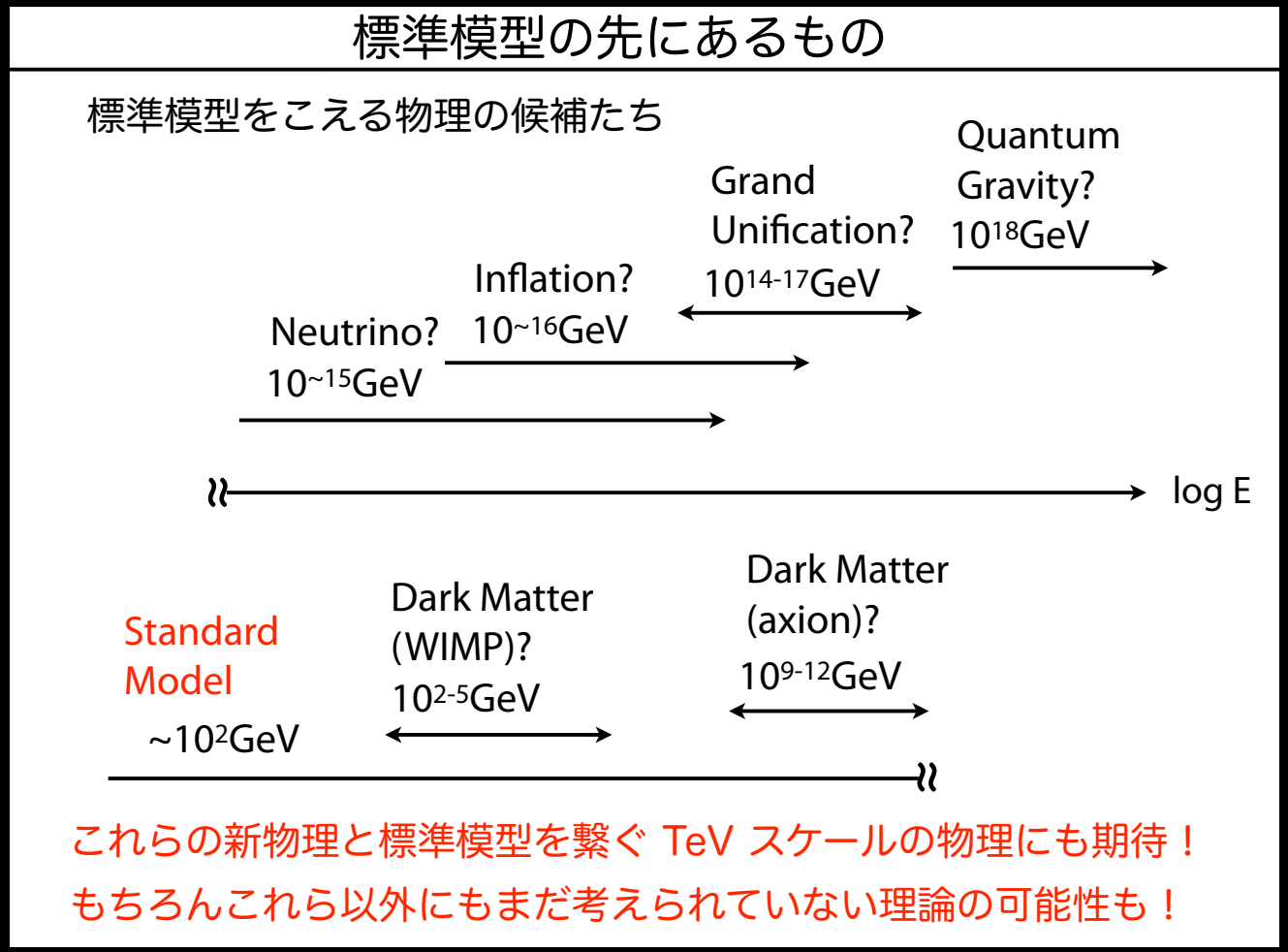
最先端研究 VI
暗黒物質

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

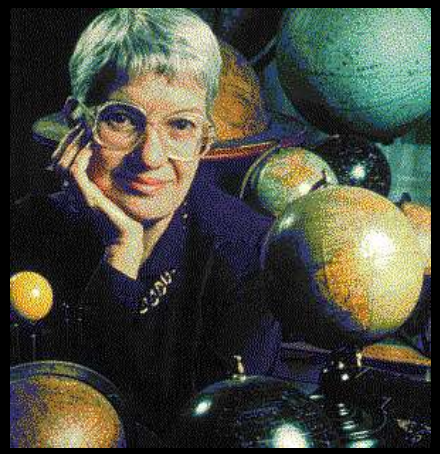
暗黒物質の理解は
素粒子の理解を
はるかに広げて
くれる「鍵」だろう。

暗黒物質研究の動機

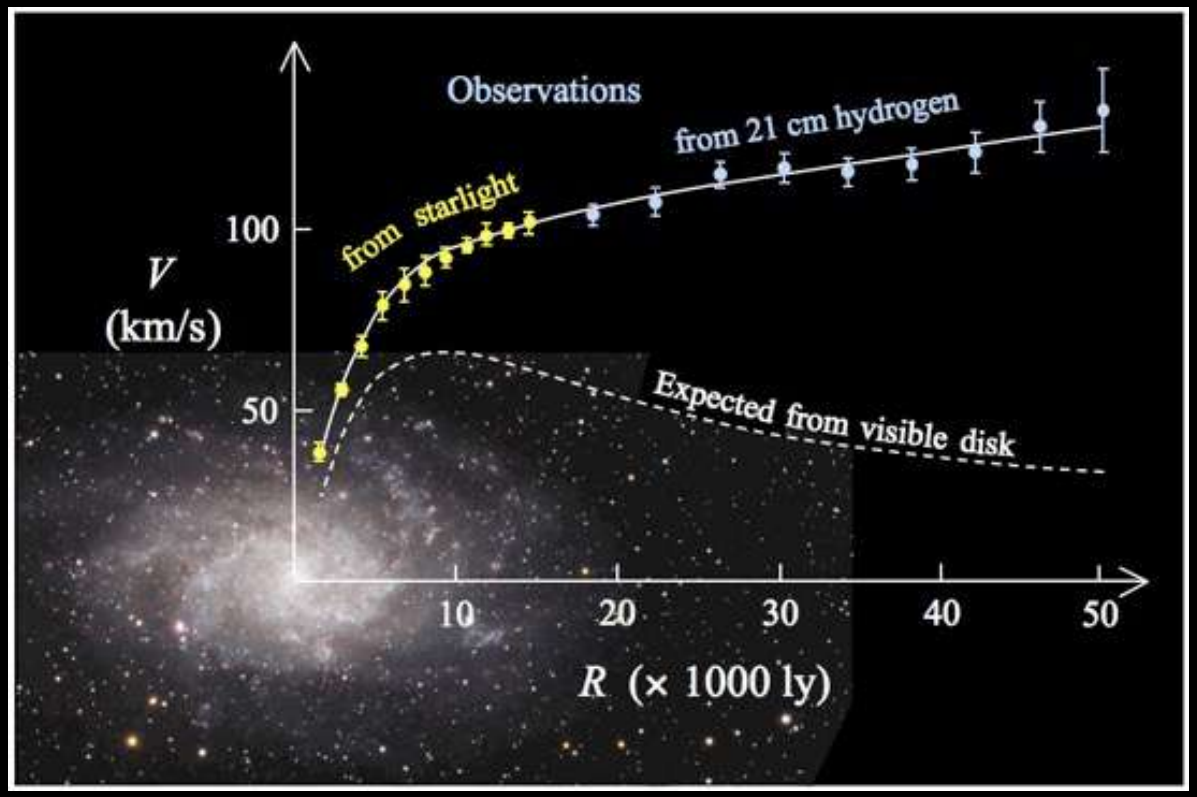
2. 宇宙の誕生と発展、運命を司る法則の理解
   - 暗黒物質は既に「発見」済
   - 但し「正体」不明
     - 暗い星、原始ブラックホール等、既知物質か
     - 未発見の素粒子か

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



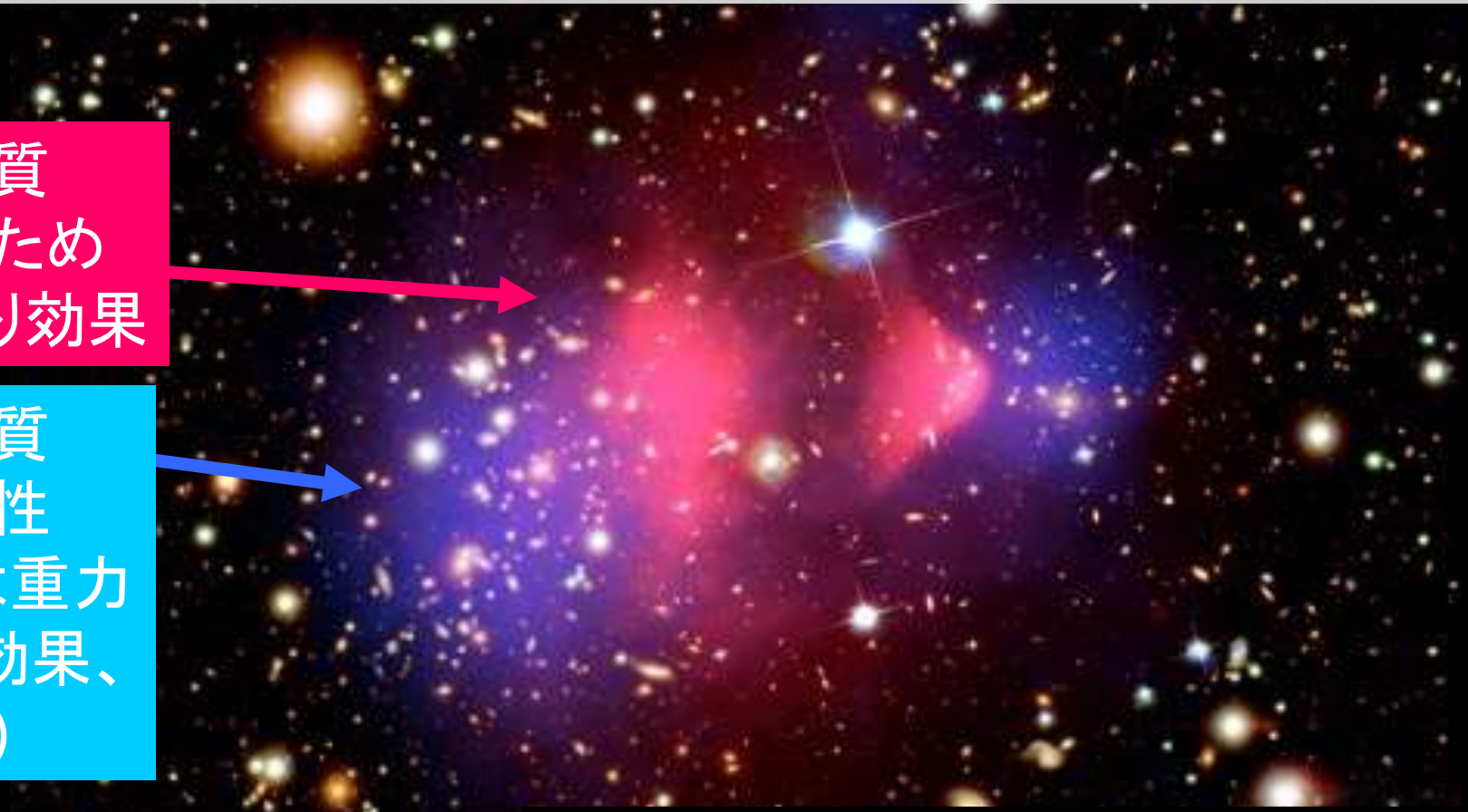
この方法で太陽系近傍に陽子1個分/3ccの密度で存在することが判明

- 衝突する銀河

The bullet cluster (弾丸銀河団) 衝突中

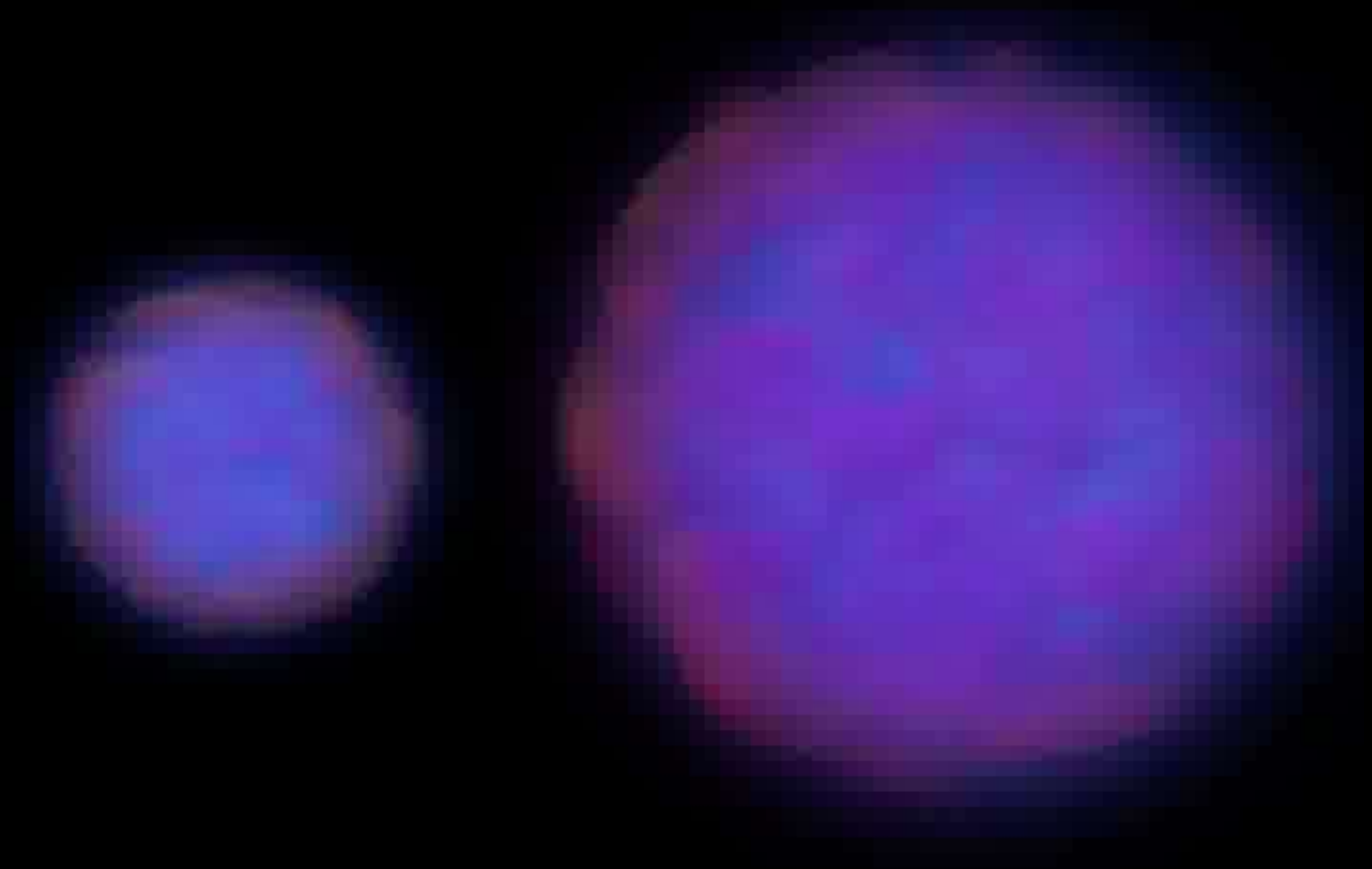
通常物質
摩擦のため
引き摺り効果

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.

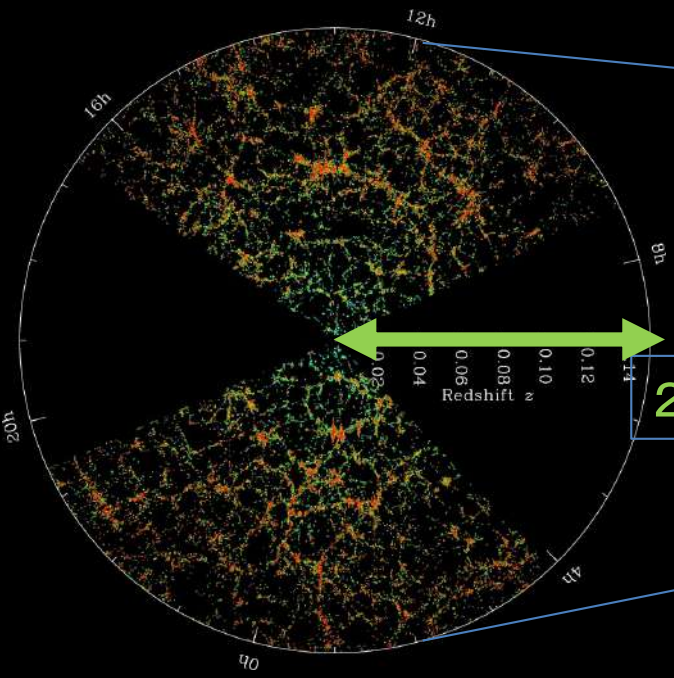
想像動画



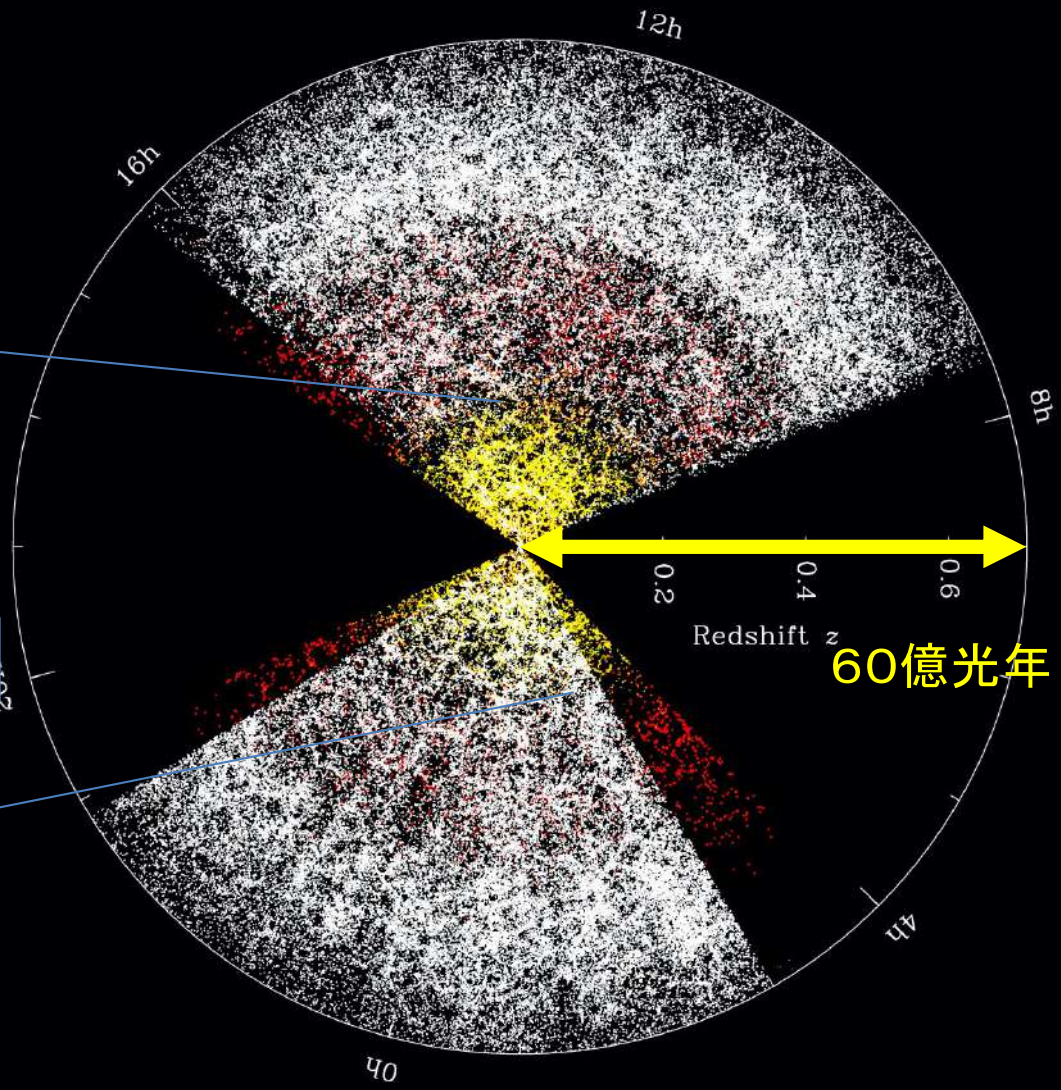
http://chandra.harvard.edu/resources/animations/galaxy_clusters.html

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



20億光年

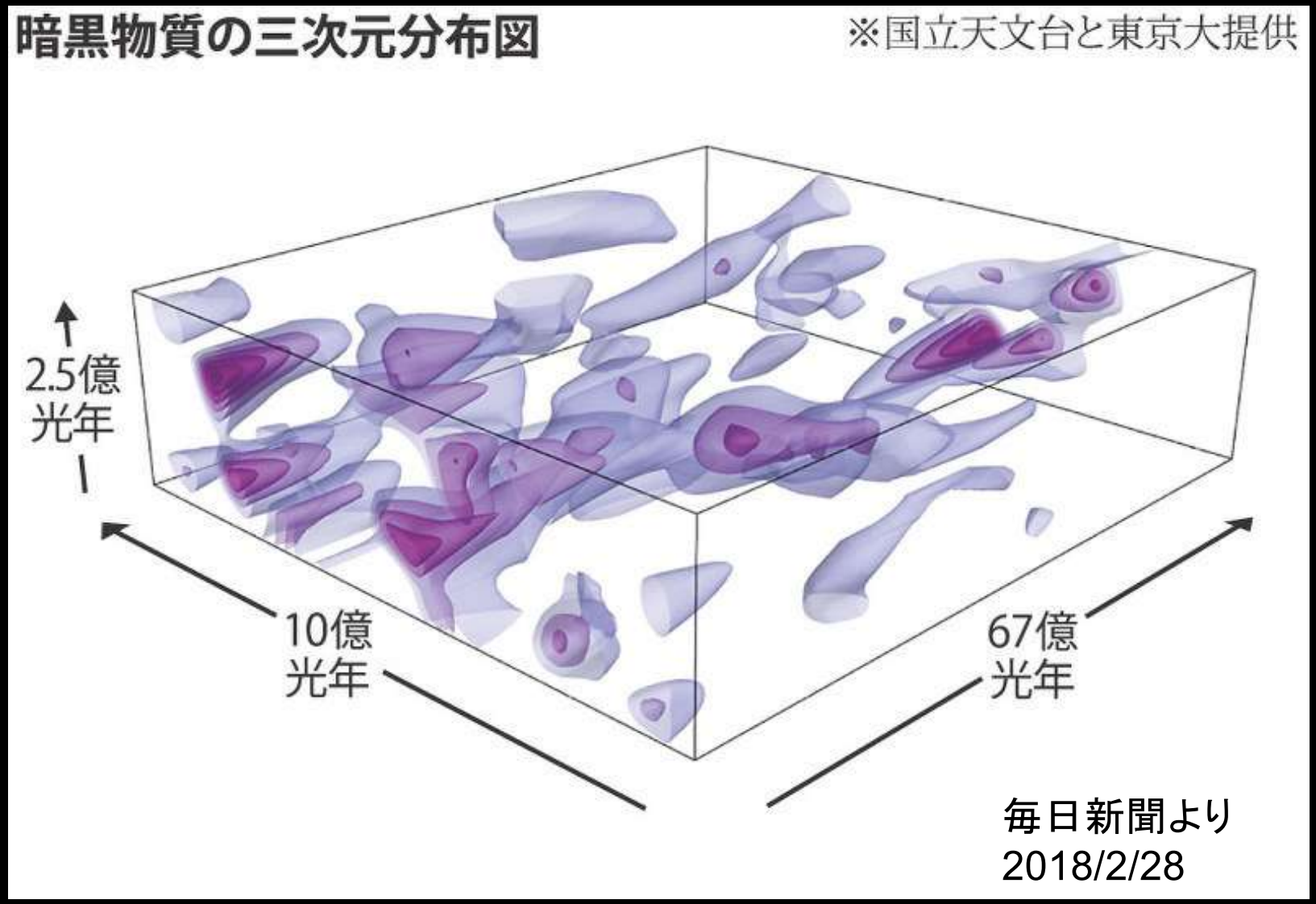


60億光年

http://www.sdss.org/science/#Cosmology

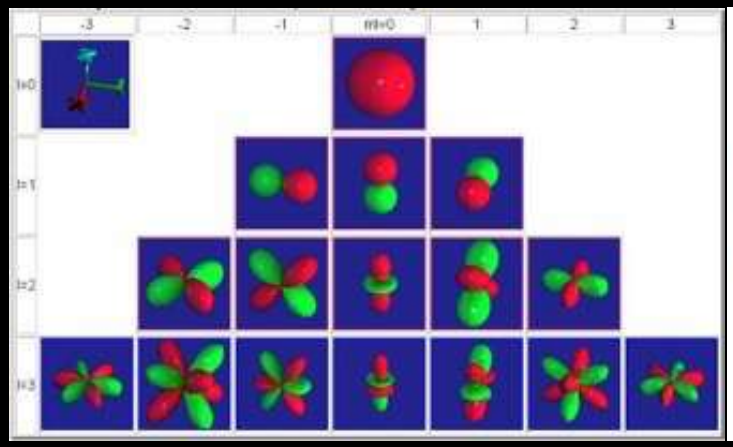
http://www.mpa-garching.mpg.de/131601/hl201506

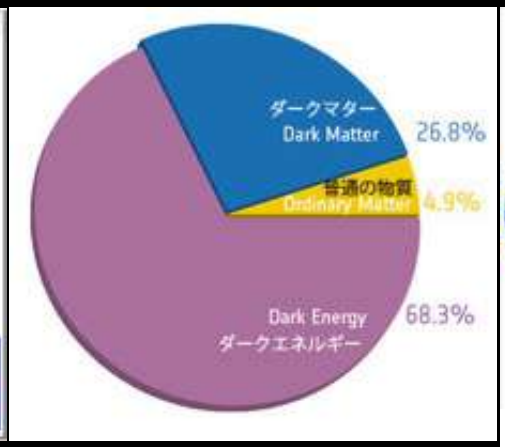
重力レンズ効果：宇宙論的深度での質量分布

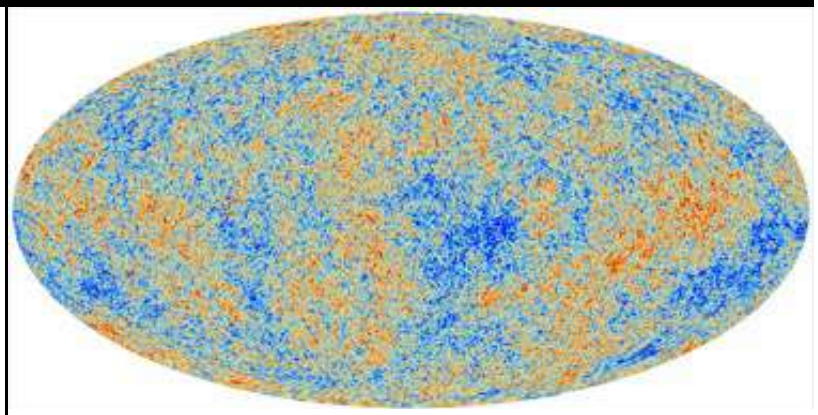


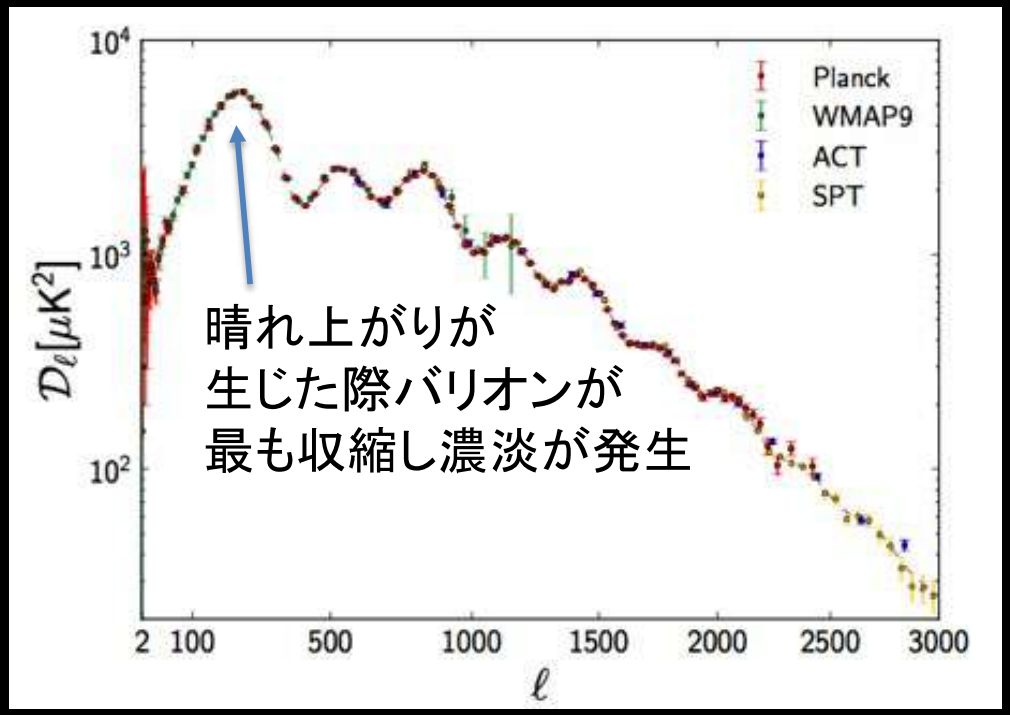
太陽の5千兆倍に及ぶ塊を65個観測、理論より2割少ない、との精度

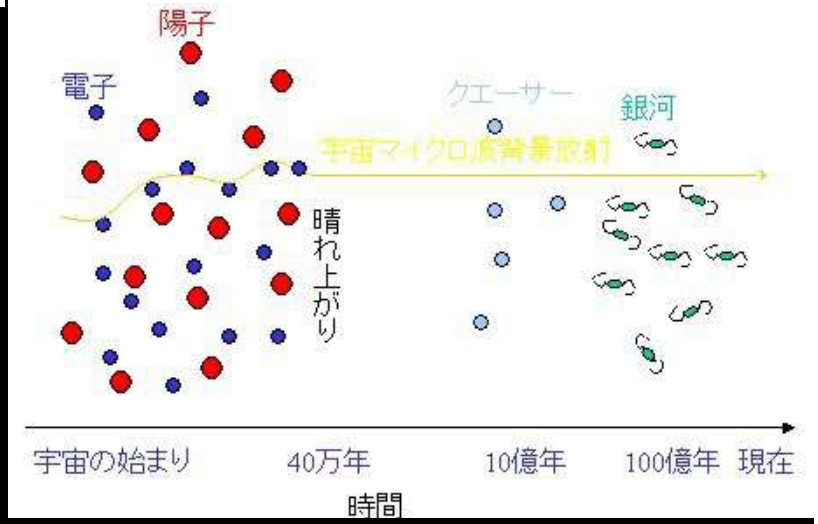
• 宇宙開闢時の電波の解析









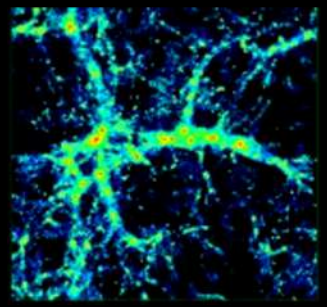


小規模 → 大規模

銀河の回転速度

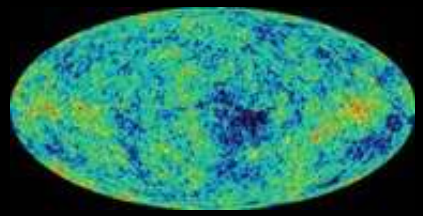
衝突する銀河

銀河大規模構造



暗黒物質地図

宇宙背景輻射

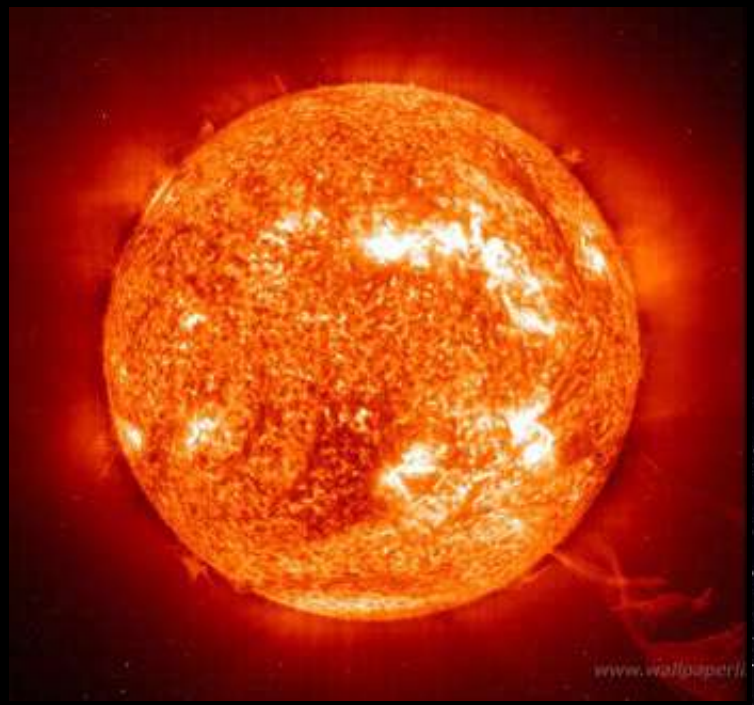


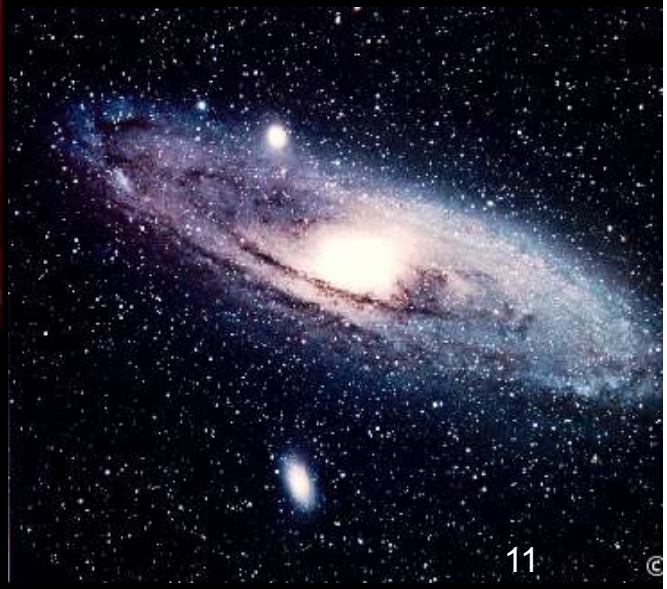
各スケールの未解決問題が
「たった一つの未知粒子」
の発見で一気に解決の可能性

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

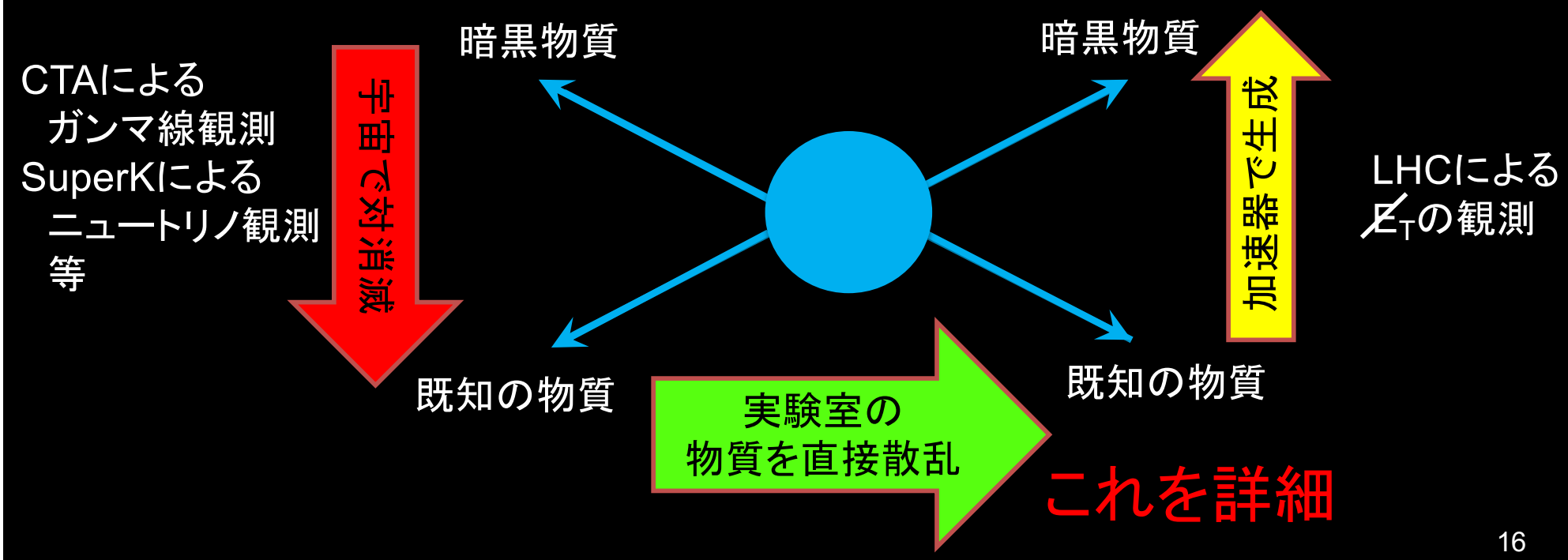
	SM particles	SUSY particles
Quark	u d c s t b	$\tilde{u}$ $\tilde{d}$ $\tilde{c}$ $\tilde{s}$ $\tilde{t}$ $\tilde{b}$
Lepton	e ν_e μ ν_μ τ ν_τ	$\tilde{e}$ $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\mu}$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_\tau$
Higgs	H^+ H^- H_1^0 H_2^0 A^0	$\tilde{H}^+$ $\tilde{H}^-$ $\tilde{H}_1^0$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

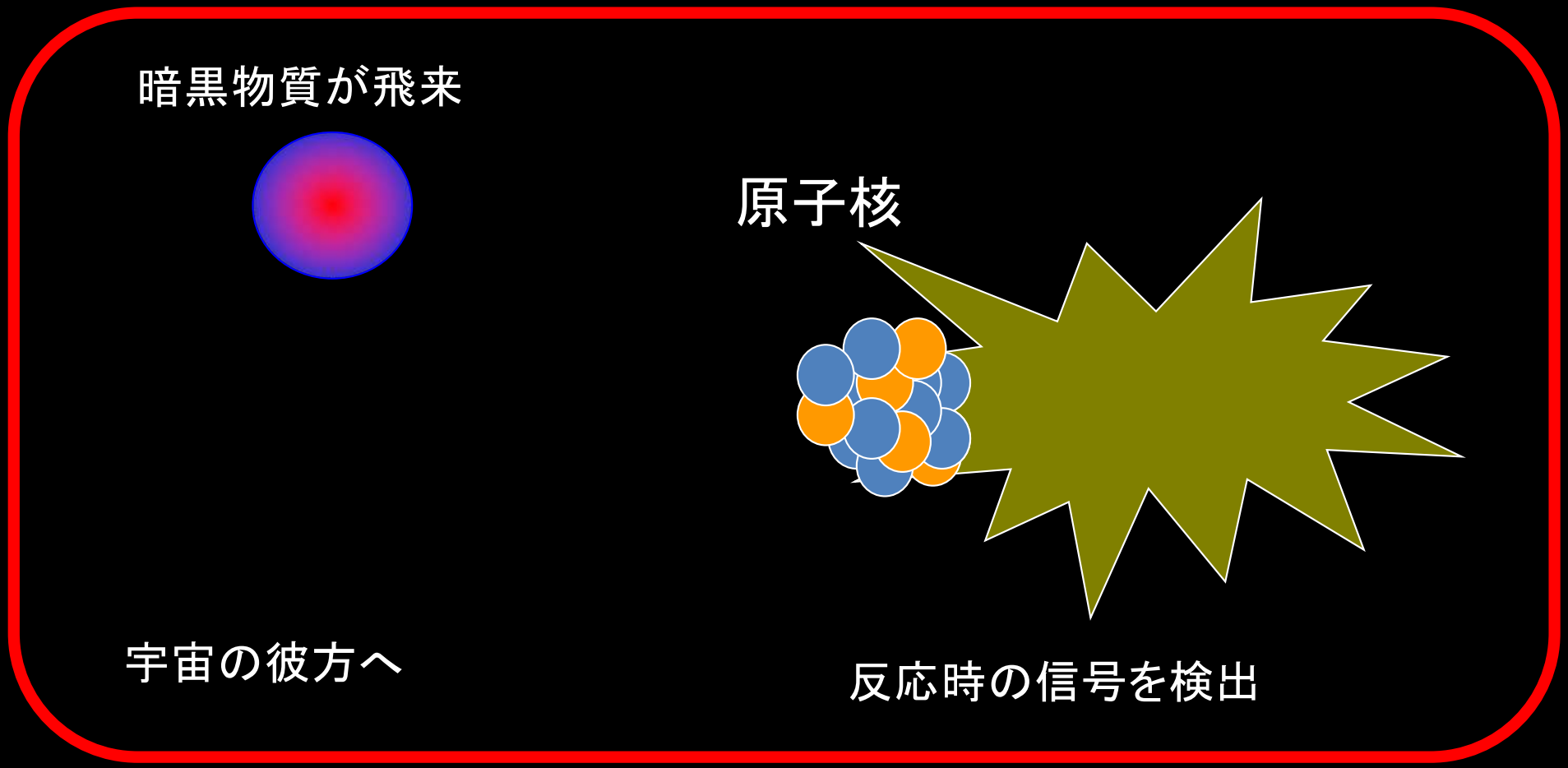
暗黒物質(WIMP、軽い粒子)の探索法

- 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



直接散乱の検出の方法

- 通常の物質が反跳される現象を測定



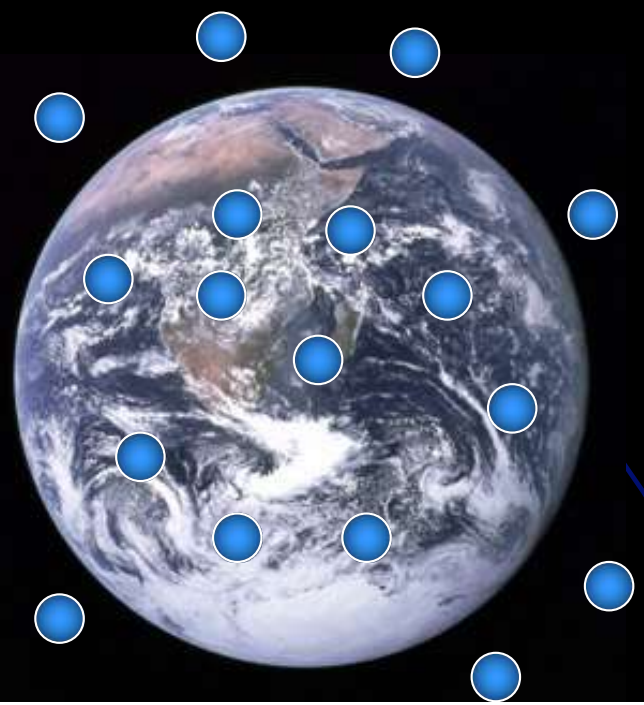
- 最も直接的で、発見後に詳しい研究が可能。
- 新研究分野の扉が開く

存在量

銀河の回転速度
光る物質の量
} 推測される質量

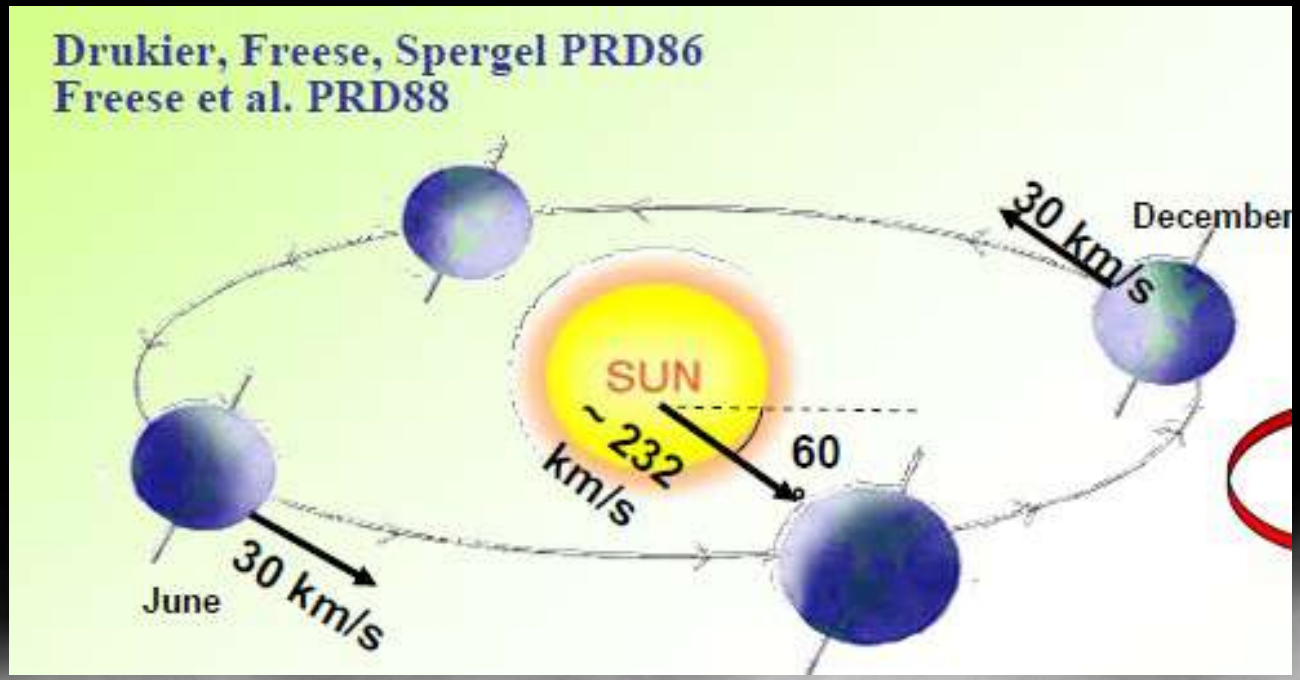
3ccに水素原子1個分の差

非衝突性のため
地球はスカスカ



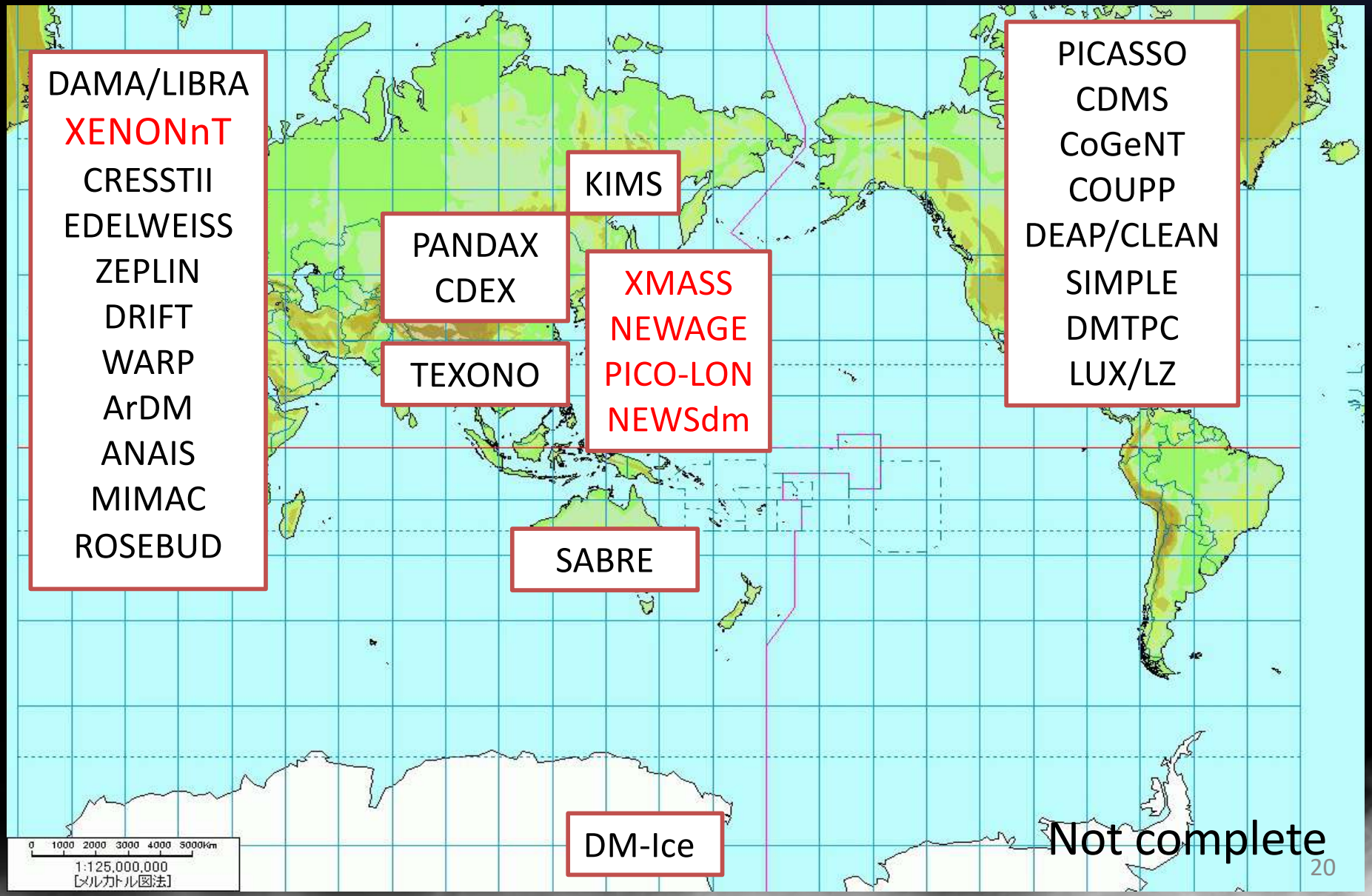
もう一つの特徴：暗黒物質の「風」と季節変動

- 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。
- 衝突する**頻度**が変化、反跳原子核の**方向観測**



実は変動を観測したと主張する実験グループもある！

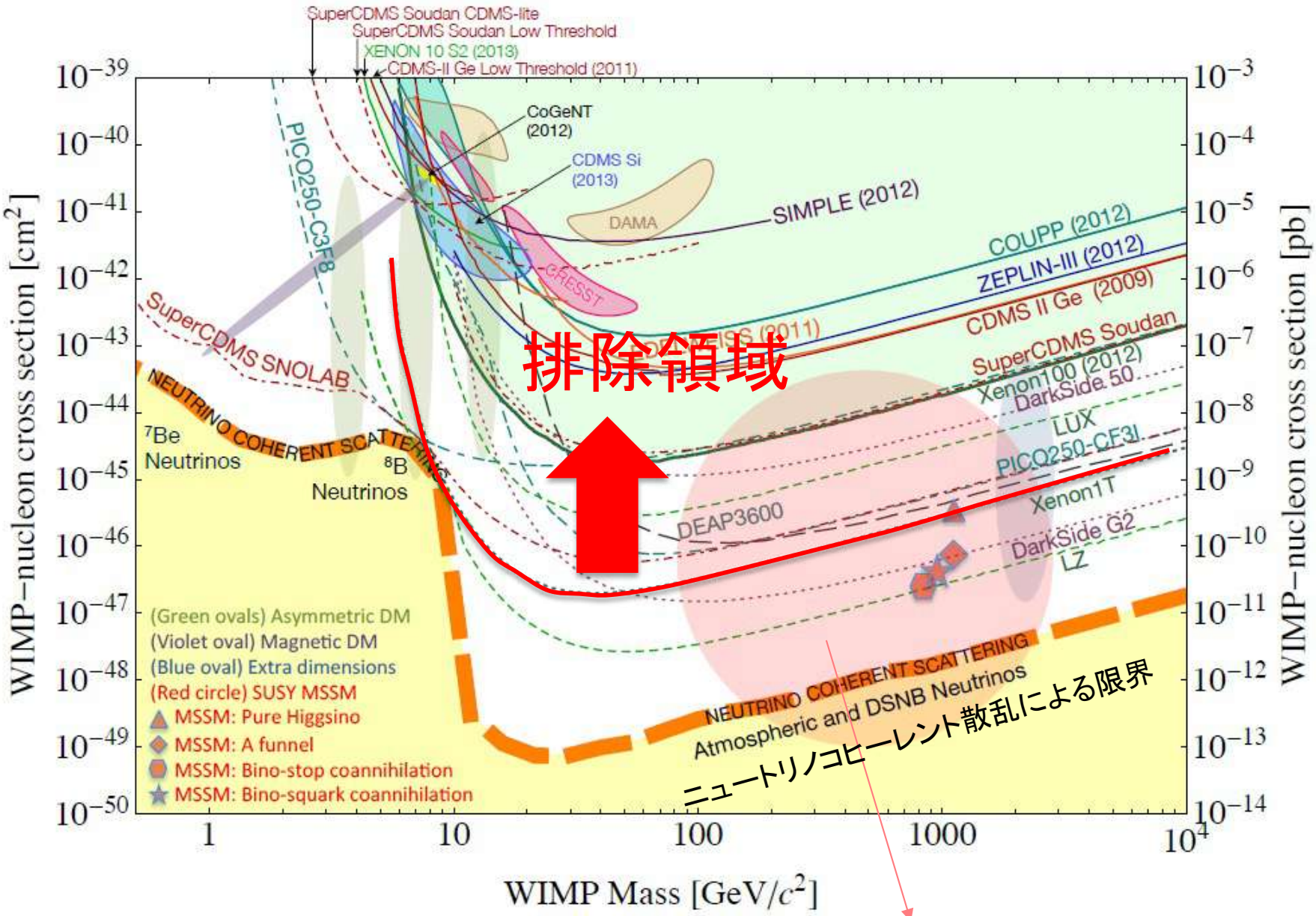
世界中で30以上の実験！



Not complete

WIMPs、軽い粒子の探索状況

衝突頻度



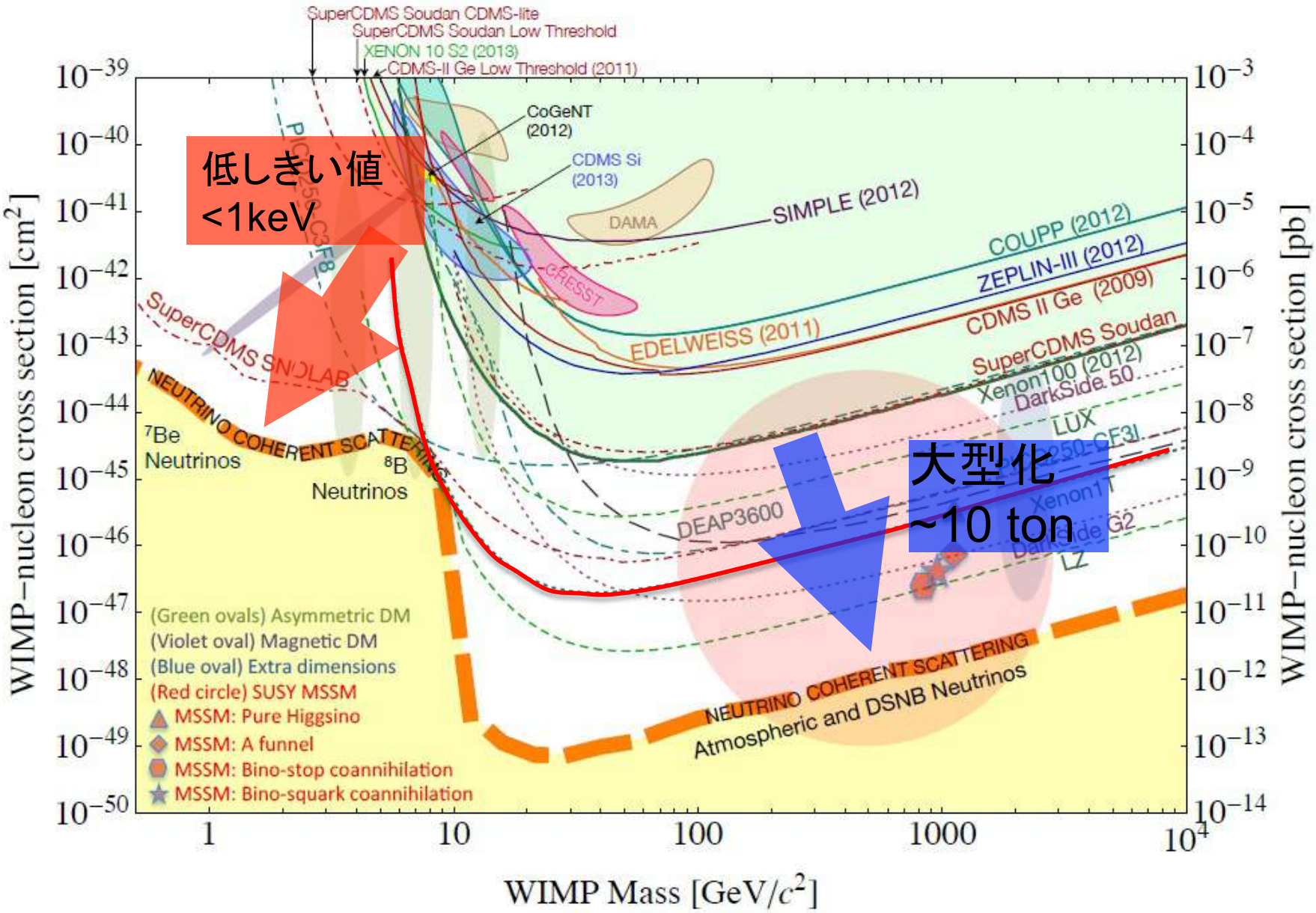
質量

超対称性理論からの予想

from arXiv:1310.8327v1

将来の方向性

衝突頻度



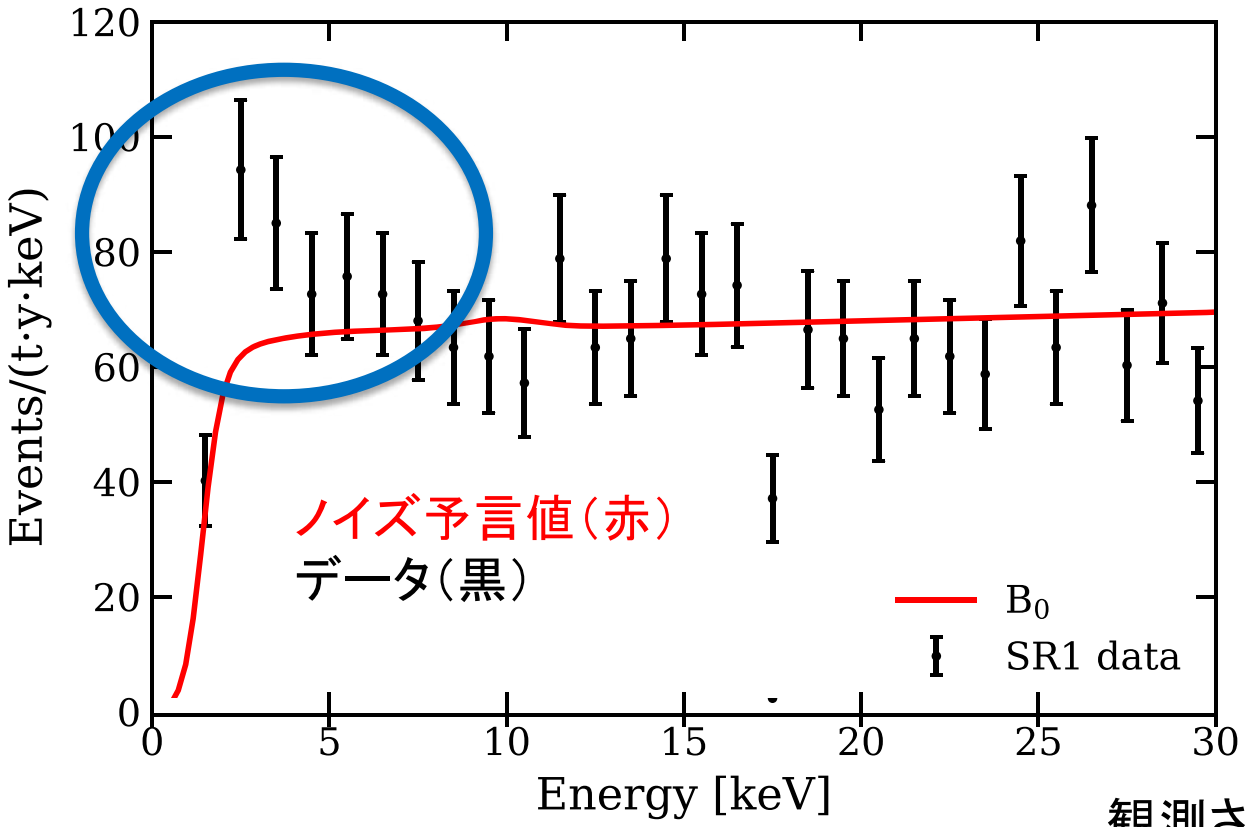
質量

from arXiv:1310.8327v1

こんな中：アクシオン発見か？

2020年の7月発表のXENON1Tのデータ

観測された
事象の頻度

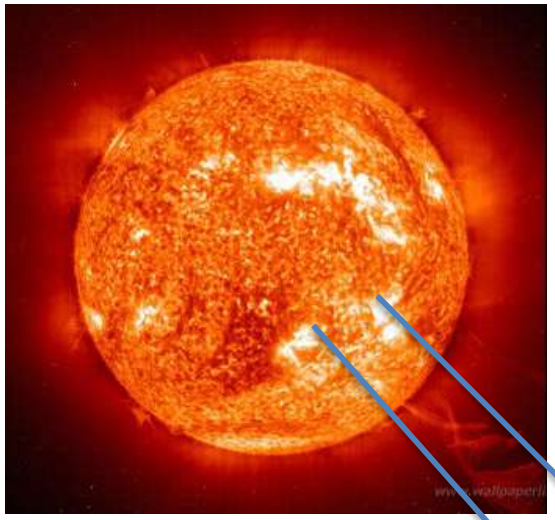


観測された
事象のエネルギー

統計的には3.2シグマの有意度
＝1/1000以下の確率
新粒子の発見か？

何が原因？　大発見かノイズか

- 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？



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？

アクシオン
が飛んできている？

単なる不純物？

後述のより大型のXENONnT実験で決着をつけたい

アクシオンってなに？

- 素粒子物理学では、問題を解決すると、別の問題を引き起こすことがある。
- イータ粒子の質量を理解する過程で、真空が複雑であることがわかってきた。
- 強い力の物理において、巻き付き数“n”を持つ無数の真空の存在が示された。
- 現実の真空はそのnの重ね合わせ。重ね合わせ方の確度のズレがθ(シータ)
- θは1-2πの数字のはずだが、実は10^{-10}程度以下！
- なにかおかしい。
- 新粒子「アクシオン」があるとうまく説明できる。

この粒子を探せ！

それが見つかるかもしれない、、

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
  - 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
- 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

暗黒物質の飛んでくる量の変動を見よう！

暗黒物質の飛んでくる方向を見よう！

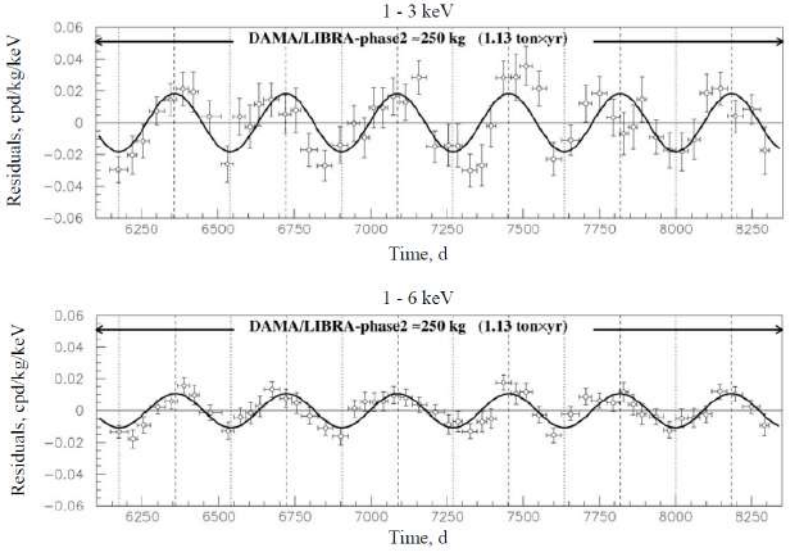
暗黒物質をまず直接検出しよう！

徳島大学　伏見先生

@PicolonF

PICOLON dark matter search

- 目的
  - 宇宙暗黒物質の探索
  - 超高純度NaI(Tl)を開発
  - イタリアのDAMA/LIBRAグループが主張している季節変化を検証
  - 100 kg以上の大型検出器システムを計画



R.Bernabei et al.,Nucl. Phys. At. Ene. **19** (2018) 307.

PICOLONグループが開発した
超高純度NaI(Tl)検出器

徳島大学　伏見先生

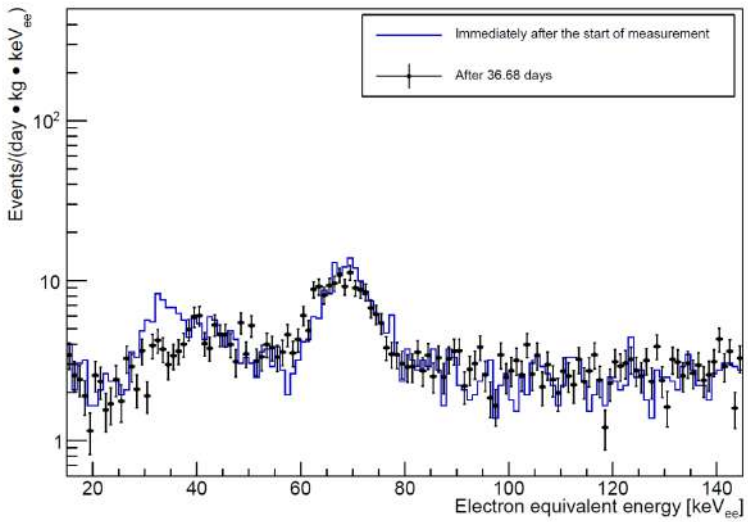
2021年度の状況

岐阜県飛騨市の東北大学ニュートリノ科学研究センター神岡観測室にて建設中

2021年7～10月にNaI(Tl)検出器を2個インストール
インストール直後は、宇宙線とヨウ素との反応で作られる^{125}I ($T_{1/2} = 58$ d)と
^{126}I ($T_{1/2} = 13$ d)が強い。

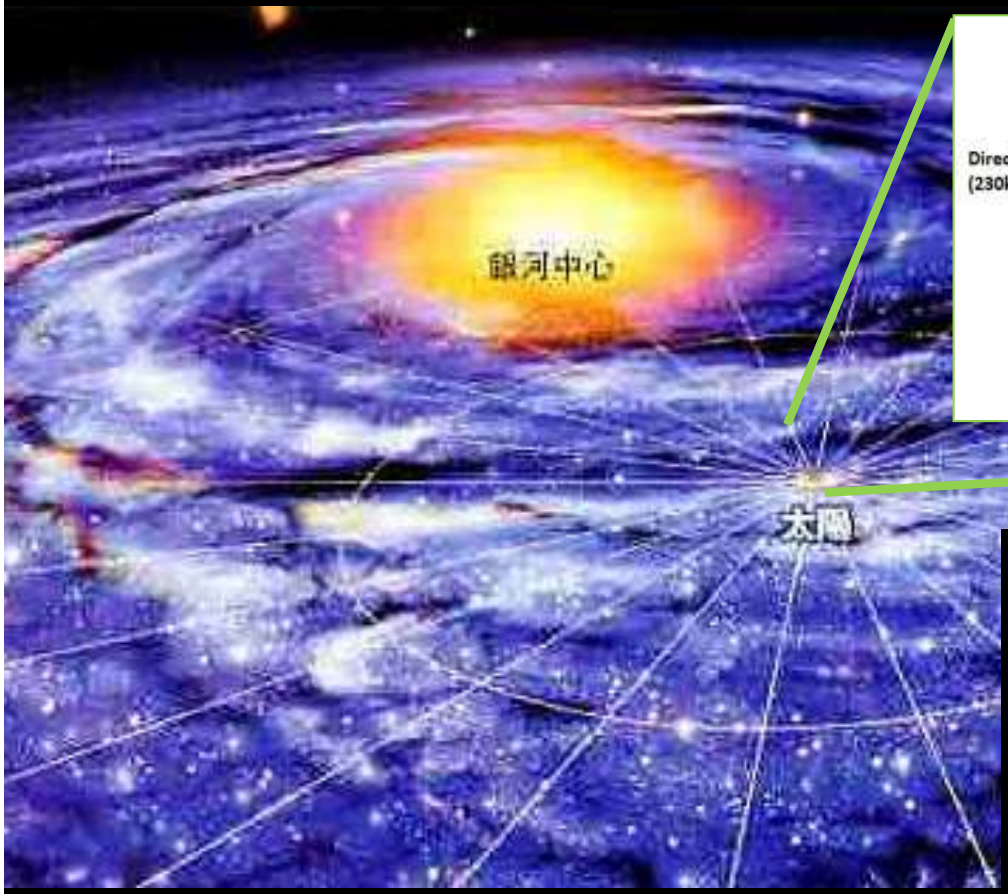
2021年10月から2個を1つのシールド（左写真）に入れて低バックグラウンド測定中
単独のNaI(Tl)で2 day^{-1} keV^{-1} kg^{-1}を達成

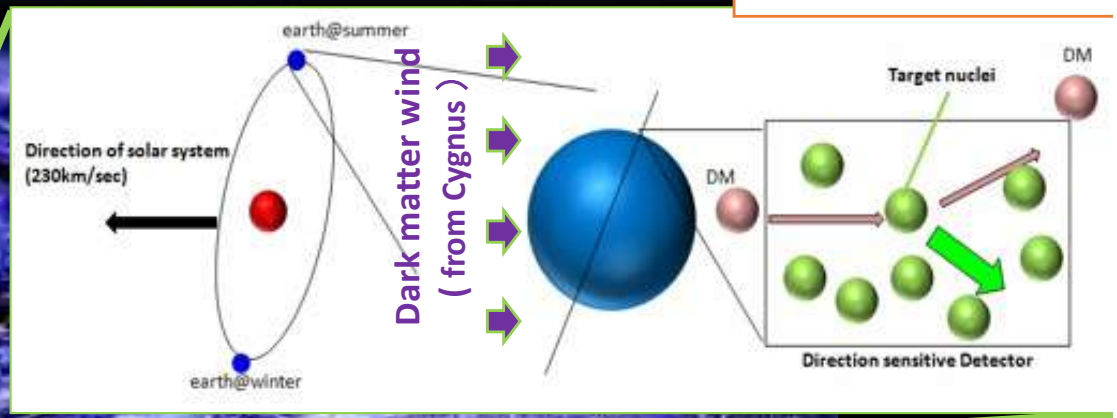
右のエネルギースペクトルについて
2021年8月頃のデータ
青線：　インストール直後につき、
宇宙線起源のピークが強い
黒点：　1ヶ月経過して^{126}IのX線が
消えている

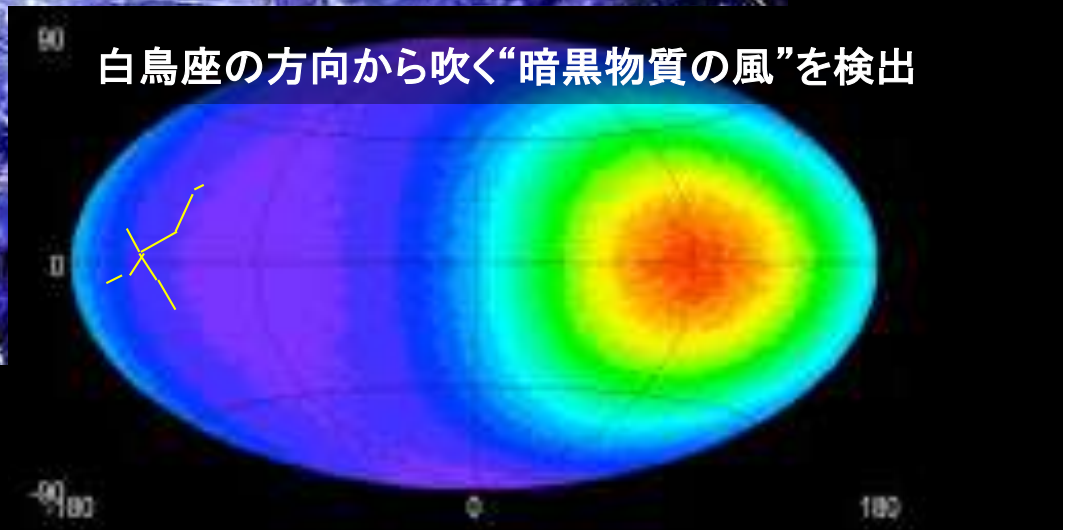


今後、大型モジュールを組み合わせた
検出器を建設予定！
最新情報はTwitterで発信中！

名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生

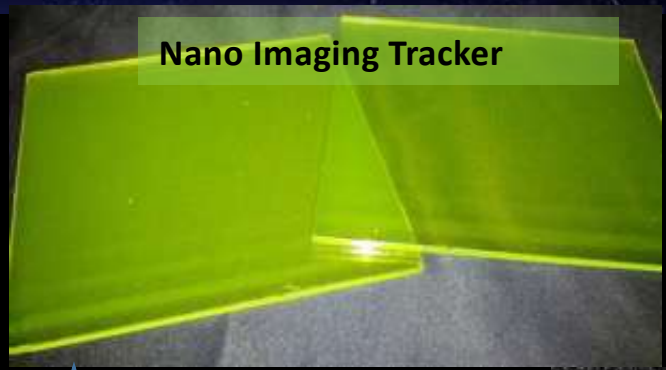






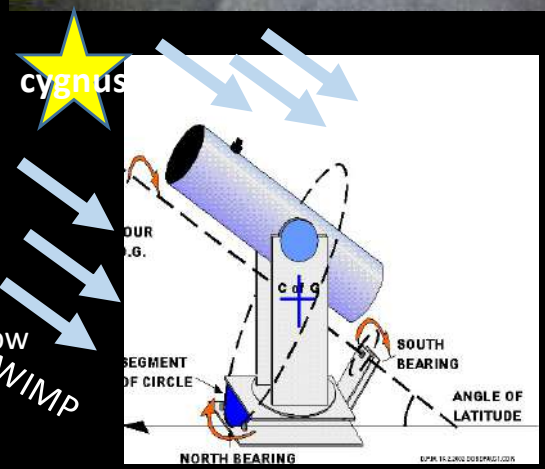
名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生

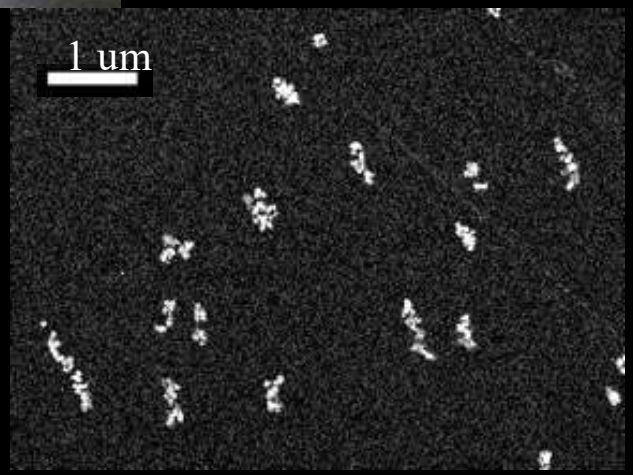
Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement



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





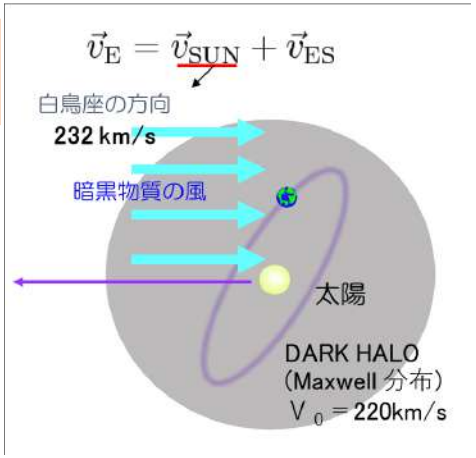
Nagoya
Chiba

LPI RAS Moscow
JINR Dubna
SINP MSU Moscow

Bari
LNGS
Naples
Rome

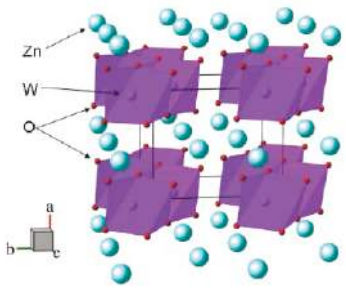
METU

東京大学　関谷先生

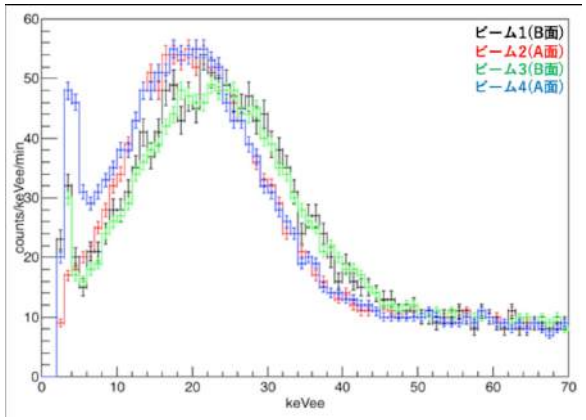


暗黒物質方向検出器の開発

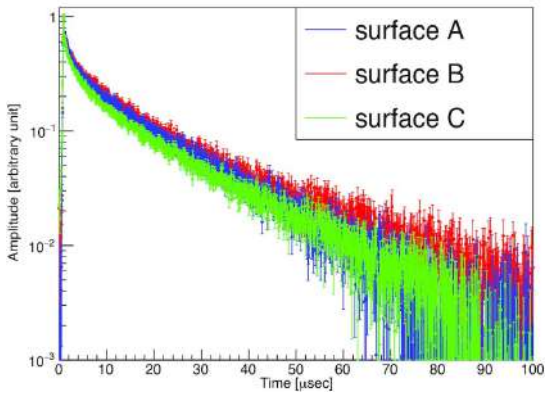
- 白鳥座の方向からやってくる暗黒物質→確実な証拠
  - **発光量が粒子の入射方向で変化する結晶を用いて暗黒物質探索**
- $ZnWO_4$シンチレータ
  - 単斜晶系の結晶で中性子に対して入射方向によって発光量が異なることを確認した。
  - さらには、シンチレーションの減衰時定数が粒子の入射方向によって異なることを突き止めた。



中性子に対する応答の違い



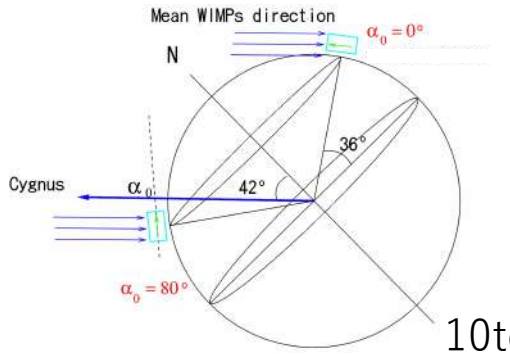
入射方向による時定数の違い



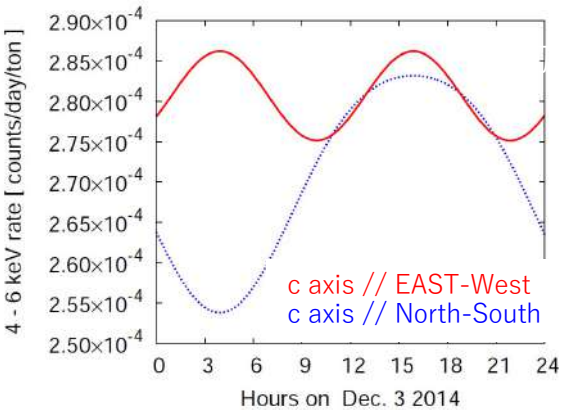
東京大学　関谷先生

どう使うかは工夫次第!

1.ただ置いておく



10ton位あれば日変動が見れる



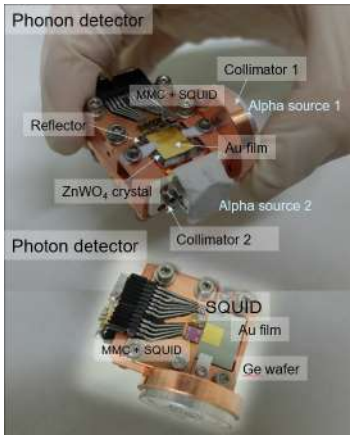
2.冷やす

極低温熱量計型検出器

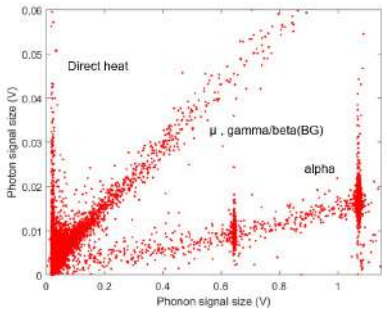
photonとphononの同時測定

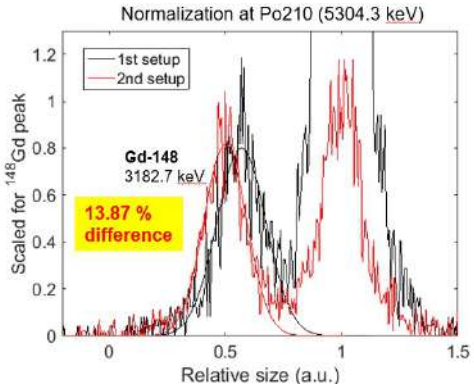
　熱として全エネルギーを測定し、発光量も測定できれば入射方向情報が得られる。

1kgの高純度結晶用意済



核断熱消磁や希釈冷凍機により40mKまで冷やすと粒子識別能力発光量も増える。異方性も増す?





宇宙線研、東北大、韓国IBSとの共同研究

NEWAGE実験

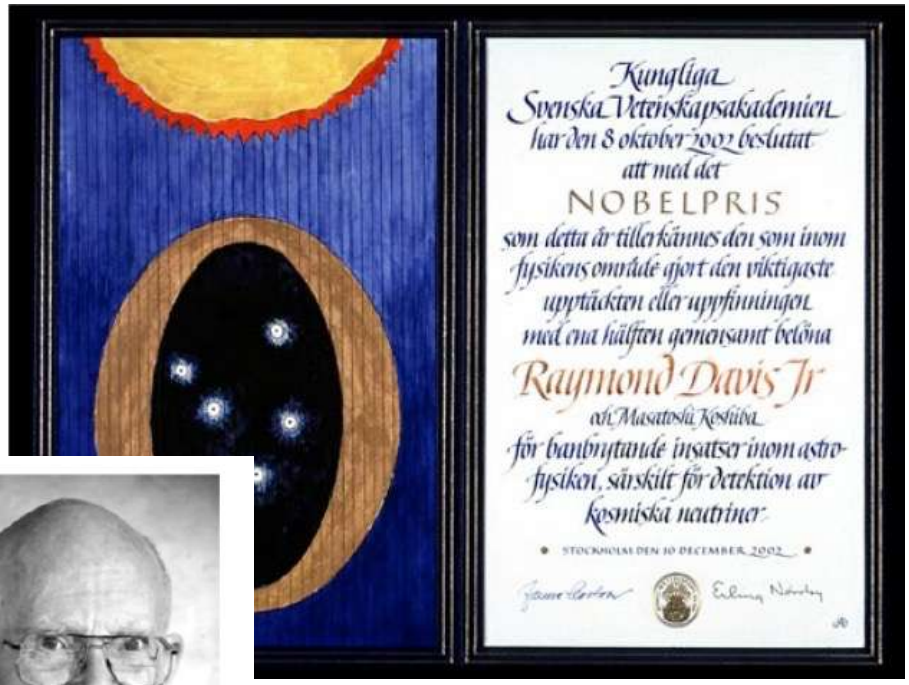
神戸大学　身内先生

Direction-Sensitive WIMP-search NEWAGE

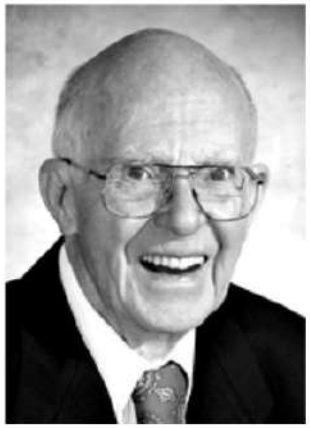
http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/

- 神戸大学主導（研究代表者：身内賢太朗）
- 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



2002年ノーベル物理学賞の賞状



Raymond Davis Jr.
Prize share: 1/4

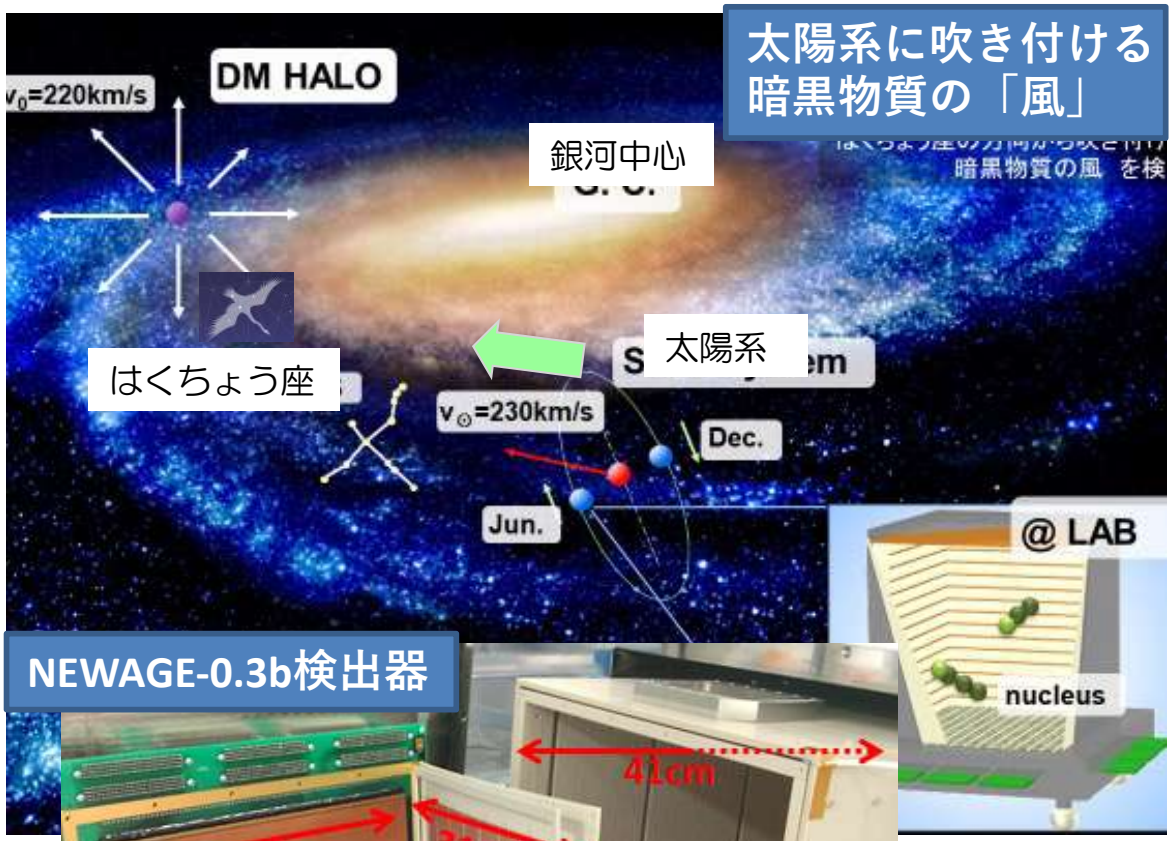
Masatoshi Koshiba
Prize share: 1/4

NEWAGE実験（概要）

神戸大学　身内先生

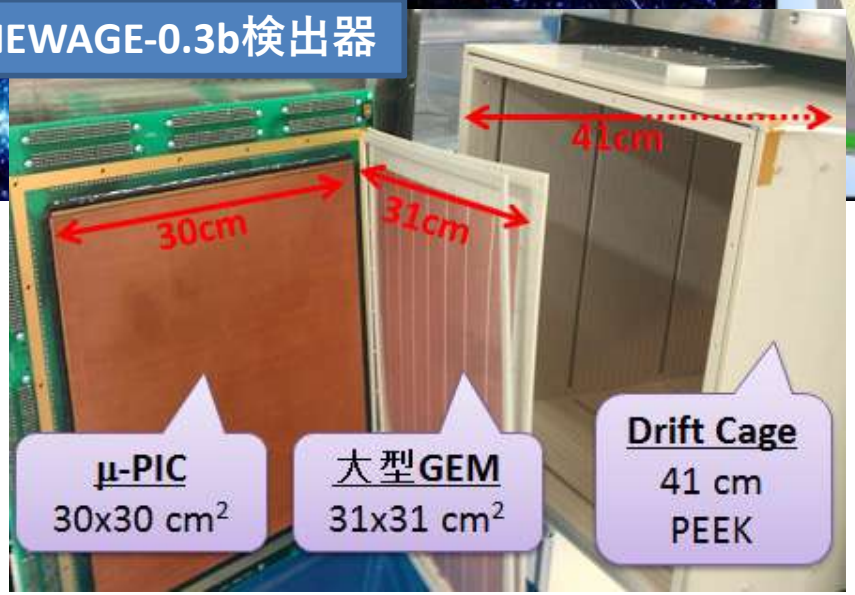
- 三次元飛跡検出器で銀河に付随する暗黒物質の「風」を捉える
- 暗黒物質検出の決定的証拠,
  その後の性質解明へ
- 小型器で観測中＆感度向上へ
  - NEWAGE-0.3b: 観測中
    (2017年11月～)@神岡
  - 次世代検出器の開発 @神戸

太陽系に吹き付ける暗黒物質の「風」



NEWAGEメンバーと次世代器

NEWAGE-0.3b検出器



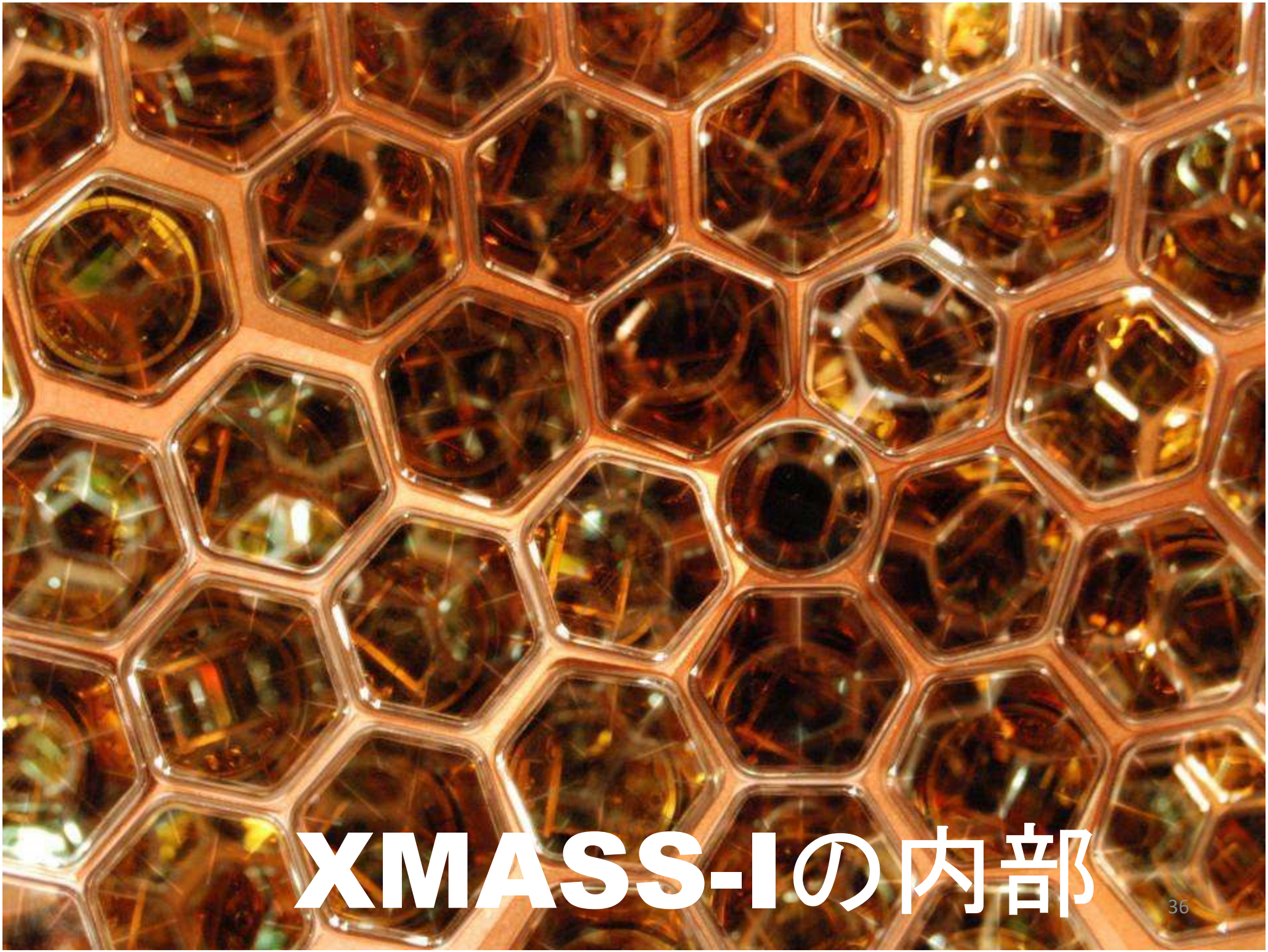
東京大学他：XMASS実験（神岡・実験完了）

東京大森山　他

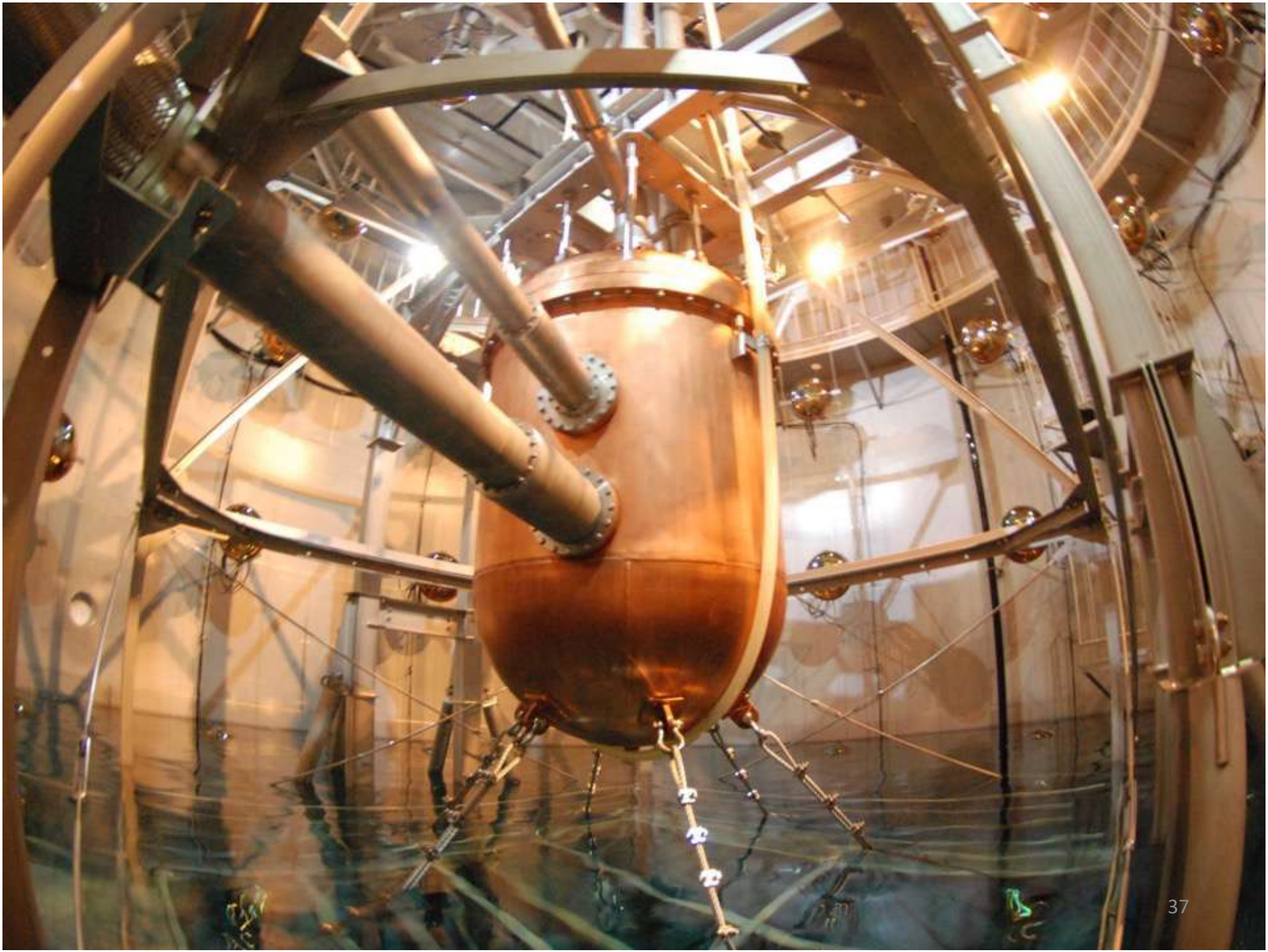
1トンの液体キセノン

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。

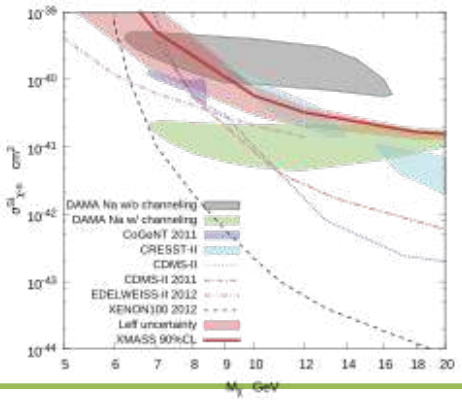
多数の光電子増倍管によって蛍光を捕らえる。



XMASS-Iの内部



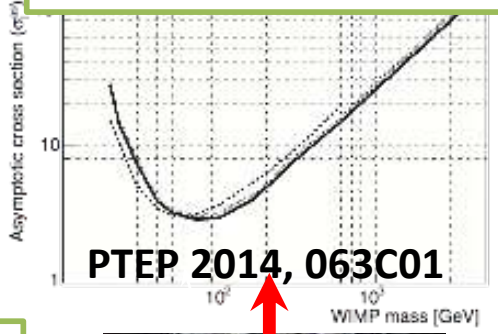
XMASS-I：暗黒物質等の探索結果



軽い暗黒物質の探索

Phys. Lett. B 719 (2013) 78

非弾性散乱による探索

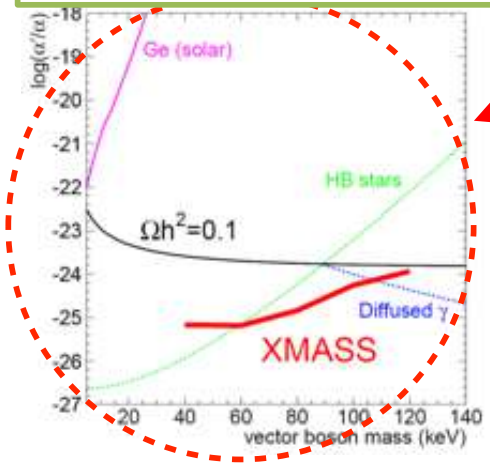


PTEP 2014, 063C01

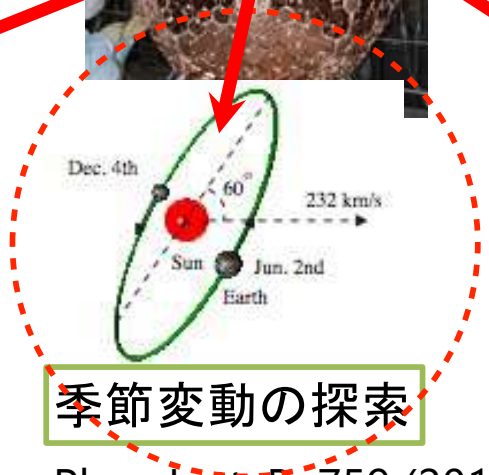
太陽アクシオン

Phys. Lett. B 724 (2013) 46

スーパーウィンプス



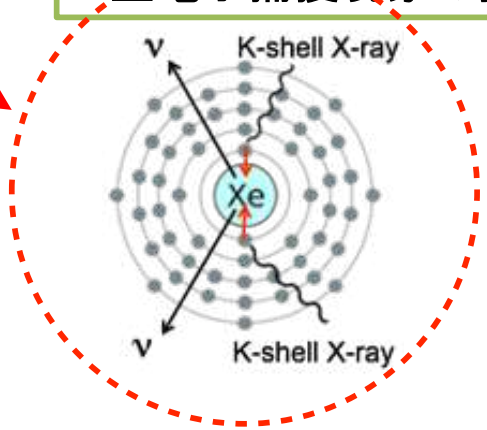
Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 121301



季節変動の探索

Phys. Lett. B 759 (2016) 272

二重電子捕獲現象の探索



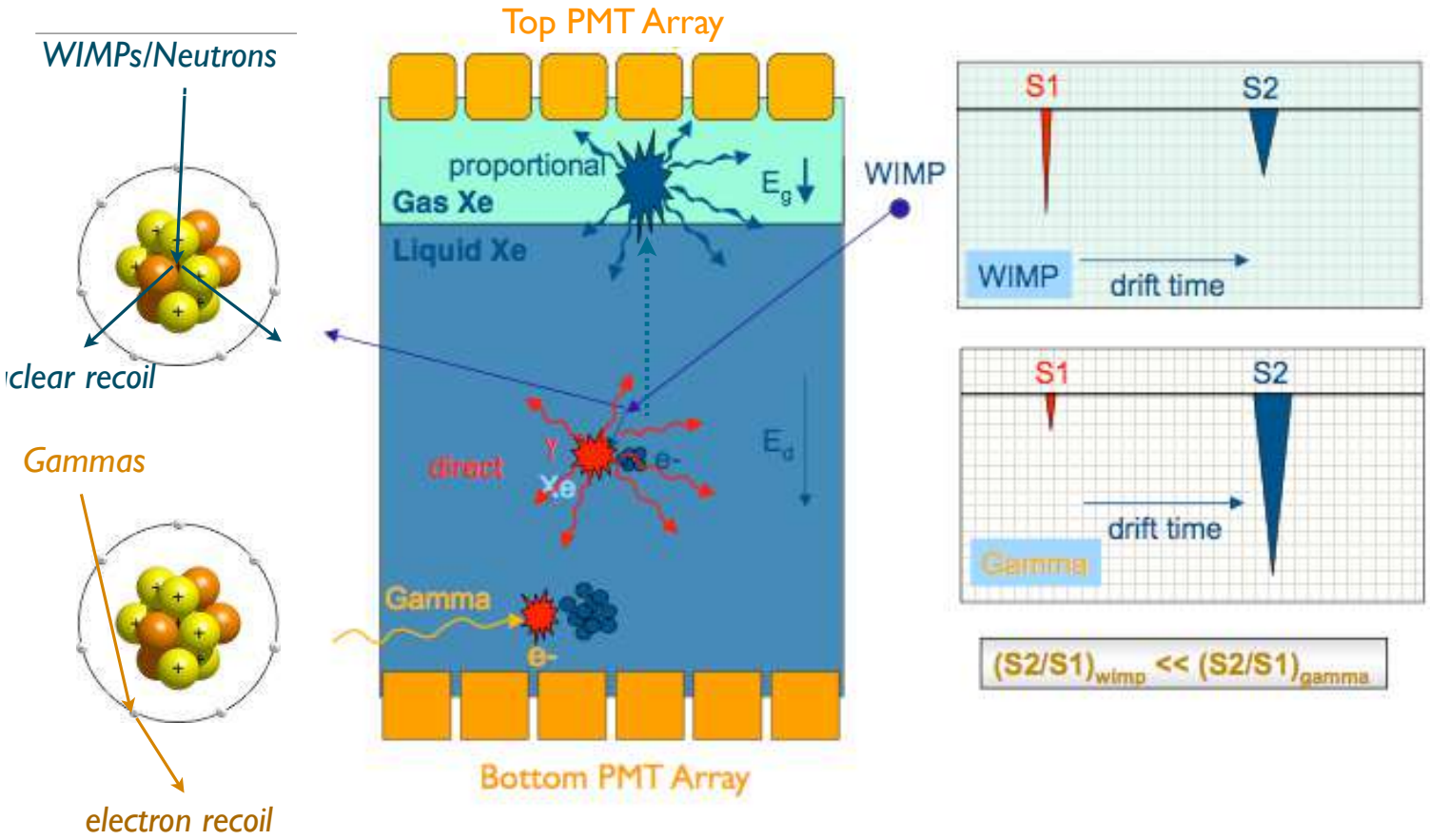
Phys. Lett. B 759 (2016) 64

- 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

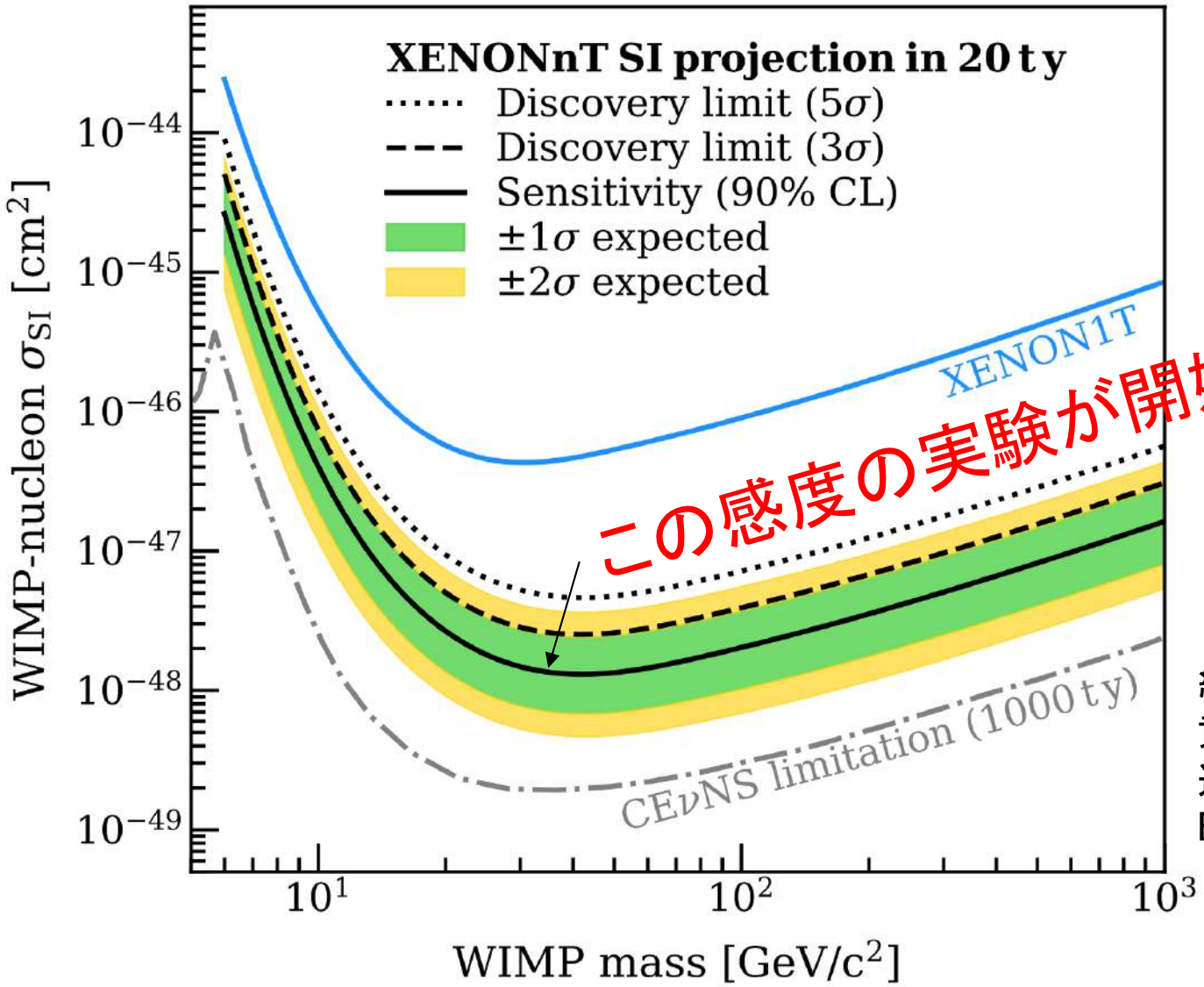
放射線による事象は
ガス中の信号が大きい

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



この感度の実験が開始

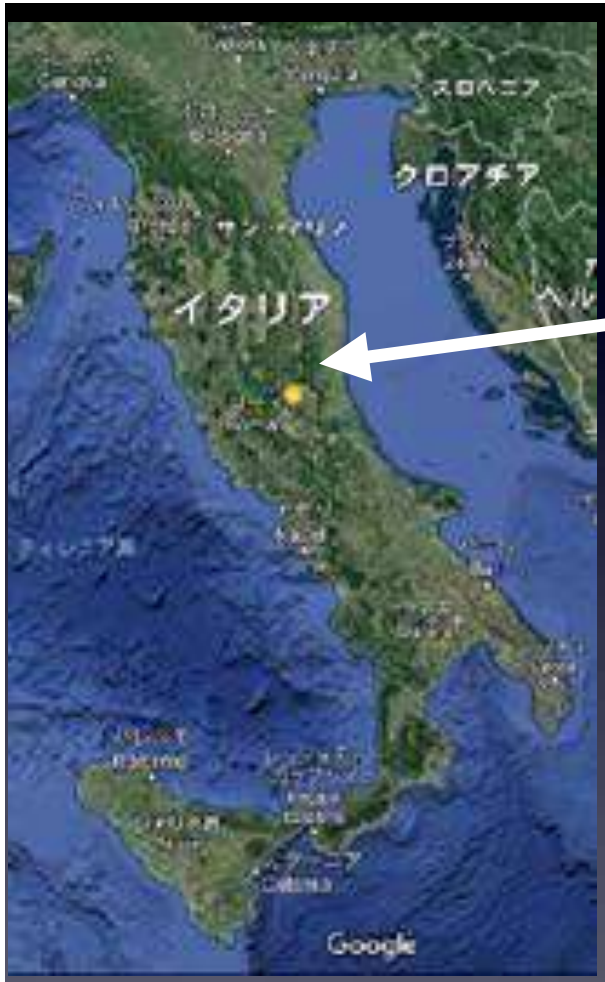
これから5年間で
発見もしくは
信号の兆候を
捉えたい

緑バンド：1σで得られそうな感度
黄バンド：2σの範囲で、
運が悪いときや良い時の感度
Brazilian flag plotと呼ばれる

~160 scientists, from 28 institutions

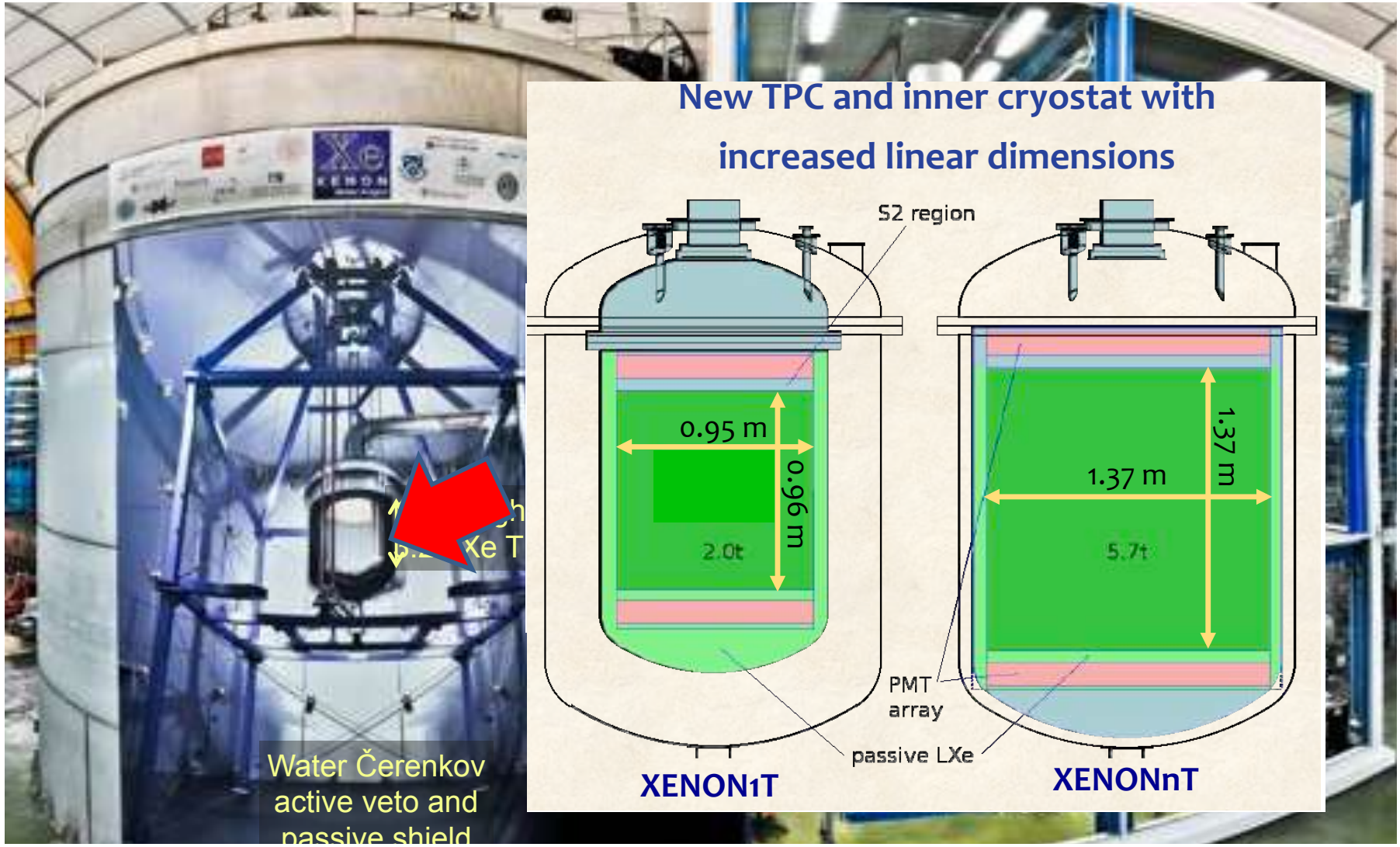
日本から16名（学生は東大から1名、名古屋1名、神戸3名参加）

実験場所:イタリア
グランサッソ研究所

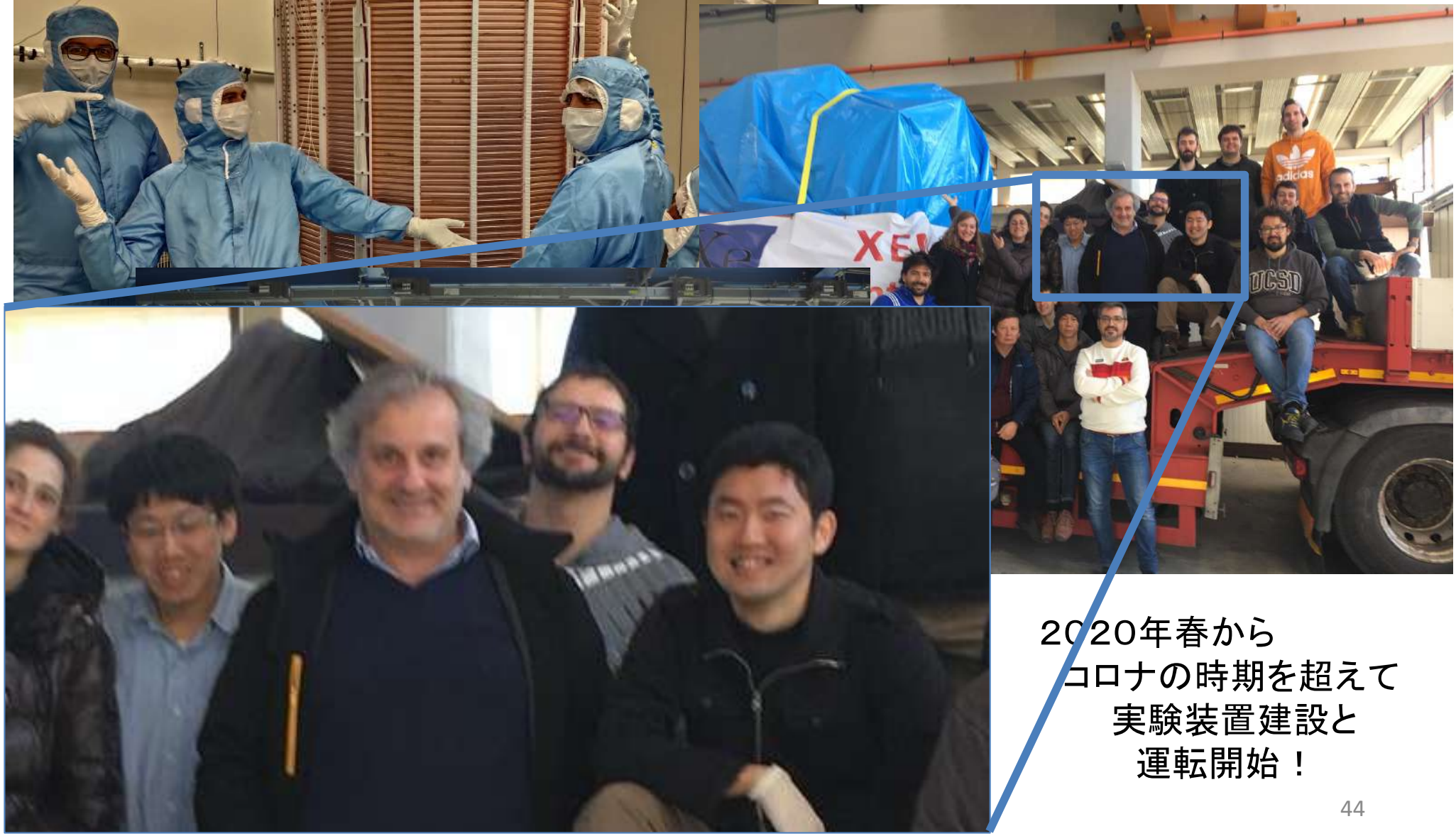


迅速なupgradeの理由

- 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



2020年春から
コロナの時期を超えて
実験装置建設と
運転開始！

LXeを用いた大型実験（キセノンを数トンから10トン使用）競争状況

- XENON実験（イタリア、本研究室参加）
  - データ収集中！
  - XENON1Tの電子反跳事象を検証中。
- LZ実験（アメリカ）
- PANDA-X実験（中国）

<u>暗黒物質の発見から標準理論を超えた物理の発見・宇宙の成り立ちを事実に基づいて理解可能となる</u>

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が国内の大学・研究所で進められています。

- 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