

# 直接探索の将来計画 ～チカラワザのその先に～ JEDI's new hopes

神戸大学 身内賢太郎

2013年9月21日



THANKS

Japanese Experimental  
Dark matter Investigators



# 直接探索の将来計画 ～チカラワザのその先に～ JEDI's new hopes

メッセージ

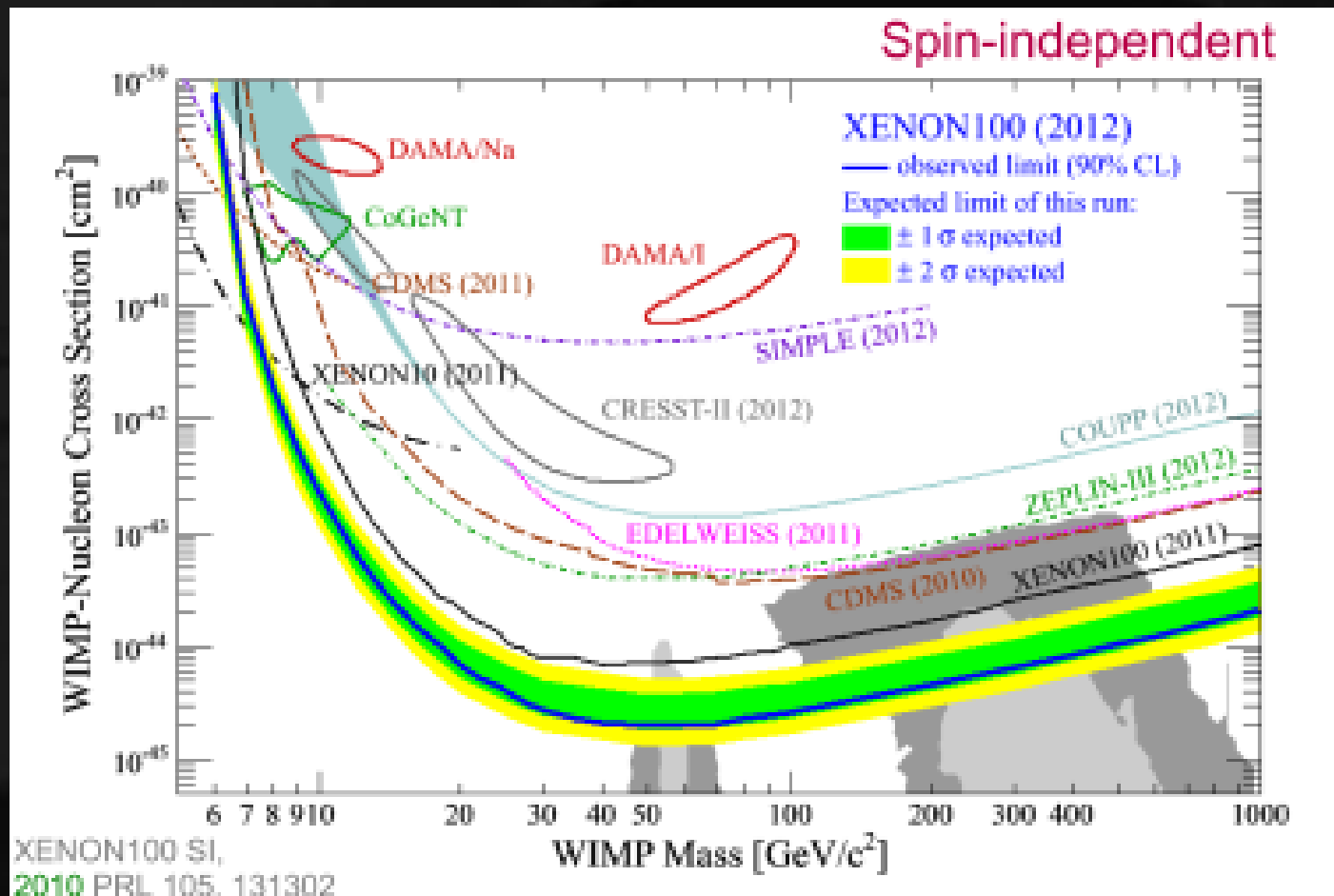
「その先」はすぐそこ

# 直接探索の将来計画 ～チカラワザのその先に～ JEDI's new hopes

- ◆ チカラワザ：「大質量」の将来計画
- ◆ 「その先」の目指すもの：暗黒物質の信号
- ◆ JEDI's WEAPON
- ◆ 「その先」へ：将来計画

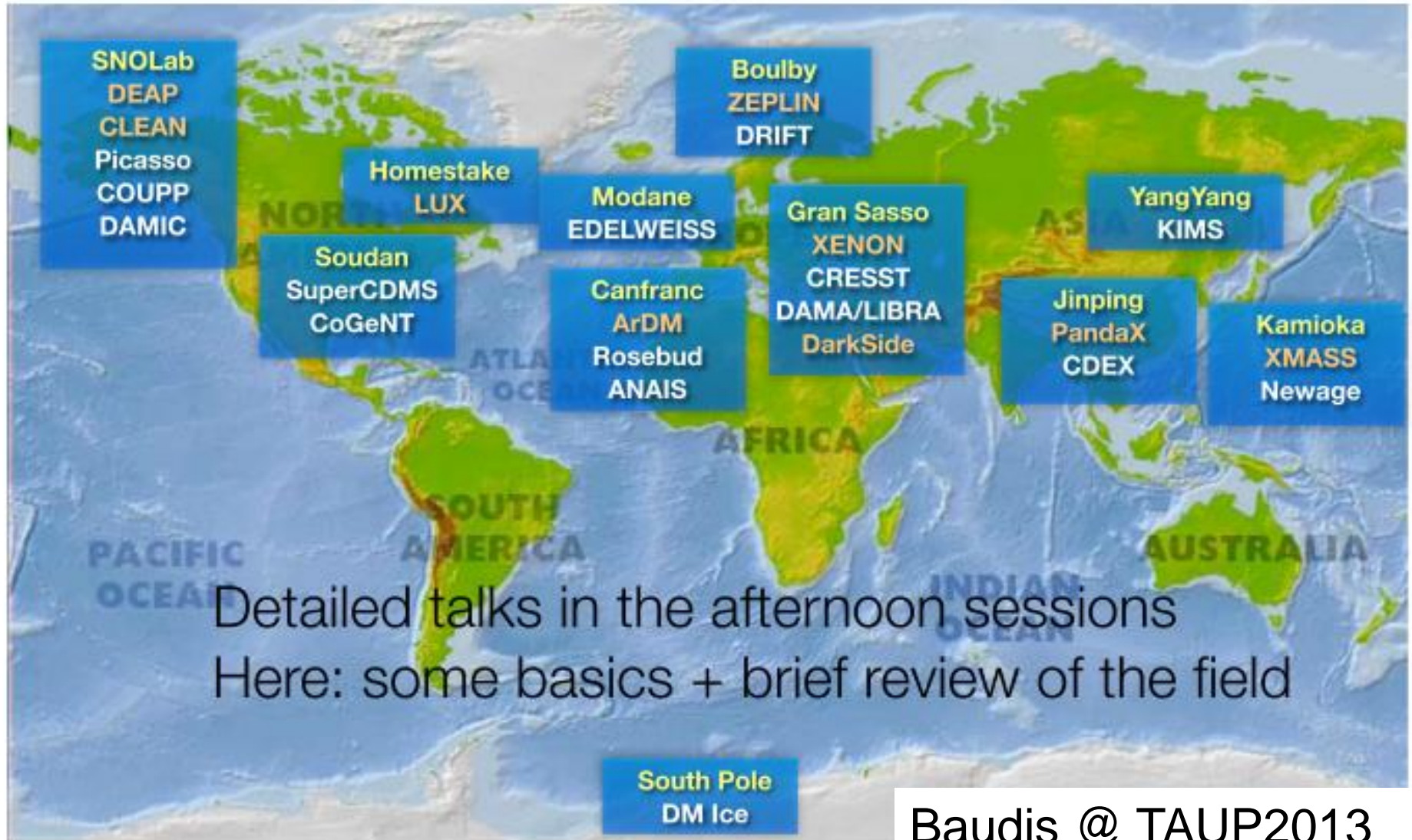
# ◆ 現状確認

- DAMA CoGeNT CRESST
- XENON





# A world-wide effort to search for WIMPs



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

# チカラワザ

低温検出器  
希ガス液体検出器

の合従連衡

# 低温検出器

● 100~200kg ^



Germanium

EURECA-I

(150kg)



CRESST

Gran Sasso

CaWO<sub>4</sub>

phonon – scintillation



## SuperCDMS SNOLAB

### Ongoing R&D

100 mm detector  
procurement  
fabrication  
testing  
production (6 det/mo)

Readout improvements  
Tower engineering  
new SQUID arrays  
JFET → HEMT

Installation @ SNOLAB  
Shielding design  
Cryogenic System  
Neutron Veto

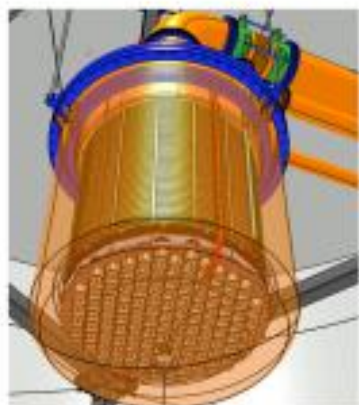
*IDM talk by Silvia Scorza*

Run 200 kg for 4 years  
 $\sigma_{SI} < 8 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$   
for 60 GeV/c<sup>2</sup> WIMP

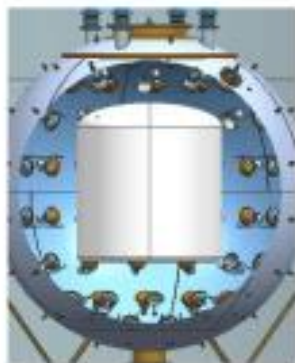


# Future argon and xenon detectors

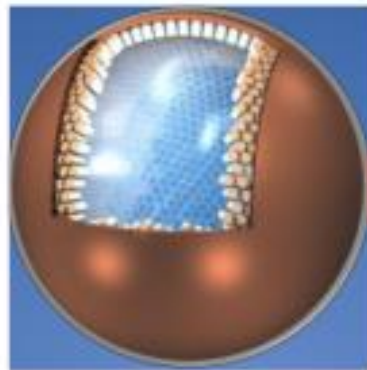
- Under construction: XENON1T at LNGS, 3.5 t LXe in total
  - ➔ commissioning in 2014, first run in 2015, goal  $2 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$
- Near future + design and R&D: XENONnT (n t LXe), XMASS-1.5 (5 t LXe), DarkSide-5000 (5 t LAr), LZ (7 t LXe), DARWIN (20 t LXe)



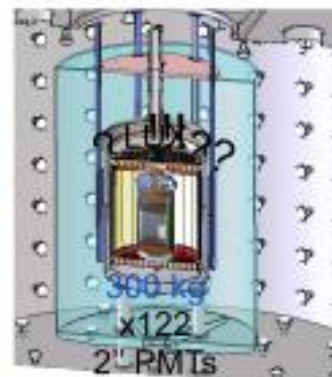
XENON1T: 3.5 t LXe



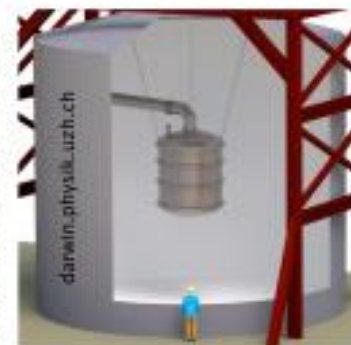
DarkSide: 5 t LAr



XMASS: 5t LXe



LZ: 7t LXe



DARWIN: 20 t LXe/LAr

# 液体キセノン

## XENON1T 建設中 2015年観測開始予定



XENON1T in Hall B  
(next to Icarus) @ LNGS

### XENON1T (2011-2015)

- Liquid xenon TPC to explore  $\sigma \sim 2 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$
- Detector size:  
~ 1 m<sup>3</sup>, ~ 3 t LXe, ~ 1 t fiducial mass
- Water Cherenkov Muon Veto
- Approved by INFN.
- Funded.
- Construction start: fall 2012.



# DarkSide Program

Multi-stage program at Gran Sasso National Laboratory

DarkSide 10

Currently running full prototype detector

DarkSide 50

First physics detector

Physics goal  $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$

DarkSide G2

Multi-ton detector

Physics Goal  $\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$

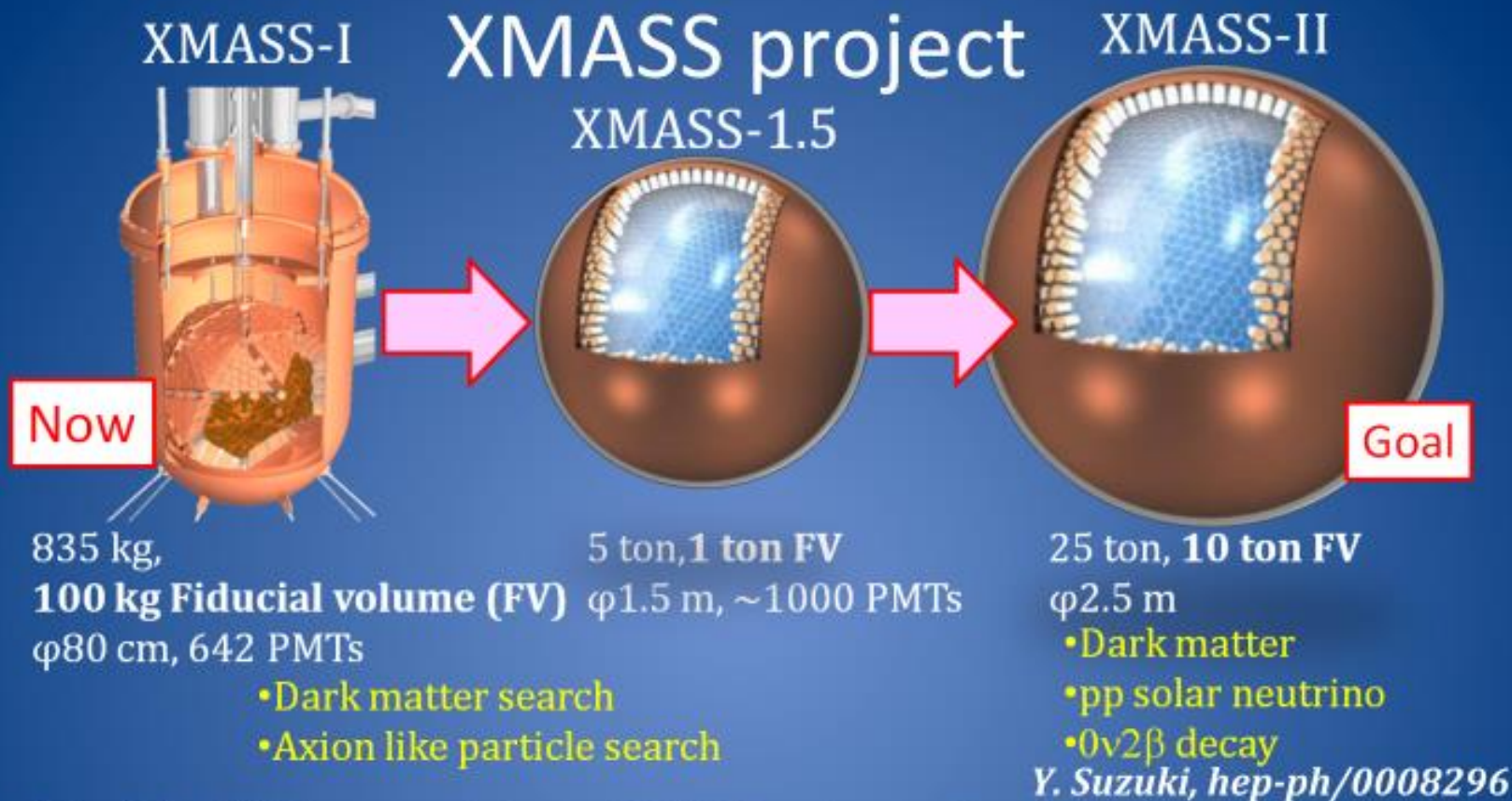
+ multiple

26th July 2012

RICHARD SALDANHA  
IDENTIFICATION OF DARK MATTER 2012



# ◀ XMASS-II



• In this slide, I'd like to explain our XMASS project at Kamioka observatory in Japan.

• Our final goal, a ten ton scale detector of XMASS-II such as dark matter, pp solar neutrino and  $0\nu 2\beta$  decay.

• Refurbishment of XMASS-I will be completed and planned to start in 2015. They are mainly for XMASS-II.

• Commissioning data of XMASS-I was taken in 2011.

CYGNUS 2013@Toyama

2013/06/11

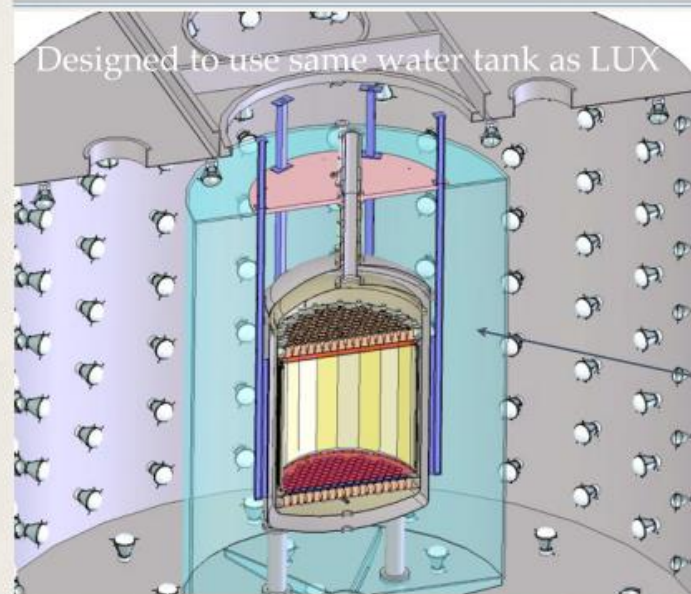
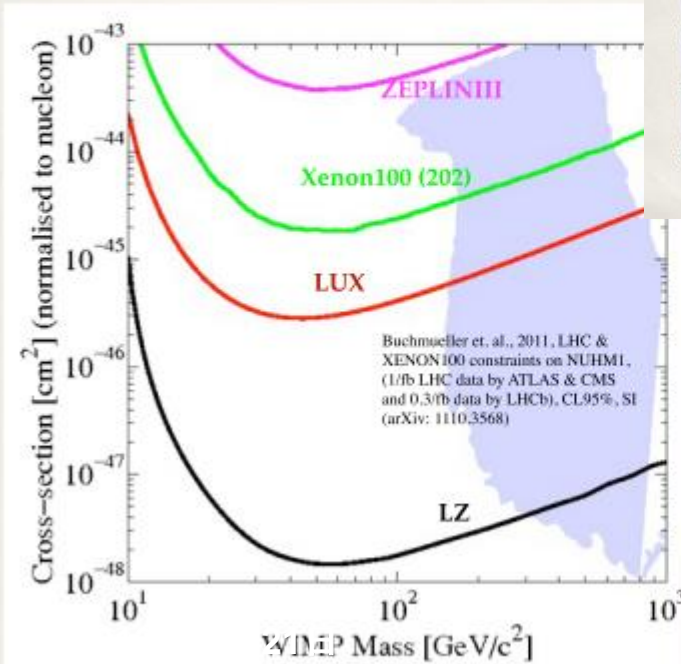
Nagoya univ. Hiroyoshi Uchida

LZ

7T XENON

# Beyond LUX, LUX+ZEPLIN=LZ

## Conclusions



7 T fiducial Xe, 8.6 T total, scintillation signals read out with  $\approx 500$  Hamamatsu R11410 3" PMTs

Two-step veto uses water shield + liquid scintillator in acrylic vessel, as well as instrumented Xe outside active region

See Tom Shutt and Dave Malling's talks for details <sup>34</sup>

Liquid xenon detectors are very

power Karen Gibson on behalf of the LUX Collaboration

search Identification of Dark Matter

Hopeful July 26, 2012

present something exciting at the next IDM!!!



◀ カマかせだけではなくて、

- 低BG光センサー "QUPID"
- チタン容器

Radio-assay of Titanium samples for the LUX Experiment

arXiv:1112.1376v

Comparison of Photon Detectors from Hamamatsu

arXiv:1103.3689v2

R11065 (Ar)  
R11410 (Xe)  
3 inch

QUPID  
3 inch

MAX  
XAX

Katsushi Arisaka, UCLA

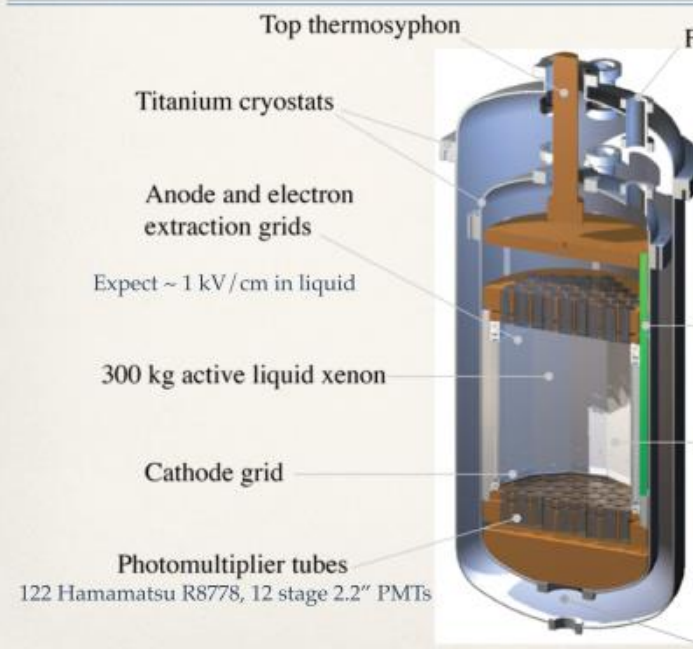
U/Th ~ 1 mBq

U/Th ~ 5 mBq

U/Th ~ 0.1 mBq

Confirmed by ICP/GD-MS

Cryostat

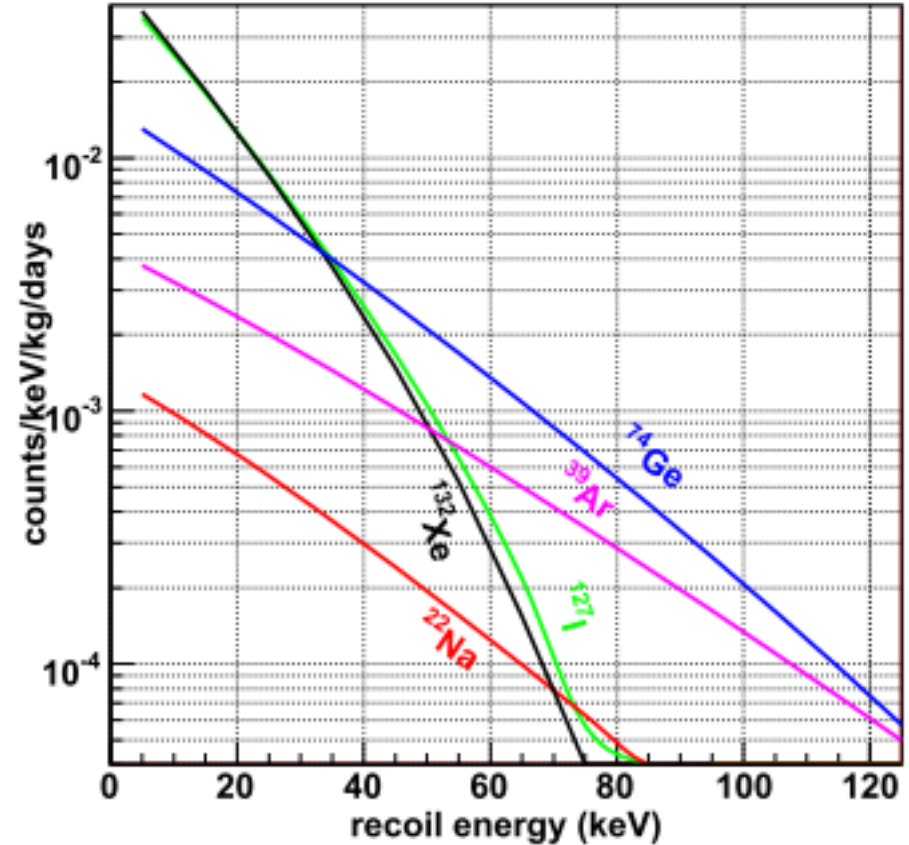


# 「その先」の目指すもの

物質依存  
季節変動 +  
非弾性散乱  
方向感度

# 物質依存

- rate、スペクトル形状が物質依存あり
- CDMS Ge/Si など
- 系統誤差のコントロール



# □ Cross section

$$\frac{dR}{dE_R} = c_1 \frac{R_0}{E_0 r} e^{-c_2 E_R / E_0 r} \quad [\text{count/keV/kg/day}]$$

$$R_0 = \frac{361}{M_\chi M_N} \left( \frac{\sigma_{\chi-N}}{1 \text{pb}} \right) \left( \frac{\rho_D}{0.3 \text{GeVcm}^{-3}} \right) \left( \frac{v_0}{230 \text{km/s}} \right) \quad [\text{count/kg/day}]$$

➤ **Enhancement factor C**

$$\sigma_{\chi-N} = 4G_F^2 \mu_{\chi-N}^2 C_N$$

➤ **SI interaction**

$$C \propto A^2$$

➤ **SD interaction** (contribution of **either** proton **or** neutron is considered)

$$C \propto \lambda^2 J(J+1)$$

Isotope	unpaired	abundance	$\lambda^2 J(J+1)$
<sup>7</sup> Li	p	92.5%	0.411
<sup>19</sup> F	p	100%	0.647
<sup>23</sup> Na	p	100%	0.041
<sup>73</sup> Ge	n	7.8%	0.065
<sup>127</sup> I	p	100%	0.023

$R$  : countrate

$E_R$  : recoil energy

$c_1, c_2$  : const

$E_0$  : kinetic energy of DM

$v_0$  : DM velocity

$M_\chi$  : DM mass

$M_N$  : target mass

$$r = \frac{4M_\chi M_N}{(M_\chi + M_N)^2}$$

$\rho_D$  : DM density

$$\mu_{\chi-N} = \frac{M_\chi M_N}{M_\chi + M_N} : \text{reduced mass}$$

$G_F^2$  : Fermi coupling constant

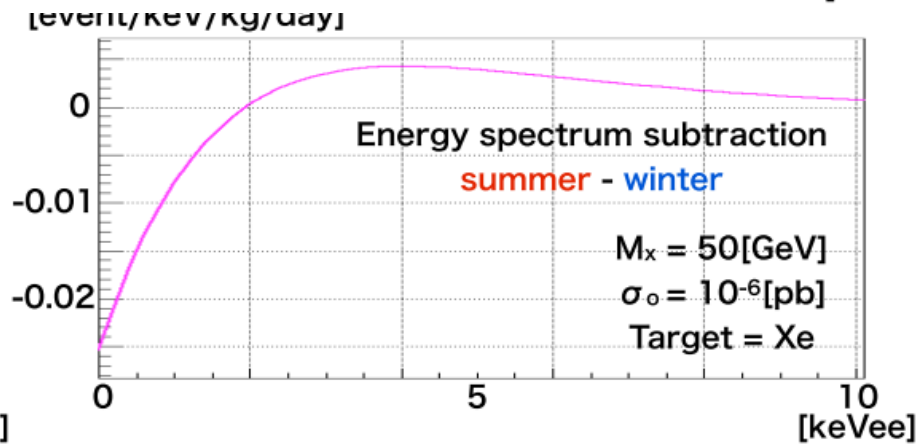
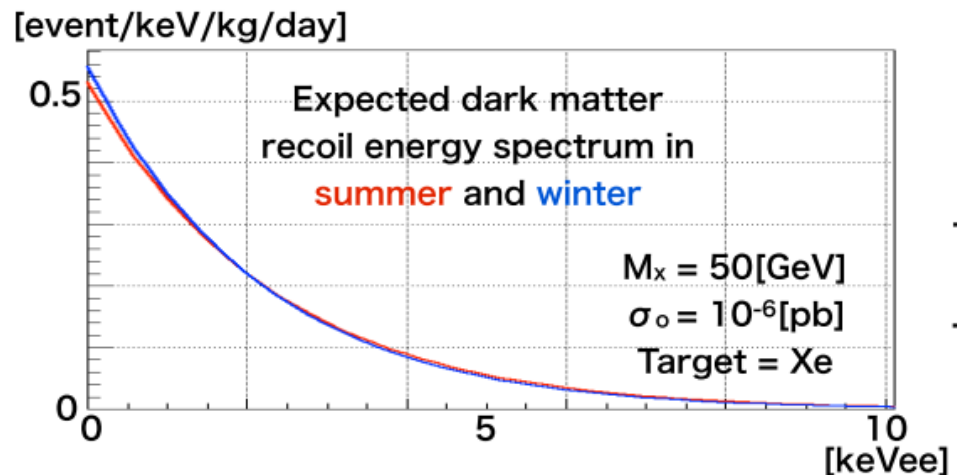
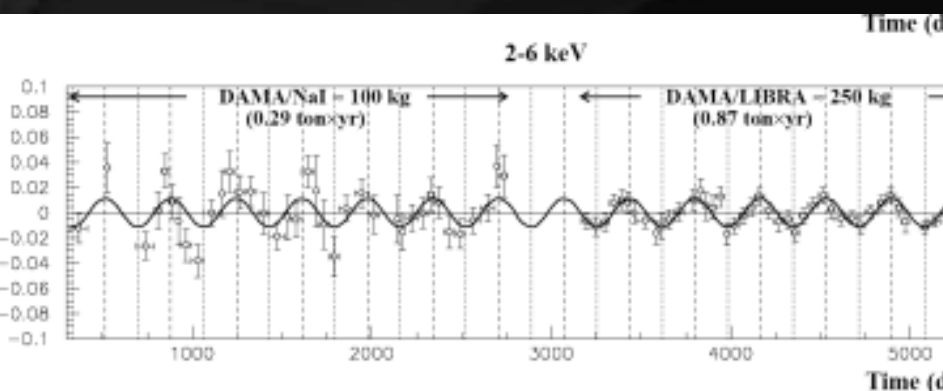
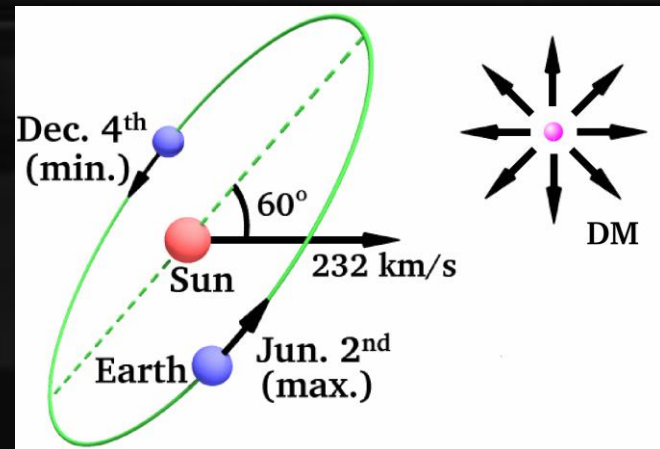
**A** : atomic number

**$\lambda$**  : Lande factor

**J** : total spin of the nuclei

# 季節変動 +

- 「DAMA以上」の為には、
- 位相反転を見る



# ◆ 非弾性散乱

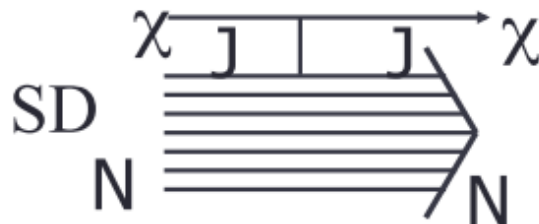
- 原子核の励起 ⇒ ピークが得られる

## WIMPs interactions to be studied

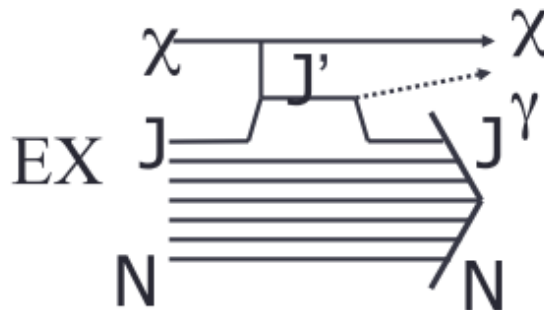
• NaI(Tl) is sensitive to all types!!



$$\sigma \propto A^2$$



$$\sigma \propto C\lambda^2 J(J+1)$$

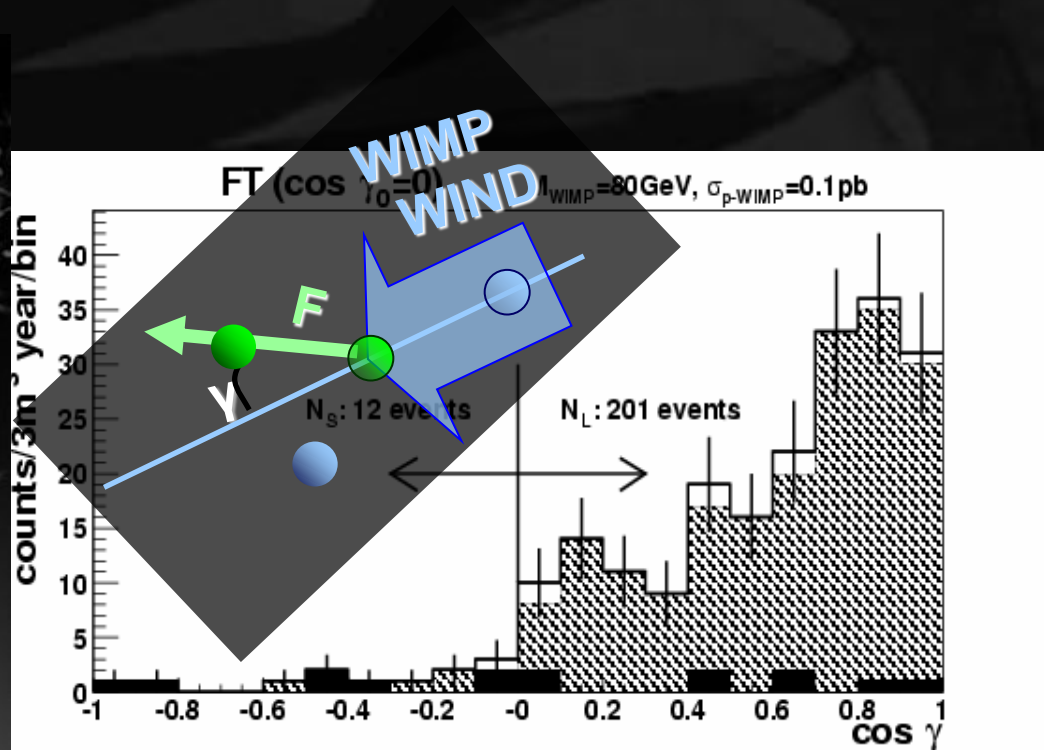
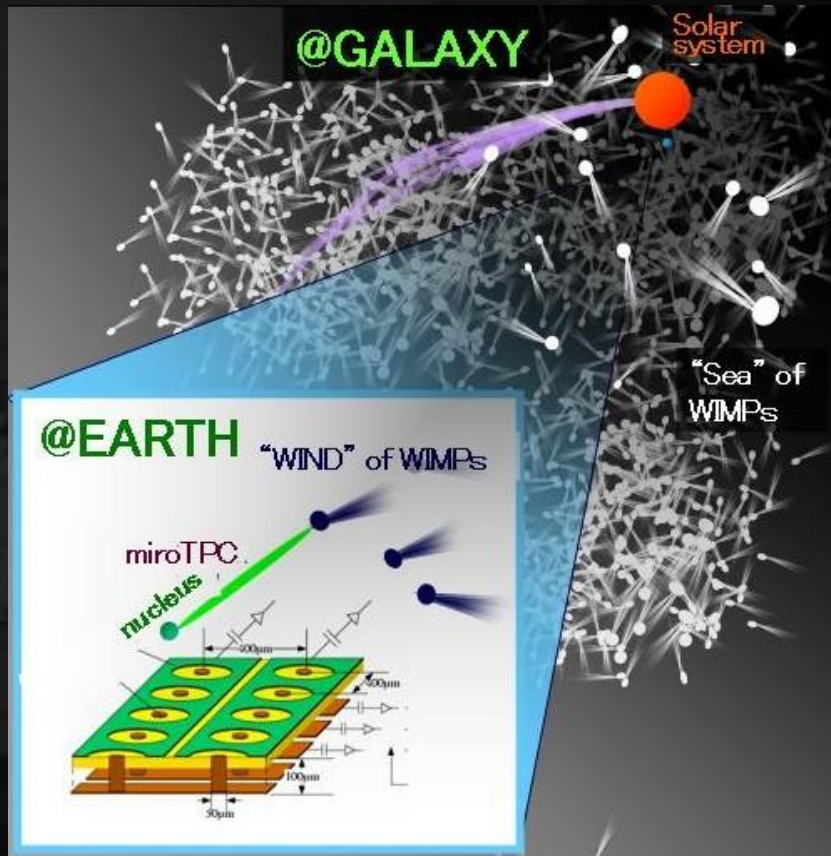


$$\sigma \propto \sqrt{\frac{2J'+1}{2J+1}} \frac{1}{g_M} \langle A | M1 | A^* \rangle$$



# 方向感度

- 決定的な信号
- 季節変動の1/1000程度の統計でOK
- Weekly Interacting... 程度で十分



# 方向感度な世界コミュニティー

● 国際会議「CYGNUS 2013」 BY YOUNG JEDI

盗難  
in フランス



**CYGNUS 2013**  
4th International Workshop on Directional Dark Matter Detection

sponsored by  
K M I  
K M I  
International Maxima Institute  
for the Origin of Particles and Cosmology

10 - 12 June 2013,  
Oarks Canal Park Hotel,  
Toyama, Japan

**Scientific Program**  
Technical progress on direction sensitive detectors  
Data analysis (2D/3D track reconstruction, background rejection, ...)  
Sense recognition : analysis strategies & measurements  
Experimental results from directional prototypes  
Theoretical studies  
Dark matter halo dynamics  
Related activities

**International Organizing committee**  
James Battat (Bryn Mawr College)  
Ioannis Giomataris (CEA Saclay, France)  
Anne Green (U. of Nottingham, UK)  
Igor Inastorza (U. de Zaragoza, Spain)  
Dinesh Loomba (University of New Mexico, USA)  
Frederic Mayet (LPSC Grenoble, France)  
Kentaro Miuchi (Kobe University, Japan)



**Local Organizing committee**  
K. Miuchi (Kobe Univ.)  
T. Naka (Nagoya Univ.)  
A. Takeda (ICRR, Univ. of Tokyo)  
H. Sekiya (ICRR, Univ. of Tokyo)  
K. Nakamura (Kyoto Univ.)  
K. Hosokawa (Kobe Univ.)

LOC 平均 33歳



## ◆ JEDI's weapon



What is this?

It's a lightsaber. Much smarter than blusters.

Star Wars Episode IV

# JEDI's weapon

## ● LOW BG 技術

google

検索 共有 詳細 >>

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(I) ヘルプ(H)

## 極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会

日時:2013年4月23日(火), 24日(水) 場所:富山市「富山商工会議所」10階



2013年4月23・24日 (於富山商工会議所)

懇談会のプログラム, スライドは[こちら](#)です

### 開催主旨

# 「その先」へ

## ANKOK

## XMASS-II

## PICOLON

## NIT

## NEWAGE

実験名 (ホスト)	物質依存	季節変動+	方向感度	非弾性散乱	手法
ANKOK (早大)	○	○			2層 アルゴン
XMASS-II (ICRR)	○	○		○	シンチレータ
PICO-LON (徳島大)	○	○		○	薄型シンチ
NIT(名大)	○		○		エマルジョン
NEWAGE(神戸大)	○		○		ガスTPC

# ◆ ANKOK (早大+)

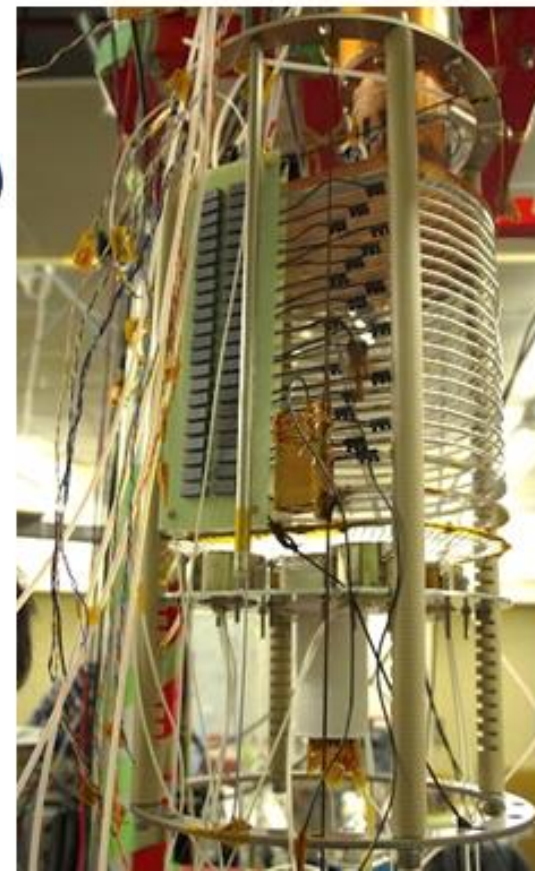
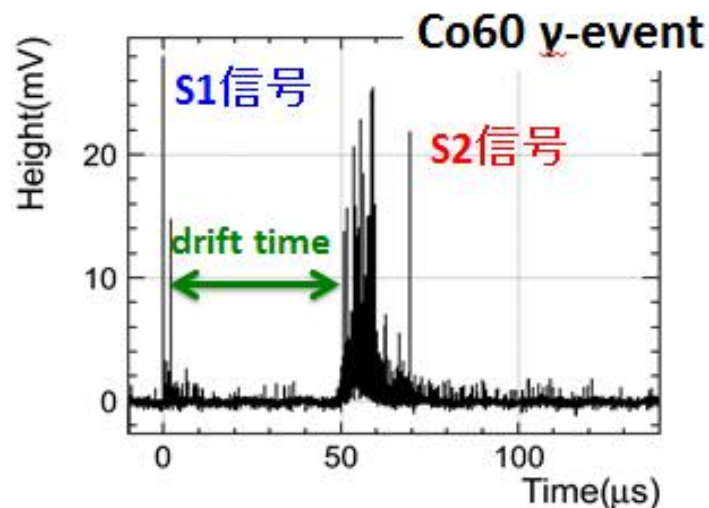
- アルゴン
- 待望の 2層型
- 光量増加 ガンマ線除去
- 地上・10kg

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

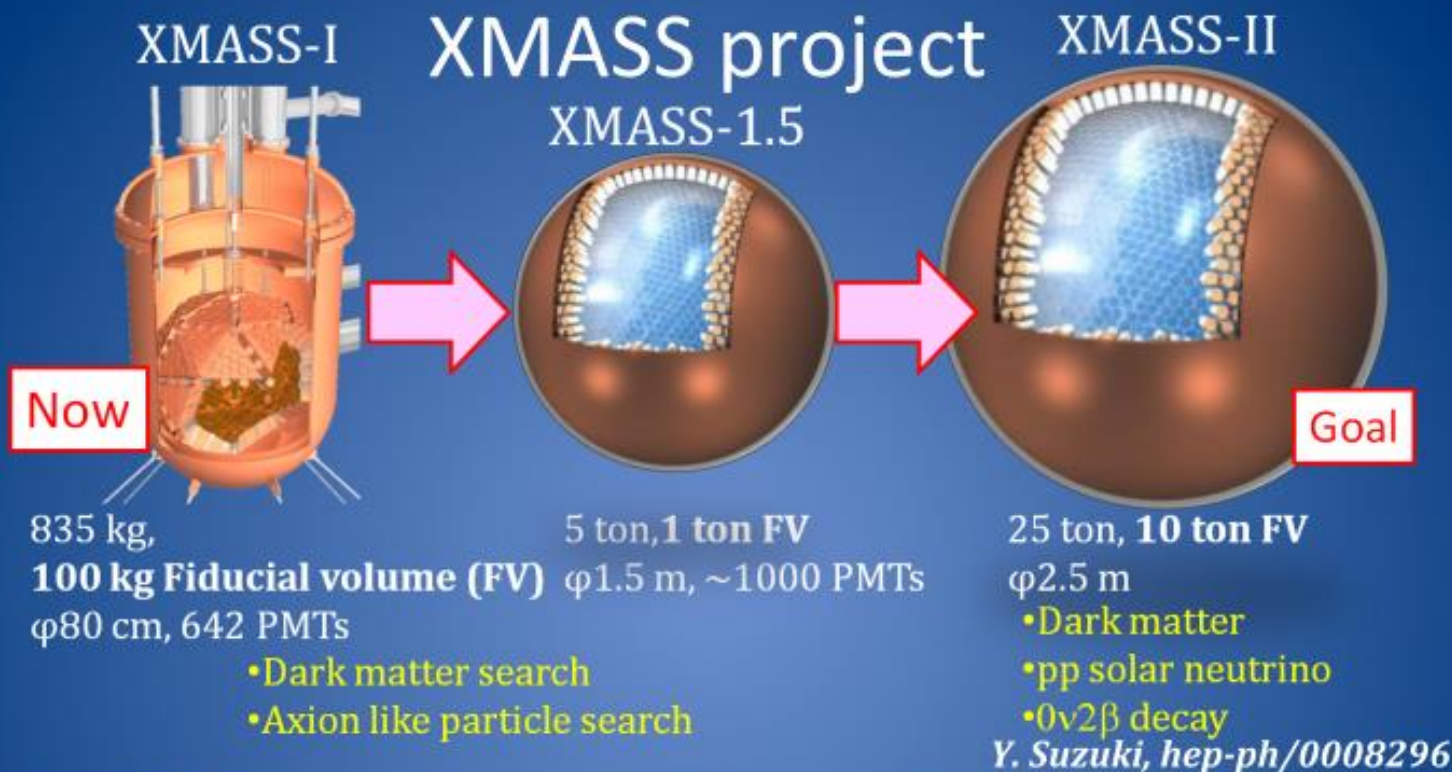
早稲田大学地上8階にて

**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**

# XMASS-II (ICRR+)

## ● キセノンシンチレータ



• In this slide, I'd like to explain our XMASS project at Kamioka observatory in Japan.

• Our final goal, a ten ton scale detector of XMASS-2 will search for particles such as dark matter, pp solar neutrino and  $0\nu 2\beta$  decay.

• Refurbishment of XMASS-I will be completed in this year and the next is planned to start in 2015. They are mainly for dark matter search.

• Commissioning data of XMASS-I was taken from November 2008 to

CYGNUS 2013@Toyama

2013/06/11

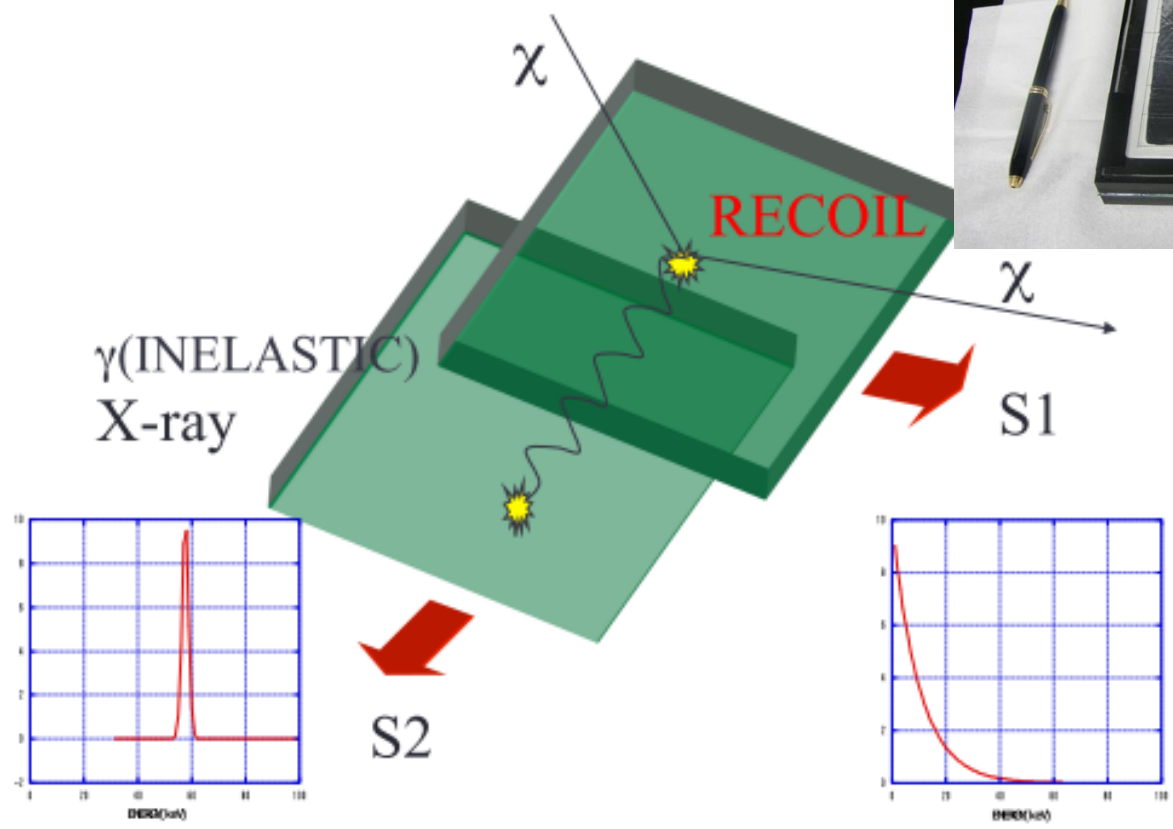
Nagoya univ. Hiroyoshi Uchida



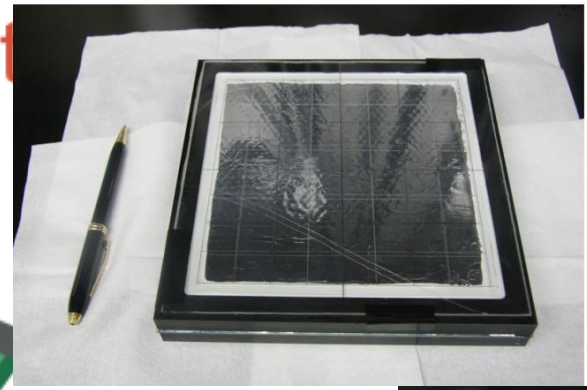
# ◆ PICO-LON (徳島大+)

- NaIシンチレータ
- 地下・ $10 \times 10 \times 0.1 \text{cm}^3$

## Concept of PICO-LON det



PICO-LON single layer module





# 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

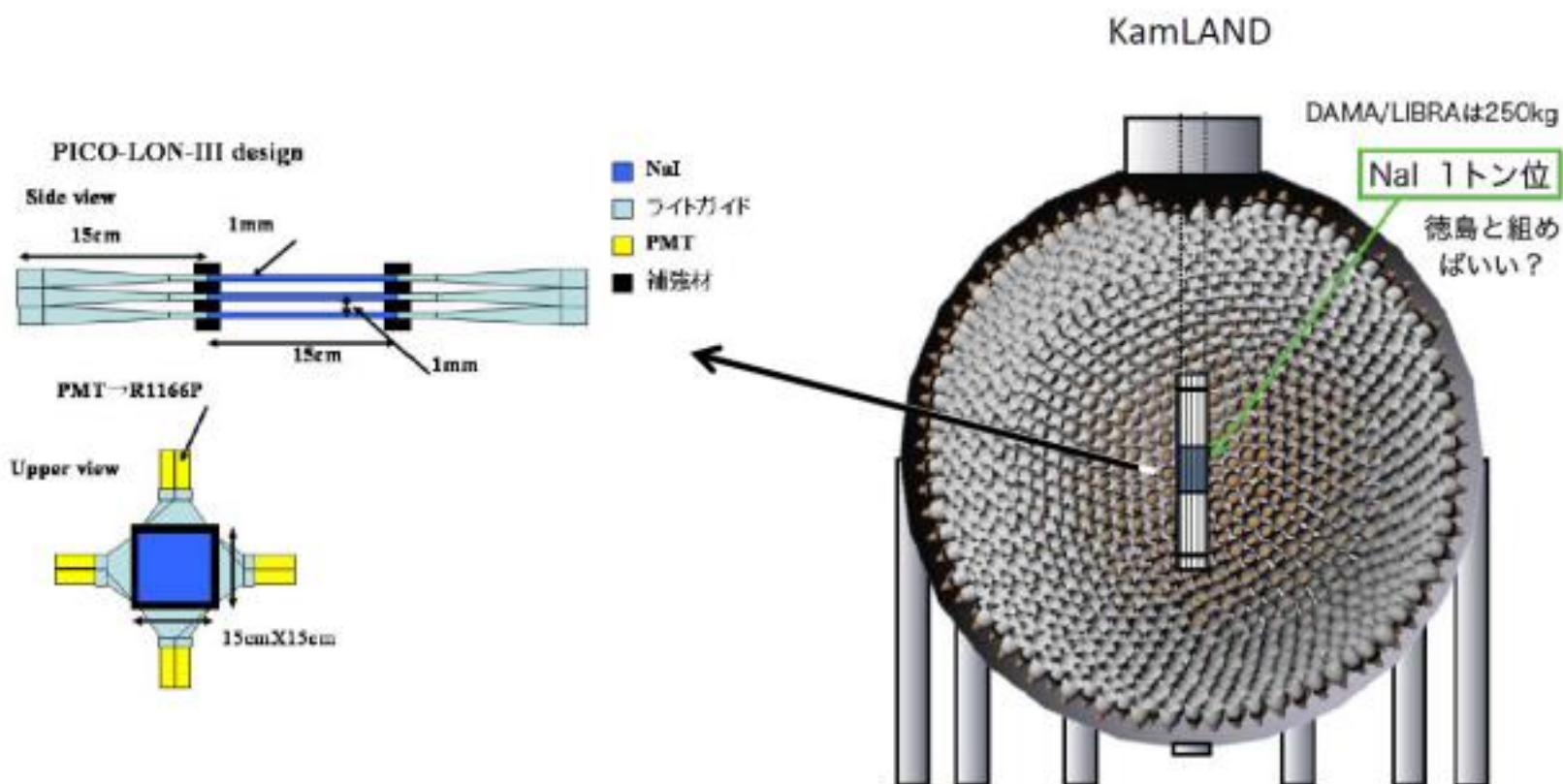
# Present result

	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.



# NEWAGE

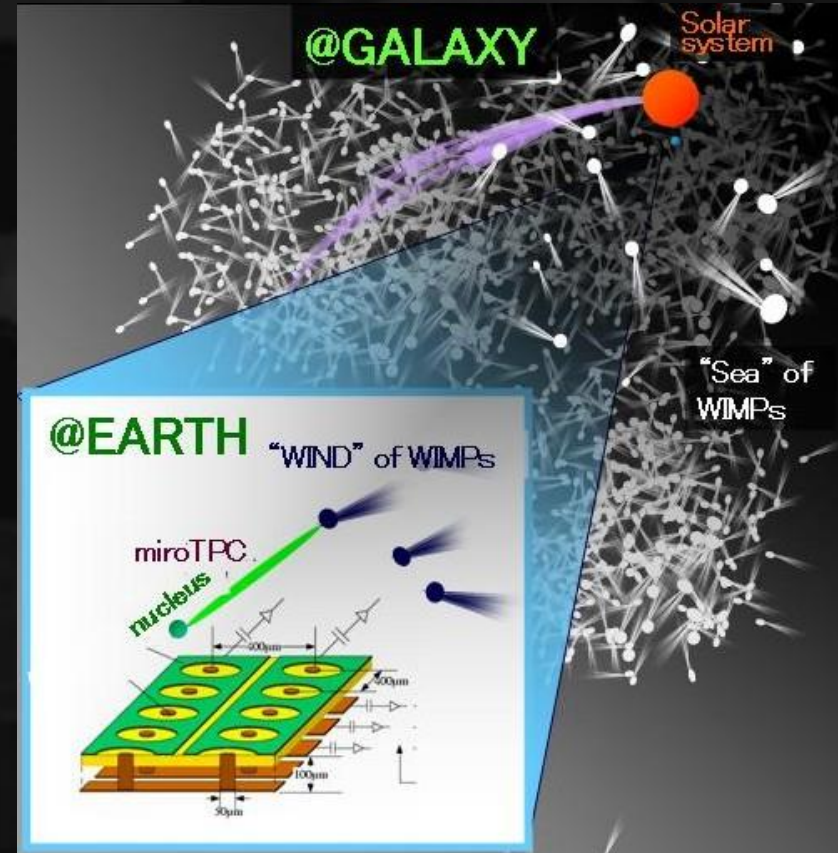
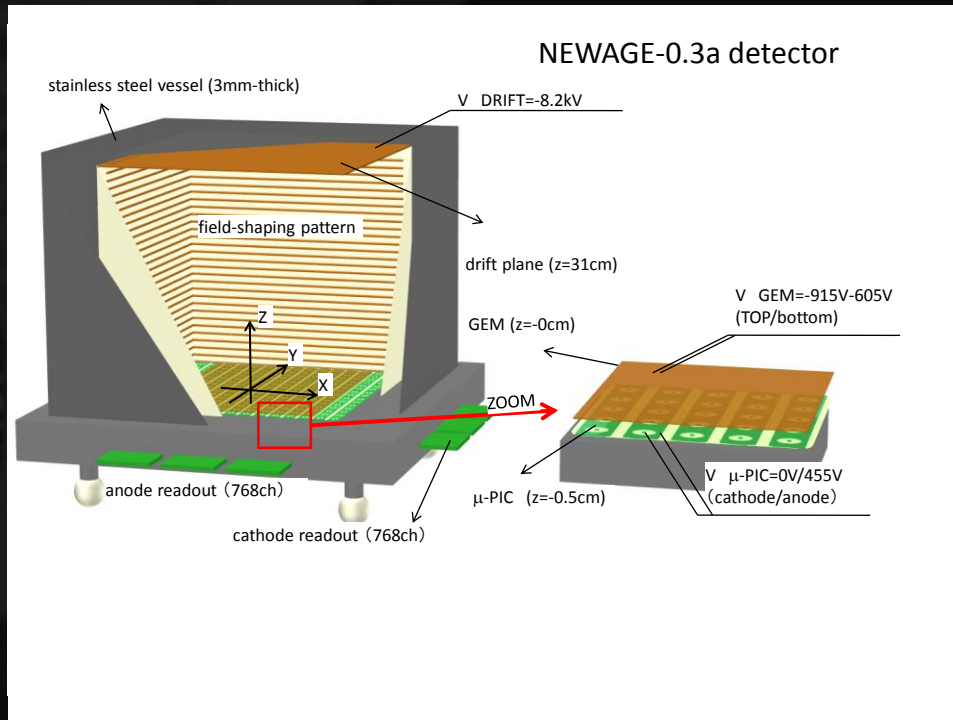
(New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)

- CF<sub>4</sub> ガス+3次元飛跡検出
- 暗黒物質検出⇒運動解明まで
- 10g程度で地下実験

JINST 7 C02023

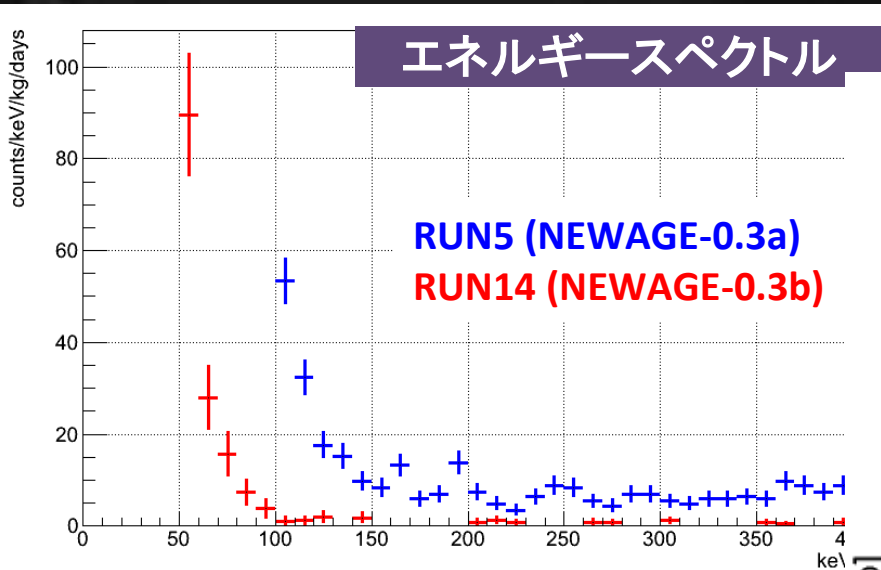
Phys. Lett. B 686(2010)11

HEニュース 31(2013)



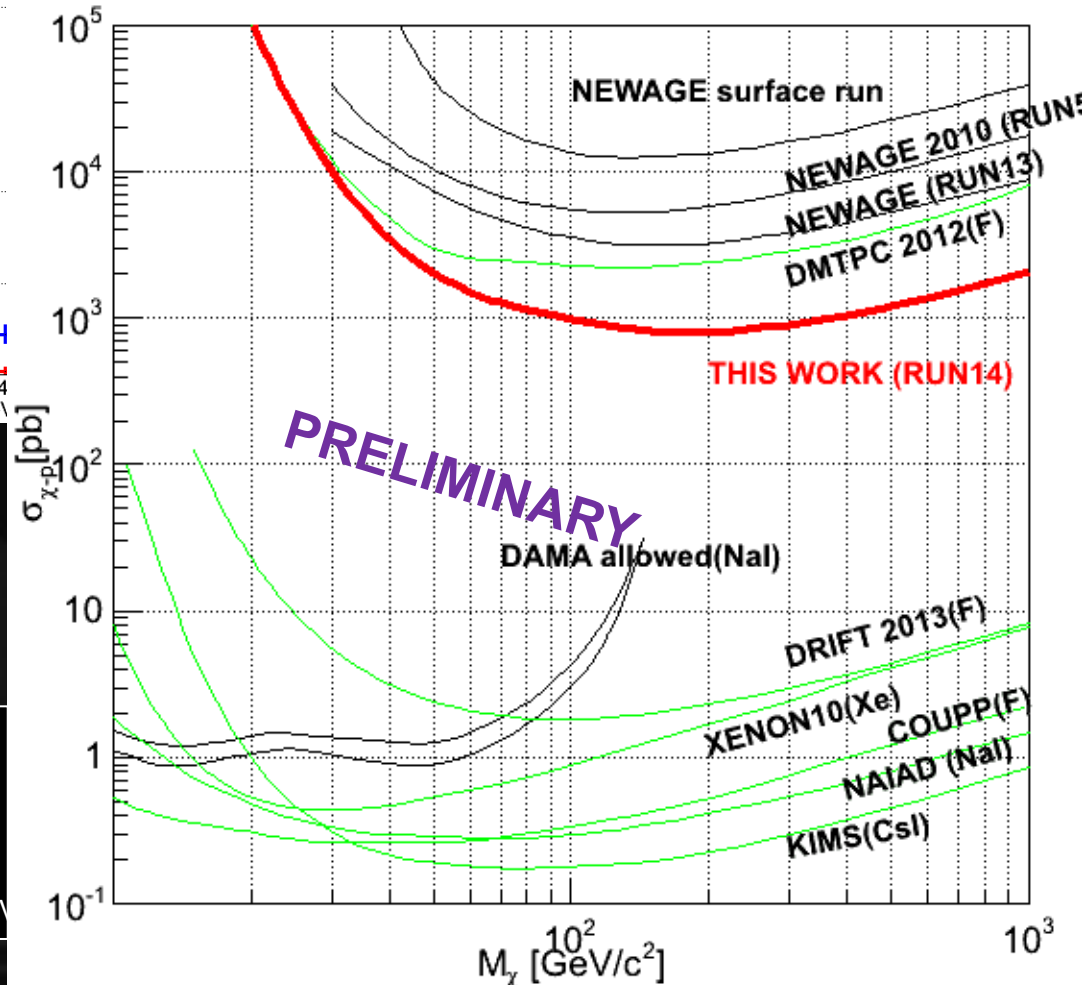
- 方向に感度を持つ最高の制限
- さらなる低BG化 大型化

中村 学会発表



$\rho = 0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^3$   
 $v_0 = 220 \text{ km}/\text{sec}$   
 $v_E = 244 \text{ km}/\text{sec}$   
 $v_{\text{esc}} = 650 \text{ km}/\text{sec}$   
 Energy resolution = 50%  
 Energy threshold = 50keV

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



2013年 9月21日  
日本物理学会



# 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

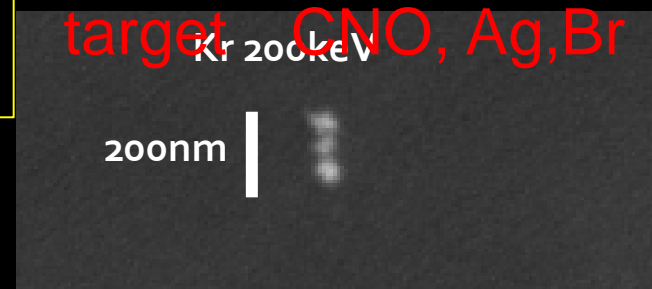
Emulsion detector for dark matter search

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

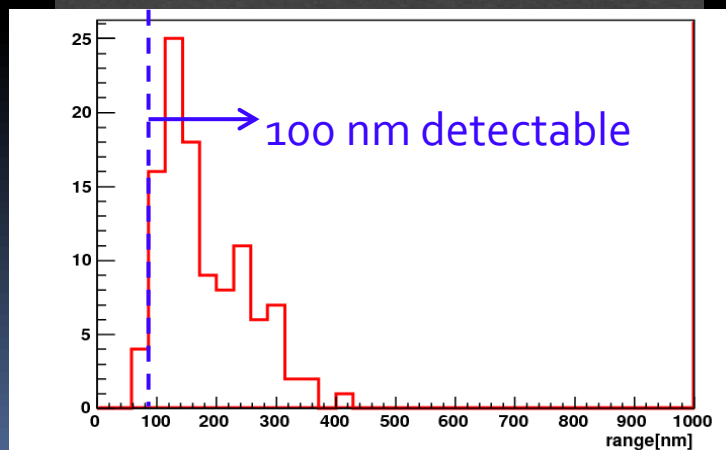


Detector ability

	NIT (40 nm AgBr)	U-NIT (20 nm AgBr)
AgBr density	12 AgBr/μm	29 AgBr/μm
Detectable range	> 200 nm@C	> 100 nm@C
Tracking E threshold	> 80 keV@C	> 35-40 keV@C

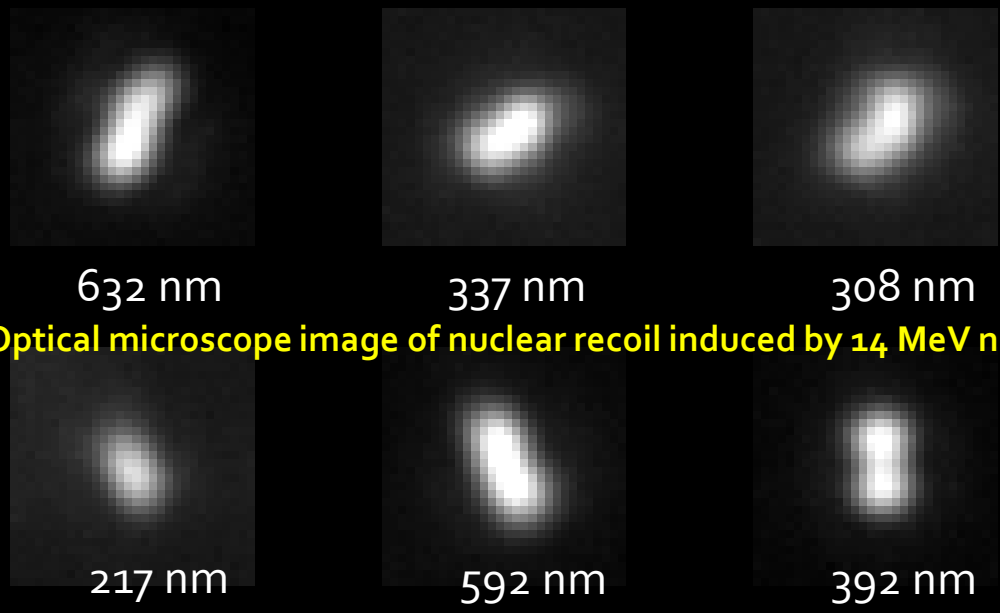


Scanning Electron Microscope

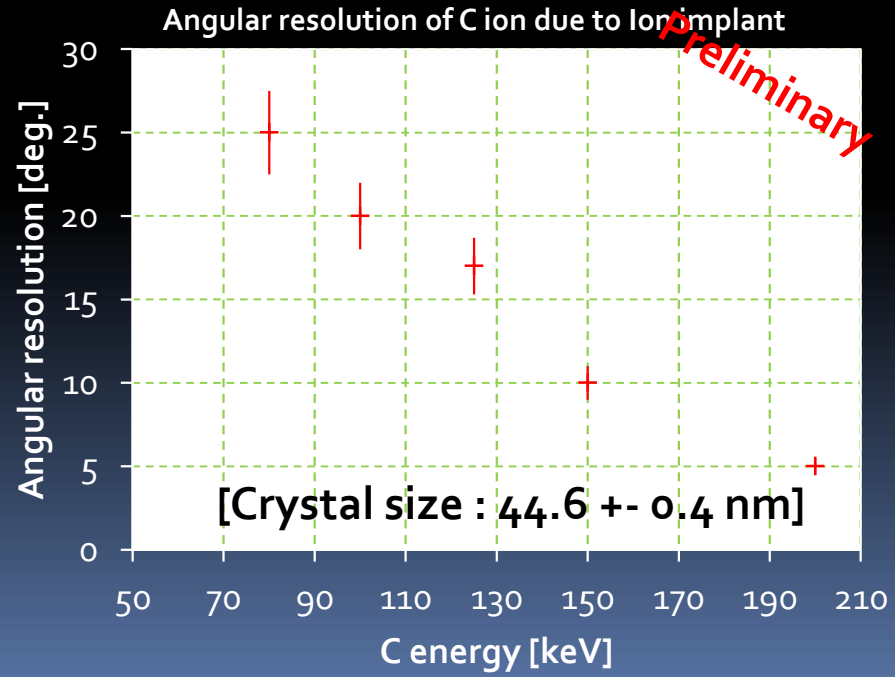
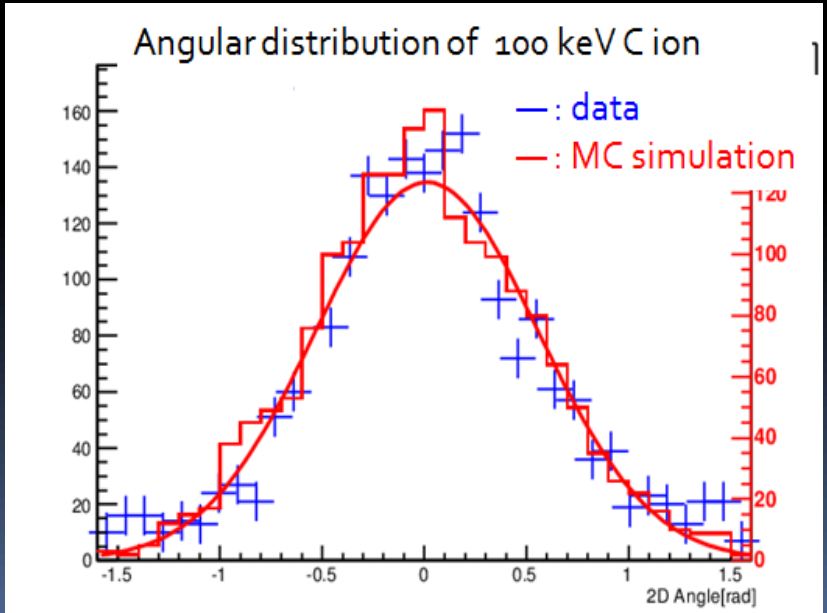
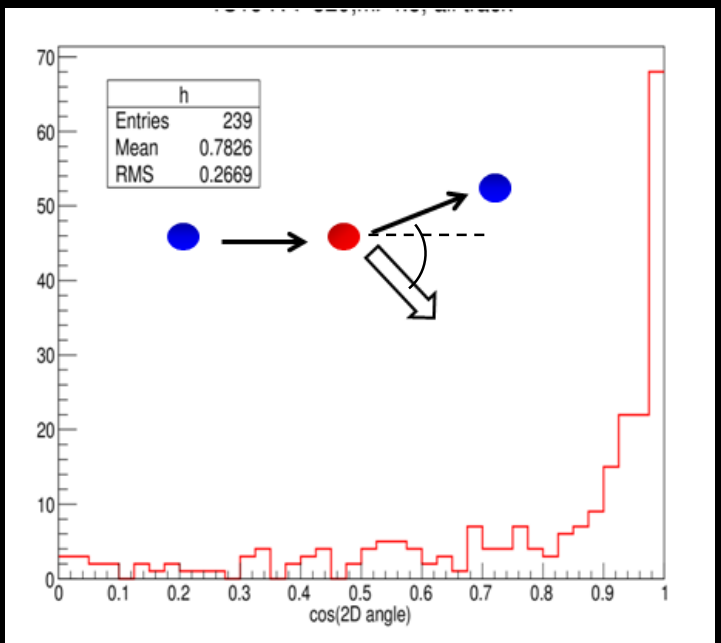


Range distribution [nm]

# Neutron and low velocity C ion demonstration



Optical microscope image of nuclear recoil induced by 14 MeV neutron



# 現状

- 地下実験候補地：グランサツソ研究所  
→ 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。



# 3LDK(仮称)

## ◆ Low-Z Low-threshold detector for Low-mass Dark matter search @ Kamioka

### ◆ 低閾値 low Z の検出器(すべて半導体)

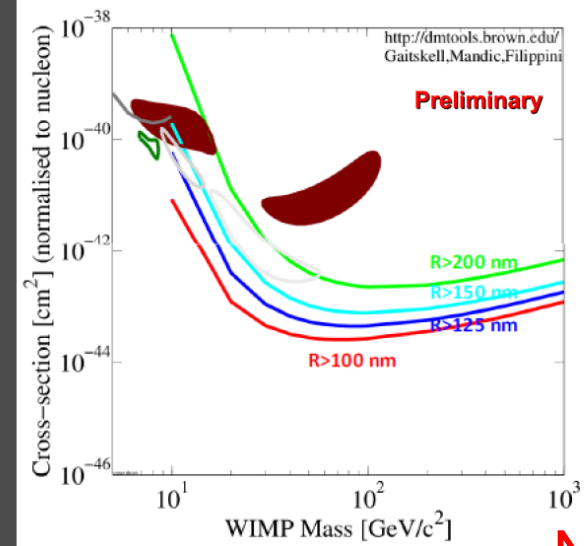
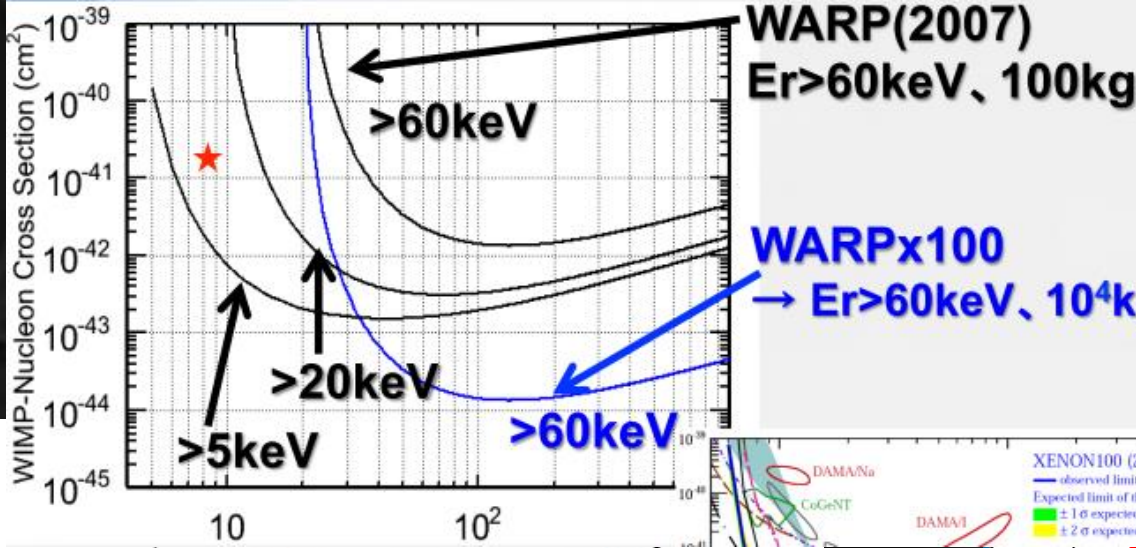
もの	ブローカー、プロ	ターゲット	電離エネルギー [eV]	枯れ度
CCD	鶴(京大)	Si	3.65	◎
SOIPIX	鶴(京大)	Si	3.65	△
<u>SIC</u>	田中(KEK)、大島(原研高崎)	C, Si	7.8	△
ダイヤモンド	田中(KEK)、金子(北大)	C	13	○
有機半導体	田中(KEK)、熊木(山形大)	C	~8	×
<u>Ge(参考)</u>		<u>Ge</u>	2.96	◎

身内 @ 低バックグラウンド会議

5~10年でのreach

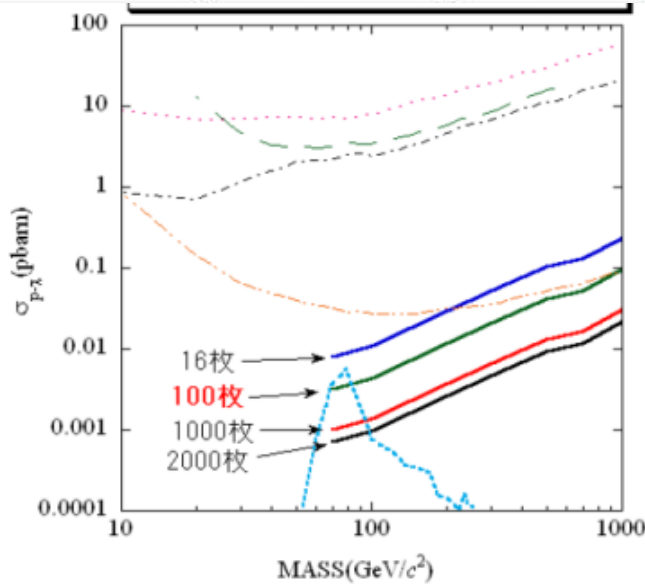
ANKOK

Physics Goal

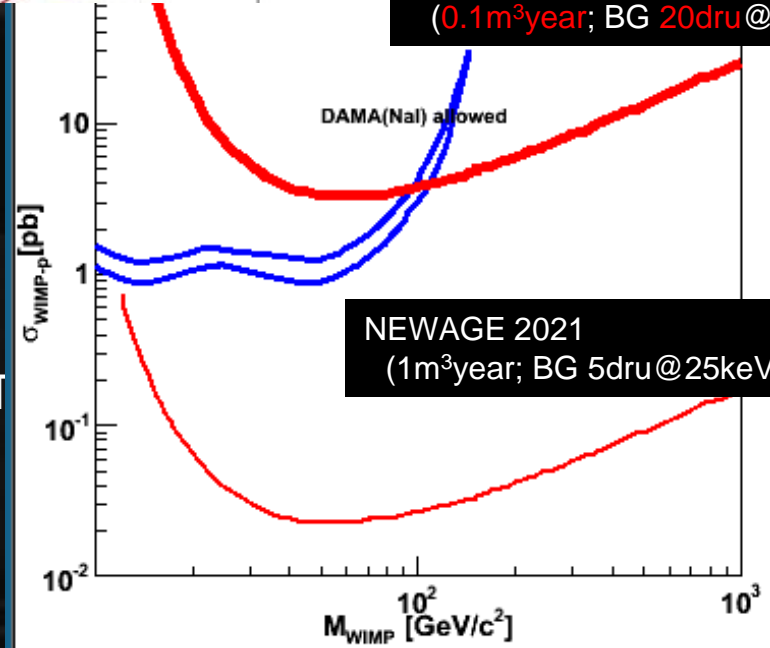


NIT

NEWAGE 2016  
(0.1m³year; BG 20dru@35keVnr)



PICO-LON



# 「その先」へ

実験名 (ホスト)	ターゲット	手法	やったこと
ANKOK (早大)	Ar	2層 アルゴン	光量、 $\gamma$ 除去
XMASS-II (ICRR)	Xe	シンチレータ	大質量 大光量
PICO-LON (徳島大)	Na, I	薄型シンチ	低BG結晶
NIT(名大)	Ag,C,N,H,O	エマルジョン	方向感度
NEWAGE(神戸大)	F, Ar, Xe	ガスTPC	方向感度結果、低BG化

# メッセージ

「その先」はすぐそこ



JEDIs, equipped with their WEAPONS,  
are ready to attack the dark side.

JEDI : **J**apanese **E**xperimental **D**ark matter **I**nvestigators



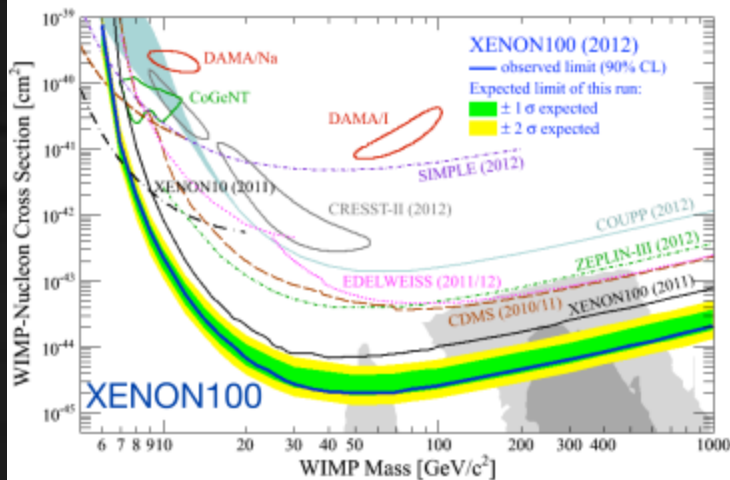


2013年 9月21日  
日本物理学会

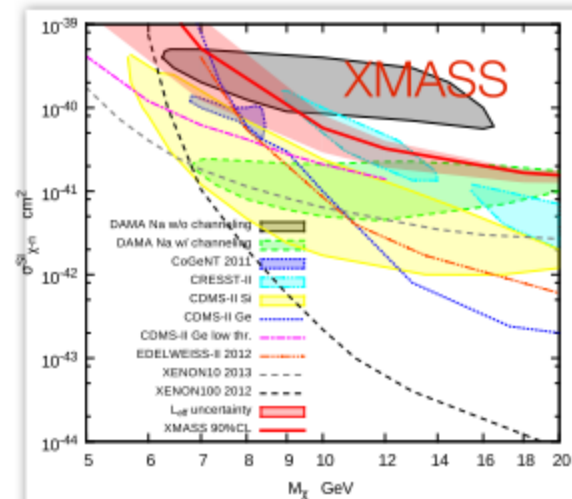
# Noble liquid recent results: spin-independent

- No evidence for WIMPs
- Upper limit on WIMP-nucleon cross section is  $2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  at  $M_W = 55 \text{ GeV}$

XENON100: Phys. Rev. Lett. 109 (2012)



XMASS: Phys. Lett. B 719 (2013)



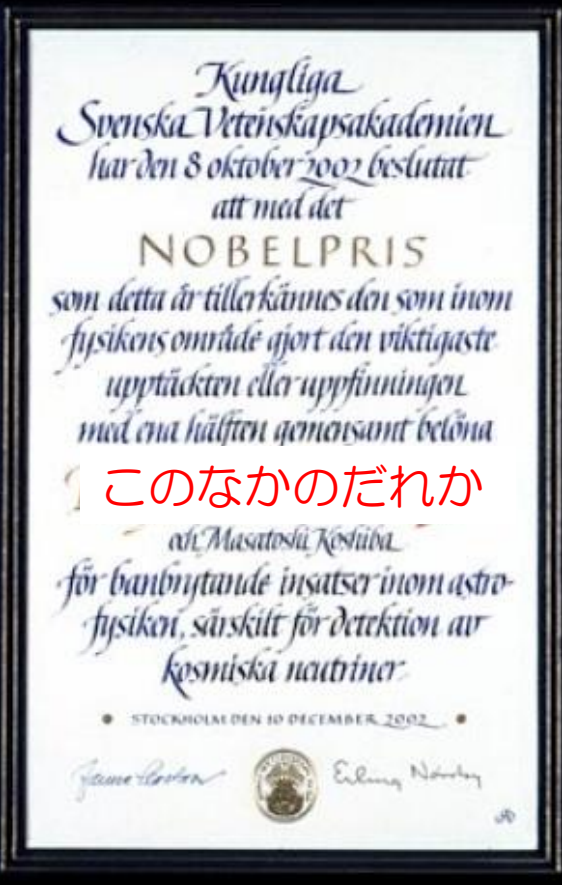
# ◆ CYGNUS



# ◆ 「地下連合」で目指すもの

- 技術交流
- お金
- コミュニティー形成

} 手段



このなかのどれか



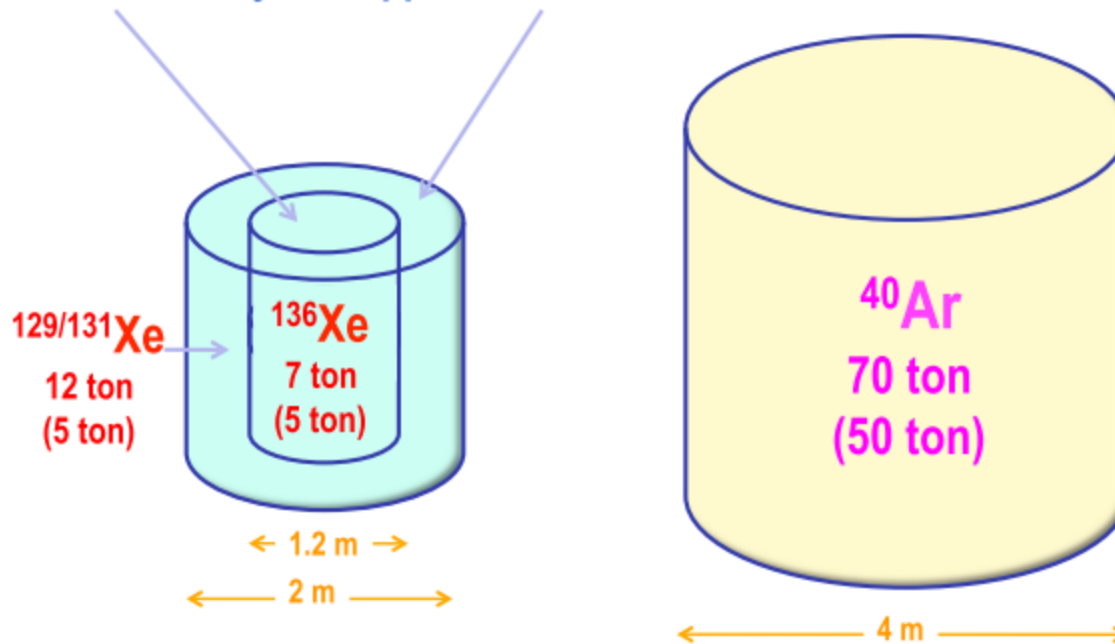
# XAX (Xenon-Argon-Xenon)

arXiv:0808.3968

*WIMP (Spin even)  
Double Beta Decay*

*WIMP (Spin odd)  
pp Solar Neutrino*

*WIMP (Spin even)*



7/25/12

Katsushi Arisaka, UCLA

34

## □ Direct detection

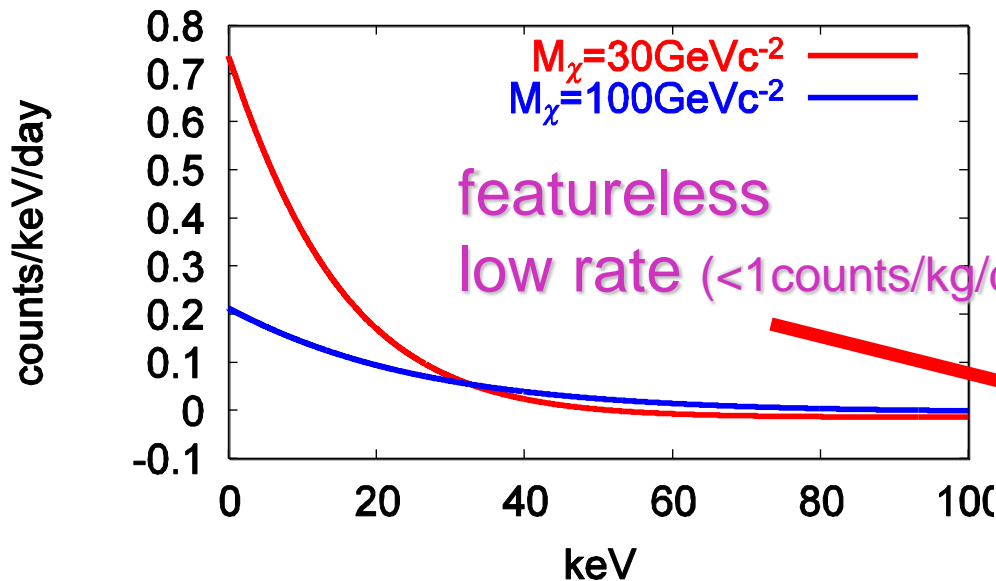
### ➤ Expected spectra

$$\frac{dR}{dE_R} = c_1 \frac{R_0}{E_0 r} e^{-c_2 E_R / E_0 r} \quad [\text{count/keV/kg/day}]$$

$$R_0 = \frac{361}{M_\chi M_N} \left( \frac{\sigma_{\chi-N}}{1\text{pb}} \right) \left( \frac{\rho_D}{0.3\text{GeVcm}^{-3}} \right) \left( \frac{v_0}{230\text{km/s}} \right) \quad [\text{count/kg/day}]$$

(Maxwellian distribution is assumed  
for DM velocity)

LiF 1kg  $\sigma_{\chi-p}=0.1\text{pb}$



featureless  
low rate (<1counts/kg/day)

low threshold  
low BG

(deep underground etc...)

$R$  : countrate

$E_R$  : recoil energy

$c_1, c_2$  : const

$E_0$  : kinetic energy of DM

$v_0$  : DM velocity

$M_\chi$  : DM mass

$M_N$  : target mass

$$r = \frac{4M_\chi M_N}{(M_\chi + M_N)^2}$$

$\rho_D$  : DM density

# SD cross section (more precisely)

➤ SD enhancement factor  $C_N^{SD} \propto \left( a_p \langle S_{p(N)} \rangle + a_n \langle S_{n(N)} \rangle \right)^2 \frac{J+1}{J}$

(Phys. Lett. B 488(2000)17)

(contributions of **both** proton **and** neutron are considered)

$a_p, a_n$ :  $\chi$ -nucleon couplings ← **?? SUSY model**

$\langle S_{p(N)} \rangle$ : proton spin in the nucleus ← **!! shell model**

**Destructive interference for**

$$a_p \langle S_{p(N)} \rangle / a_n \langle S_{n(N)} \rangle < 0 \quad \text{and} \quad \left| a_p \langle S_{p(N)} \rangle \right| \sim \left| a_n \langle S_{n(N)} \rangle \right|$$

Isotope	unpaired	$\langle S_{p(N)} \rangle$	$\langle S_{n(N)} \rangle$
${}^7\text{Li}$	p	0.497	0.004
<b><math>{}^{19}\text{F}</math></b>	<b>p</b>	<b>0.441</b>	<b>-0.109</b>
${}^{23}\text{Na}$	p	0.248	0.020
${}^{73}\text{Ge}$	n	0.009	0.372
${}^{127}\text{I}$	p	0.309	0.075

${}^{19}\text{F}$  has **opposite sign** of

$$\langle S_{p(N)} \rangle / \langle S_{n(N)} \rangle$$

compared to  ${}^{23}\text{Na}, {}^{73}\text{Ge}, {}^{127}\text{I}$

**→ COMPLEMENTARY**

**for  $a_p, a_n$  determination**

- (1) 実験の現状にとどまらず、今後の展開、どのように「本実験」として実現してゆくか。：「本実験」＝「ノーベル賞をとれるかもしれない実験」として以下の議論
- (2) 「本実験」実現に向けての問題点は何か。：大型化、低BG化
- (3) 実現するのに必要なmanpower、経費：発表中で
- (4) 年次計画：発表中で
- (5) 国際競争力、他の実験に比べての実験の長所：発表中で

-----

NEWAGEに照らし合わせて上記を含むようなトークでお願い致します。

特に外部の人はとりあえずの目標はDAMA領域というのは知っていると思いますが、発見に向けたその後の展開はあまり話を聞く機会はなかったように思います。(タイムスケールを含め)



# NEWAGE

(New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)

目的:

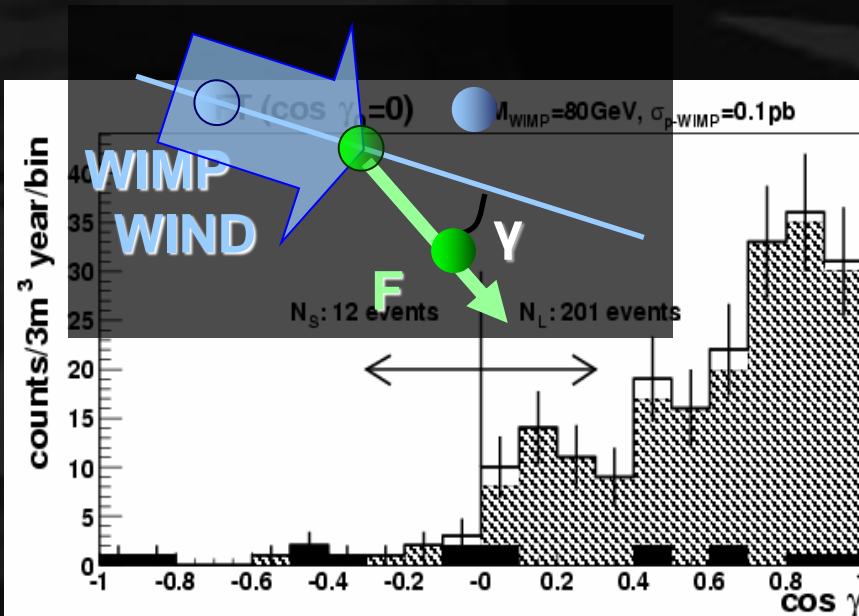
- 方向に感度を持つ暗黒物質の発見: 5~10年  
= 強力な信号
- 銀河内での暗黒物質の運動解明: 10~20年

JINST 7 C02023

Phys. Lett. B 686(2010)11

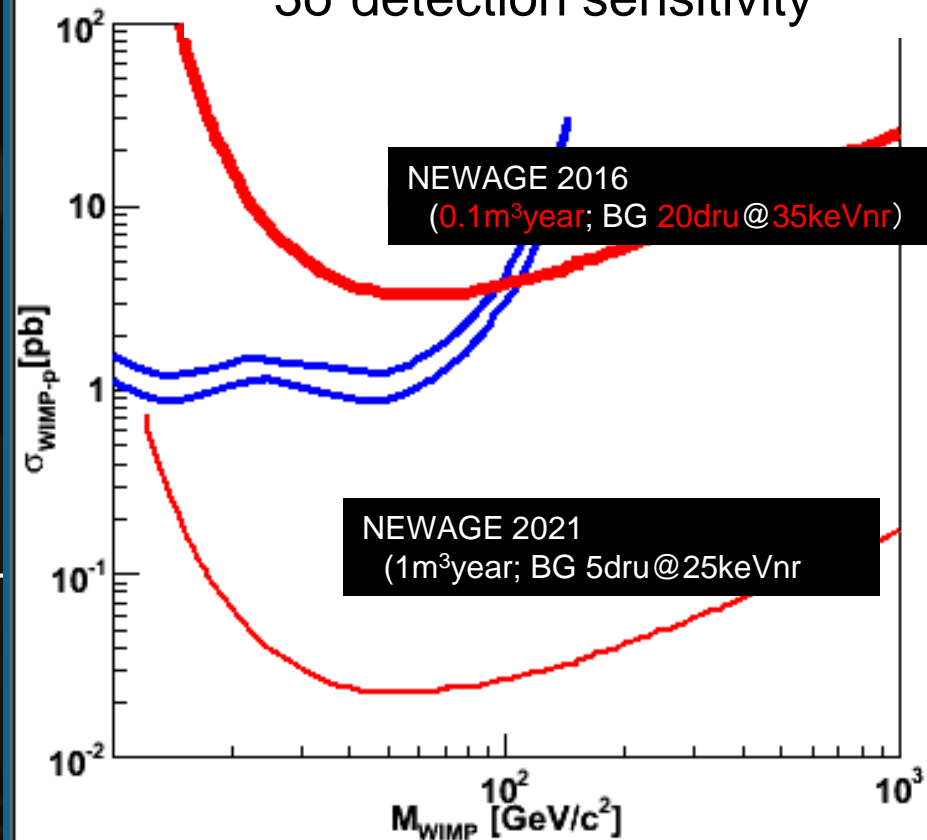
HEニューズ 31(2013)

原子核反跳の角度分布



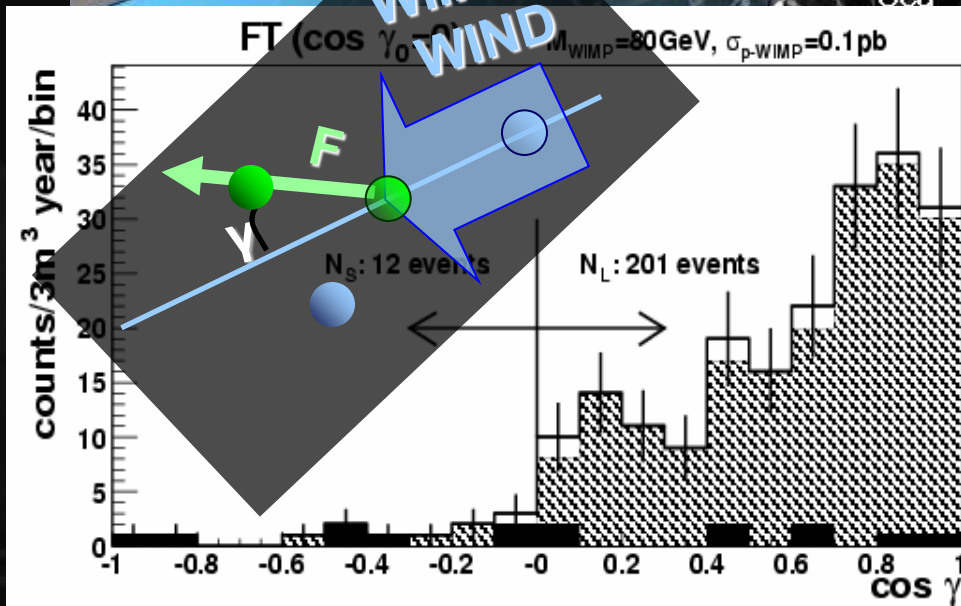
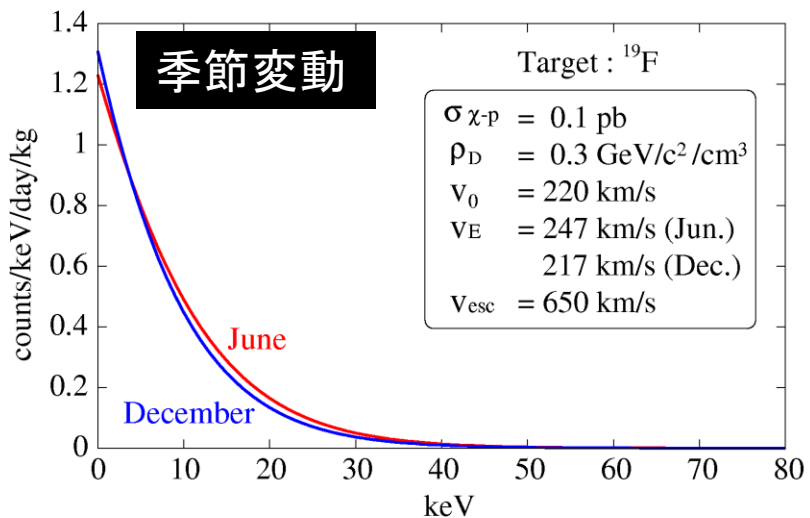
前方散乱のピーク

3σ detection sensitivity



# 飛跡検出のメリット

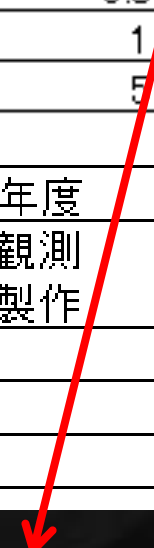
- 季節変動(5%以下)と比較して確実な証拠となる  
(前後の非対称度は最大で10倍。)
- 検出の後には暗黒物質の性質解明



# ◆ 「身の丈」ベースの将来計画

- BG低減を確認しながらのスケールアップ。  
打ち上げ花火は上げられないが、、、

		2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
名: NEWAGE	実験フェーズ	0.3bコミ 0.3b観測	0.3b観測 0.6aR&D	0.3b観測 0.6a製作	0.6aコミ 0.6a観測	0.6a観測 1.0aR&D	0.6a観測 1.0a製作	1.0aコミ 1.0a観測	1.0a観測 1.0b R&D	1.0a観測 1.0b製作	1.0bコミ 1.0a,b観測
	必要経費(億円)		0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.2	1	1	0.1
	既存人数		3	2	1	1	1	1	1	1	1
	不足人数		2	3	5	7	7	7	9	9	9



ここ以降は常に「本実験」

サイズの日安：

0.3?  $0.3 \times 0.3 \times 0.4 = 0.04m^3$

0.6  $0.6 \times 0.6 \times 0.4 = 0.1m^3$

1.0  $1.0 \times 1.0 \times 0.4 = 0.4m^3$

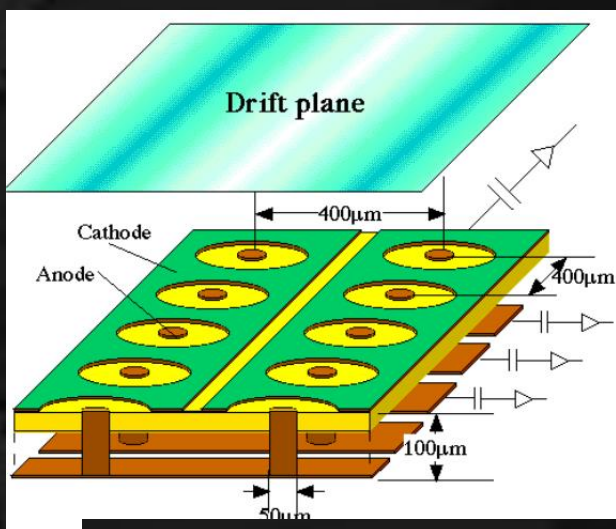
# 検出器：ガス TPC

- 三次元飛跡検出器
- MPGD<sup>‡</sup> による読み出し
- CF<sub>4</sub> gas (~0.05 bar)

‡ MPGD: Micro Pattern Gas Detector

## ガス検出器のメリット

- 方向に感度を持つ
- ガンマ除去 (<10<sup>-5</sup>)



## 体制

- 神戸大, 京大, ICRR
- ~10 in paper, 実働 3

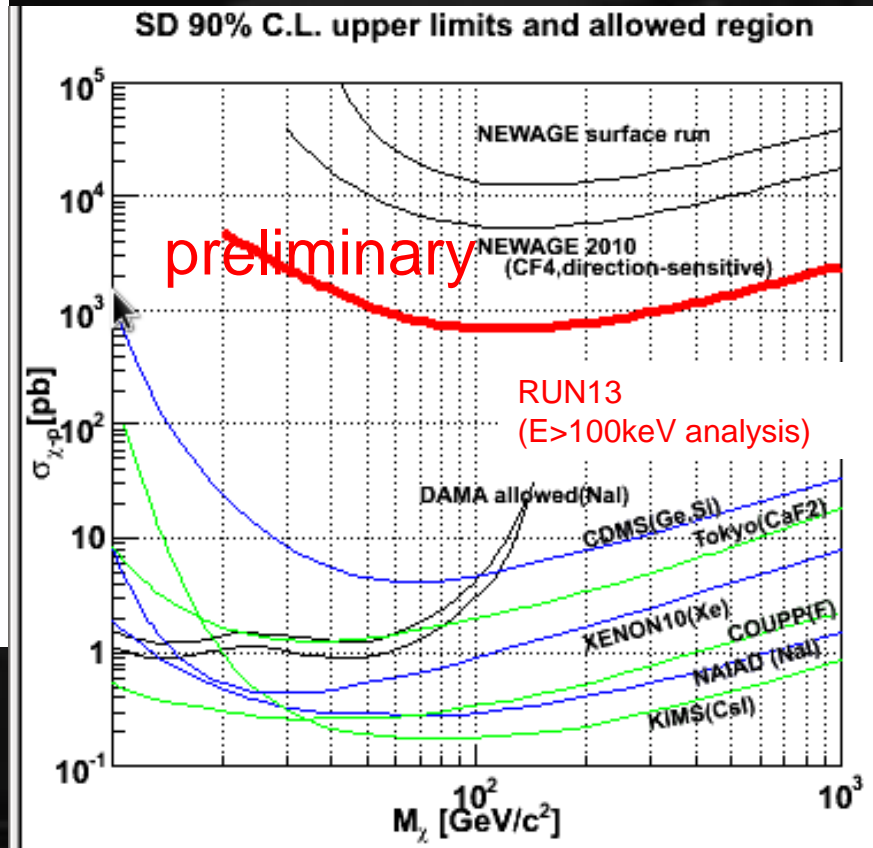
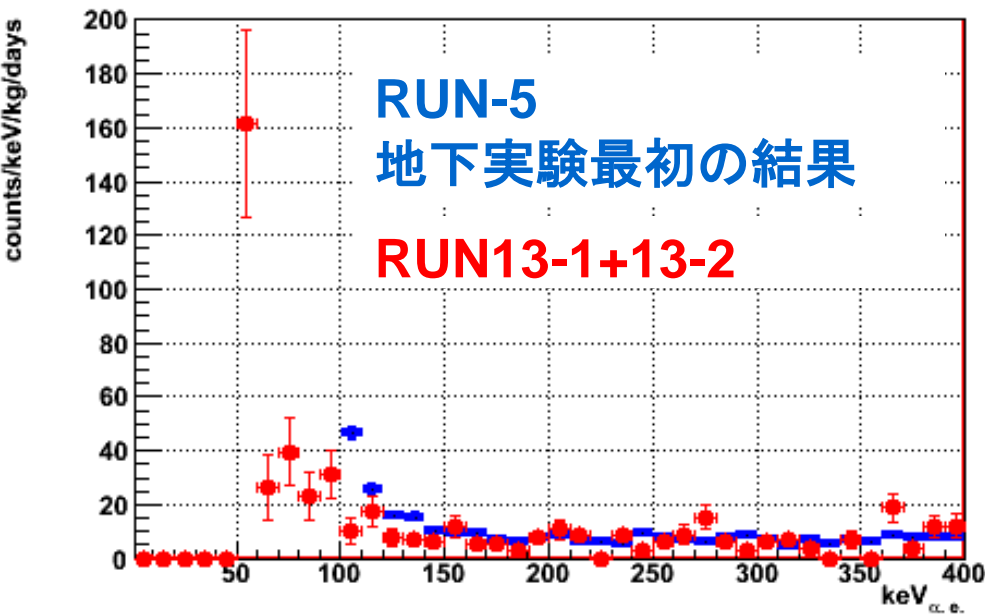
## 現状と将来

- NEWAGE-0.3a 30×30×30cm<sup>3</sup> : 休止中
- NEWAGE-0.3b 30×30×40cm<sup>3</sup> : 2013年3月～
- NEWAGE-0.6a デザイン中



# NEWAGE-0.3a 感度 (解析中)

- 2012年前半分
- exposure 0.140kg · days
- スペクトル閾値 100keV⇒50keV
- rate: ~1/5 at 100keV



# NEWAGE-0.3b

μ-PIC

- ・サイズ：  
30x30cm
- ・ピッチ：400μm

GEM (8分割)

- ・サイズ：**31x31cm**
- ・厚み：100μm
- ・穴径：70μm
- ・ピッチ：140μm
- ・材質：LCP

30cm

31cm

ドリフトケージ

- ・長さ：**41cm**
- ・材質：PEEK

41cm



NEWAGE-0.3bの結果を0.6aのデザインに反映。

低BGに関して。

容積、読み出しは4倍。⇒ 0.3a方式を踏襲

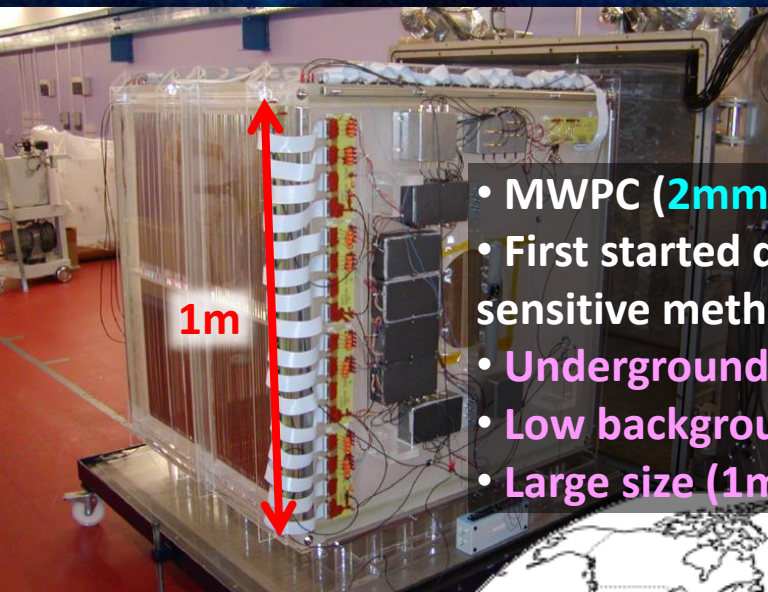
		2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
名: NEWAGE	実験フェーズ	0.3bコミ 0.3b観測	0.3b観測 0.6aR&D	0.3b観測 0.6a製作	0.6aコミ 0.6a観測	0.6a製作
	必要経費(億円)	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1
	既存人数	3	2	1	1	1
	不足人数	2	3	5	5	5

2016年度に「本実験」開始を目指す。

スケールアップのために回路のR&Dを行う。



# 世界の方向感度DM実験

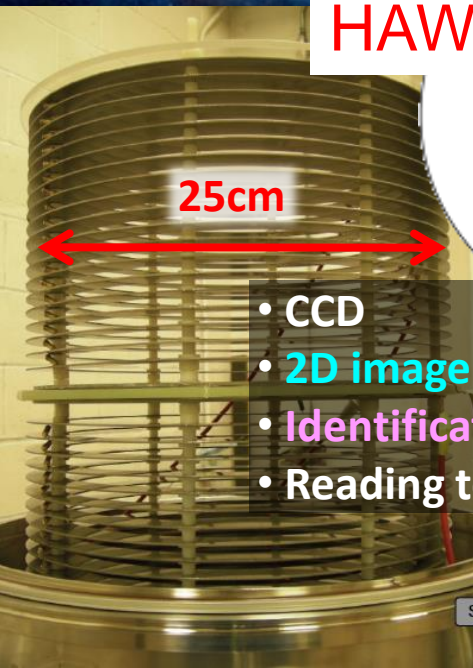
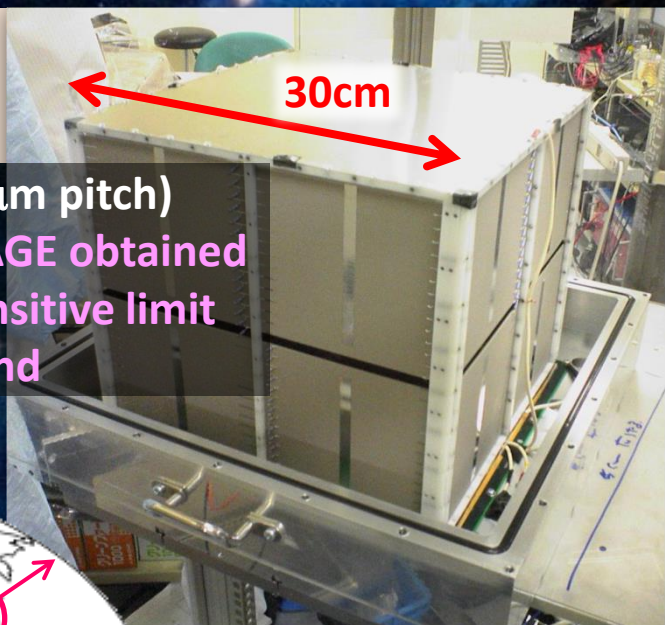


**DRIFT**  
[UK]

- MWPC (2mm pitch)
- First started direction-sensitive method
- Underground
- Low background
- Large size (1m<sup>3</sup>)

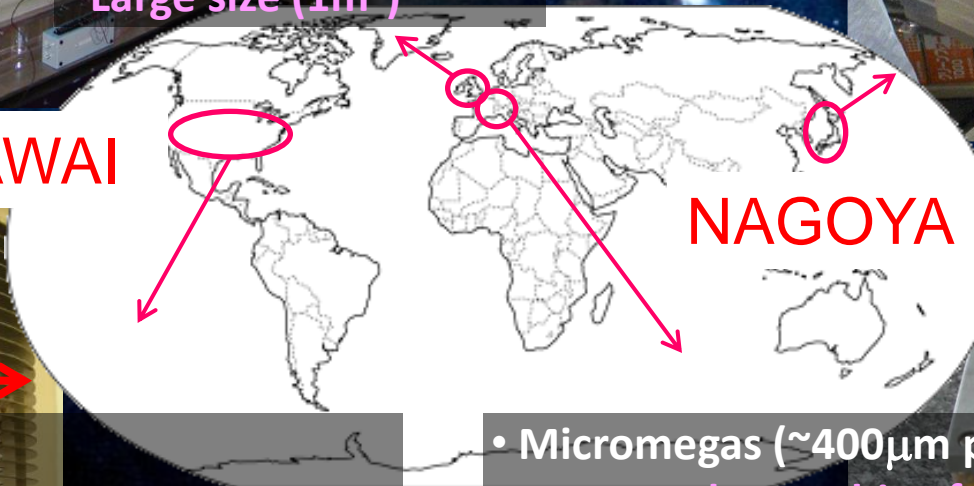
**NEWAGE**  
[Japan]

- $\mu$ -PIC (400 $\mu$ m pitch)
- Only NEWAGE obtained direction-sensitive limit
- Underground



**DMTPC**  
[USA]

- CCD
- 2D image
- Identification of head-tail
- Reading to underground

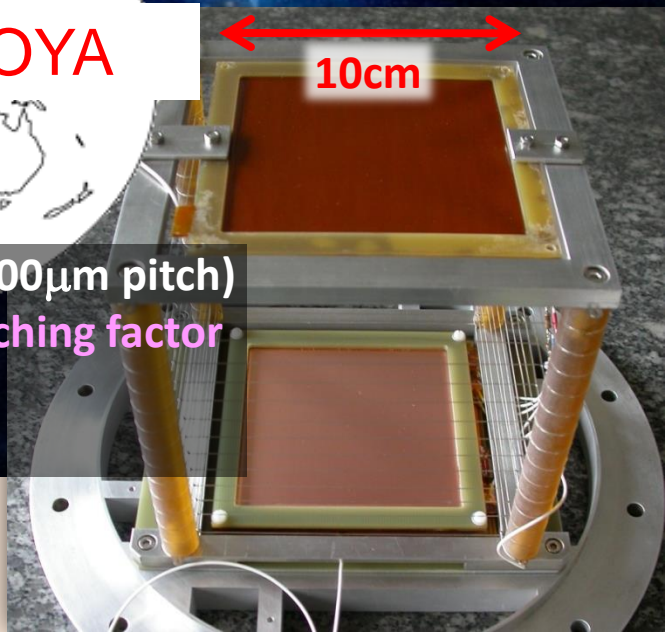


**HAWAII**

**NAGOYA**

- Micromegas (~400 $\mu$ m pitch)
- Measured quenching factor in detail
- R&D at surface

**MIMAC**  
[France]





# CYGNUS 2013

4th International Workshop on Directional Dark Matter Detection

sponsored by



Kawayashi-Maskawa Institute  
for the Origin of Particles and the Universe

10 - 12 June 2013,  
Oarks Canal Park Hotel,  
Toyama, Japan

## Scientific Program

Technical progress on direction sensitive detectors  
Data analysis (2D/3D track reconstruction, background rejection, ...)  
Sense recognition : analysis strategies & measurements  
Experimental results from directional prototypes  
Theoretical studies  
Dark matter halo dynamics  
Related activities

International Organizing committee

James Battat (Bryn Mawr College)  
Ioannis Giomataris (CEA Saclay, France)

# 国際競争

グループ	ホスト	地下実験	技術	検出器サイズ	3次元飛跡	標的
DRIFT	英国	2000~	MWPC	1m	△	F
MIMIAC	仏国	未	MPGD	10cm	◎	3He
NEWAGE	京大	2007~	MPGD	30cm	◎	F
NIT	名大	未	エマル ジョン	10cm	○	Bなど
DMTPC	MIT	2011~	CCD	20cm	○(2次元)	F
D <sup>3</sup>	ハワイ	未	MPGD	1cm	○	F

- **DRIFT** : **BGの低減研究により制限曲線は固体・液体検出器と同程度になった。** arXiv : 1010.3027
- **方向に感度を持った実験結果はNEWAGEのみ**

† MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) 多線式比例計数管 :  
「堅い」技術。線間隔を2mmより細かくできないのが難点。

‡ MPGD (Micro Pattern Gas Detector) 微細加工ガス検出器 :  
ピッチを400μ以下にできる。数種類の形状が存在する。

# まとめ

- (1) 実験の現状にとどまらず、今後の展開、どのように「本実験」として実現してゆくか。：「本実験」=「ノーベル賞をとれるかもしれない実験」として以上の議論
- (2) 「本実験」実現に向けての問題点は何か。：大型化、低BG化
- (3) 実現するのに必要なmanpower、経費：表の通り
- (4) 年次計画：「本実験」は2016年度～
- (5) 国際競争力、他の実験に比べての実験の長所：  
「方向解析」でリード技術的な優位性のキープが肝要

		2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	
名: NEWAGE	実験フェーズ	0.3bコミ 0.3b観測	0.3b観測 0.6aR&D	0.3b観測 0.6a製作	0.6aコミ 0.6a観測	
	必要経費(億円)	0.1	0.2	0.3	0.1	
	既存人数	3	2	1	1	
	不足人数	2	3	5	5	
年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	0.6a観測 1.0aR&D	0.6a観測 1.0a製作	1.0aコミ 1.0a 観測	1.0a 観測 1.0b R&D	1.0a 観測 1.0b 製作	1.0b コミ 1.0a,b 観測
	0.1	0.5	0.5	0.2	1	1
	1	1	1	1	1	1
	5	7	7	7	9	9
	観測	観測			観測	観測



# TPC with QPIX(JAPAN)

## ◆ Concept

- pixel readout "ultimate" TPC
- detect the shape of the electron cloud

TOF : Time of Flight

TOT : Time over Threshold

ADC : SAR ADC

Position

drift time

pulse width

ADC

→ Z position

→ Z duration

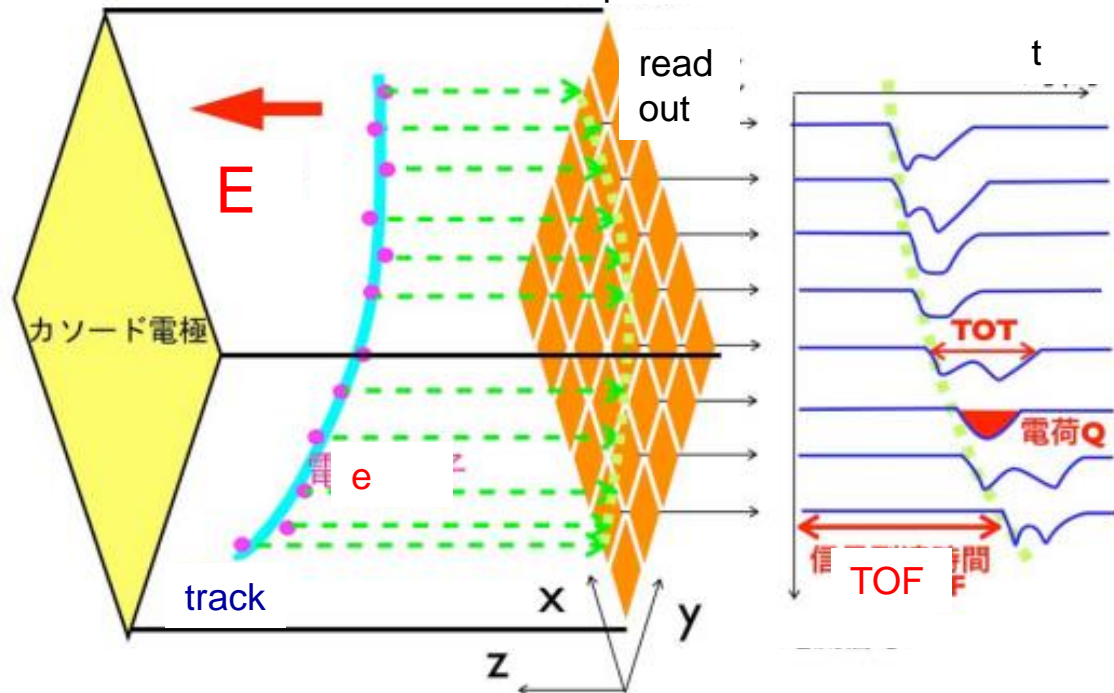
→ charge

→ XY position

Quad information

Quasi- 3D Pixel

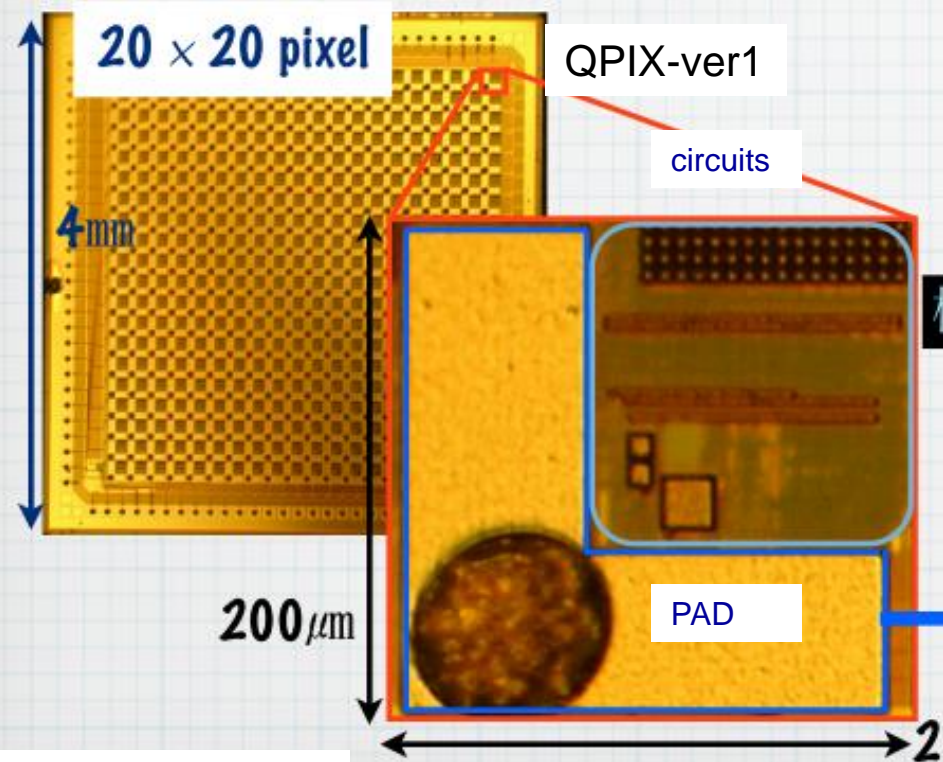
Q(ADC) equipped Pixel





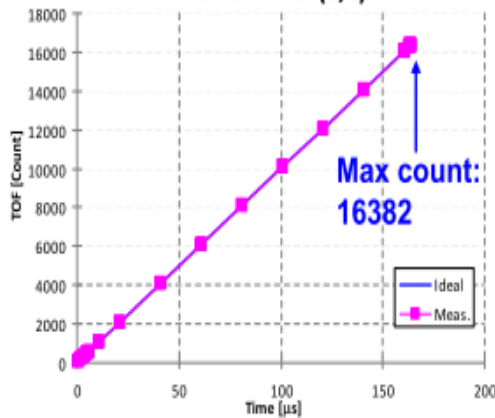
# ◆ QPIX ver-1

designed specs	QPIX.v.1
Dimensions	200 x 200 $\mu\text{m}^2$ (circuits in 130 $\mu\text{m}^2$ )
Channels	20 x 20ch/chip
ADC LSB/MSB	1.5 fC/1.5 pC
Readout information	TOF: 14 bits
	TOT: 8 bits
	ADC: 10 bits, 10MSPS

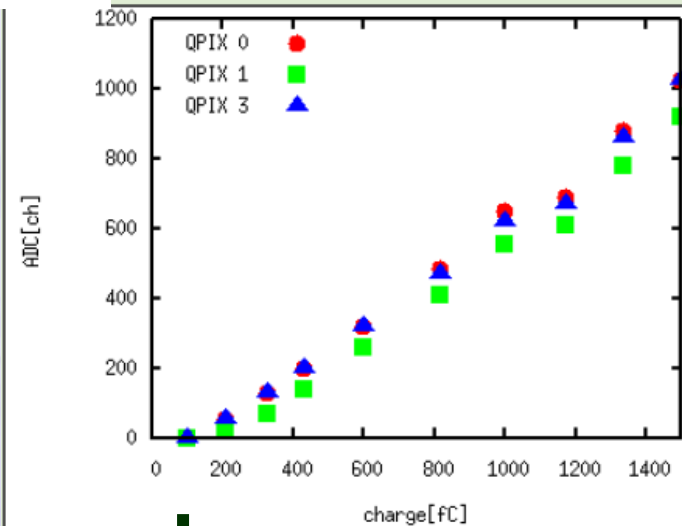
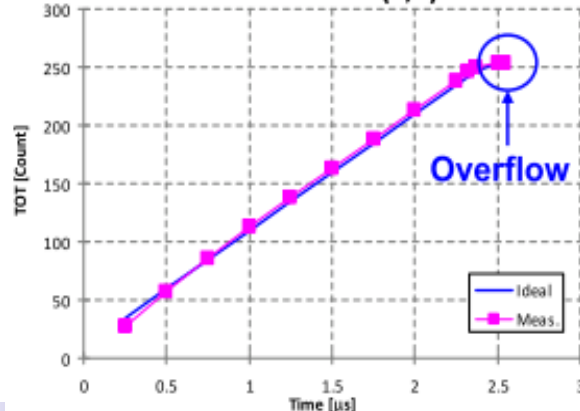


## LABO tests

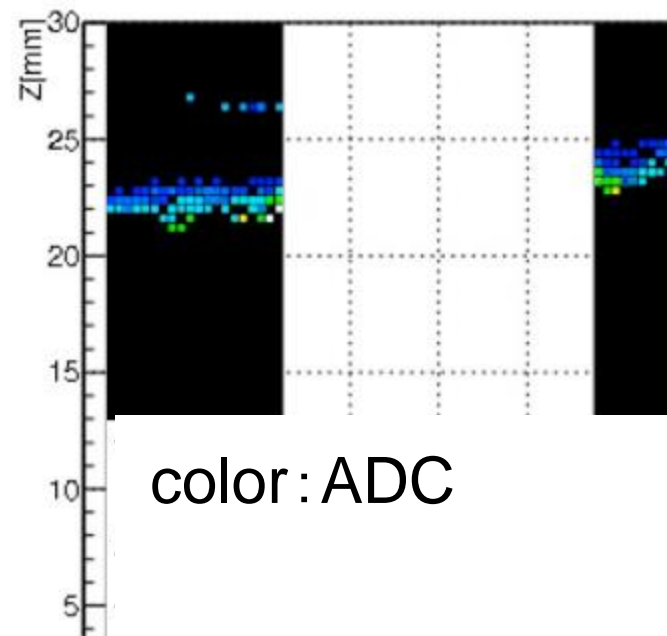
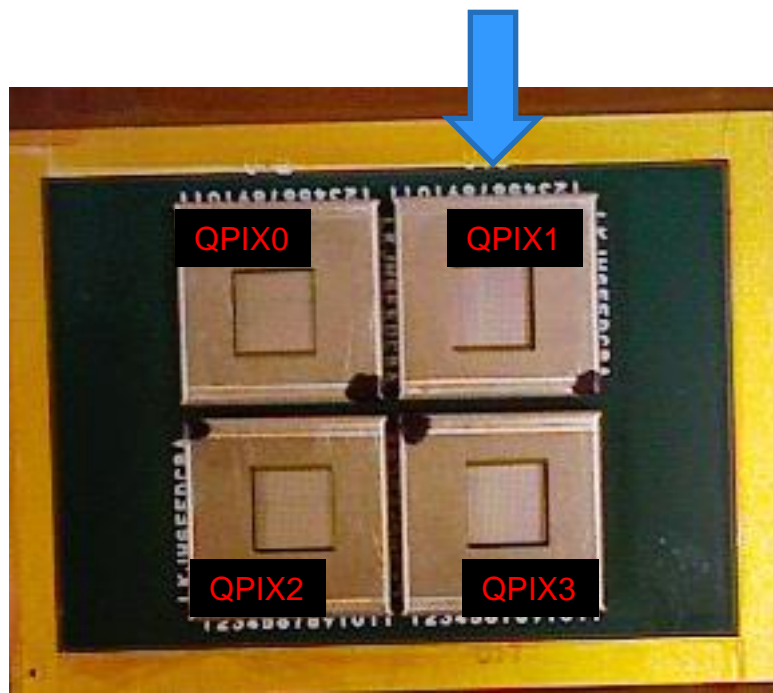
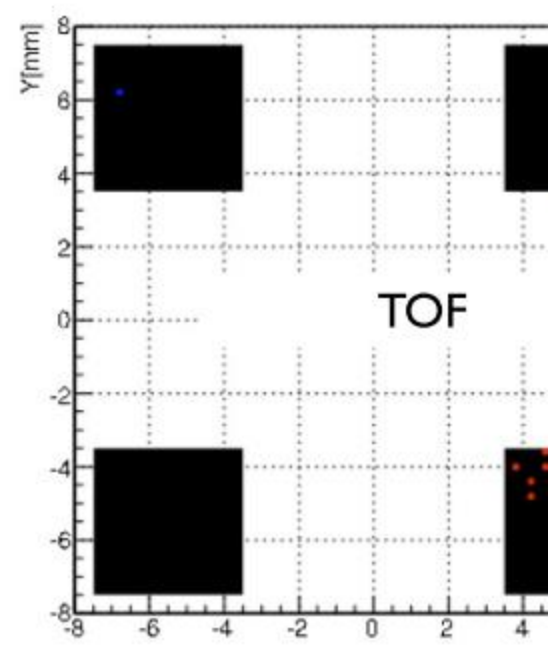
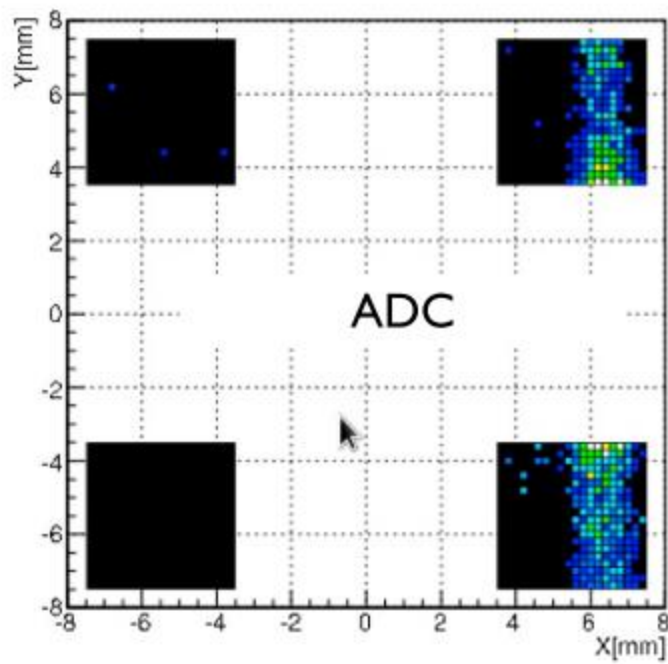
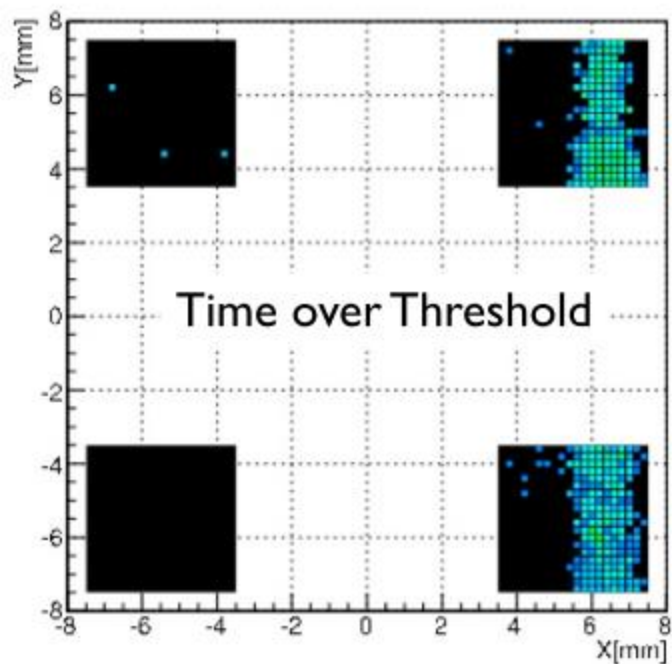
TOF of Pixel (0,0)



TOT of Pixel (0,0)

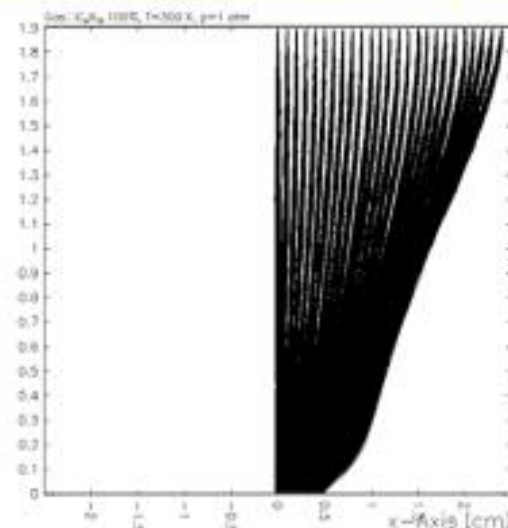


◆ works mostly as designed...

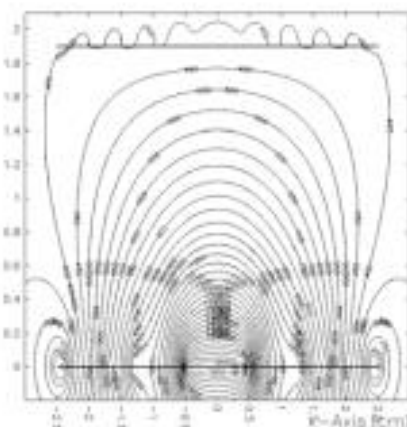
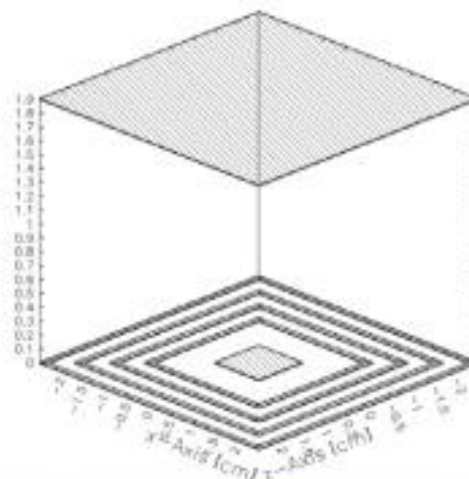


# A New Idea: Charge Focusing

- Pixel readout dominates detector cost ( $\sim \$18 / \text{cm}^2$ )
- Can reduce cost by electrostatically focusing the drift charge between GEMs and pixels
- Not the same as using larger pixels
  - Reduction in needed readout area and hence cost
  - Small reduction in position resolution (diffusion + GEM resolution worse than pixel resolution)
  - Expect to retain excellent noise level and high speed (due to small pixel feature size / capacitance)
  - Also solves the problem of tiling pixel chips (to achieve full area coverage) in high electric field
- Simulation looks promising  $\rightarrow$  experimental tests this summer



**GARFIELD simulation**



$\rightarrow$  High priority since reward in case of success is large (up to factor 10-25 reduction in cost per sensitivity)



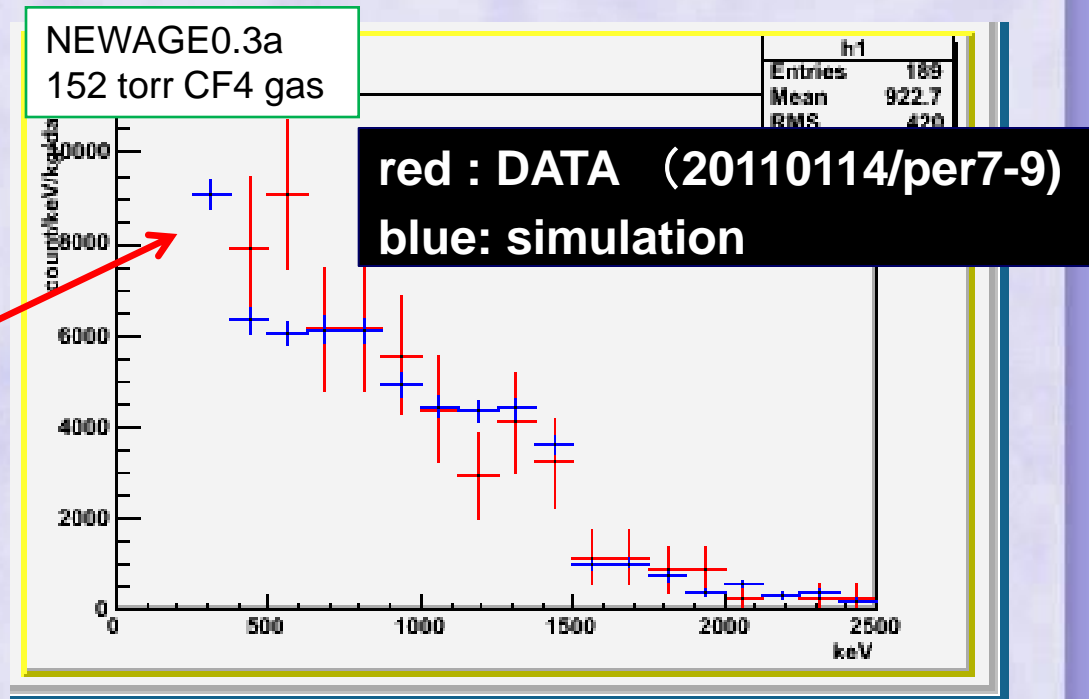
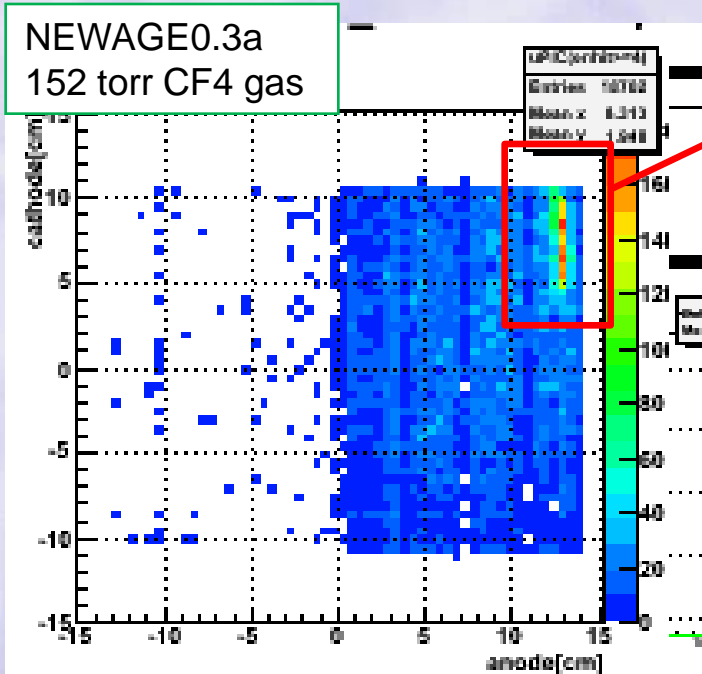
# Calibration with $^{10}\text{B}$

- $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  reaction ( $Q=2.70\text{MeV}$   $\sim 1.5\text{MeV } \alpha$ )



$^{10}\text{B}$  (1.5 $\mu\text{m}$  thickness) coated glass

irradiate with thermalized neutrons





# 世界競争と協力：CYGNUS

## 方向に感度を持った暗黒物質実験のworkshop

- 2007年より隔年（IOCとして身内）
- 2013年（第4回）は日本で開催

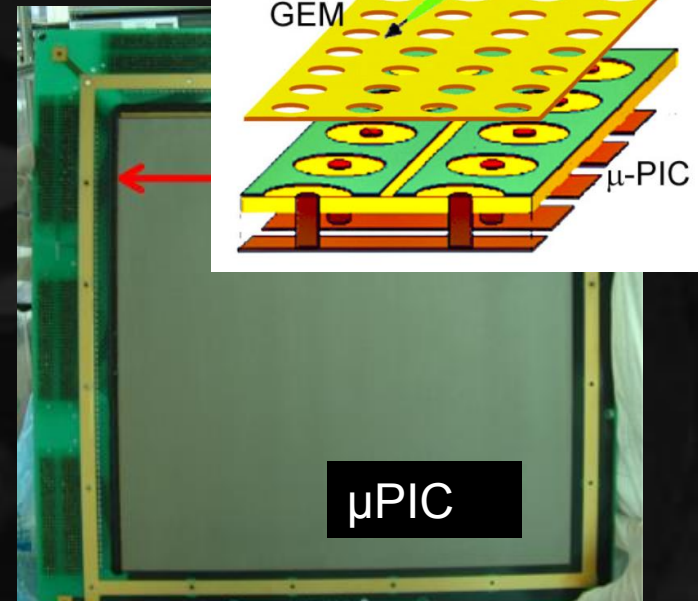
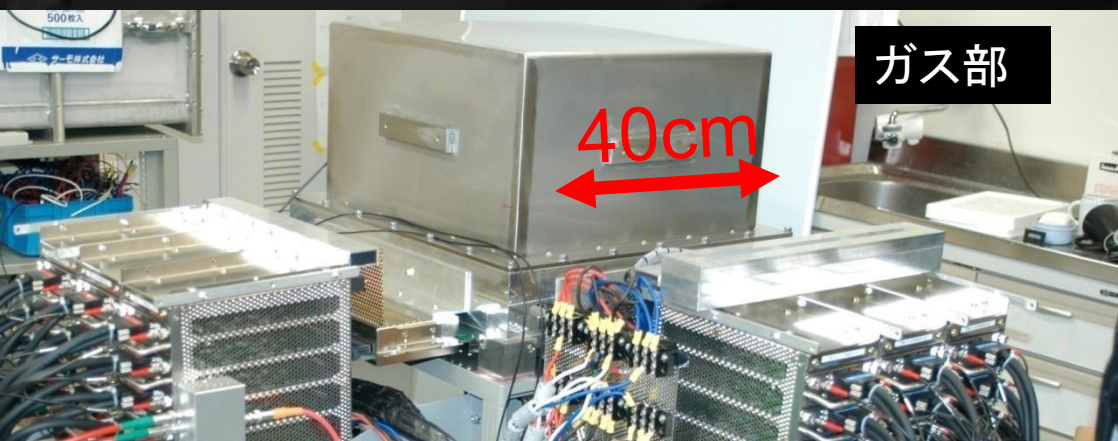
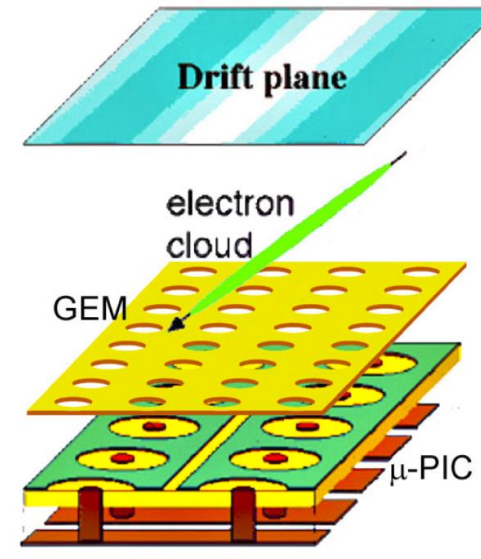


## 競争と協力：

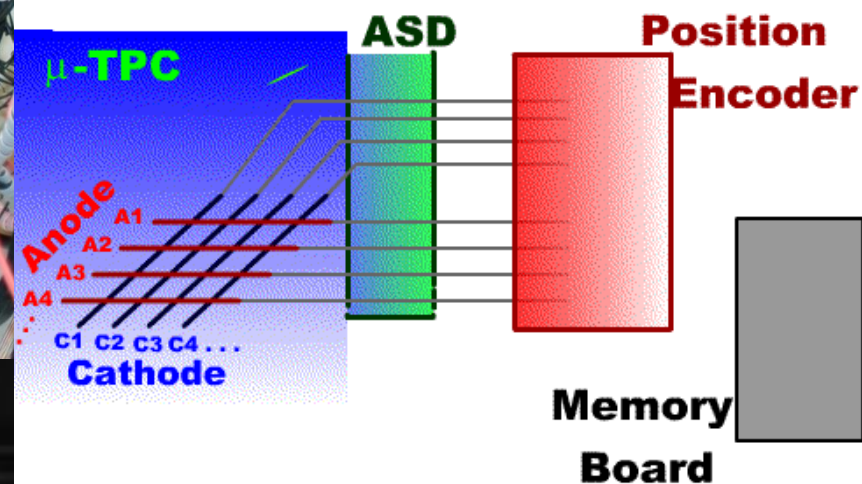
- 2007年4グループ ⇒ 2011年6グループ
- 共通の技術（BG対策、読み出しなど）をworking package（WP）で共有

# 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
- CF<sub>4</sub> ガス SD探索



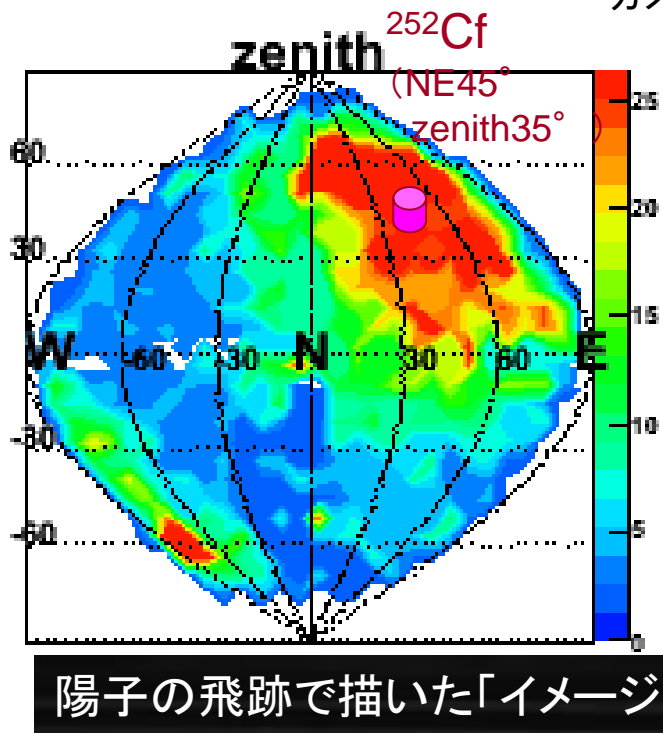
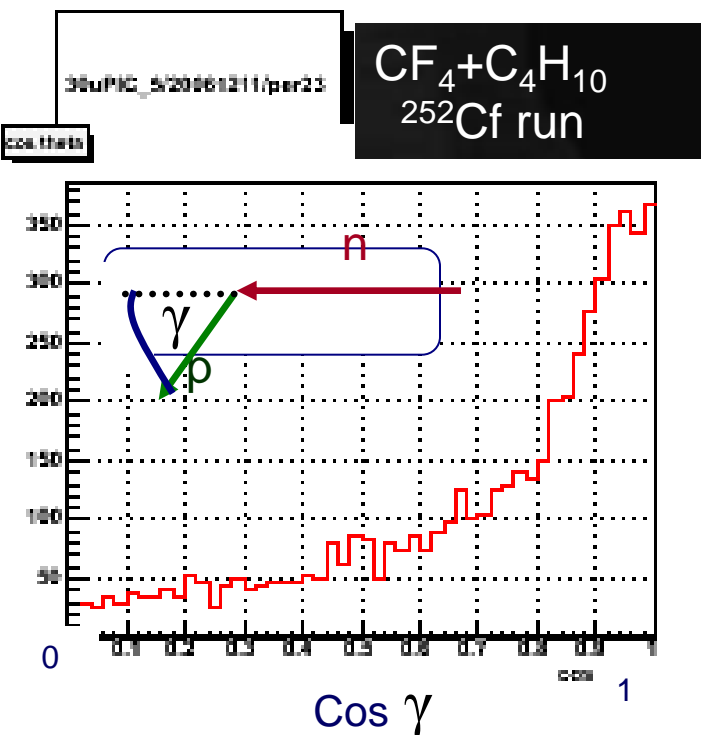
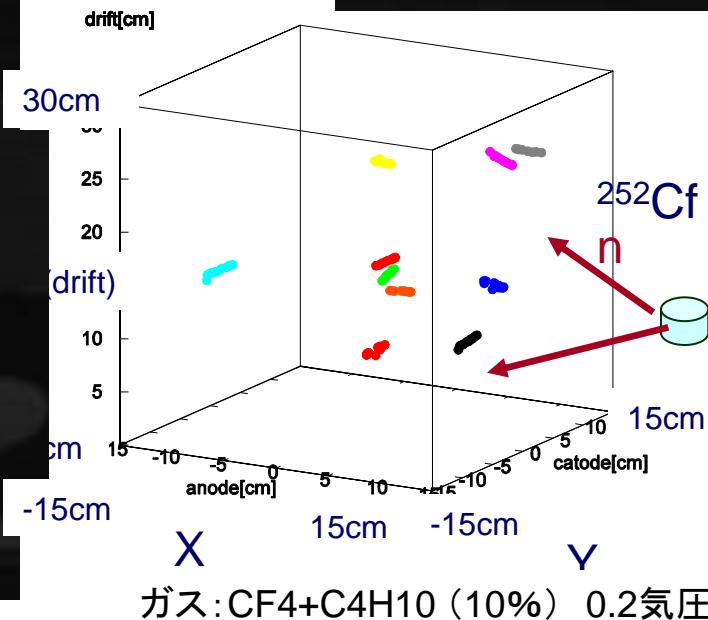
検出器  
NEWAGE-0.3a



# 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

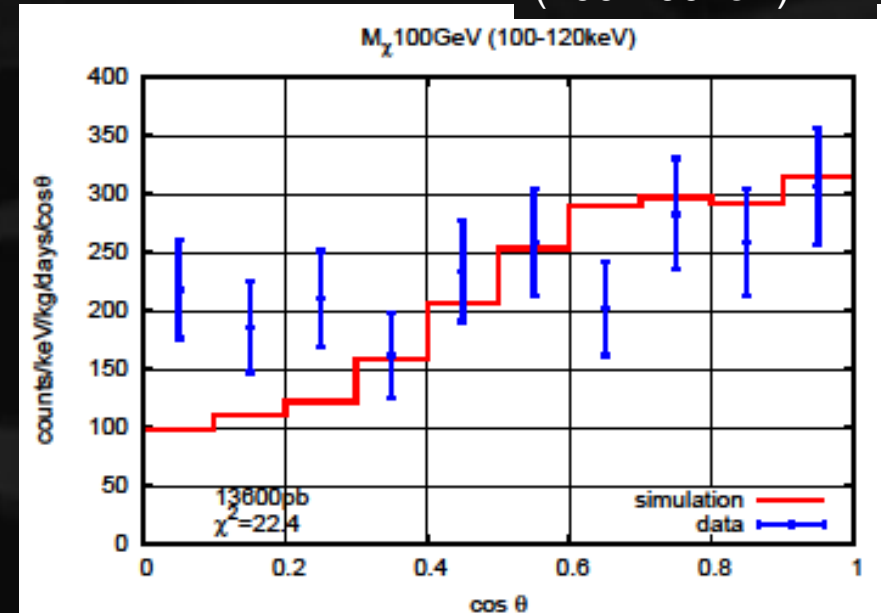
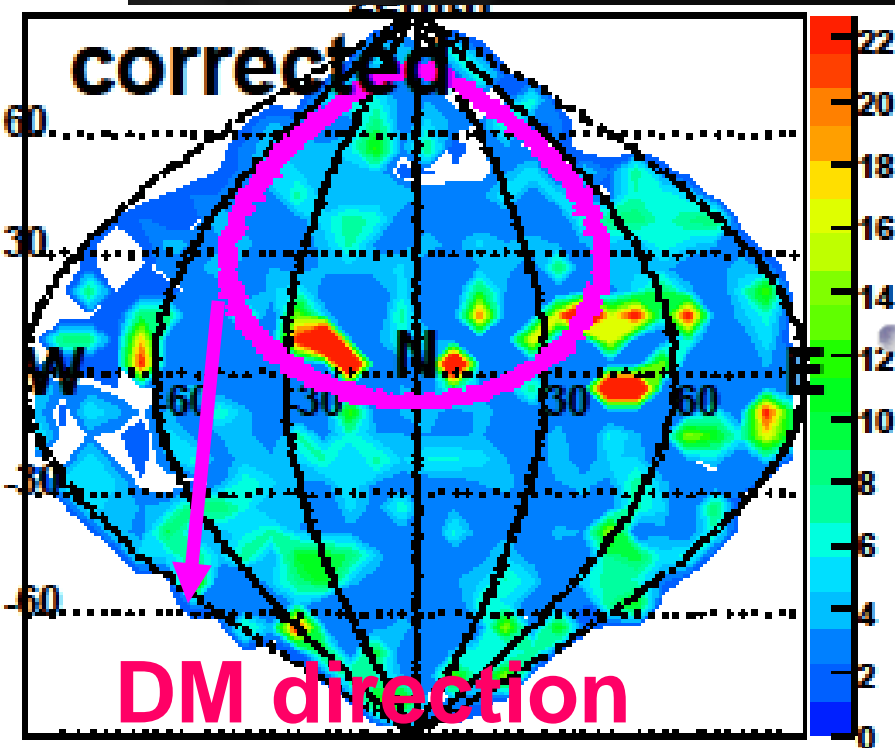


# 地上(京大)でのDM探索実験

- 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)

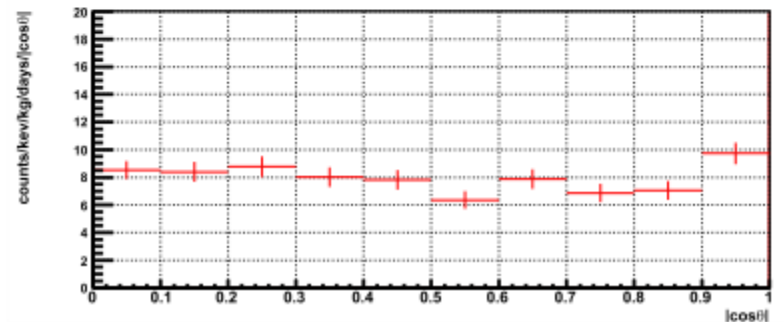
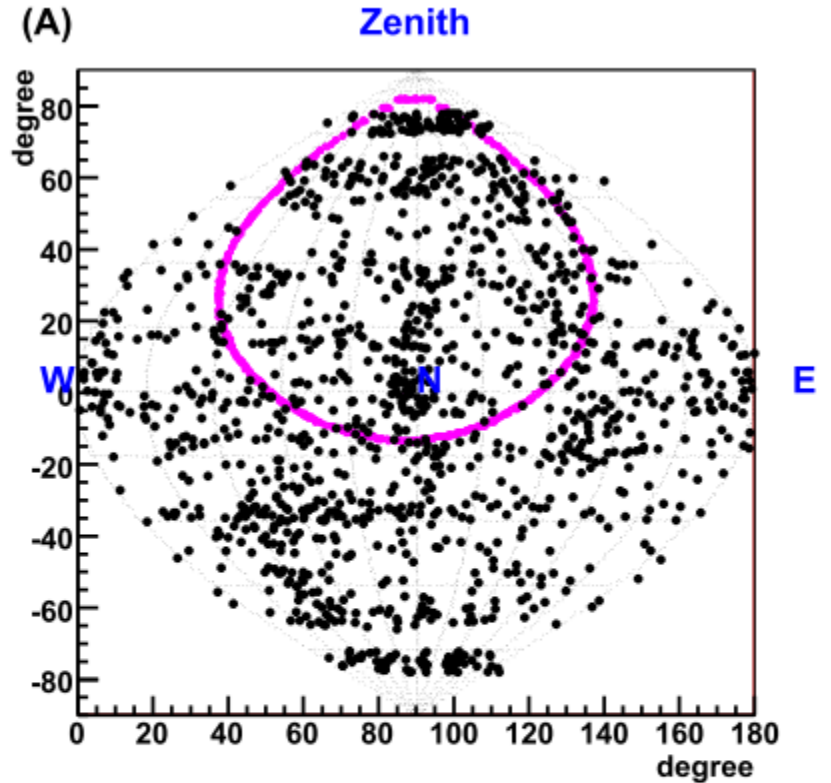
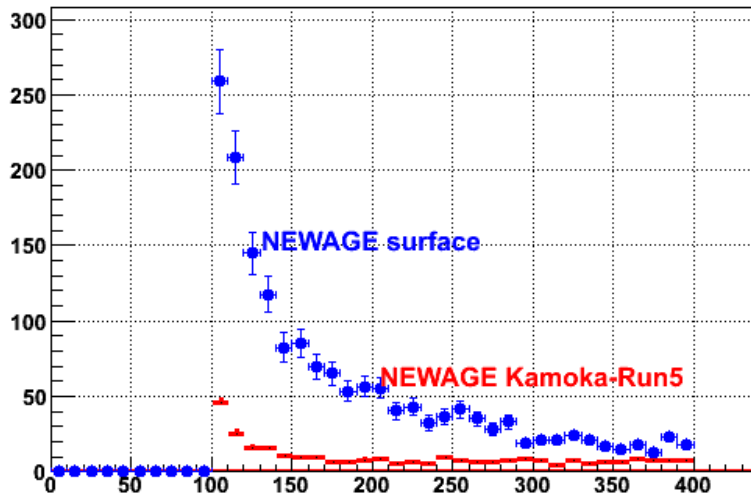
● 観測0.524 kg・days

● 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



# Current status

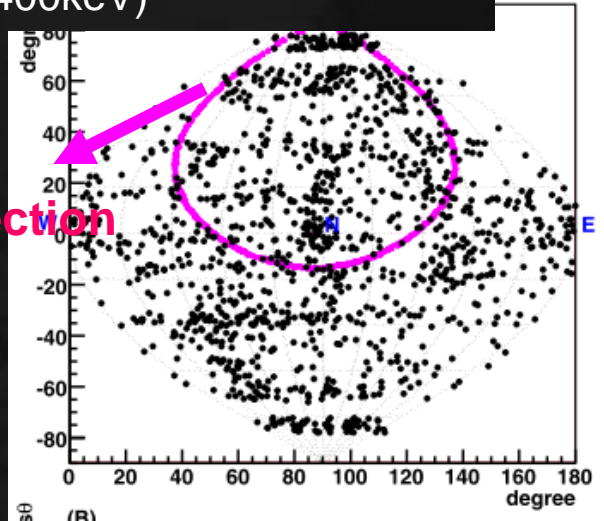
- **First direction-sensitive DM search**

PLB654 (2007) 58

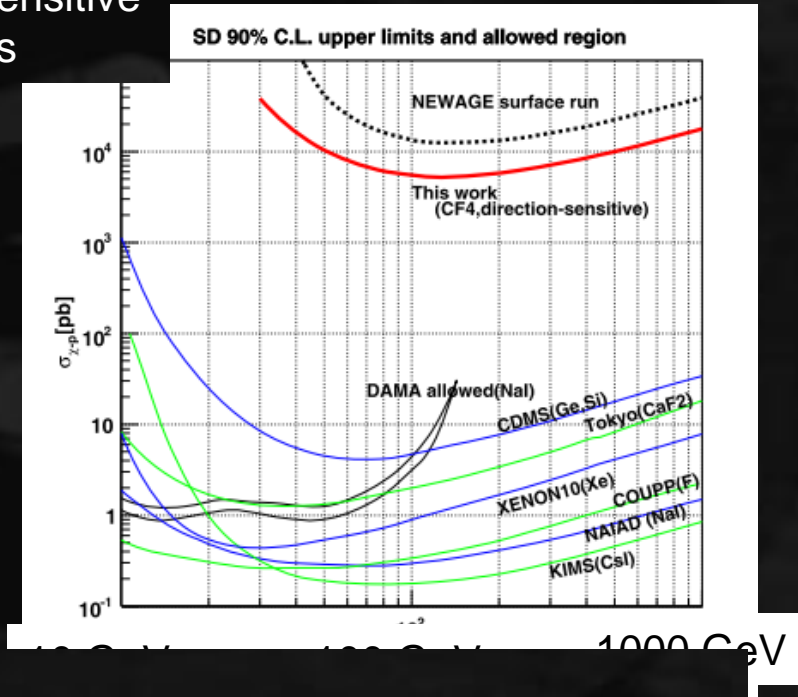
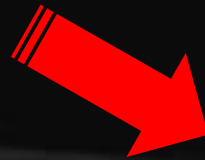
- **Improved (still the only direction-sensitive) limit**

PLB 686(2010)11

North sky by C and F nuclei  
(100-400keV)



direction-sensitive  
upper limits



# On-going and to the future

- **BG reduction (material screening, gas purification...)**

- **Design larger volume detectors (tiling 30cm MPGDs)**

- **Tracking (pixel-readout ASIC)**

- (1) 実験の現状にとどまらず、今後の展開、どのように「本実験」として実現してゆくか。
- (2) 「本実験」実現に向けての問題点は何か。
- (3) 実現するのに必要なmanpower、経費
- (4) 年次計画
- (5) 国際競争力、他の実験に比べての実験の長所

-----

NEWAGEに照らし合わせて上記を含むようなトークでお願い致します。

特に外部の人はとりあえずの目標はDAMA領域というのは知っていると思いますが、発見に向けたその後の展開はあまり話を聞く機会はなかったように思います。(タイムスケールを含め)

各実験グループに「予算・マンパワー年表」を作ってもらい、

- (1) それは各実験グループのtalkの中で説明してもらおう。
- (2) 世話人にあらかじめ提出してもらい、パネルディスカッション前に集約して議論の題材にする。

## ◆ 低BG化

- 材料

- ・ ガラス強化フッ素樹脂⇒PEEK材
- ・ GEM、 $\mu$ PICの材料も見直しへ

- ガス循環

- ・ 冷却活性炭

- ガンマ線除去

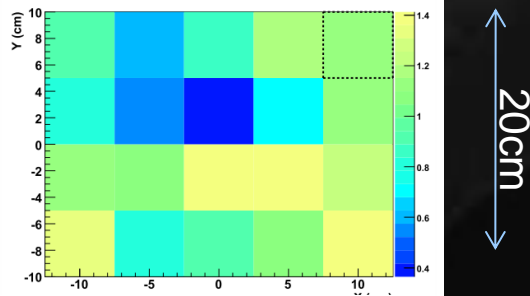
- ・ ゲインマップによる補正



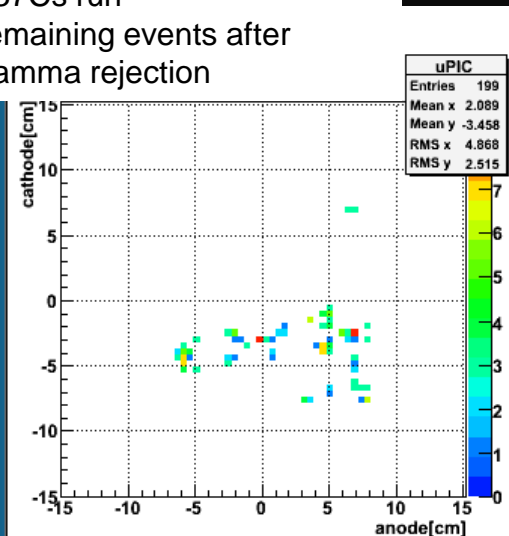
# ガンマ線： 精細なゲインマップを作成

- gas gain is not uniform in  $30 \times 30 \text{cm}^2$

old gain map **RUN5**

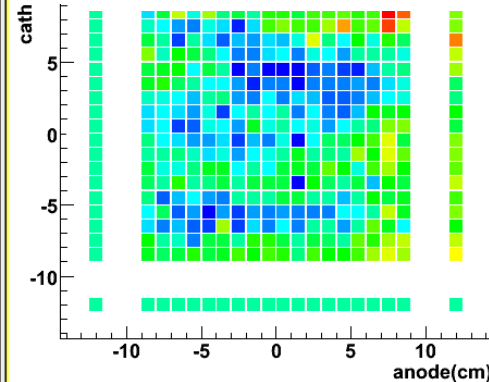


137Cs run  
remaining events after  
gamma rejection

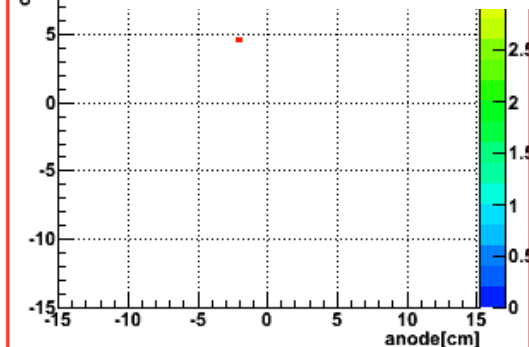


gamma rejection  
 $8.1 \text{e-}6$

new gain map **RUN13**



137Cs run  
remaining events after  
gamma rejection

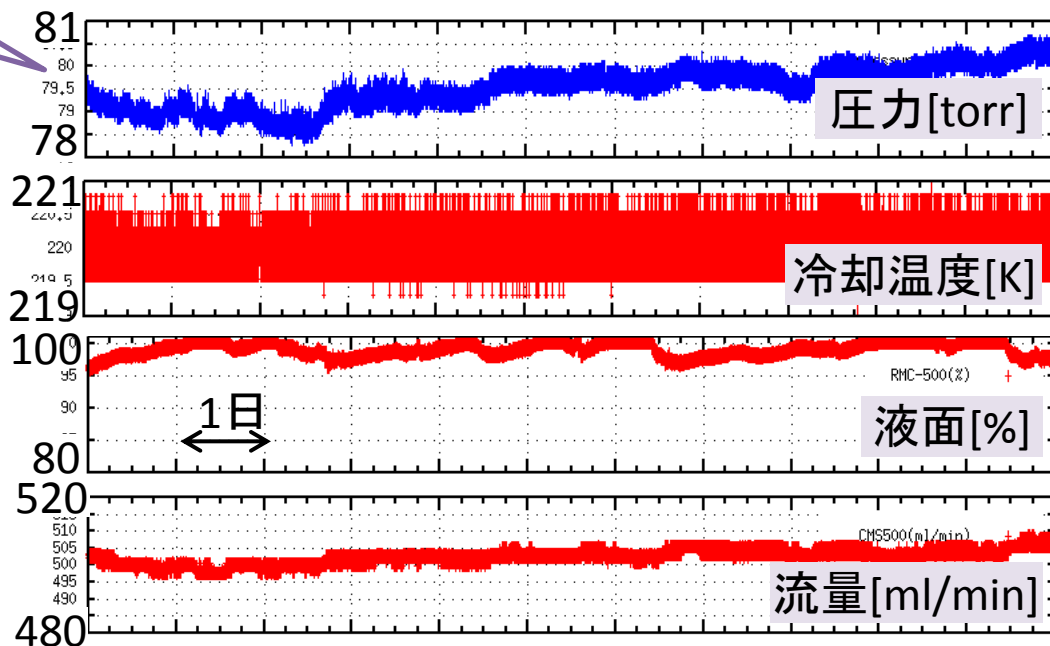
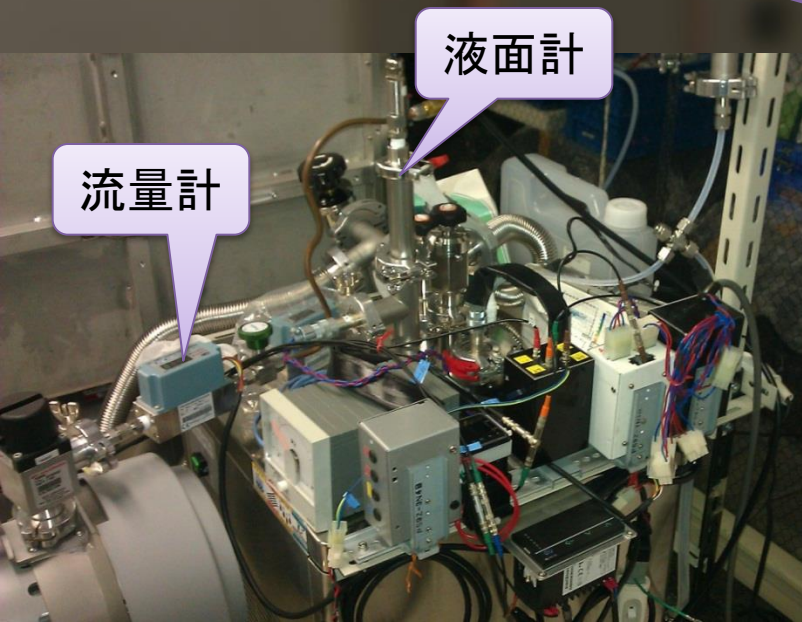
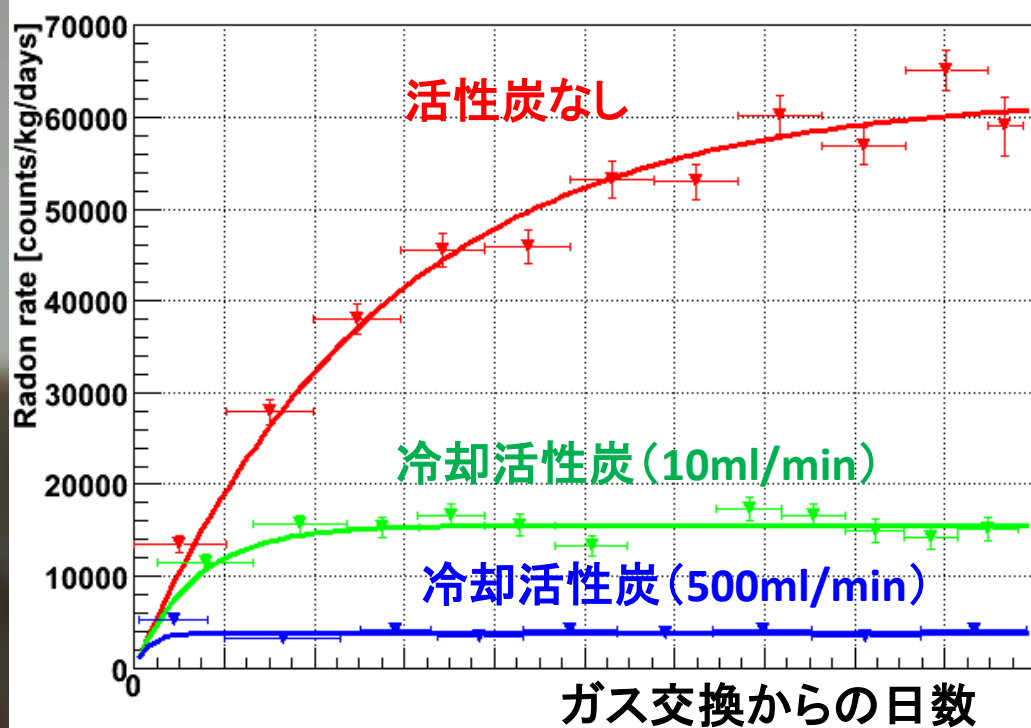


gamma rejection  
 $1.0 \text{e-}6 >$

# ラドン除去

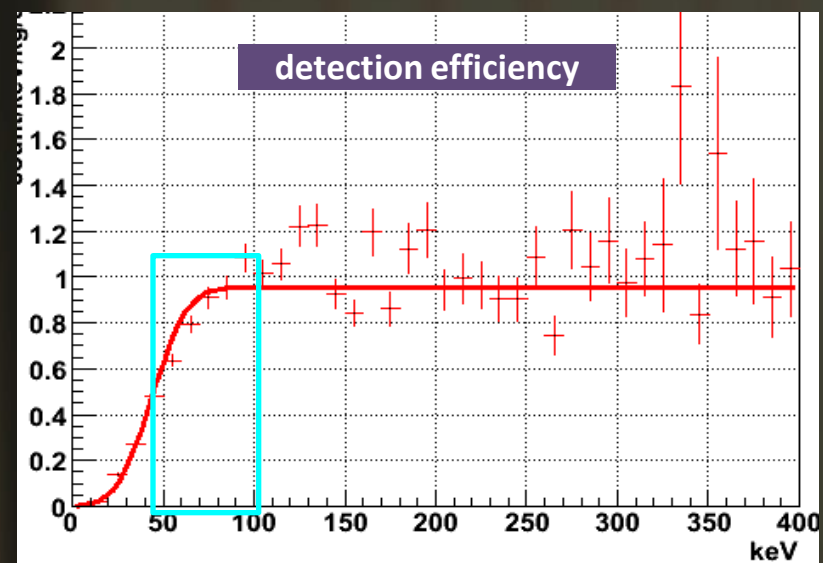
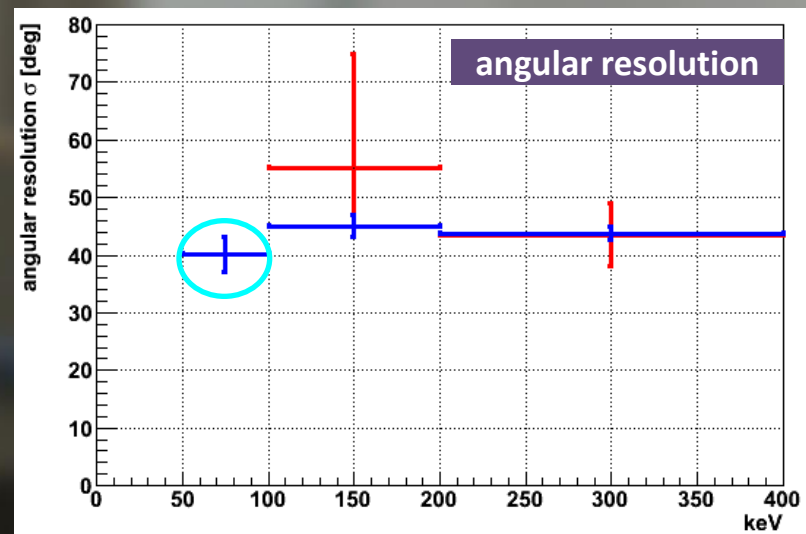
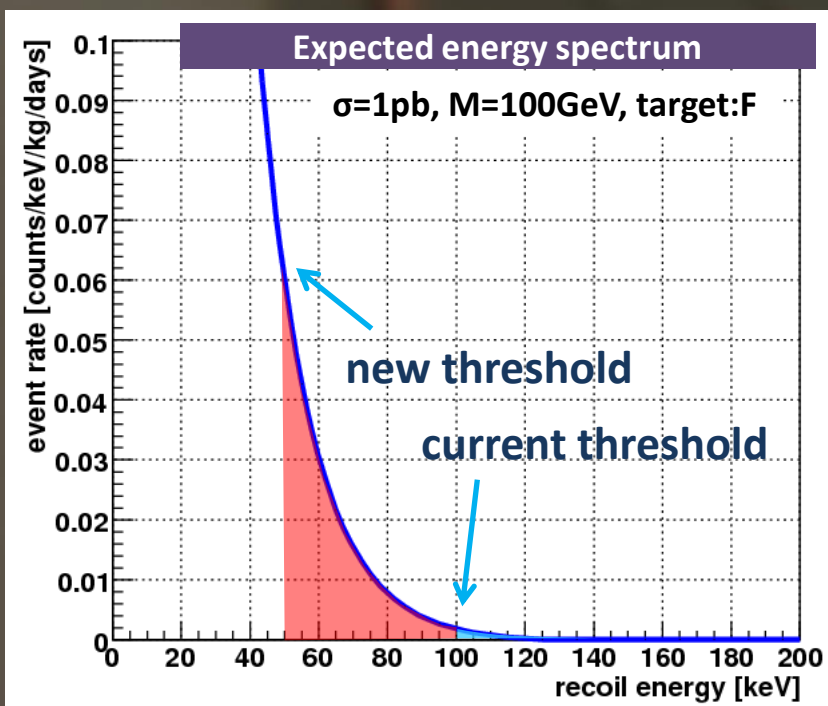
- 冷却活性炭+ガス循環
- ラドンレート: 1/10以下
- 各種モニタ機能を搭載

$\mu$ -PICのゲインのばらつきからの  
圧力変動の要請は $\sim 6$ torr



# 低圧ガス

- ガス圧 : 0.2atm  $\Rightarrow$  0.1atm
- 角度分解能 : 40度 @50-100keV
- 検出効率 : 0.6 @50keV
- エネルギー閾値 : 100  $\Rightarrow$  50keV



# ◆ quenching

- 0.5@40keV

- ~10keVee th for 35keVn.r.

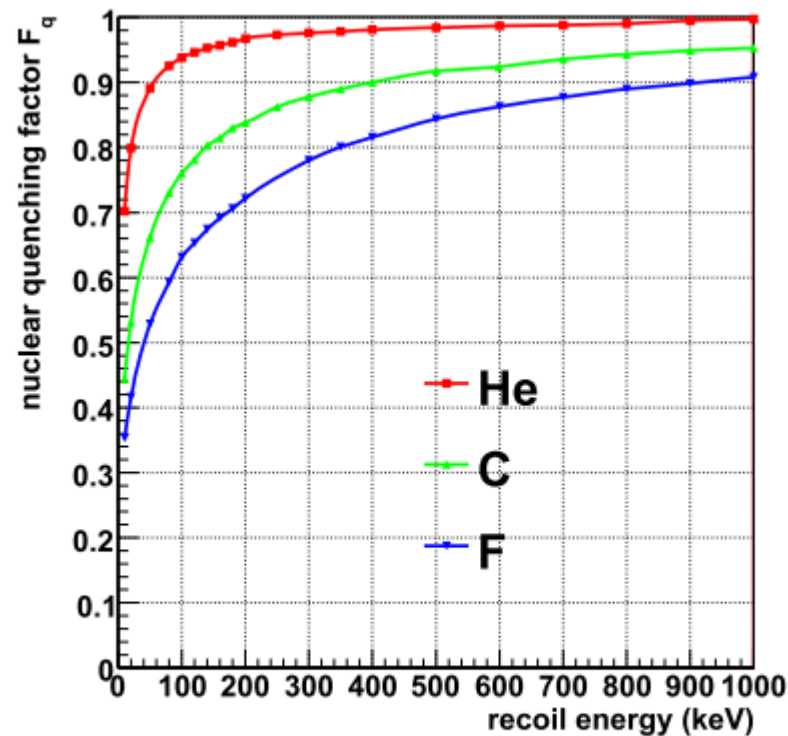


Figure 4.11: Nuclear quenching factor for helium (red line), carbon (green line) and fluorine (blue line) in  $CF_4$  gas. The number of ion-electron pairs produced by a particle with energy of  $E$  in gas is calculated as  $F_q \times \frac{E}{W}$ , where  $W$  is the W-value of the gas.



# 別紙1：実験の簡単な説明

## 検出器

- 三次元飛跡検出器
- 低圧ガス (CF<sub>4</sub> 等)
- 検出ピッチ400 $\mu$ m
- 1m<sup>3</sup>以上 ( (30cm)<sup>3</sup> )
- 閾値30keV (100keV)
- 角度分解能30度 (55度)

(括弧内は現状)

