

# 暗黒物質研究の現状

宇宙線研究室

身内賢太郎

2011年4月19日 高エネルギー天文学

内容

暗黒物質

加速器実験

間接探索

直接探索

NEWAGE

参考文献

宇宙素粒子物理学

PLB667(2008) PDG DATABOOK

中村輝石修論 (2011年2月)

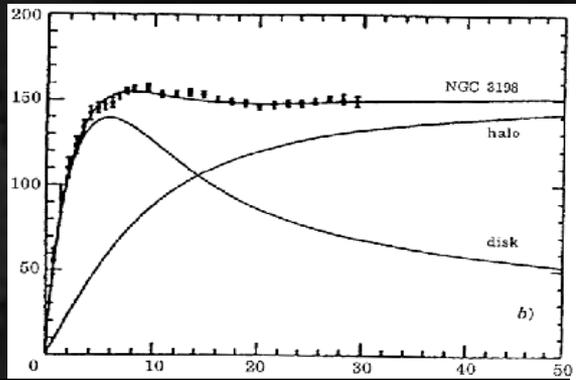
など



# 結論

暗黒物質は未発見

# 暗黒物質の歴史



Annu. Rev. Astron. Astrophys. 29(1991)409

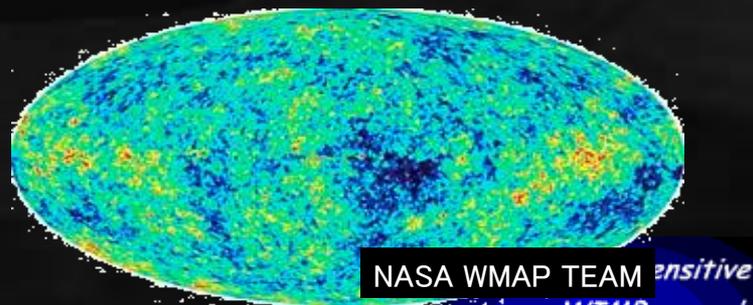
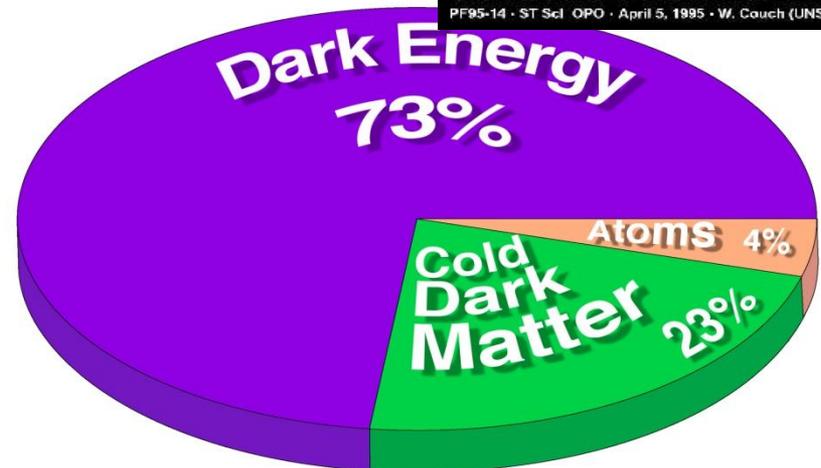
- 銀河の回転曲線 (1930s~)



Gravitational Lens in Abell 2218  
PF95-14 • ST ScI OPO • April 5, 1995 • W. Couch (UNSW), NASA

HST • WFPC2

- 遠方銀河の重力レンズ効果 (1990s~)



- 宇宙マイクロ波背景放射 (2002~)

# 最近では

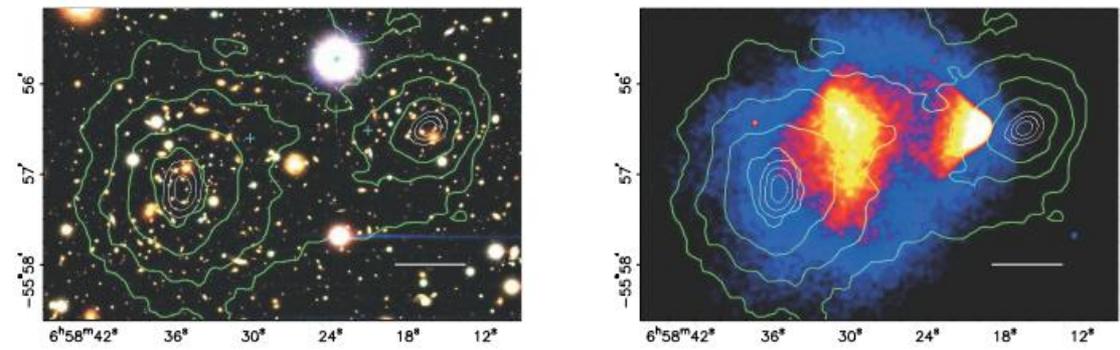
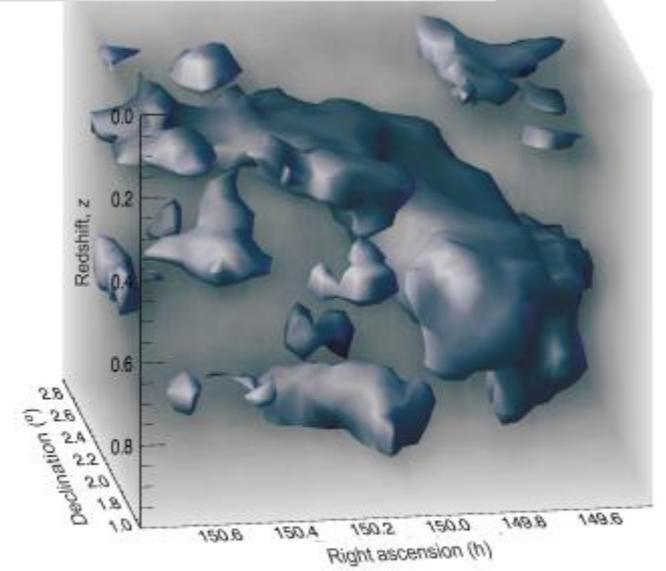


FIG. 1.—*Left panel:* Color image from the Magellan images of the merging cluster 1E 0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. *Right panel:* 500 ks *Chandra* image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak-lensing  $\kappa$  reconstructions, 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.



**Figure 5 | Three-dimensional reconstruction of the dark matter distribution.** The three axes correspond to right ascension, declination and redshift: with distance from the Earth increasing towards the bottom. The redshift scale is highly compressed, and the survey volume is really an elongated cone. An isodensity contour has been drawn at a level of  $1.4 \times 10^{13} M_{\text{Sun}}$  within a circle of radius 700 kpc and  $\Delta z = 0.05$ . This was chosen arbitrarily to highlight the filamentary structure. The faint background shows the full distribution, with

2011年 4月14日  
高エネルギー天文学

# 暗黒物質の候補

## - バリオン

MACHO(Massive Compact Halo Object)

## - 非バリオン

ニュートリノ

アクシオン

WIMPニュートラリーノ

その他有

# MACHO(Massive Compact Halo Object)

- もっとも ナイーブ な候補「暗い星」
- MACHOが前を通った時の背景の星の増光を見る
- 1990年代前半には「天下取り」直前
- 現在では主要候補からは除外

A&A 469, 387–404 (2007)  
DOI: 10.1051/0004-6361:20066017  
© ESO 2007

396

P. Tisserand et al.: Limits on the Macho content of the Galactic Halo from EROS-2

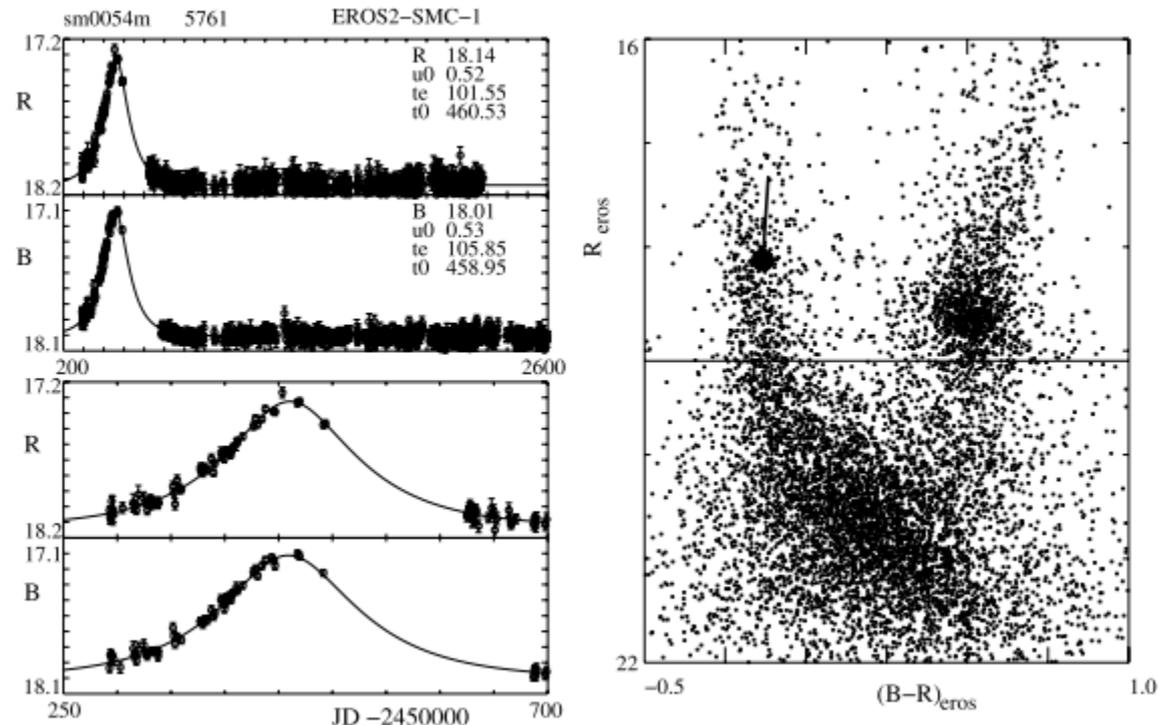
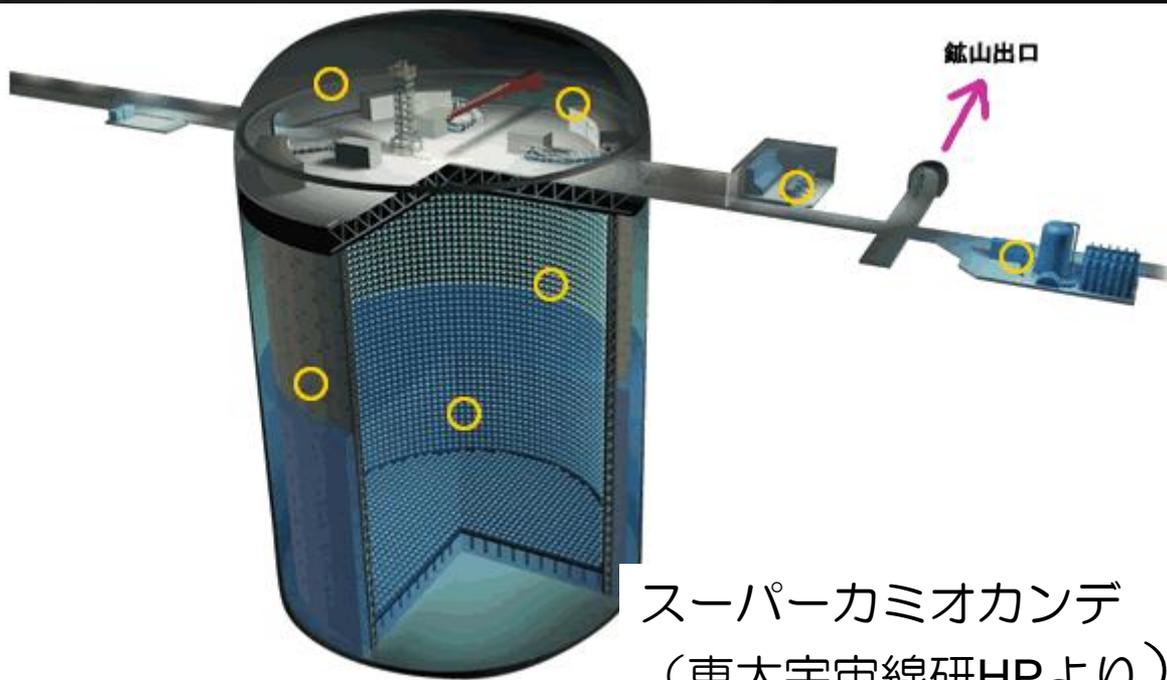


Fig. 7. The light curves of EROS-2 microlensing candidate EROS2-SMC-1 (star sm005-4m-5761). Also shown is the color-magnitude diagram of the star's CCD-quadrant and the excursion of the event.

## ニュートリノ

- 1998年～ニュートリノ振動により「質量有り」
- 日本がニュートリノ研究をリード



スーパーカミオカンデ  
(東大宇宙線研HPより)

- 速すぎる：宇宙の大規模構造をなまらせてしまう
- 暗黒物質候補から除外

# アクシオン

QCDで中性子の電気双極子を計算  $\sim 10^{-16}$  ecm

実験値  $< 10^{-25}$  ecm

⇒ 強い相互作用のCP問題

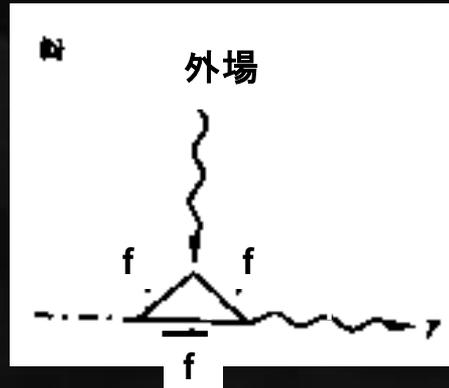
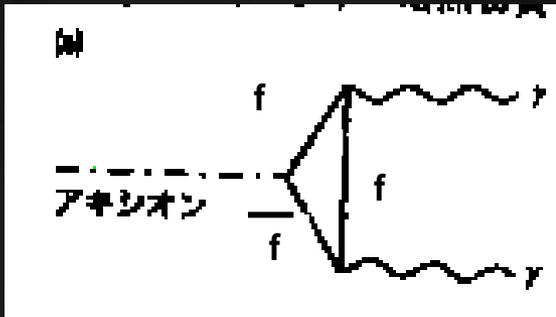
Peccei & Quinn PRL38 (1977) 1440

アクシオンを導入することで、自然に解決

アクシオンと光子2個との結合

光子2つが見える / 磁場によって光子に変換

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha_{EM}}{\pi} \frac{C_a}{f_{PQ}}$$



$\alpha$ : 微細構造定数

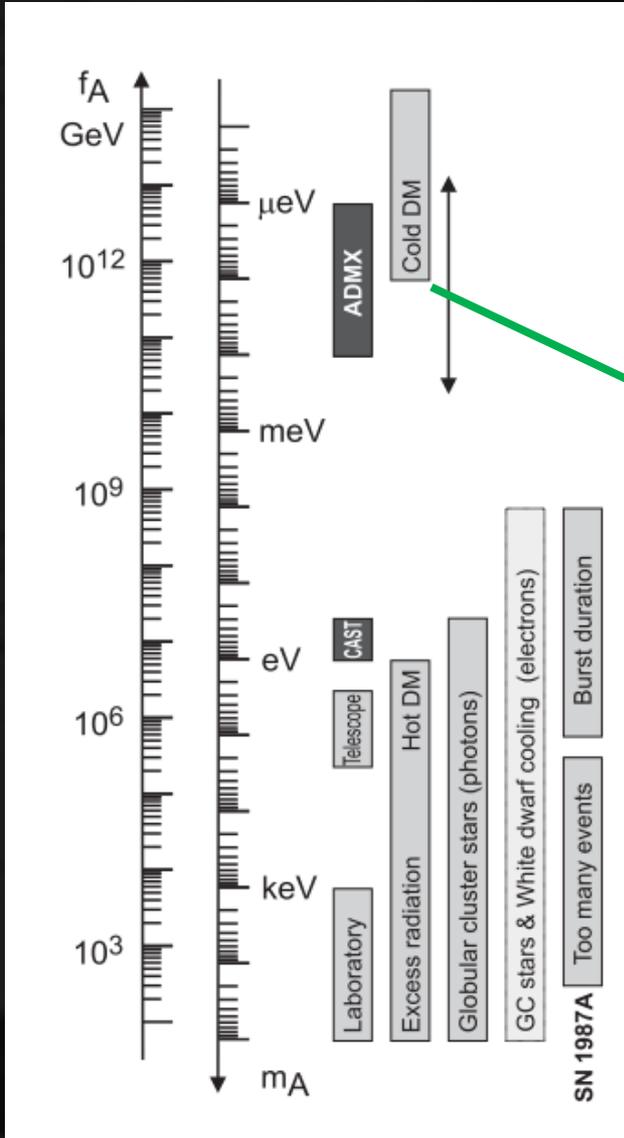
$C_a$ : アクシオンモデルによる定数 (0~1)

# アクシオン

アクシオンの質量 (理論)

$$m_a = 0.6 \text{eV} \frac{10^7 \text{GeV}}{f_{\text{PQ}}}$$

$f_{\text{PQ}}$ : 新しい対称性の破れのスケール



これよりも重たい「CDMとしての」アクシオンは  
超新星爆発1987Aの観測によって制限

重いとニュートリノの放出時間が短くなる  
: 観測と矛盾

# DMアクション探索

質量  $\sim \mu\text{eV}$

PHYSICAL REVIEW D 69, 011101(R) (2004)  
Improved rf cavity search for halo axions

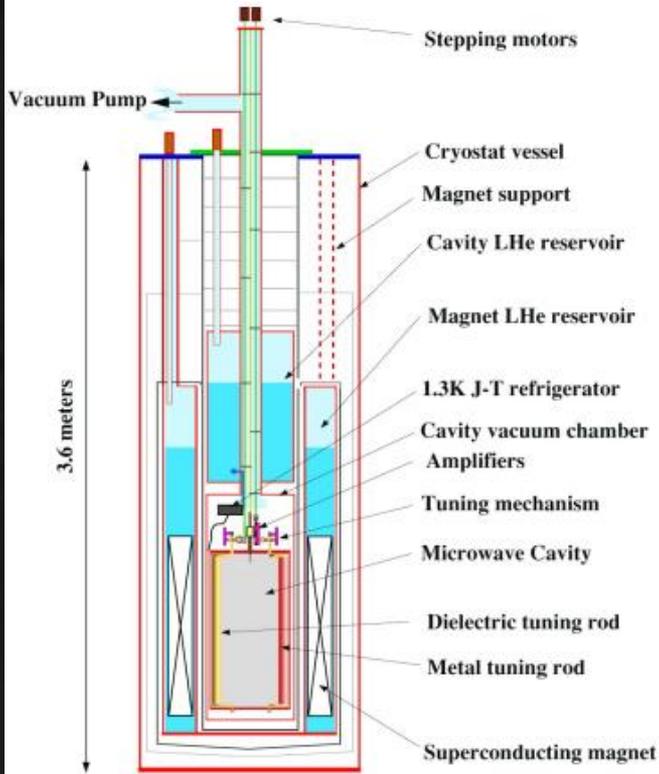
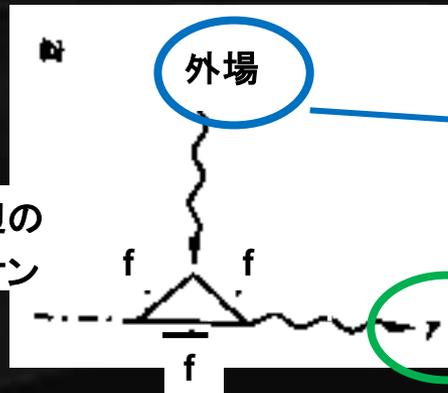


FIG. 1. Sketch of the rf cavity axion detector.

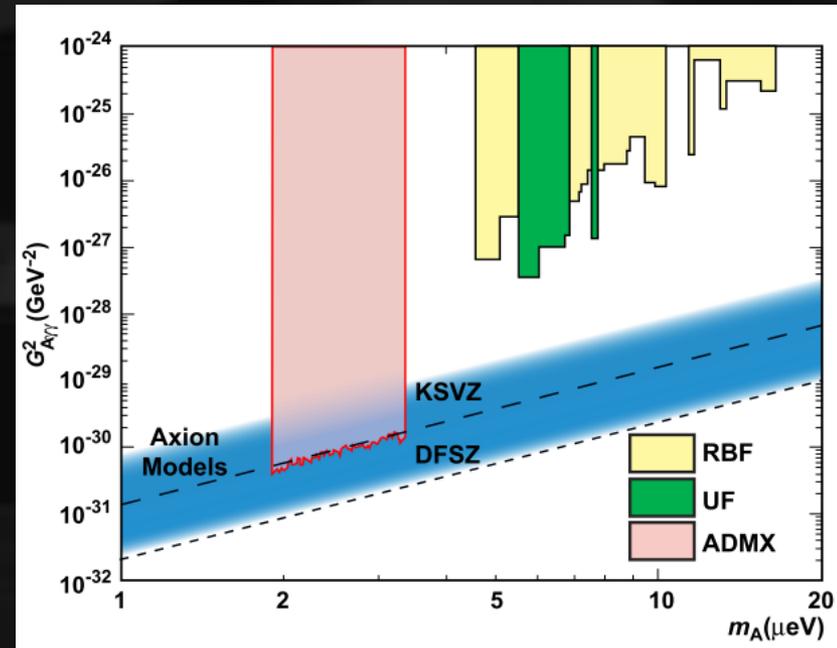
そこら辺の  
アクション



マイクロ波  
を入れる

光子を検出

PDG 2010review

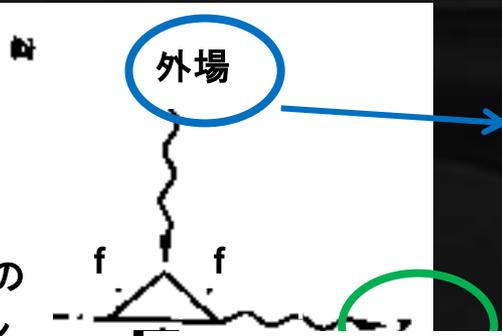


理論に触り始めたが、  
現在までのところ 未発見



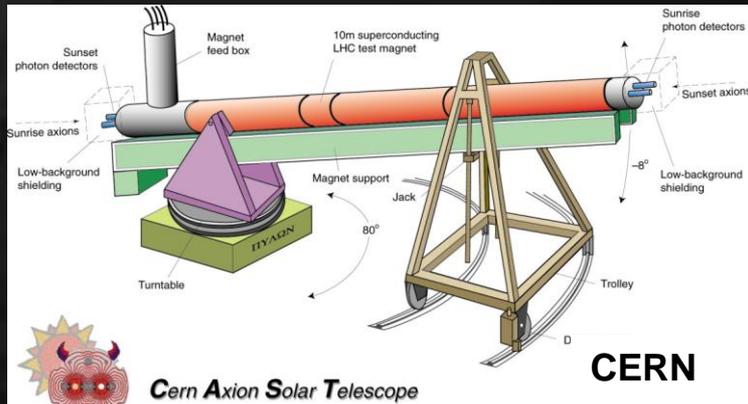
# 重いアクシオン探索

- 太陽中の磁場でできる  
アクシオンを検出
- 質量  $\sim eV$
- CERNや東大



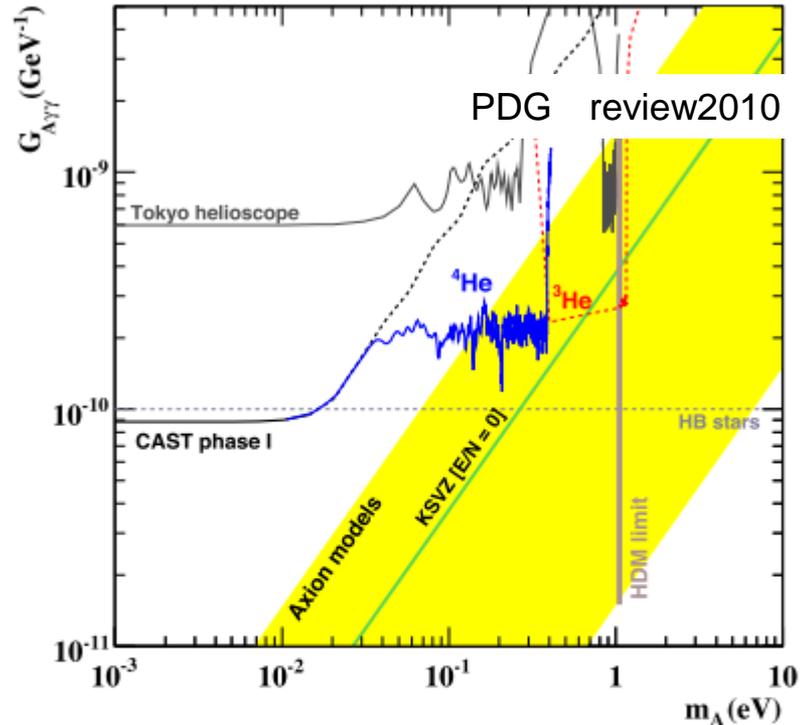
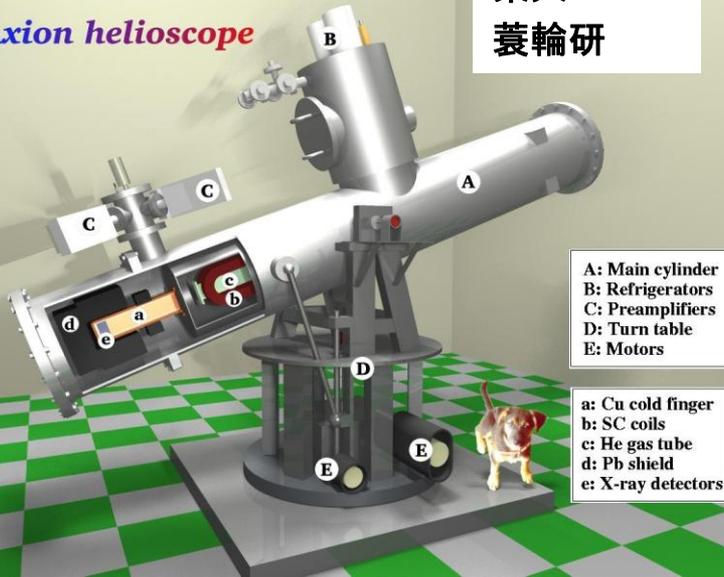
太陽からの  
アクシオン

磁場をかける



東大  
蓑輪研

Axion helioscope



**Figure 2:** Solar exclusion plot for axion-like particles [50]. The red dashed line is the sensitivity of the ongoing  $^3\text{He}$  phase of CAST. The vertical line (HDM) is the hot dark-matter limit [59]. The yellow band represents models with  $0.07 < |E/N - 1.92| < 0.7$ , the green solid line corresponds to KSVZ axions.

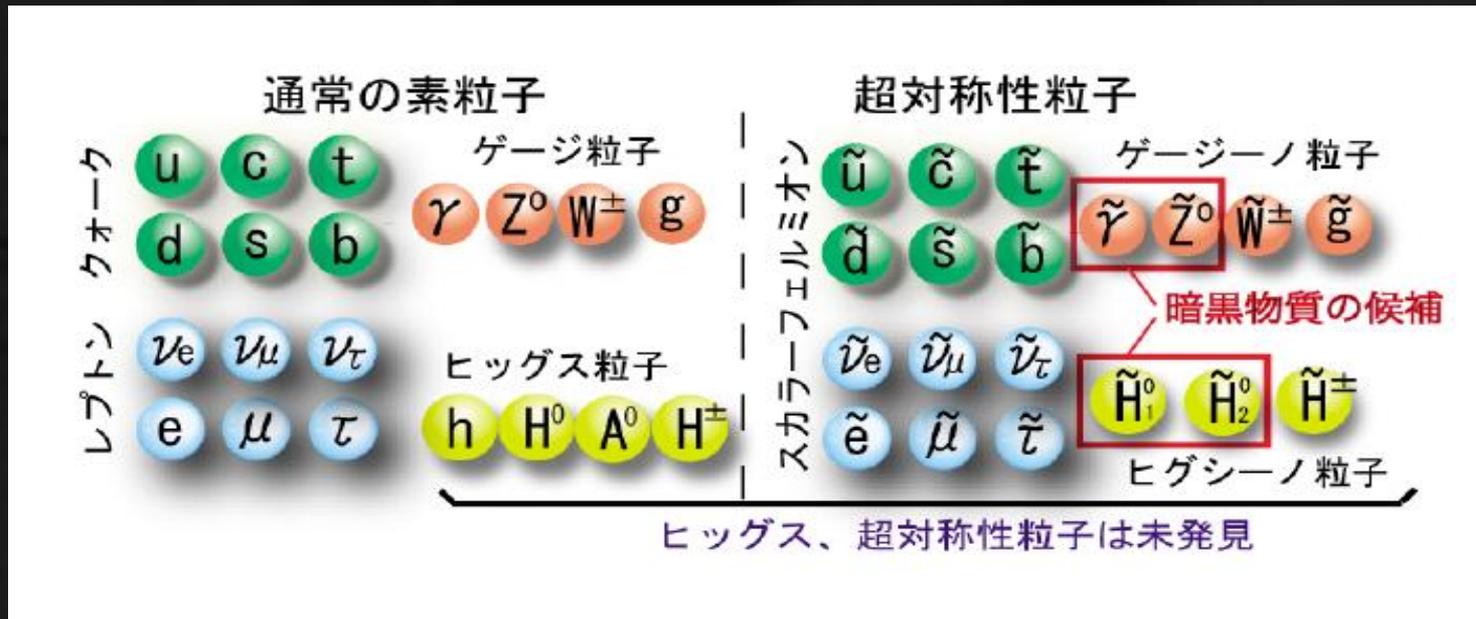
# WIMPs その中でも超対称性粒子(SUper SYmmetry)

・ スピンが1/2違うSUSY粒子 (ボゾン $\leftrightarrow$ フェルミオン)

・ 階層性問題 (大統一エネルギー/電弱エネルギー $\sim 10^{14}$ )

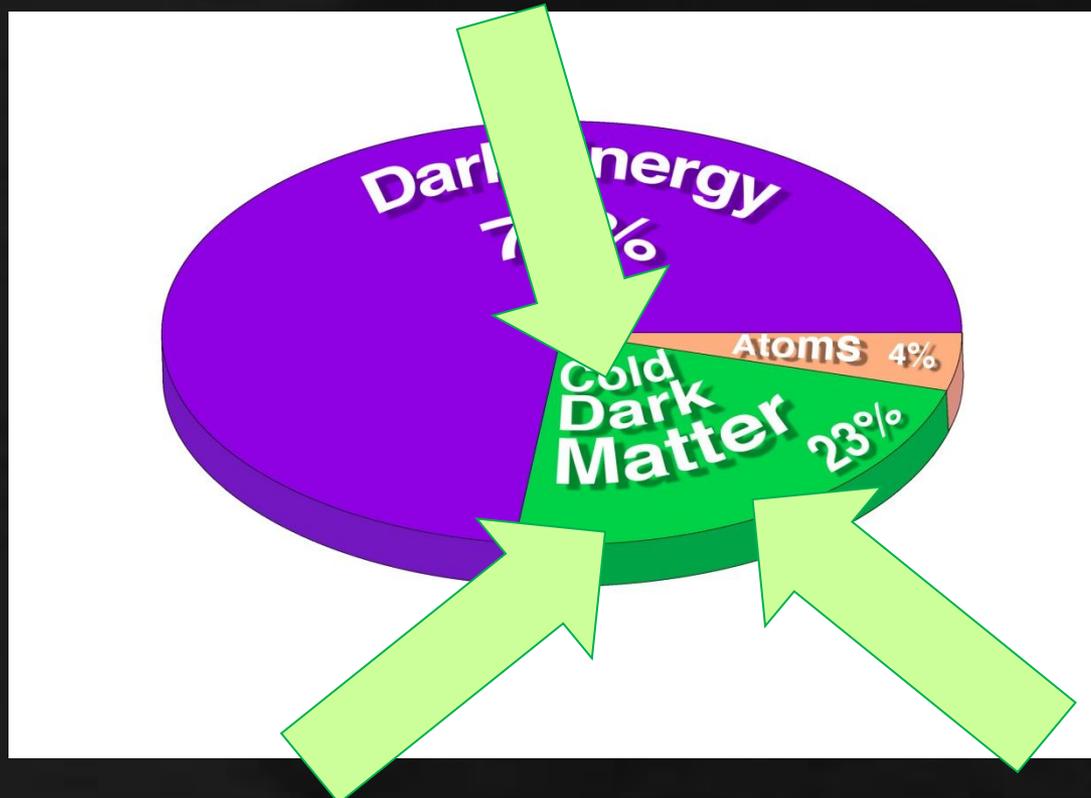
・ ヒッグスの質量発散問題

の解決の為に提唱



もっとも軽いSUSY粒子は安定  
⇒ 暗黒物質の良い候補

# 加速器実験



間接探索

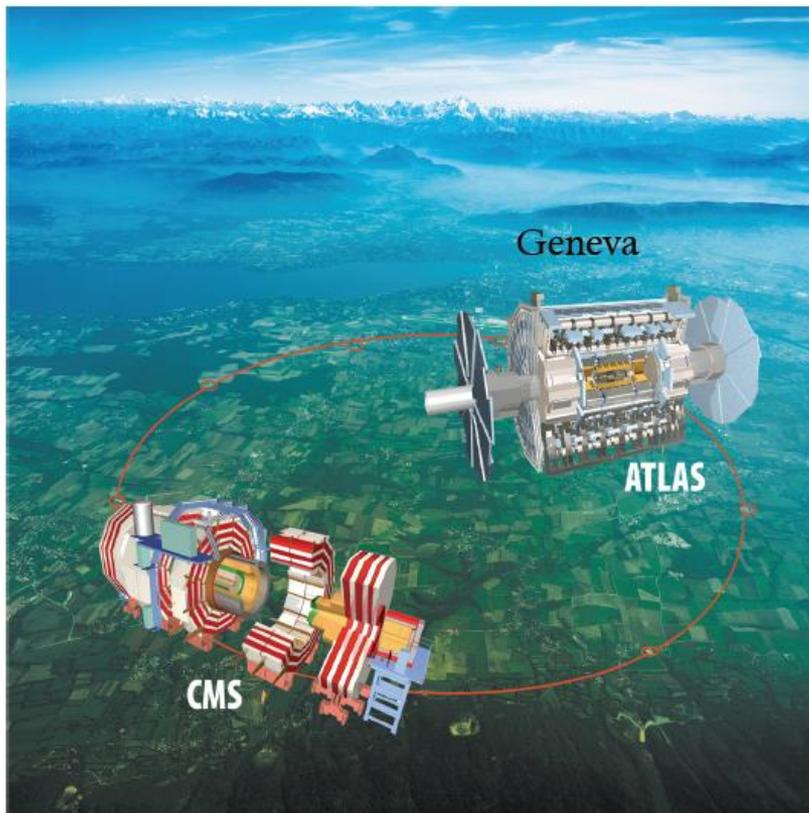
直接探索

# 加速器実験



# SUSY探索@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

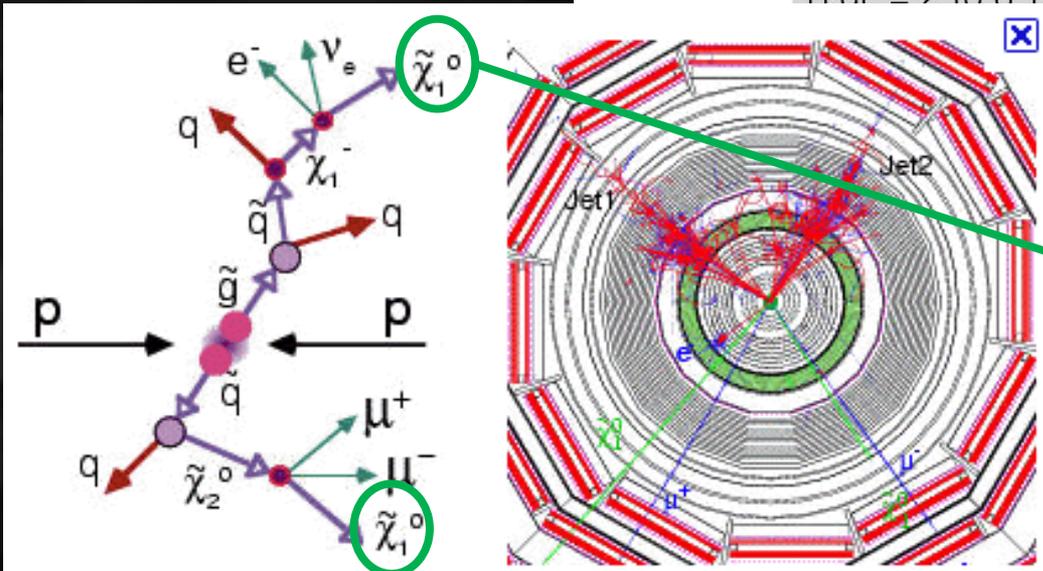
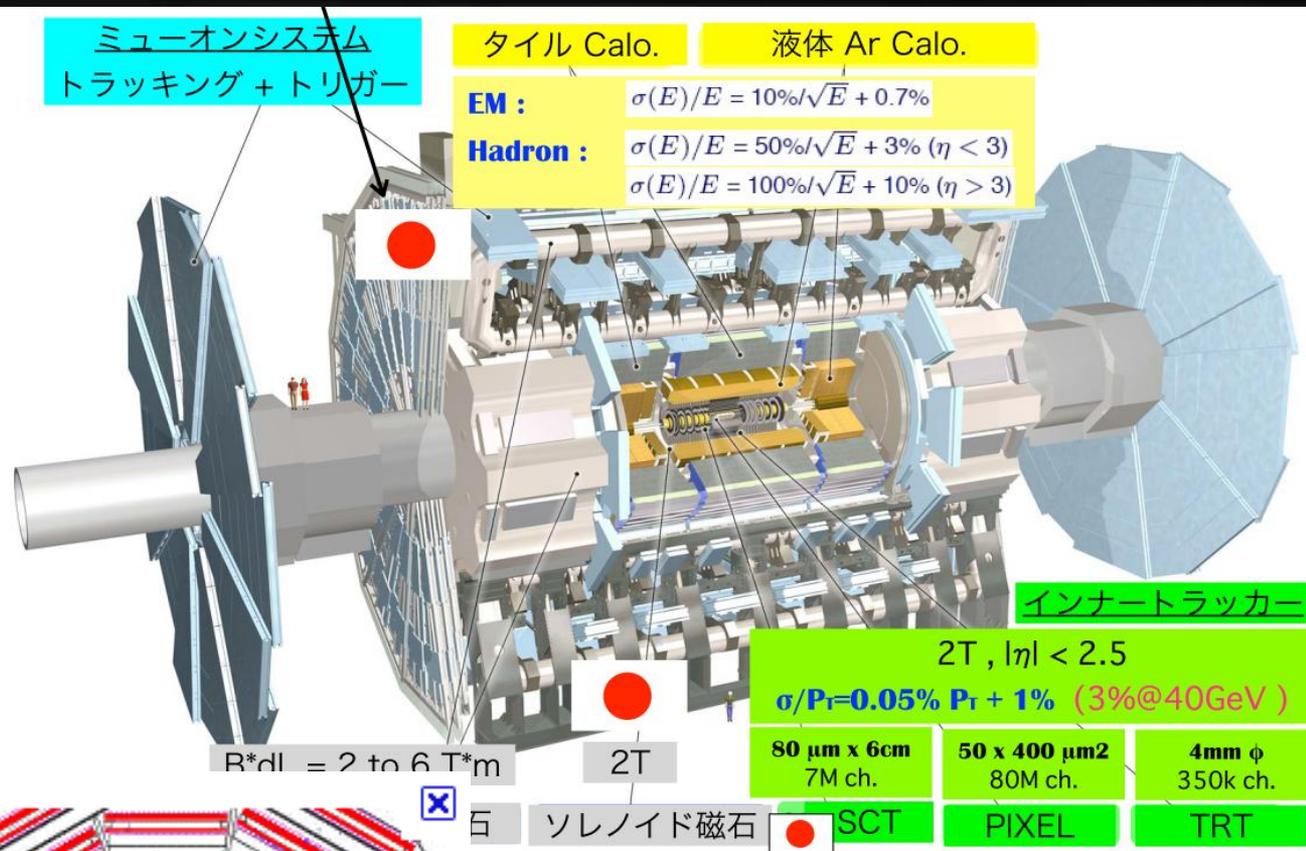
IDM2010 Montpellier - 30.07.2010 3

- 7TeV陽子 + 7TeV陽子 の衝突 (デザイン値)
- 現在半分のエネルギーでデータ取得中



# LHCで何を見るか

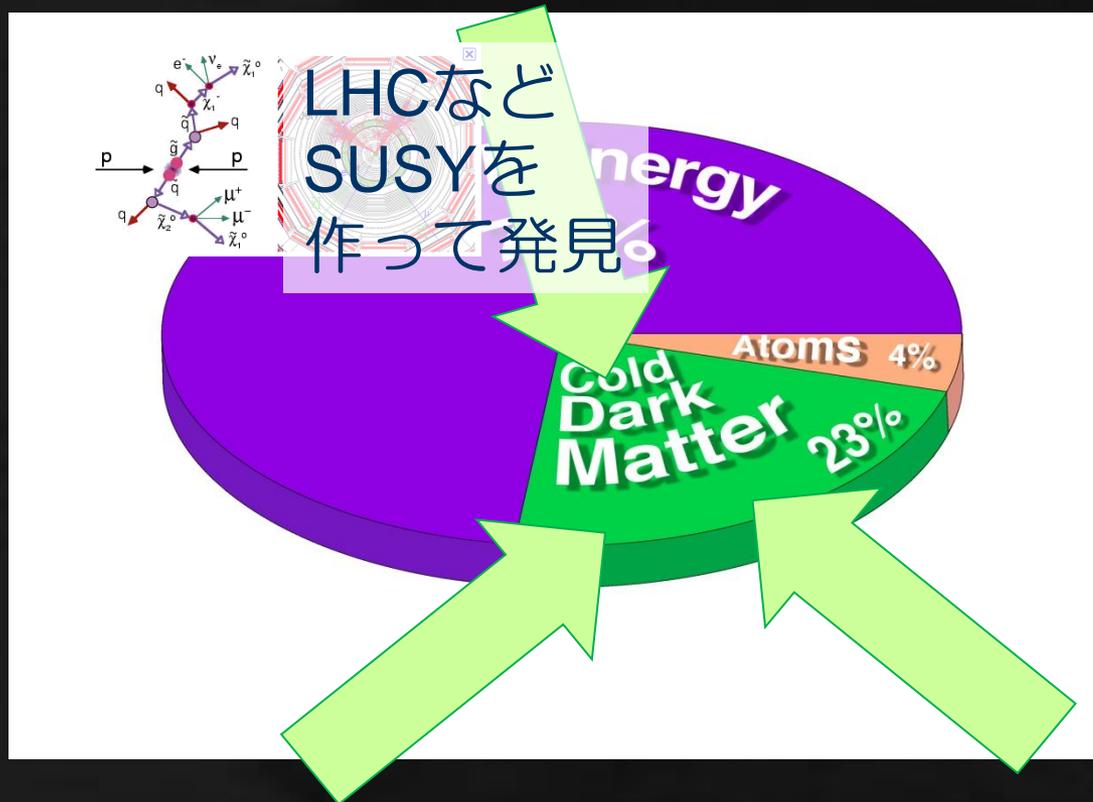
p+pからSUSYを作る



見えない運動量を探す  
 (あれば) SUSYを発見できる。  
 質量、その他のSUSYパラメータ

SUSY=暗黒物質  
 までは言えない。

# 加速器実験



間接探索

直接探索

# ◀ 間接探索

- 暗黒物質の重力集中⇒対消滅 @ 銀河中心など
- ガンマ線、陽電子、電子、ニュートリノ などを見る

## Dark matter annihilation as antimatter factory (complementary to gamma rays)

VOLUME 53, NUMBER 6      PHYSICAL REVIEW LETTERS      6 AUGUST 1984

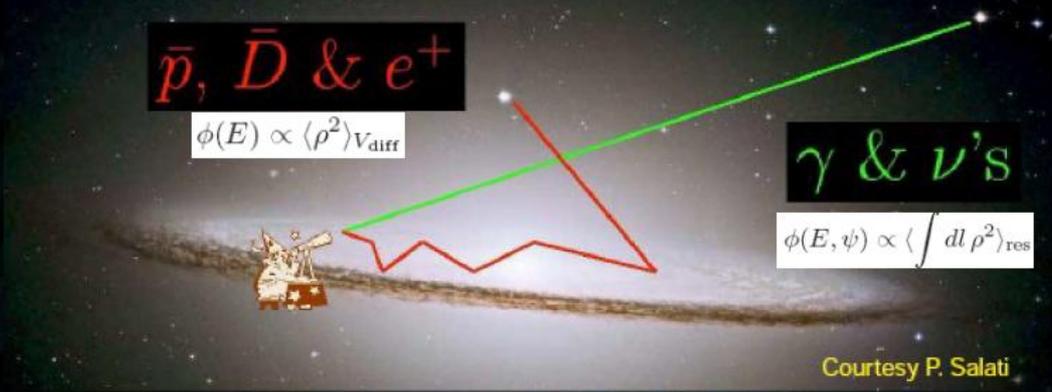
---

**Cosmic-Ray Antiprotons as a Probe of a Photino-Dominated Universe**

Joseph Silk  
*Astronomy Department, University of California, Berkeley, California 94720, and Institute for Theoretical Physics,  
University of California, Santa Barbara, California 93106*

and

Mark Srednicki  
*Physics Department, University of California, Santa Barbara, California 93106*  
(Received 8 June 1984)



- Main arguments:
- DM annihilation provides as many particles as antiparticles
  - Antimatter cosmic rays are rare because secondary products
  - DM-induced antimatter CRs may have specific spectral properties

- But:
- We must control the backgrounds
  - Antiprotons are secondaries, what about positrons ?
  - Do the natural DM particle models provide clean signatures?

# - PAMELA (衛星)

磁場を使ってpositronを選択的に検出  
2009年に「エクセス」の結果

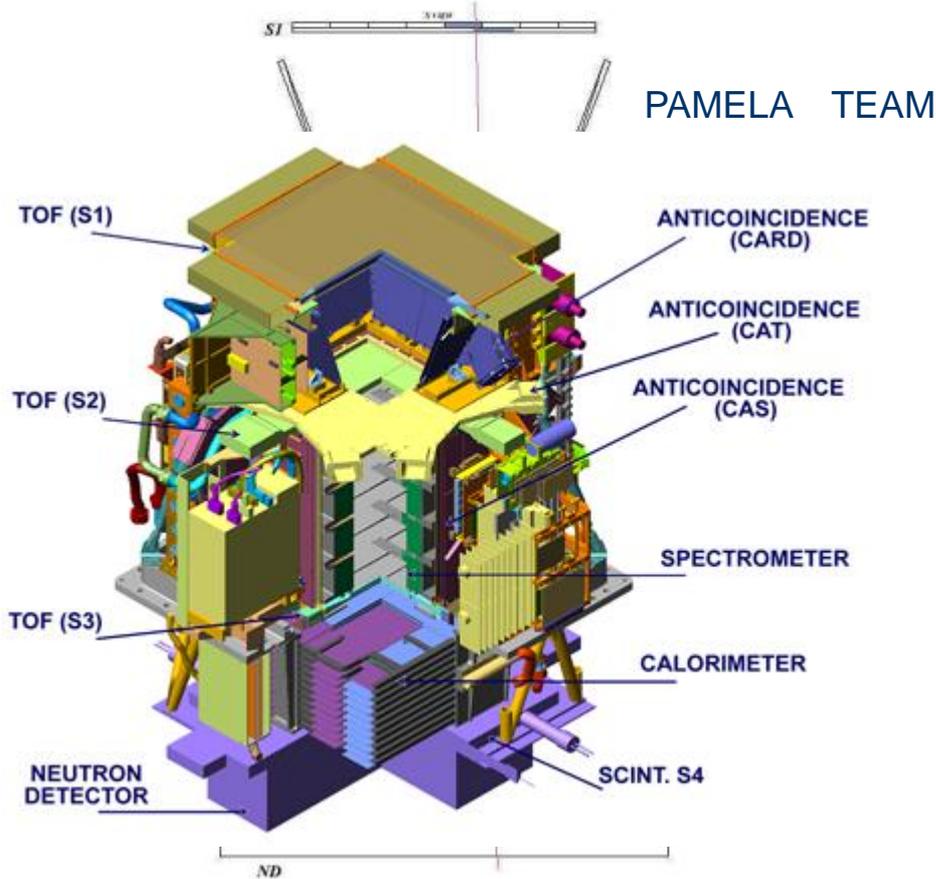


FIG. 5: Positron Event display. A 68 GeV positively-charged particle selected as positron. The bending (x) view is shown. The signals as detected by PAMELA detectors are shown along with the particle trajectory (solid line) reconstructed by the fitting procedure of the tracking system. The calorimeter shows the typical signature of an electromagnetic shower (plane 19 of the calorimeter x-view was malfunctioning).

NATURE | Vol 458 | 2 April 2009

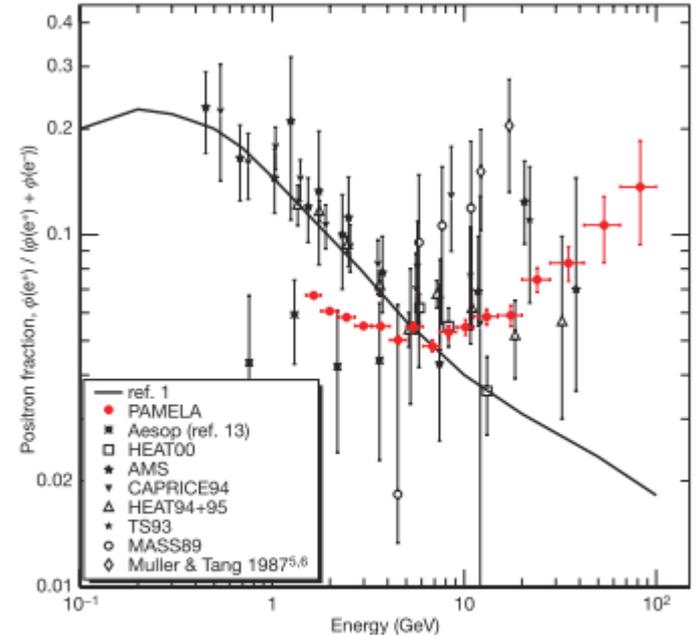
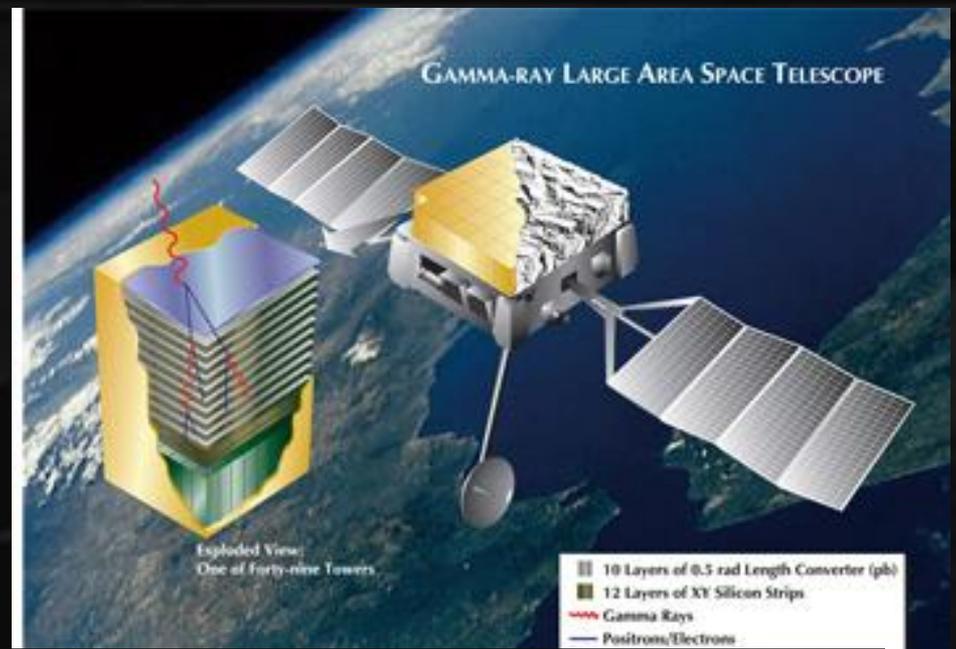


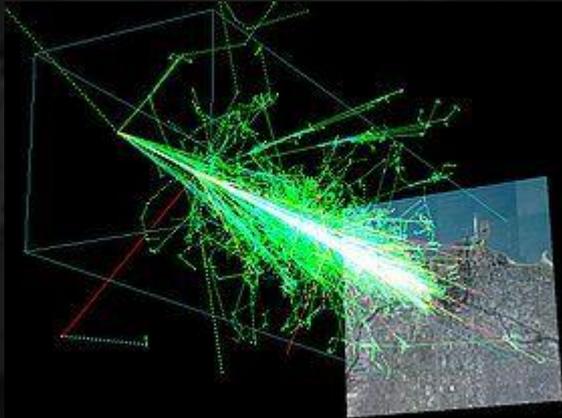
Figure 2 | PAMELA positron fraction with other experimental data and with secondary production model. The positron fraction measured by the PAMELA experiment compared with other recent experimental data (see refs 5–7, 11–13, 30, and references within). The solid line shows a calculation<sup>1</sup> for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic rays in the Galaxy without reacceleration processes. Error bars show 1 s.d.; if not visible, they lie inside the data points.

Direction Sensitive  
WIMP-search  
**NEWAGE**

- Fermi (衛星)  
電子・ガンマ線(対生成)  
シリコントラッカー



- HESS (地上)  
ガンマ線(大気チェレンコフ)



@ナミビア

# - Fermiの結果は

PRL102(2009)181101

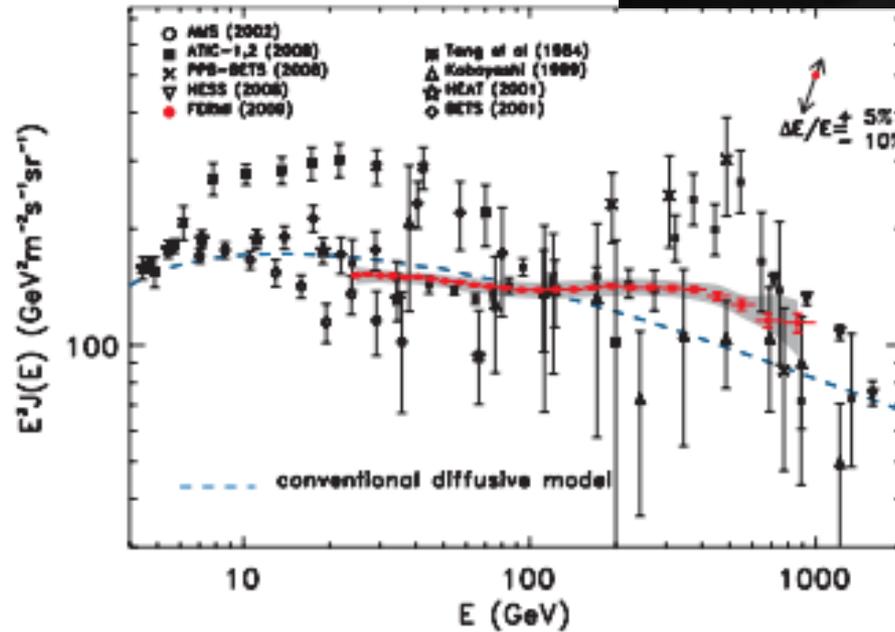


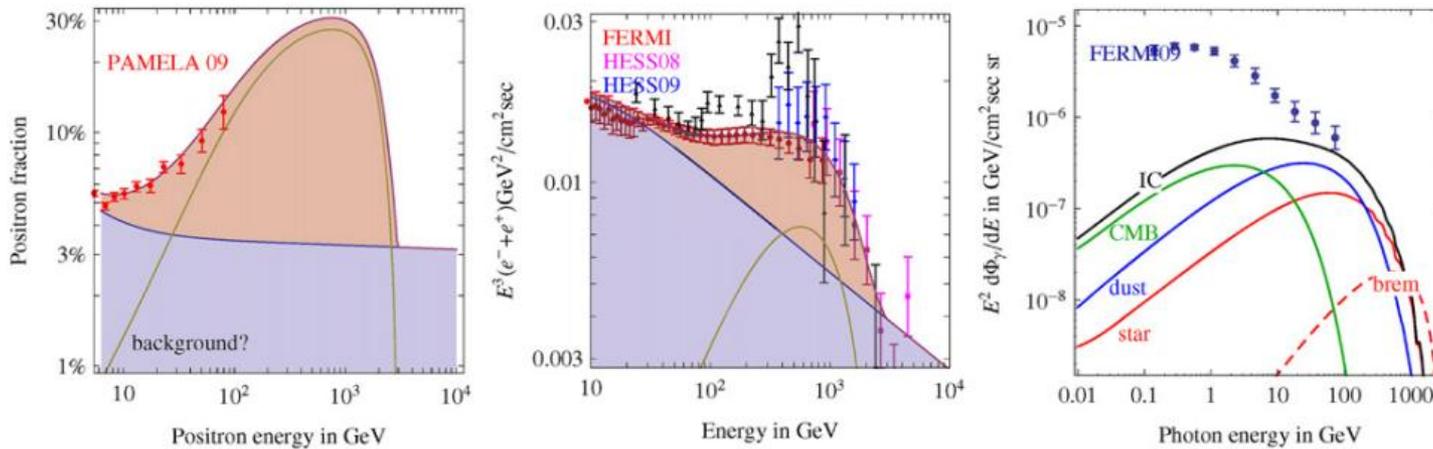
FIG. 3 (color). The Fermi LAT CR electron spectrum (red filled circles). Systematic errors are shown by the gray band. The two-headed arrow in the top-right corner of the figure gives size and direction of the rigid shift of the spectrum implied by a shift of  $+5\%$  to  $-10\%$  of the absolute energy, corresponding to the present estimate of the uncertainty of the LAT energy scale. Other high-energy measurements and a conventional diffusive model [1] are shown.

エクセスなかった。



# - 結果の解釈、、、

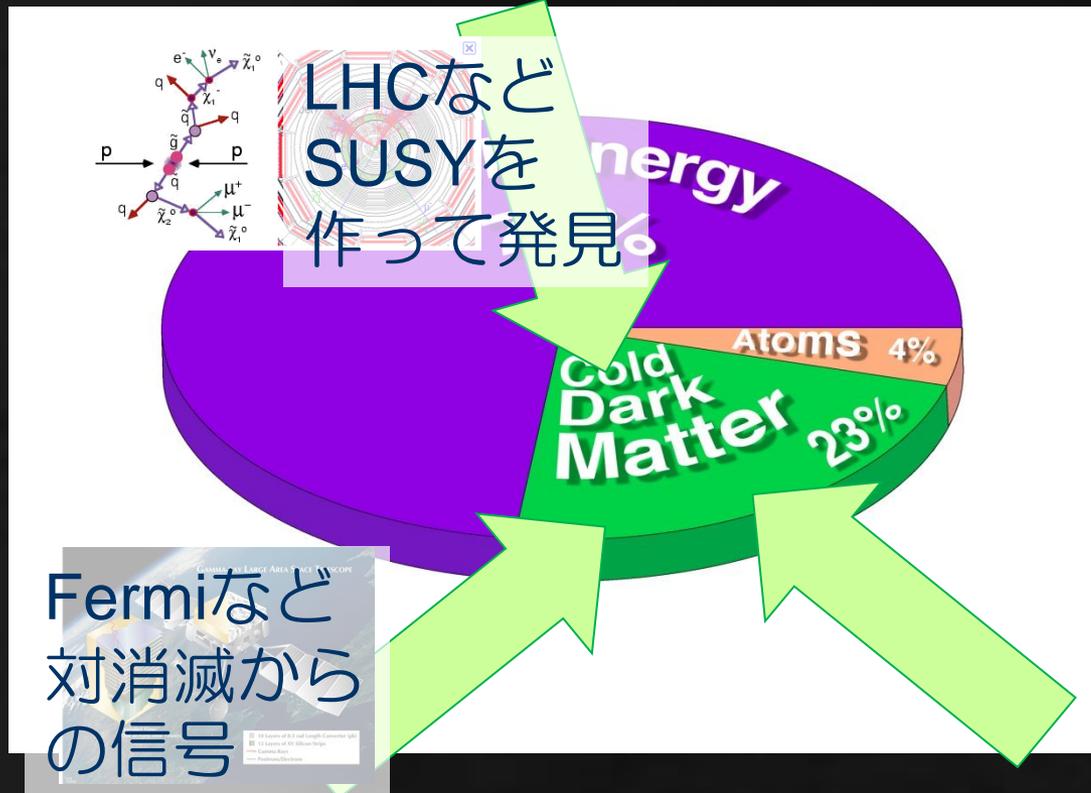
DM with  $M = 3. \text{ TeV}$  that annihilates into  $4\mu$  with  $\sigma v = 7.8 \times 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{s}$



PAMELA、Fermi、HESSの結果を説明するモデルが諸々提唱されている。暗黒物質でもそうでなくても構わない。

理論やさんの楽しい次期

# 加速器実験

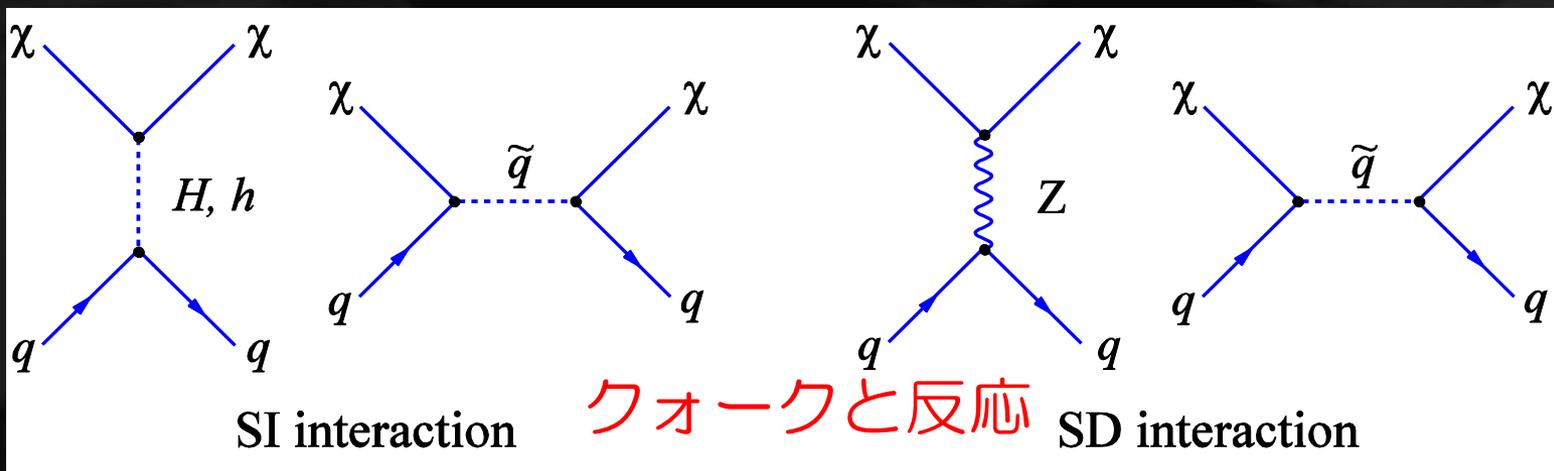
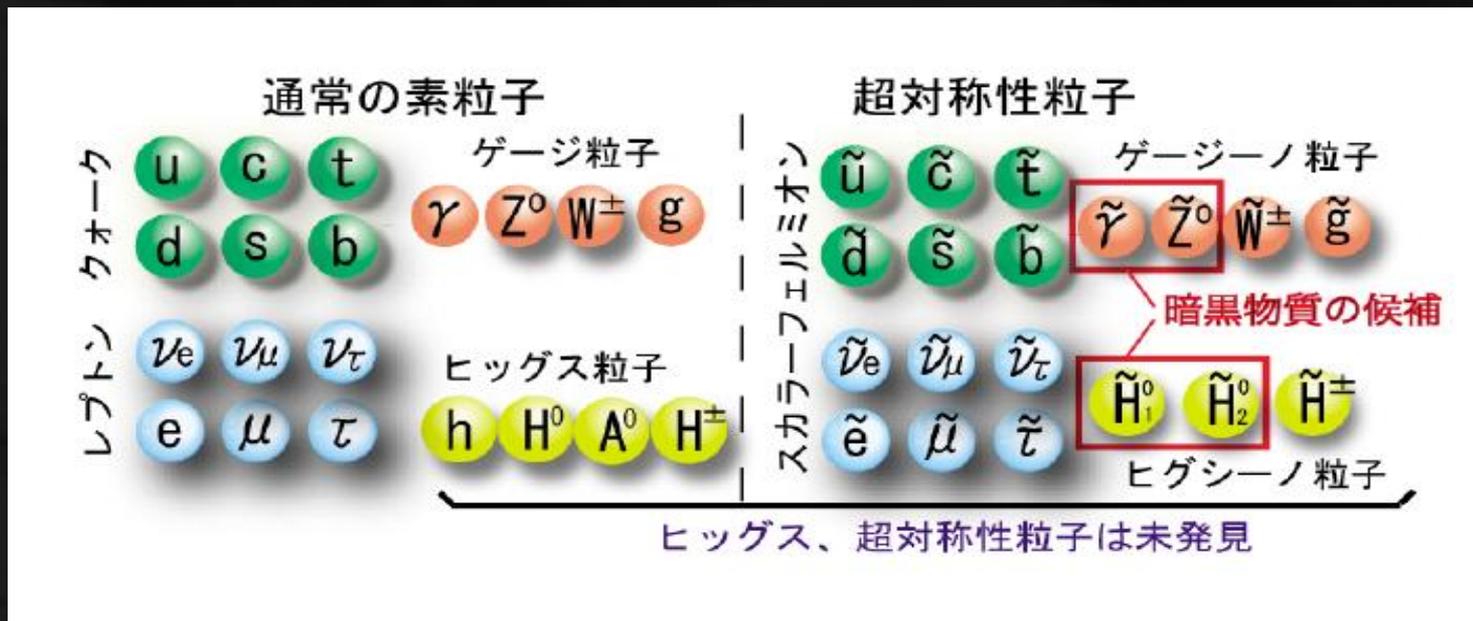


間接探索

直接探索

# 直接探索実験

# - WIMPs その中でも超対称性粒子



# 暗黒物質の直接検出

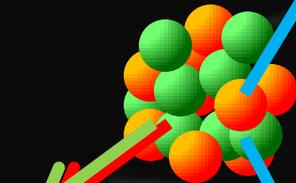
$E_R$  検出 (光)

**DAMA** (NaI)  
KIMS (CsI)  
XMASS (Xe)

(光+電離)

ZEPOLINE II/III  
**XENON10/100** (Xe)  
ArDM · WARP (Ar)

原子核



反跳

$E_R < \sim 100 \text{keV}$

暗黒物質

$E_R$  検出 (電離)

HPGe

(光+温度)

CRESST  
(CaWO<sub>4</sub>)

$E_R$  検出 (温度)

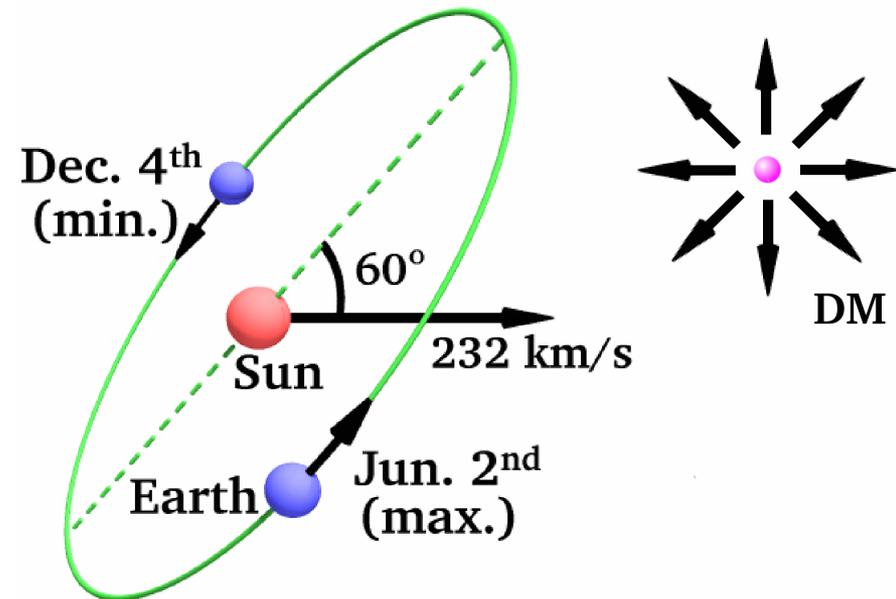
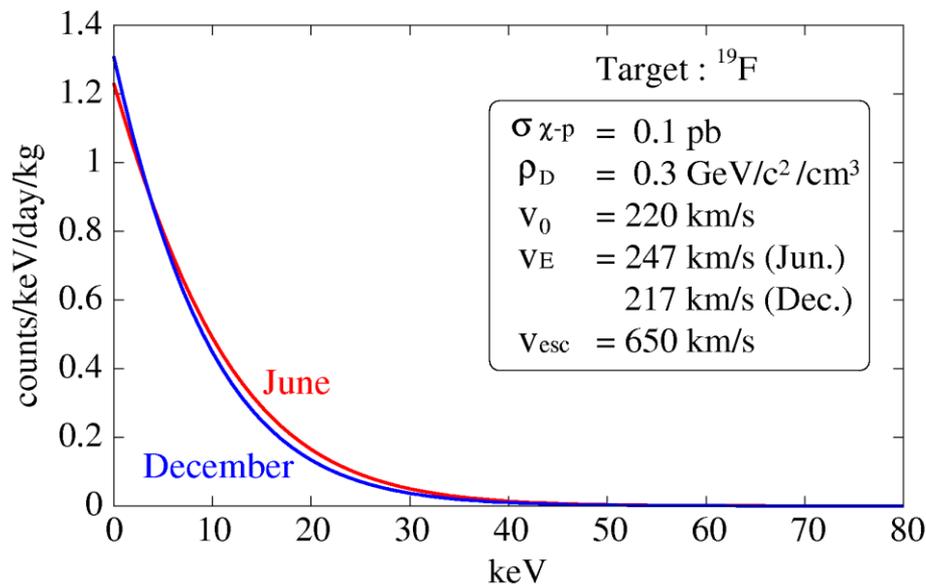
ROSEBUD (LiF),  
COUPP, SIMPLE, PICASSO  
(CxFx)

(電離+温度)

**CDMS** (Ge)  
EDELWEISS (Ge)

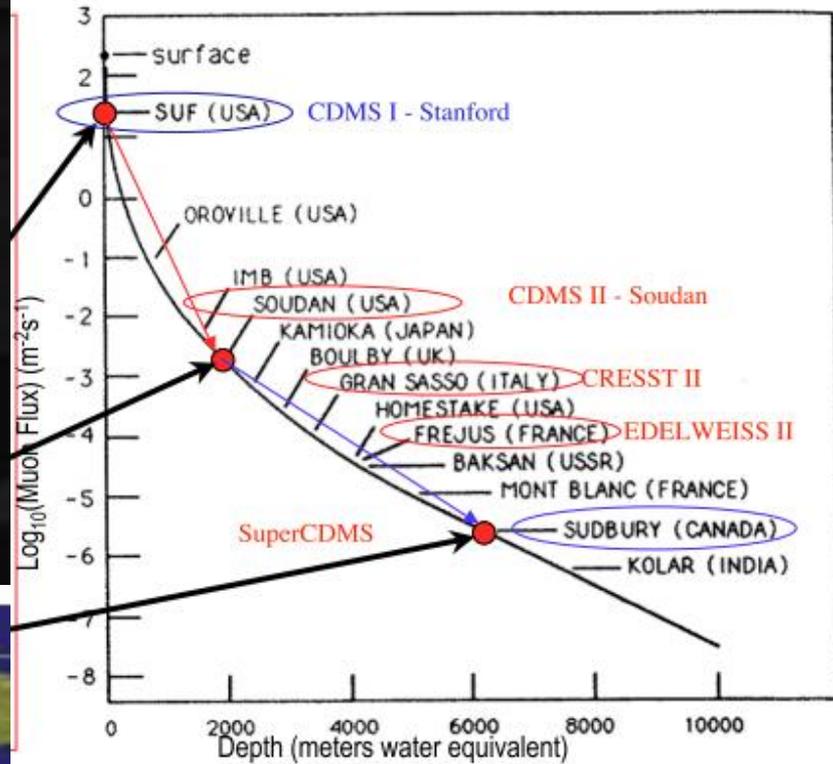
# ● 期待される信号

- その① スペクトル / 「\*\*事象見つけた」
- その② 計数率の季節変動
- その③ 到来方向の検出



# 世界の地下実験室

- 宇宙線起源のバックグラウンドを避けるために地下にもぐって実験
- 残りのBG:  $\gamma$ 線・中性子



ヨーロッパ  
英国・フランス  
スペイン・イタリア他

アジア  
日本・韓国

北米  
米国・カナダ

# おもな実験の比較

	CDMS	XENON	DAMA/LIBRA
ターゲット	半導体 (Ge,Si)	液体キセノン	NaI
温度	10mK	~160K	常温
オペレーション	極難	難	易
質量	1kg	10kg	250kg
ガンマ線除去	適用	適用	不使用
最長データ取得	3ヶ月程度	3ヶ月程度	7年+4年

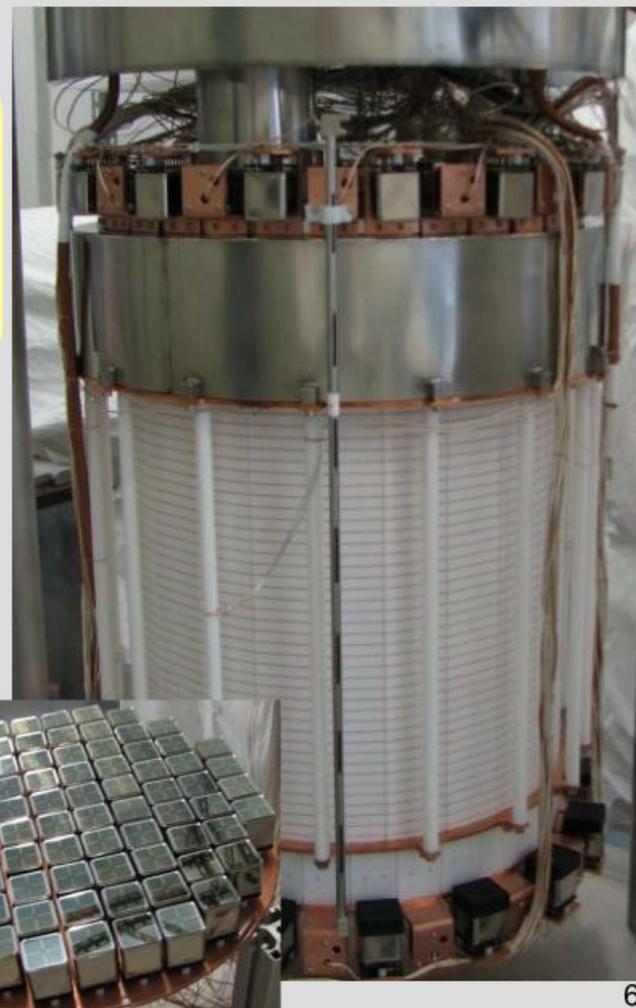
## XENON100

### Goal (compared to XENON10):

- increase target  $\times 10$
- reduce gamma background  $\times 100$   
→ material selection & screening  
→ detector design

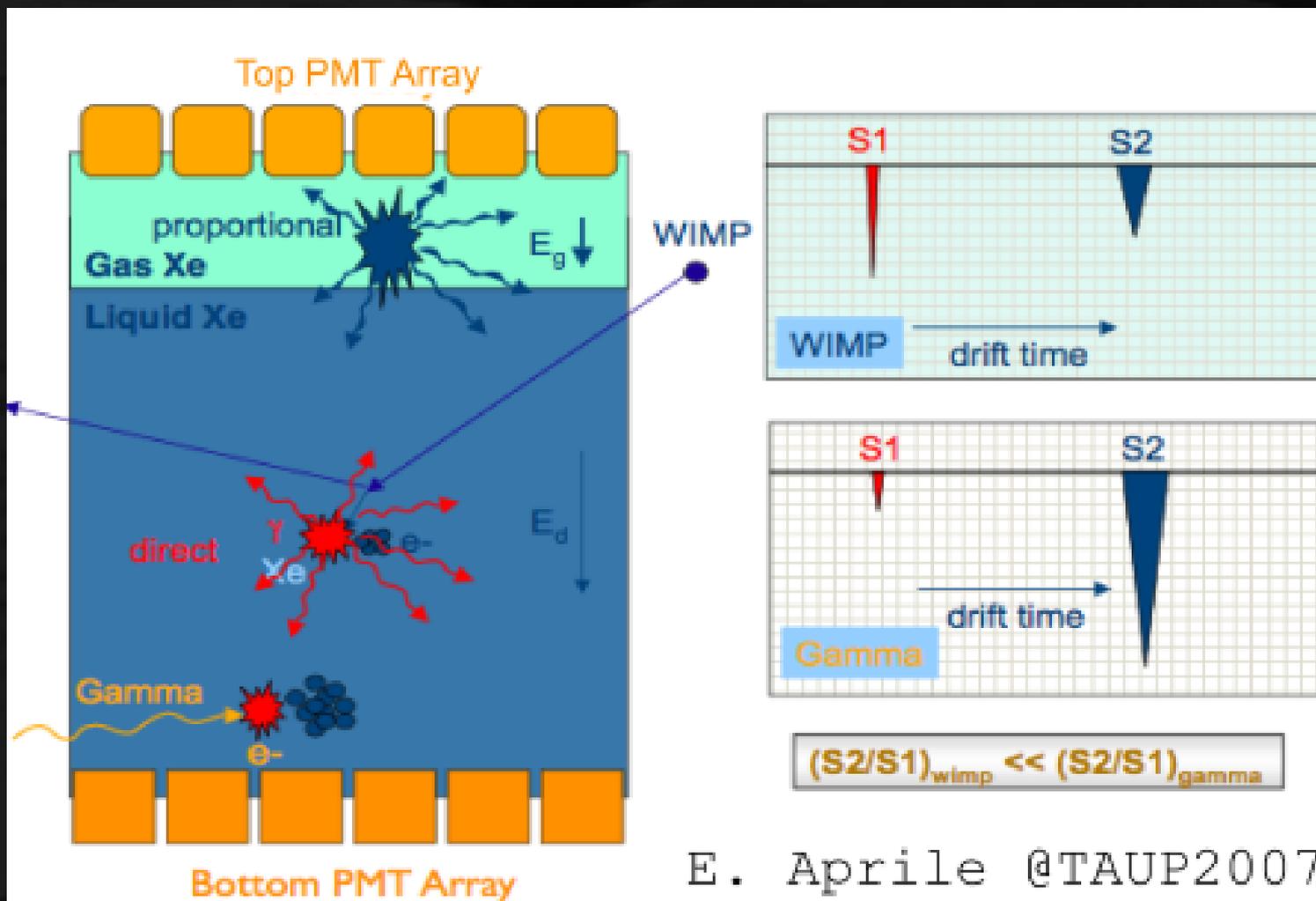
### Quick Facts:

- 161 kg LXe TPC (mass:  $10 \times \text{Xe10}$ )
- 62 kg in target volume
- active LXe veto ( $\geq 4$  cm)
- 242 PMTs (Hamamatsu R8520)
- improved Xe10 shield  
(Pb, Poly, Cu, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> purge)



# XENON100

## ガンマ線除去



E. Aprile @TAUP2007

# DAMA/LIBRA

## 250kgのNaIシンチレータ

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

filling the inner Cu box with  
further shield

DAMA/LIBRA started operations on March 2003

BELLI@  
TAUP07

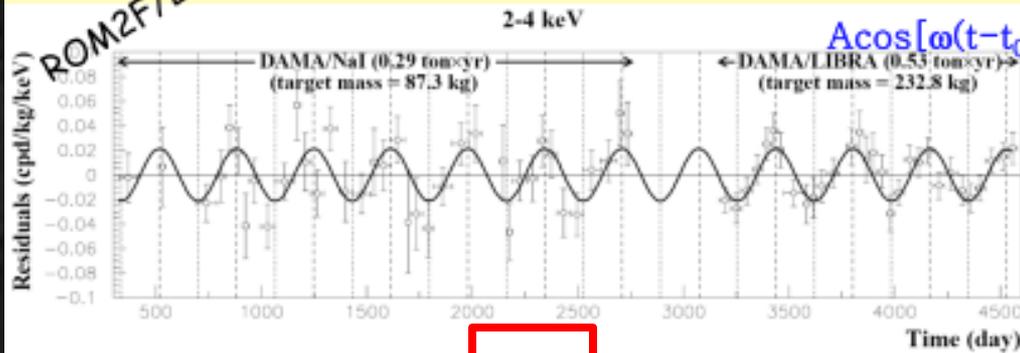
closing the Cu box  
housing the detectors

view at end of detectors'  
installation in the Cu box

Sensitive  
P-search  
AGE

# Model Independent Annual Modulation Result

DAMA/NaI (7 years) + DAMA/LIBRA (4 years) Total exposure: 300555 kg×day = 0.82 ton×yr  
 experimental single-hit residuals rate vs time and energy



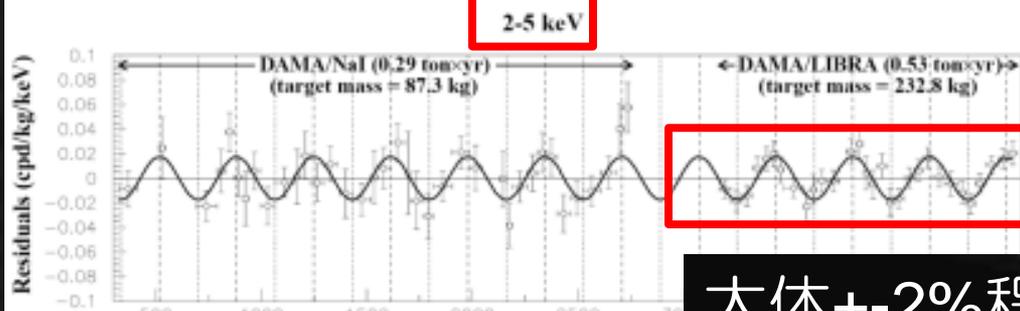
2-4 keV

$A = (0.0215 \pm 0.0026)$  cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 51.9/66$  **8.3  $\sigma$  C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 117.7/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.3 \times 10^{-4}$



2-5 keV

$A = (0.0176 \pm 0.0020)$

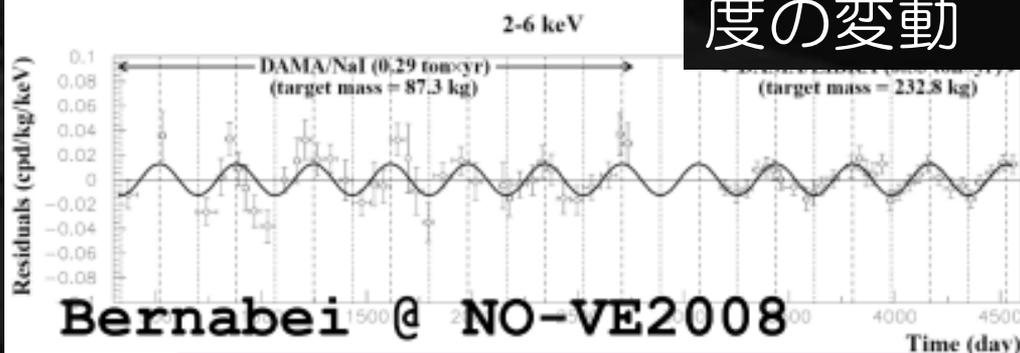
cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 39.6/66$  **8.8  $\sigma$  C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.1/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.9 \times 10^{-4}$

大体+-2%程  
 度の変動



2-6

$A = (0.0129 \pm 0.0016)$  cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 54.3/66$  **8.2  $\sigma$  C.L.**

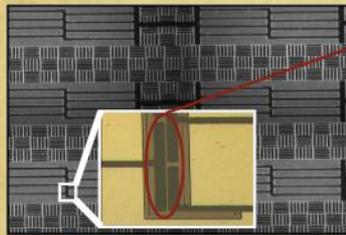
Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.4/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.8 \times 10^{-4}$

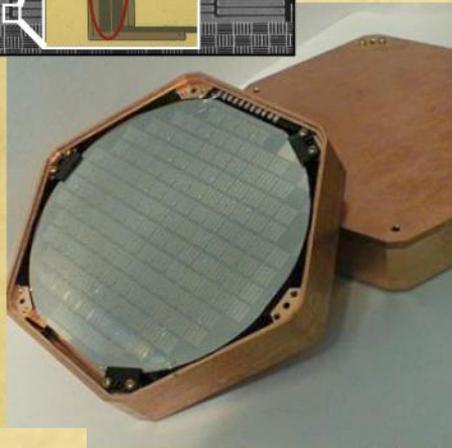
Bernabei @ NO-VE2008

# CDMS

- ゲルマニウム 230g×19ヶ
- ガンマ線除去に優れる



This the  
superconducting  
thermometer  
1x250  $\mu\text{m}$



Tarek Saab

@IDM2010



# CDMS「12月17日に結果発表します」 世界中の憶測合戦。 結局2事象(両方BGである可能性は23%)

トップ ニュース スポーツ エンタメ ライフ

社会 ビジネス 政治 国際 文化 サイエンス 社説 コラム 大気 交通 動画 マイタビ English

現在位置: asahi.com > ニュース > サイエンス > 記事

## 宇宙の「暗黒物質」検出？ 本当ならノーベル賞級の発見

2009年12月11日14時29分

B 印刷 ブログに利用する

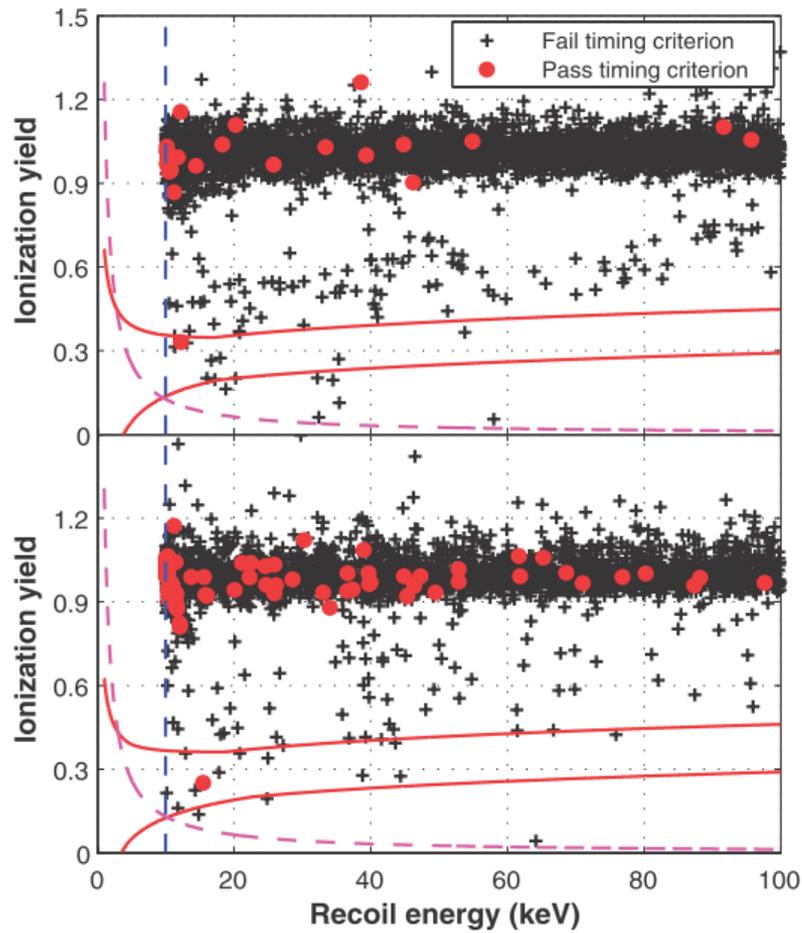
【ワシントン＝勝田敏彦】宇宙の「物質」の4分の1を占めるとされるが、影も形もない謎の「暗黒物質」の粒子が米国でついに検出されたらしい、との報道が英米の科学雑誌や研究施設の地元紙の電子版などで相次いでいる。暗黒物質の理解は宇宙物理の最も大きな課題の一つで、本当ならノーベル賞級の大発見となる。

宇宙の構成は、我々の世界を作っていると考えられている素粒子は数%に過ぎず、7割強を未知の「暗黒エネルギー」が、2割強をやはり未知の暗黒物質が占めているとみられている。

報道などによると、米ミネソタ大が運営する地下約700メートルにある施設CDMS2が暗黒物質の粒子を検出したという。17日ごろに「検出」を報告する論文を発表するという報道もあるが、研究チームはコメントを出していない。

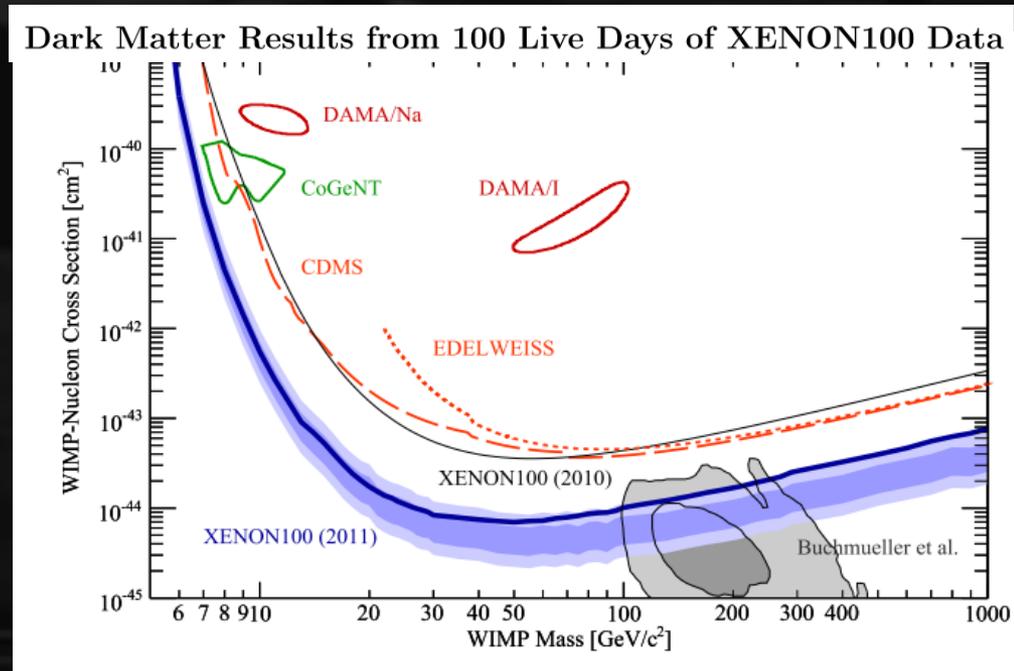
この施設は、暗黒物質の粒子がぶつかってきたときに起きると予想されるわずかな温度上昇を極低温にした半導体で検出する。「検出」を示すには、まれにしか起きない反応を長期間観測する必要があるうえ、類似現象を確実に除外しなければならず、かなり難しいと考えられている。

暗黒物質は2007年、米航空宇宙局(NASA)のハッブル宇宙望遠鏡が、50億光年離れた銀河団に存在しているのを見つけたが、地上で



# 戦いの歴史

- 1997～ DAMA : 「検出」を主張
- 2000～ CDMS等に否定される
- 2008年 LIBRAで再現!
- 2009年 CDMS 2事象
- 2010年～ その他の実験も (BGだろうが) 「\*\*事象」を報告



# 世界の暗黒物質探索：今後は？日本は？

- 大質量の戦いに参戦：XMASS（東大）
- 別の切り口で：NEWAGE（京大）



← XMASS検出器

液体キセノン800kg  
時期的な遅れは量で取り戻す  
2010年より稼働

日経サイエンス 2010.06  
SCIENTIFIC AMERICAN 日本版  
ニュースページ拡充!

ion Sensitive  
WIMP-search  
**NEWAGE**

# 方向感度を持つ実験

# 第四の情報：原子核飛跡

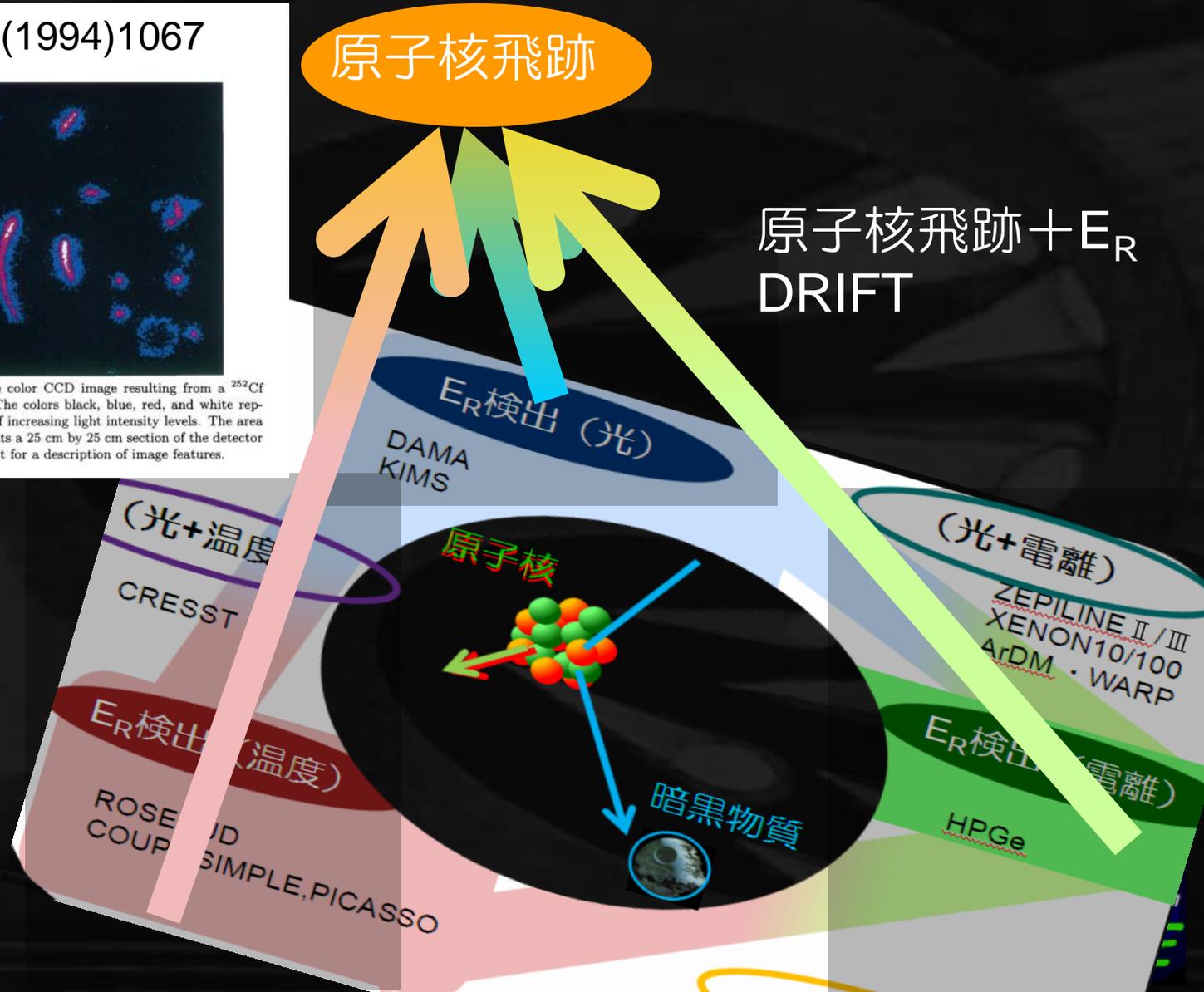
PRL73(1994)1067



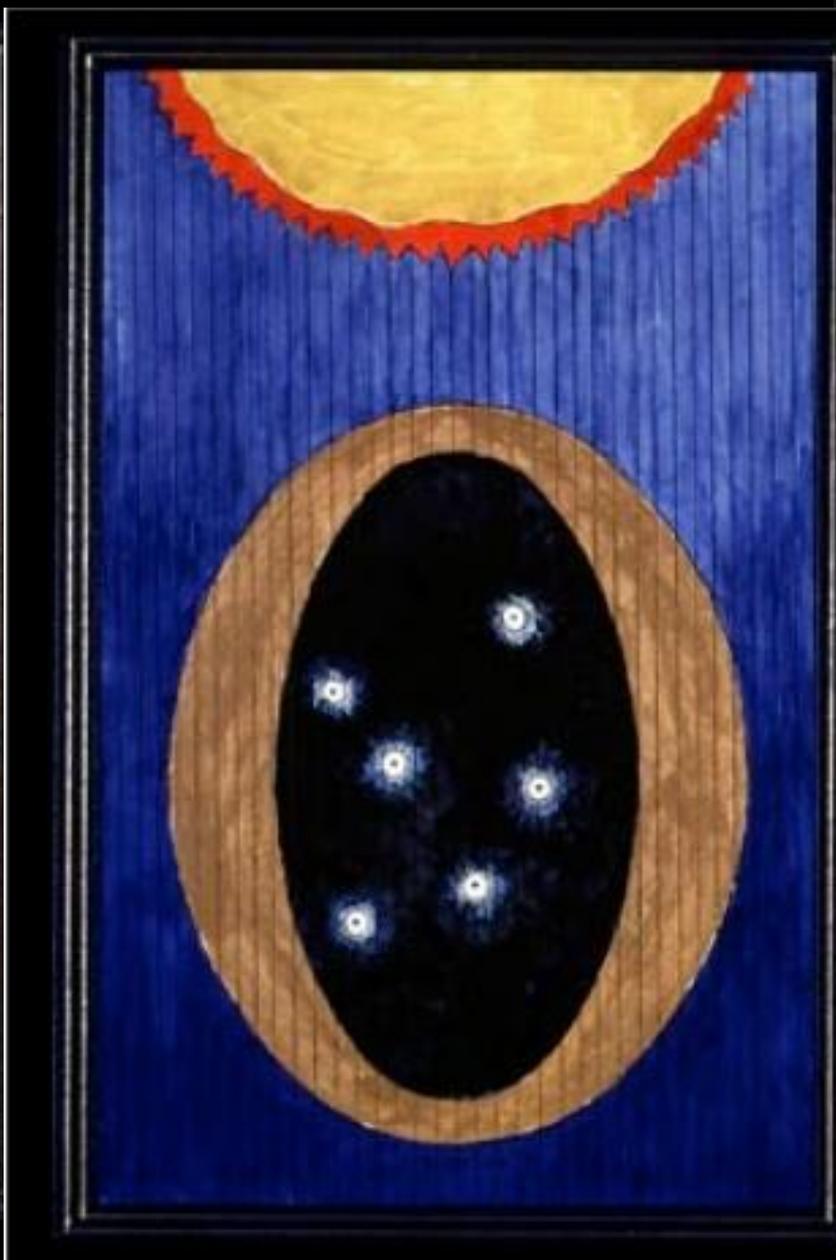
FIG. 2. A false color CCD image resulting from a  $^{252}\text{Cf}$  neutron source. The colors black, blue, red, and white represent the order of increasing light intensity levels. The area displayed represents a 25 cm by 25 cm section of the detector plane. See the text for a description of image features.

原子核飛跡

原子核飛跡 +  $E_R$   
DRIFT



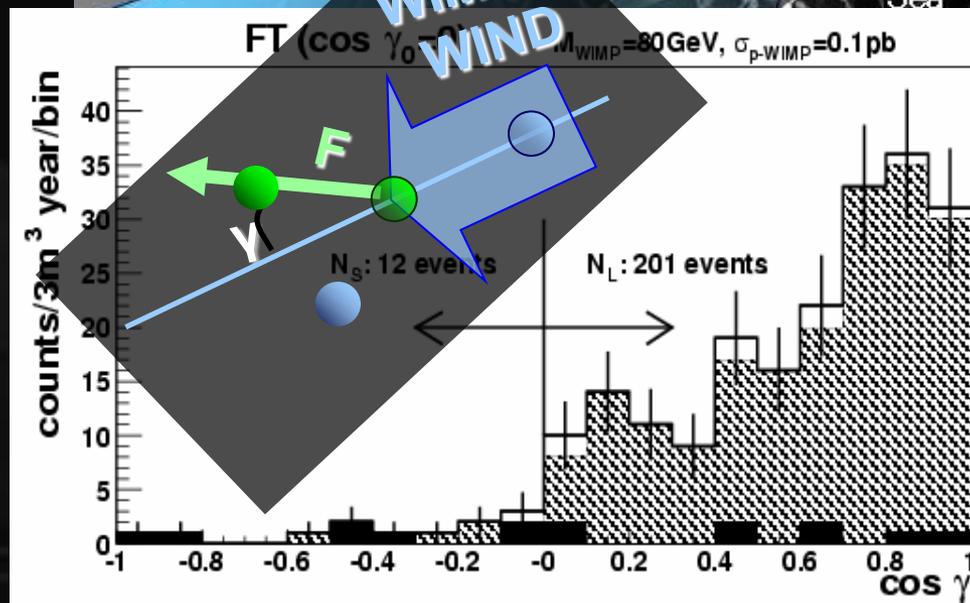
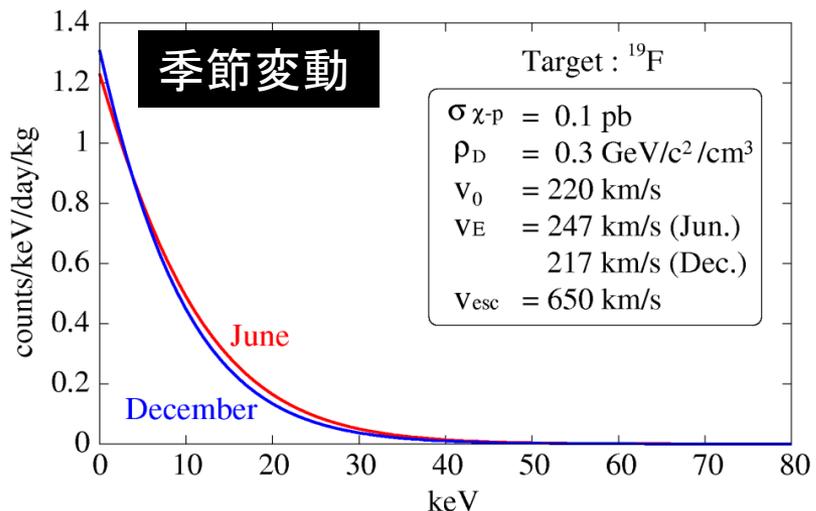
# 「方向性」の重要性



S  
li  
  
som  
fysi  
i  
mä  
R  
för  
fy  
.  
J

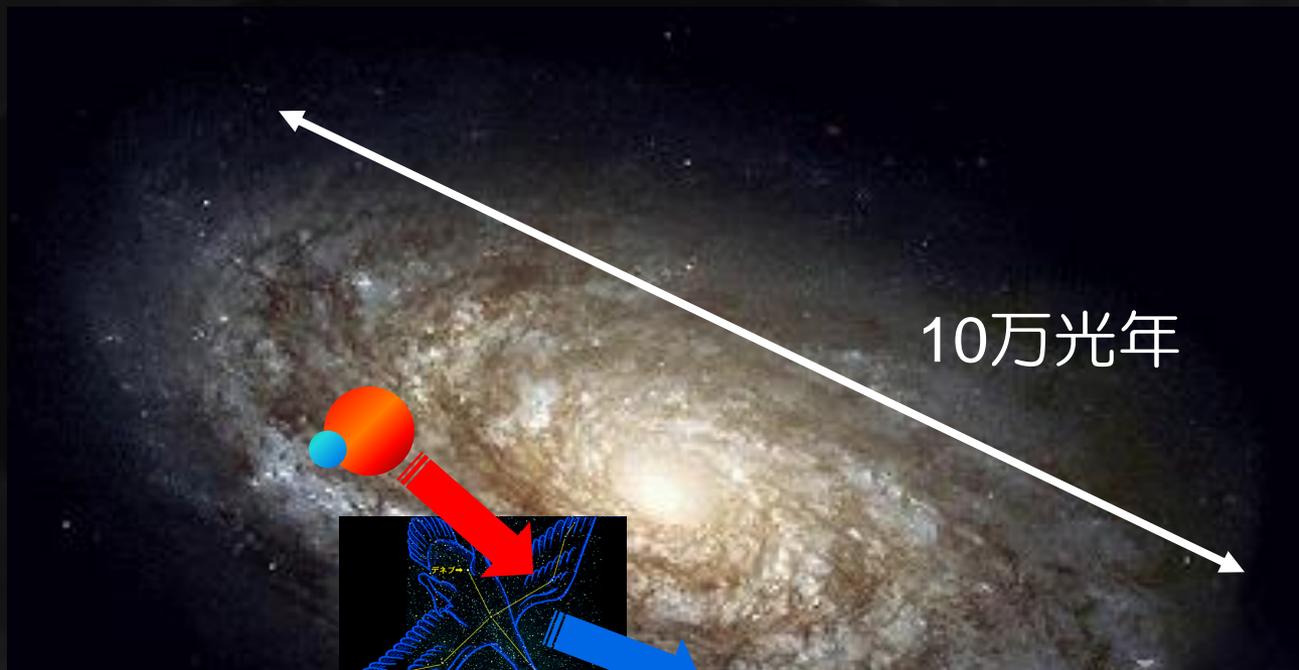
# 飛跡検出のメリット

- 季節変動(5%以下)と比較して確実な証拠となる  
(前後の非対称度は最大で10倍。)
- 検出の後には暗黒物質の性質解明



# CYGNUS

- 方向に感度を持った暗黒物質実験のworkshop
  - 2007年に初回を立ちあげ、2009年5月に2回目



デネブまでは  
1500光年程度



@CYGNUS2009 (MIT)

# "WHITE PAPER"

(arXiv 200911.0323)

世界の実験

DRIFT (英)

DM-TPC (米)

NEWAGE (京大)

MIMAC (仏)

NIT (名大)

International Journal of Modern Physics A  
© World Scientific Publishing Company

## The case for a directional dark matter detector and the status of current experimental efforts

S. AHLEN,<sup>1</sup> N. AFSHORDI,<sup>22,30</sup> J. B. R. BATTAT,<sup>14</sup> J. BILLARD,<sup>11</sup> N. BOZORGNIA,<sup>3</sup>  
S. BURGOS,<sup>20</sup> T. CALDWELL,<sup>14,21</sup> J. M. CARMONA,<sup>12</sup> S. CEBRIAN,<sup>12</sup> P. COLAS,<sup>4</sup>  
T. DAFNI,<sup>12</sup> E. DAW,<sup>25</sup> D. DUJMIC,<sup>14</sup> A. DUSHKIN,<sup>2</sup> W. FEDUS,<sup>14</sup> E. FERRER,<sup>4</sup>  
D. FINKBEINER,<sup>6</sup> P. H. FISHER,<sup>14</sup> J. FORBES,<sup>20</sup> T. FUSAYASU,<sup>15</sup> J. GALAN,<sup>12</sup>  
T. GAMBLE,<sup>25</sup> C. GHAG,<sup>5</sup> I. GIOMATARIS,<sup>4</sup> M. GOLD,<sup>17</sup> H. GOMEZ,<sup>12</sup> M. E. GOMEZ,<sup>7</sup>  
P. GONDOLO,<sup>28</sup> A. GREEN,<sup>19</sup> C. GRIGNON,<sup>11</sup> O. GUILLAUDIN,<sup>11</sup> C. HAGEMANN,<sup>17</sup>  
K. HATTORI,<sup>10</sup> S. HENDERSON,<sup>14</sup> N. HIGASHI,<sup>10</sup> C. IDA,<sup>10</sup> F. J. IGUAZ,<sup>12</sup> A. INGLIS,<sup>1</sup>  
I. G. IRASTORZA,<sup>12</sup> S. IWAKI,<sup>10</sup> A. KABOTH,<sup>14</sup> S. KABUKI,<sup>10</sup> J. KADYK,<sup>13</sup>  
N. KALLIVAYALIL,<sup>14</sup> H. KUBO,<sup>10</sup> S. KUROSAWA,<sup>10</sup> V. A. KUDRYAVTSEV,<sup>25</sup> T. LAMY,<sup>11</sup>  
R. LANZA,<sup>14</sup> T. B. LAWSON,<sup>25</sup> A. LEE,<sup>14</sup> E. R. LEE,<sup>17</sup> T. LIN,<sup>6</sup> D. LOOMBA,<sup>17</sup>  
J. LOPEZ,<sup>14</sup> G. LUZON,<sup>12</sup> T. MANOBU,<sup>9</sup> J. MARTOFF,<sup>26</sup> F. MAYET,<sup>11</sup> B. McCLUSKEY,<sup>25</sup>  
E. MILLER,<sup>17</sup> K. MIUCHI,<sup>10</sup> J. MONROE,<sup>14</sup> B. MORGAN,<sup>29</sup> D. MUNA,<sup>19</sup>  
A. St. J. MURPHY,<sup>5</sup> T. NAKA,<sup>16</sup> K. NAKAMURA,<sup>10</sup> M. NAKAMURA,<sup>16</sup> T. NAKANO,<sup>16</sup>  
G. G. NICKLIN,<sup>25</sup> H. NISHIMURA,<sup>10</sup> K. NIWA,<sup>16</sup> S. M. PALING,<sup>25</sup> J. PARKER,<sup>10</sup>  
A. PETKOV,<sup>20</sup> M. PIPE,<sup>25</sup> K. PUSHKIN,<sup>20</sup> M. ROBINSON,<sup>25</sup> A. RODRIGUEZ,<sup>12</sup>  
J. RODRIGUEZ-QUINTERO,<sup>7</sup> T. SAHIN,<sup>14</sup> R. SANDERSON,<sup>14</sup> N. SANGHI,<sup>17</sup>  
D. SANTOS,<sup>11</sup> O. SATO,<sup>16</sup> T. SAWANO,<sup>10</sup> G. SCIOLLA,<sup>14</sup> H. SEKIYA,<sup>27</sup> T. R. SLATYER,<sup>6</sup>  
D. P. SNOWDEN-IFFT,<sup>20</sup> N. J. C. SPOONER,<sup>25</sup> A. SUGIYAMA,<sup>23</sup> A. TAKADA,<sup>24</sup>  
M. TAKAHASHI,<sup>10</sup> A. TAKEDA,<sup>27</sup> T. TANIMORI,<sup>10</sup> K. TANIUE,<sup>10</sup> A. TOMAS,<sup>12</sup>  
H. TOMITA,<sup>1</sup> K. TSUCHIYA,<sup>10</sup> J. TURK,<sup>17</sup> E. TZIAFERI,<sup>25</sup> K. UENO,<sup>10</sup> S. VAHSEN,<sup>13</sup>  
R. VANDERSPEK,<sup>14</sup> J. VERGADOS,<sup>8</sup> J. A. VILLAR,<sup>12</sup> H. WELLENSTEIN,<sup>2</sup> I. WOLFE,<sup>14</sup>  
R. K. YAMAMOTO,<sup>14</sup> and H. YEGORYAN<sup>14</sup>

11.0323v1 [astro-ph.CO] 1 Nov 2009

Direction Sensitive  
WIMP-search  
WAGE

# DRIFT (英)

- 1990年代～
- 最大 (1m<sup>3</sup>) ◎
- BG Study ◎
- 2mmピッチ読み出し×
- 3次元飛跡 △
- DMに対する制限：未



Fig. 5. DRIFT IIb detector at Boulby mine. Two back-to-back TPCs each with a 50 cm drift distance, share a common vertical central cathode. Readout is done with two 3-layer MWPCs with 2 mm wire spacing. Operation is with negative ion CS<sub>2</sub> gas at 40 Torr (170 g target mass) [24]

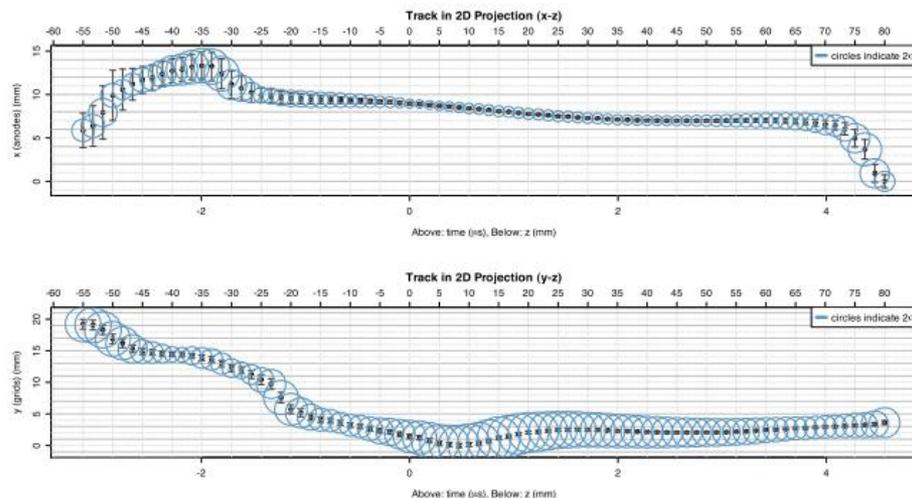


Fig. 8. Example 3D reconstruction (x-z and y-z projections) of a  $\sim 100$  keV S recoil in DRIFT IIb (circle sizes indicate the amount of deposited charge).

# DM-TPC (米)

- 2007~
- CCDで2D飛跡  $\Delta$
- 分解能  $\odot$
- 飛跡の前後判定  $\odot$
- まだ地上実験

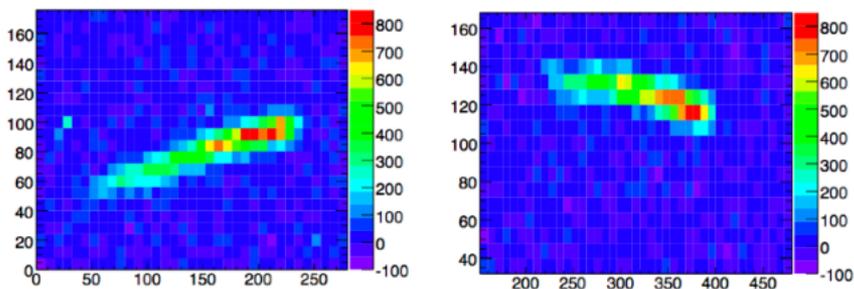
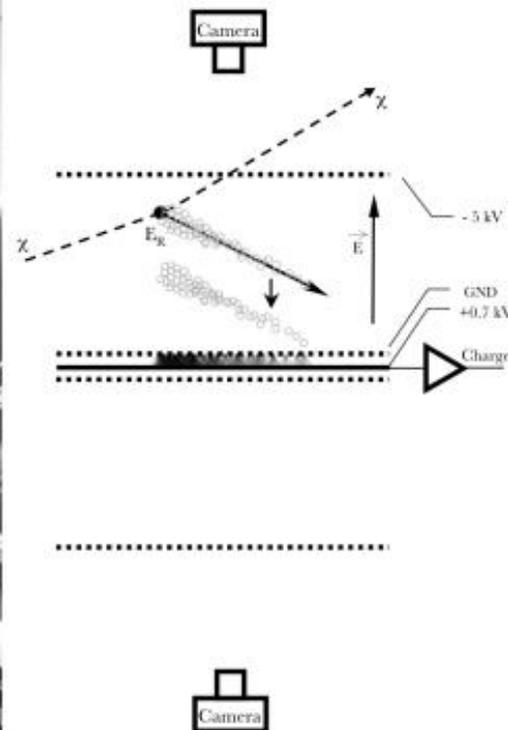
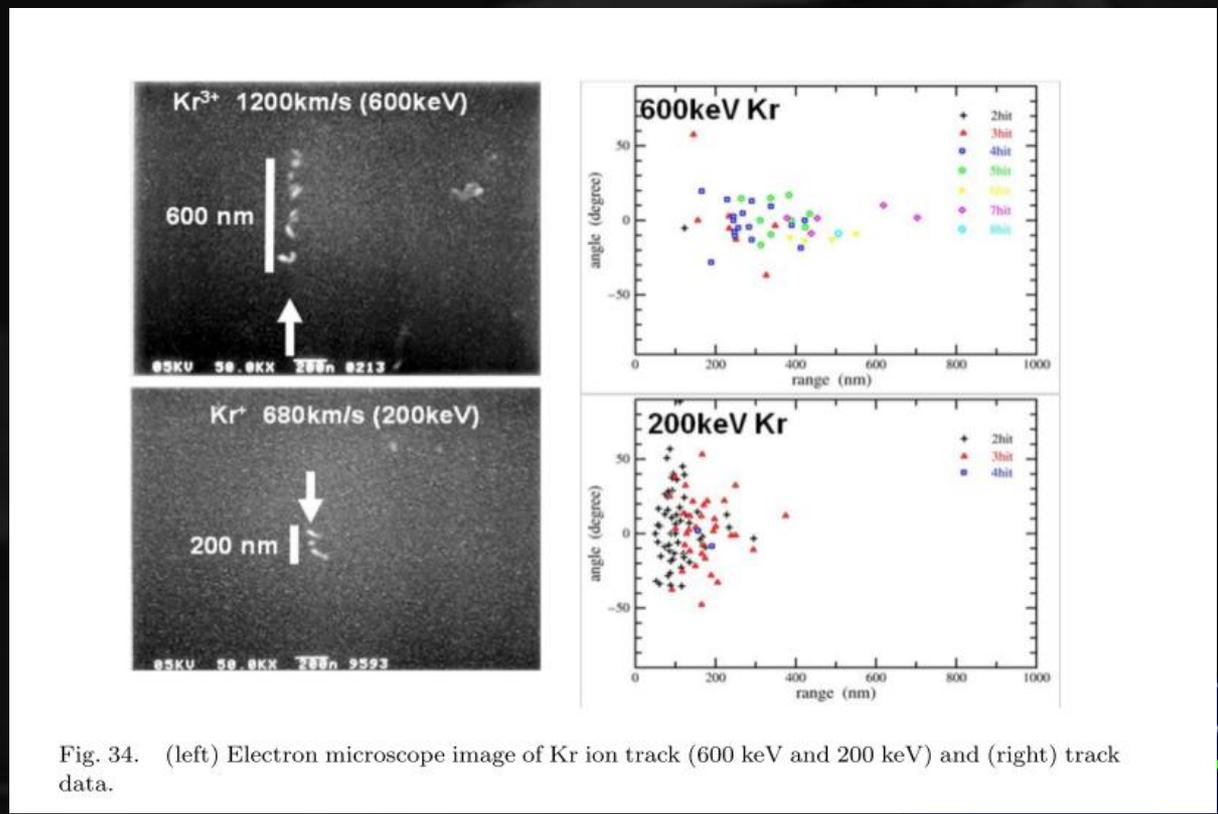
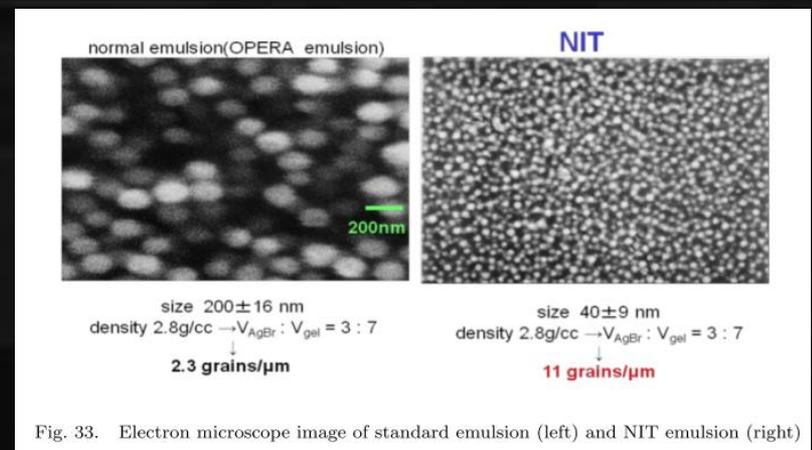


Fig. 17. Sample neutron-induced nuclear recoil candidates. The neutrons were incident from the right. The head-tail is evident from the light distribution along the track. In these images, 100 pixels corresponds to 6 mm. Figures taken from Ref. [58](#).

# ◆ NIT (名大)

- エマルジョン
- 大質量◎
- 即時性 ×
- 角度分解能、エネルギー閾値△



# NEWAGE

最新結果	Physics Letters B 686 (2010) 11
地上実験	Physics Letters B 654 (2007) 58
実験提唱	Physics Letters B 578 (2004) 241

## 神岡鉱山跡で観測準備が進む

長野

642本の光センサー

内部に1トンの液体キセノン

XMASS

多数のセンサーを取り付ける

施設へ向かう

口

(東大の鈴木教授の資料を基に作成)

暗黒物質をとらえる世界の主な装置		
検出装置	研究グループ	特徴
XMASS	東大など	キセノンとの反応を検出、従来の100倍の感度
NEWAGE	京大など	フッ素との反応を検出、飛来する方向を検知
XENON100	米コロンビア大など	キセノンとの反応を検出、高感度が可能
CDMS II	米ミネソタ大など	半導体との反応を検出、感度を上げにくい

岐阜、富山県境の山深い鉱山跡に先端装置を備え付け、宇宙最大級のなぞに迫る実験が3月にも始まる。宇宙の質量の4分の1を占めるとされるものの、いまだに見つかっていない「暗黒物質」の観測に東京大学などの研究チームが挑む。宇宙の誕生や変遷の解明につながるだけに米欧の研究者らも観測一歩乗りへしのぎを削っており、日本の取り組みに熱い視線を注ぐ。

1月下旬、雪が積もる岐阜県北部・飛騨市の山あいを進み、かつて垂鉛や鉛を産出した神岡鉱山跡の坑道にたどり着いた。中へは車を入れる。数分後、東大宇

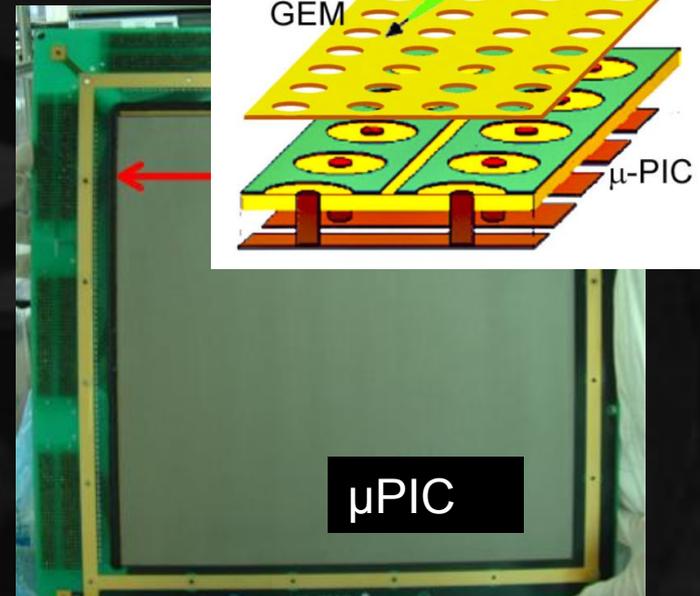
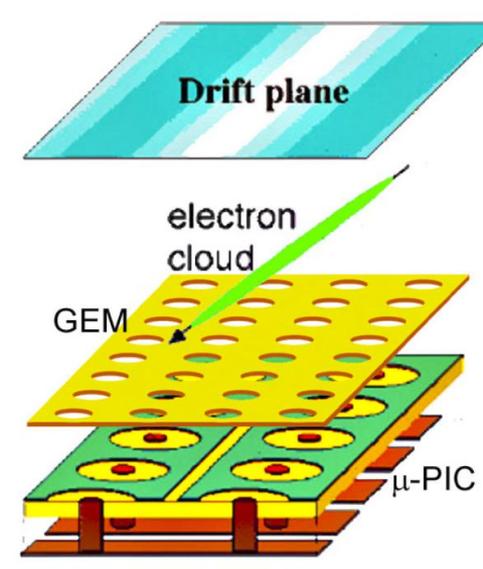
# 見えない「暗黒物質」を探せ

# NEWAGE

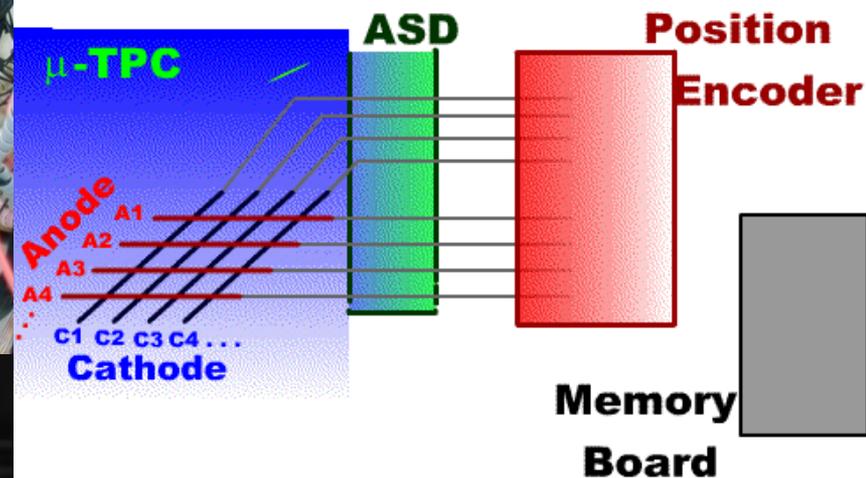
- 実用的なサイズのMPGD ◎
- 初の制限◎
- ガス循環システム ○
- 原子核の前後判定 △
- バックグラウンドレベル△

# そしてNEWAGE

- 京大で開発した「 $\mu$ PIC」検出器
- 30cm角検出器で地下実験中
- CF4 ガス SD探索



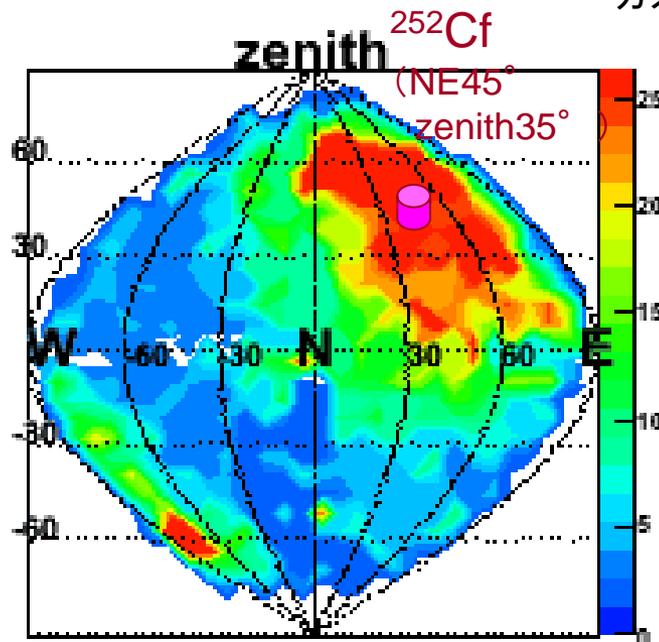
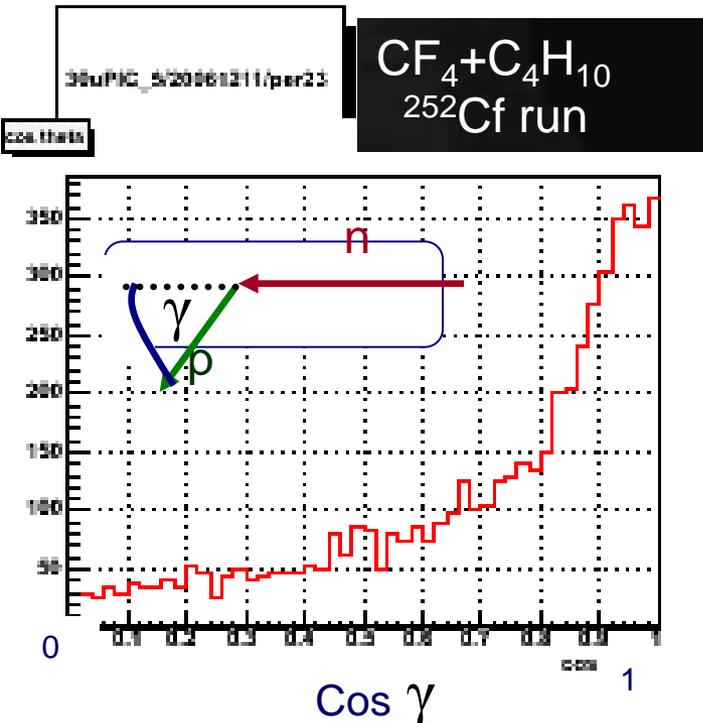
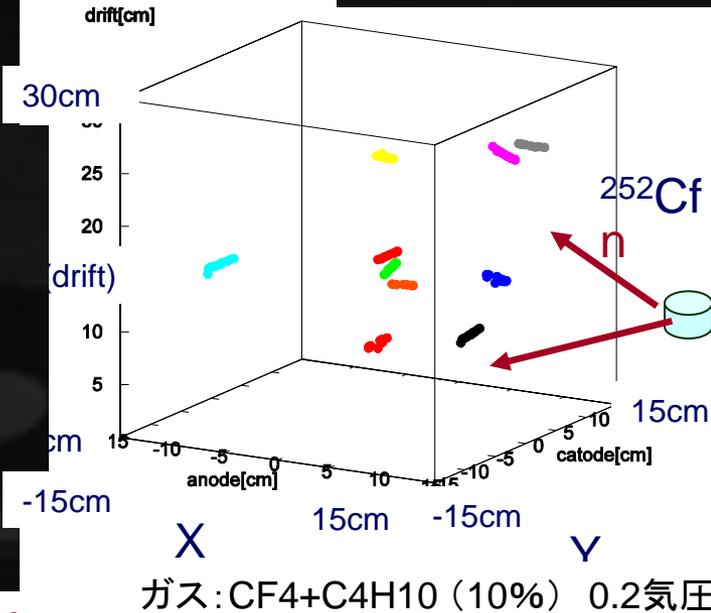
検出器  
NEWAGE-0.3a



# 飛跡検出、イメージング

- 中性子に反跳された陽子を検出
- 前方に散乱される様子が見えている
- WIMP → フッ素の反跳で見た現象をエミュレート

## 陽子飛跡の例



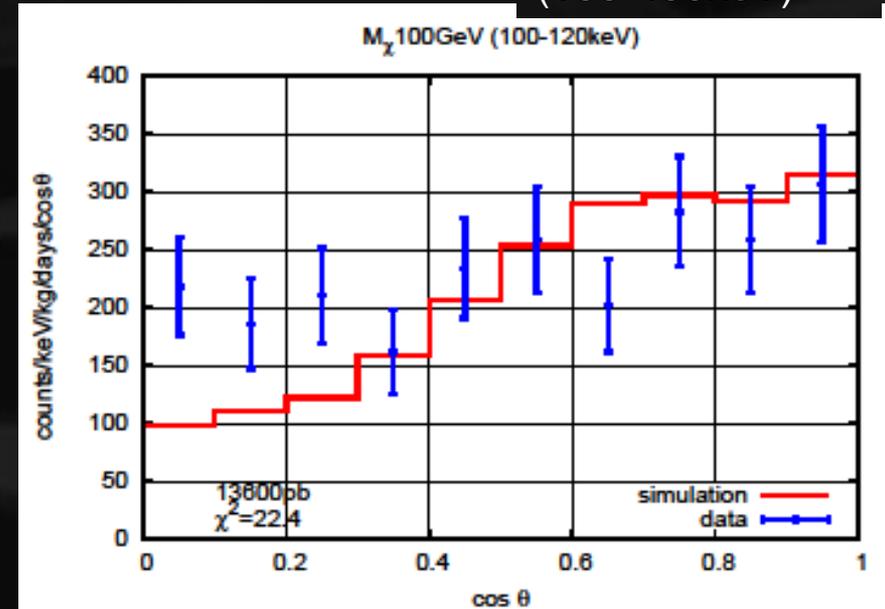
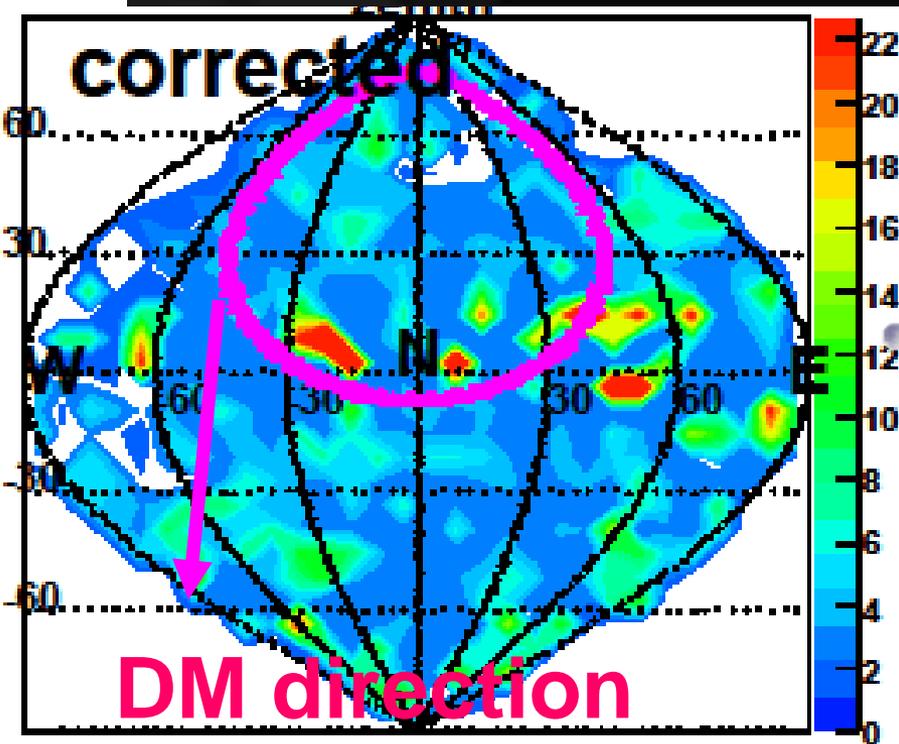
陽子の飛跡で描いた「イメージ」

# 地上(京大)でのDM探索実験

- 原子核飛跡を用いた手法では初めて
- 2006年測定
- exposure 0.15 kg days

Cosθ 分布  
(100-400keV)

C、Fの原子核で描いた「スカイマップ」  
(100-400keV)



## 結果

- DMの信号は  $\chi^2$  テストで排除
- 方向に感度をもった初の制限

# ● 地下実験結果 (2008年)

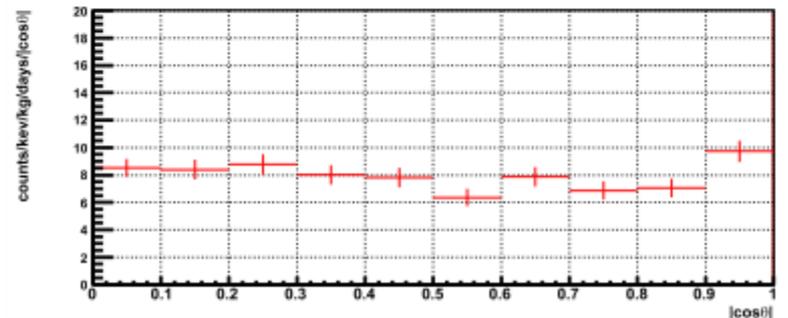
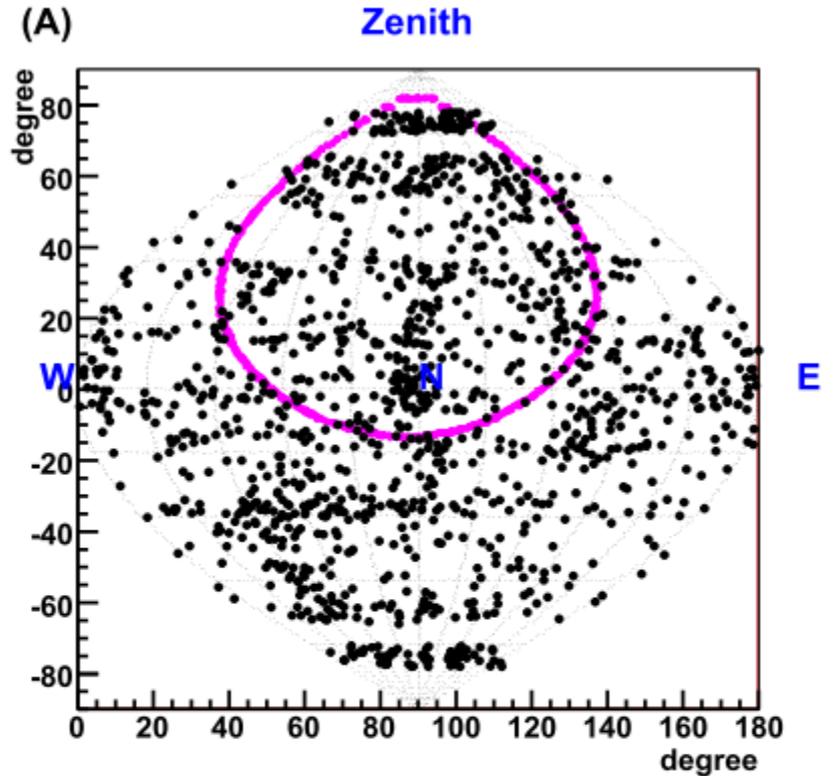
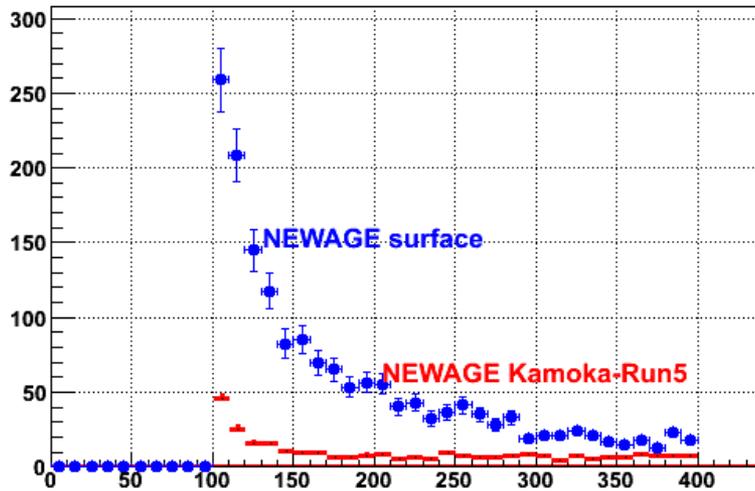
● 観測  $0.524 \text{ kg} \cdot \text{days}$

● スペクトル

地上の1/5 程度：新たなBG

● スカイマップ

フラットな  $\cos\theta$  分布

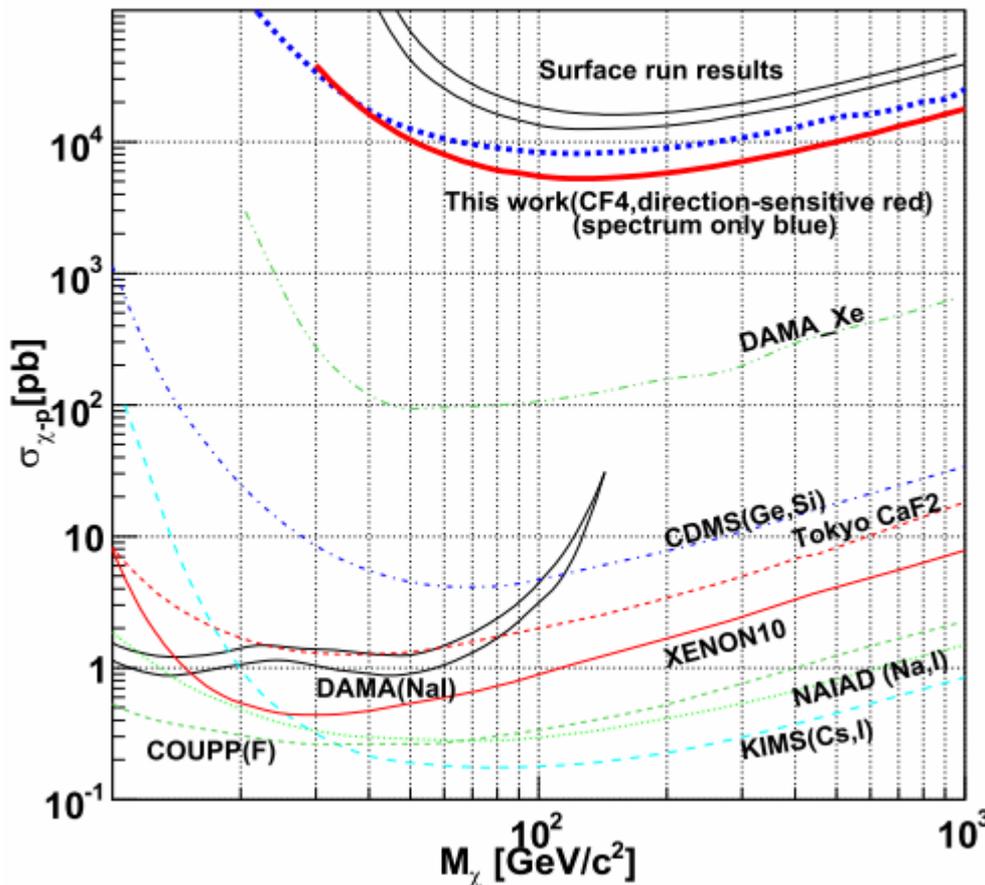


# ● 地下実験 first results

● 5400pb for 150GeV

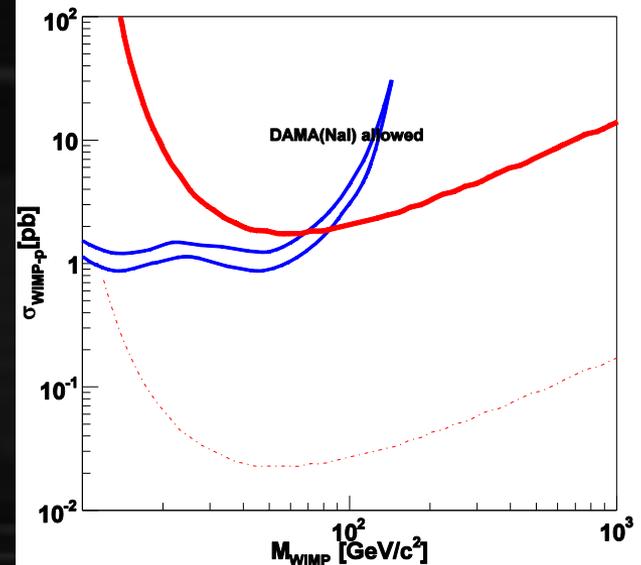
● まだまだに見えるが、、、

SD 90% C.L. upper limits and allowed region



BGを1/10に低減  
0.1m<sup>3</sup>年 の観測  
すれば、

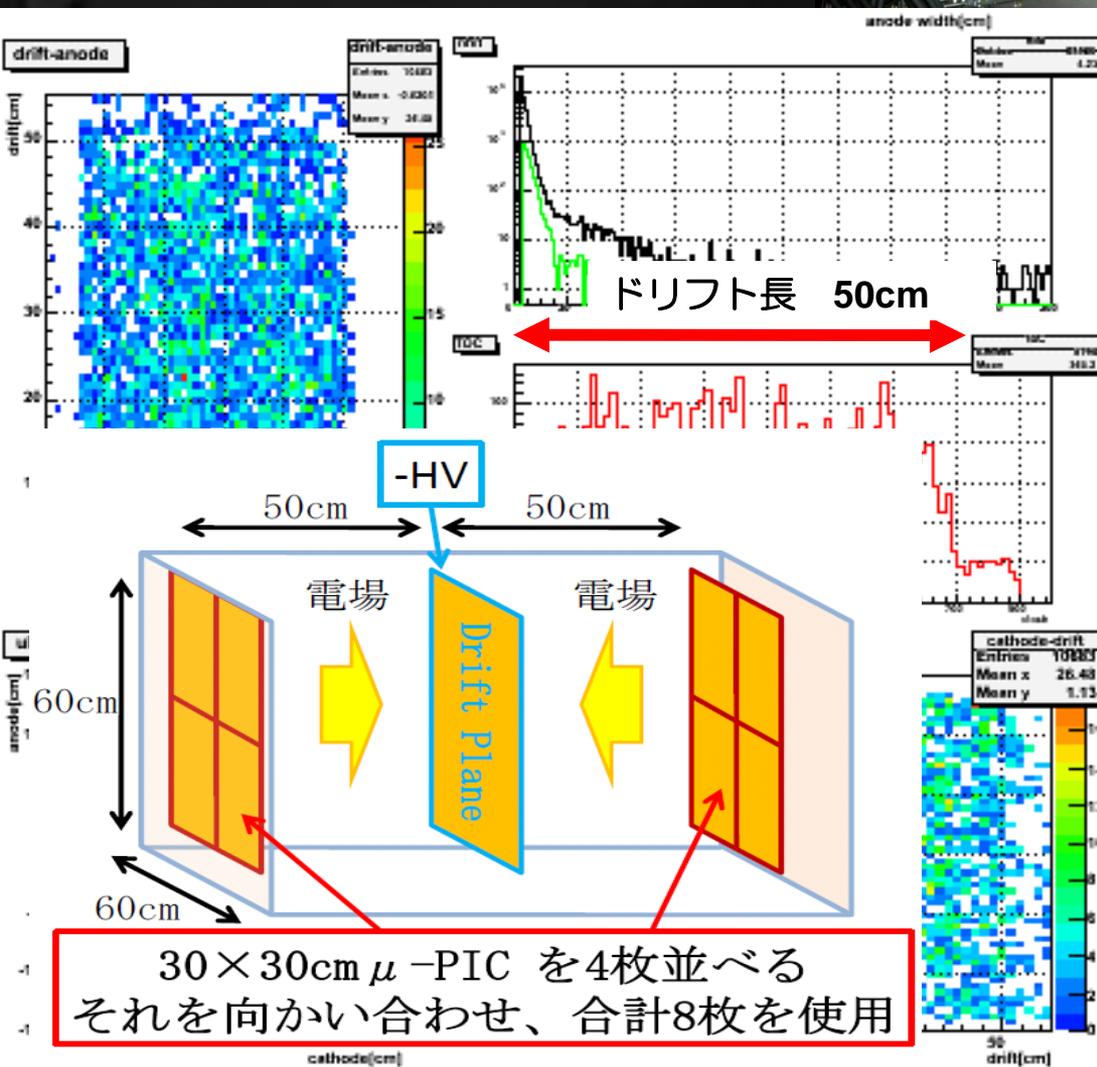
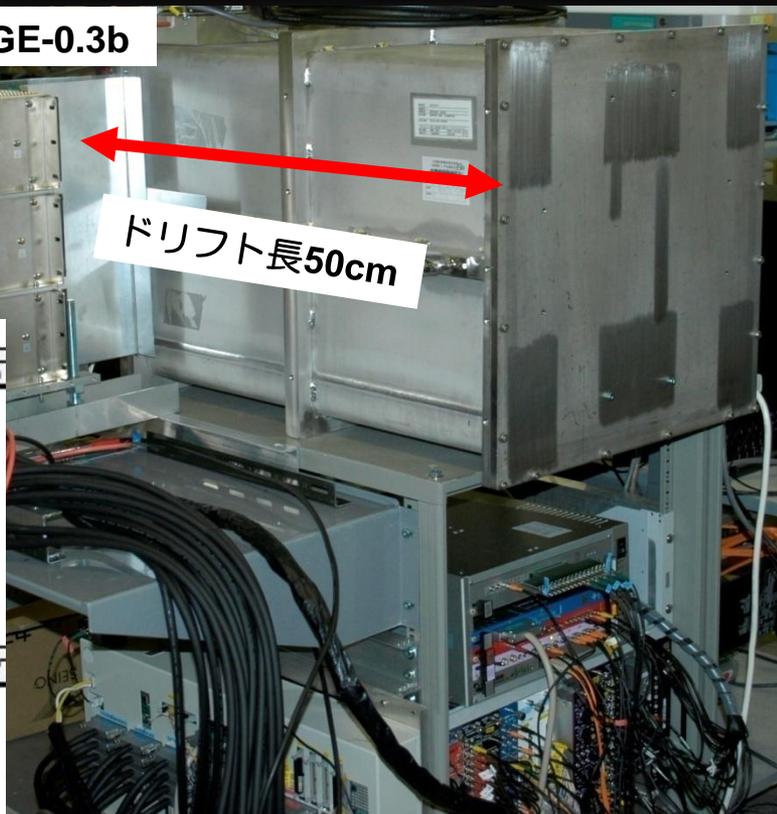
SD 90% C.L. upper limits



# 大型化のSTUDY (地上)

- ドリフト長 50cm
- (CF4 152 torr)

NEWAGE-0.3b

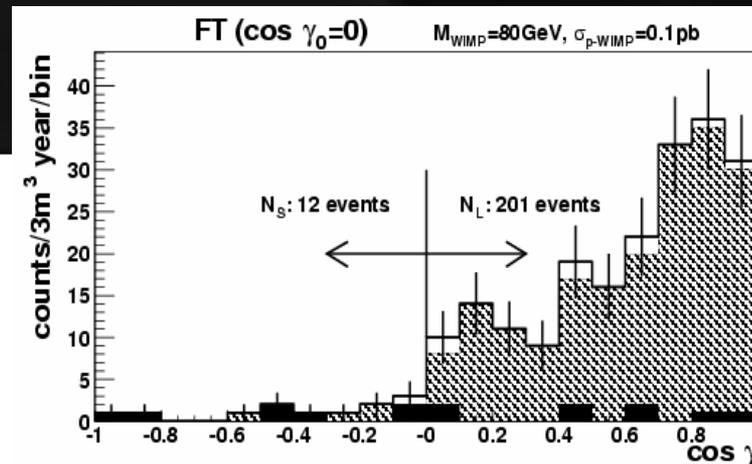
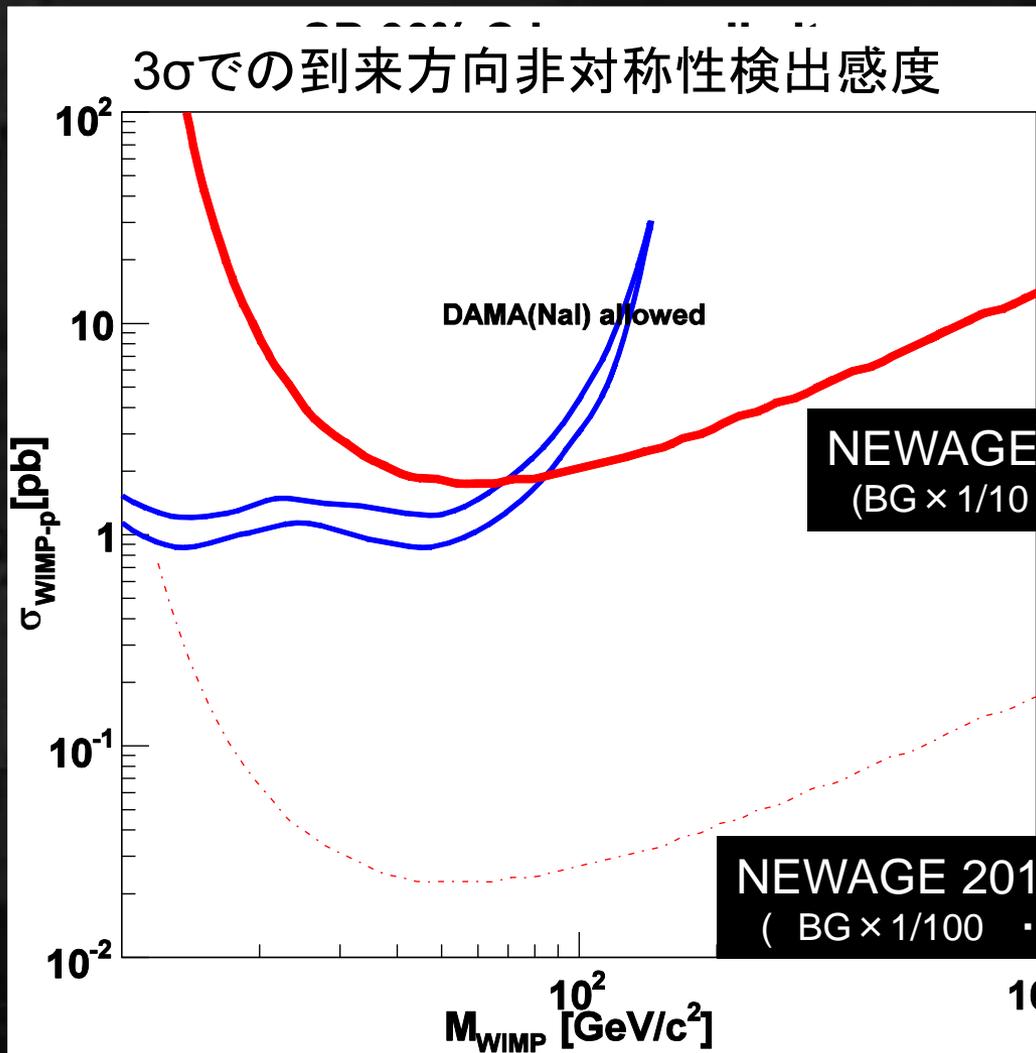


中性子照射@1m (252Cf)  
50cmのドリフト長に渡って良い応答  
詳細なstudyへ。

NEWAGE

# NEWAGEのこのさき

- DAMA領域の探索へ

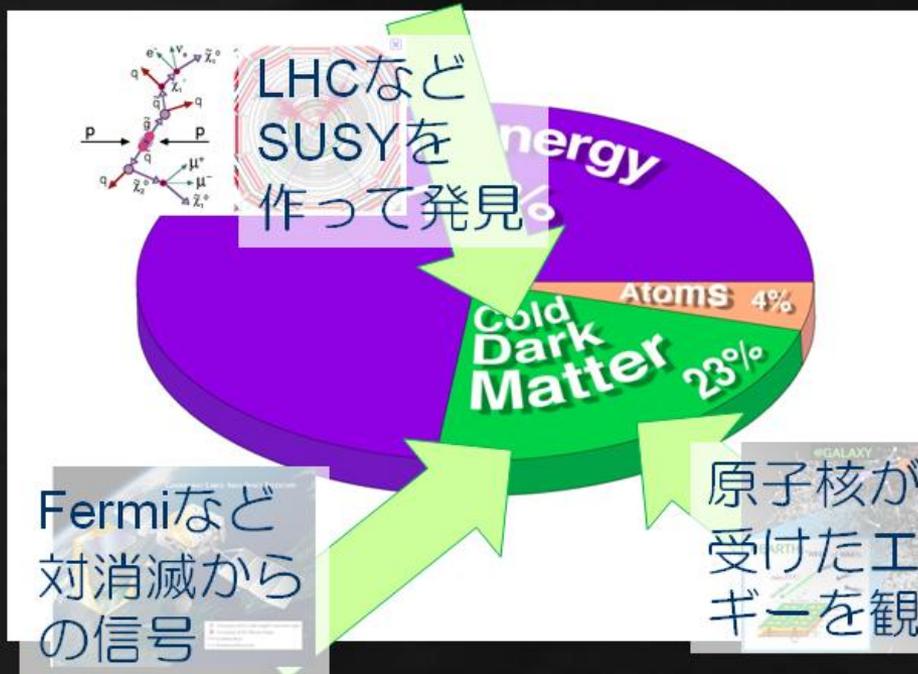


# 結論

## 暗黒物質は未発見

### 加速器実験

だけど、  
せめまくってます



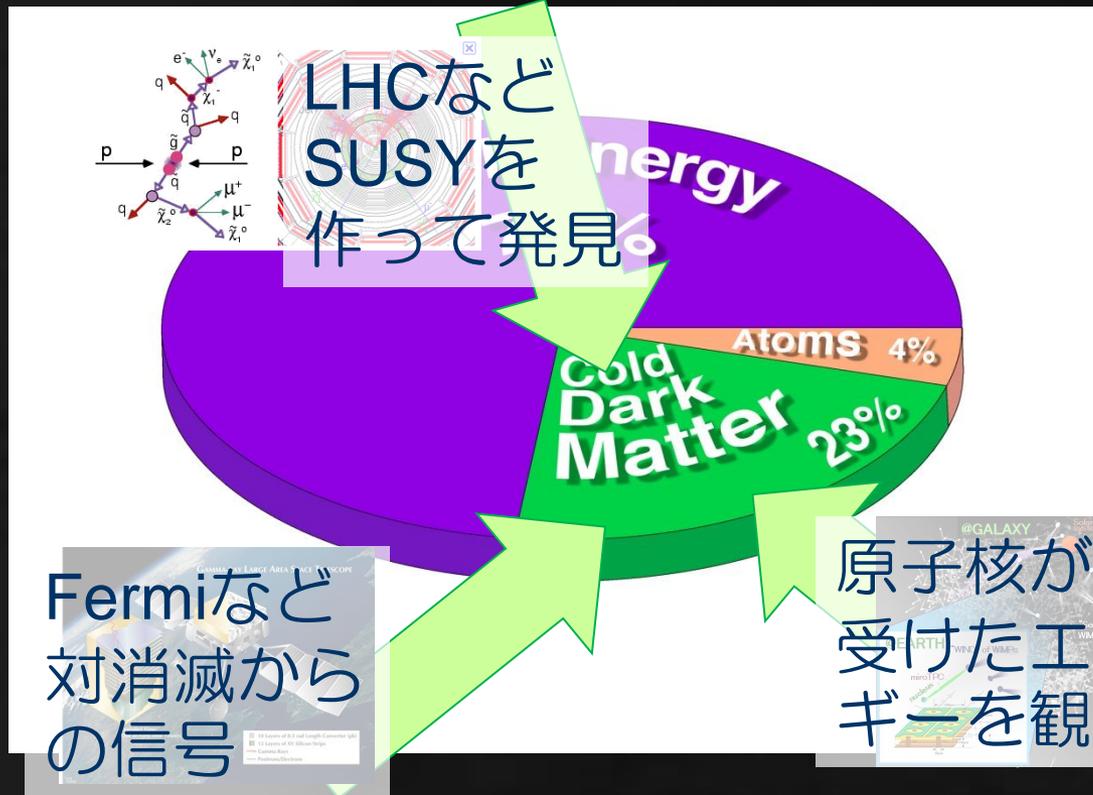
### 間接探索

### 直接探索

Direction Sensitive  
WIMP-search

NEWAGE

# 加速器実験

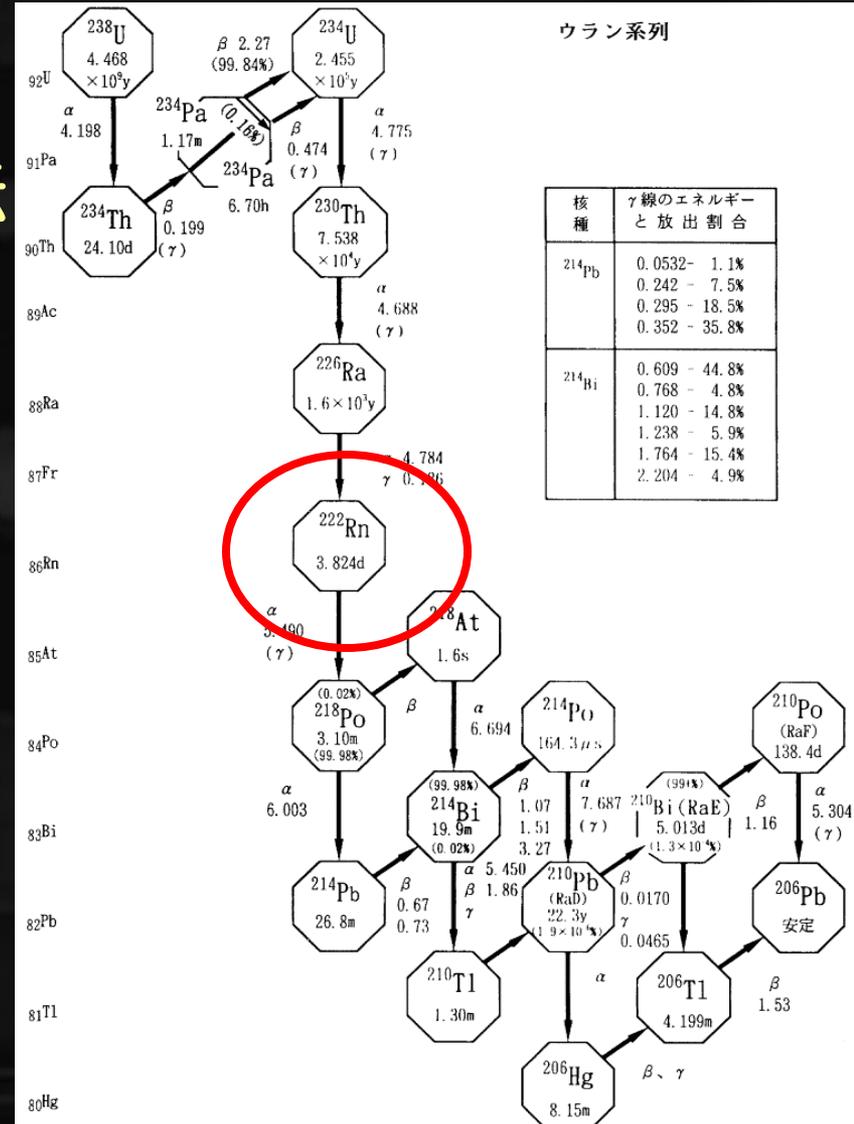
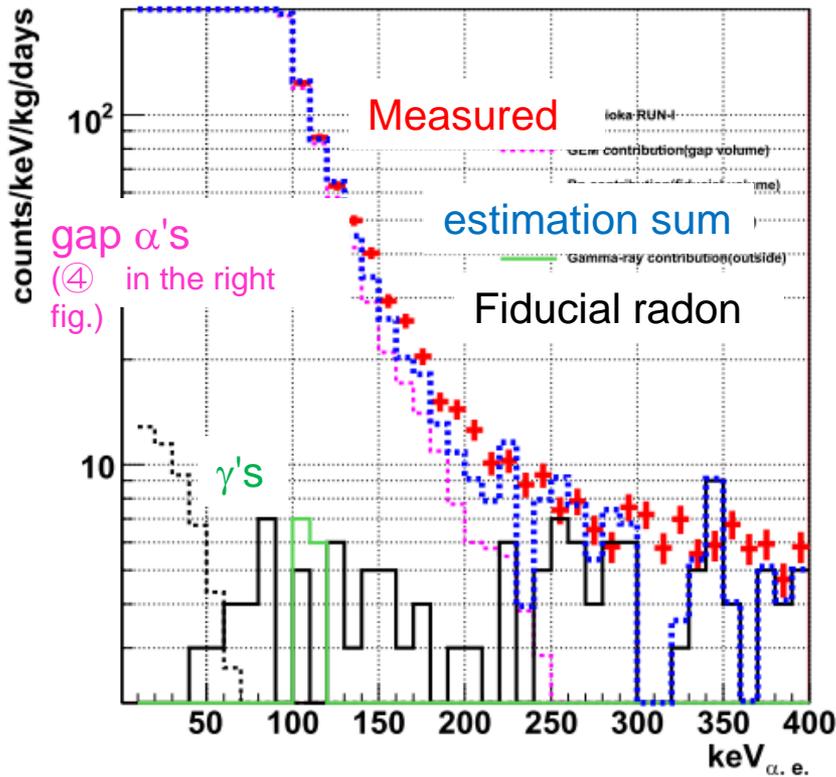


間接探索

直接探索

# BGの低減

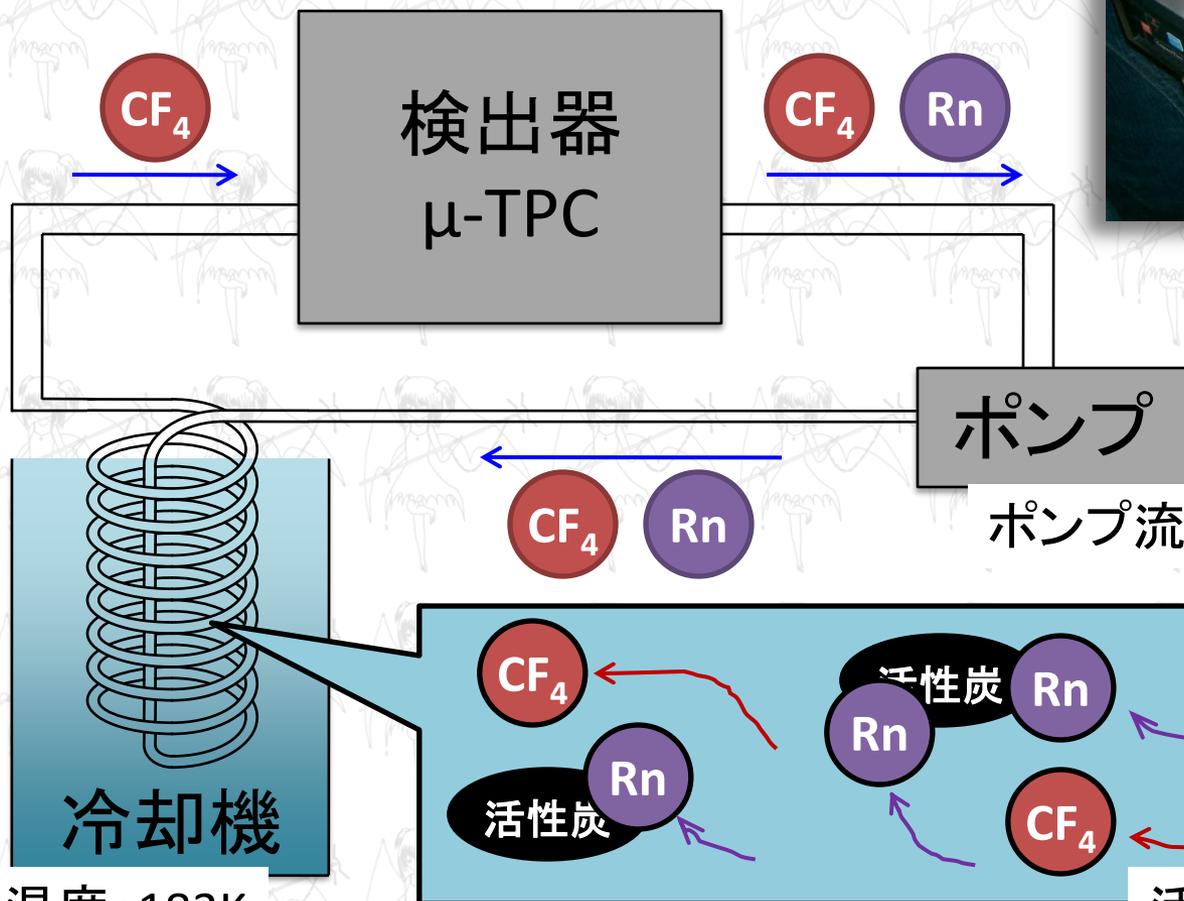
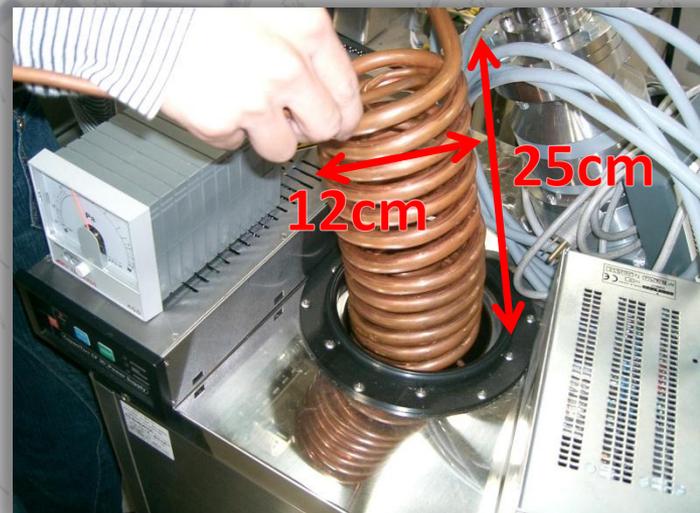
- 検出器内部の物質に含まれる U、Thなどの崩壊によるα線 が主成分
- 主にラドンとして侵入
- 材料の選択とラドンの除去



中村発表  
(JPS2009秋)

# 冷却活性炭システム

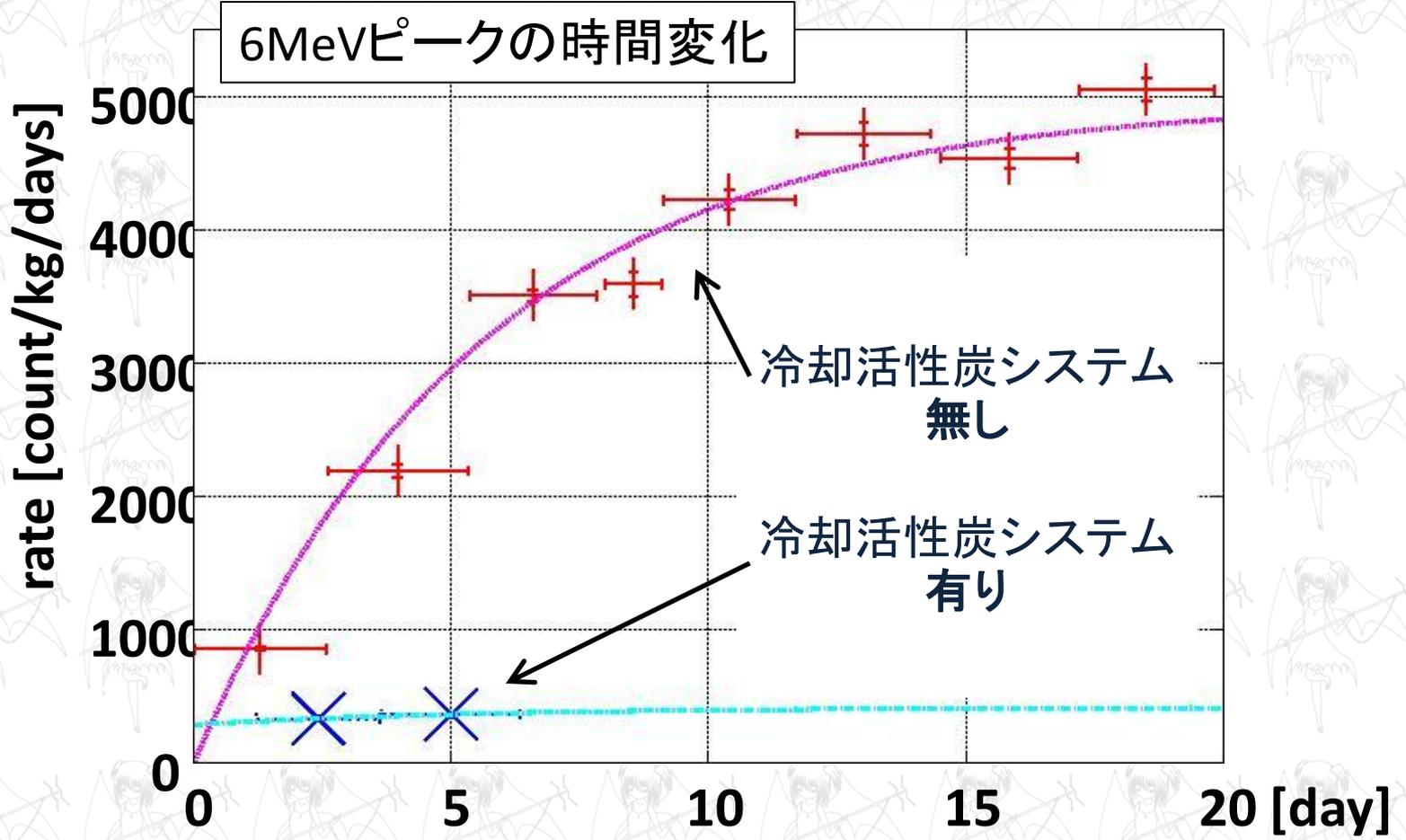
冷却(183K)・・・ラドンを液化  
活性炭・・・ラドンを吸着



Rnの沸点: 211K  
CF<sub>4</sub>の沸点: 145K

中村発表  
(JPS2009秋)

# ラドン減少の結果



5000  400以下  
count/kg/days count/kg/days

ラドン: 8%以下に削減