

# 暗黒物質研究の現状

日本物理学会 北陸支部講演会

神戸大学 身内賢太郎

2013年12月20日



THANKS

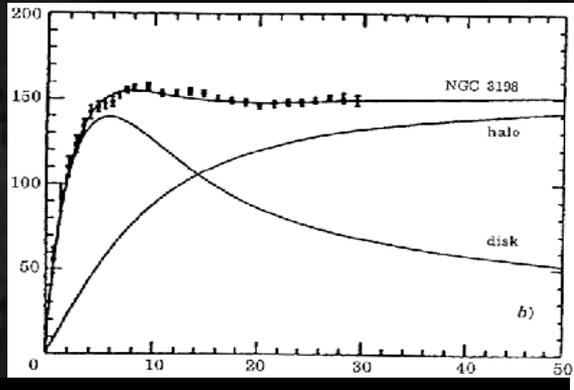
Japanese Experimental  
Dark matter Investigators





歷史

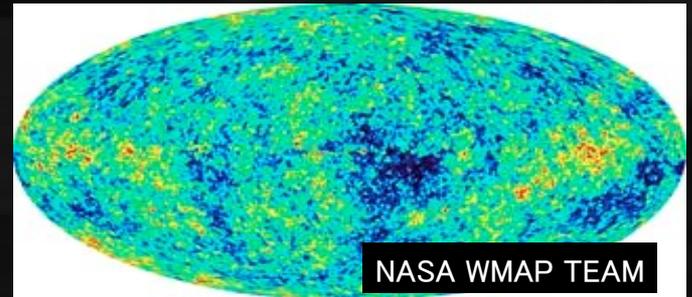
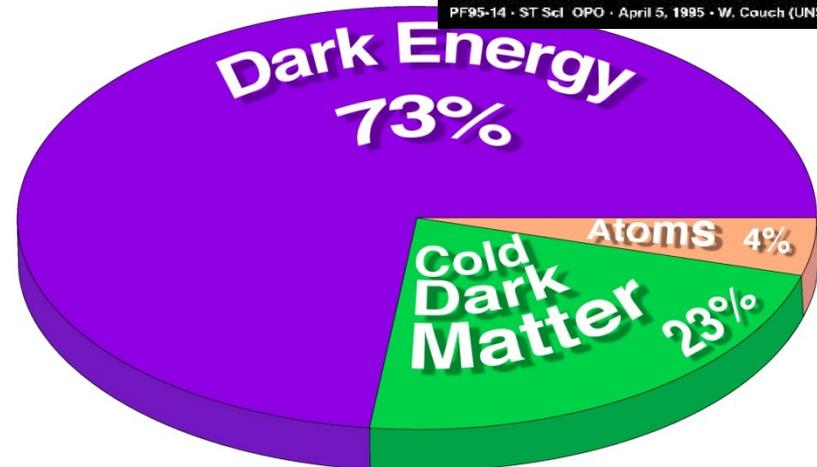
# 歴史



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

- 銀河の回転曲線 (1930s~)

- 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~)

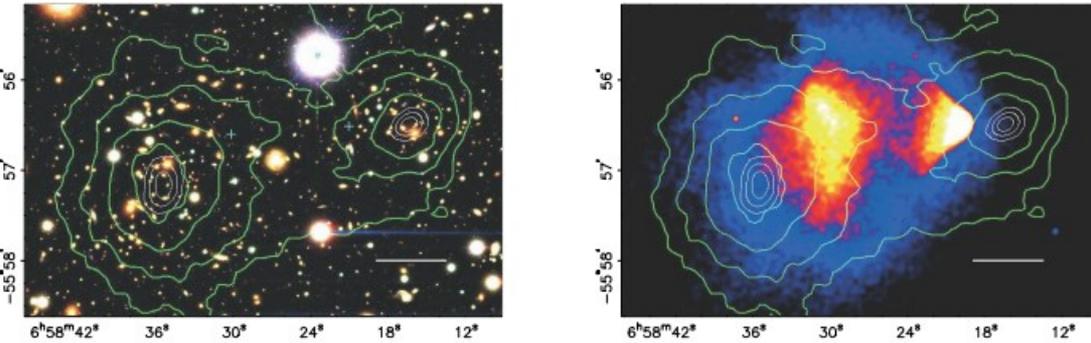
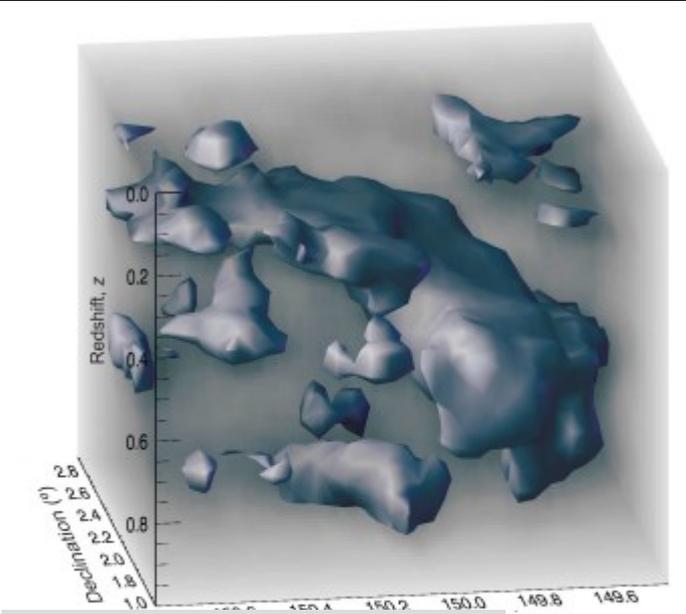


Fig. 1.—*Left panel:* Color image from the Magellan images of the merging cluster 1E 0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. *Right panel:* 500 ks *Chandra* image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak-lensing  $\kappa$  reconstructions,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



Vol 445 | 18 January 2007 | doi:10.1038/nature05497

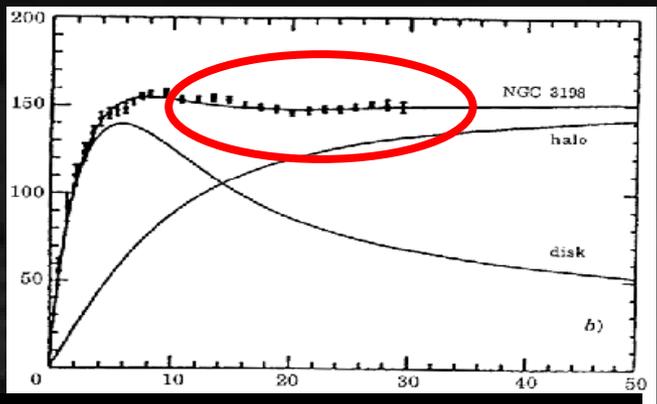
**Figure 5 | Three-dimensional reconstruction of the dark matter distribution.** The three axes correspond to right ascension, declination and redshift: with distance from the Earth increasing towards the bottom. The redshift scale is highly compressed, and the survey volume is really an elongated cone. 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 the level of the greyscale corresponding to the local density. Additional views are provided in Supplementary Fig. 7.

- 銀河団の衝突  
通常物質とは違う「何か」がある。

- 暗黒物質の三次元マッピング

分かったこと  
宇宙の組成の1/4  
銀河、銀河団に付随

分からないこと  
何だかわからない！

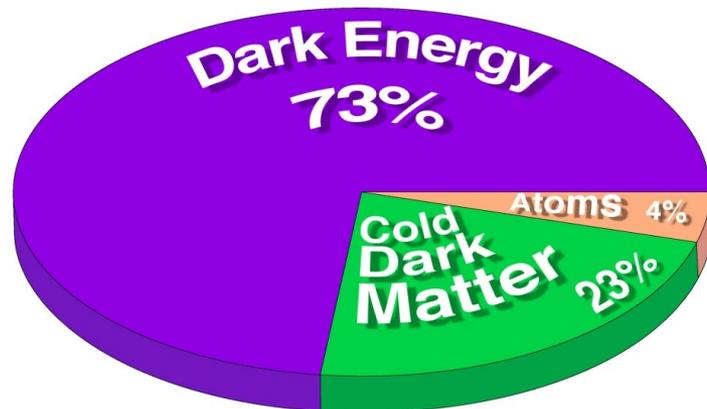


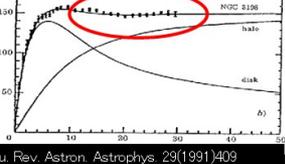
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 29(1991)409



# 高速回転 三所攻めだ～

を

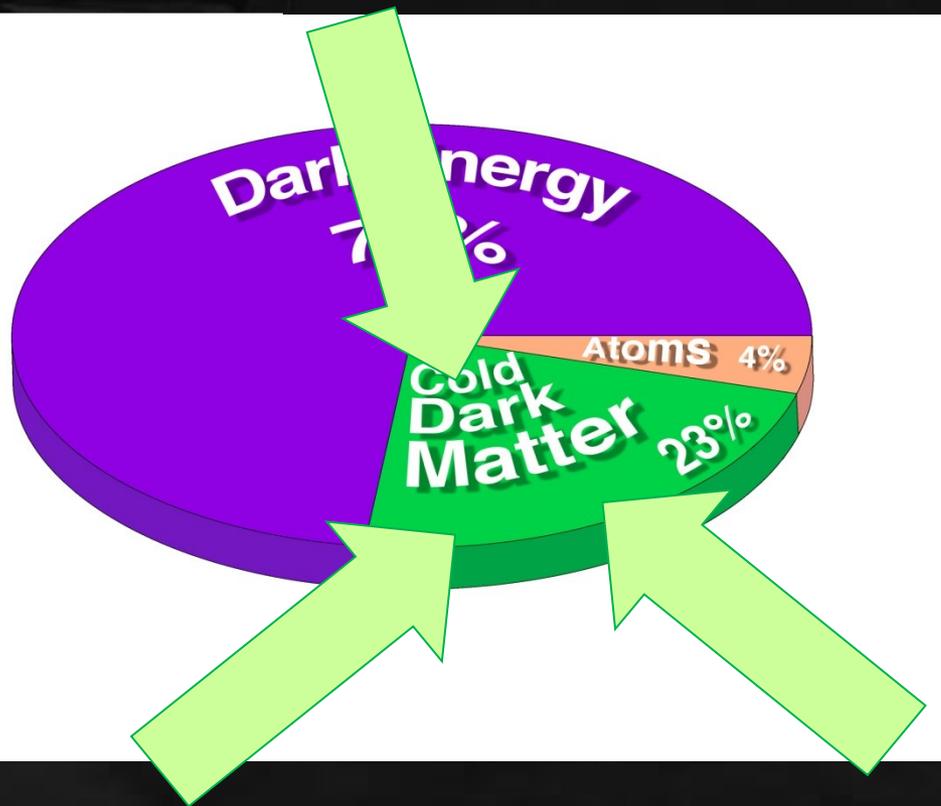




# 加速器実験

高速回転 三所攻めだ〜

を



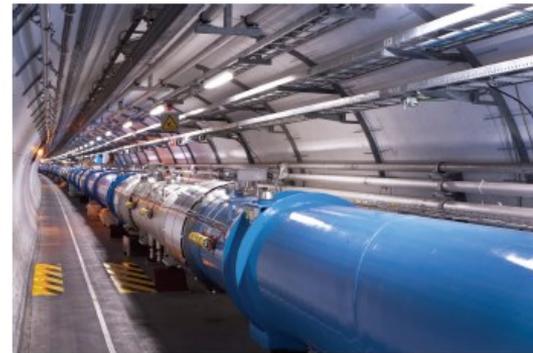
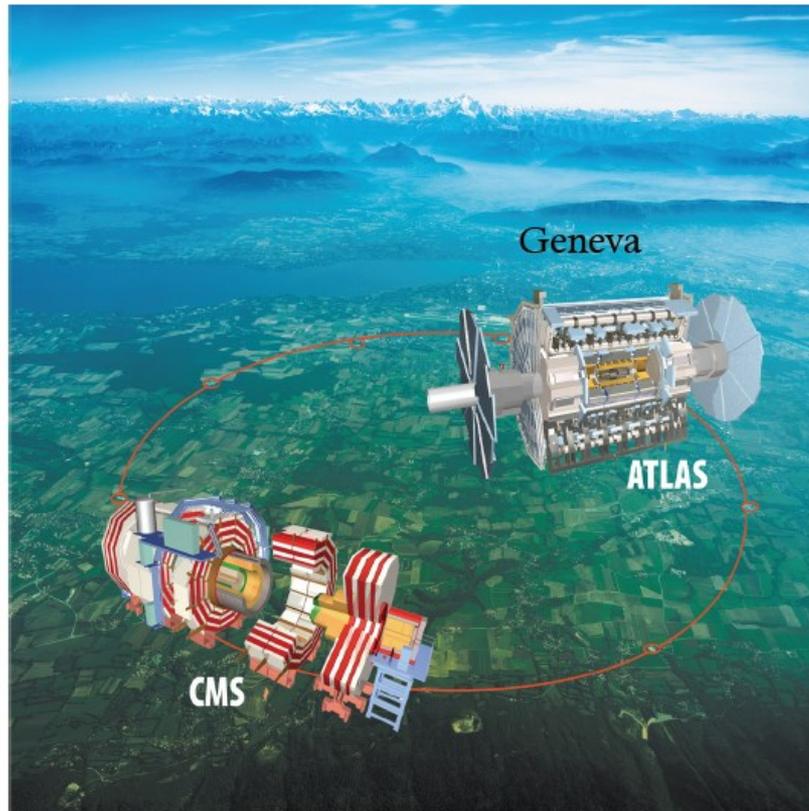
間接探索

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.

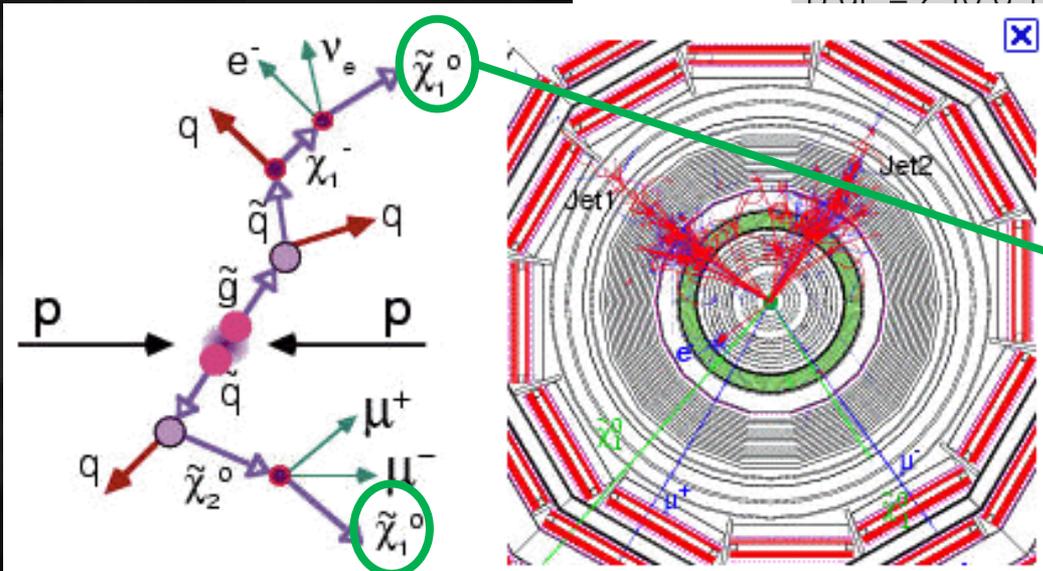
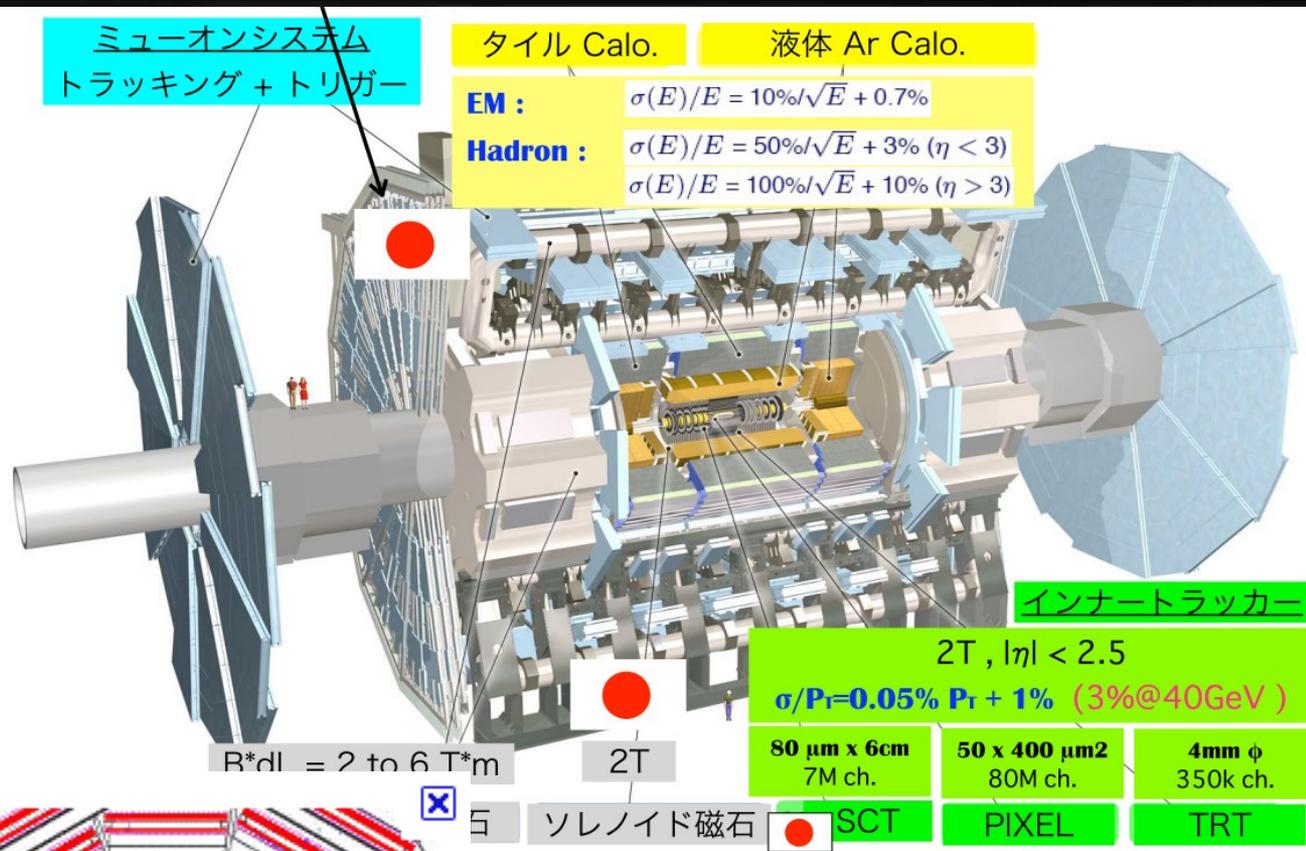
Claus Horn: First LHC Results

IDM2010 Montpellier - 30.07.2010 3

- 陽子 + 陽子 の衝突
- 8TeV でデータ取得 (~2012)
- 13~14TeVにupgrade中 2015年から再稼働

# 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

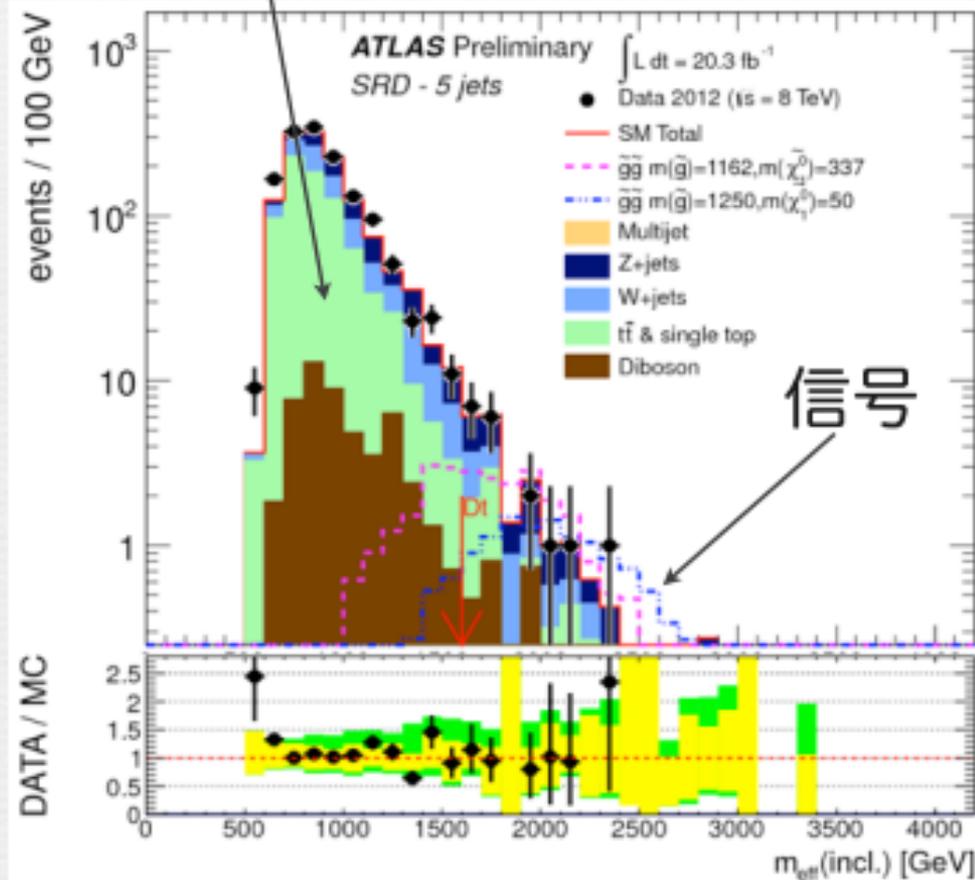
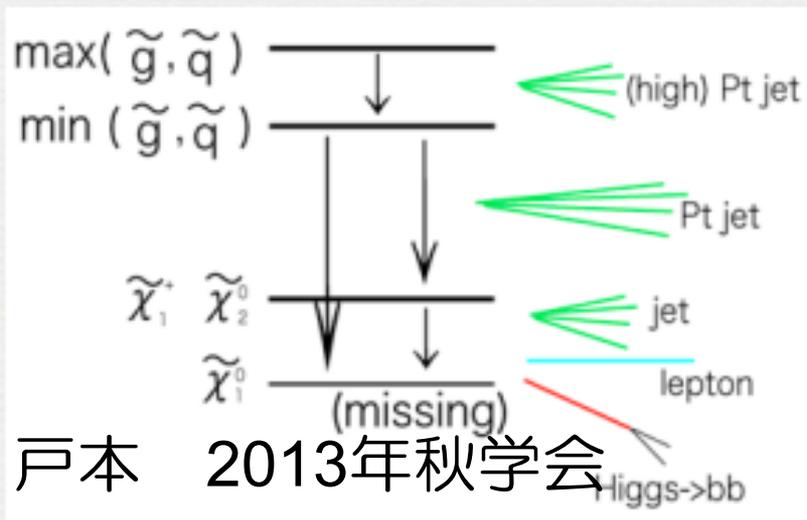
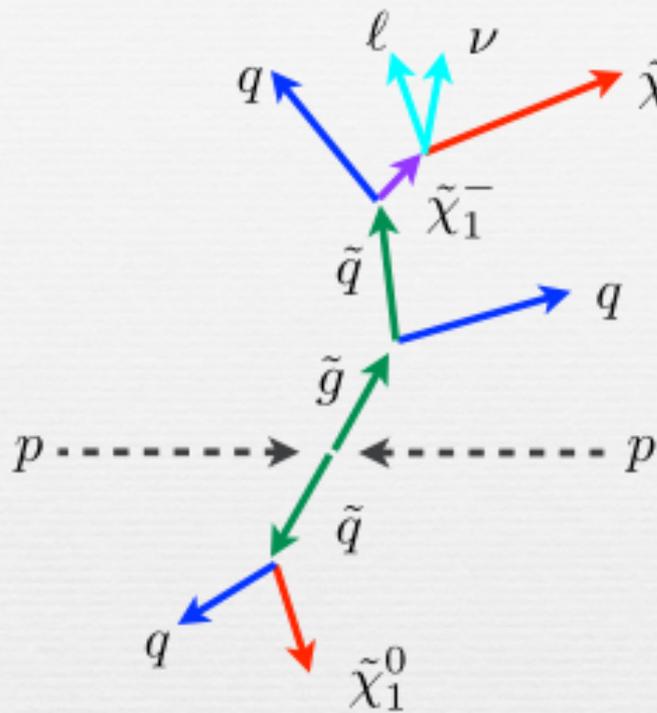
SUSY=暗黒物質  
 までは言えない。

# LHCでのSUSY探索

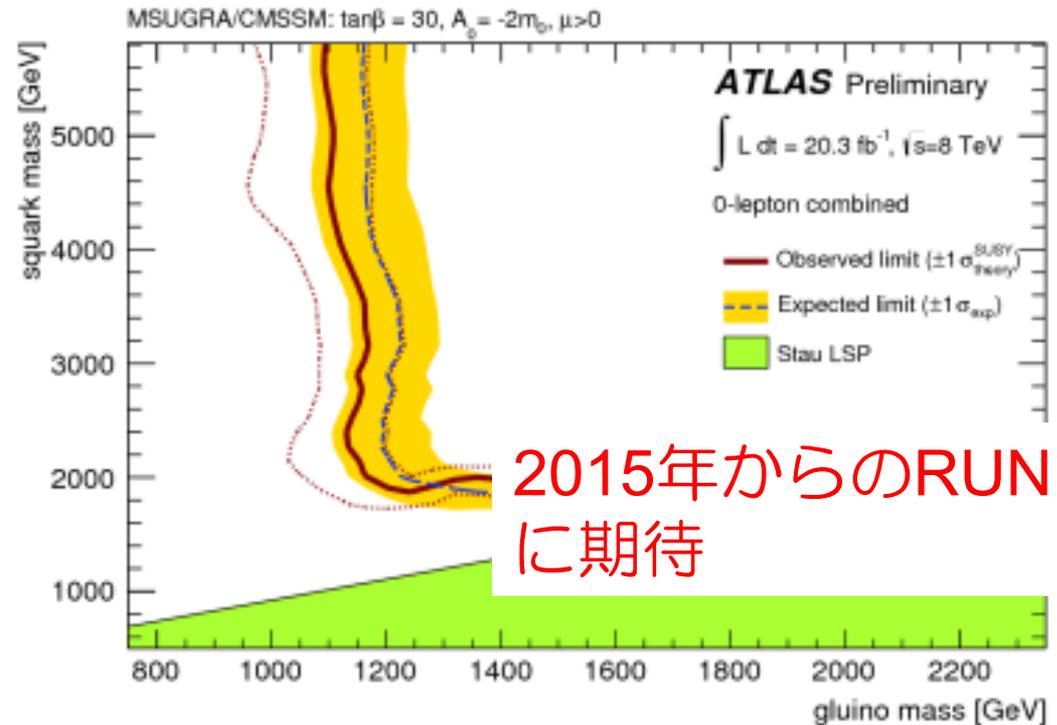
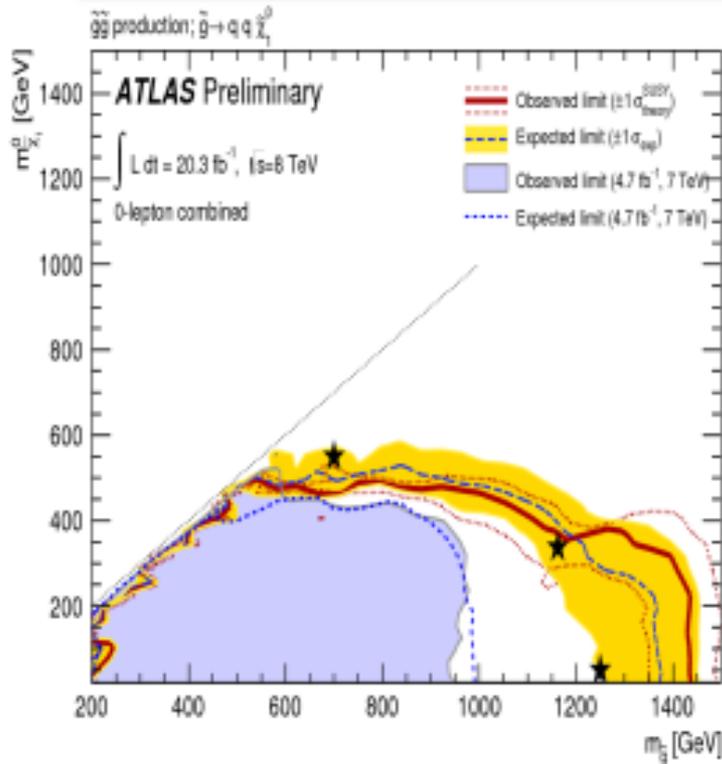
多数の高運動量Jets +  $E_T^{\text{miss}}$  + X

$$m_{\text{eff}} = \sum_{\text{jets}} p_T + \sum_{\text{leptons}} p_T + E_T^{\text{miss}}$$

背景事象はcontrol regionから外挿

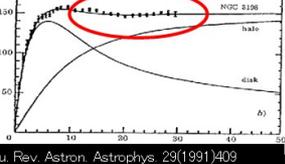


# “Easy”な超対称性モデルは棄却



Decayを仮定して考えると  
 Neutralino < 400GeVの時  
 Gluino > 1.4TeV

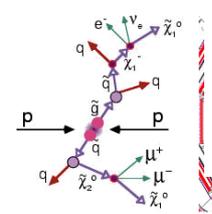
Modelを利用 CMSSM  
 Gluino > 1.1 TeV (Heavy squark)  
 > 1.4-1.6TeV (Light squark)



# 加速器実験

高速回転 三所攻めだ~

を



LHC 8TeV :  
SUSY未発見



間接探索

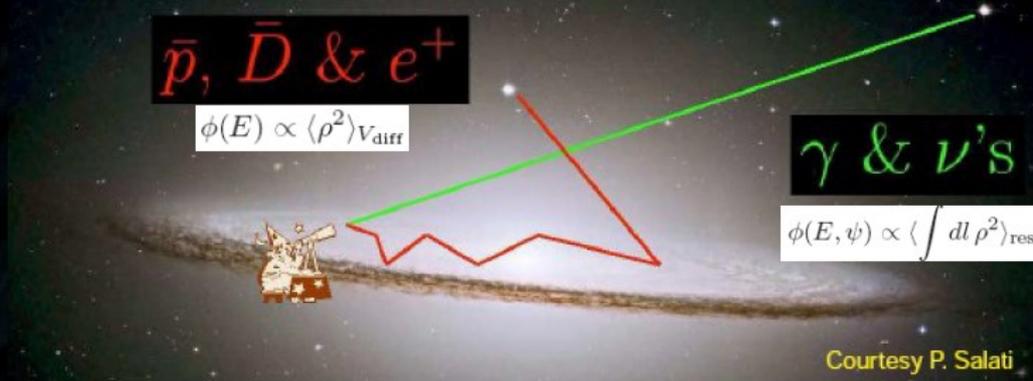
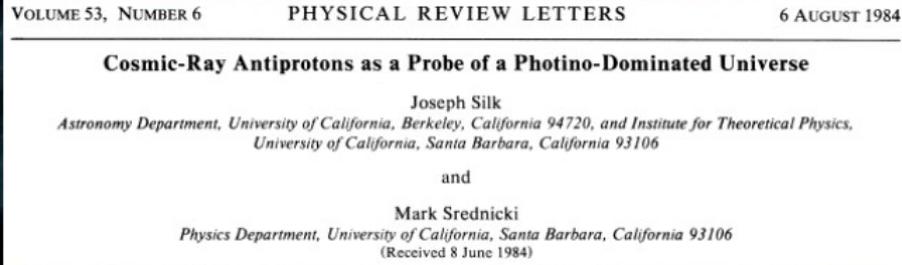
直接探索



# 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、ニュートリノ などを見る

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



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?

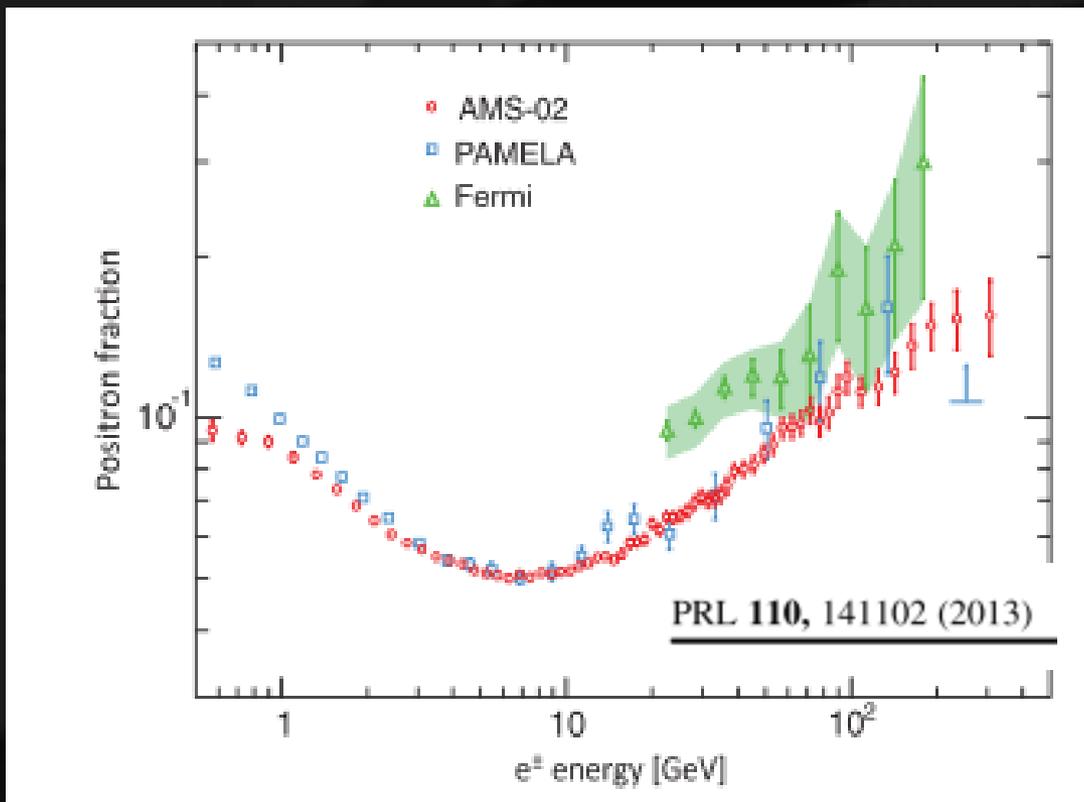
# 陽電子

電子数との比を見る。 ← 超過!

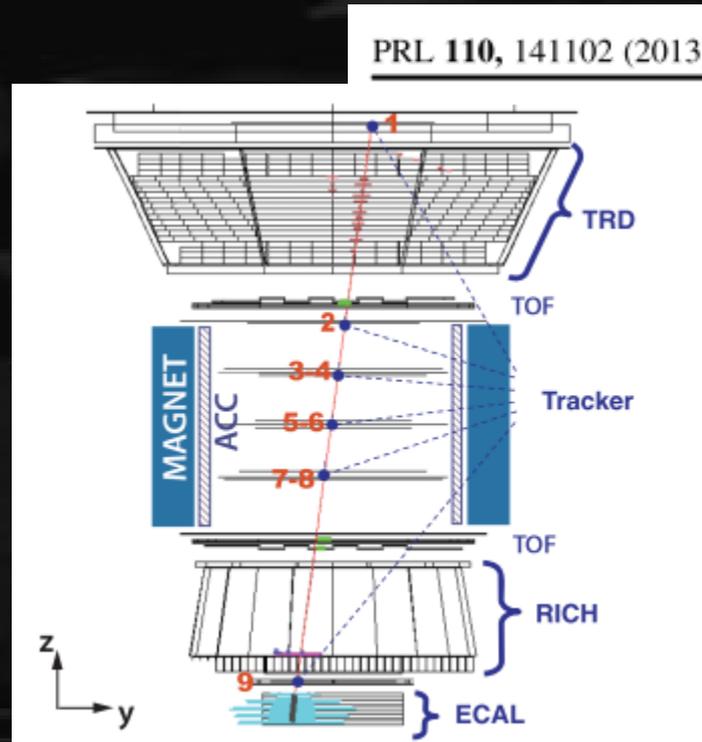
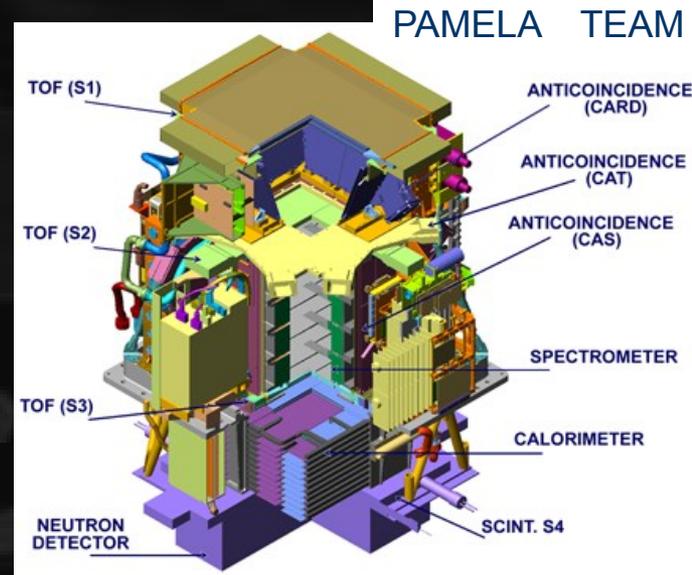
2008年 PAMERA衛星

2012年 FERMI衛星

2013年 AMS-02(ISS)



- 決定的な証拠はまだ。



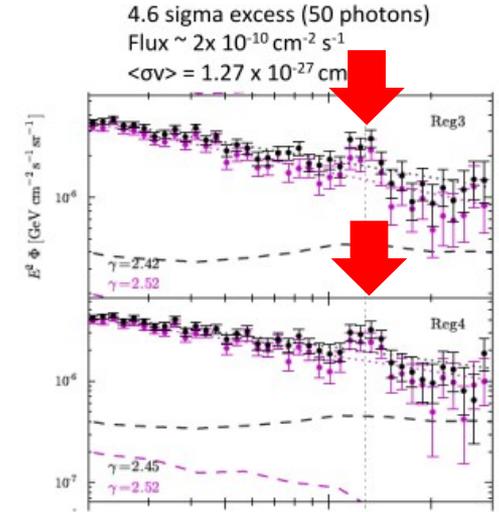
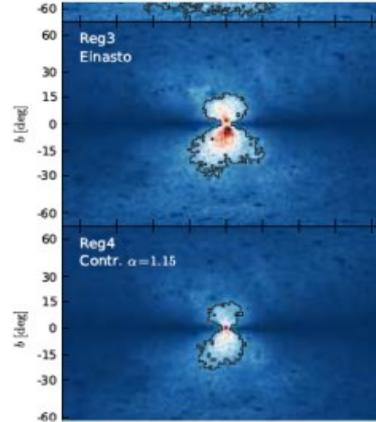
# ガンマ線

■ FERIMI衛星

■ 130GeVにピークか?

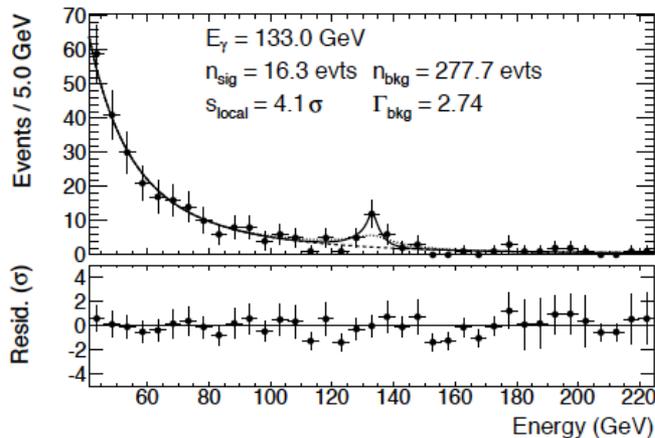
## 130GeV Line feature in gamma rays from Galactic Center in Fermi-LAT data (43 months), C. Weniger in 2012

JCAP08(2012)007

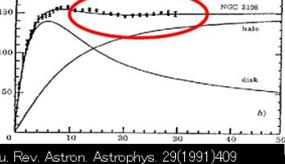


## Analysis with 2D Energy Dispersion Model

Fit to a gamma-ray line at 133 GeV in the P7REP CLEAN R3 data using the 2D model including a scale factor for the width of the energy dispersion.



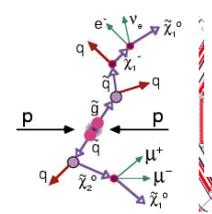
- 装置起源などの可能性も合わせて、さらなるSTUDY中。



# 加速器実験

高速回転 三所攻めだ～

を



LHC 8TeV :  
SUSY未発見



陽電子・ガンマ線：  
何か兆候?

間接探索

直接探索

# 直接探索実験

# 暗黒物質の直接検出

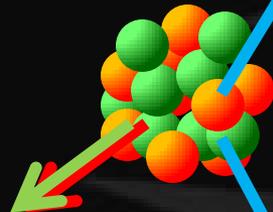
$E_R$ 検出 (光)

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)

CoGent  
HPGe

(光+温度)

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

$E_R$ 検出 (温度)

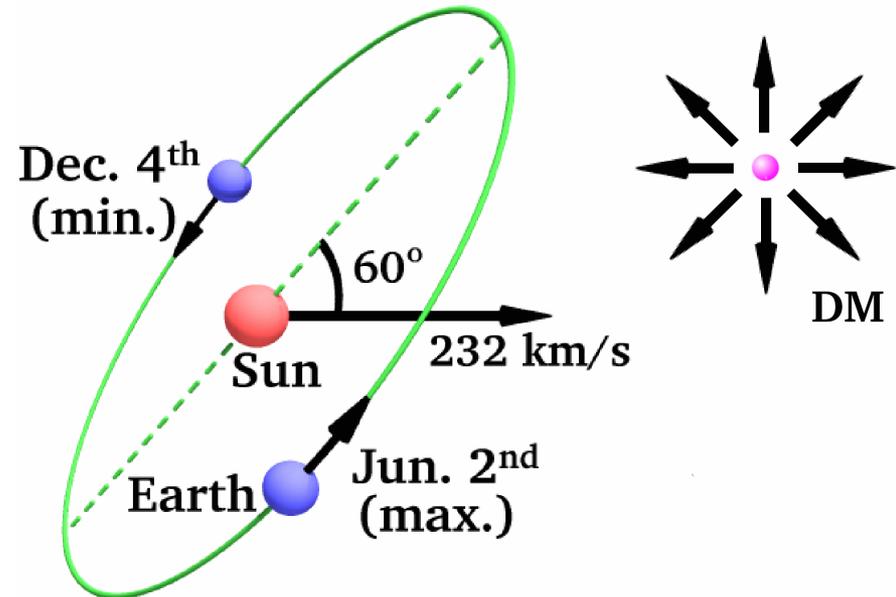
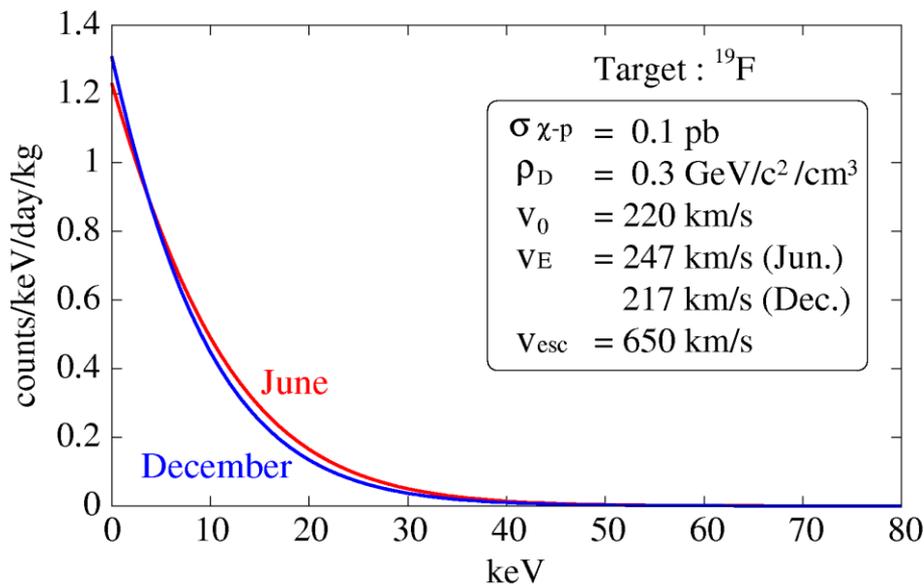
ROSEBUD (LiF),  
COUPP, SIMPLE, PICASSO  
(CxFx)

(電離+温度)

CDMS (Ge)  
EDELWEISS (Ge)

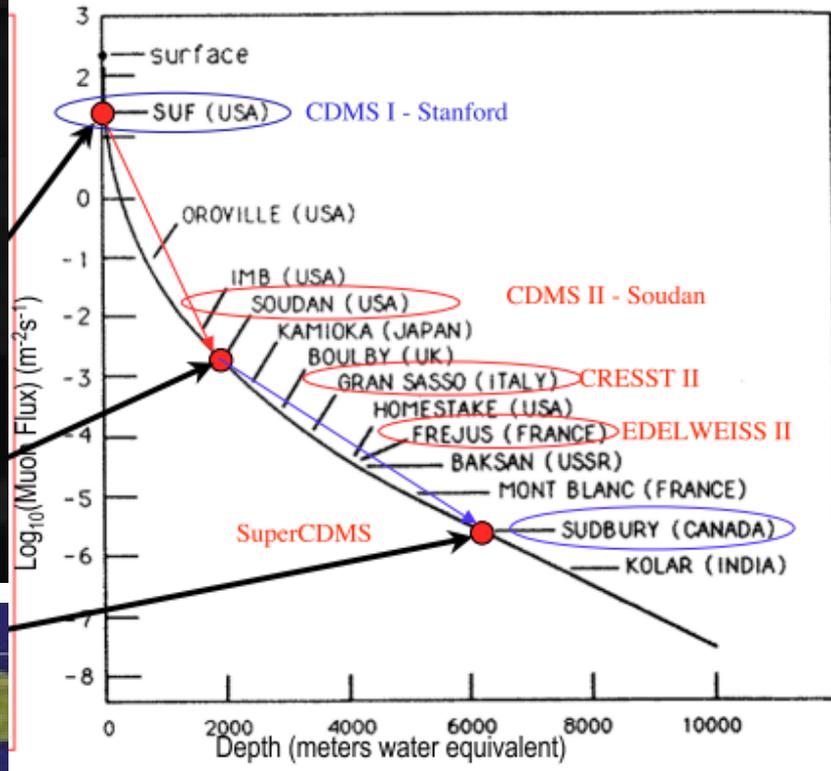
# ■ 期待される信号

- 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

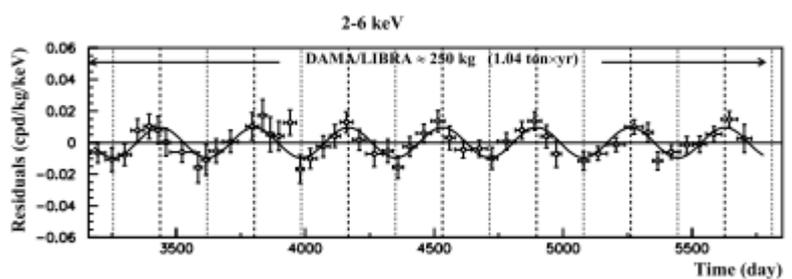
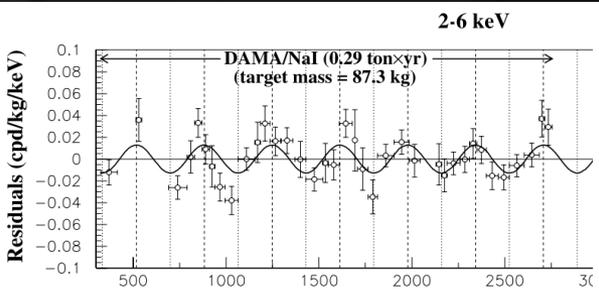


# DAMA/LIBRA

- 250kgのNaIシンチレータ
- 1.33ton・年の観測
- 14サイクルの季節変動 (9.3 $\sigma$ )

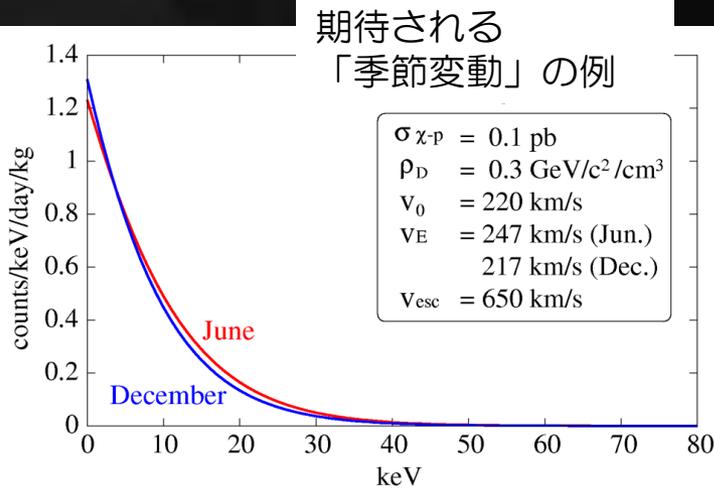


DAMA page

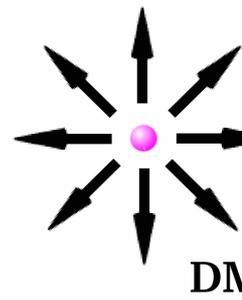
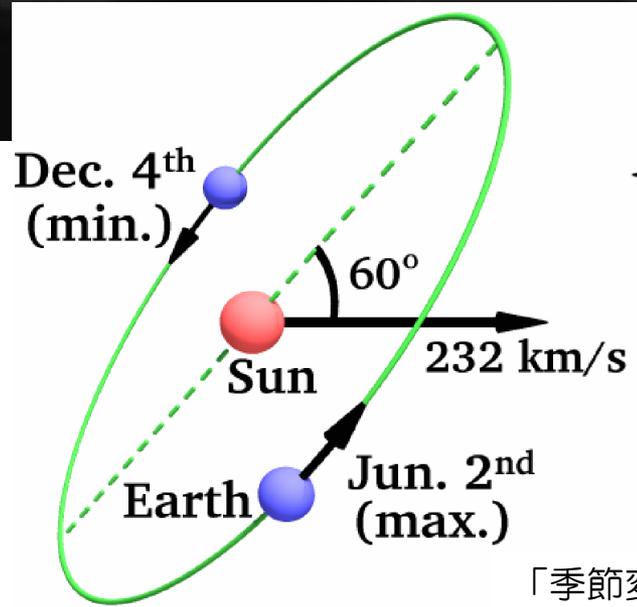


Eur. Phys. J. C (2008) 56: 333–355  
DOI 10.1140/epjc/s10052-008-0662-y

arXiv:1308.5109



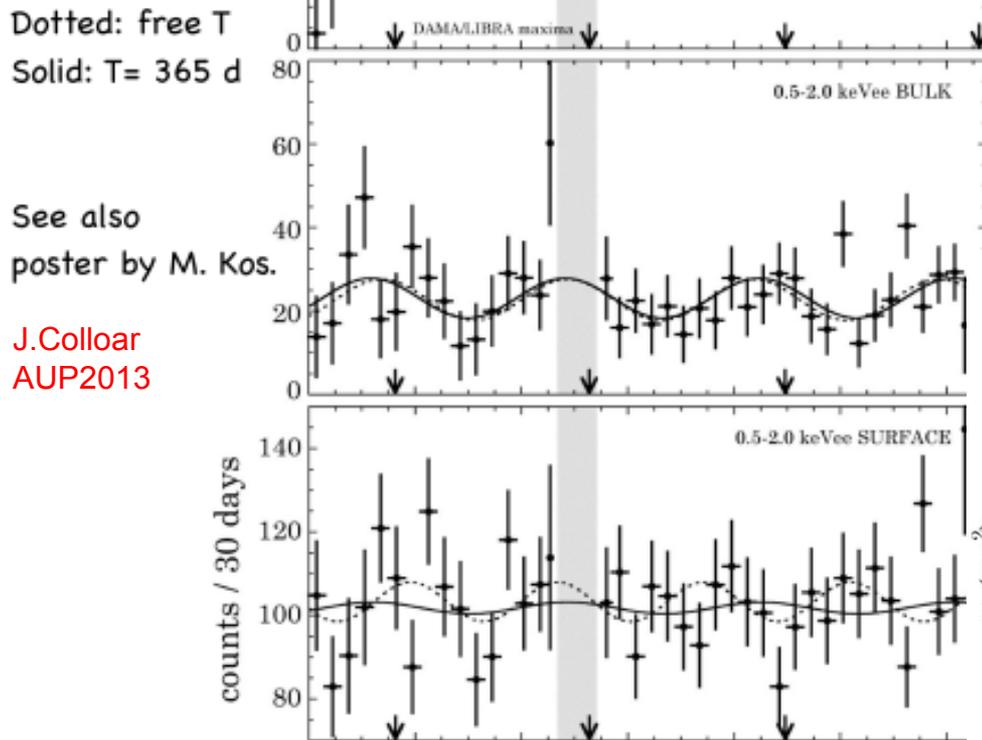
期待される「季節変動」の例



「季節変動」の模式図

# CoGent

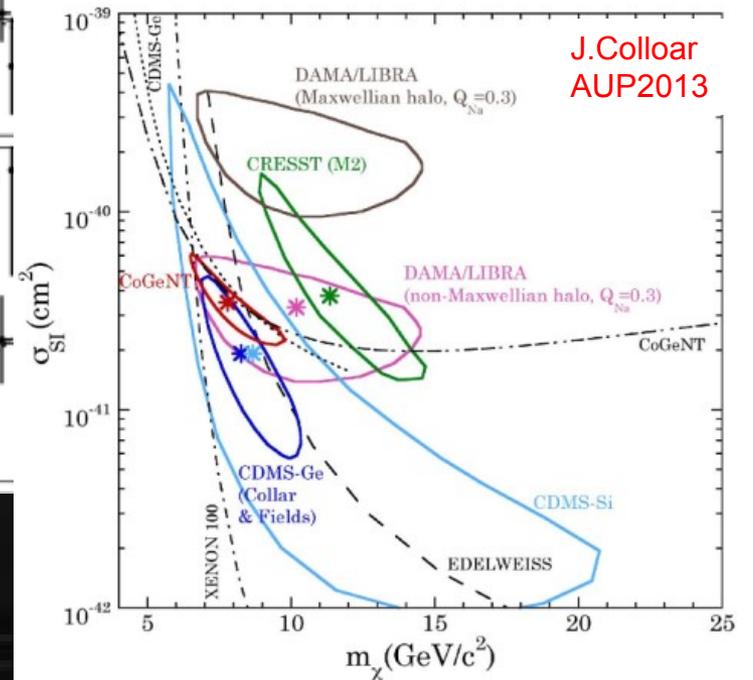
- 閾値の低い (0.4keV) Ge半導体検出器 (440g)
- 3.4年の季節変動(2.2 $\sigma$ )
- 10GeV付近を主張



J.Colloar  
AUP2013



J.Colloar  
AUP2013



J.Colloar  
AUP2013

Asilomar

# CDMS II

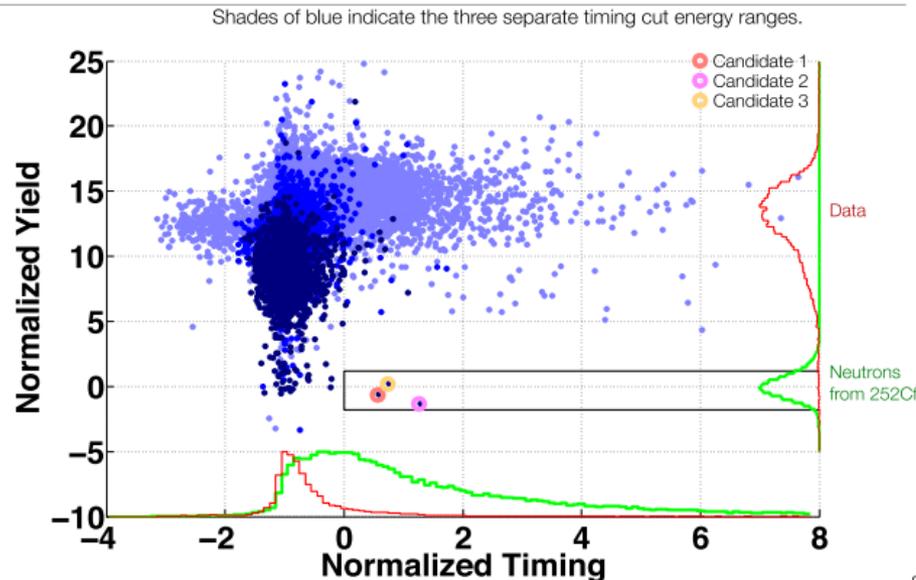
- Ge、Si ボロメータ+半導体検出器
- ガンマ線除去
- 3事象(Si-run, 2013) BG確率5.4%
- 2事象(Ge-run, 2010)

CDMS II (Ge+Si)

- 4.6 kg Ge (19 x 240 g)
- 1.2 kg Si (11 x 106g)
- 35% NR acceptance

Julien Billard (MIT) - TAUP2013

Three events! **Si run** arXiv:1304.4279



240 g Ge or 106 g Si crystals  
(1 cm thick, 7.5 cm diameter)

We do not believe this result rises to the level of a discovery, but does call for further investigation.

# ■ XENON100 : 液体キセノン

■ 161kg液体キセノン

■ ガンマ線除去

## XENON100

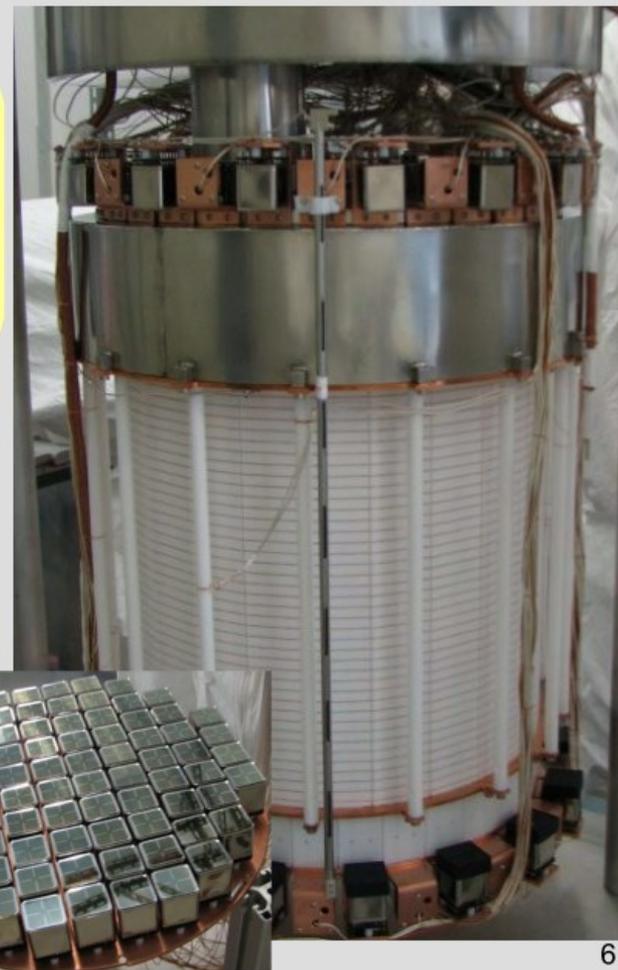


### Goal (compared to XENON10):

- 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)

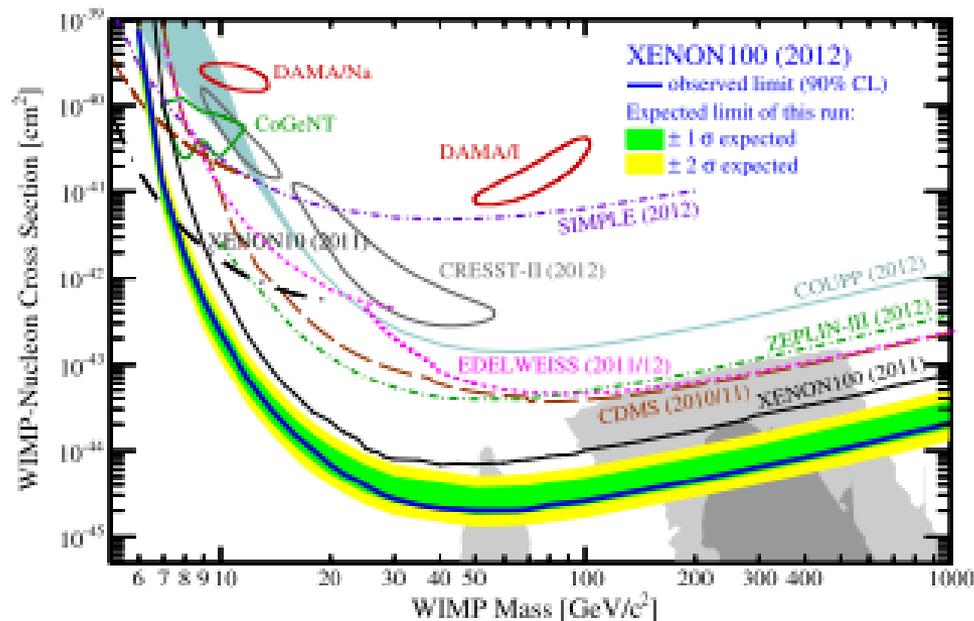


# 戦いの歴史

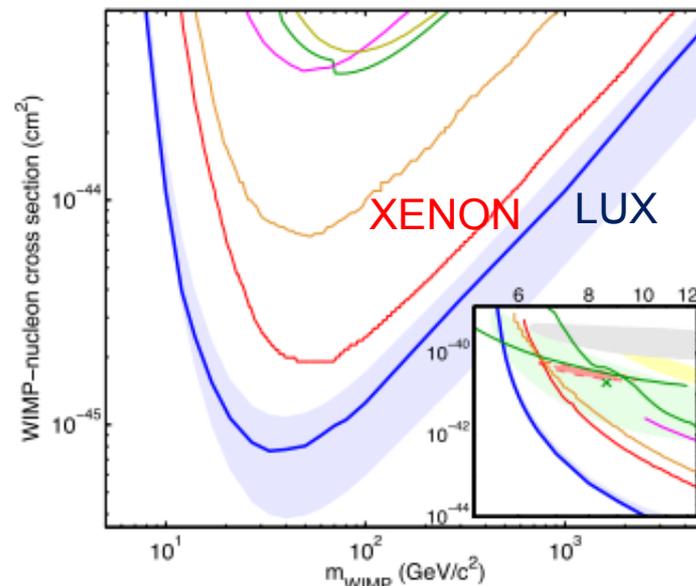
- 1997～ DAMA : 「検出」を主張
- 2000～ CDMS等に否定される
- 2008年 LIBRAで再現!
- 2009年 CDMS 2事象
- 2010年～ その他の実験も (BGだろうが) 「\*\*事象」を報告

PRL 109, 181301 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS



最新結果  
from LUX page



# 世界情勢まとめ

	DAMA/LIBRA	CoGENT	CDMS	XENON
ターゲット	Nal	Ge	半導体 (Ge,Si)	液体キセノン
温度	常温	~77K	10mK	~160K
オペレーション	易	難	極難	難
質量	250kg	440g	1kg	100kg
ガンマ線除去	不使用	不使用	適用	適用
データ取得	7年+7年	3.4年	1年程度	200日程度
結果	季節変動 $9.3\sigma$	季節変動 $2.2\sigma$	2事象(Ge) 3事象(Si)	制限のみ

# 日本はどうだ



## 日本の暗黒物質探索

- XMASSを中心とした多手法での開発が進む。



THANKS  
Japanese Experimental  
Dark matter Investigators



# XMASS (東大宇宙線研+)

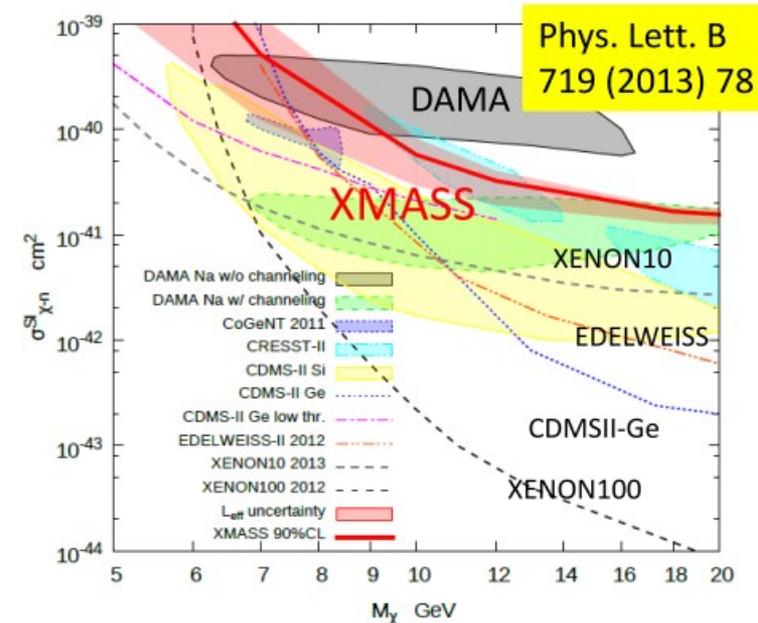
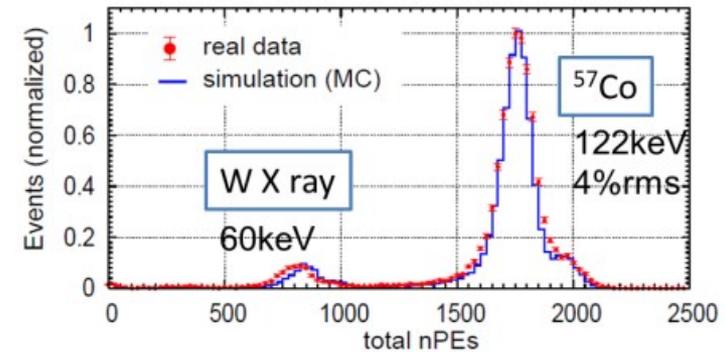
■ キセノン 835kg

■ 1層型

森山2013年秋物理学会

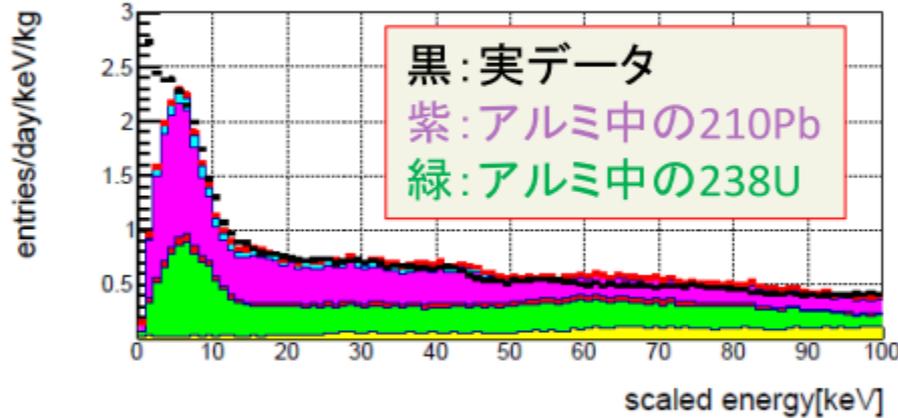
## XMASS-I commissioning phase

- 2010年神岡施設に設置。
- 世界最大835kgの液体キセノン、1層型検出器。
- 世界最大14.7p.e./keV
- 低敷居値を実現し、低質量WIMPsや太陽アクシオンの探索も行った。

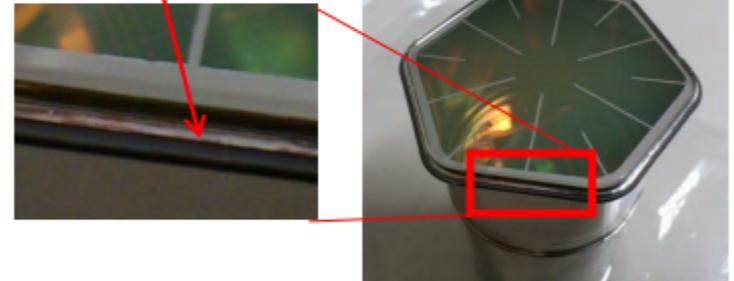


# XMASS-I-RFB

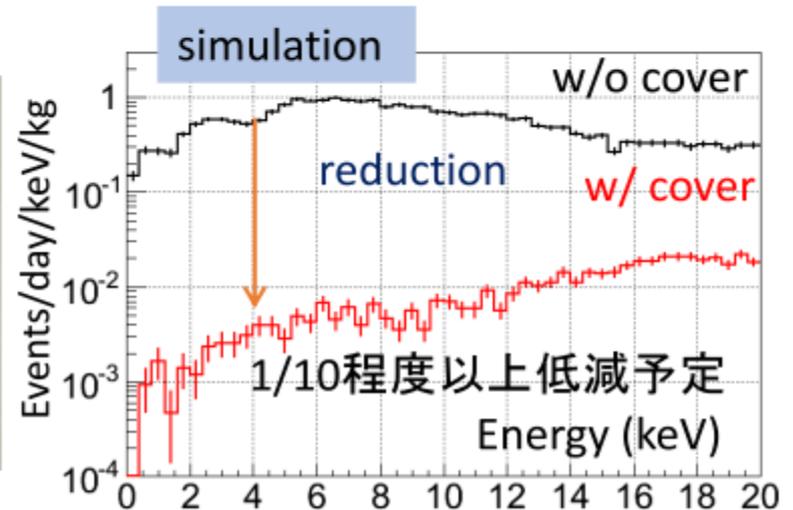
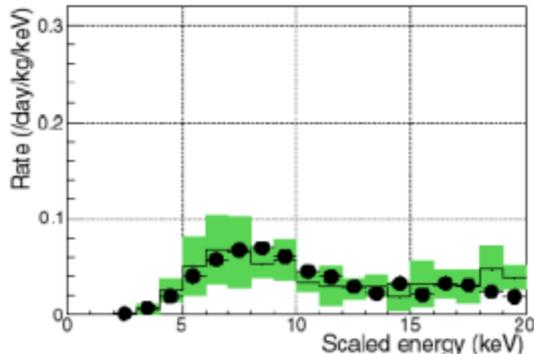
- ほとんどのBGはPMTのアルミシールからの低エネルギーβ
- BGの理解の確認と次XMASS1.5へ向けたスタディ。
- 1年程度のデータで季節変動(0.8ton y!)と多種解析の継続



Aluminum



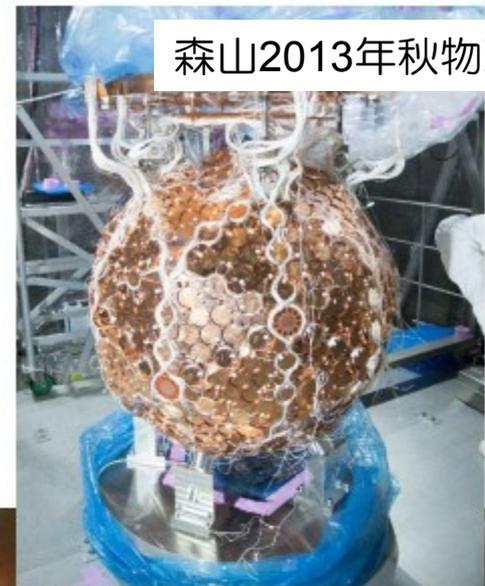
➢ R(PE)<20cm+R(T)<38cm カット後  
(カット効率: 9% @ 5-6keV)



# Refurbishmentの現状

- ほぼ完了。11月から  
データ取得再開予定  
BGの理解の確認＋物理

森山2013年秋物理学会



# ■ ANKOK (早大+)

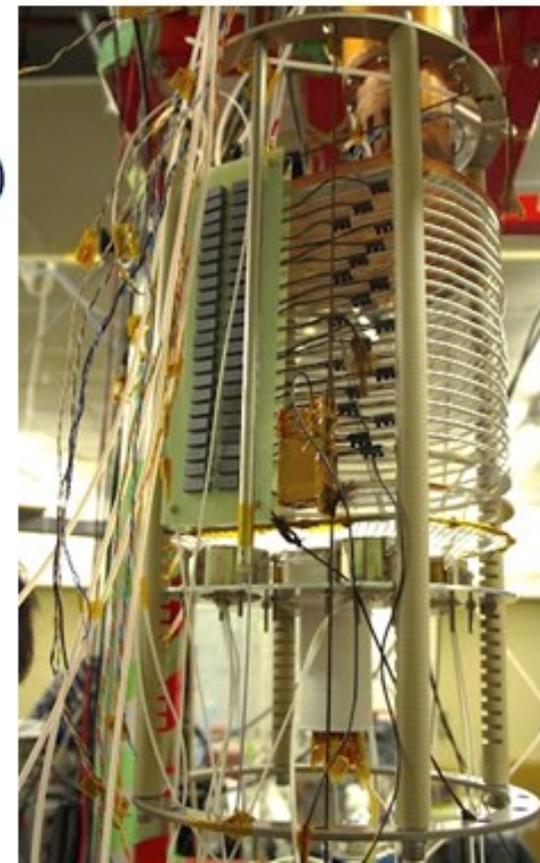
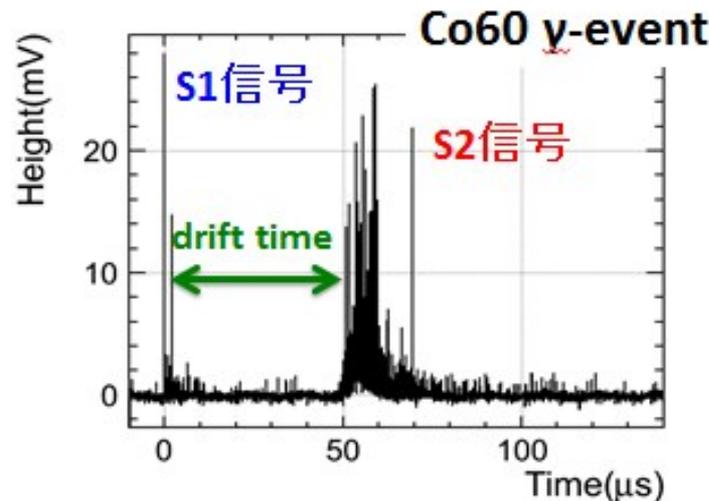
- アルゴン
- 待望の 2層型
- 光量増加 ガンマ線除去
- 地上・10kg

早大理工 藤崎薫

## 2012年 - 10kgアルゴン2相型 -

4/12

- 直径25cm × 高さ 20cm
- 底面5本のPMTで光読み出し
- ✓ 2相型の確立 (高電圧印加・液面管理)
- ✓ 10日間の安定運用
- ✓ ドリフト電子純度評価・維持



- TPB の最適化, 反射材の導入により, 光検出効率を大幅に改善
- 夏に行った 1 相型検出器の実験では約  $1.8 \text{ pes/keV}_{ee}$  を達成
  - 改善の余地はまだまだある(反射材, Q.E., 純度 ...)



~ 6.6/4.3 倍

【GORE® 拡散反射材】



~ 35/25 倍

【浜松ホトニクス R11065】



~ ??? 倍

【PURERON GP/GPF】

- この他に, 新しい検出方法にも積極的に取り組んでいる
  - 「MPPC や赤外光を用いたアルゴン蛍光の新しい検出方法の開発」  
鷲見貴生講演, 素粒子実験領域, 20aSL-10

# ANKOK GROUP

早稲田大学地上8階にて

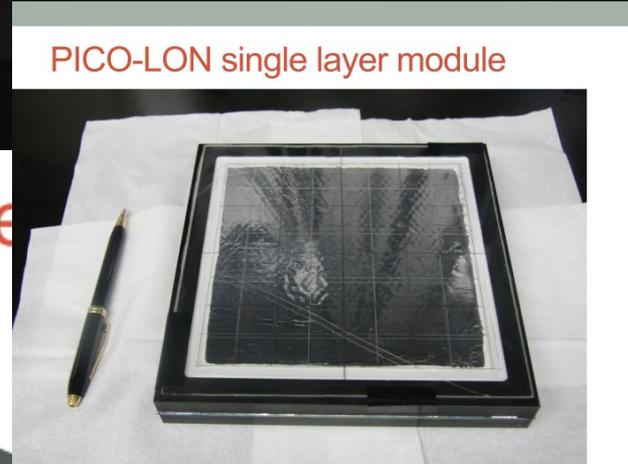


**ANKOK** は今後も成長を続け、  
国際競争力を持つアルゴン実験として、

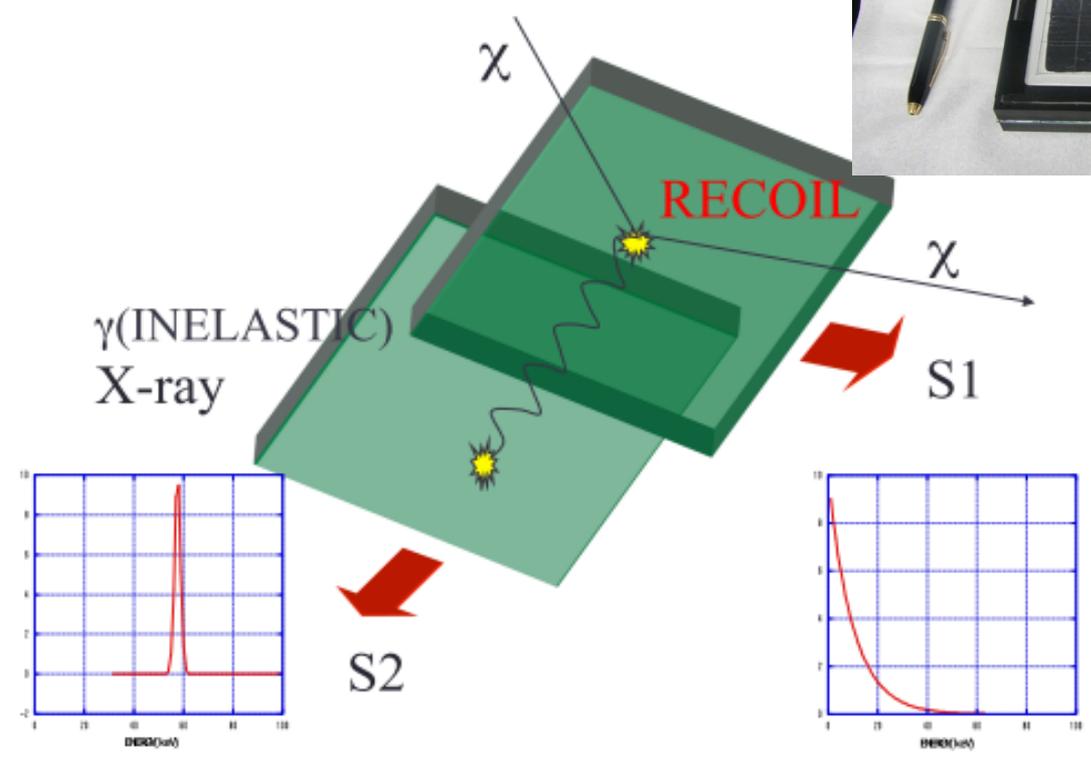
物理結果を叩き出す

# ■ PICO-LON (徳島大+)

- NaIシンチレータ
- 特性X線との同時計測
- 地下・ $10 \times 10 \times 0.1 \text{cm}^3$



## Concept of PICO-LON de



# Present status of PICO-LON module

- Low Energy threshold = 2keV OK
- Low background of crystal OK!!!!
  - Material selection
  - NaI(Tl) powder purification
  - Successfully reduced U and Th chain impurities.
- K.Fushimi 20pSJ-7

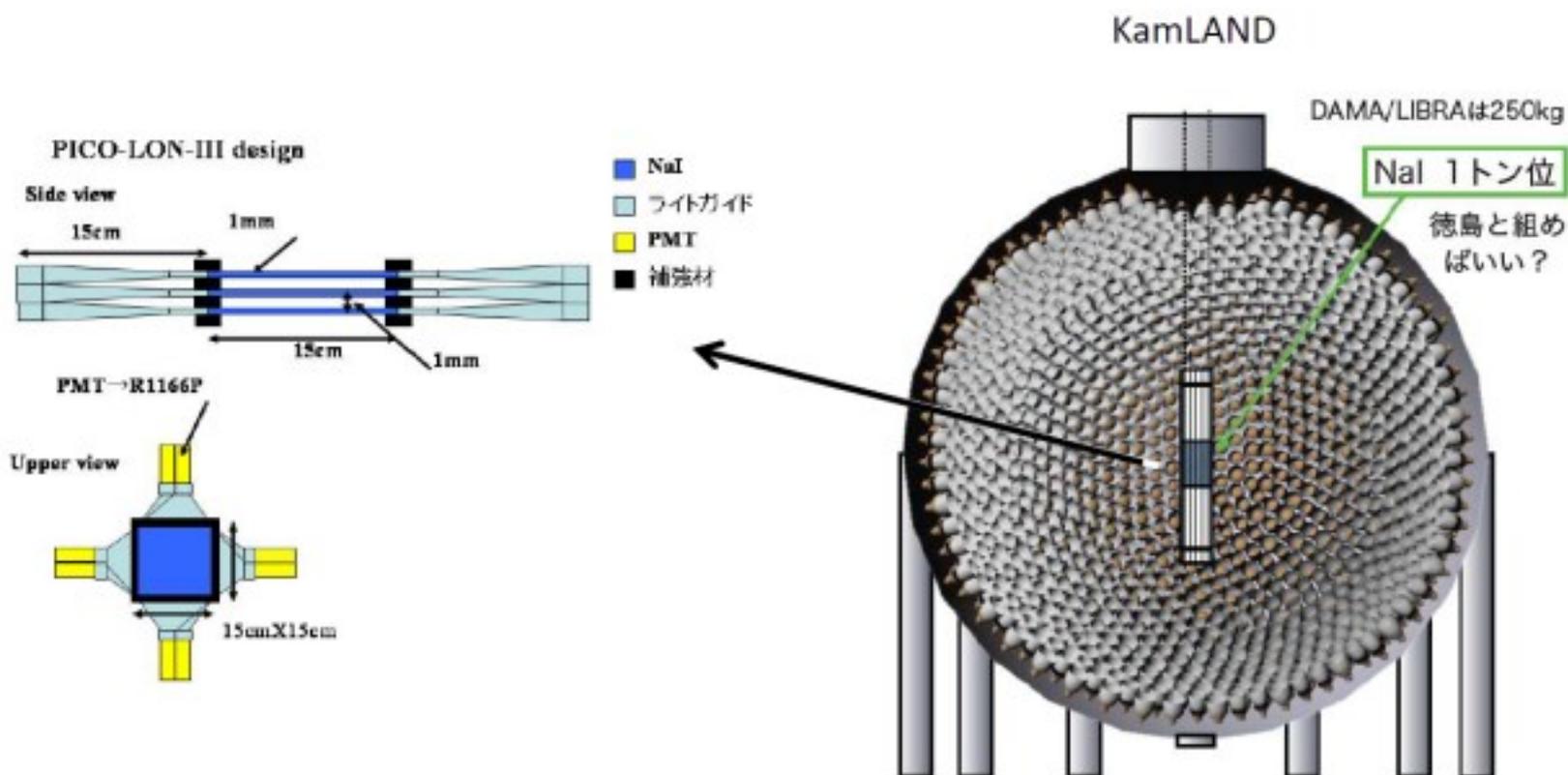
# Present result

	DAMA	DM-Ice	PICO-LON Ingot 23	Goal of PICO-LON
natK	<20ppb	500ppb	Not yet	<20ppb
$^{232}\text{Th}$	0.5-0.7ppt	50ppt	<1 ppt	<1 ppt
$^{238}\text{U}$	0.7-10ppt	7.5ppt	~8 ppt	<1 ppt
$^{210}\text{Pb}$ $\mu\text{Bq/kg}$	5-30	2000	~50	<100

- Low background NaI(Tl) completed!!!
- Next stop: Stability test
- 1-ton NaI(Tl) in a few years.(Need Fund)

# KamLAND-PICO

- Install PICO-LON detector into KamLAND
- KamLAND is an ideal active shield.



# 方向感度を持つ実験

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.

博士課程の時に出会った  
「原子核の飛跡」

# ■ 第四の情報：原子核飛跡

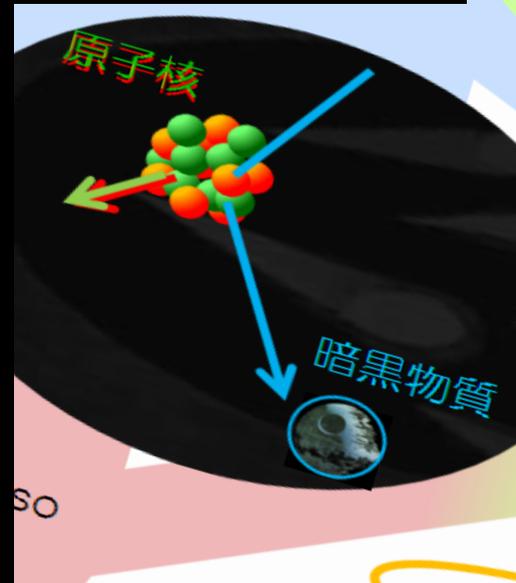
PRL73(1994)1067



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



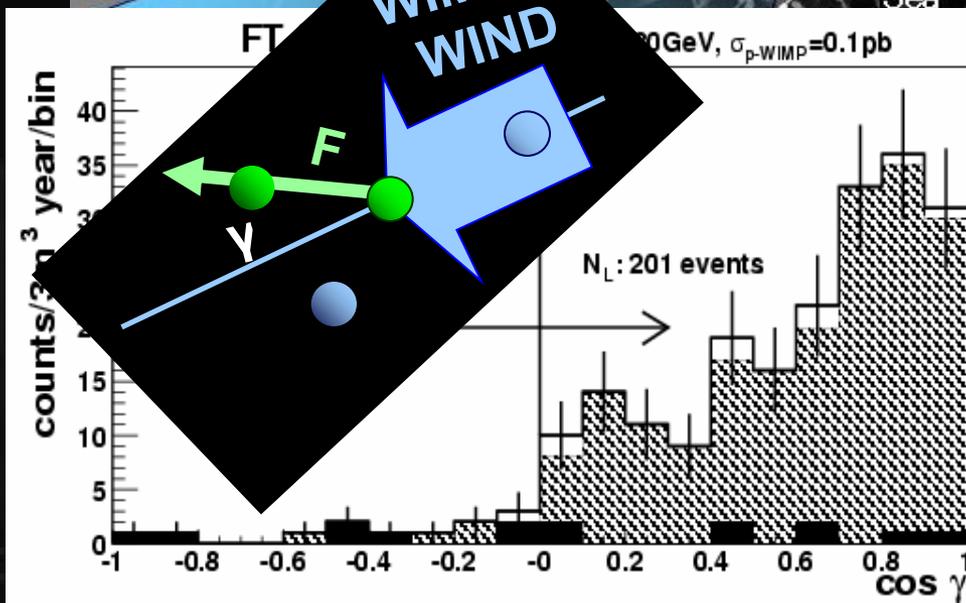
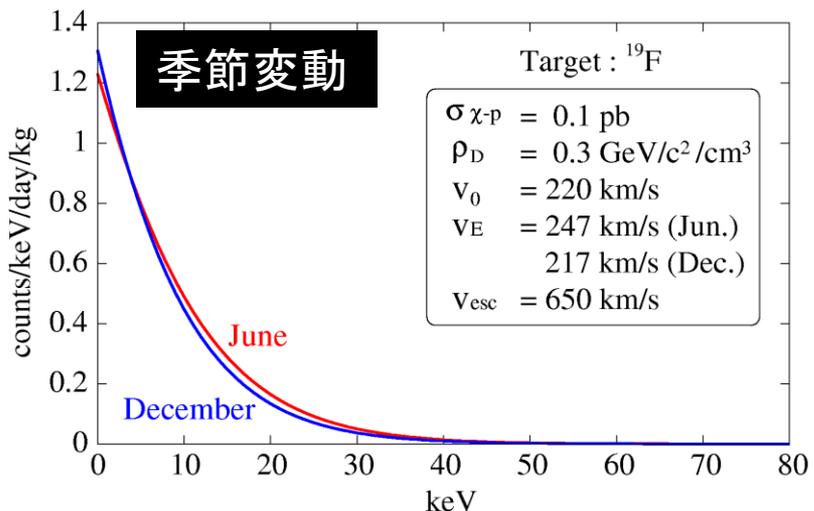
# 「方向性」の重要性



Sin  
lia  
  
som a  
fysi  
i  
mä  
R  
för  
fy  
.  
f

# 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



# Emulsion Dark Matter Search (名大十)

- 大質量によるSI interaction のdirectional search
- 赤道儀に載せて、CYGNUS方向を追尾

Emulsion detector for dark matter search

[Current Detector density : 3.2 g/cm<sup>3</sup>]



Detector ability

	NIT (40 nm AgBr9)	U-NIT (20 nm AgBr)
AgBr density	12 AgBr/μm	29 AgBr/μm
Detectable range	> 200 nm@ C	> 100 nm@C
Time	20	25-30

target: CNO, Ag, Br

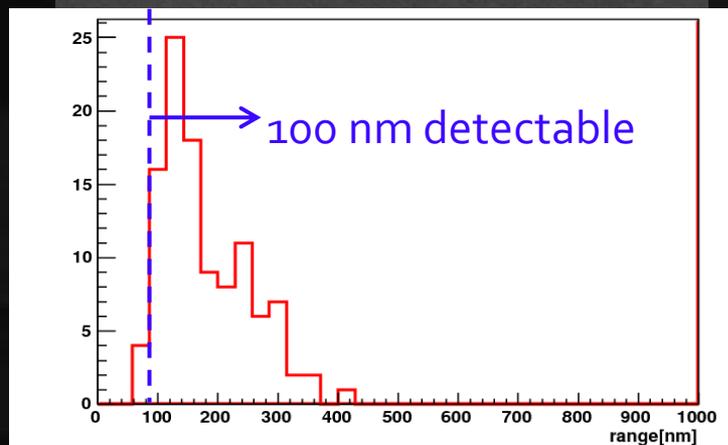
Kr 200keV

200nm

Scanning Electron Microscope

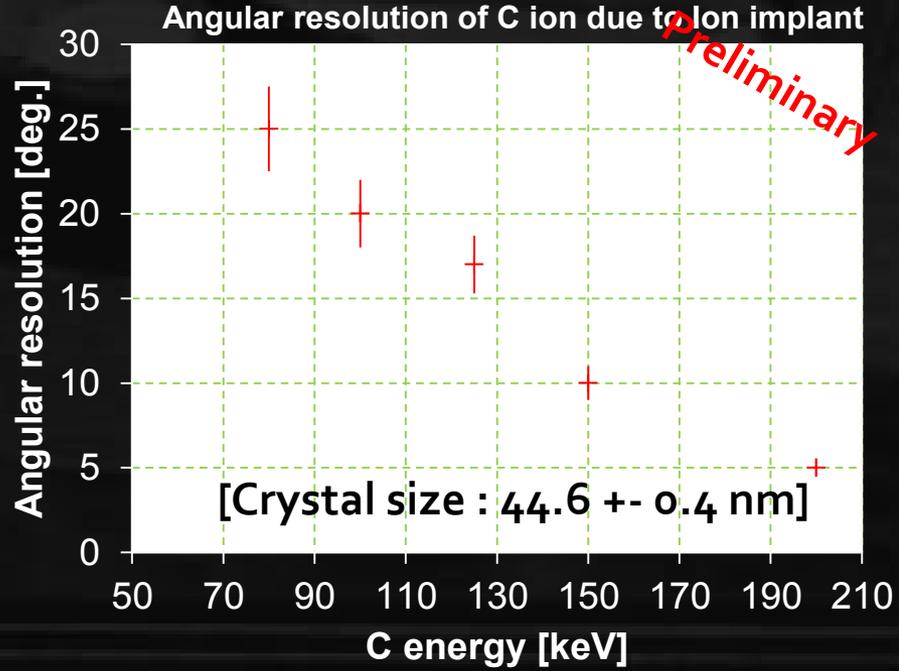
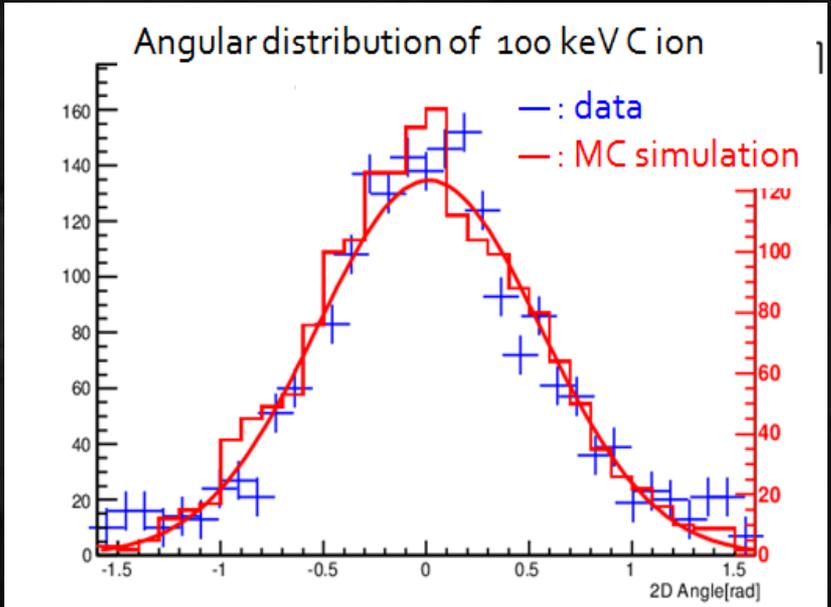
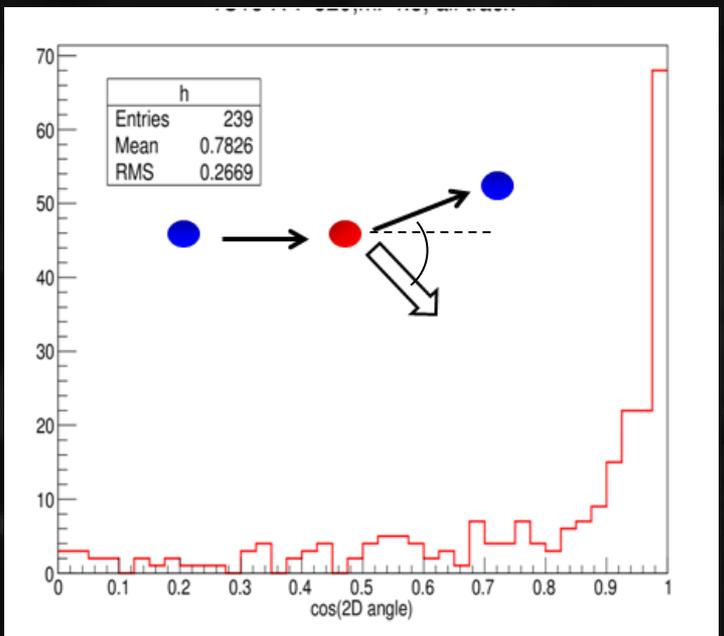
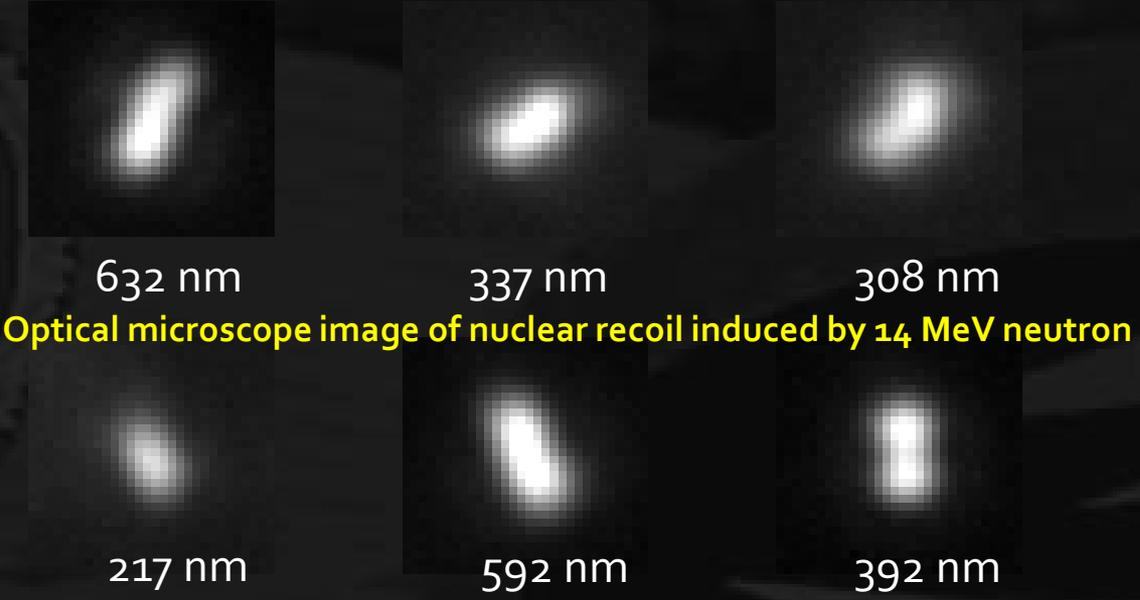
Kr 400keV

500nm



Range distribution [nm]

# Neutron and low velocity C ion demonstration



# 現状

- 地下実験候補地：グランサッソ研究所  
→ 現在、referee committee からの宿題をこなしてるところ
- バックグラウンド低減に向けた検出器の性能調整
- 内部バックグラウンドの測定
- 中性子を使った性能評価
- 来年くらいからのグラムスケールの実験を目指す。

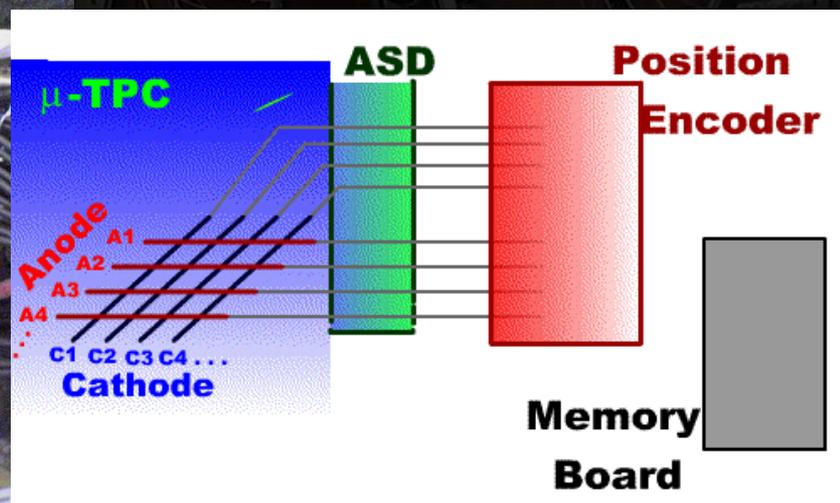
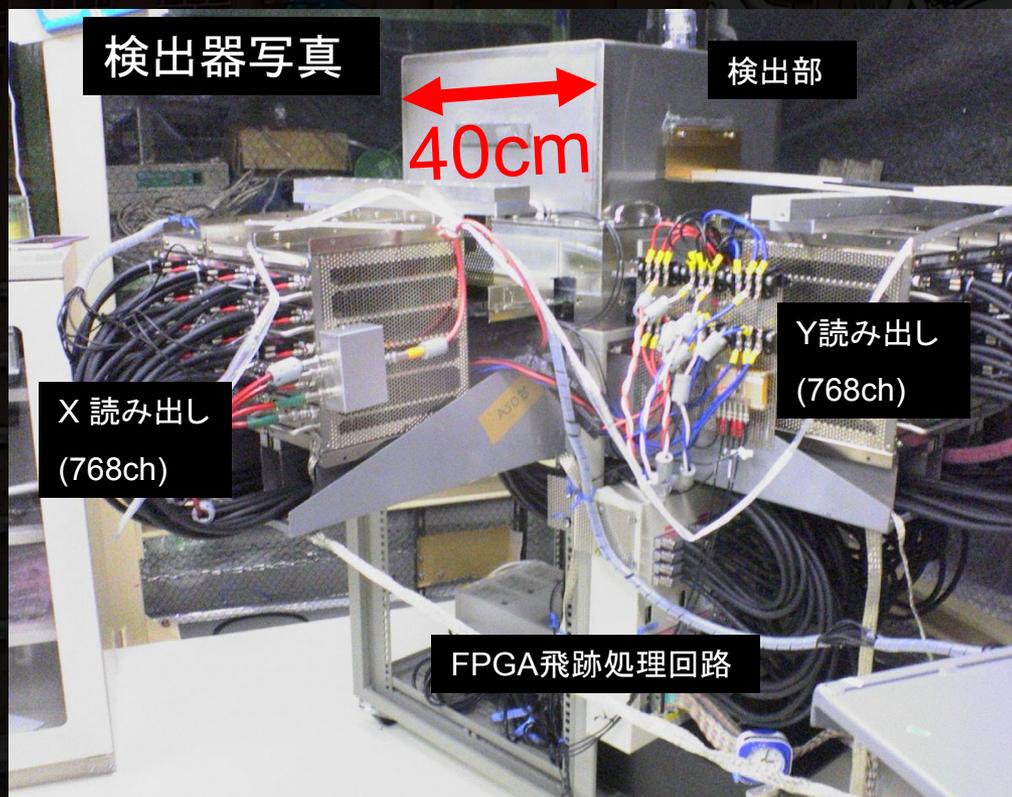
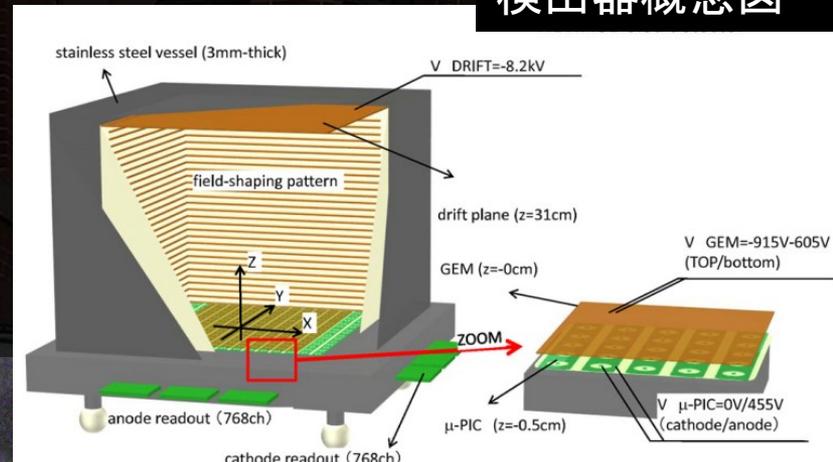
# NEWAGE

最新結果	Physics Letters B 686 (2010) 11
地上実験	Physics Letters B 654 (2007) 58
地下実験	Physics Letters B 578 (2004) 241
新検出器	JINST 7 C02023

# NEWAGE概要

- マイクロTPCによる三次元飛跡検出
- 30cm角検出器で地下実験中
- CF<sub>4</sub> ガス SD探索

検出器概念図

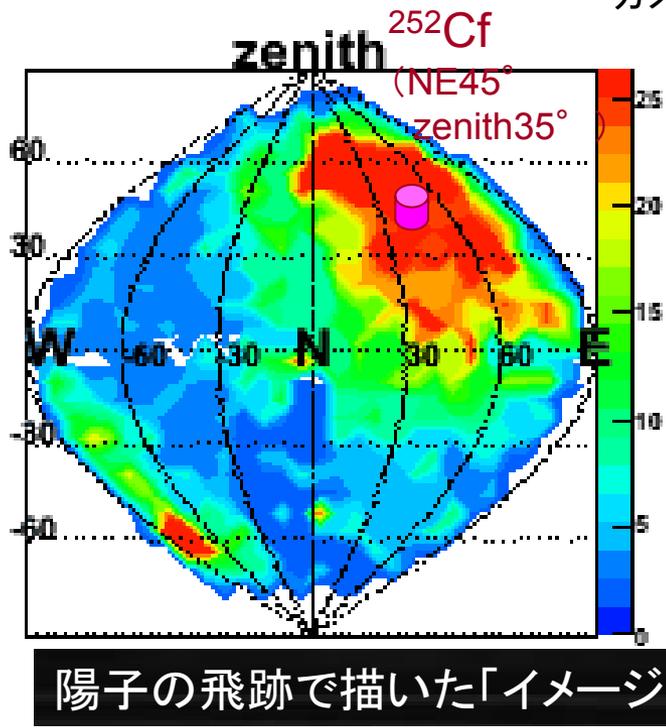
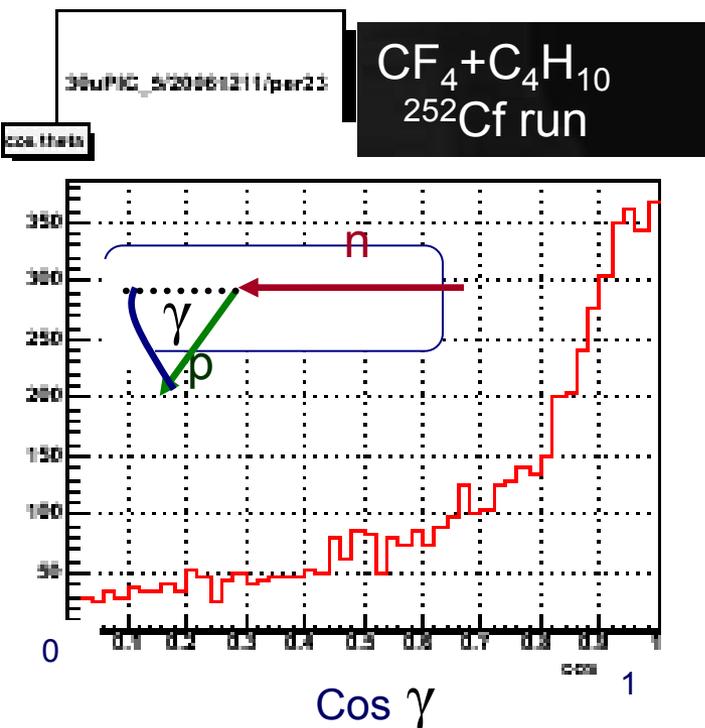
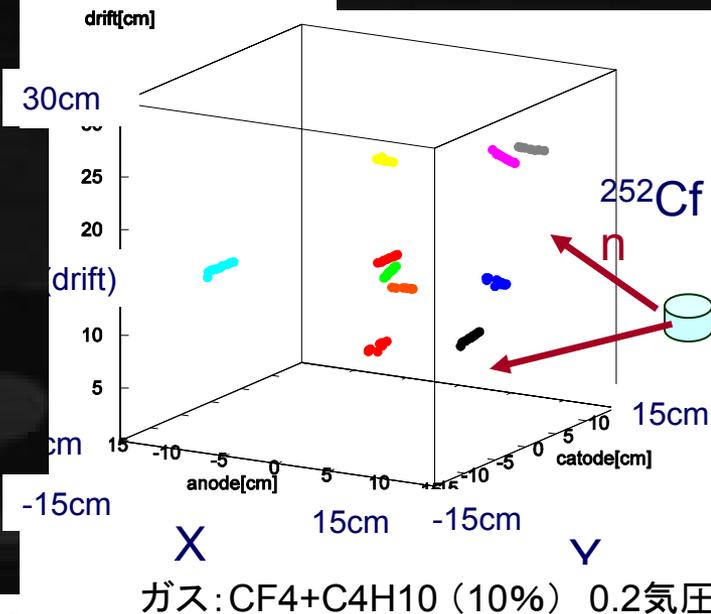


TPC (time projection chamber) の原理

# 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

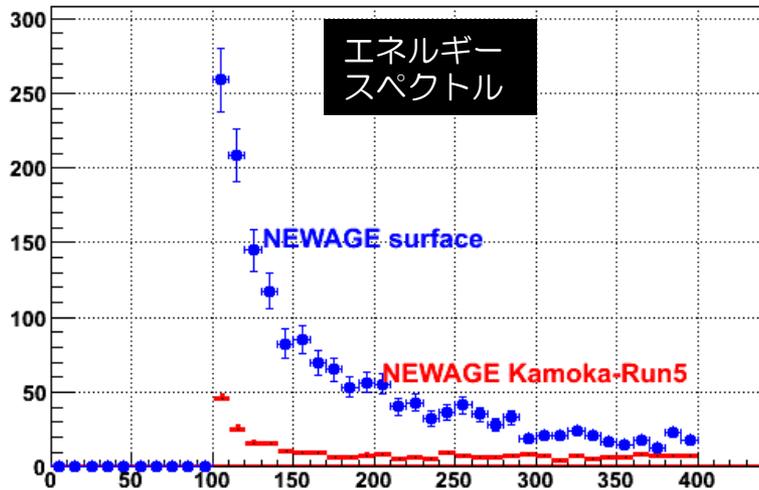
## 陽子飛跡の例



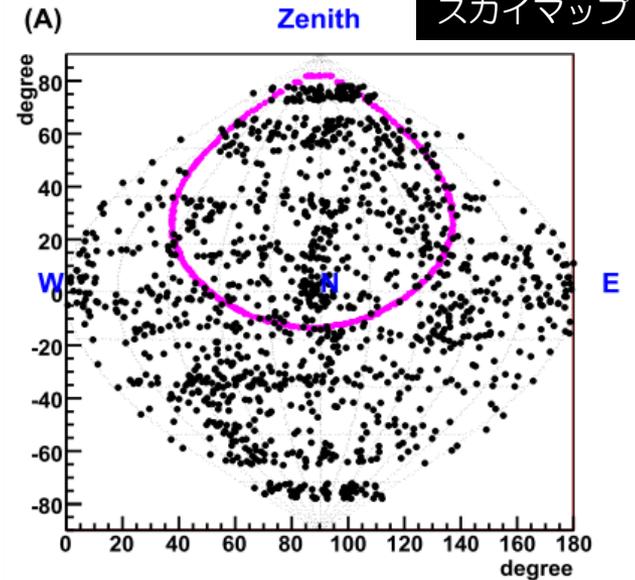
陽子の飛跡で描いた「イメージ」

# NEWAGE地下実験

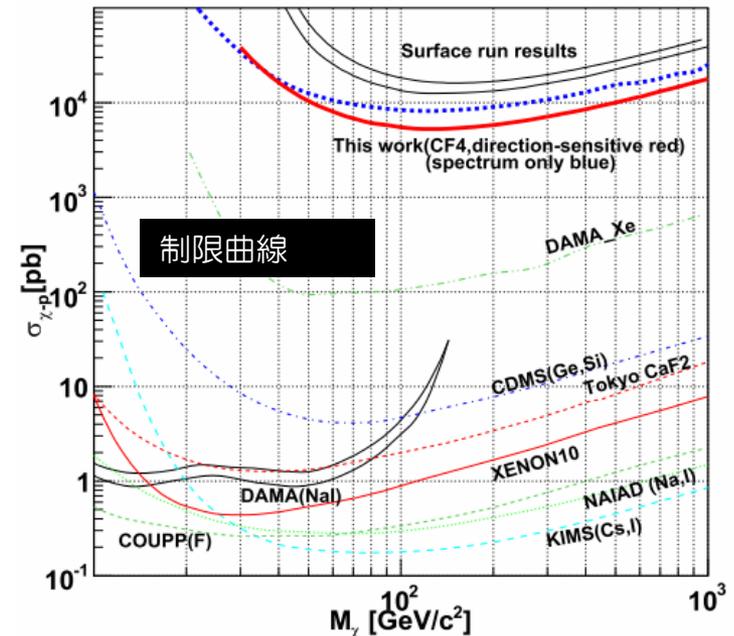
- エネルギースペクトル 地上の1/5 程度に改善
- スカイマップ
- 制限曲線：方向に感度を持つ実験として唯一の制限



Physics Letters B 686 (2010)

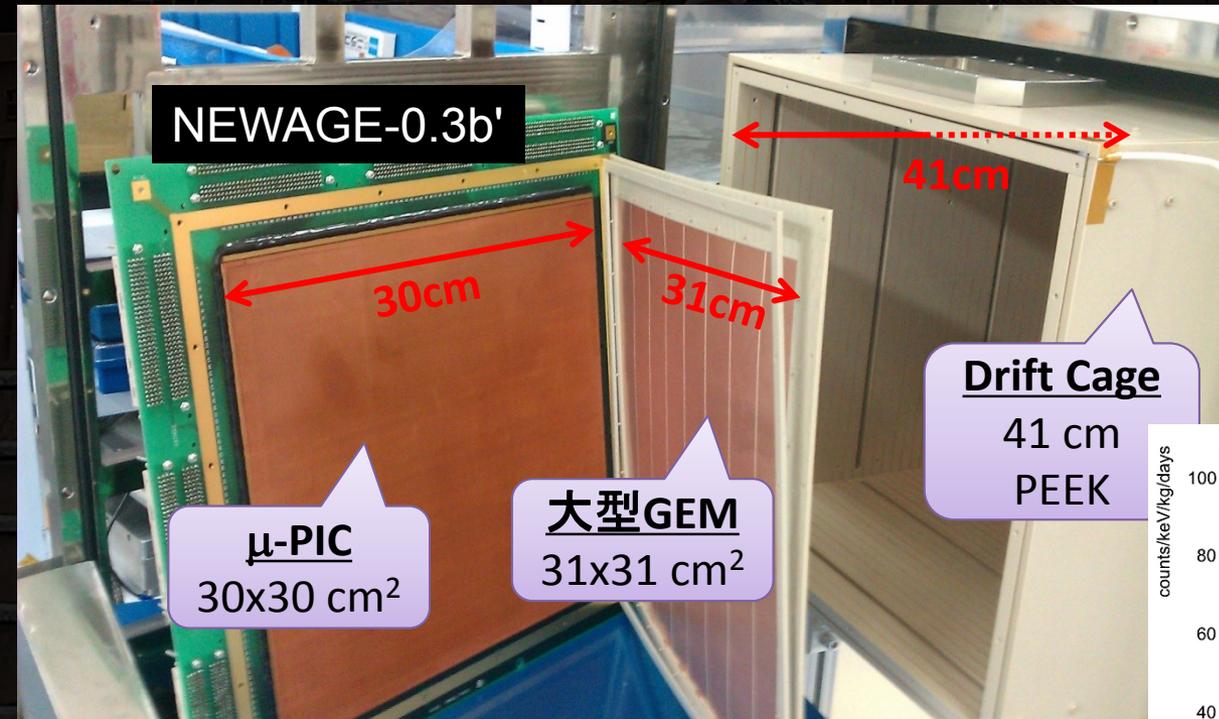


SD 90% C.L. upper limits and allowed region

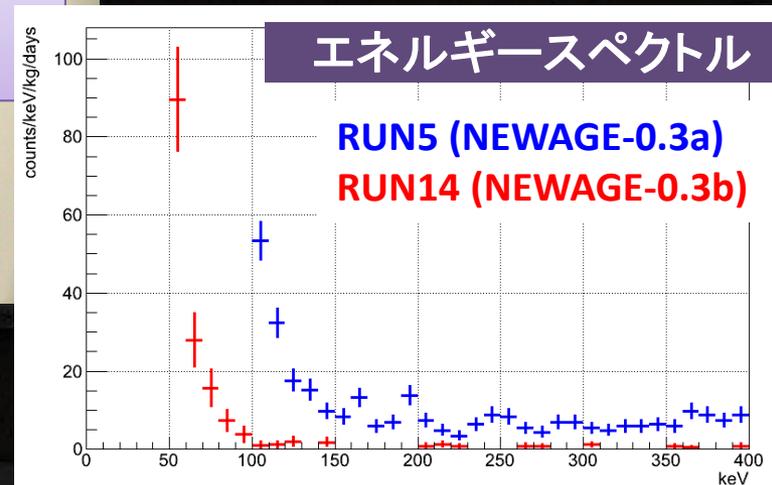


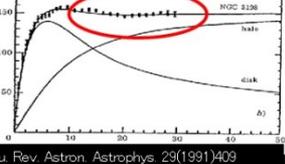
# NEWAGE 感度向上へ

- 新検出器：NEWAGE-0.3b' (大型、低BG)
- 2013年3月地下に設置
- 感度向上、現在暗黒物質観測中



暗黒物質発見に向けてさらなる感度向上を

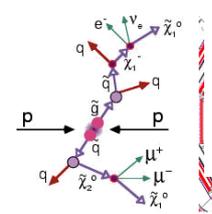




# 加速器実験

高速回転 三所攻めだ～

を



LHC 8TeV :  
SUSY未発見

まとめ

多手法で暗黒物質の研究が進んでいる。  
数年のうちに強い証拠が得られる可能性も。



陽電子・ガンマ線：  
何か兆候?

「信号」と「否定」  
入り乱れ

間接探索

直接探索