

最先端研究 | 暗黒物質

森山 茂栄 (もりやま しげたか)

東京大学 宇宙線研究所

次世代ニュートリノ科学連携研究機構

カブリ数物連携宇宙研究機構



取り組みたい研究？

宇宙や宇宙線の起源、天体を知りたい？
素粒子のことを知りたい？
とにかく凄そうな研究をしたい？
決まっていない？

素粒子の理論的研究をしたい？
素粒子を実験的に研究したい？

The 7 Biggest Unanswered Questions in Physics

1. What is matter made of?
2. Why is gravity so weird?
3. Why does time seem to flow only in one direction?
4. Where did all the antimatter go?
5. What happens in the gray zone between solid and liquid?
6. Can we find a unified theory of physics?
7. How did life evolve from nonliving matter?



The 7 Biggest Unanswered Questions in Physics

XENON実験

1. What is matter made of?

暗黒物質 = ダークマターの
正体はなにか？

2. Why is gravity so weird?

3. Why does time seem to flow only in one
direction?

Super-K/Hyper-K 宇宙のCP対称性の破れ？

4. Where did all the antimatter go?

5. What happens in the gray zone between solid
and liquid?

大統一理論？

6. Can we find a unified theory of physics?

7. How did life evolve from nonliving matter?



素粒子物理学を発展させる上での 暗黒物質研究の動機

- 暗黒物質は天文学では既に「発見」済
- 但し「正体」不明
 - 新しい物理の「ポータル(入口)」として期待される暗黒物質の同定。それは垂涎の的。

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。

大発見へ向けて、いまボールは自然を観察する「素粒子物理学」側にある！

素粒子物理学の次のステップへ 向けた暗黒物質の研究

暗黒物質＝ダークマターの研究のためには

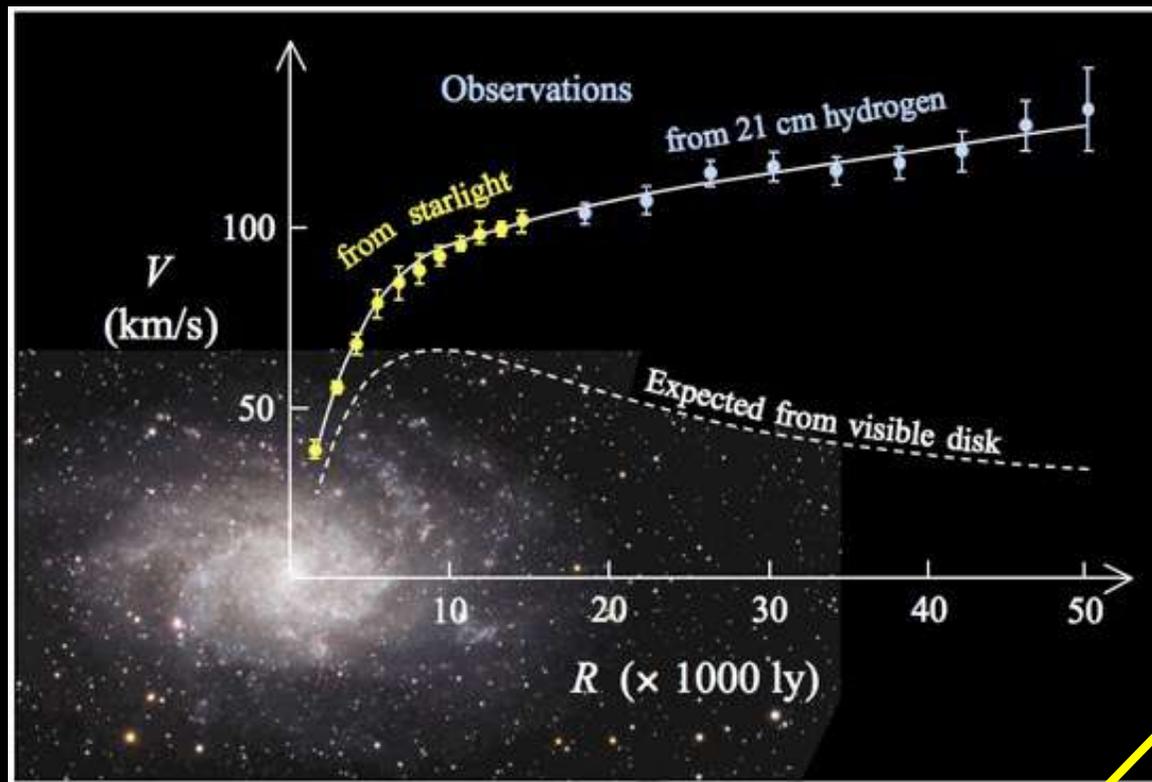
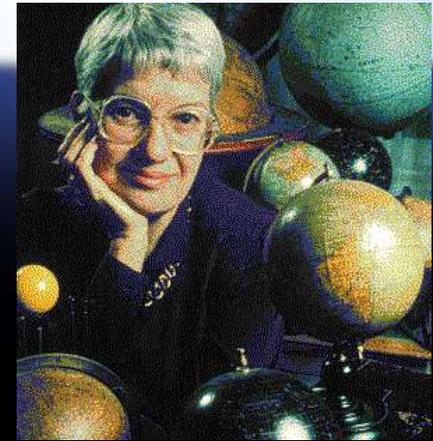
- 加速器を用いた研究
- 宇宙・自然の観測を通じた研究

宇宙線研究所では主として後者に力点がある

暗黒物質存在の証拠

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



超重要！
後で出てきます

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

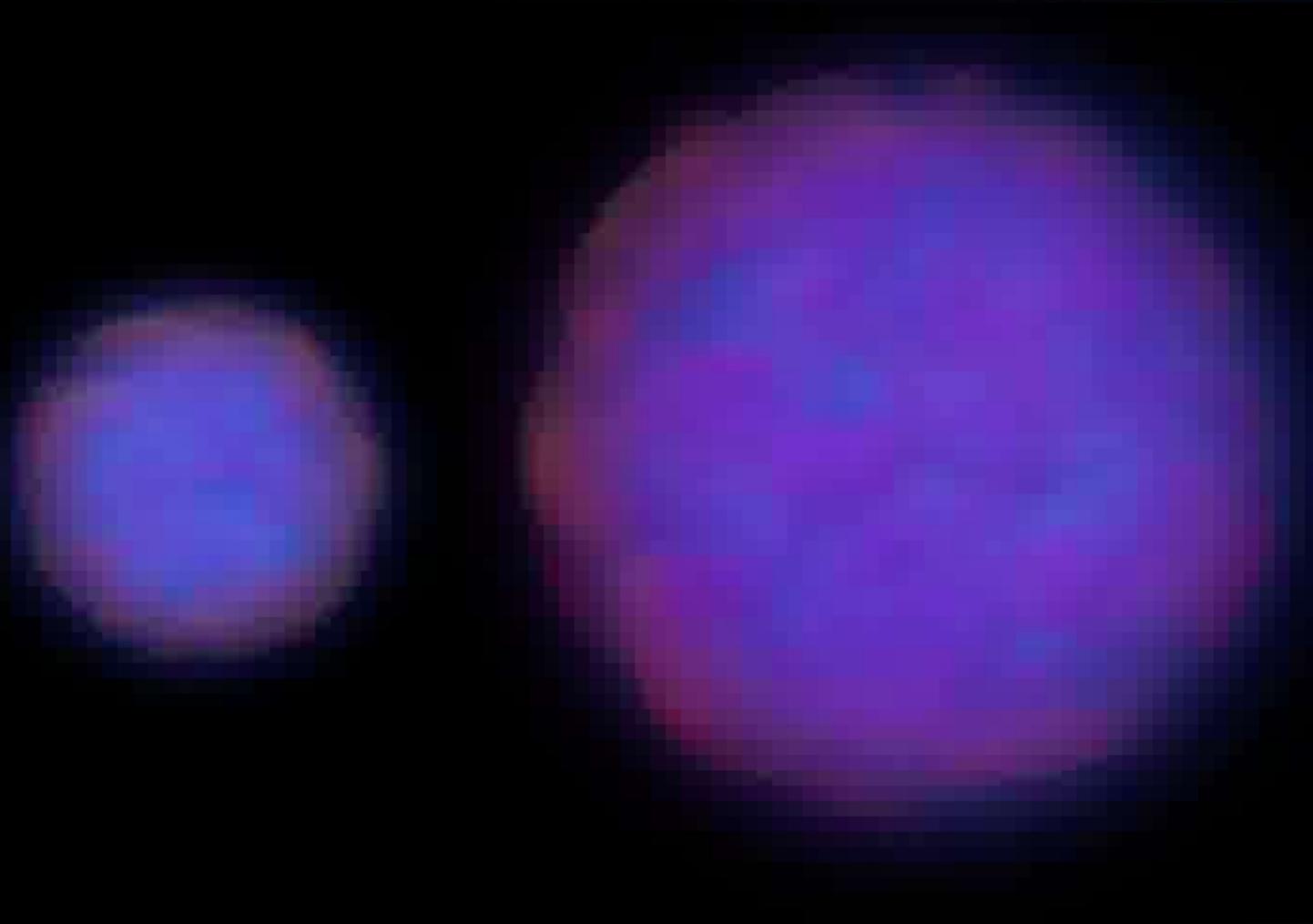


暗黒物質
非衝突性
(観測は重力
レンズ効果、
色は仮)



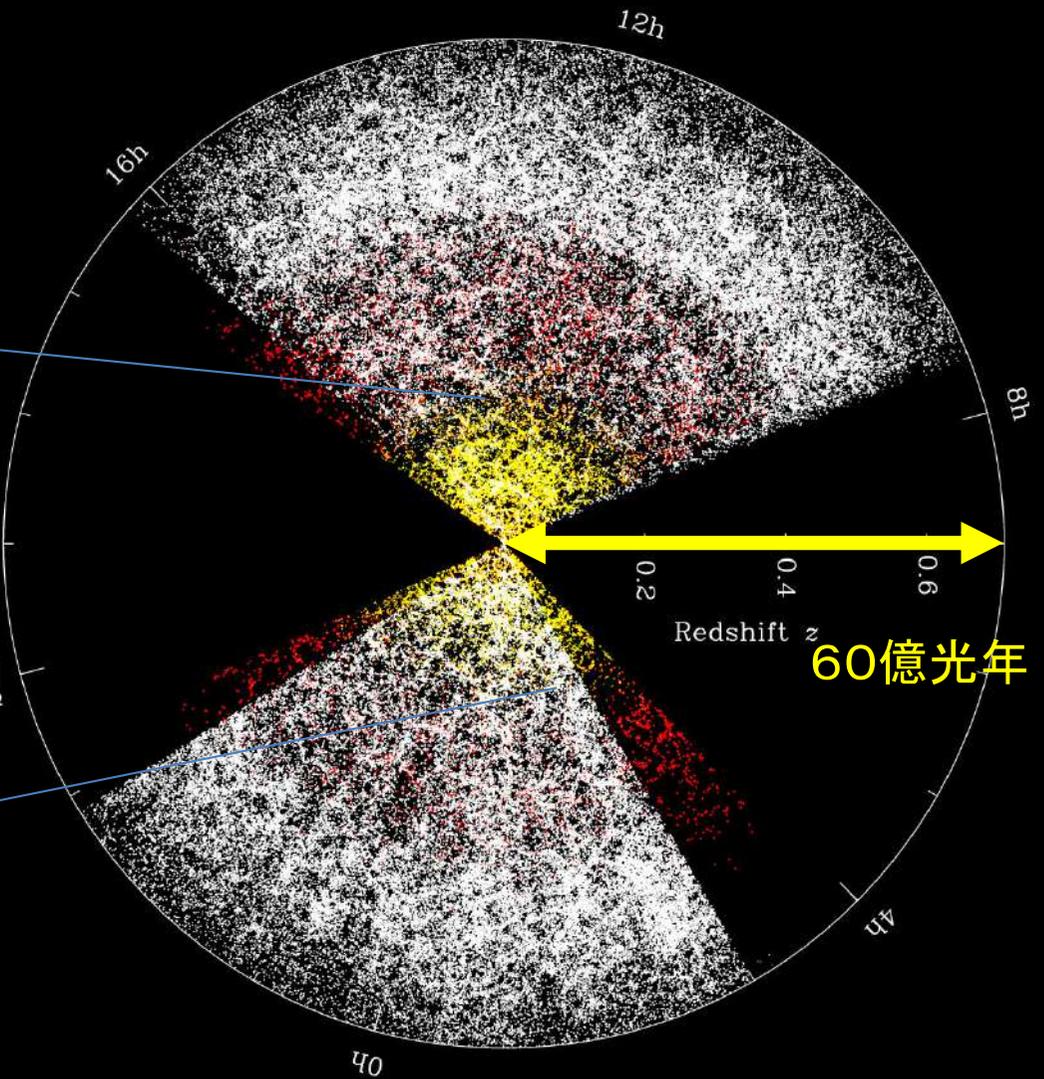
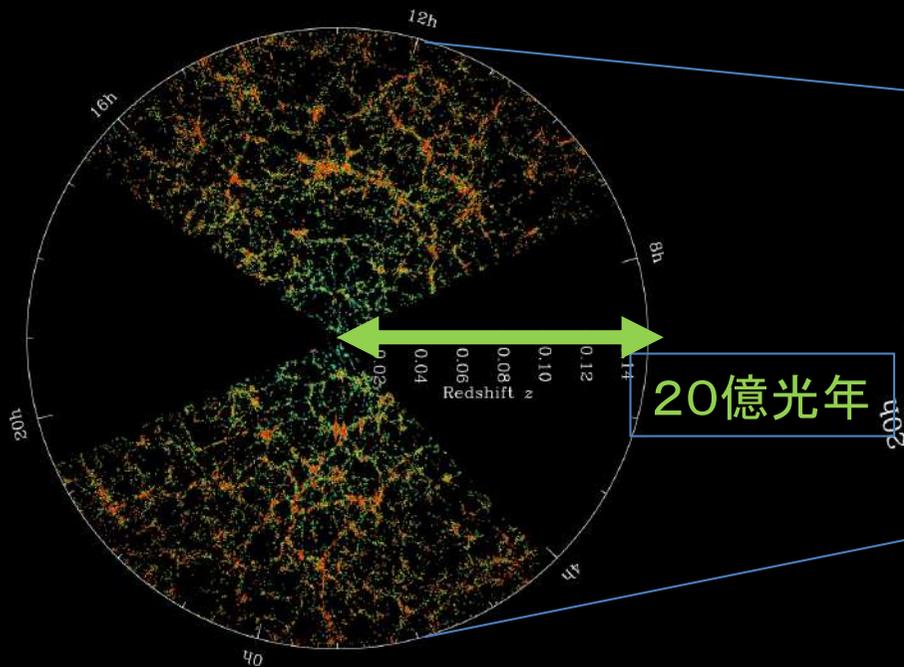
Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.;
Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.;
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/
U.Arizona/D.Clowe et al.

想像動画



大規模構造の成長

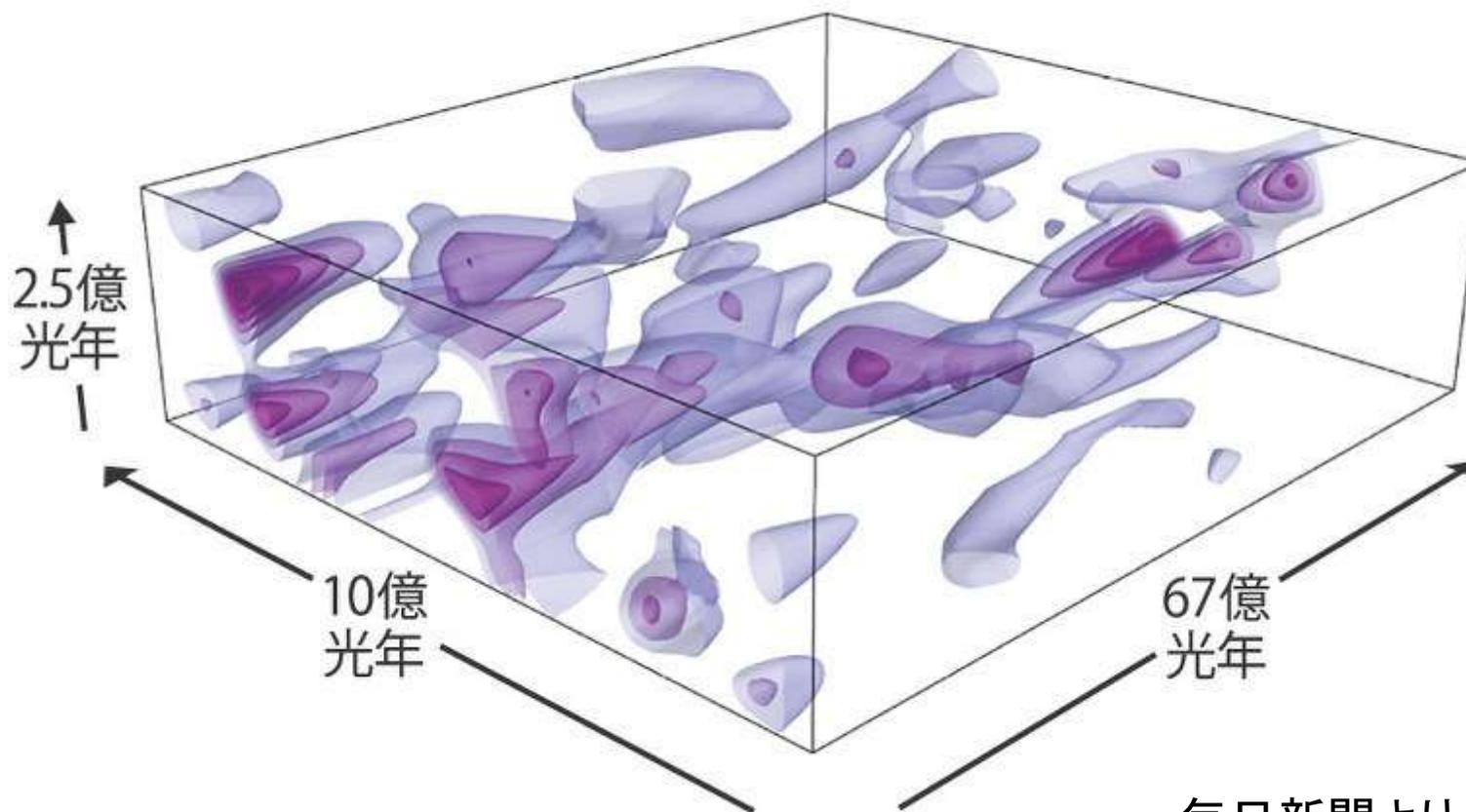
銀河の密度の粗密は
暗黒物質の凝縮で作られた



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

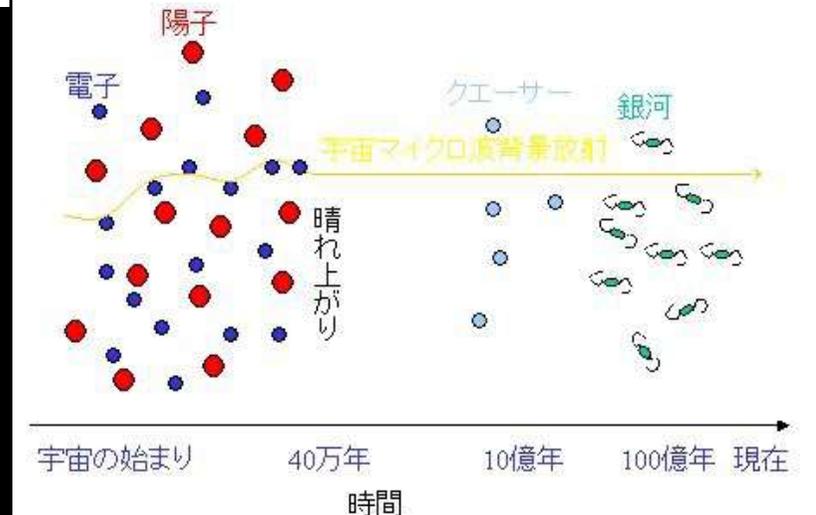
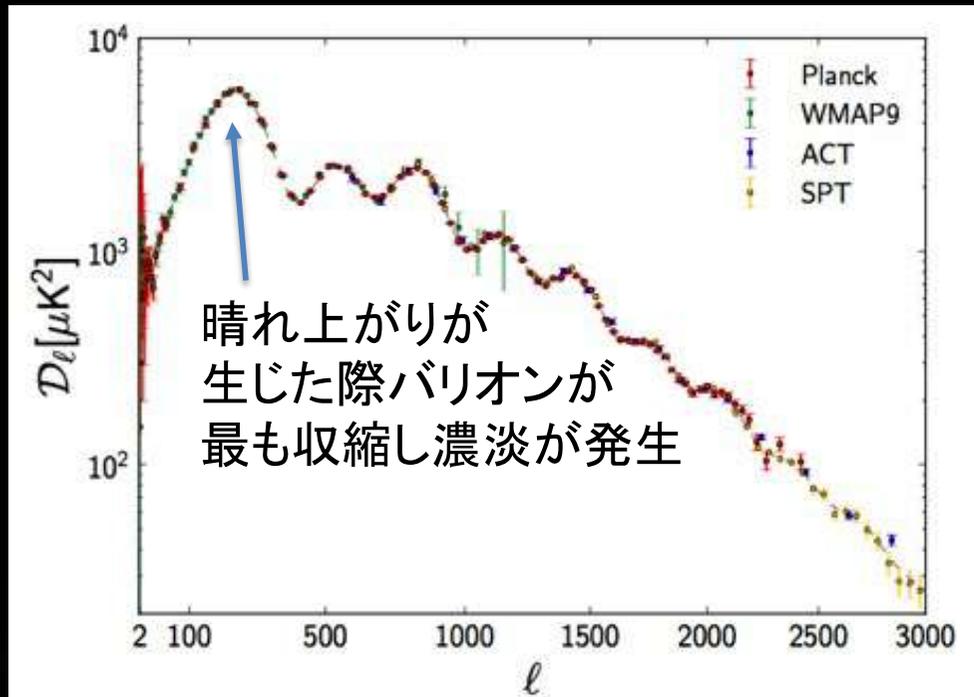
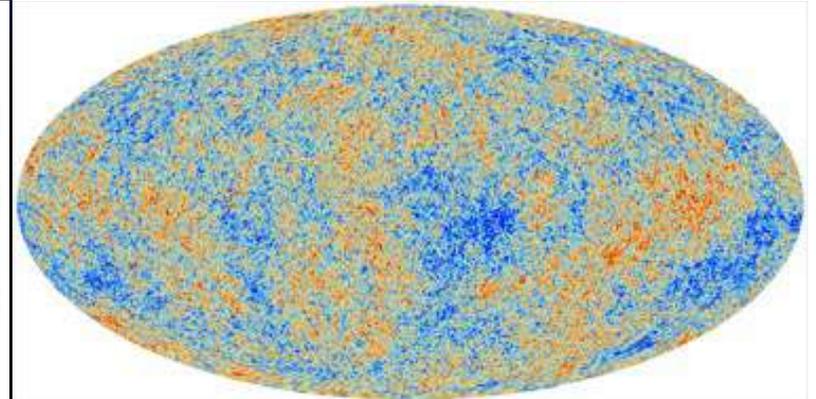
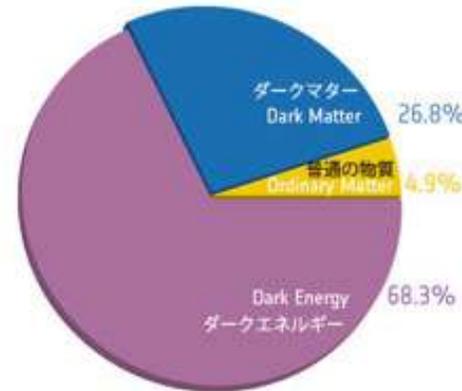
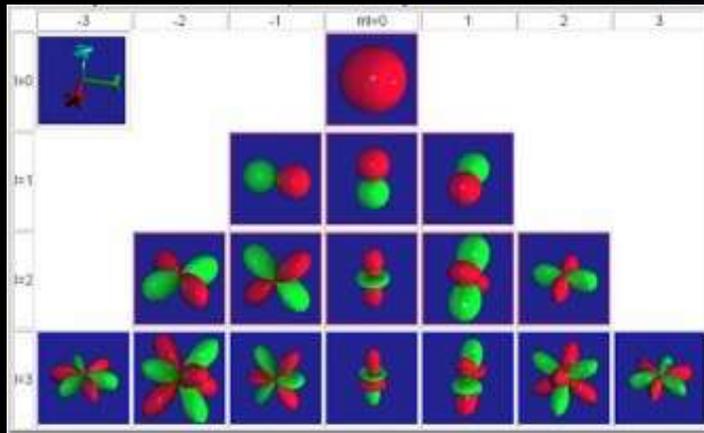
※国立天文台と東京大提供



毎日新聞より
2018/2/28

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

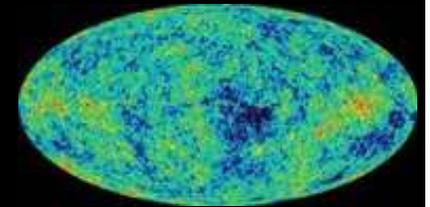
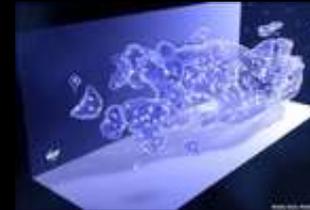
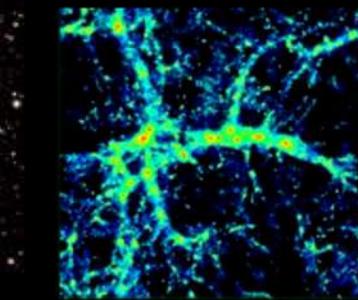
銀河の回転速度

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

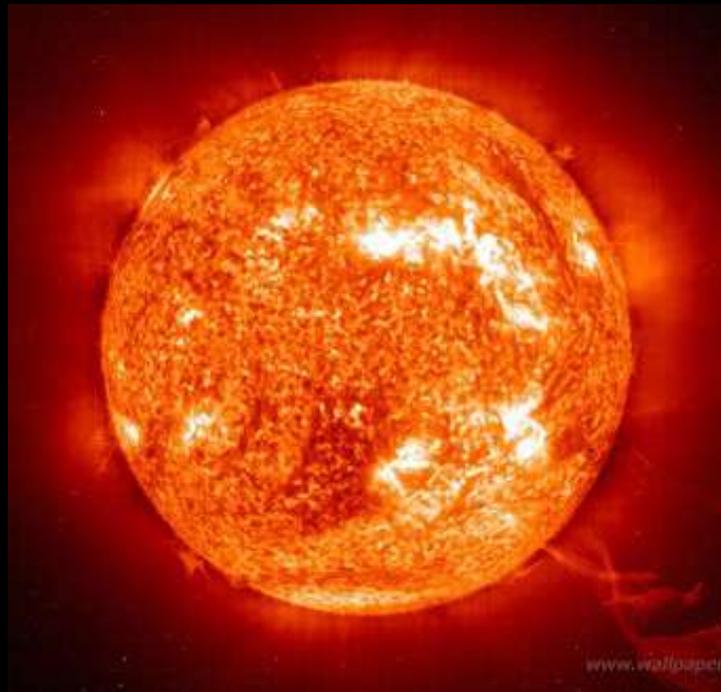


各スケールの未解決問題が
「たった一つの未知粒子」
の発見で一気に解決の可能性

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



暗黒物質の同定方法

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
- 相互作用の強さ: 重力以上
- スピン: 未知

すべてにおいて実験的決定が必要

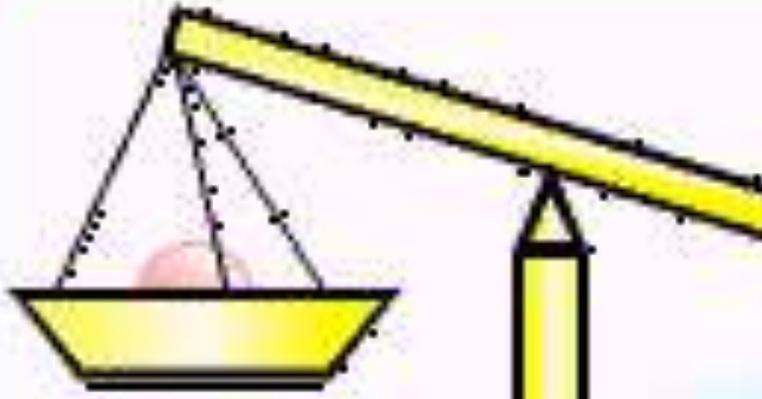
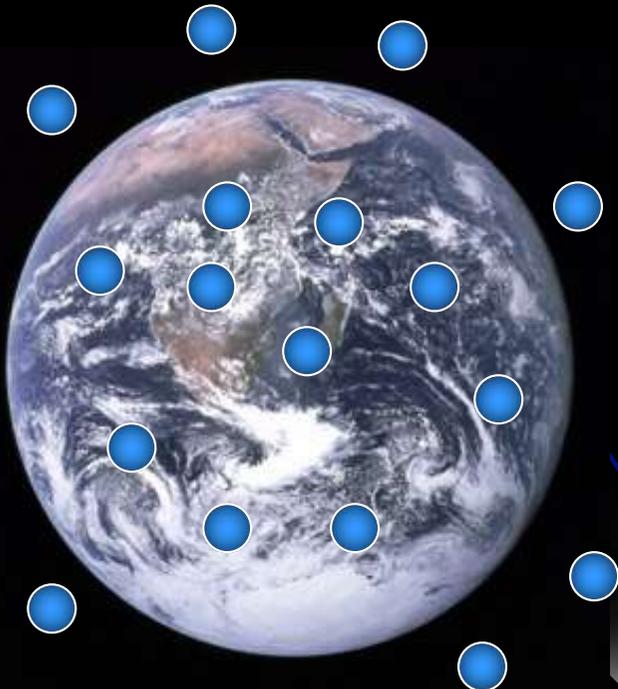
存在量

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



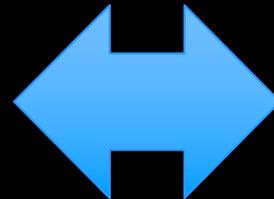
地球の体積の中にも
たった500g程度だが
宇宙のサイズになると
影響が大変大きい(サイエンスゼロ)

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

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



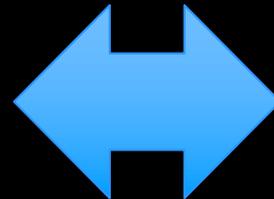
観測手法による分類

- 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

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

本講義では横綱候補のWIMP等を、
発見後に詳しく調査可能な直接検出法を詳説

WIMPの代表的候補 超対称性粒子ニュートラリーノ

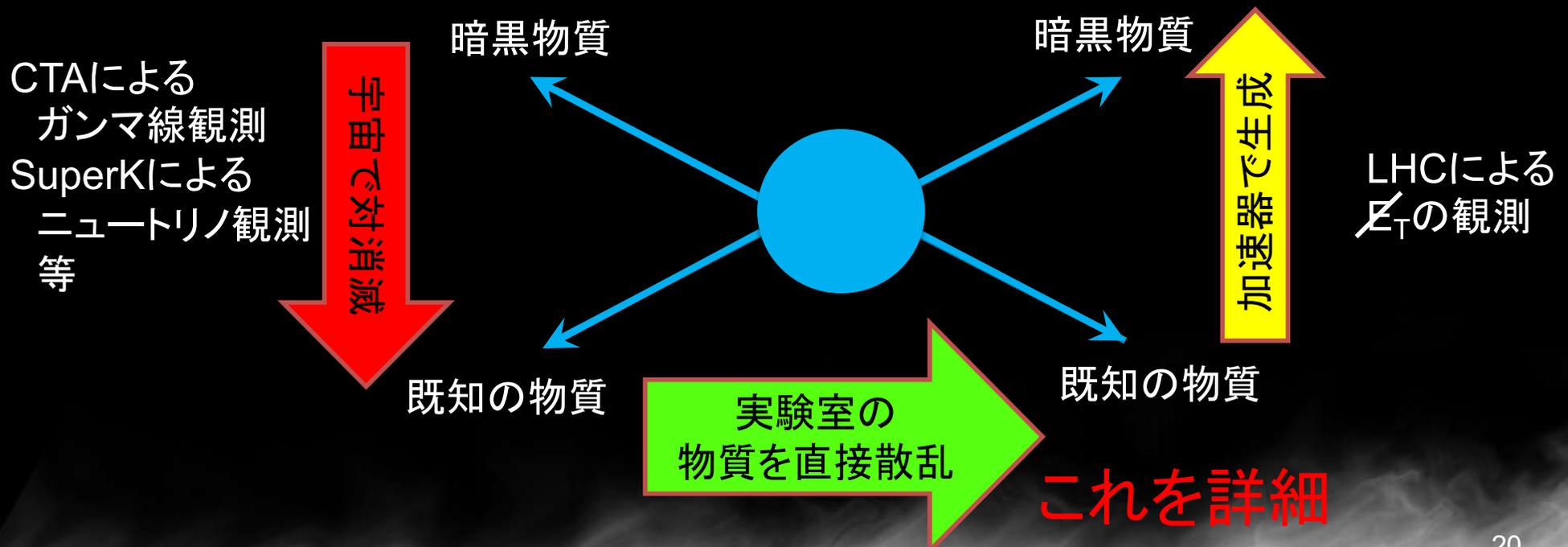
	SM particles	SUSY particles
Quark	u d c s t b	\tilde{u} \tilde{d} \tilde{c} \tilde{s} \tilde{t} \tilde{b}
Lepton	e ν_e μ ν_μ τ ν_τ	\tilde{e} $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\mu}$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_\tau$
Higgs	H^+ H^- H_1^0 H_2^0 A^0	\tilde{H}^+ \tilde{H}^- \tilde{H}_1^0 \tilde{H}_2^0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

- 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



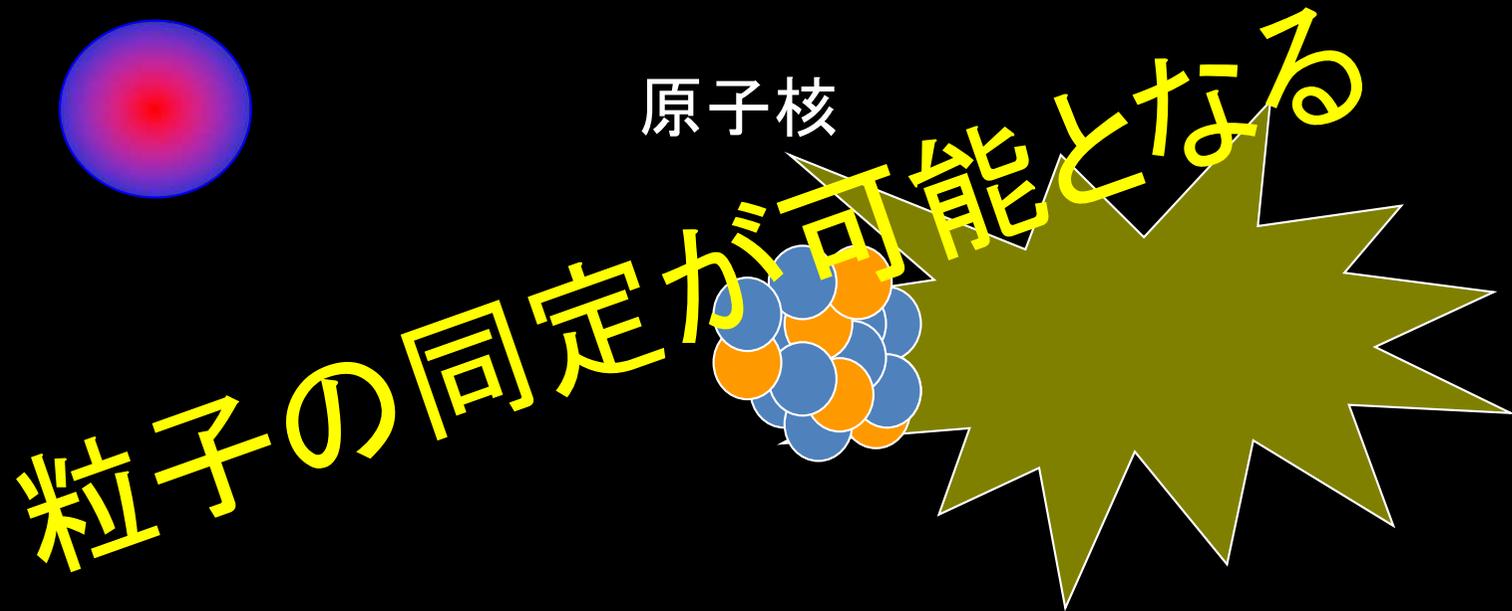
直接検出の方法

- 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



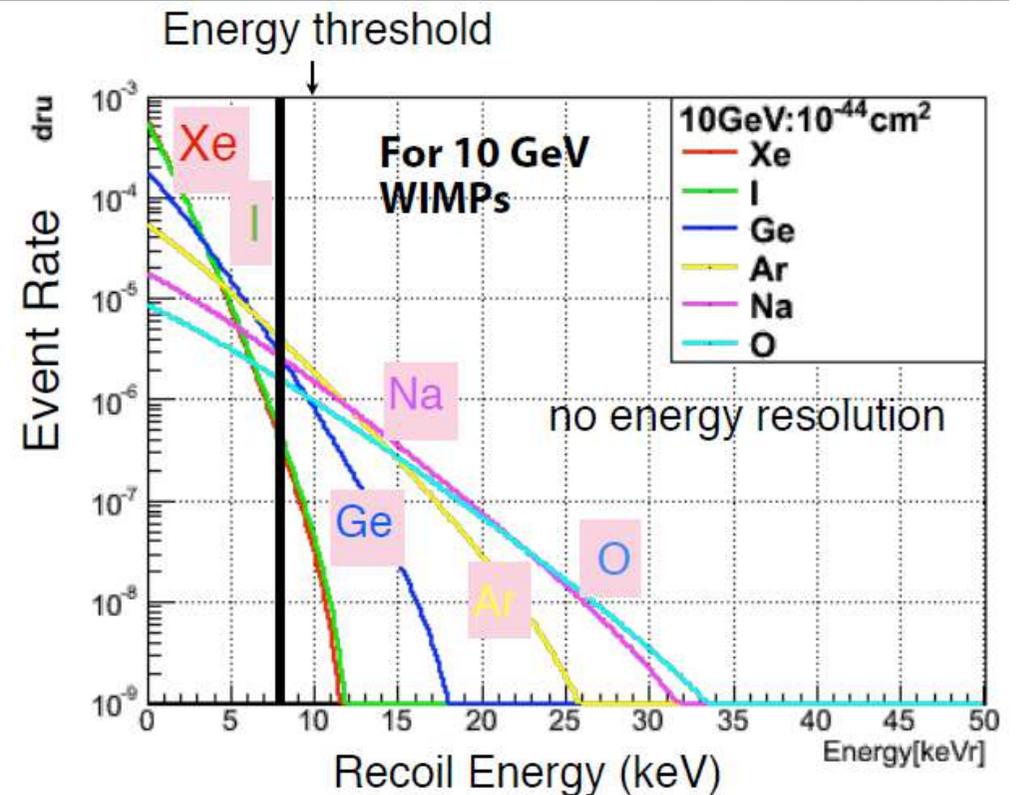
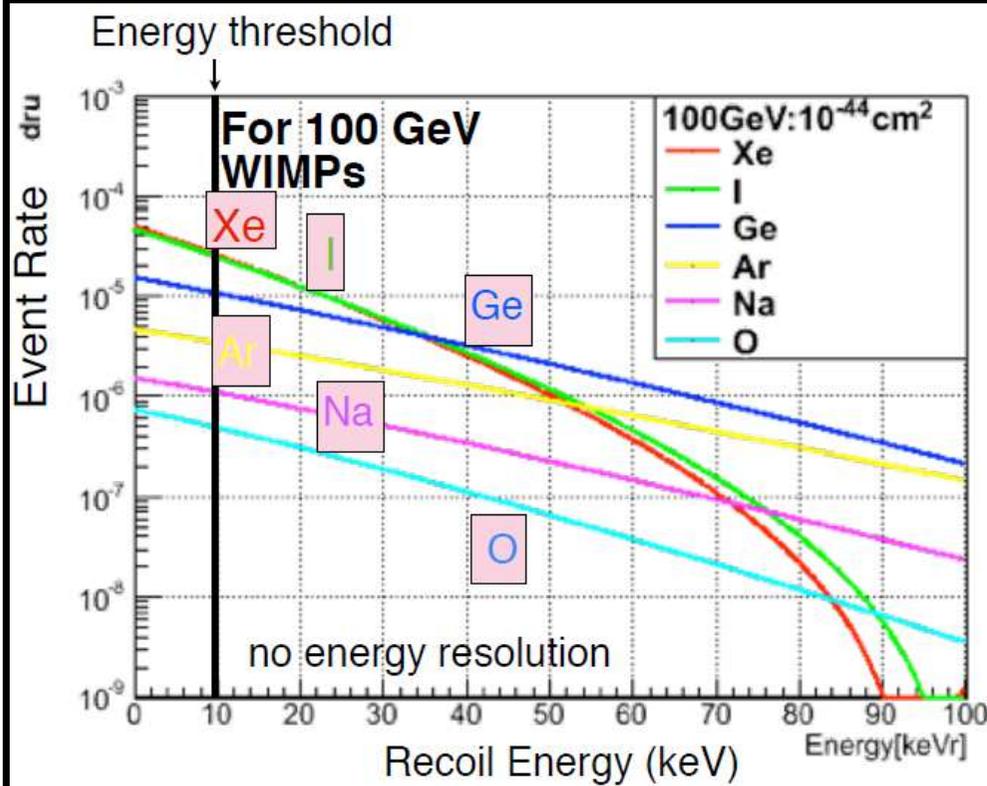
宇宙の彼方へ

反応時の信号を検出

- 付与されるエネルギー分布で質量が求まる
- 反応の頻度で相互作用の強さが求まる

直接検出の方法

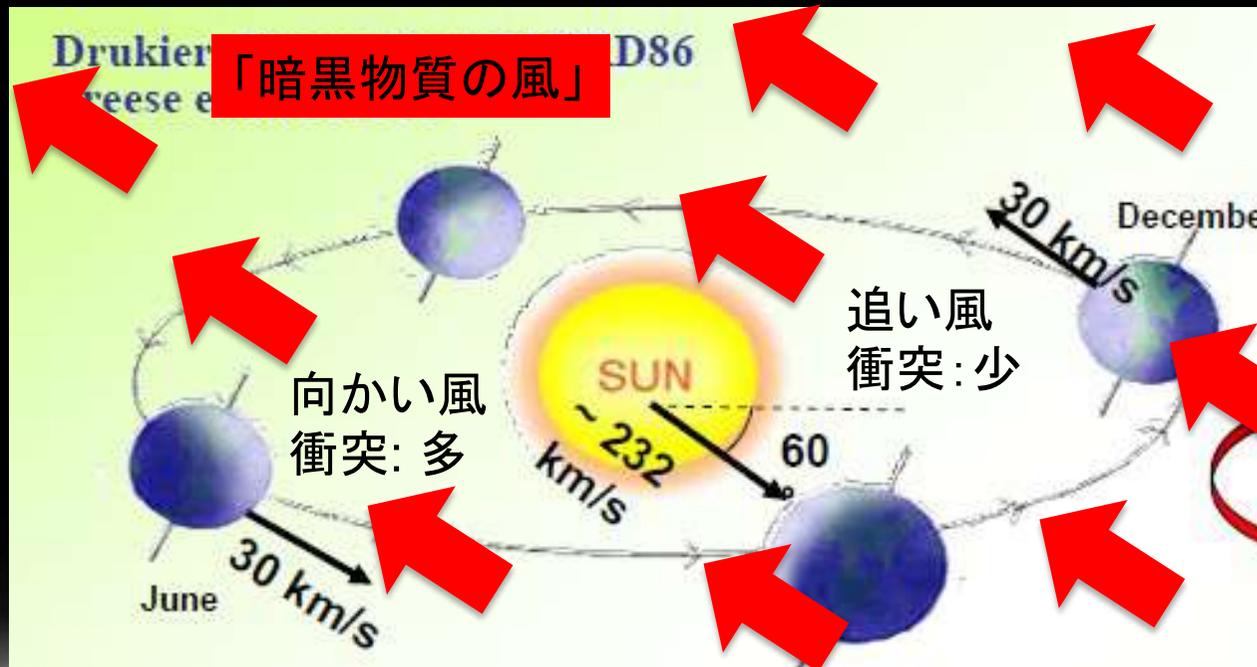
- 通常の物質が反跳される現象を測定



- 付与されるエネルギー分布で質量が求まる
- 反応の頻度で相互作用の強さが求まる

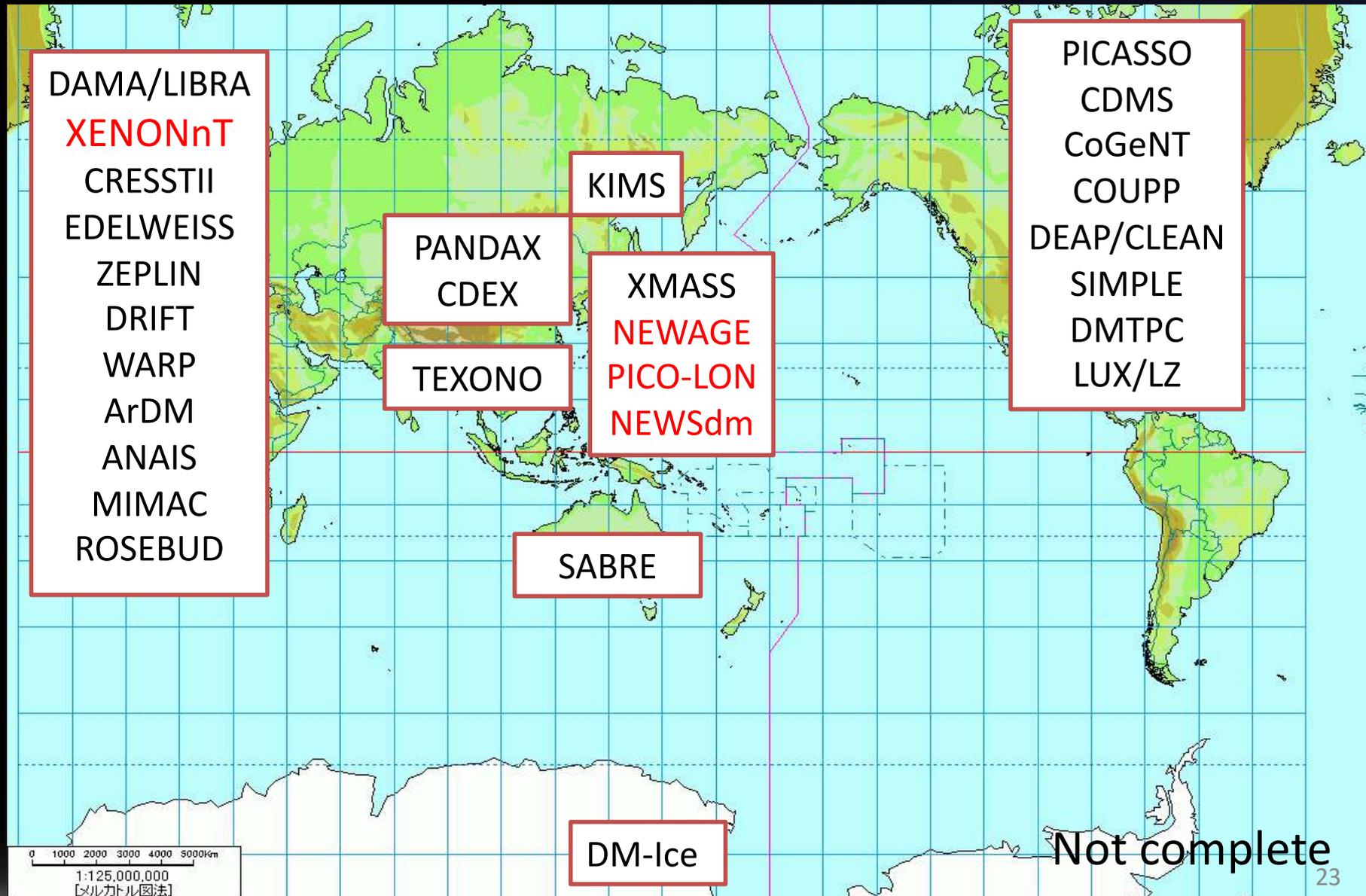
もう一つの特徴： 暗黒物質の「風」と季節変動

- 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**



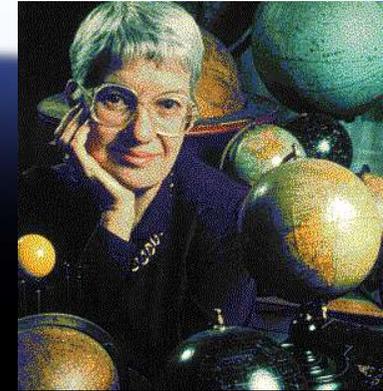
実は変動を
観測したと主張
する実験グループ
もある！

世界中で30以上の実験！

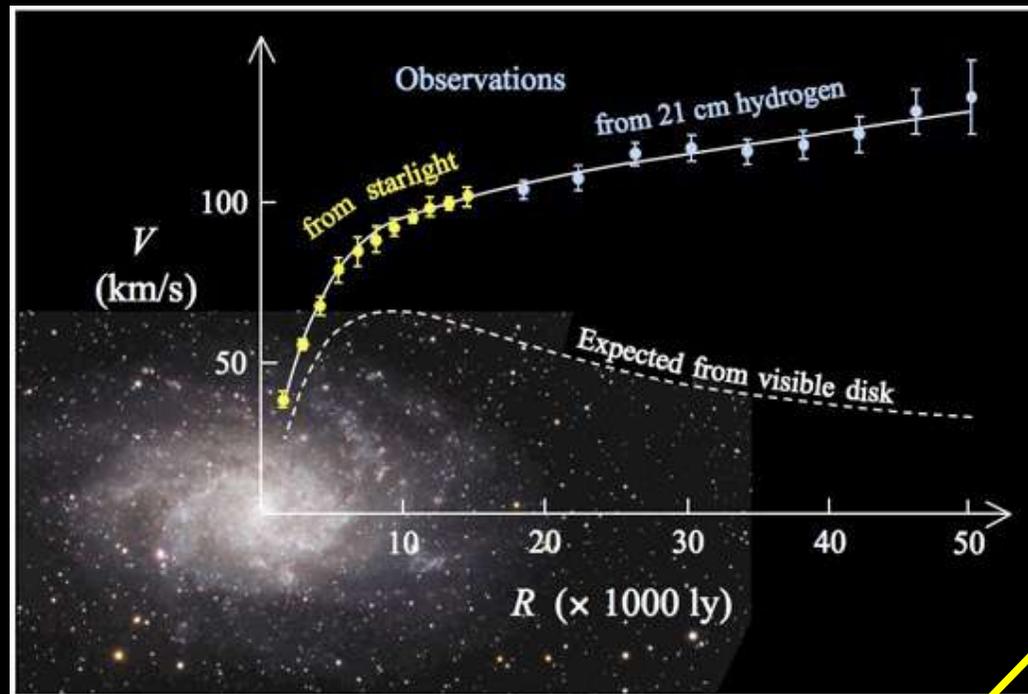


暗黒物質存在の証拠

- 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



衝突頻度

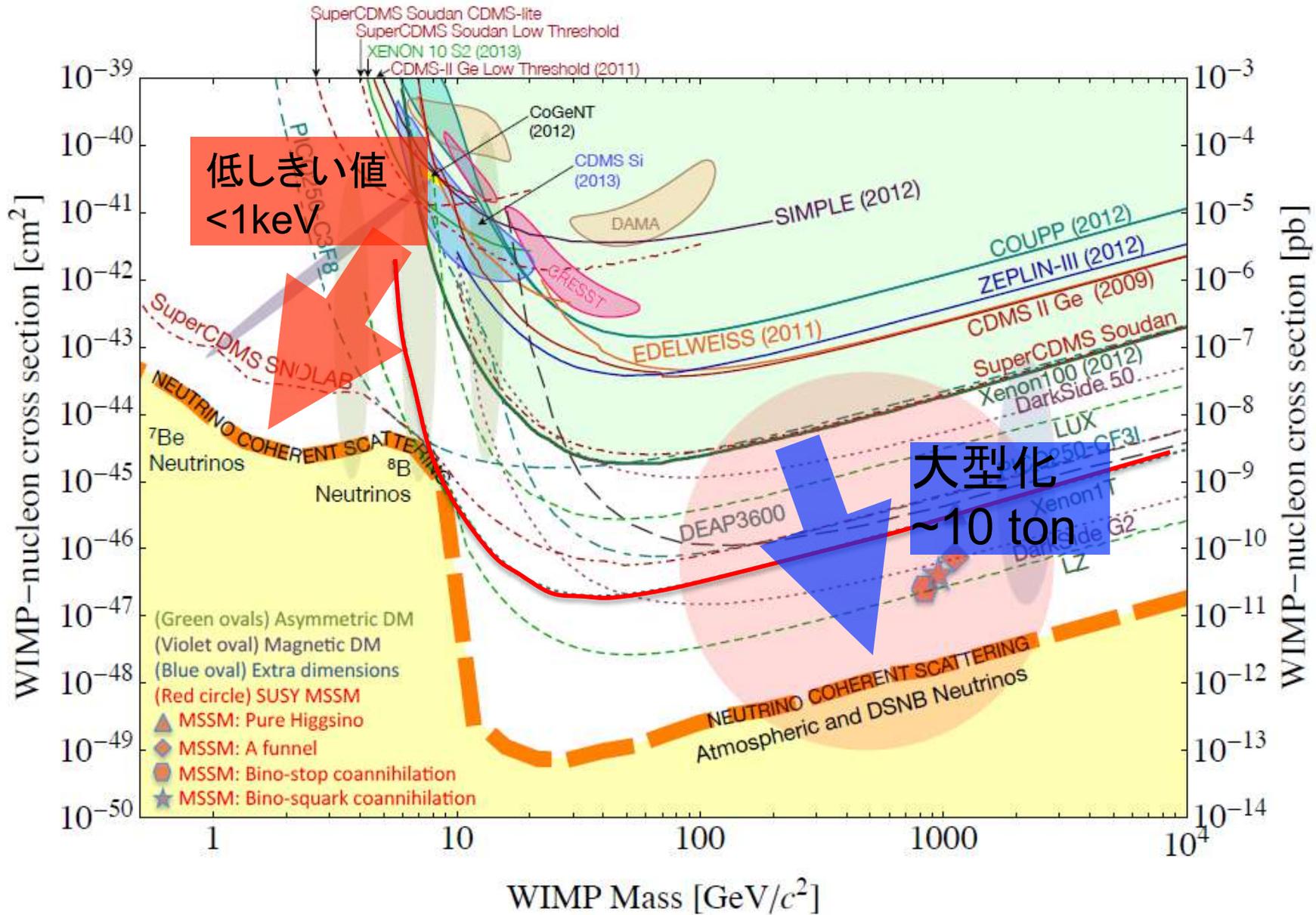


超重要！
後で出てきます

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

現在と将来の方向性

衝突頻度



探索実験の紹介

国内外で行われている実験

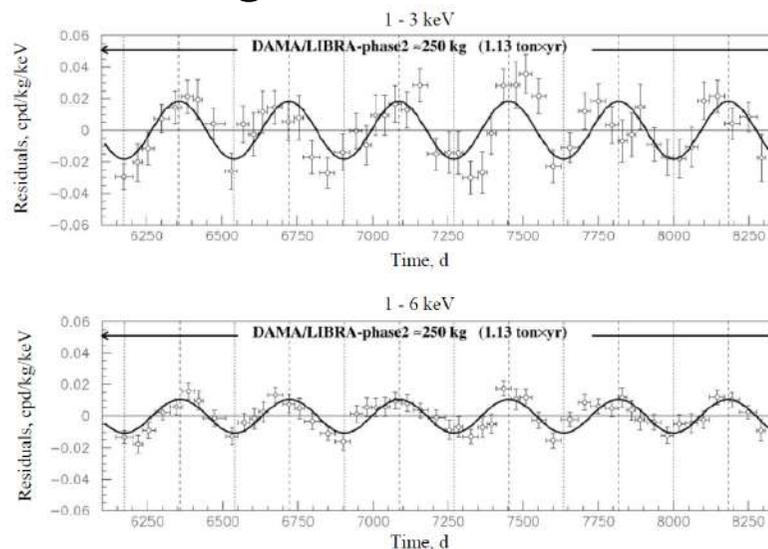
- 研究開発
 - 徳島大: PICOLON
 - 名古屋大: NEWSdm
 - 東京大学: 結晶の異方性
 - 他多数研究開発中
 - 小型装置で実験中
 - 神戸大: NEWAGE
 - 超大型・世界最高感度で実験予定
 - 東京大・名古屋大・神戸大: XENONnT実験に参加
- 暗黒物質の飛んでくる量の変動を見よう！
- 暗黒物質の飛んでくる方向を見よう！
- まずは暗黒物質を直接観測するのが最初！
-



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



PICOLONグループが開発した
超高純度NaI(Tl)検出器

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

実験の状況



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

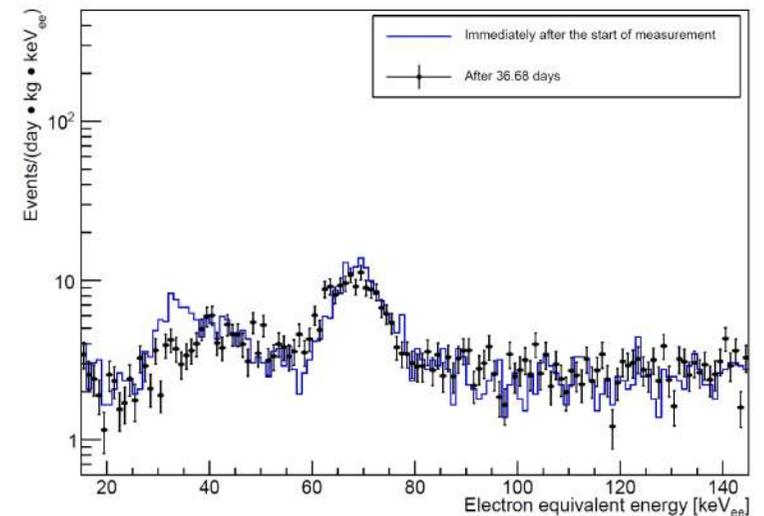
Nal(Tl)検出器を2個インストール

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 ($T_{1/2} = 58 \text{ d}$)と ^{126}I ($T_{1/2} = 13 \text{ d}$)が強い。

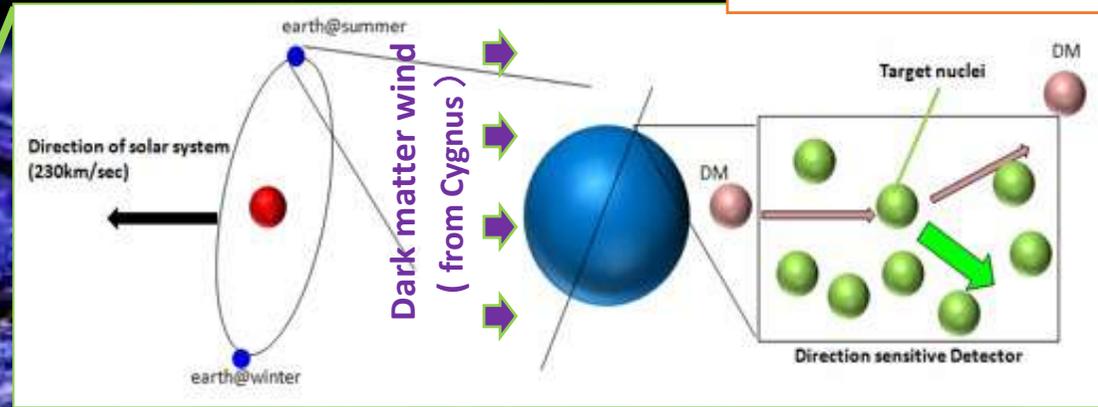
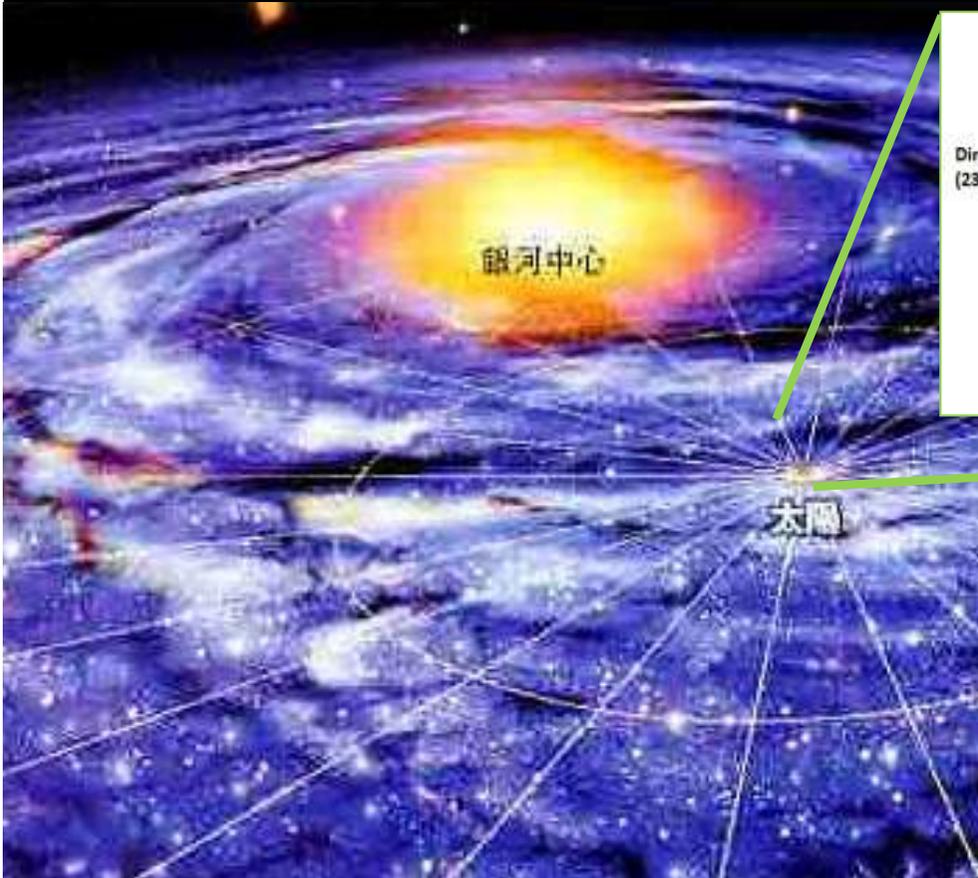
2個を1つのシールド（左写真）に入れて低バックグラウンド測定中
単独のNal(Tl)で $2 \text{ day}^{-1} \text{ keV}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ を達成

右のエネルギースペクトルについて
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

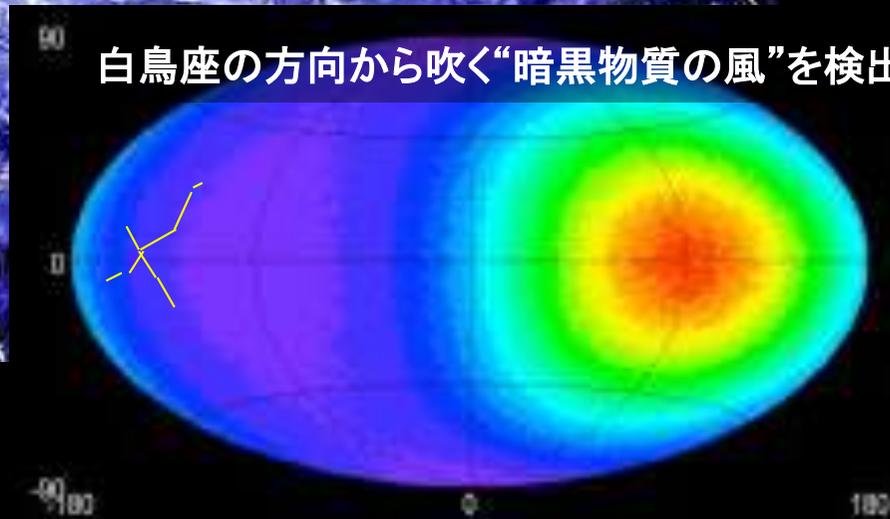
今後、大型モジュールを組み合わせた
検出器を建設予定！
最新情報はTwitterで発信中！



名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生



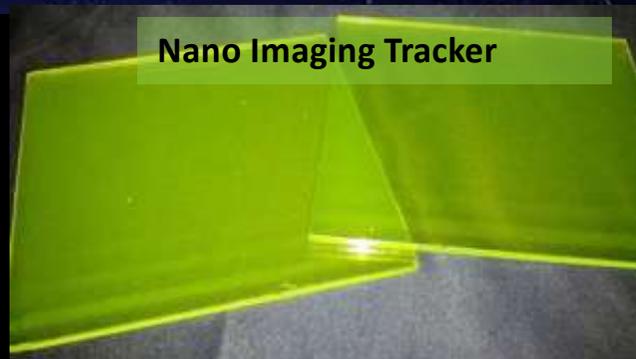
白鳥座の方向から吹く“暗黒物質の風”を検出



名古屋大学
中村先生
東邦大学
中先生



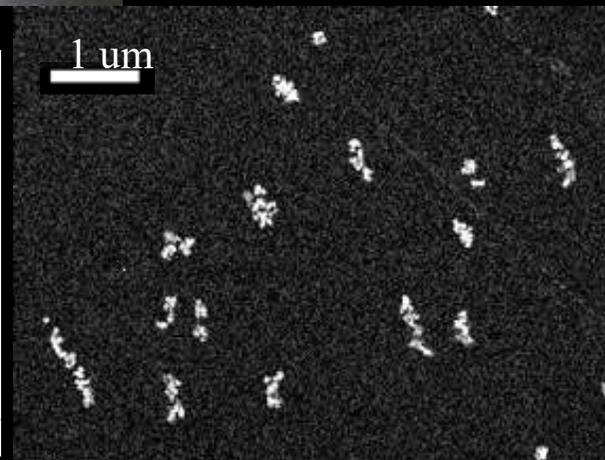
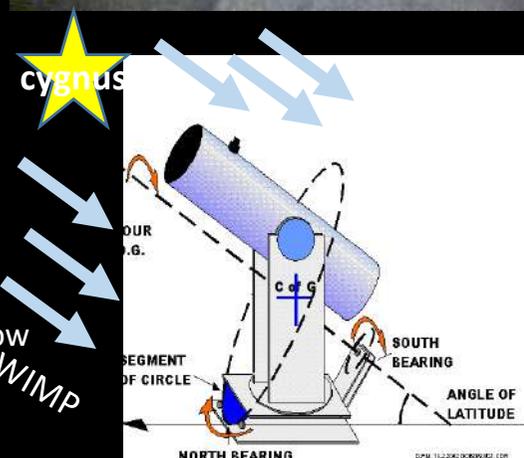
Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement



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



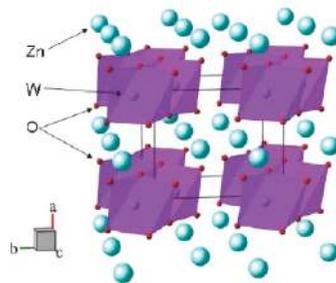
METU

WIMP

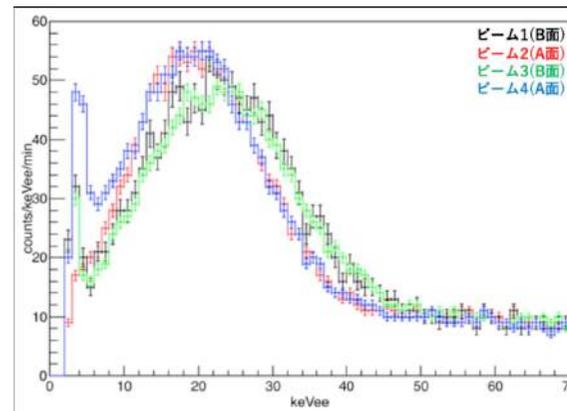


暗黒物質方向検出器の開発

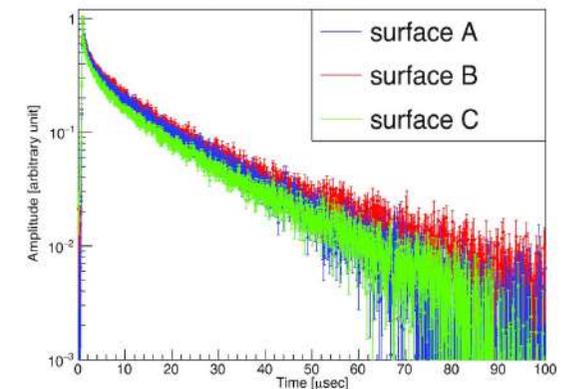
- 白鳥座の方向からやってくる暗黒物質→確実な証拠
 - 発光量が粒子の入射方向で変化する結晶を用いて暗黒物質探索
- ZnWO_4 シンチレータ
 - 単斜晶系の結晶で中性子に対して入射方向によって発光量が異なることを確認した。
 - さらには、シンチレーションの減衰時定数が粒子の入射方向によって異なることを突き止めた。



中性子に対する応答の違い



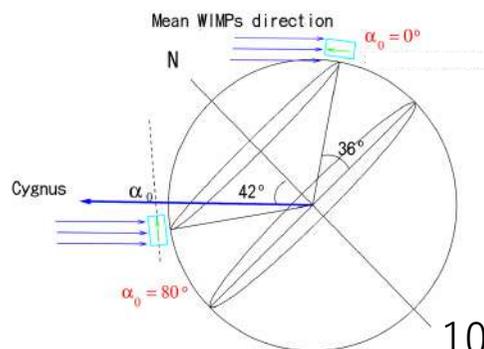
入射方向による時定数の違い



どう使うかは工夫次第!

1.ただ置いておく

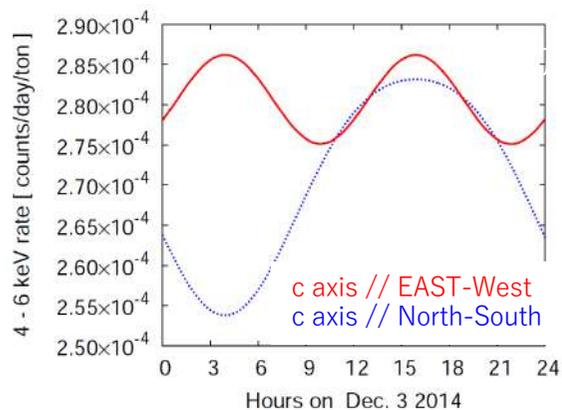
2.冷やす



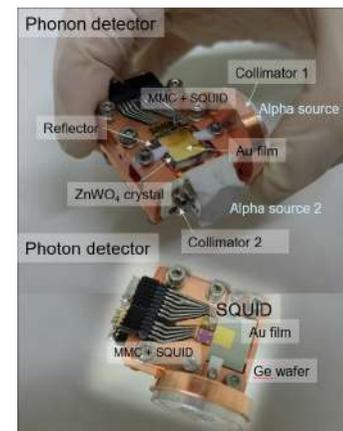
10ton位あれば日変動が見れる

極低温熱量計型検出器
photonとphononの同時測定

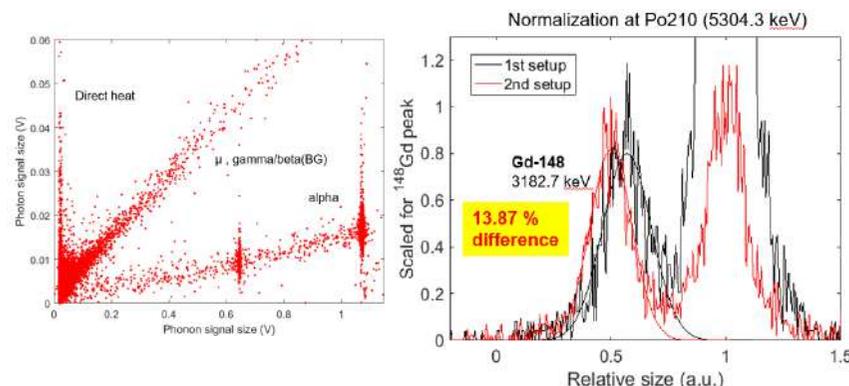
熱として全エネルギーを測定し、
発光量も測定できれば入射方向情報
が得られる。



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

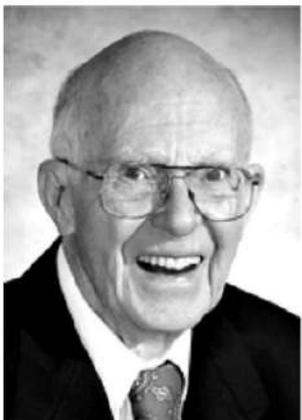
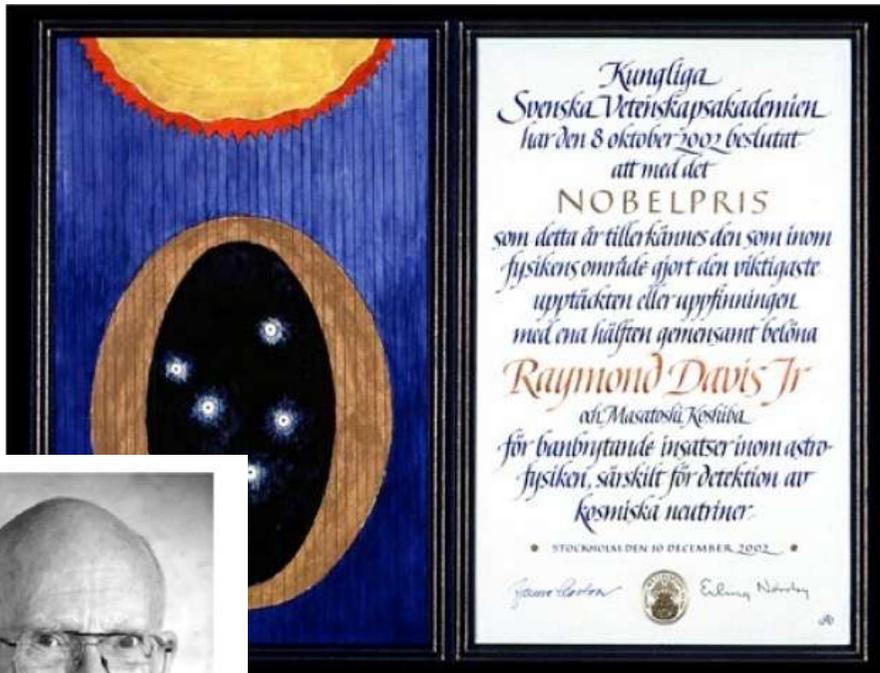
NEWAGE実験

神戸大学 身内先生



<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



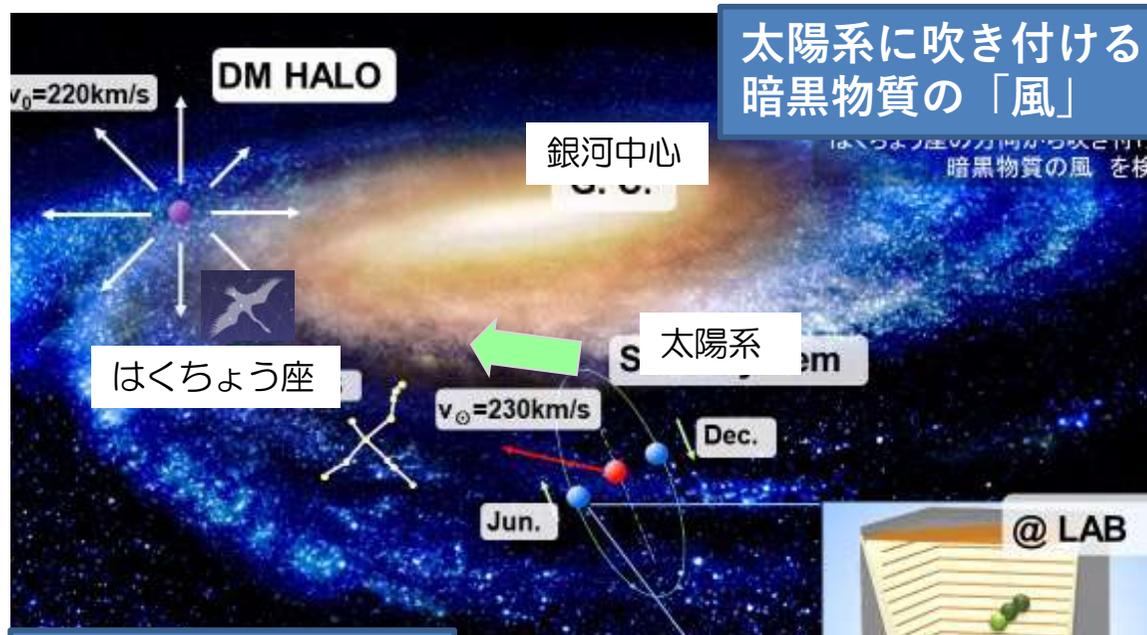
Masatoshi Koshiba
Prize share: 1/4

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

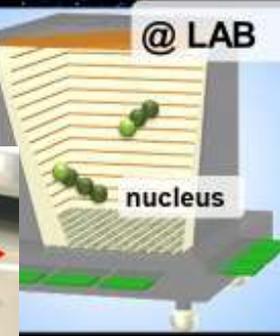
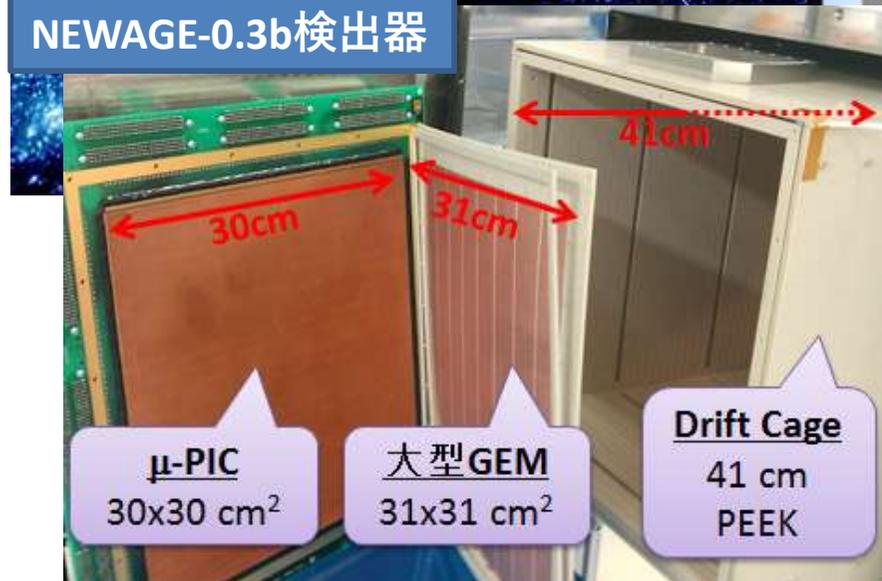


太陽系に吹き付ける暗黒物質の「風」

NEWAGEメンバーと次世代器



NEWAGE-0.3b検出器



XENON実験@イタリア

東京・名古屋・神戸大
森山他

グランサッソ研究所

世界最高感度でガチで発見を狙う代表的実験





THE UNIVERSITY OF CHICAGO
Chicago

UC San Diego
UCSD

Rice

PURDUE UNIVERSITY
Purdue

Subatech
Subatech

Coimbra

LPNHE
LPNHE

INFN
Torino

Bologna

L'Aquila

INFN
LNGS

Napoli

Weizmann

清華大學
Tsinghua University
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

~180 scientists, from 27 institutions
日本から14名 (学生は東大から1名、神戸2名参加)



Credit: XENON Collaboration



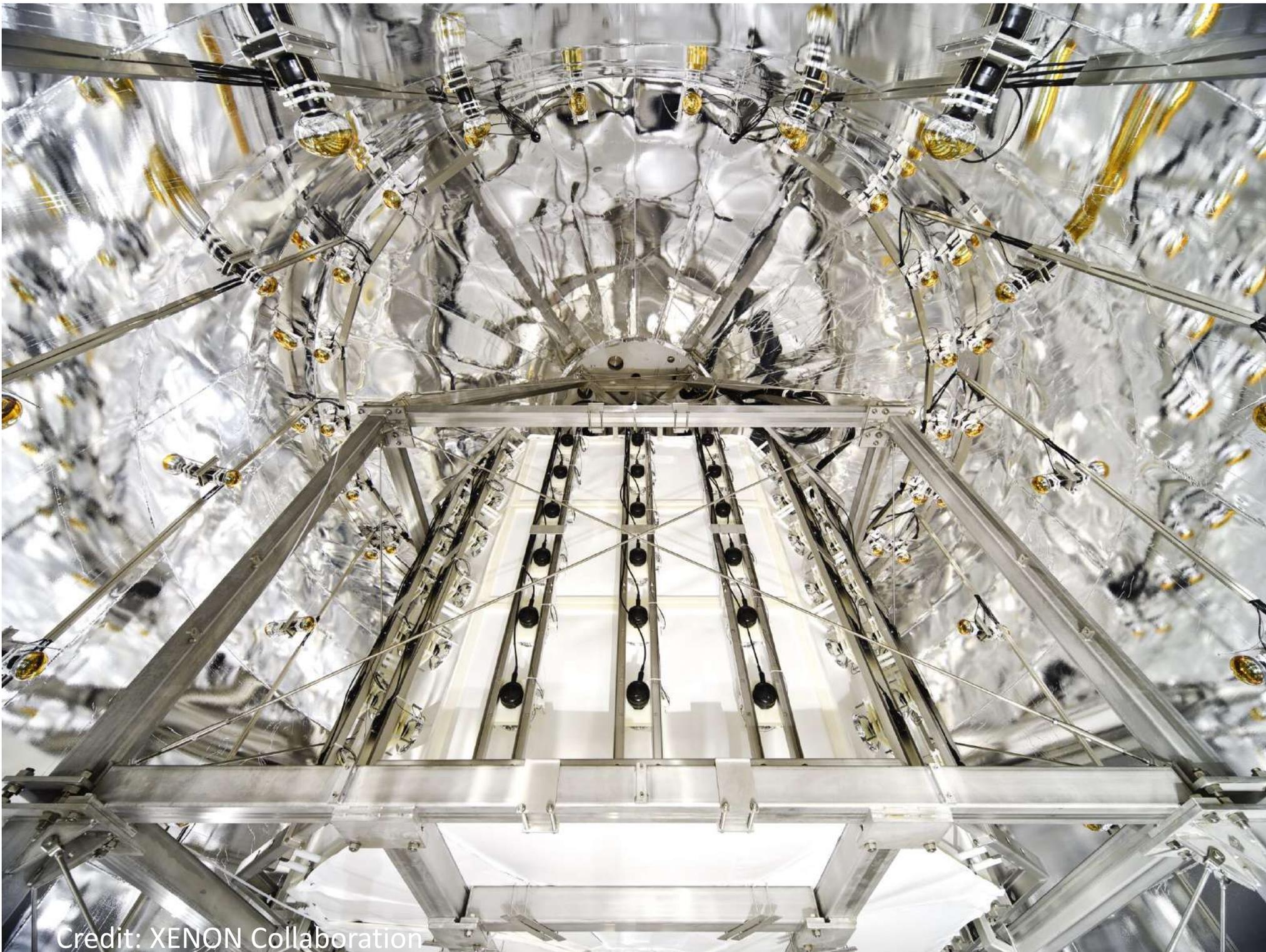
Credit: XENON Collaboration



Credit: XENON Collaboration



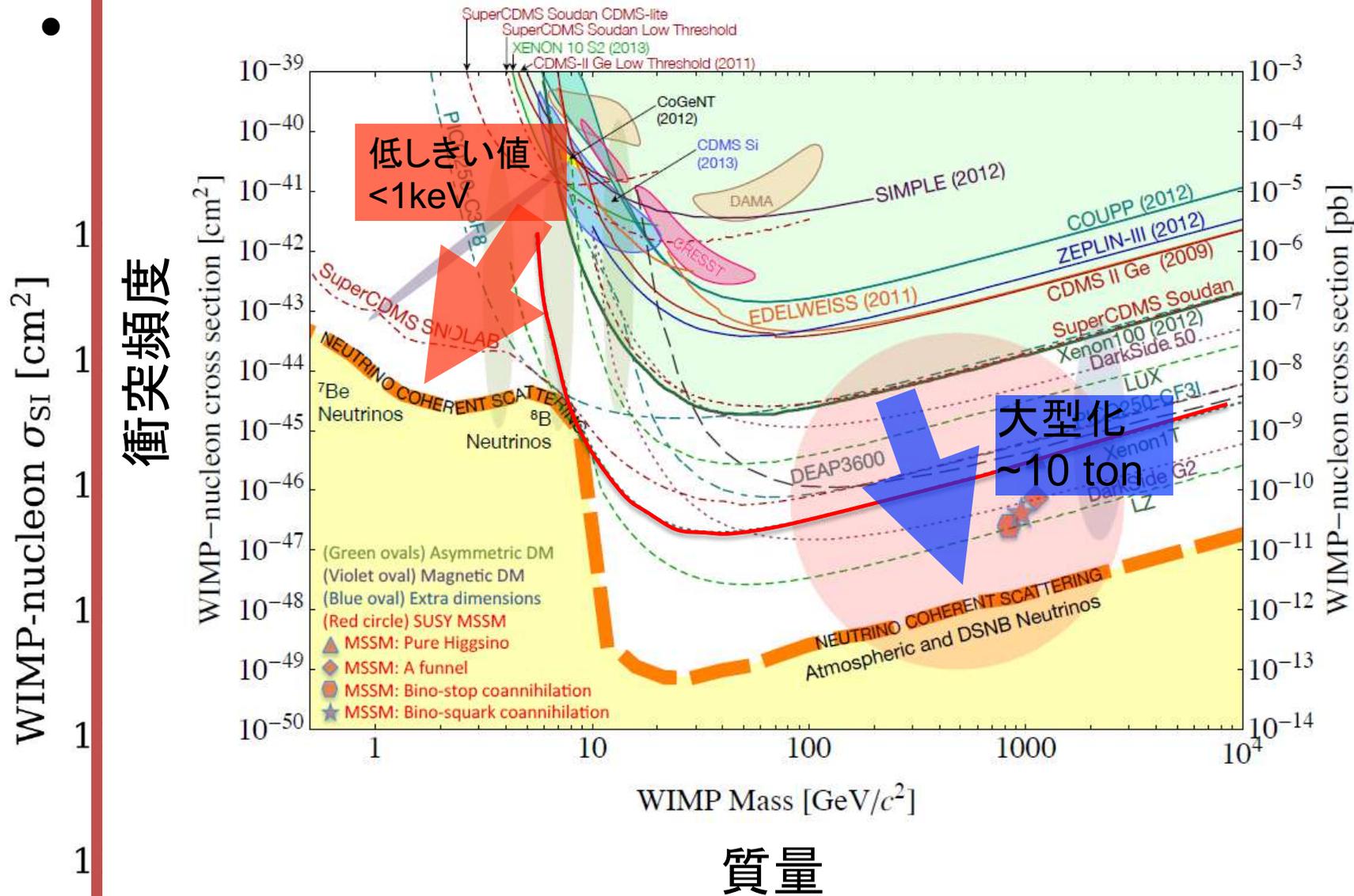
Credit: XENON Collaboration



Credit: XENON Collaboration

検出の原理は
サイトでの動画をどうぞ

現在と将来の方向性



で

感度

度

る



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！

東京大学のXENONグループ



IPMUメンバーがXENON賞を受賞

LXeを用いた大型実験(キセノンを数トンから10トン使用)の競争

- XENON実験(イタリア、本研究室参加)
 - データ収集中！もうすぐ初の暗黒物質探索結果発表
 - とはいえ前進実験の検証レベルの観測量
 - 今後5年に渡り重要な発見に至る努力を続ける
- LZ実験(アメリカ)
 - 昨年夏前に初結果を公表したもののジャーナルに掲載されてない...
- PANDA-X実験(中国)
 - 改良中？

世界中が横綱候補のWIMPを狙っている⁴⁷

東京大学のXENON実験紹介サイト

<https://sites.google.com/view/xenon-ut/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0>



XENON実験の公サイト

<https://www.dsfc.univaq.it/xenon/>





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。
- 是非一緒に研究し発見の現場で力を合わせよう！

森山 茂栄 moriyama@icrr.u-tokyo.ac.jp

カイ・マルテンス kai.martens@ipmu.ac.jp