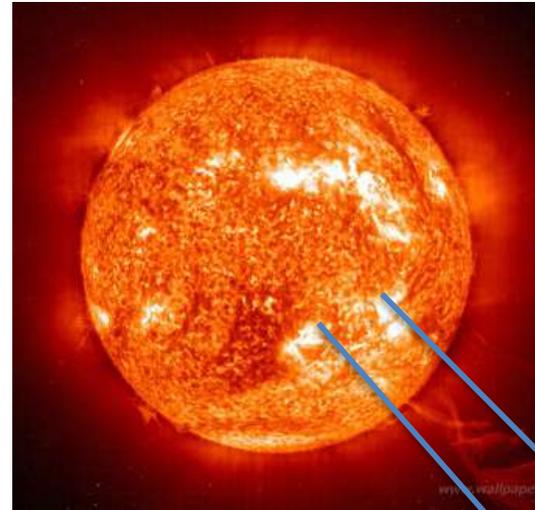
昨年の7月にXENON1Tのデータ



統計的には3.2シグマの有意度
新粒子の発見か？

何が原因か？

- **アクシオン**と呼ばれる未発見粒子が太陽から飛来しているものが吸収された？
- 太陽から飛来する**ニュートリノの未知の特性**のため電子が蹴飛ばされた？
- **軽いボゾン**でできた**暗黒物質**が検出器に吸収された？
- **トリチウム**と呼ばれる放射性不純物のため？



アクシオン
が飛んできている？

単なる**不純物**？

太陽からの
ニュートリノが
知られていない
衝突方法を起こした？

ボゾン暗黒物質
の発見？



後述のより大型のXENONnT実験で決着をつけたい

国内外で行われている実験

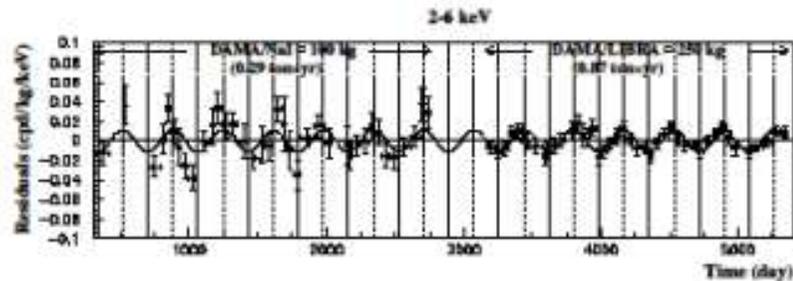
- 研究開発
 - 徳島大: PICOLON
 - 名古屋大: NEWSdm
 - 早稲田大: ANKOK
 - 東京大学: 結晶の異方性
 - 福井大、京都大、東北大、岡山大等も研究開発中
- 小型装置で実験中
 - 神戸大: NEWAGE
- 大型装置のデータ解析中
 - 東京大他: XMASS
- 超大型・世界最高感度で実験予定
 - 東京大・名古屋大・神戸大: XENONnT実験に参加

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.

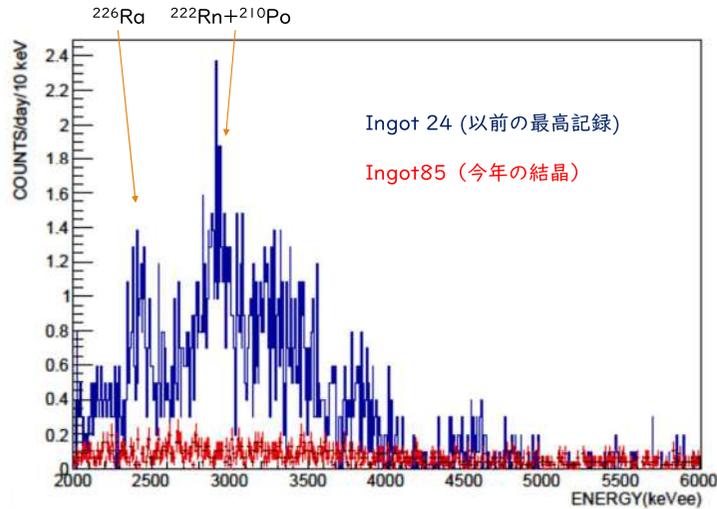


- DAMA/LIBRA R.Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2648 : 250 kg NaI(Tl)
- 他のグループによる検証ができていない。



高純度化成功！

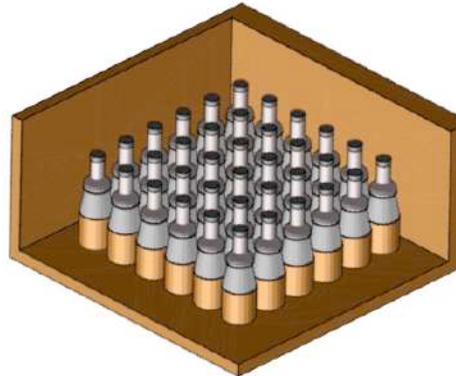
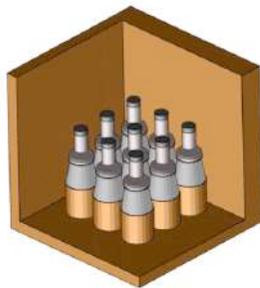
Ingot24
 ^{226}Ra 100 $\mu\text{Bq/kg}$
 ^{210}Pb 50 $\mu\text{Bq/kg}$



SCALE UP

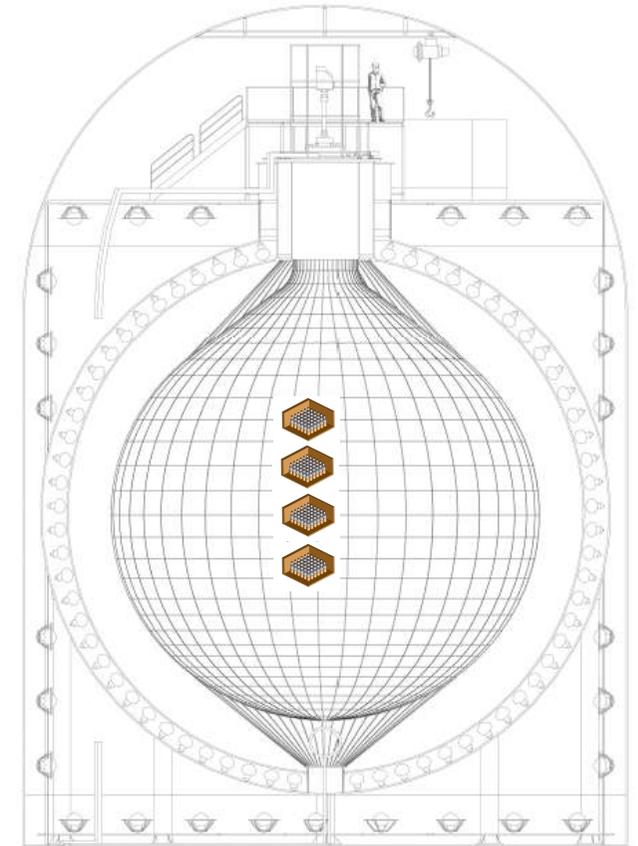
247 kg NaI(Tl)
~2021
基盤(S)

54 kg NaI(Tl)
2019-2022
基盤(A)

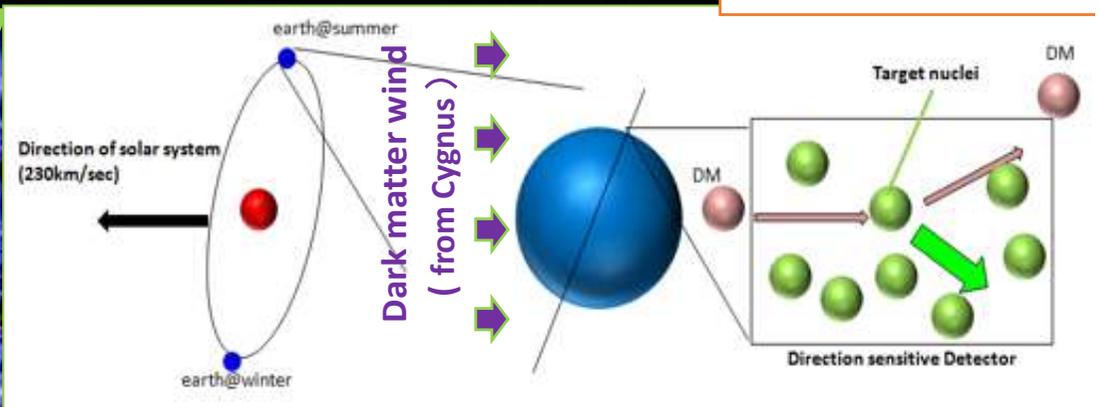
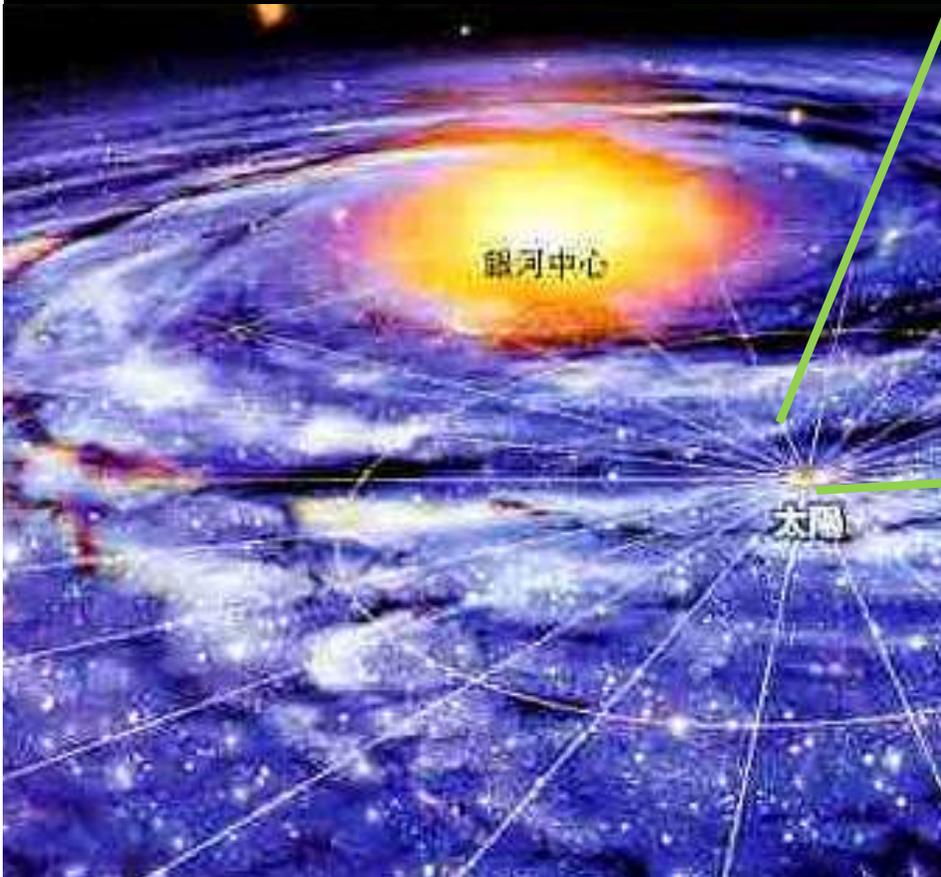


DAMA/LIBRAを黙らせるにはこの質量

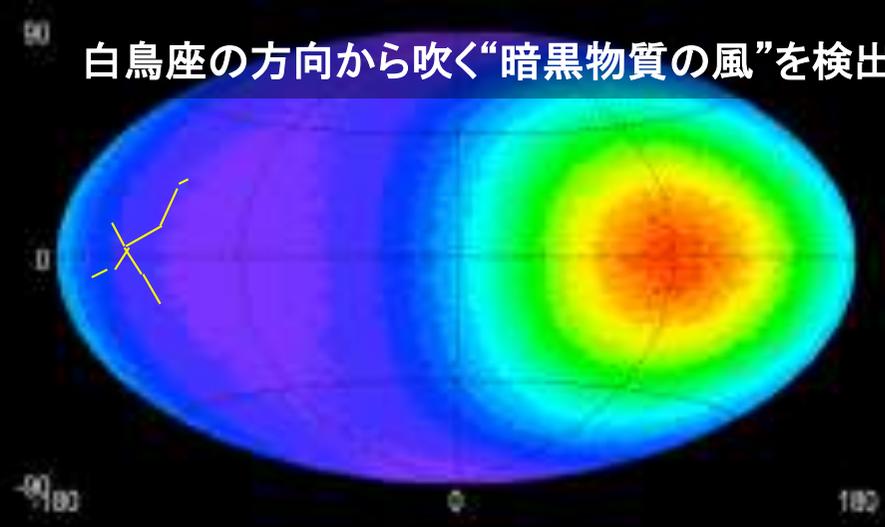
KamLAND-PICO
1000 kg NaI(Tl)
~2025 特別推進



名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生



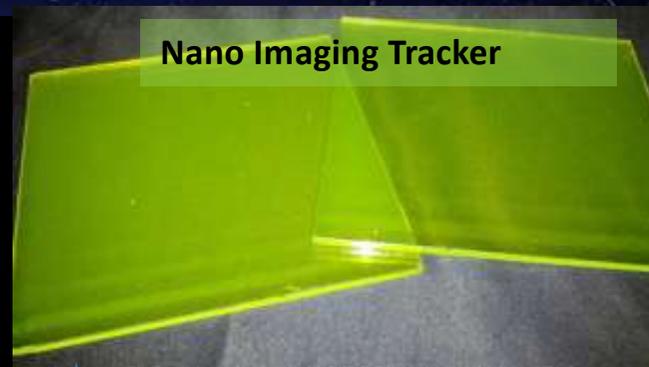
白鳥座の方向から吹く“暗黒物質の風”を検出



名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生



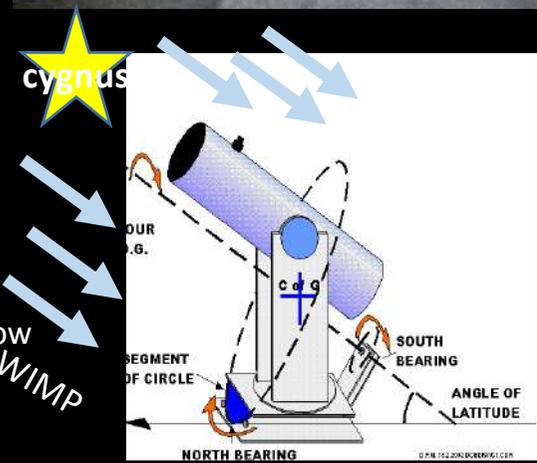
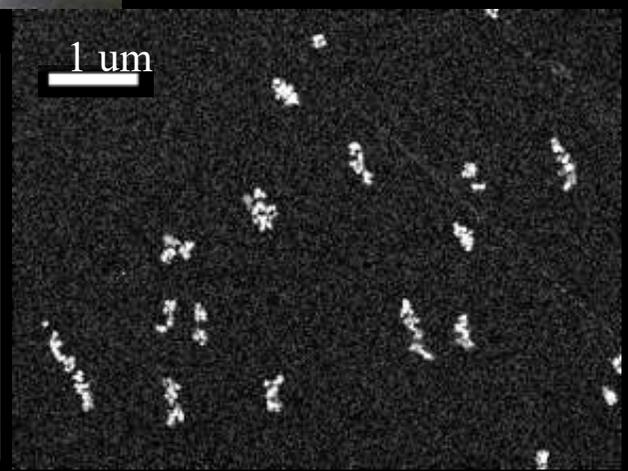
**Nuclear Emulsions for WIMP Search -
directional measurement**



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)

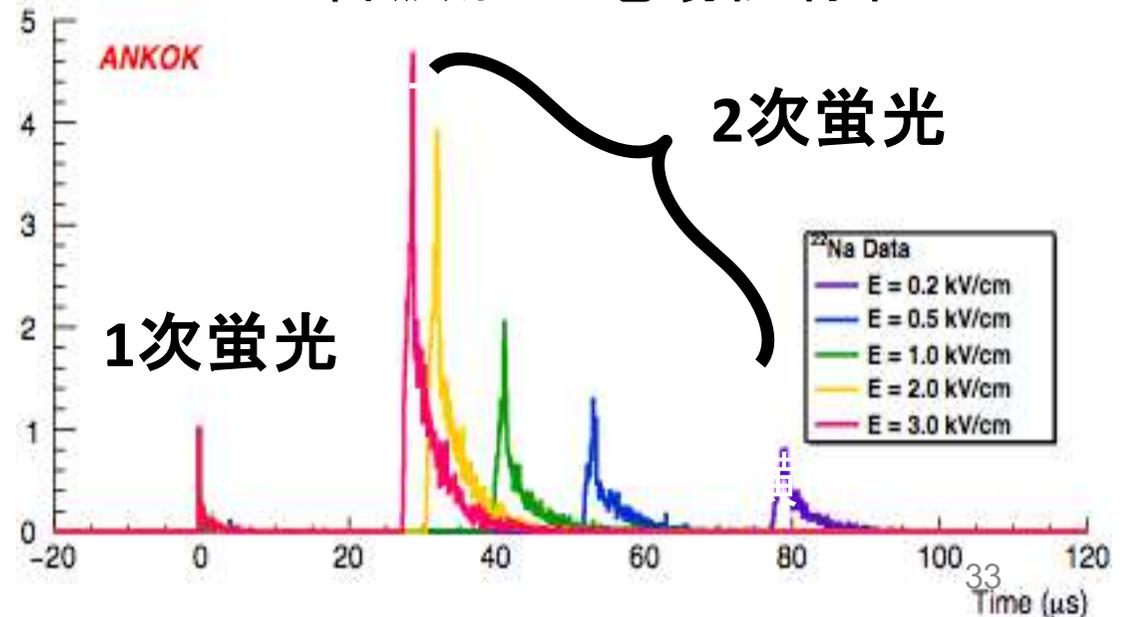
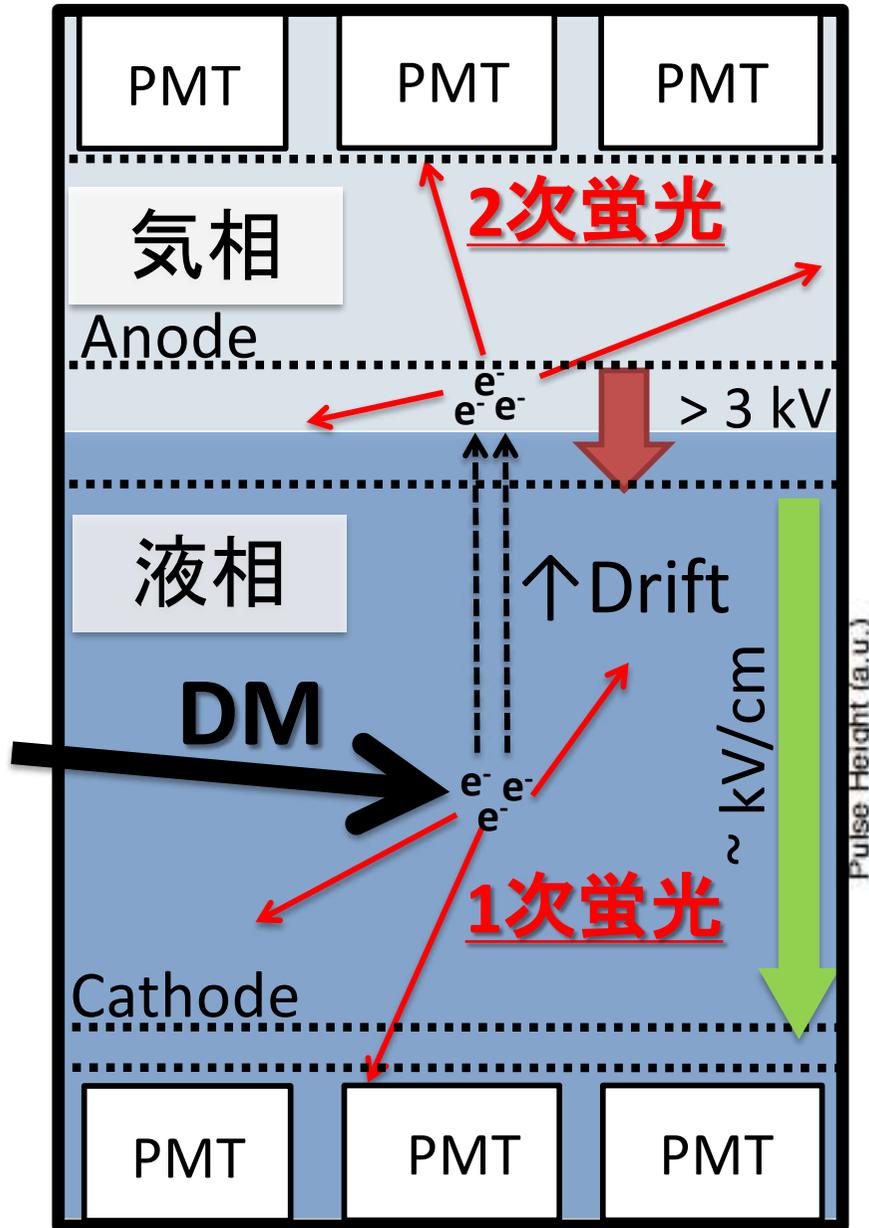
◆ アルゴン気・液2相型 → 蛍光と電離電子の両方検出

◆ 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○

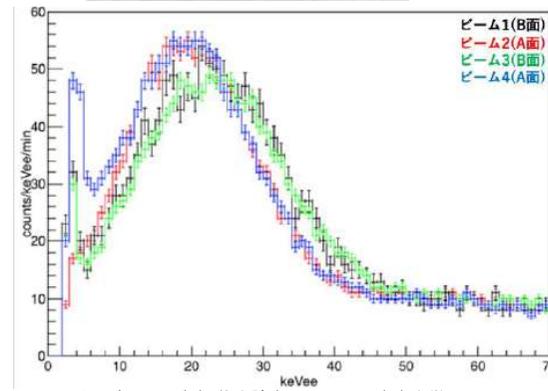
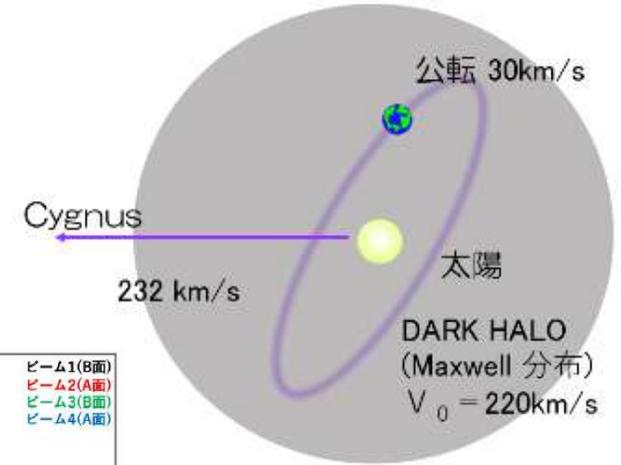
強力な事象識別能力(γ 線 vs DM信号)

★ 応答波形の電場依存性



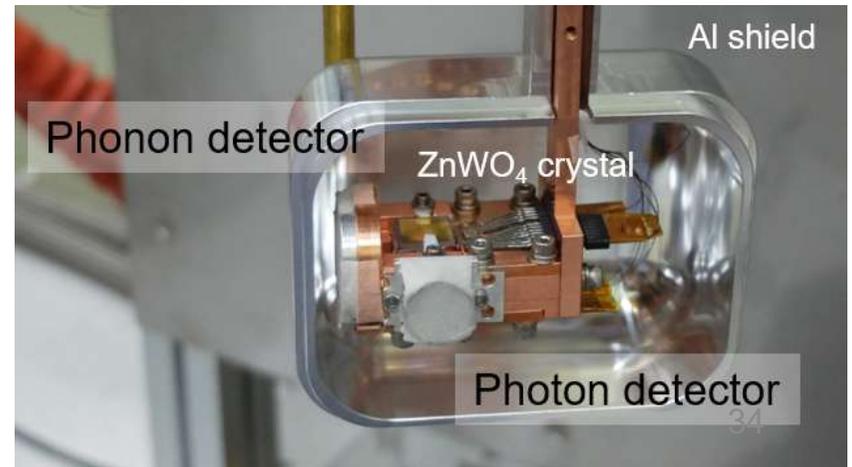
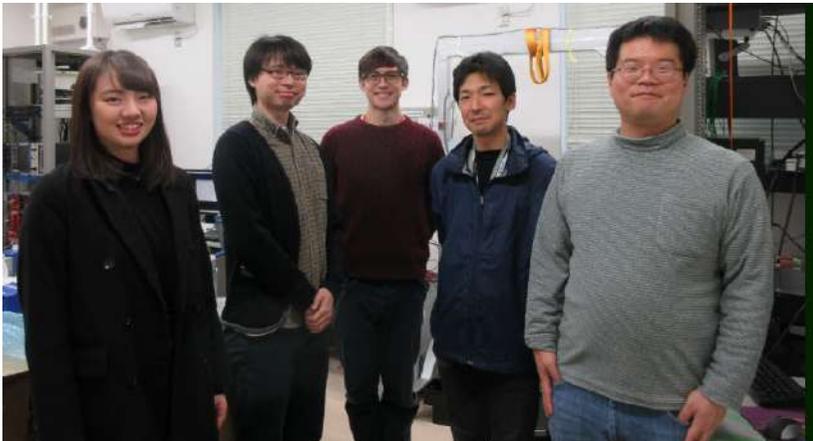
新たなアイデアの検出器開発

1. フランス Saclay名古屋大と共同開発



方向によって
発光量の異なる
結晶の研究

2. 韓国IBS、東北大、山形大と共同開発



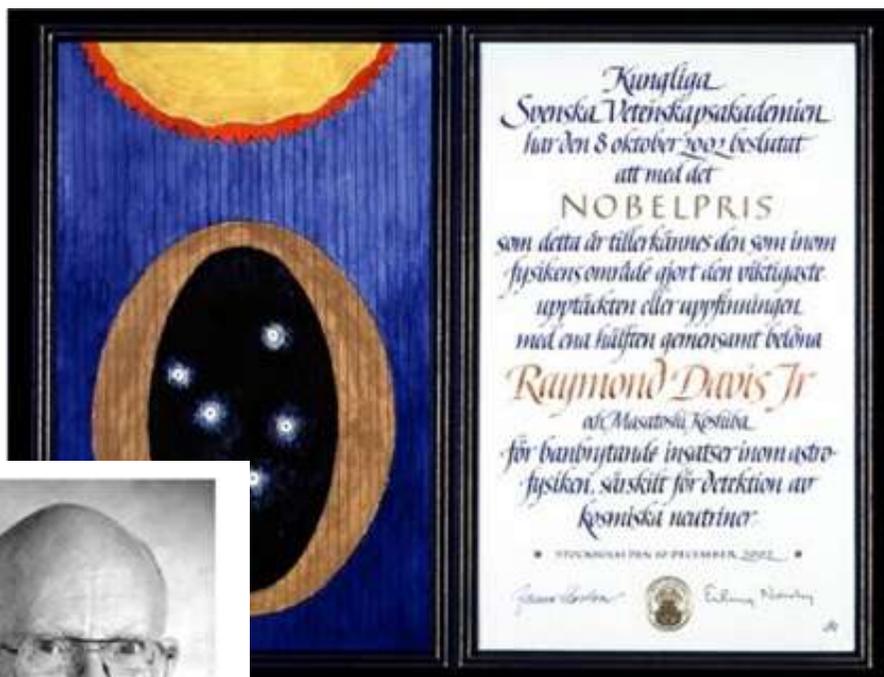
NEWAGE実験

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 Koshiba
Prize share: 3/4

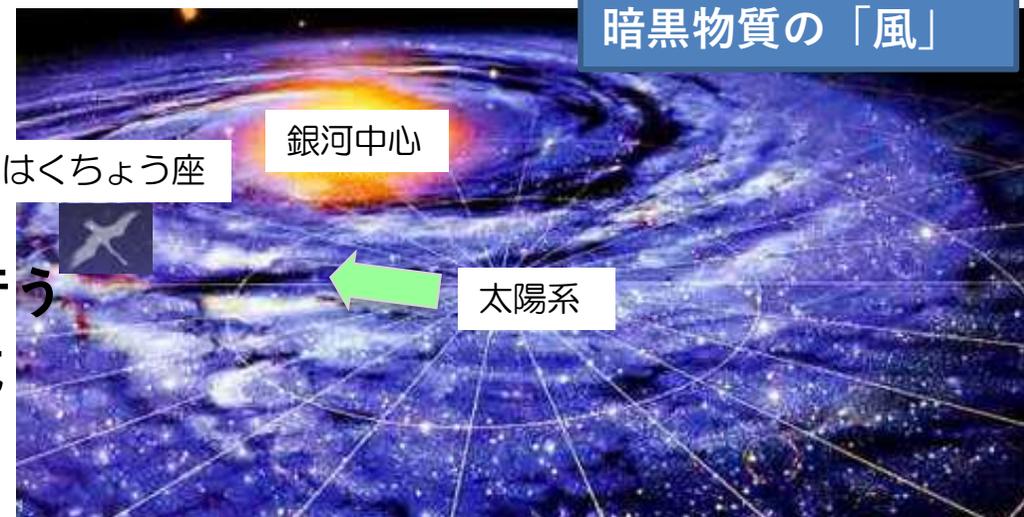
NEWAGE実験 (概要)

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

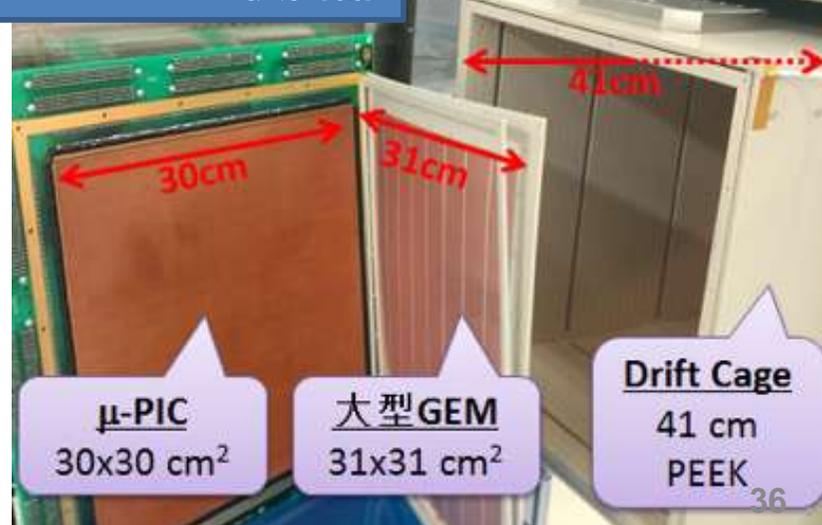
太陽系に吹き付ける
暗黒物質の「風」



- 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
 - ガンマ線遮蔽を行い感度向上
 - 海外の研究グループと共同研究

NEWAGE-0.3b検出器



東京大学他: XMASS実験(神岡)

東京大森山 他

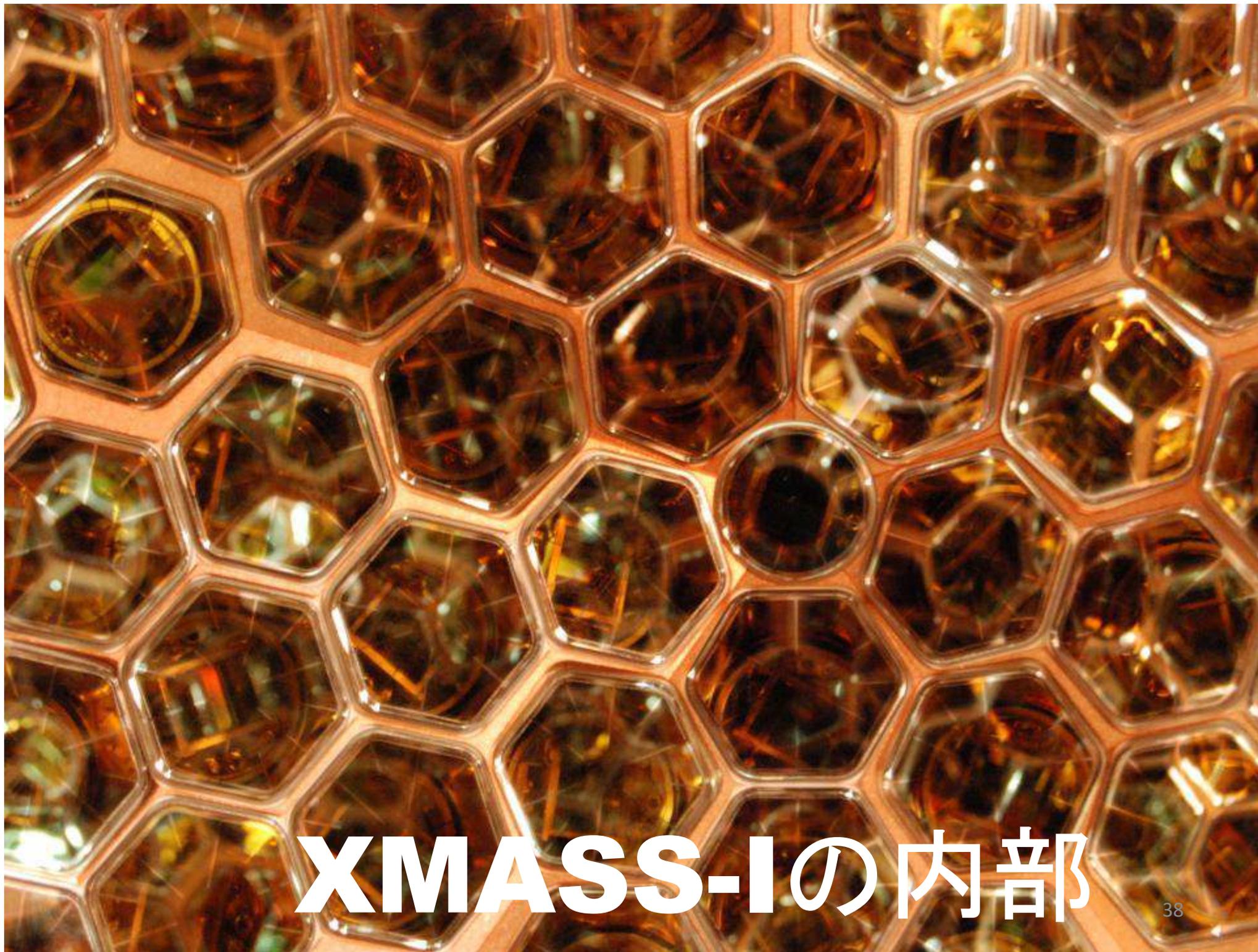
1トンの液体キセノン

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。

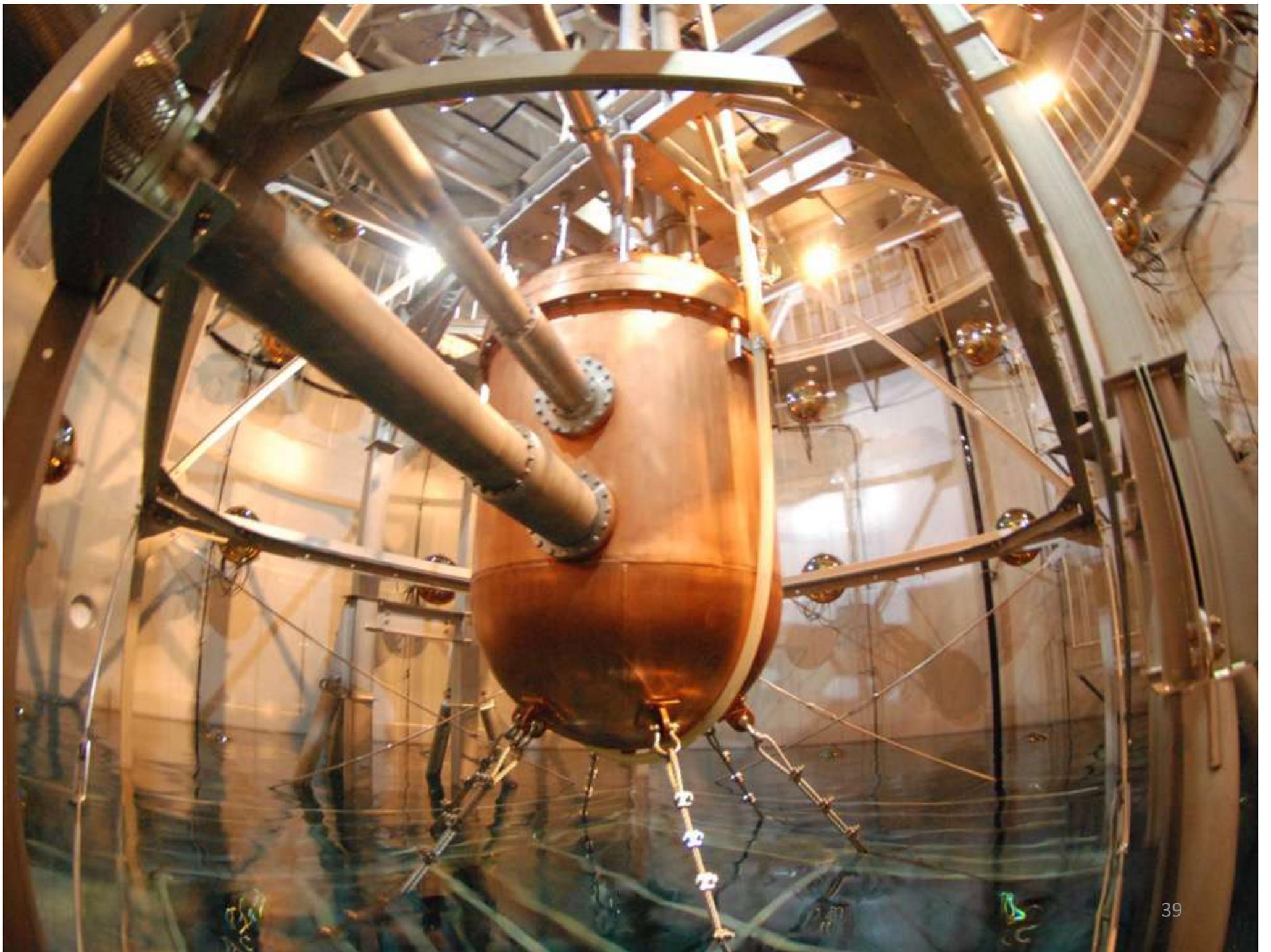
多数の光電子増倍管によって蛍光を捕らえる。

直径80cm

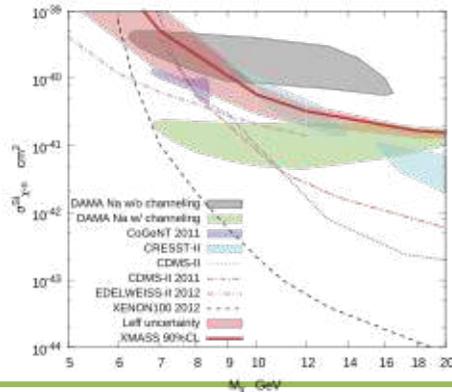




XMASS-Iの内部



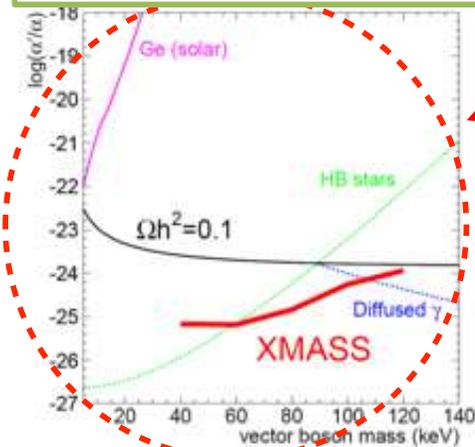
XMASS-I: 暗黒物質等の探索結果



軽い暗黒物質の探索

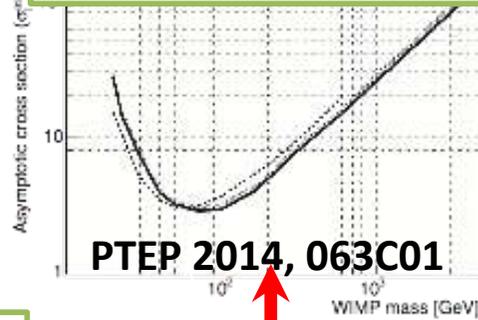
Phys. Lett. B 719 (2013) 78

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

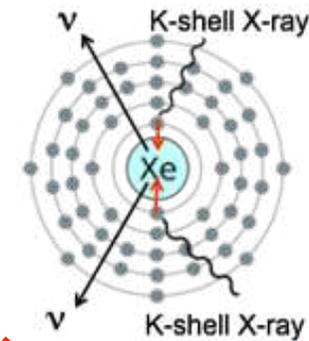


太陽アクシオン



Phys. Lett. B 724 (2013) 46

二重電子捕獲現象の探索



Phys. Lett. B 759 (2016) 64



季節変動の探索

Phys. Lett. B 759 (2016) 272

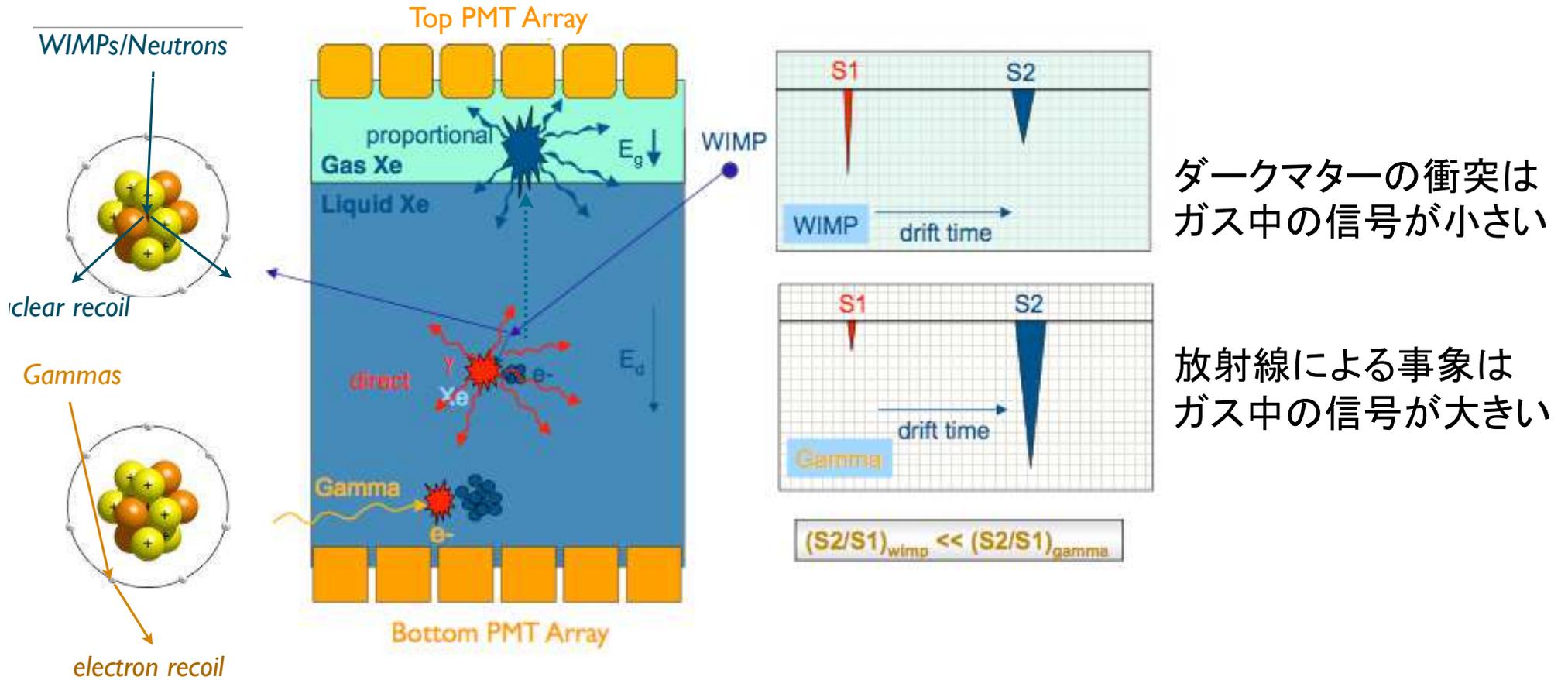


- 当初予定したものより広い種類の暗黒物質を探索
- 貴重なデータの中に新たな信号を探索中

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



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

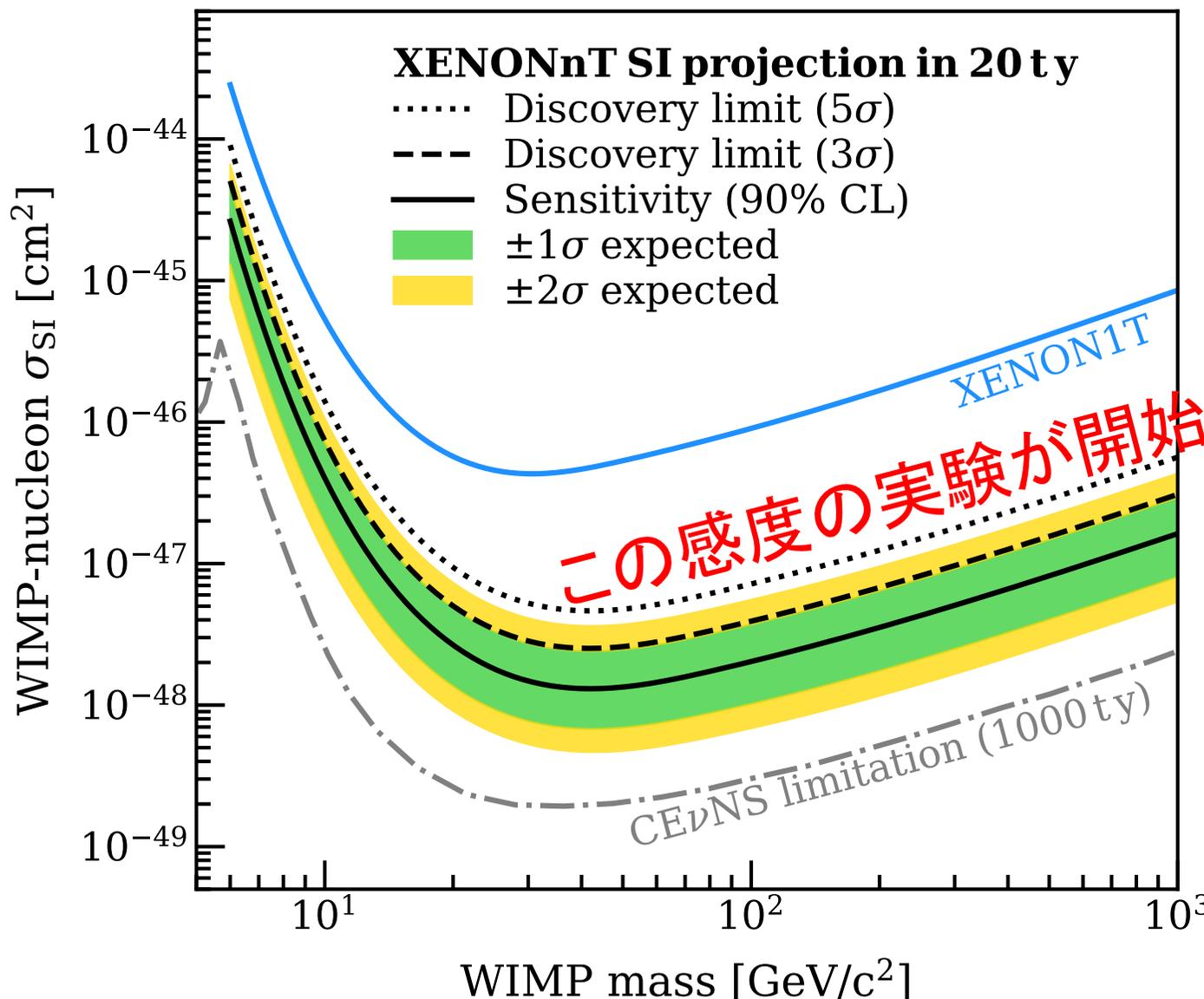
XENON実験@イタリア

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



XENON



これから5年間で
発見もしくは
信号の兆候を
捉えたい

緑バンド:
実現できそうな感度
黄バンド:
運が悪いときや
良い時の感度



THE UNIVERSITY OF CHICAGO
Chicago

UC San Diego
UCSD



Rice

P PURDUE UNIVERSITY
Purdue

Subatech
Subatech

Coimbra

LPNHE
LPNHE

INFN
Torino

Bologna

L'Aquila

INFN
LNGS

Napoli

Weizmann

清华大学
Tsinghua

東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO
Tokyo

NAGOYA UNIVERSITY
Nagoya

KOBE
Kobe

NYU ABU DHABI
NYUAD

XENONnT
建設へ向けて
2017から参加

~160 scientists, from 28 institutions

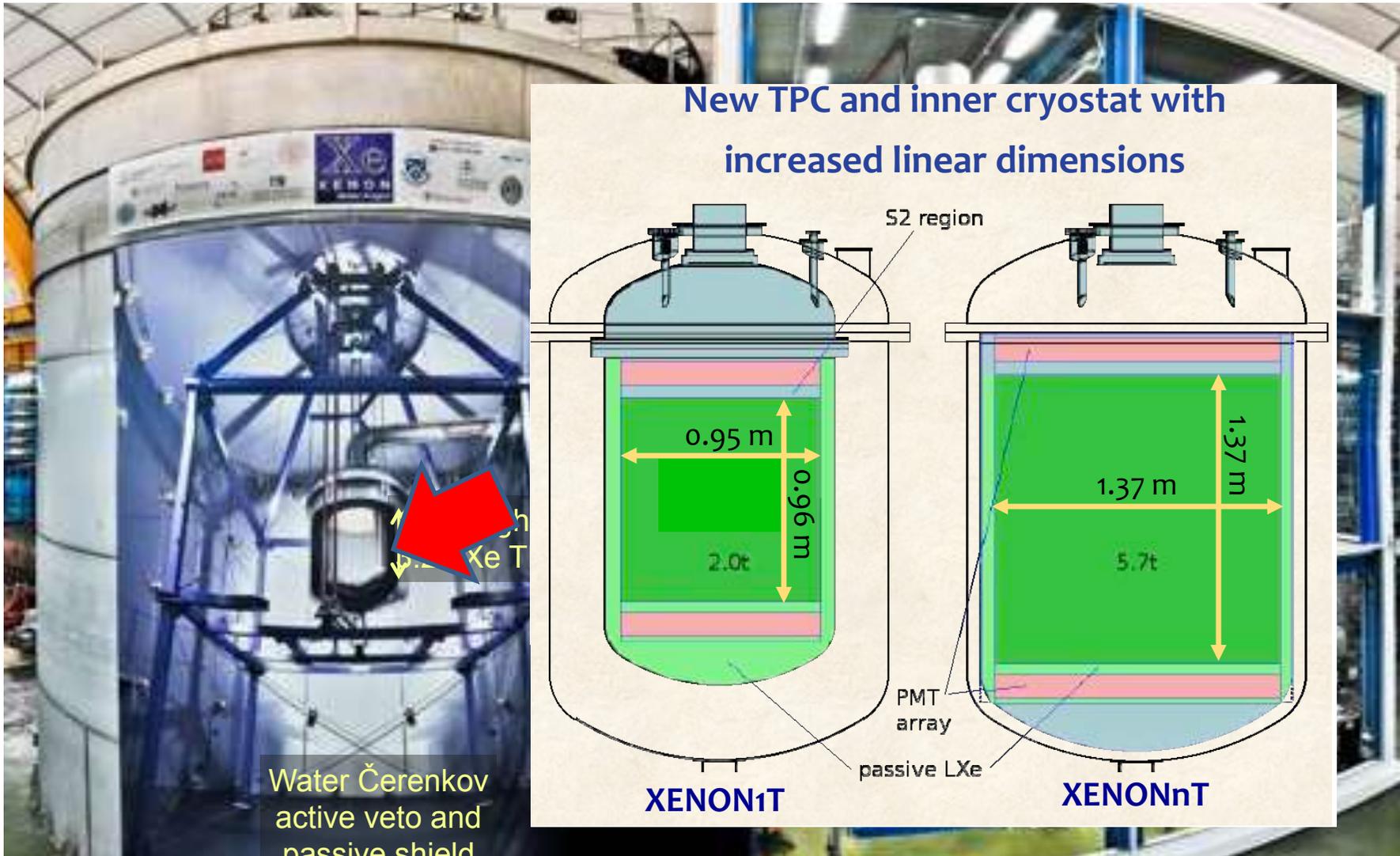
日本から18名(学生は東大から2名、名古屋4名、神戸2名参加)⁴³

実験場所：イタリア グランサッソ研究所



迅速なupgradeの理由

- 検出器本体部分だけ拡張。周辺機器はそのまま使える。**XENON1TからXENONnTへ大型化**



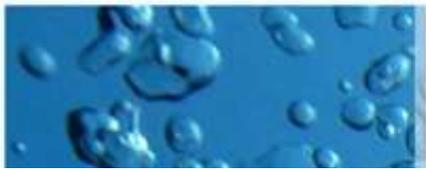
世界の国々の研究者、学生、
男性女性多種多様な研究者
とともに研究を進める



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)
 - コミッショニング中(試験データ収集)
- LZ実験(アメリカ)
- PANDA-X実験(中国)

沢山の人々が発見を期待している。
国際的な活躍の場。



まとめ

- 暗黒物質の存在は確実。「正体」を知りたい。
- 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。
- 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を行う。
- 発見の現場で是非一緒に研究しましょう！

森山茂栄 moriyama@icrr.u-tokyo.ac.jp

カイ・マルテンス kai.martens@ipmu.ac.jp