



# 暗黒物質

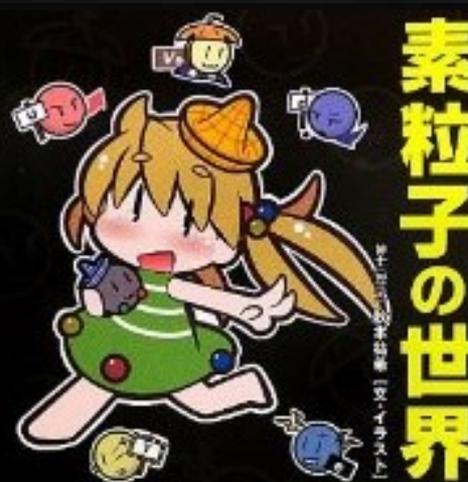
2017年3月8日

ICRR

宇宙・素粒子スプリングスクール  
最先端研究

神戸大学

身内賢太郎



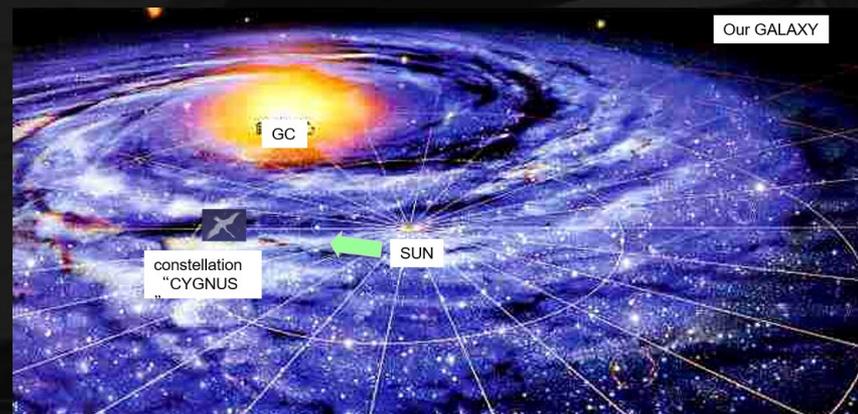
進路に悩む大学3年生向け

## 宇宙に躍る5日間

宇宙・素粒子

### SPRING SCHOOL

応募は1.13まで



# 素粒子



# はじめまして

- 身内賢太郎
- 神戸大学 准教授

- 職業 大学教員

- 好物



写真はイメージです。

- 実験 XMASS NEWAGE

- 野望

神戸 身内



すべて ニュース 地図 画像 動画

約 445,000 件 (0.65 秒)

身内 賢太郎 - 神戸大学 大学院理学研究科 物理学専攻 粒子物

[ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~miuchi/](http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~miuchi/) ▼

2012/04/11 - e-mail: [miuchi@panda.kobe-u.ac.jp](mailto:miuchi@panda.kobe-u.ac.jp) 住所〒657-8501 神戸市 灘区 六

大学院理学研究科 物理学専攻自然科学総合研究棟3号館317号室 アクセス方法、

[www.kobe-u.ac.jp/~miuchi/](http://www.kobe-u.ac.jp/~miuchi/) 5637. FAX +81(0)78-803-5662



# みんな大好き ノーベル賞

## The Nobel Prize in Physics 2013



Photo: A. Mahmoud  
**François Englert**  
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud  
**Peter W. Higgs**  
Prize share: 1/2

## The Nobel Prize in Physics 2015



Photo: A. Mahmoud  
**Takaaki Kajita**  
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud  
**Arthur B. McDonald**  
Prize share: 1/2

ヒッグス粒子の発見：

ニュートリノ振動発見：

# 「標準理論」を超えた物理

- ニュートリノ質量
- 重力波
- ダークエネルギー
- **ダークマター**
- ヒッグスの性質解明



<http://legacy.kek.jp/ja/activity/ipns/T2K.html>

暗黒エネルギー  
「すばる」

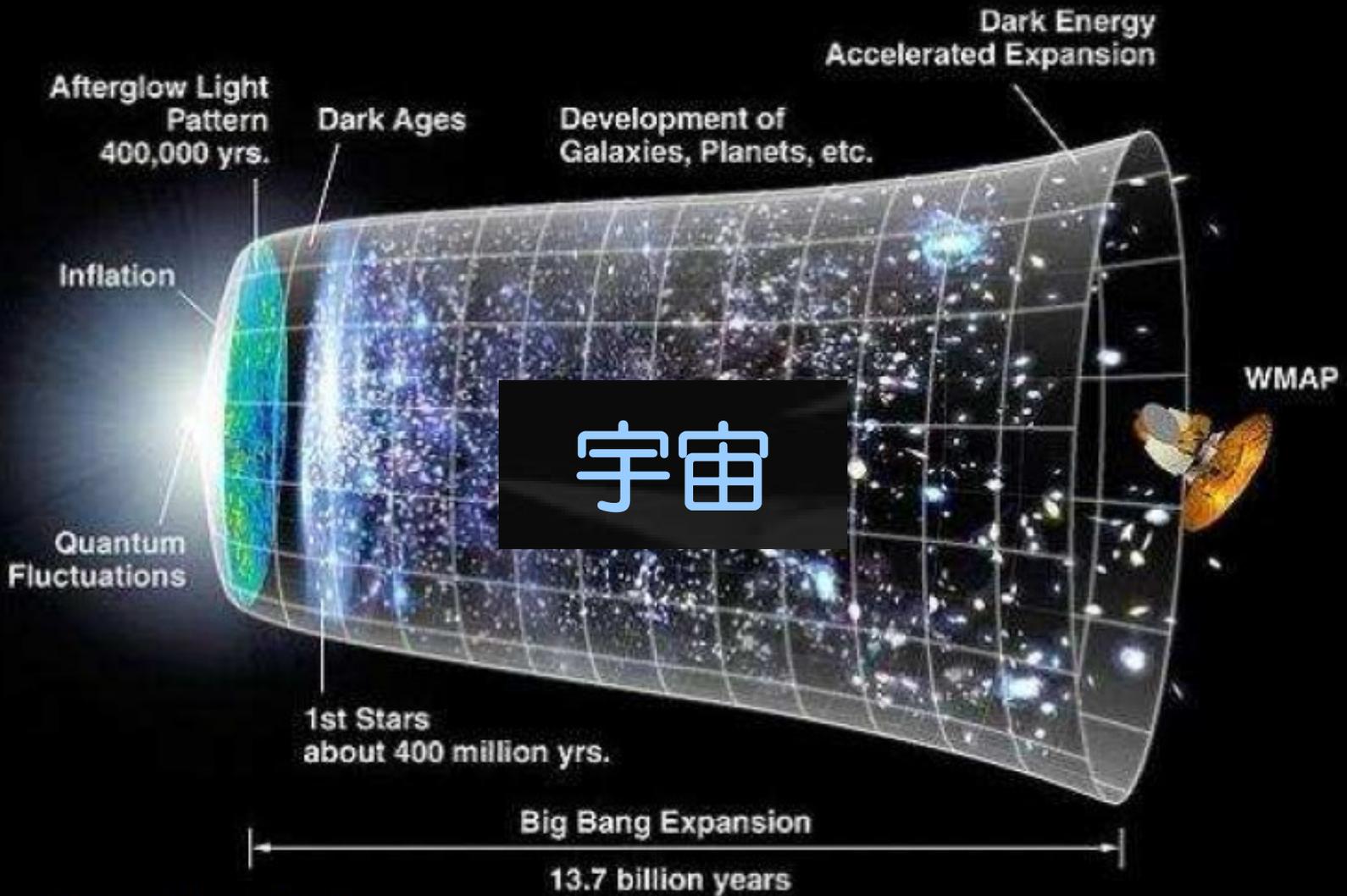


[http://www.naoj.org/j\\_index.html](http://www.naoj.org/j_index.html)

重力波「かぐら」

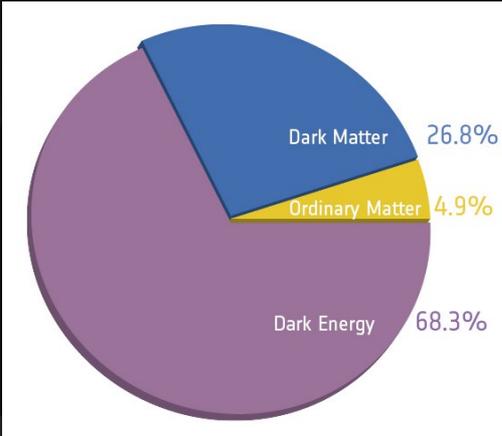
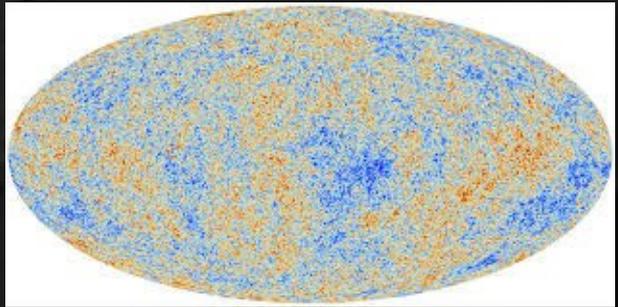


<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



Credit: NASA, WMAP

95% οφ τηε υνιπερσε ισ ΥΝΚΝΟΩΝ !



宇宙の理解

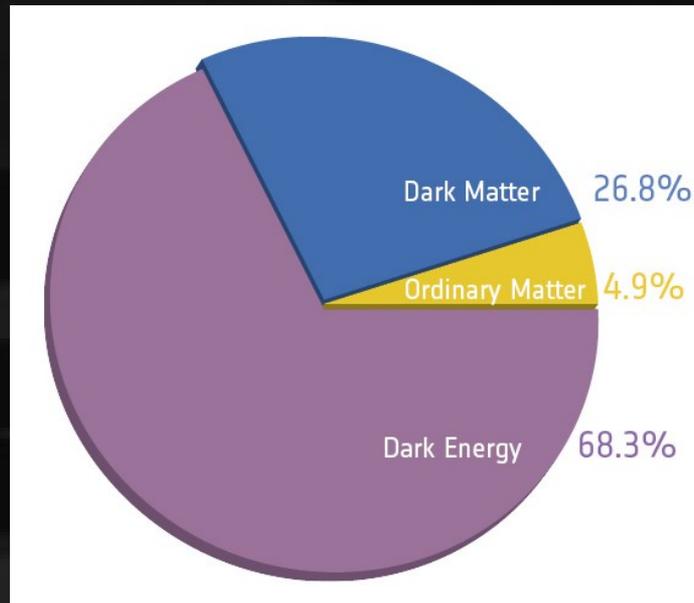
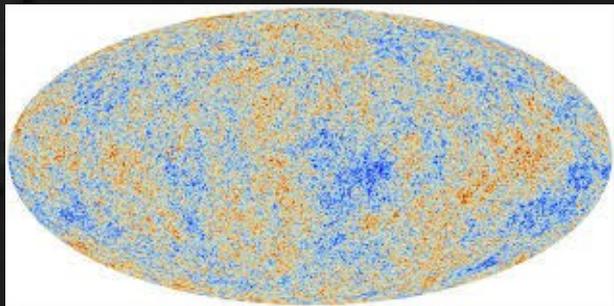
# Δαρκ Ματτερ

A collection of various icons representing different concepts, including:

- Question marks, exclamation points, and symbols of uncertainty.
- Scientific and astronomical symbols like a microscope, telescope, and planet.
- Geometric shapes like squares, circles, and triangles.
- Other symbols like a bicycle, a house, and a checkmark.

これを何とか調べたい

# 宇宙の 95%はまだわからない



## ダークマター

### ■ わかっていること

- 質量をもつ物質
- 宇宙の約1/4を占める
- 運動の速度

### ■ わからないこと

- 何だかわからん。
- 質量
- 「物」との反応の仕方

これをなんとか調べたい。



身近なふしぎから宇宙のぎもんまでよくわかる!

なぜ?ど~して?

# 科学の図鑑



# 子供だって 「ダークマター」

## 宇宙空間のまっくらな部分にはなにもないの?

宇宙空間のまっくらな部分に、なにがあるか考えてみたことはありませんか? 宇宙空間には、空気がないことはわかっています。だから宇宙飛行士は宇宙での作業では、宇宙服をきて、酸素をほそゆうしています。長い間、宇宙空間のまっくらな部分にはなにもないと考えられていました。ところが研究がすすみ、なぞの物質があることがわかってきたのです。

## 目に見えないけれど、たくさんの物質があるよ



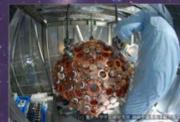
宇宙では、星や銀河など、みなさんの目で見えるものは、全体の4%くらいだといわれています。のこりは、「ダークマター」といわれる、目に見えない物質が全体の23%。正体不明のダークエネルギーが73%あると考えられています。ダークマターもダークエネルギーも、目には見えませんが、計算した結果、「ある」ということはわかっています。宇宙のなりたちにもかかわっているため、ダークマターとダークエネルギーの正体を解明するための研究がすすんでいます。

宇宙からとどく、ダークマターのわずかなしるしをとらえる!

岐阜県の神岡鉱山の山頂から1000メートル下の地底で、宇宙のなぞにせまるさまざまな実験研究をしています。



京都大学が中心になってすすめるNEWAGE実験の装置。「ダークマター」をとらえようとしている。



東京大学宇宙線研究所が中心にすすめているX-MASS実験の装置。ダークマターを観測している。

# 暗黒物質



(2015年7月23日 報道ステーション)

## 宇宙・素粒子にまたがる大きな謎

NGC 4622  
HST • WFPC2

Hubble  
Heritage

Q 1

銀河の回転速度の $r$  依存を求めよ  
(質量は銀河中心に集中しているとする)

A 1

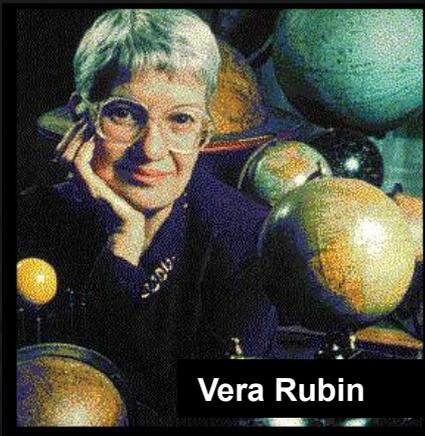
$$v \propto 1/r^{1/2}$$

# ■ ダークマター

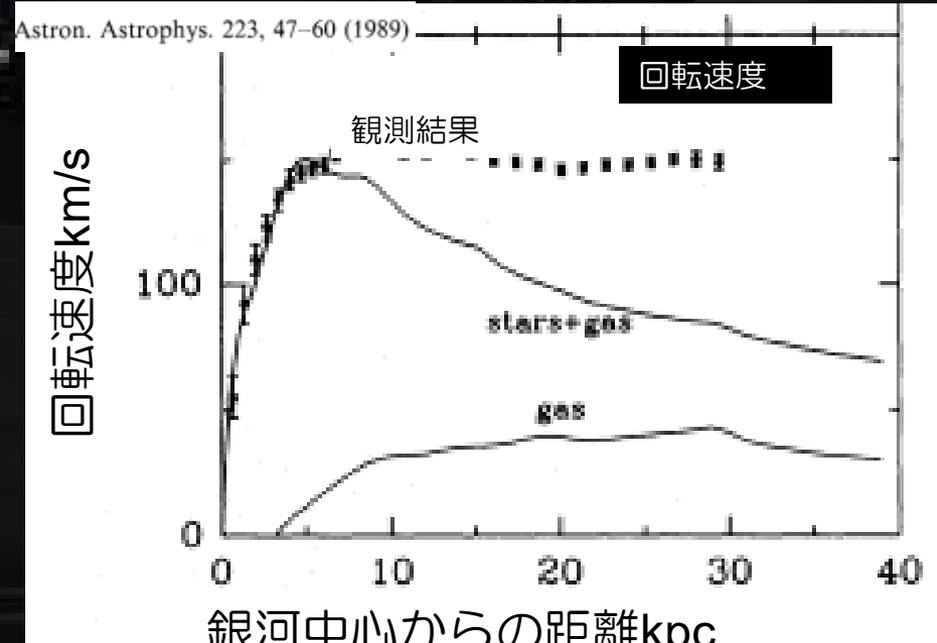
■ 初出：1930年

■ 1970年代～ 本格観測

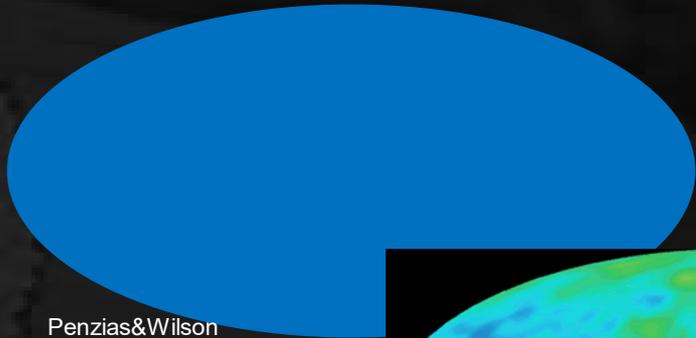
1kpc(キロパーセク) = 3260光年



- 高速で回転するには強い引力が必要
- ⇒ 星だけでは足りない
- ⇒ 「暗黒物質」があるはずだ！

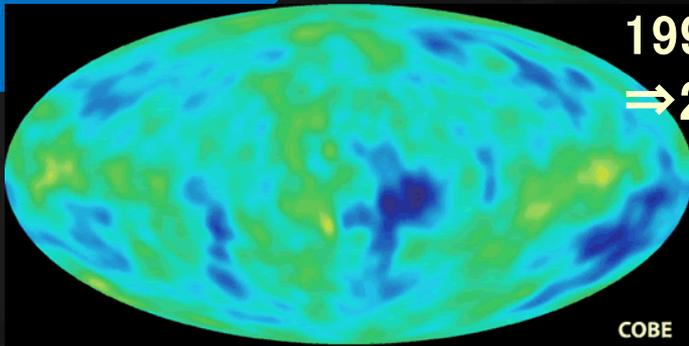


# ■ 空からくるマイクロ波（天球図）



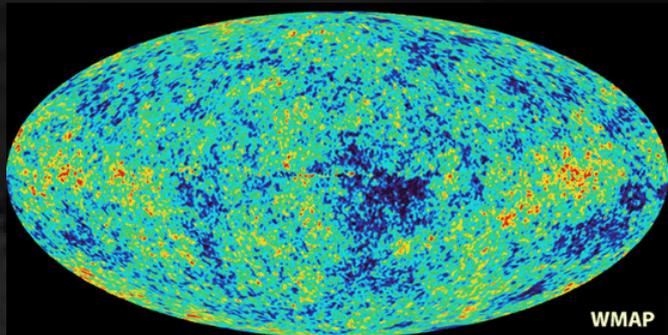
Penzias&Wilson

1965年マイクロ波が来ている  
⇒1978年ノーベル物理学賞



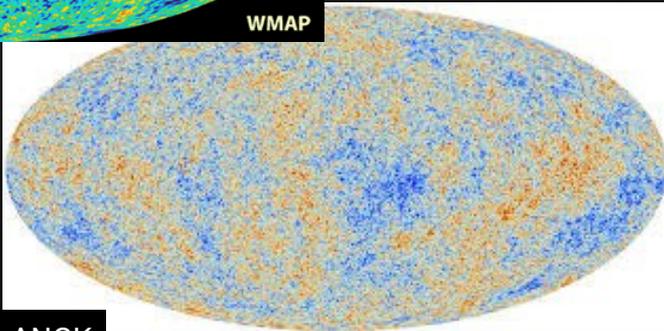
1992年 一様でない  
⇒2006年ノーベル物理学賞

COBE



WMAP

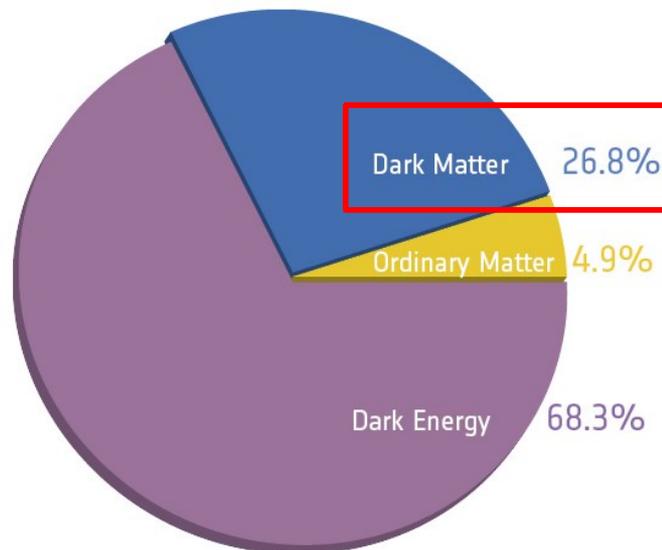
2000年以降さらに  
詳細な「ムラムラ」



PLANCK



宇宙の組成が分かった。



# それ以外にも ダークマター

## 遠方銀河の重力レンズ効果 (1990~)



暗黒物質で空間  
がゆがんでいる。

## 銀河団の衝突 (2007)

左：暗黒物質

右：通常物質

(プラズマ)

Astrophysical Journal 648 648(2006)L109

No. 2, 2006

DIRECT EMPIRICAL PROOF OF EXISTENCE OF DARK MATTER

L11

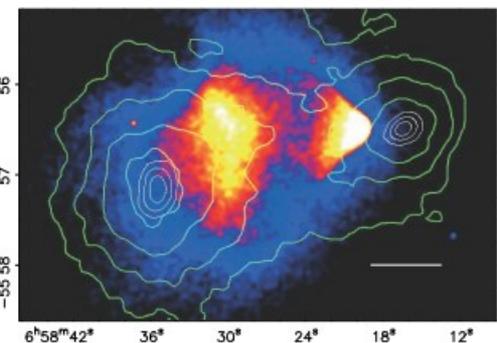
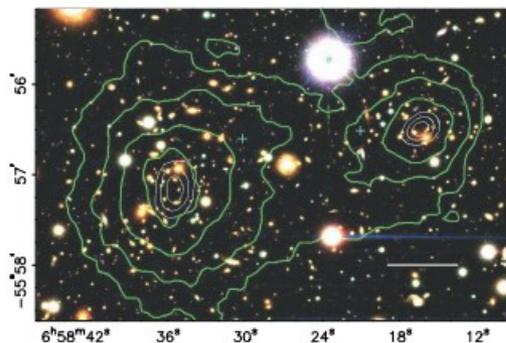
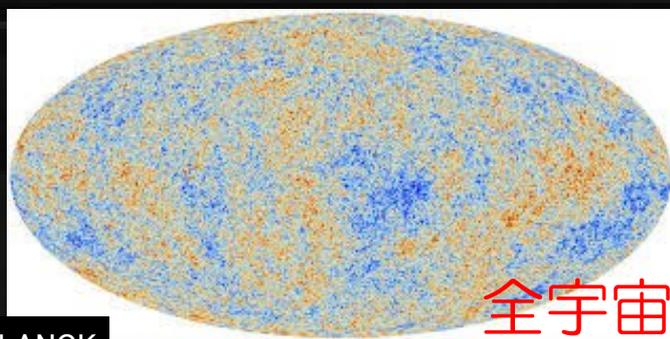


FIG. 1.—Left panel: Color image from the Magellan images of the merging cluster 1E 0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. Right panel: 500 ks *Chandra* image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak-lensing  $\kappa$  reconstructions, with the outer contour levels at  $\kappa = 0.16$  and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the  $\kappa$  peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and 99.7% confidence levels. The blue plus signs show the locations of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

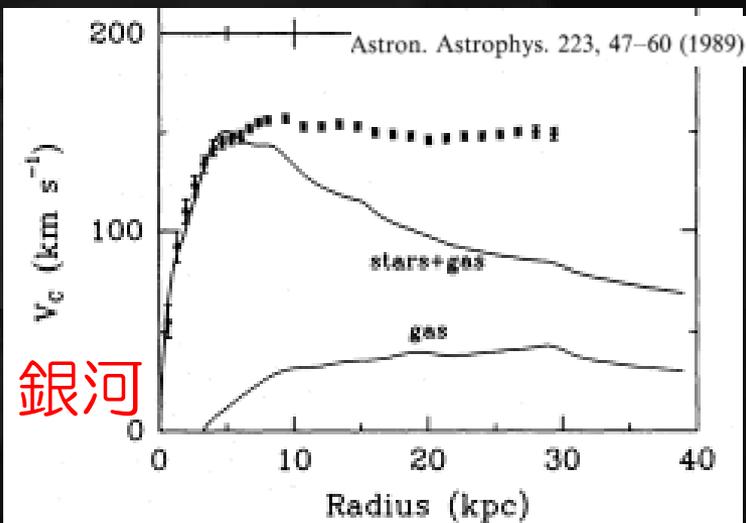


PLANCK

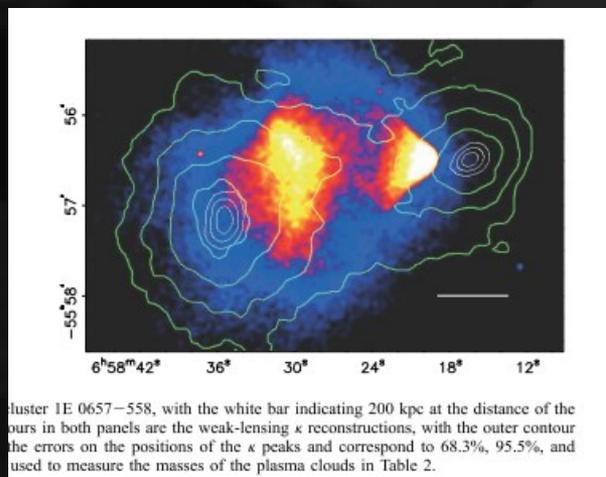
全宇宙

# 暗黒物質 @宇宙のあちこち (いろいろなスケール)

銀河団



銀河



Cluster 1E 0657-558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the ours in both panels are the weak-lensing  $\kappa$  reconstructions, with the outer contour the errors on the positions of the  $\kappa$  peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

# 暗黒物質：わかっていること

そこら中にある ( $0.3\text{GeV/cc}$ )  
我々を通りぬけている (反応が小さい)  
重力の源

予言されていた?

加速器実験

ダークマター

何だ?

質量?  
性質?

間接探索

直接探索

加速器実験

ダークマター  
何だ?

質量?  
性質?

間接探索

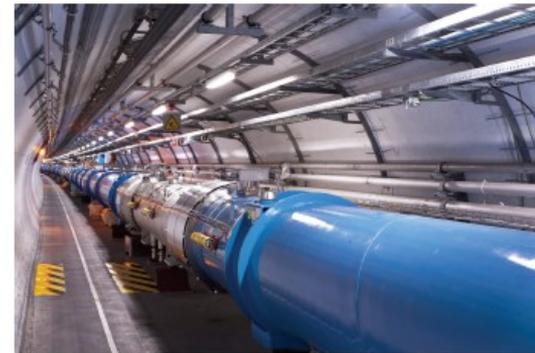
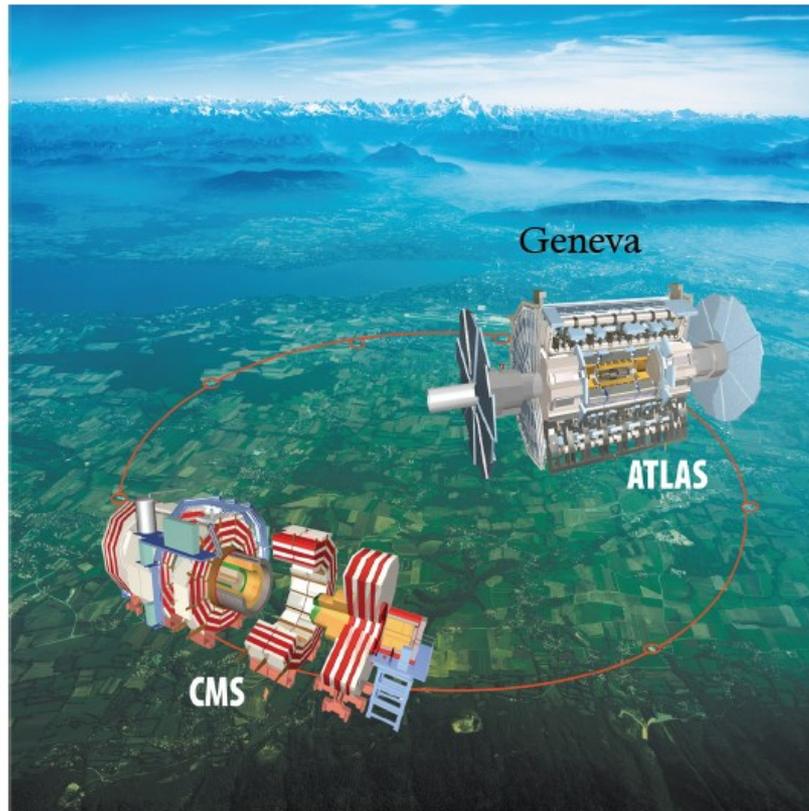
直接探索

# 加速器実験

暗黒物質をつくる

# 暗黒物質製造器：LHC

## The Large Hadron Collider



Tunnel circumference: 27 km,  
~ 100m under ground.  
1232 main + 7000 smaller magnets,  
B = 8 Tesla (@ 14TeV)  
Operating temperature: 1.9K  
4 Experiments: ATLAS, CMS,  
ALICE, LHCb.

Claus Horn: First LHC Results

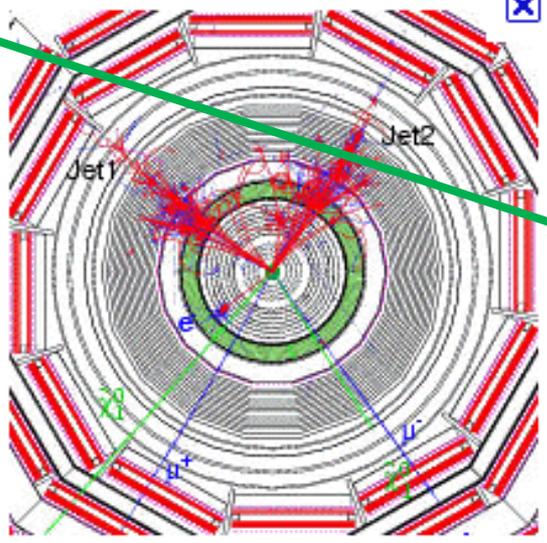
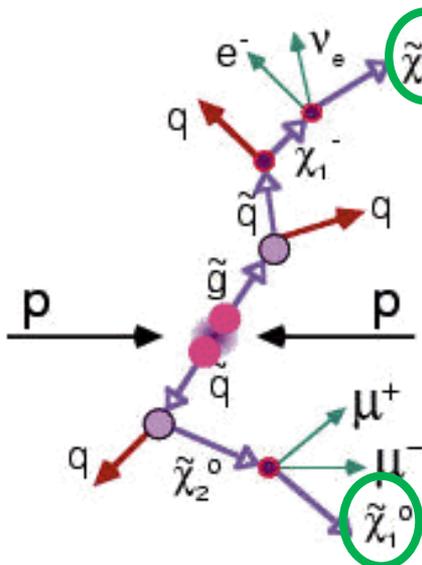
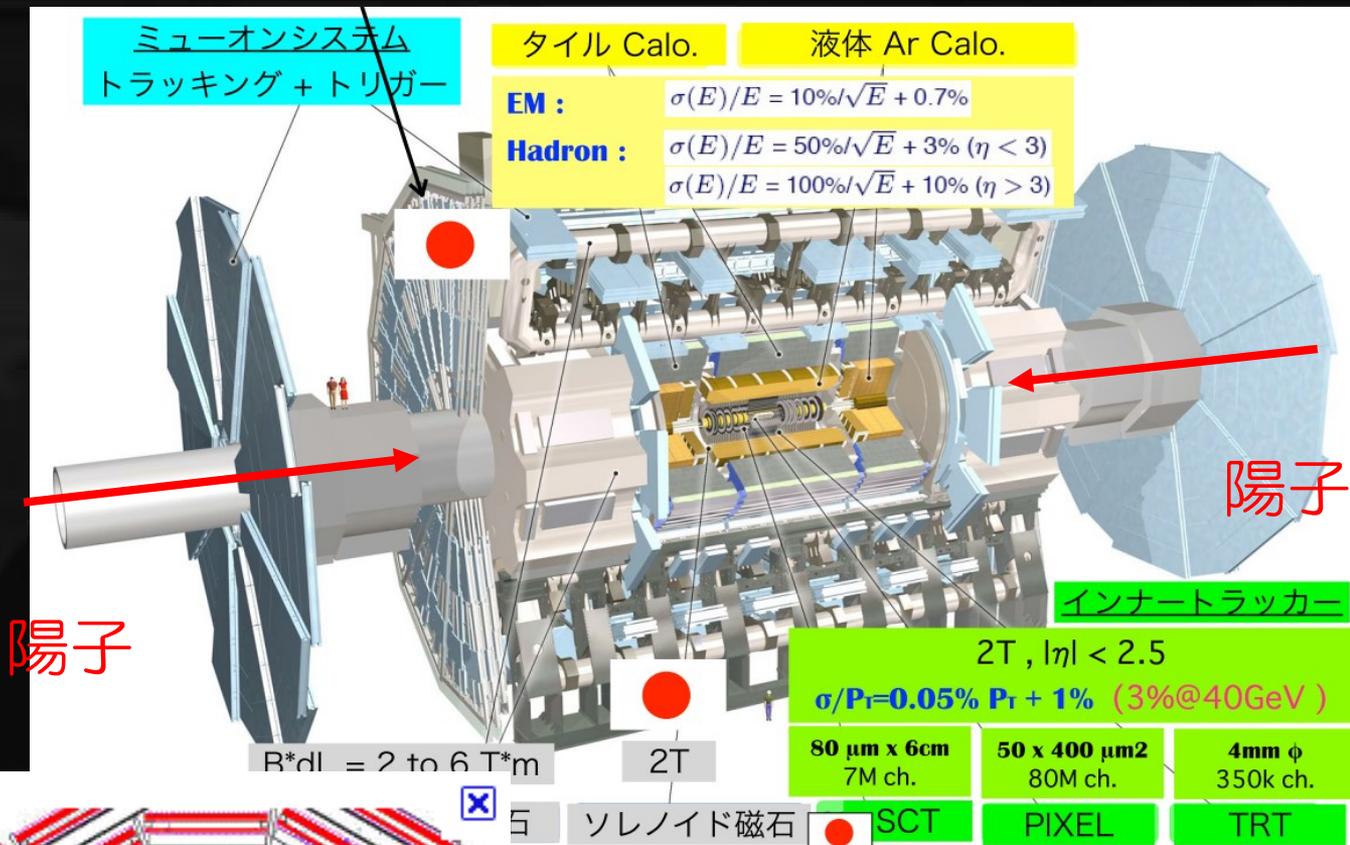
IDM2010 Montpellier - 30.07.2010 3

- 欧州原子核研究機構 CERN (2012年ヒッグス粒子発見)
- 陽子 と 陽子 を高エネルギーで衝突させる

# LHC ATLAS実験

陽子の衝突

たくさんのもの  
ができる



すり抜けた暗黒物質を探す  
(見えない運動量を探す)

# 加速器実験

暗黒物質をつくる

まだ 発見されていない。

2015年 エネルギーをアップした運転が開始、  
データ蓄積中。

加速器実験

ダークマター  
何だ?

質量?  
性質?

間接探索

直接探索

# 間接探索

暗黒物質を見る



# 間接探索

- 暗黒物質：重力のもと 銀河の中心などに集中  
⇒暗黒物質同士が衝突して対消滅  
そこからの信号（ガンマ線、陽電子、ニュートリノ）をみる。

## Galactic DM Halo

- good S/N
- difficult background
- angular information

## Galactic Center

- brightest DM source
- bright background

## DM clumps

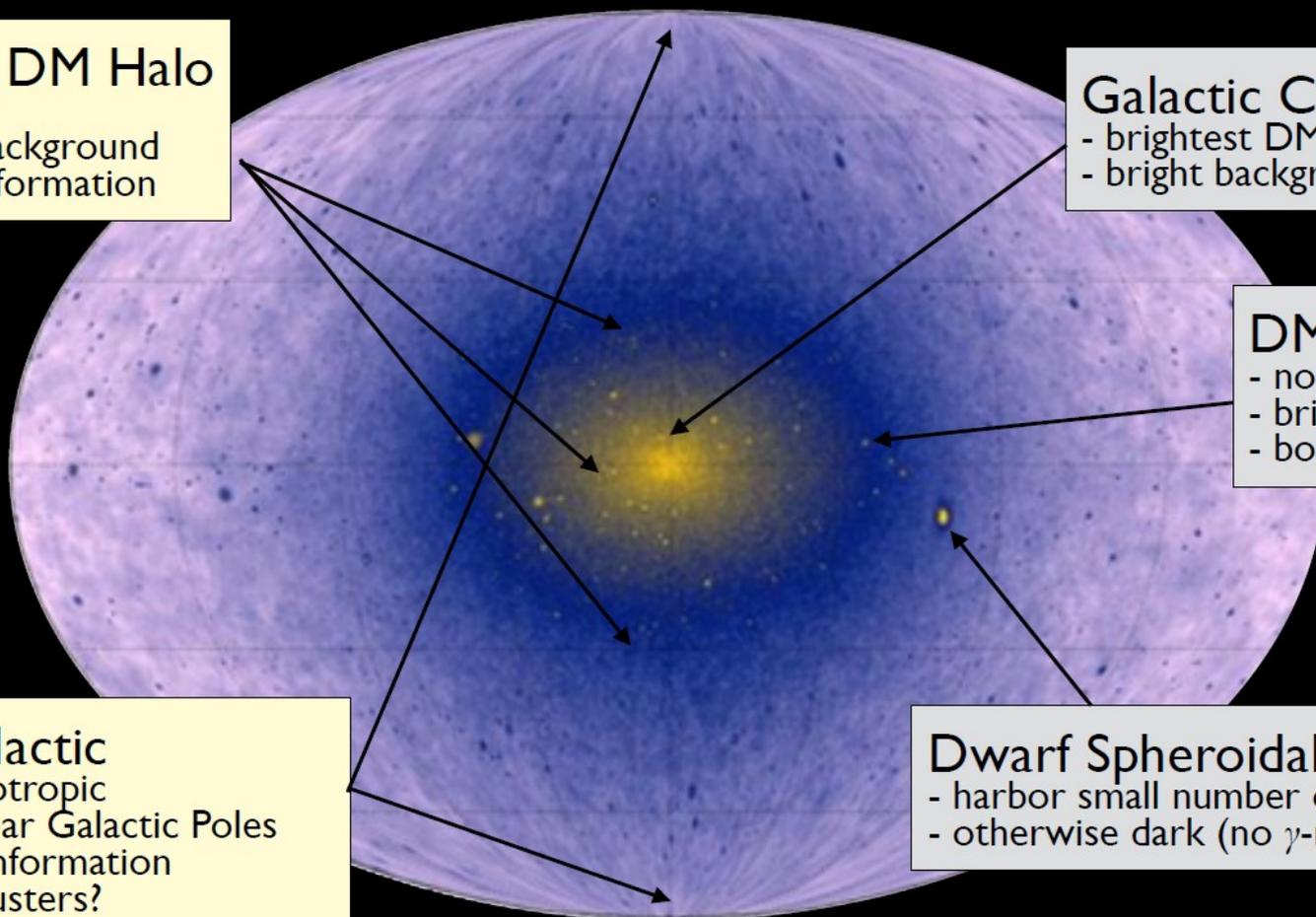
- no baryons
- bright enough?
- boost overall signal

## Extragalactic

- nearly isotropic
- visible near Galactic Poles
- angular information
- galaxy clusters?

## Dwarf Spheroidal Galaxies

- harbor small number of stars
- otherwise dark (no  $\gamma$ -ray emission)

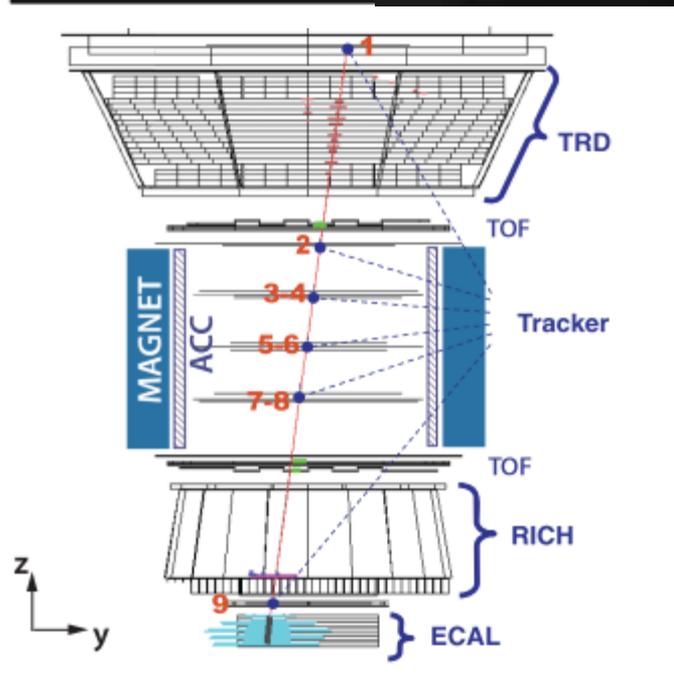


# 陽電子

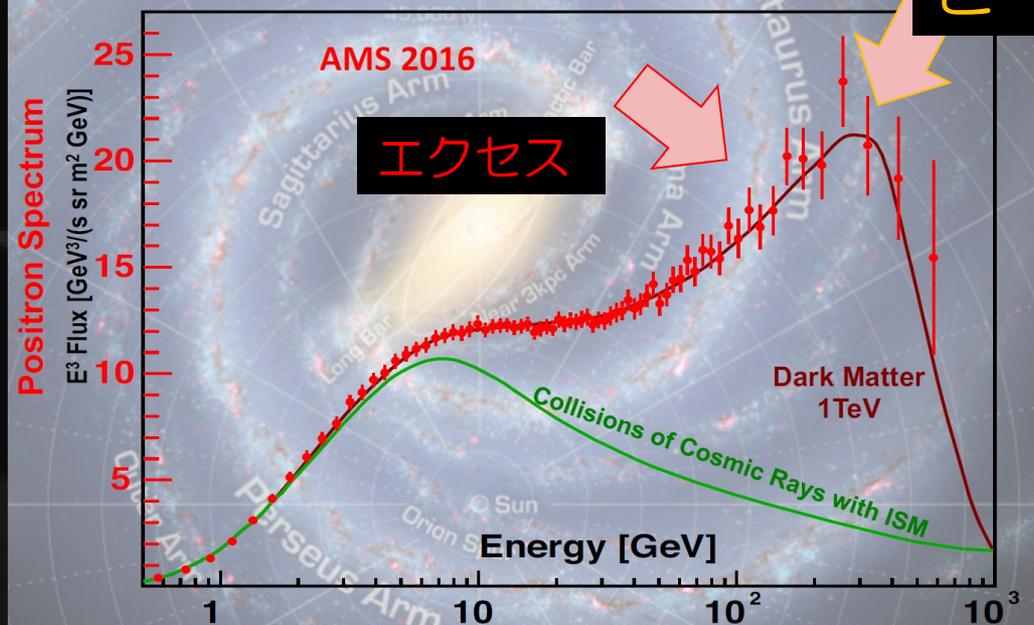
## AMS-02実験 (2013年より国際宇宙ステーション)

AMSセミナー2016年12月 より

PRL 110, 141102 (2013)



The AMS results are in excellent agreement with a Dark Matter Model

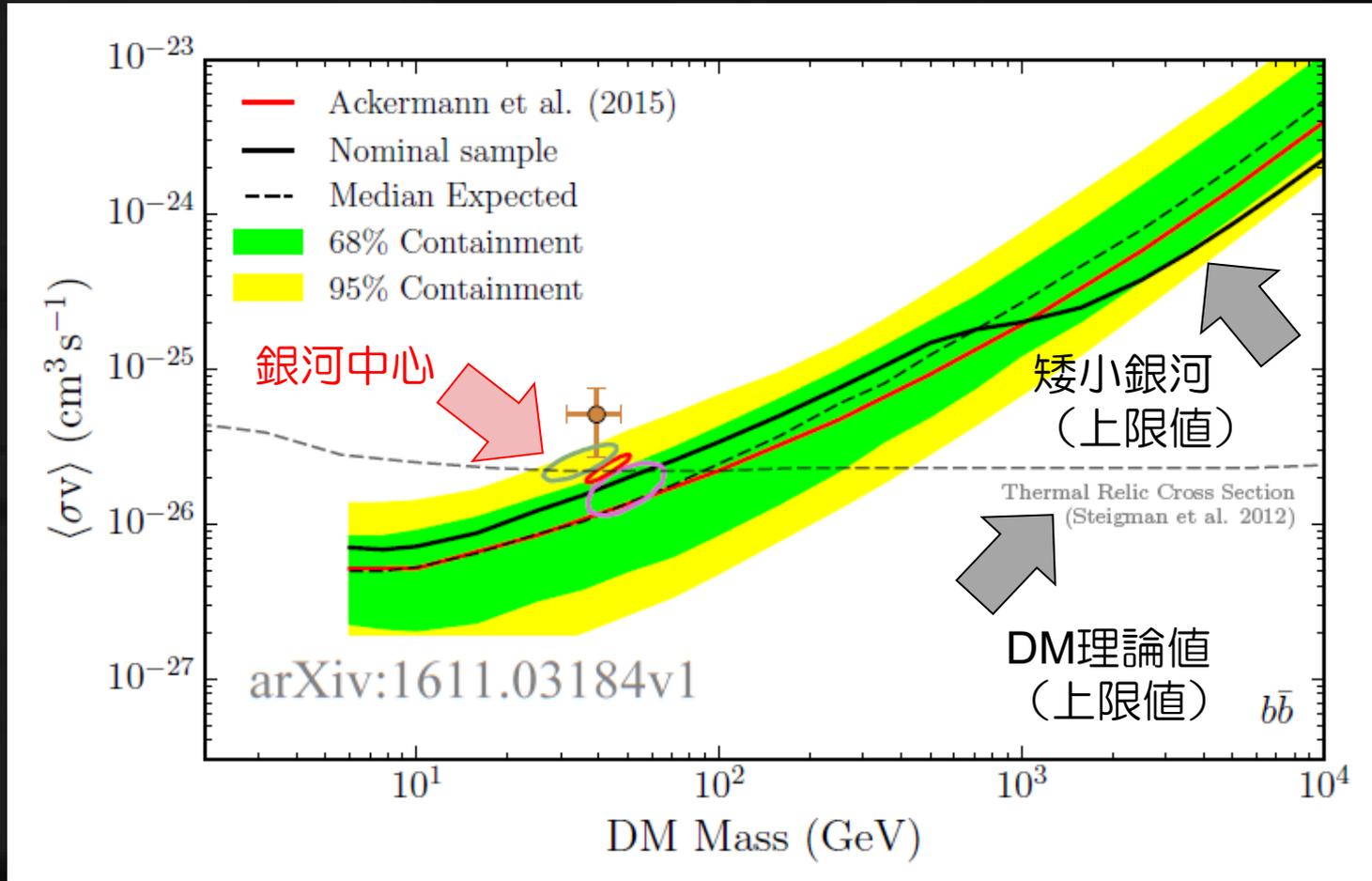


データ：赤線 ダークマターで説明できる。  
発見？ 他の起源（パルサーなど）でも説明可能。

# ガンマ線

## ■ FERIMI衛星

## ■ 銀河中心（1GeVで信号らしきもの）や矮小銀河（信号なし）



- 理論に届きつつある。今後に注目

# 間接探索

暗黒物質を見る

AMSの1TeV以上の示唆  
Fermiの1GeV付近の示唆

などあるが、確実な証拠はまだ。

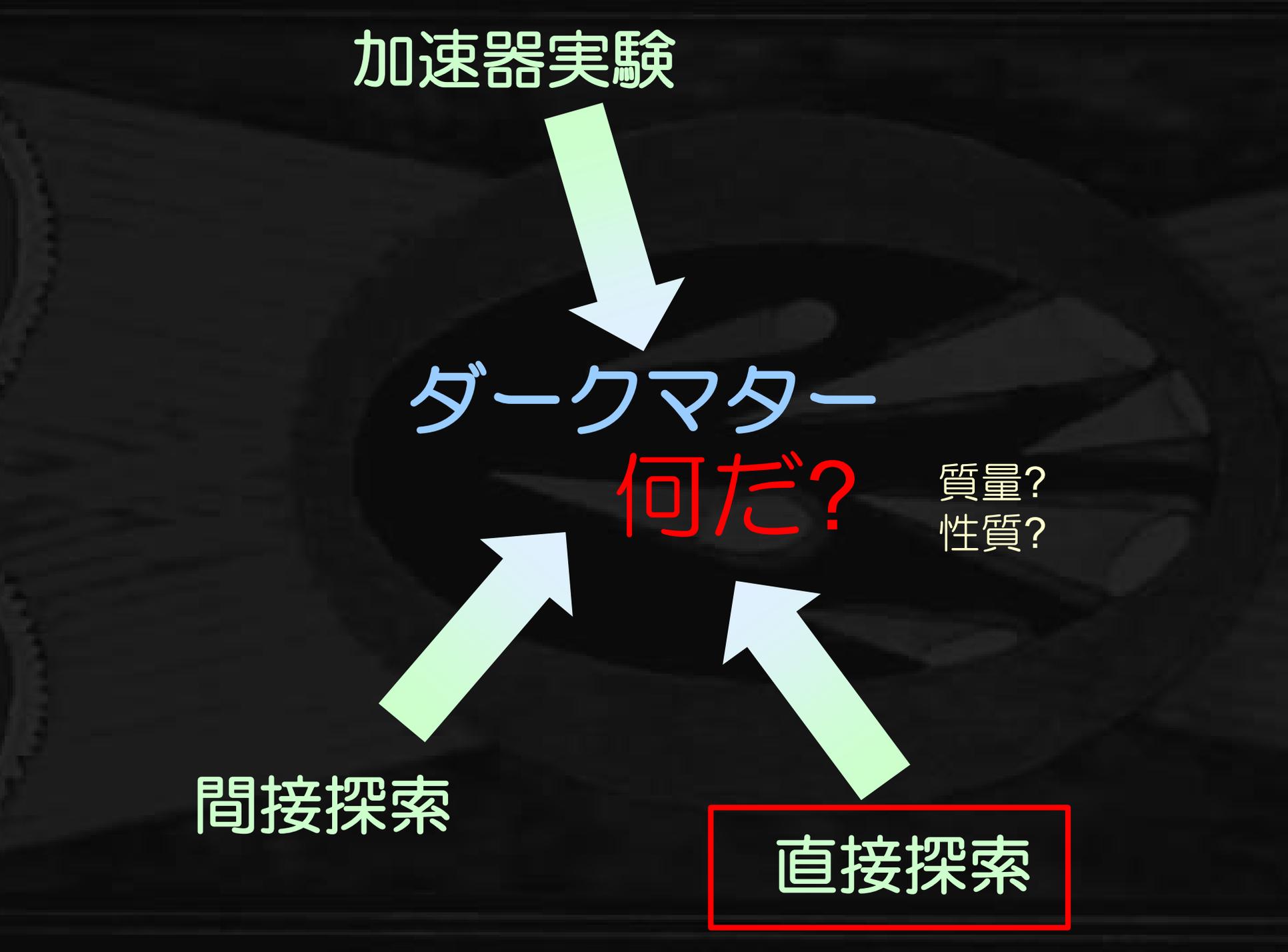
加速器実験

ダークマター  
何だ?

質量?  
性質?

間接探索

直接探索



# 直接探索

暗黒物質を待つ

# ■ 暗黒物質探索

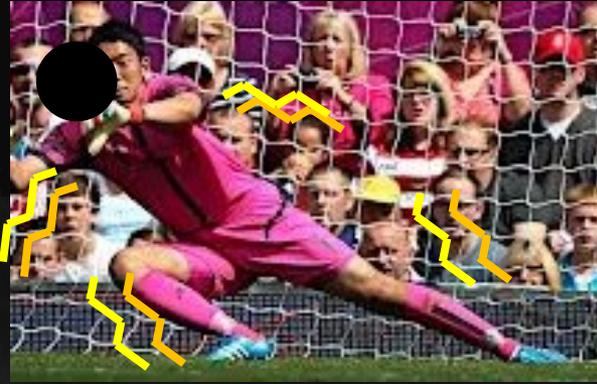
■ 「物」に暗黒物質が「当たる」

■ 捉え方：

① 温度が上がる

② 電気が生じる

③ 光が生じる

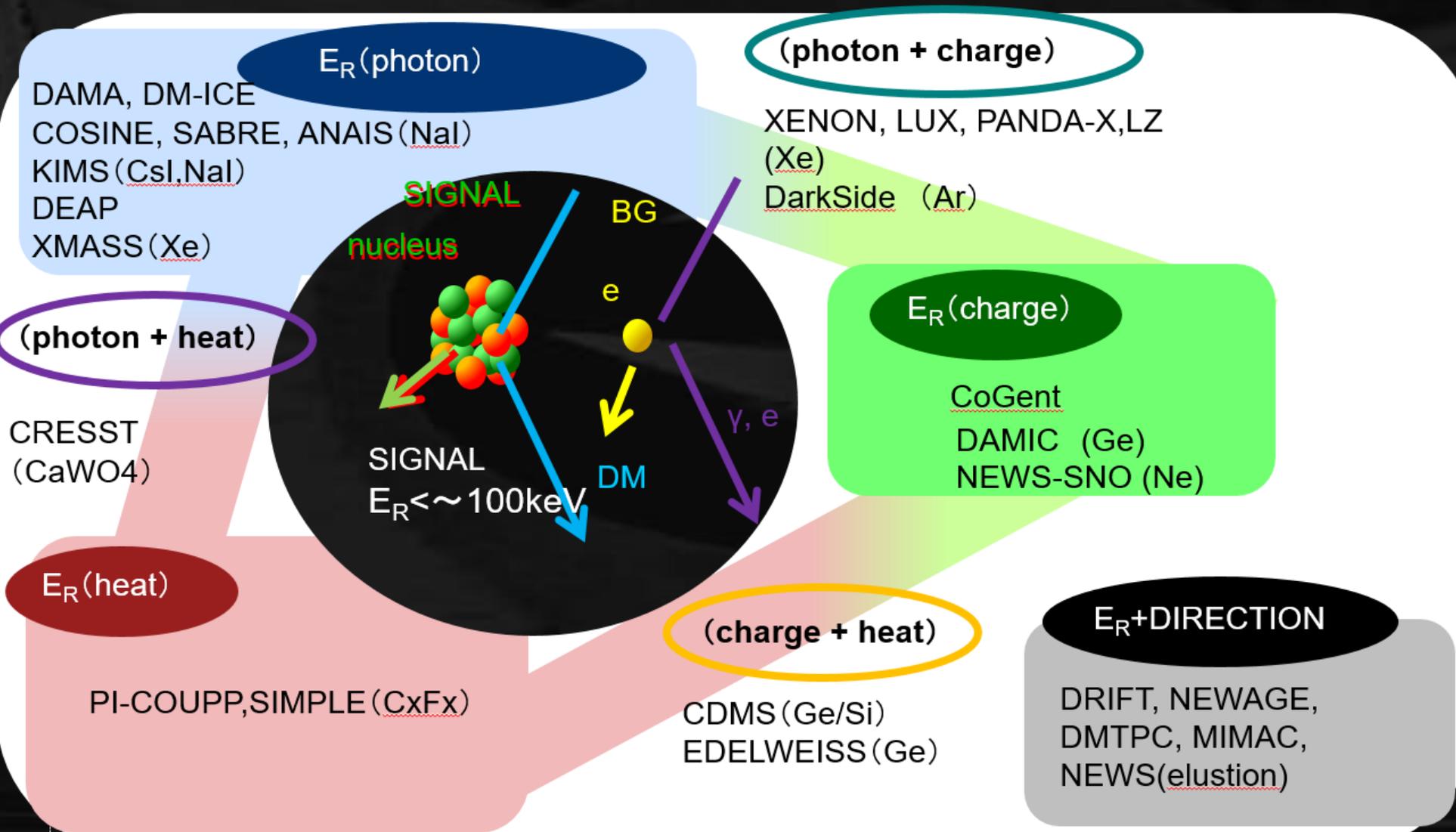


「検出器」



# Dark Matter Direct Searches 信号 DM と 原子核 の弾性散乱

バックグラウンド 電子、ガンマ線 と 電子の反応



# ■ 暗黒物質探索

- 宇宙から降り注ぐ「余計なもの」避ける。  
⇒ 地下で実験する。

A world-wide effort to search for WIMPs

世界の地下活動



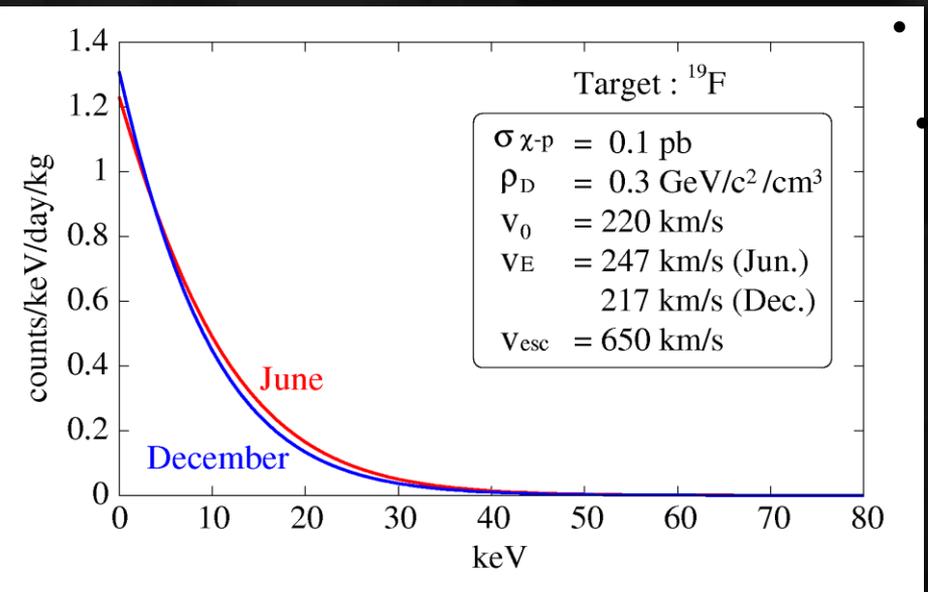
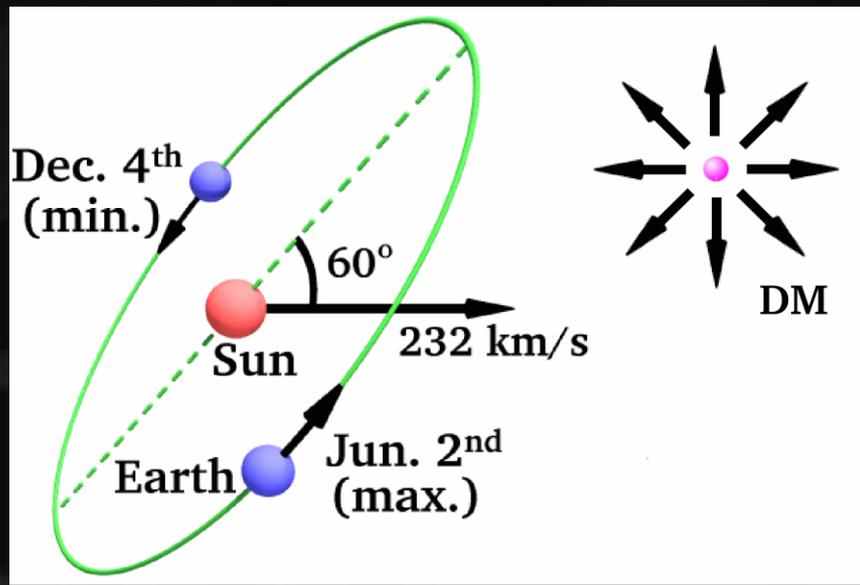
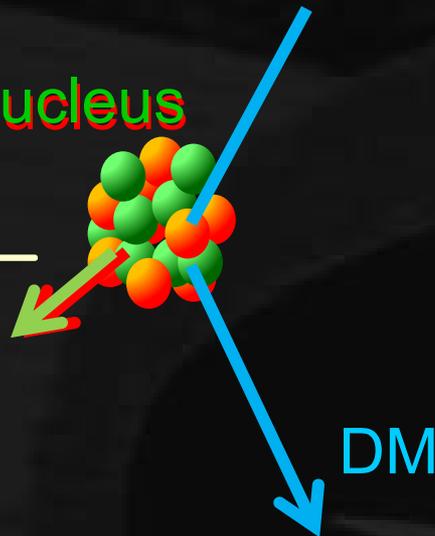
talks in the afternoon sessions  
some basics + brief review of the field

神岡は、実験数、  
規模で世界1, 2位

# ■ 暗黒物質の「証拠」

nucleus

このエネルギーを検出する



## ● 証拠力

弱



強

- ① \* 回反応した
- ② エネルギースペクトル
- ③ 季節変動
- ④ 物依存
- ⑤ 到来方向



## 250kgのNaI検出器

**The new DAMA/LIBRA set-up ~250 kg NaI(Tl)  
(Large sodium Iodide Bulk for RARE processes)**

As a result of a second generation R&D for more radiopure NaI(Tl)  
by exploiting new chemical/physical radiopurification techniques  
(all operations involving crystals and PMTs - including photos - in HP Nitrogen atmosphere)

installing DAMA/LIBRA detectors

assembling a DAMA/LIBRA detector

detectors during installation; in the  
central and right up detectors the new  
shaped Cu shield surrounding light  
guides (acting also as optical windows)  
and PMTs was not yet applied

filling the inner Cu box with  
further shield

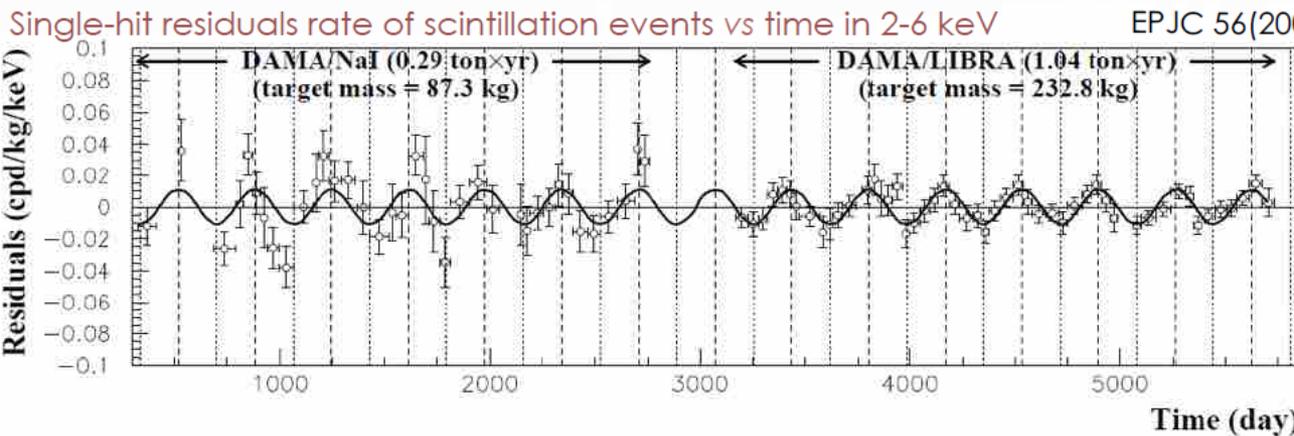
**DAMA/LIBRA started operations on March 2003**

BELLI@  
TAUP07

closing the Cu box  
housing the detectors

view at end of detectors'  
installation in the Cu box

# DAMA : 14サイクルの「季節変動」を観測



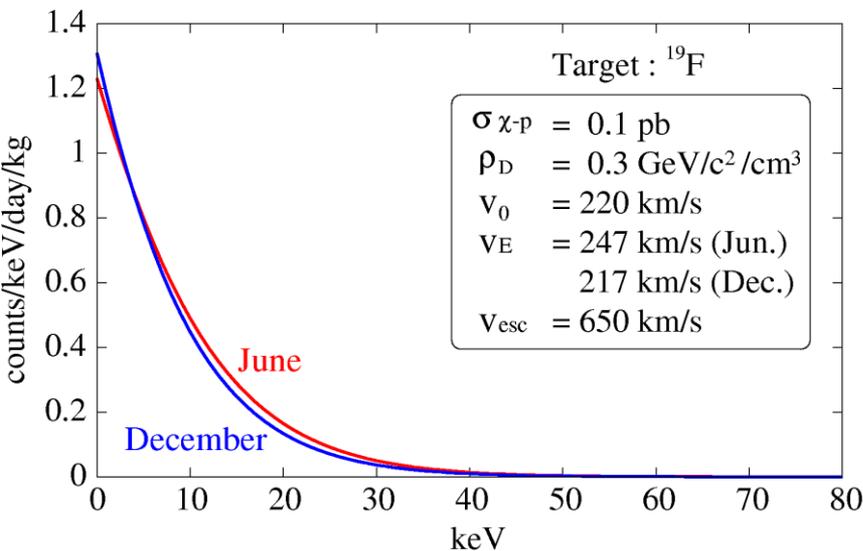
continuous line:  $t_0 = 152.5$  d,  $T = 1.0$  y

$$A = (0.0110 \pm 0.0012) \text{ cpd/kg/keV}$$

$$\chi^2/\text{dof} = 70.4/86 \quad 9.2 \sigma \text{ C.L.}$$

Absence of modulation? No  
 $\chi^2/\text{dof} = 154/87$   $P(A=0) = 1.3 \times 10^{-5}$

Fit with all the parameters free:  
 $A = (0.0112 \pm 0.0012) \text{ cpd/kg/keV}$   
 $t_0 = (144 \pm 7) \text{ d}$  -  $T = (0.998 \pm 0.002) \text{ y}$



■ 他の実験で再現せず。

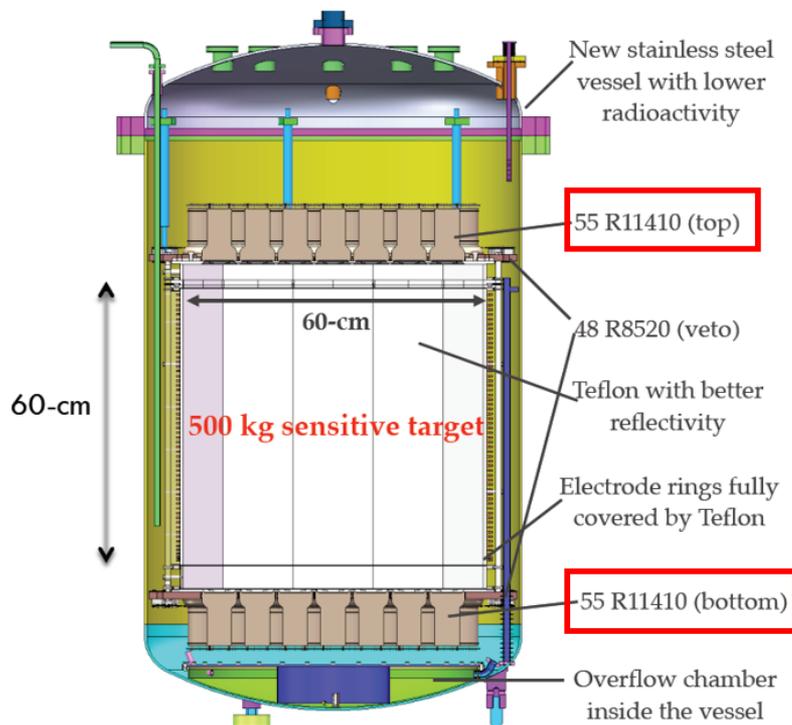
■ 一体何を見ているんだ????

■ 今年 新しいデータ公開

# 世界の最先端

- 2層式液体キセノン XENON (161kg total)  
LUX(250kg active) PandaX-II (500kg sensitive)
- ガンマ線の除去に優れる

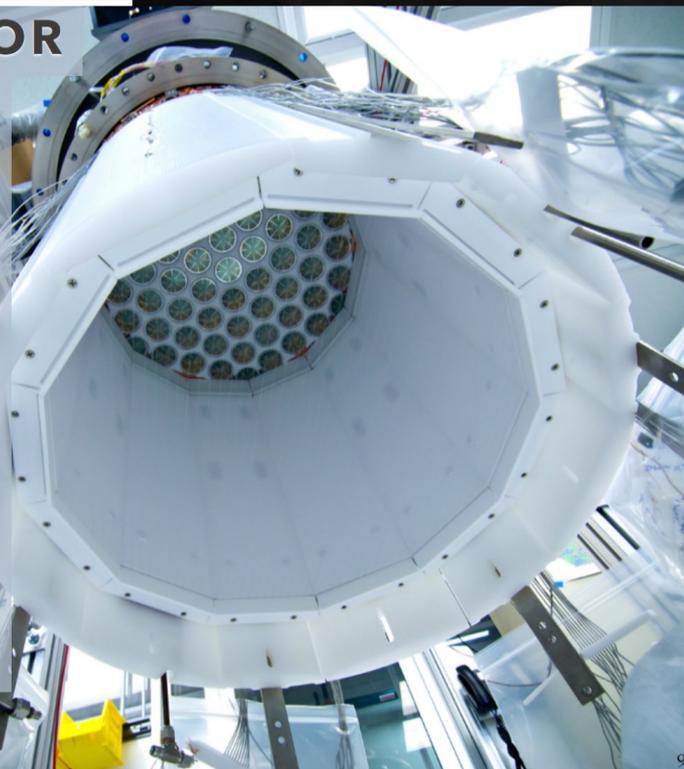
## PandaX-II



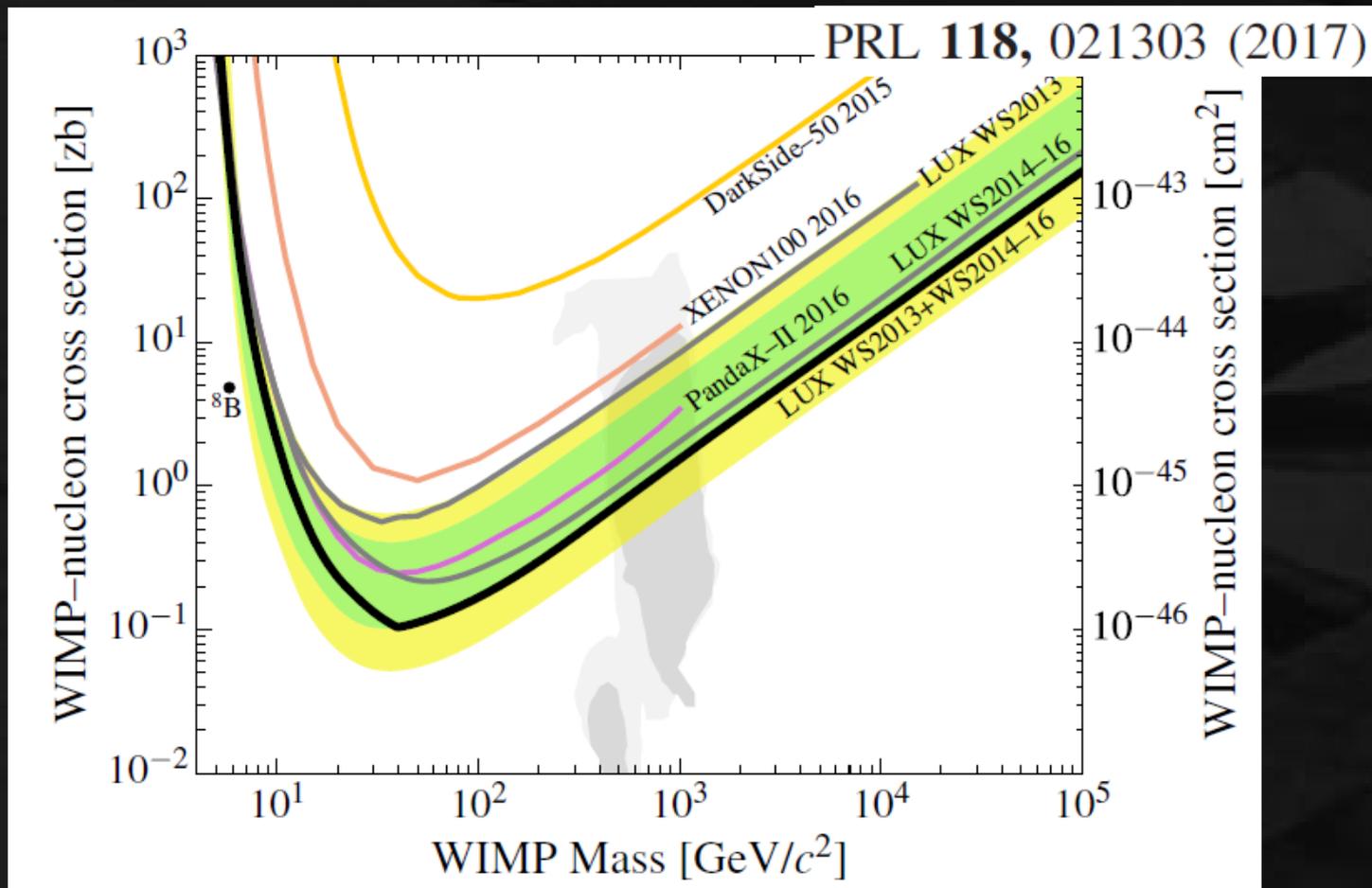
## LUX DETECTOR

- 48cm diameter by 48 cm height dodecagonal "cylinder".
- 250.9 kg LXe in active region
- 61 PMTs on top, 61 on bottom, specially produced for low radiogenic BGs and VUV sensitivity.
- Xenon was pre-purified via chromatographic separation, reducing residual krypton.
- Liquid is continuously recirculated (¼ tonne per day) to maintain chemical purity.
- Ultra-low BG titanium cryostat.

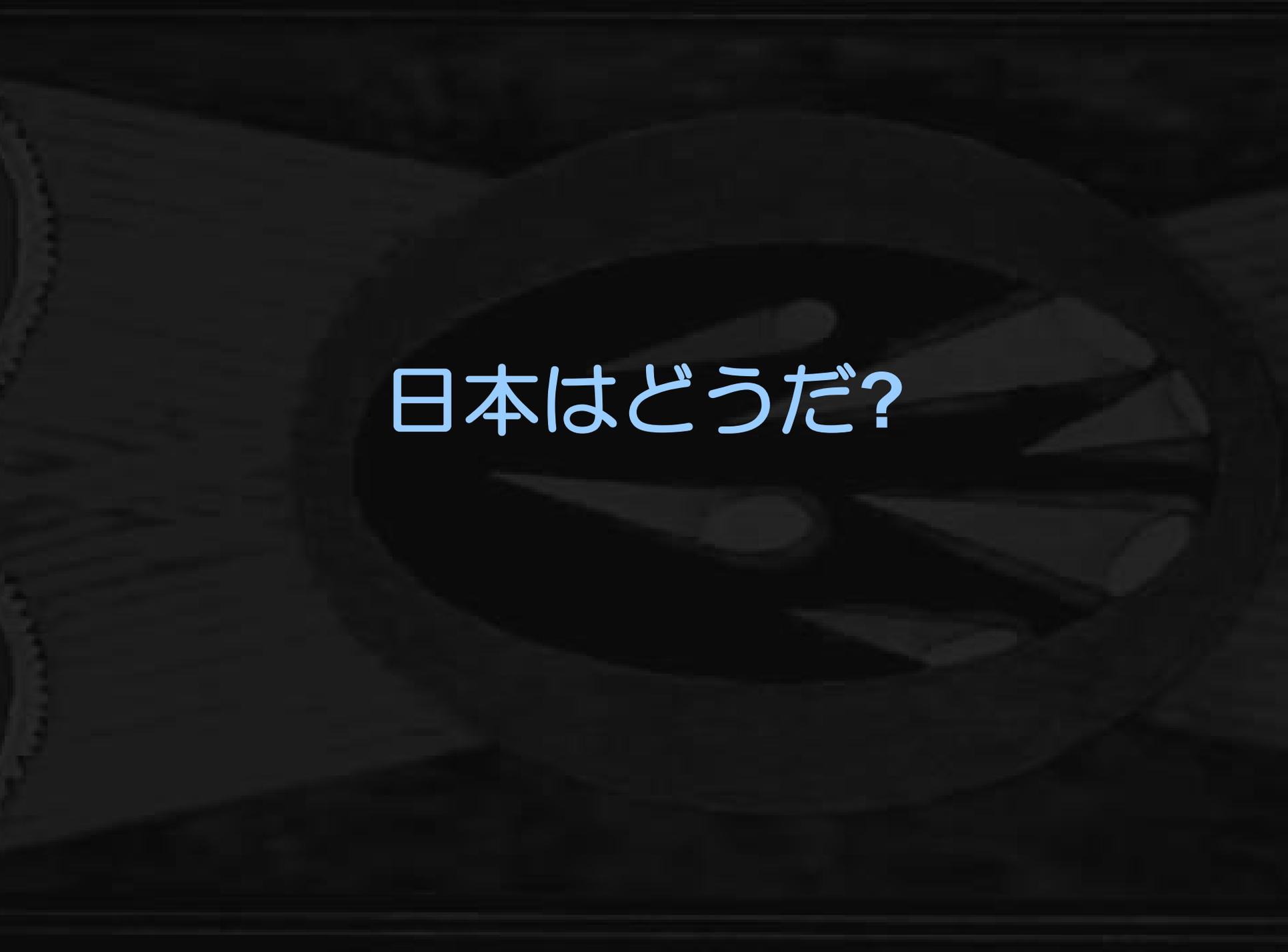
- New separate skin veto region



■ LUX (332 live-days, exposure 33500 kg days) や PandaX-II (33000 kg days) の物量作戦



- XENONグループはXENON 1T実験を昨年末から開始  
→ 今年データ公開

A dark, stylized illustration of a hand holding a pen, with the Japanese text '日本はどうだ?' overlaid in white. The background is dark and textured, suggesting a close-up of a hand and pen. The text is centered and written in a clean, white, sans-serif font.

日本はどうだ？

# 国内のDM事情

## ■ 研究開発

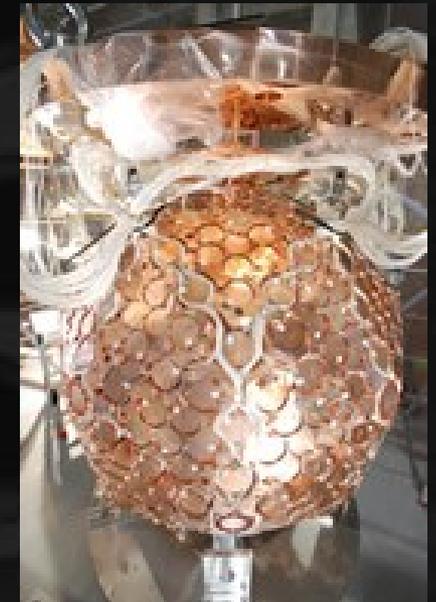
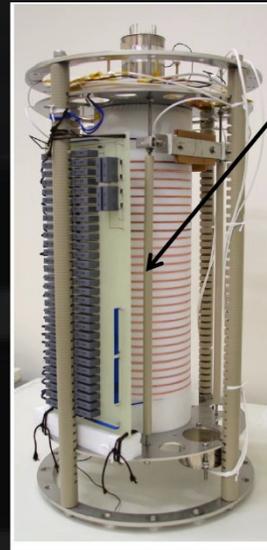
- 徳島大 PICO-LON
- 名古屋大 NEWSdm
- 早稲田大 ANKOK

## ■ 小型装置で実験中

- 神戸大 NEWAGE

## ■ 大型装置で実験中

- ICRR XMASS



# もうちょっと大人の事情

## 国内の地下実験グループ結集中

### 宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究

文部科学省研究費補助金 新学術領域 領域番号2603 (平成26年～30年度)

- ▶ ホーム
- ▶ 代表挨拶
- ▶ 領域目的
- ▶ 研究計画
- ▶ 公募研究
- ▶ 講演会 研究会
- ▶ 成果
- ▶ 関連リンク

検索

#### メニュー

▶ 公募研究のリスト (平成27年度)

▶ 代表挨拶

▶ 領域目的

▶ 研究計画

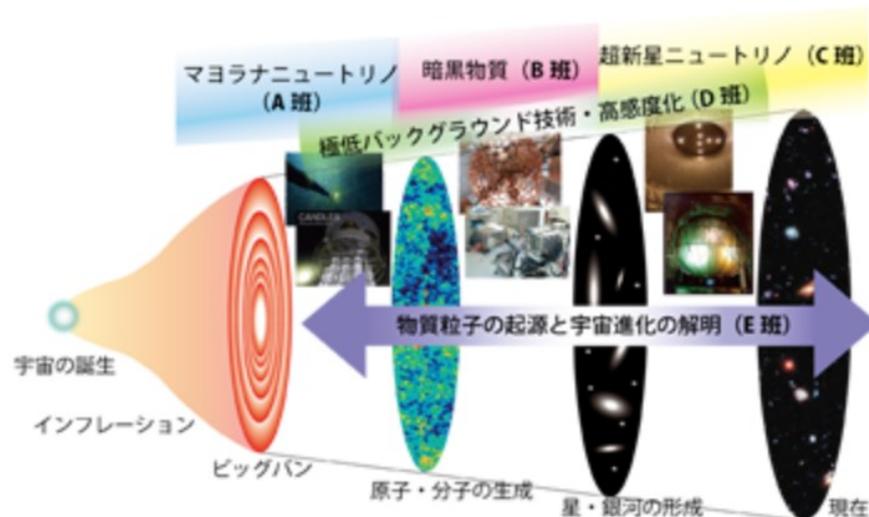
▶ X00 総括班

#### 本新学術領域が目指すもの

極低放射能研究を核に地下から、

- 宇宙初期の物質粒子生成
- 軽いニュートリノの謎
- 暗黒物質の謎
- 星形成の歴史
- 現在の天体活動

などを直接的に究明する。そして、各時代・各重要過程の理解を紡ぐことで、一連の宇宙の歴史をひもとく。



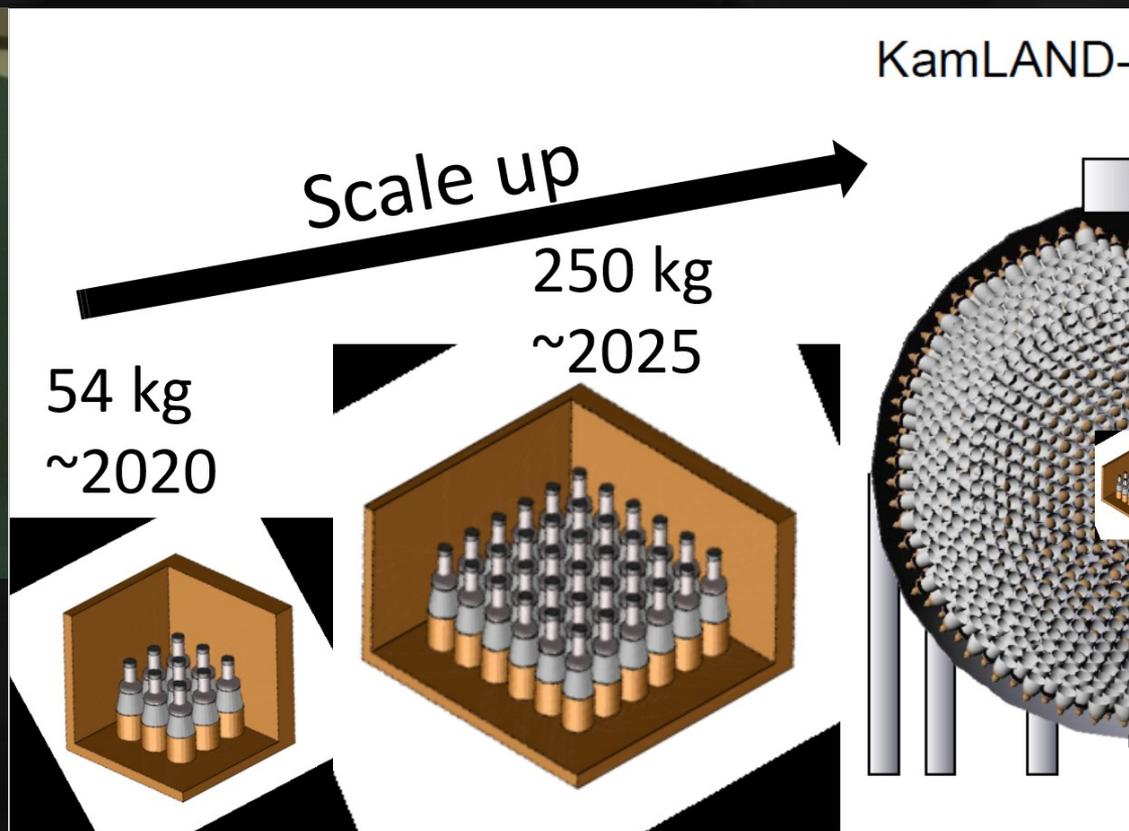
# ■ PICO-LON (徳島大+) : NaIシンチレータ

■ DAMAと同じ物質で確認

■ その後 非弾性散乱 という独自のアイディアへ



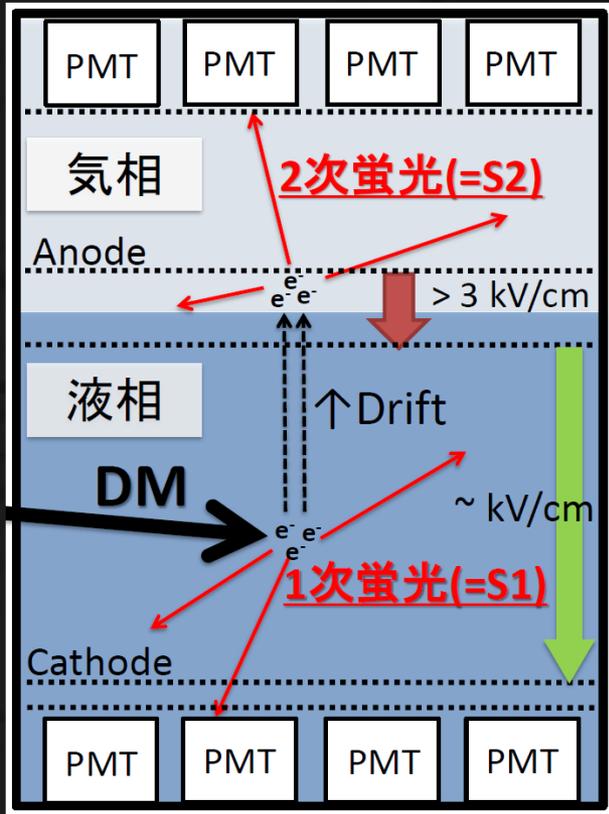
伏見スライド  
(ダークマターの懇談会)



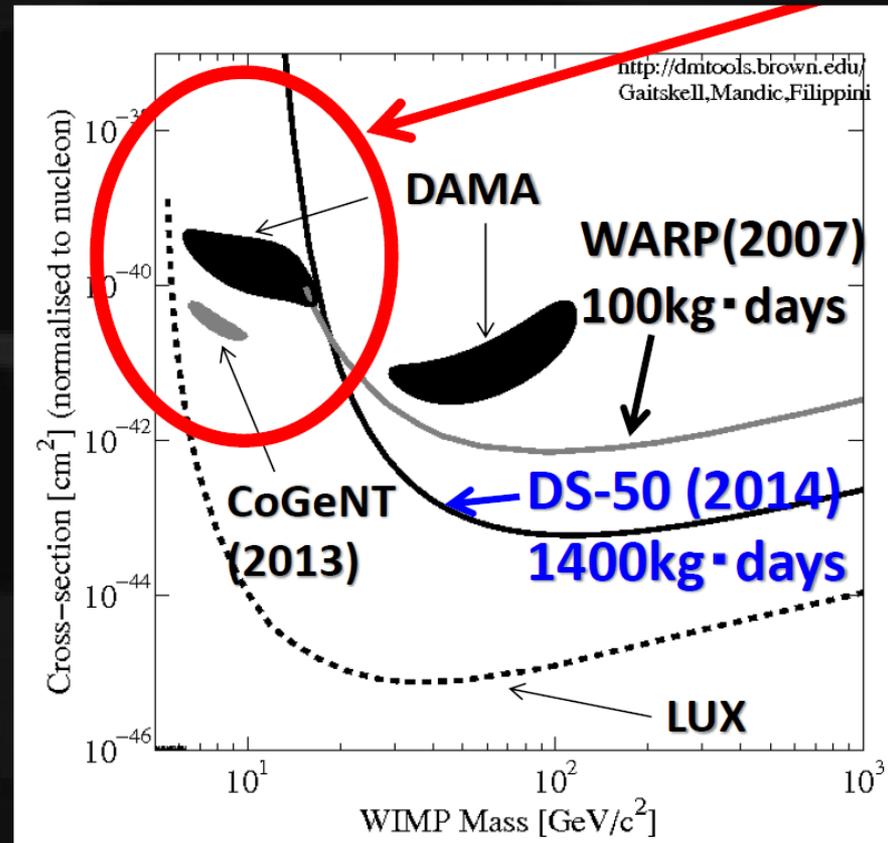
■ 現在の開発要素：結晶中の放射性不純物低減

# ■ ANKOK (早稲田大+) : 2層式液体アルゴン

- 安価、ガンマ線除去力が高い
- アルゴンによる未開拓の領域へ



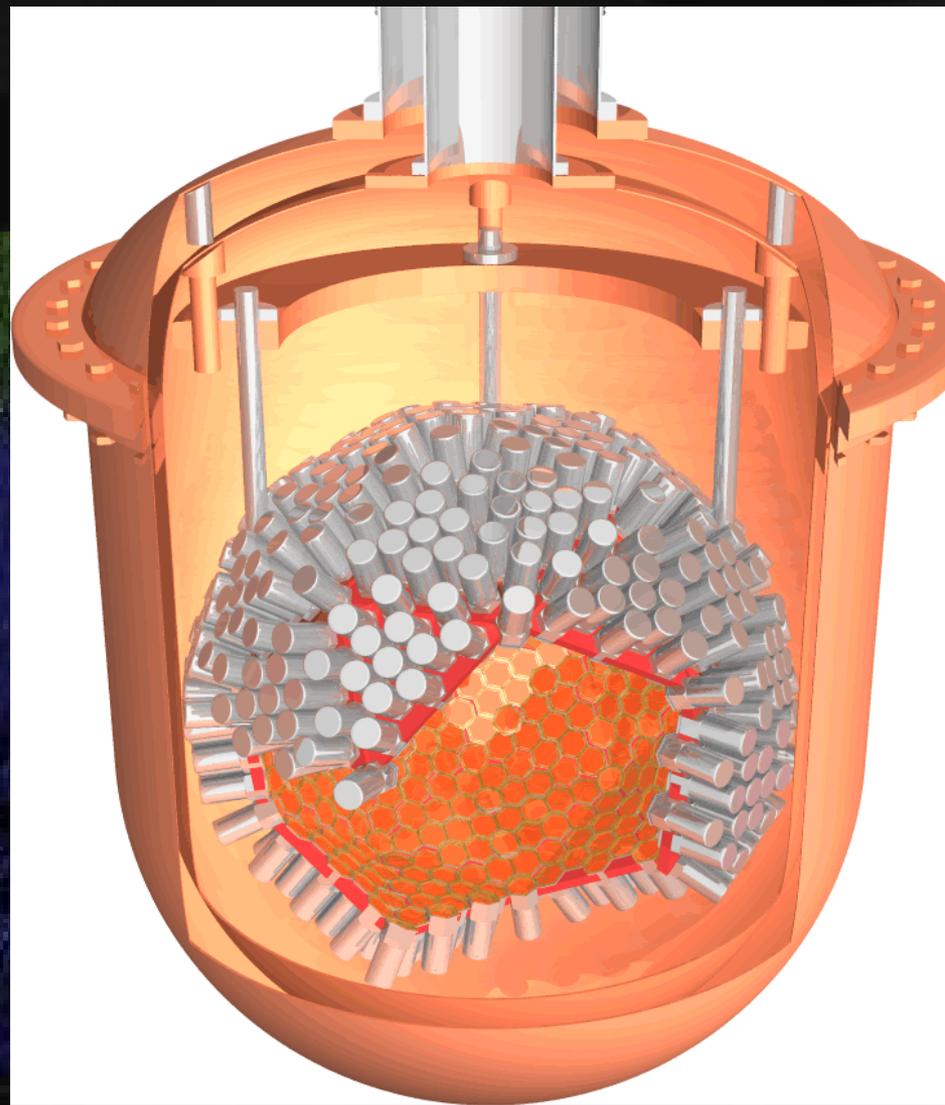
寄田スライド  
(ダークマターの懇談会)



- 現在の開発要素：地上実験の完遂

## ■ XMASS (ICRR+)

- 800kg (世界最大) の液体キセノン
- 642本の光センサー
- 神岡地下で観測中

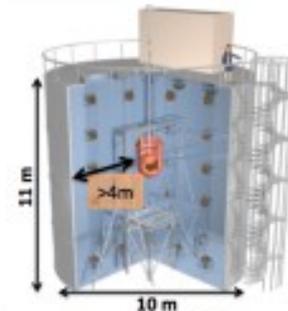


XMASS 「検出器」くみ上げ  
中に 800kgの液体キセノン

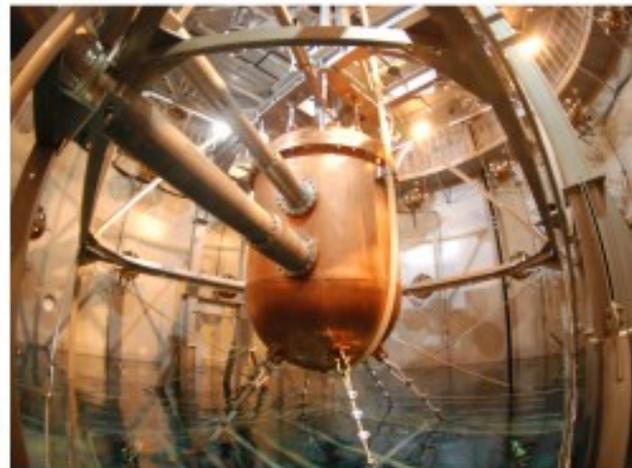
## Detector Construction



- 2009.11: PMT holder and PMT installation



- 2010.09: Construction Completed



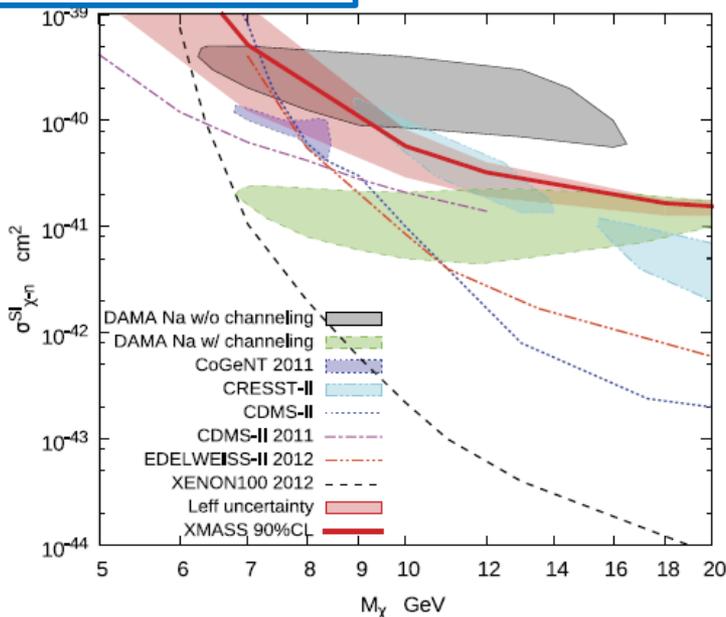
12/07/25

Y. Suzuki @IDM2012 in Chicago

# ■ XMASSの結果

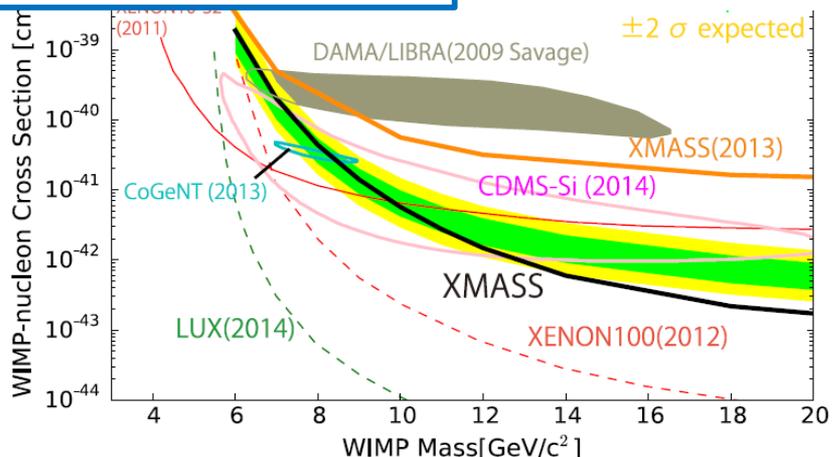
## 軽い暗黒物質

Physics Letters B 719 (2013) 78-82



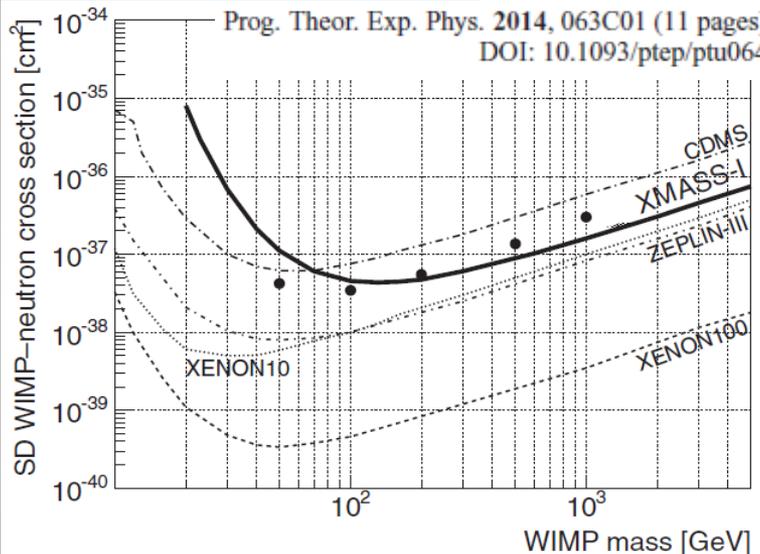
## 暗黒物質季節変動

Physics Letters B 759 (2016) 272-276

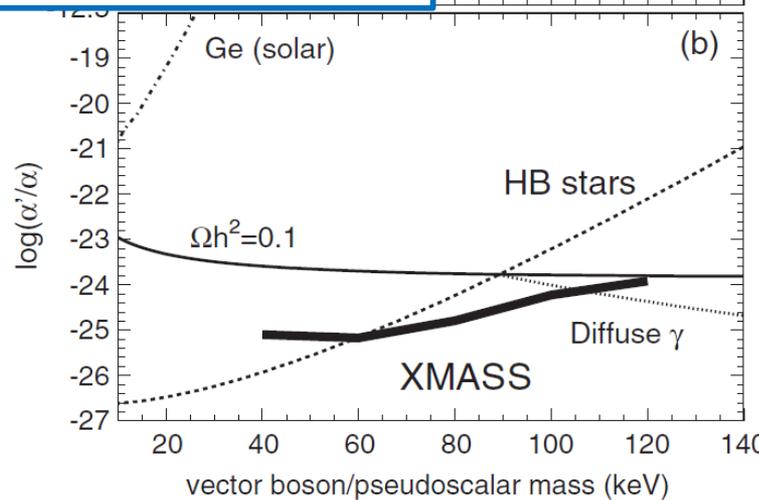


## 非弾性散乱暗黒物質

Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 063C01 (11 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptu064



## スーパーウインプス



PRL 113, 121301 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

■ その他、アクシオンや二重電子捕獲などの結果もあり

# もう一度 ノーベル賞

## The Nobel Prize in Physics 2015



Photo: A. Mahmoud  
Takaaki Kajita  
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud  
Arthur B. McDonald  
Prize share: 1/2

## The Nobel Prize in Physics 2002

Neutrino  
Oscillation

Neutrino  
Astronomy



Raymond Davis Jr.  
Prize share: 1/4



Masatoshi Koshiba  
Prize share: 1/4



Riccardo Giacconi  
Prize share: 1/2

# 「方向性」の重要性



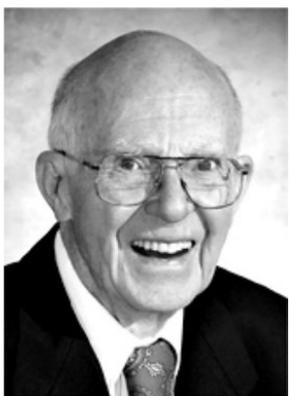
Kungliga  
Svenska Vetenskapsakademien  
har den 8 oktober 2002 beslutat  
att med det  
**NOBELPRIS**  
som detta är tillerkännes den som inom  
fysikens område gjort den viktigaste  
upptäckten eller uppfinningen  
med ena hälften gemensamt belöna  
**Raymond Davis Jr**  
och Masatoshi Koshihita  
för banbrytande  
fysiker, särskilt  
kosmiska  
neutriner

STOCKHOLM DEN 10 DECEMBER, 2002

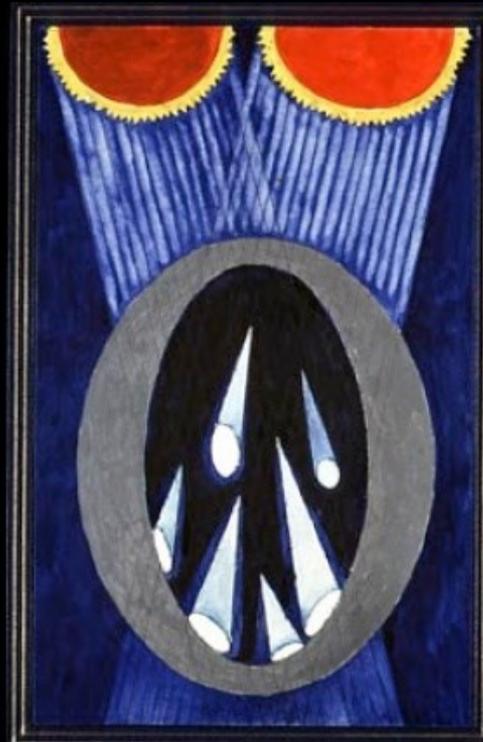
Janne Carlsson



Masatoshi Koshihita  
Prize share: 1/4



Raymond Davis Jr.  
Prize share: 1/4



Kungliga  
Svenska Vetenskapsakademien  
har den 8 oktober 2002 beslutat  
att med det  
**NOBELPRIS**  
som detta är tillerkännes den som inom  
fysikens område gjort den viktigaste  
upptäckten eller uppfinningen  
med ena hälften gemensamt belöna  
**Masatoshi Koshihita**  
och Raymond Davis Jr  
för banbrytande insatser inom astro-  
fysiken, särskilt för detektion av  
kosmiska neutriner

STOCKHOLM DEN 10 DECEMBER, 2002

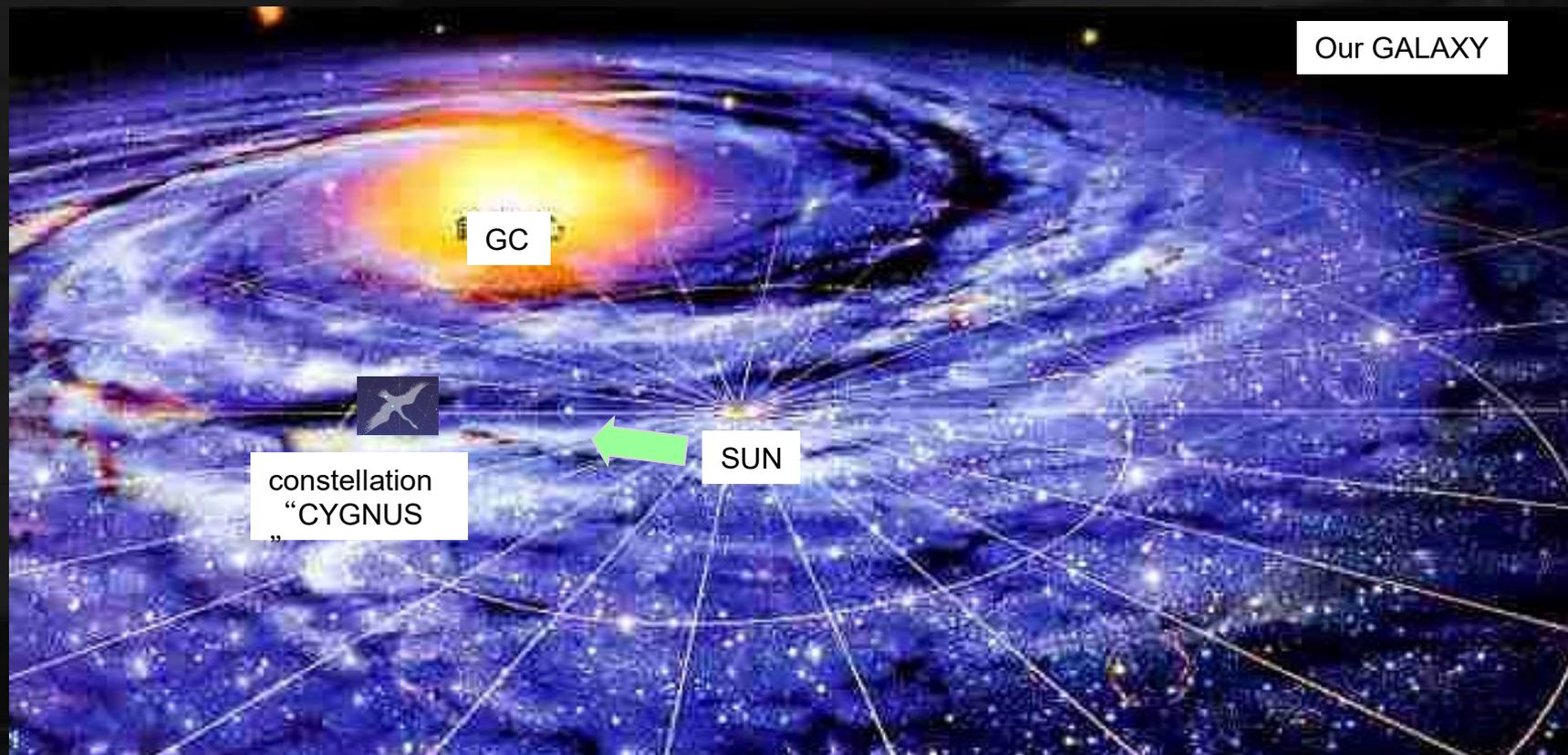
Janne Carlsson



Ernst Norling

# NEWdm/NEWAGE

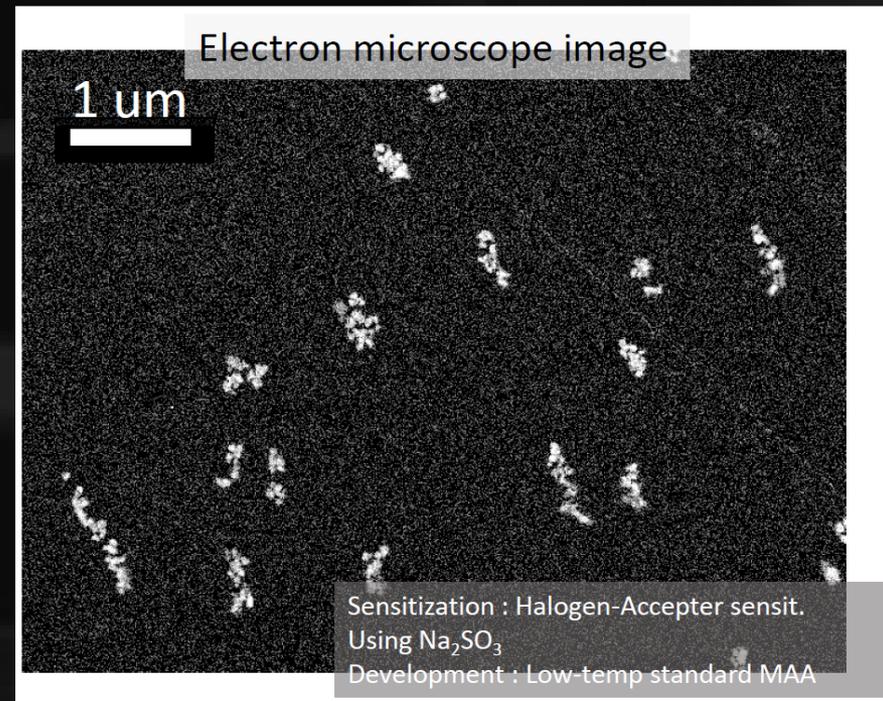
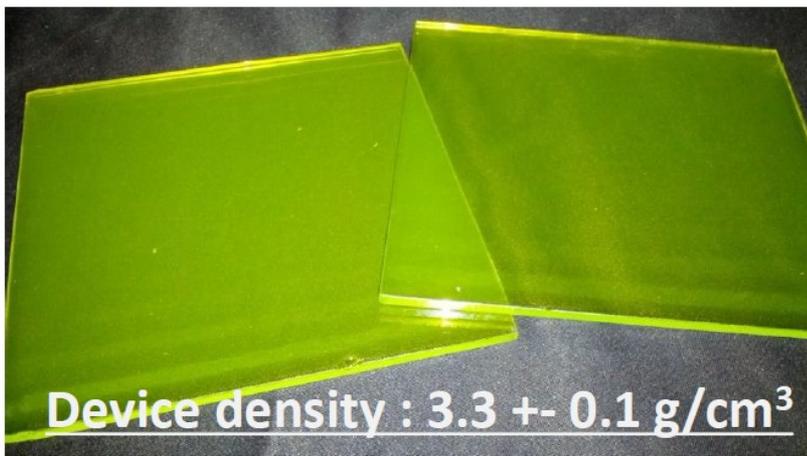
## ダークマターの風を捉える



# ■ NEWsdm : 原子核乾板

- 大質量化が可能
- 100nm程度の飛跡検出が可能

Fine-grained Nuclear Emulsion  
[ Nano Imaging Tracker: NIT ]



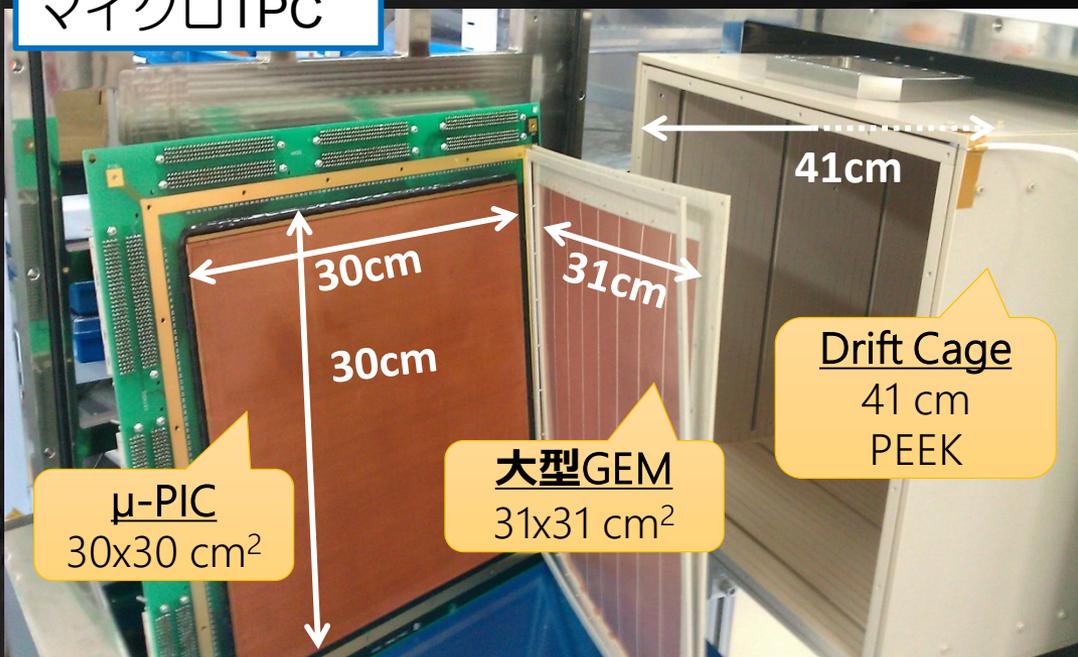
中スライド  
(ダークマターの懇談会)

- 現在の開発要素 : バックグラウンドの低減

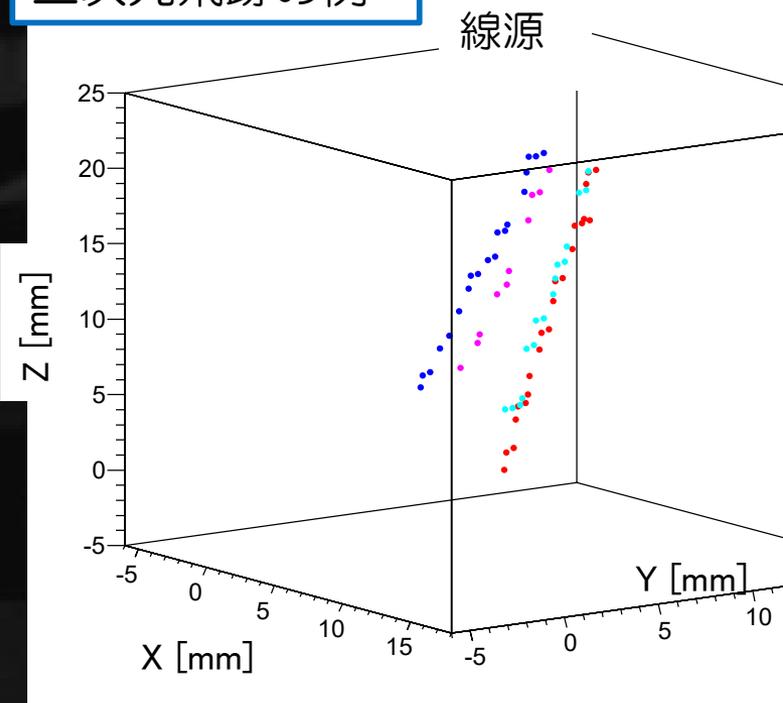
# NEWAGE (神戸大+) : ガス飛跡検出器

- 三次元飛跡可能 (マイクロTPC)
- 400 $\mu\text{m}$ ピッチのセンサー (国内開発)

マイクロTPC



三次元飛跡の例



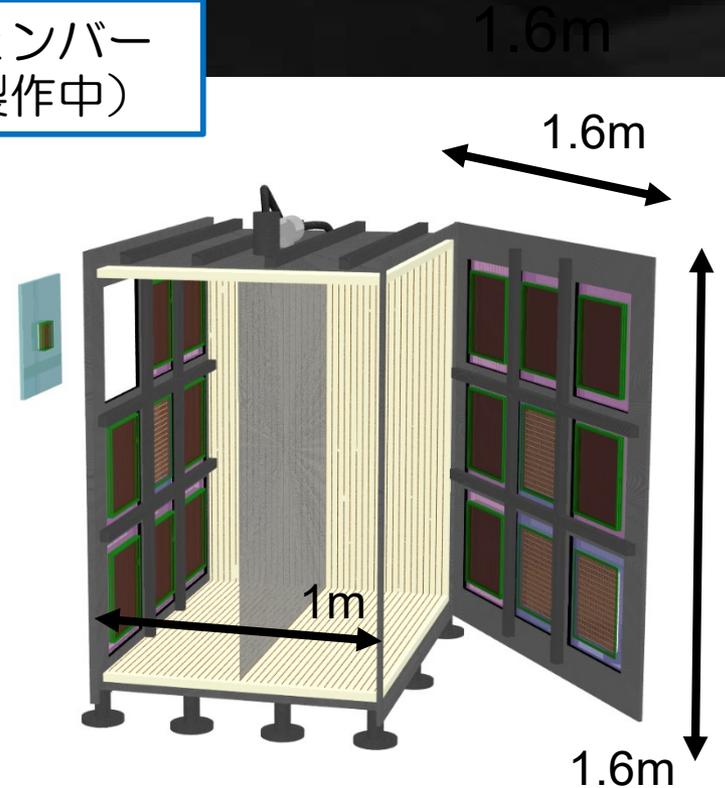
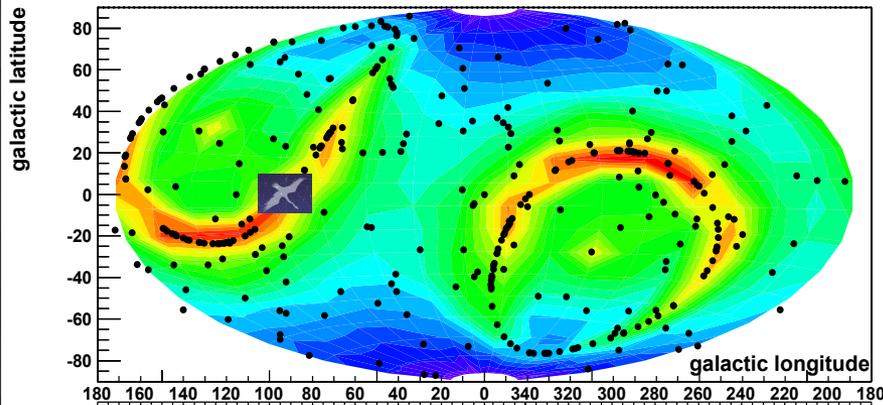
- 地下実験による

# NEWAGE 結果

## 世界の他グループはできない「天球図」取得

地下実験で得られた天球図

大型チェンバー  
(鋭意製作中)



# NEWAGE 野望

暗黒物質発見 (オレ)

→ 暗黒物質天文学 (みんな) へ

まとめ

暗黒物質 やばい

チャレンジャー求む！