

計画研究 B02

低バックグラウンド技術を応用した 方向感度を持つ暗黒物質探索の基礎研究

神戸大学 身内賢太郎

2014年8月23日

代表 身内賢太郎 (神戸)
分担 中竜大 (名古屋)
分担 田中雅士 (早稲田)

方向感度

EMULSION

NEWAGE



検索

メニュー

▶ 代表挨拶

▶ 領域目的

▶ 研究計画

▶ X00 総括班

A01 大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨナラ性と世代数の研究

A02 48Caを用いたニュートリノのマヨナラ性と研究と高分解能技術の開発

B01 大型実験装置による暗黒物質の探索

ガスTPC、原子核乾板

本研究では、方向に感度を持つ暗黒物質研究の為の低バックグラウンド(BG)化による基礎研究を総合的に行います。ガスを用いた高精度な手法(B02-1、B02-2)、相補的である原子核乾板を使用した大質量検出器の開発(B02-3)を合わせて研究を進めることで国内技術を結集、当該分野で世界をリードしてゆきます。

方向に感度を持つ暗黒物質探索実験は、その有用性は認識されながらも、技術的困難さから実現されておられません。NEWAGE(B02-1)は日本独自の技術、マイクロビクスルチェンバーを初めて暗黒物質探索実験に応用することで、世界に先駆けて当該分野を切り拓き、唯一の制限を与えています。最先端の技術を用いて開始した研究であるため、これまで原理実証を最優先し、現在「低バックグラウンド実験」への発展段階です。

本研究はB02-1を軸として行い、領域内D班の低BG技術を合わせて装置の低BG化を進め、期間内に一桁以上の感度向上、さらには暗黒物質の発見が示唆されている領域の探索への具体的な方針を示すことを目標とします。また、将来計画への基礎研究として、スピんに依存しない核子を用いた実験の検討(B02-2)、大質量検出器による方向に感度を持つ探索の検討(B02-3)などの基礎研究も進めます。暗黒物質探索の感度として先行するB01班との連携を密にとり、B01班で何かしらの兆候を得られたと

これまで：原理実証

本領域での研究：低BG化 ⇒ 本格的DM実験へ

◆ 新学術領域：他班との関係

B01班 (XMASS)

大型実験装置による暗黒物質直接探索

岸本 康宏
於 新学術「地下素核研究」
2014年8月29日



田中 (SI反応)

中 (大質量)

Emulsion

D01班 (低BG)

データベース

測定技術

Direction-Sensitive
WIMP-search

NEWAGE

B02班 (方向感度)

B02班 テーマ

チャレンジ

方向感度



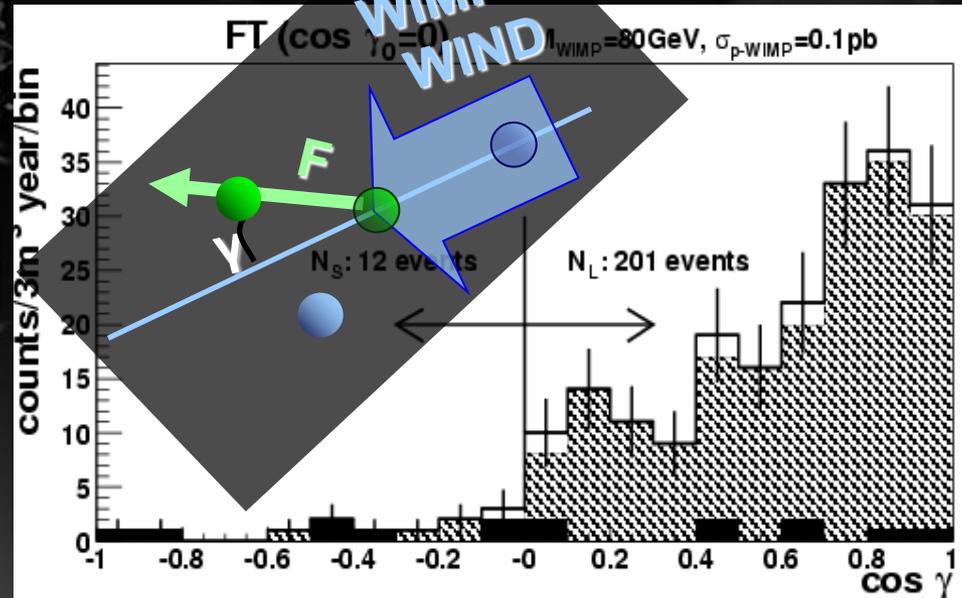
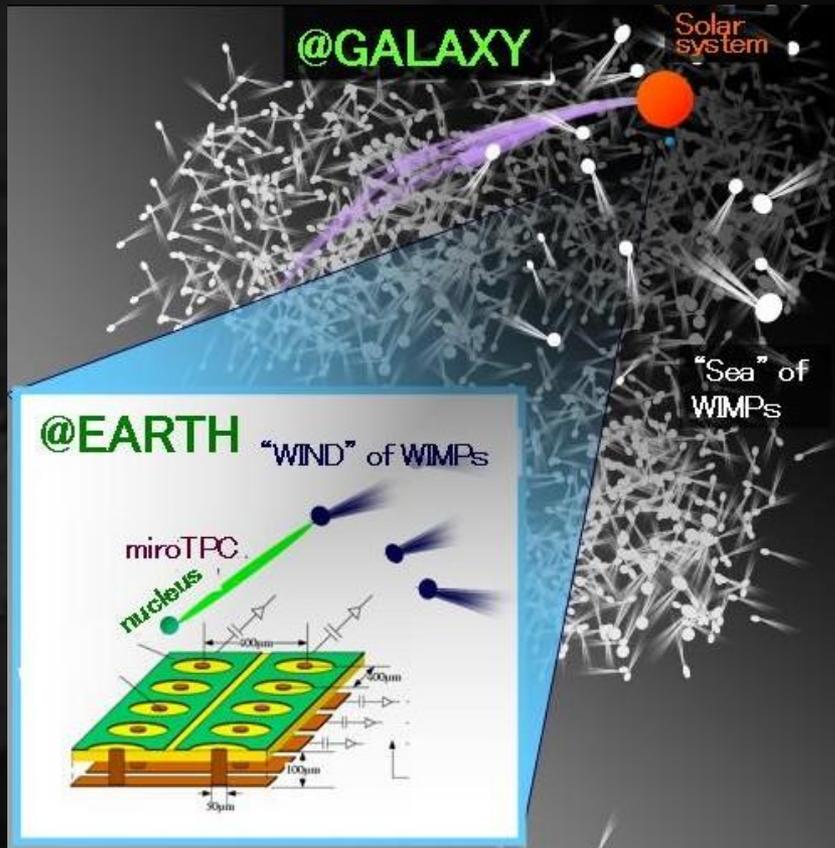
Kungliga
Svenska Vetenskapsakademien
har den 8 oktober 2002 beslutat
att med det
NOBELPRIS
som detta år tillerkännes den som inom
fysikens område gjort den viktigaste
upptäckten eller uppfinningen
med ena hälften gemensamt belöna
Raymond Davis Jr
och Masatoshi Koshiba
för banbrytande insatser inom astro-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

• STOCKHOLM DEN 10 DECEMBER 2002 •

Jaume Cortés  *Erling Nordin*

方向感度

- 決定的な信号
- 季節変動の1/1000程度の統計でOK
- 暗黒物質の運動解明へ



- [11] J. Rich, M. Spiro, Saclay preprint DPhPE 88-04 (1988); G. Gerbier, J. Rich, M. Spiro, C. Tao, in: E.B. Norman (Ed.), Proceedings of the Workshop on Particle Astrophysics, World Scientific, Singapore, 1989, p. 43.
- [12] G. Masek, K. Buckland, M. Mojaver, in: E.B. Norman (Ed.), Proceedings of the Workshop on Particle Astrophysics, World Scientific, Singapore, 1989, p. 41.

◀ 方向感度：歴史

- 1988 ガスTPCによる探索の提唱
- 1994 II+CCD 陽子の飛跡
- 199? DRIFT(英+米) R&D開始
- 2004 NEWAGE旗揚げ PLB578(2004)241
- 2007 NEWAGE方向感度初制限 PLB654(2007)58

- 2007 CYGNUS 2007(以降隔年)
- 合従連衡を経て
現在世界に5グループ

PRL73(1994)1067



FIG. 2. A false color CCD image resulting from a ^{252}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.

◀ 方向感度実験の聖地？ 神戸！！！！

● 風見鶏の館



NEWAGEたん
by 秋本祐希(Higgsたん)

緊急告知：B02班（他班のチャレンジングな方も歓迎）企画
「聖地巡礼」 8/24 研究会終了後
その後学生によるミ二研究会@神戸大

EMULSION (中)

検出器デバイス開発



2010 ~ : 独自製造ファシリティを構築
(そもそも、ダークマター検出器のR&Dをや
りたくて、中が中心になって立ち上げ)

2010-2012 : 超高分解能原子核乾板のための、
結晶の微粒子化技術を確立 (中 & 浅田)

製造スケール : ~ 1 kg detector /week
製造コスト : ~15万円/kg



検出器平均密度 : $3.2 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$

質量比

AgBr · I : 74 %

Ag (42 %), Br (31 %), I (1 %)

Binder (gelatin + PVA) : 25 %

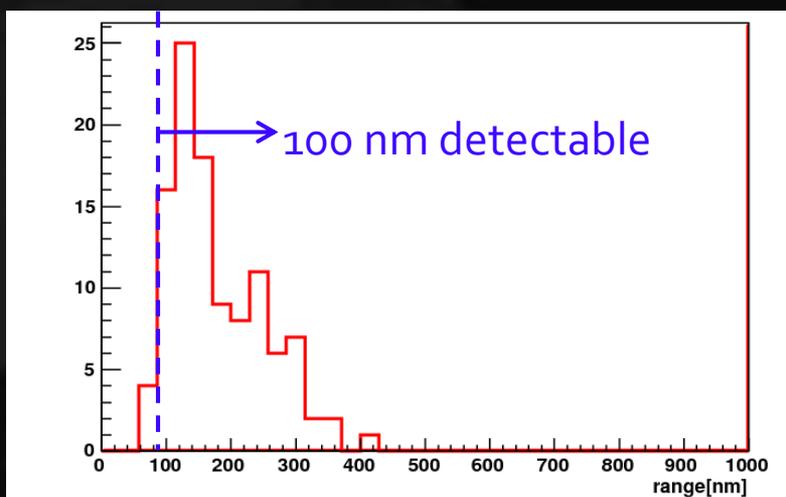
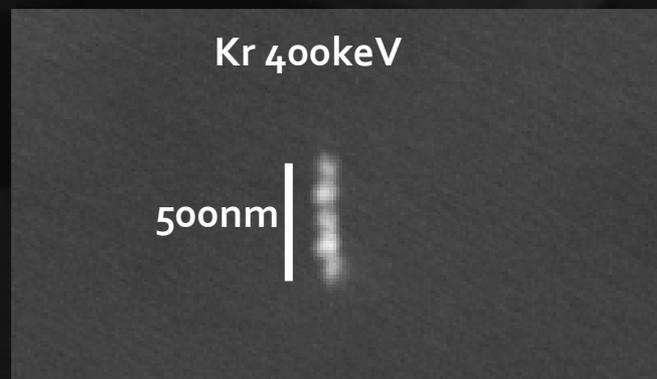
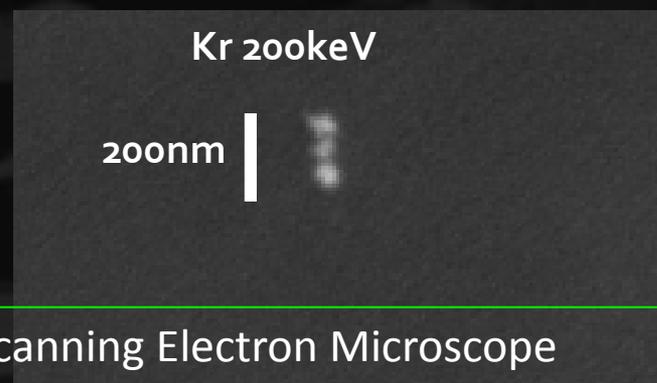
C (10 %), N (4%), O (10 %), others (2%)

Emulsion Dark Matter Search (名大十)

- 大質量によるSI interaction に対する方向感度探索
- 赤道儀に載せて、CYGNUS方向を追尾

Target : C,N,O, (Ag,Br)

	NIT	U-NIT
AgBr size	40 nm	20 nm
Detectable range	> 200 nm (80 keV 相当 for C recoil)	> 100 nm (35-40 keV 相当 for C recoil)



電子顕微鏡では方向感度があることは原理実証済み。

Read-out Technology

[短い飛跡をどうやって読み出すか]

基本コンセプト

光学顕微鏡ベースのスキャンシステム

高速に解析し、ラフに候補事象を選び出す
(バックグラウンドを捨っても、シグナルは落とさない)

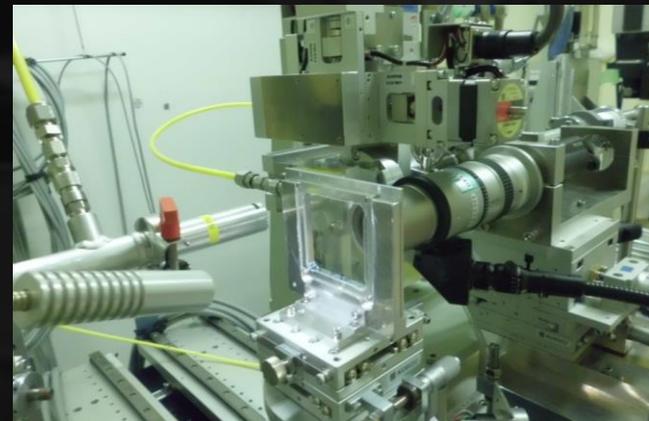


候補を選んでしまえば、それらをピンポイント
に詳細解析 (あらゆるテクノロジーを駆使。
(e.g., 高倍率解析、プラズモン共鳴 etc)

高分解能で最終チェック
X線顕微鏡が最有力システム



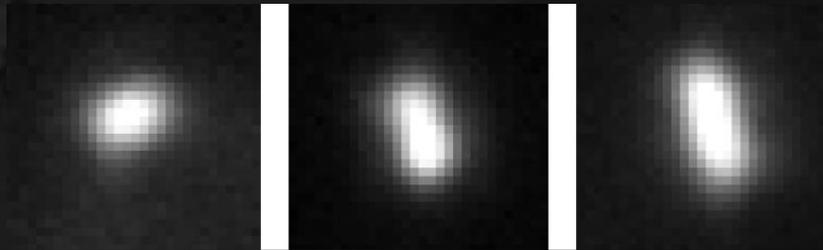
Prototype system @ Nagoya U.



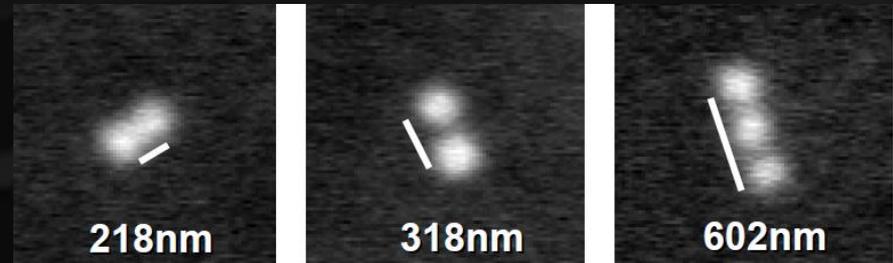
X線顕微鏡 @ SPring-8

光学顕微鏡システムによる候補選別と解析

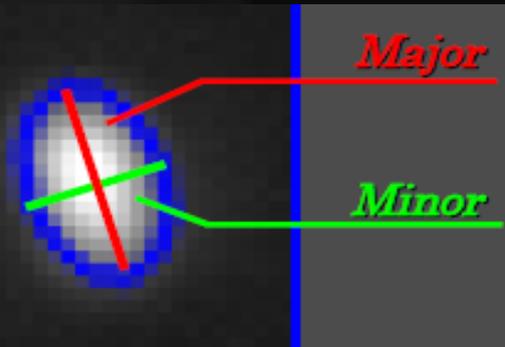
期待される反跳原子核シグナルの描像



X線顕微鏡で確認

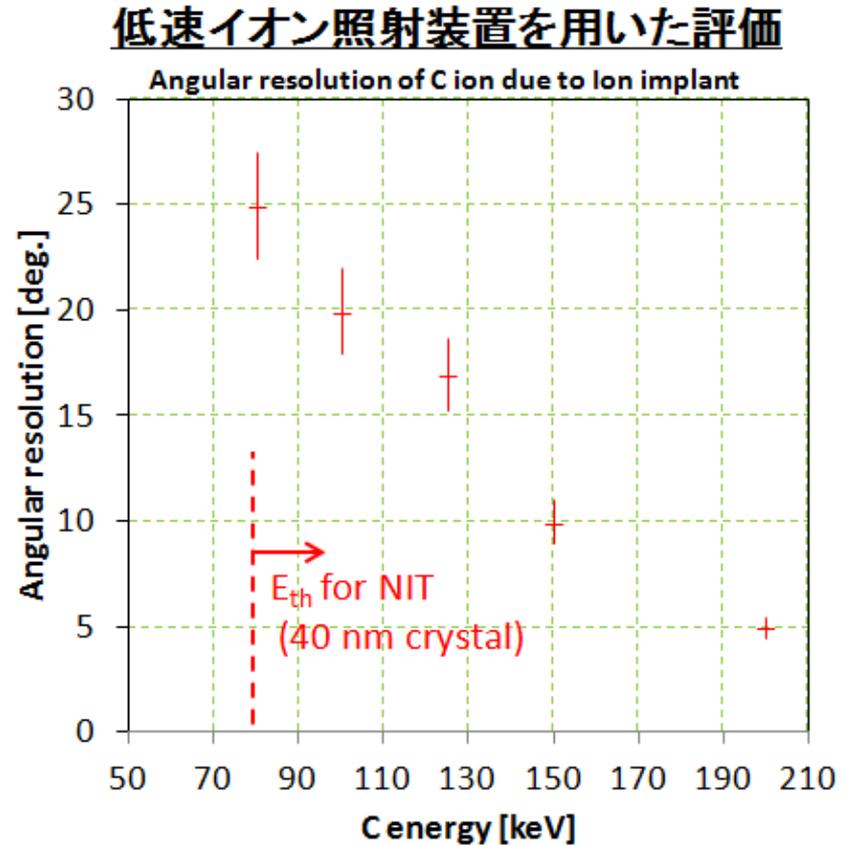
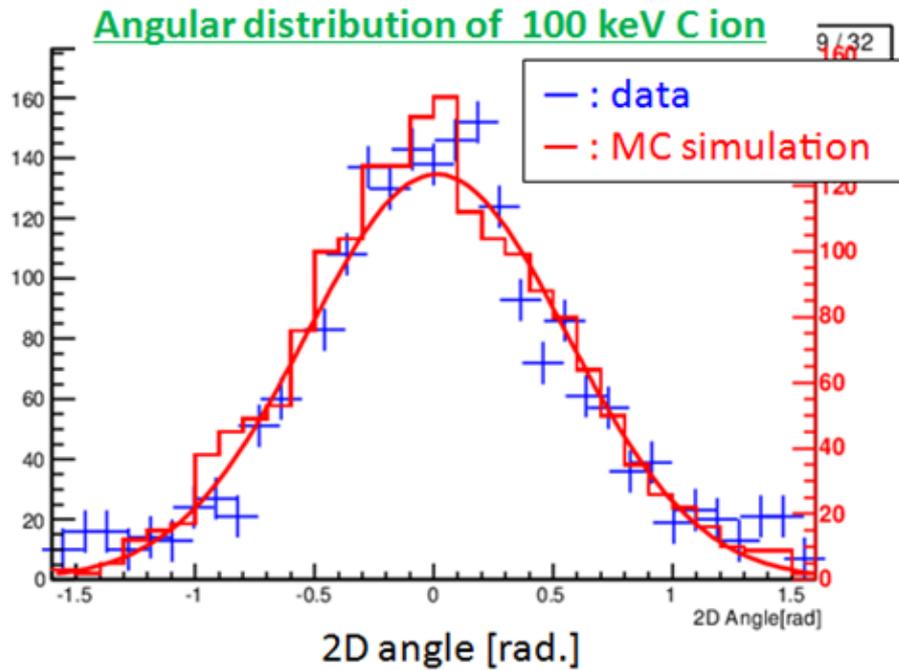


現状は、とりあえずシンプルに楕円フィッティング
(M. Kimura and T. Naka, NIM A 680 (2012) 12-17)



- 実行分解能 : 60 - 70 nm
(理論分解能 : 62 nm)
 - 解析スピード : ~ 1000 events/day
 - ※ ほぼ自動撮像が可能になっている。
 - 候補事象の位置対応精度 : 2 - 3 μm
 - システムとしてはすでに実用化
 - 拡大率を上げて、像の精細化を
進行中
- (随時アップグレードは図っていく)

方向感度測定 [イオン注入装置を用いたデモンストレーション]



検出器内部の微量放射線同位体測定

エマルジョン内部に含まれる放射性同位体も並行して測定
(イタリア人研究者と共同研究 @ グランサッソ研究所)

Current type

Type	Gelatin (normal)	Silver halide crystals (normal)
^{228}Ra (mBq/kg)	30 ± 10	< 52
^{228}Th (mBq/kg)	50 ± 10	< 3.8
^{226}Ra (mBq/kg)	19 ± 7	< 25
^{234}Th (Bq/kg)	< 0.34	< 3.3
^{234m}Pa (Bq/kg)	< 0.64	< 2.0
^{235}U (mBq/kg)	< 19	< 35
^{40}K (Bq/kg)	1.4 ± 0.2	98 ± 9
^{137}Cs (mBq/kg)	< 4.5	< 22
^{60}Co (mBq/kg)	< 2.9	< 22
^{108m}Ag (mBq/kg)	-	67 ± 9
^{110m}Ag (Bq/kg)	-	4.54 ± 0.23

K-40を減らしたタイプは現在測定中



名古屋で試料を作成し、グランサッソに送って測定

AgBr crystal sample



協力：
Stefano Nisi (Chemical Plants Service, LNGS),
C. Galbiati (Co-spokesperson, DarkSide)

5年計画

2014

光学解析システム2号機の構築と検出性能の評価、
内部および外部バックグラウンドの定量推定

2015

1-10 gスケール（解析速度に依存）でのバックグラウンドラン
⇒ バックグラウンドソースを理解

2016

高い $\gamma(\beta)$ 除去効率を持ったデバイス開発
(2014年現在、日本写真学会奨励金によって基礎研究を遂行中)
解析システムの高速度化
(100 – 1000 g スケールに対応した駆動系改善、解析アルゴリズム研
究)⇒ 光学解析からのバックグラウンド除去アルゴリズムの導入

2017

⇒ 上記開発により1 kg級の 実験の目処をつける

2018

～Kgスケールの 実験の立ち上げ (SIでのDAMA領域を視野におく)

人工高分子 (有力候補はポリヴィニルアルコール)を
用いた超低バックグラウンドデバイスの開発 (100
kg級の低バックグラウンドを目指したデバイスの基
礎研究)



NEWAGE

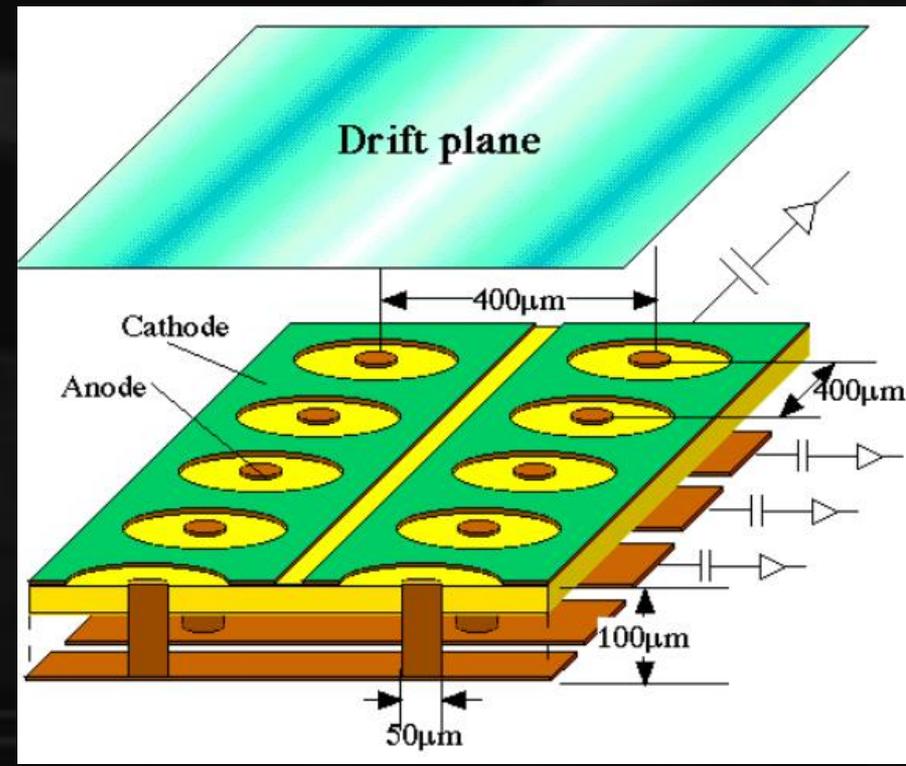
検出器：ガス TPC

- 三次元飛跡検出器
- MPGD[‡] による読み出し
- CF₄ 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 ($<10^{-5}$)



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

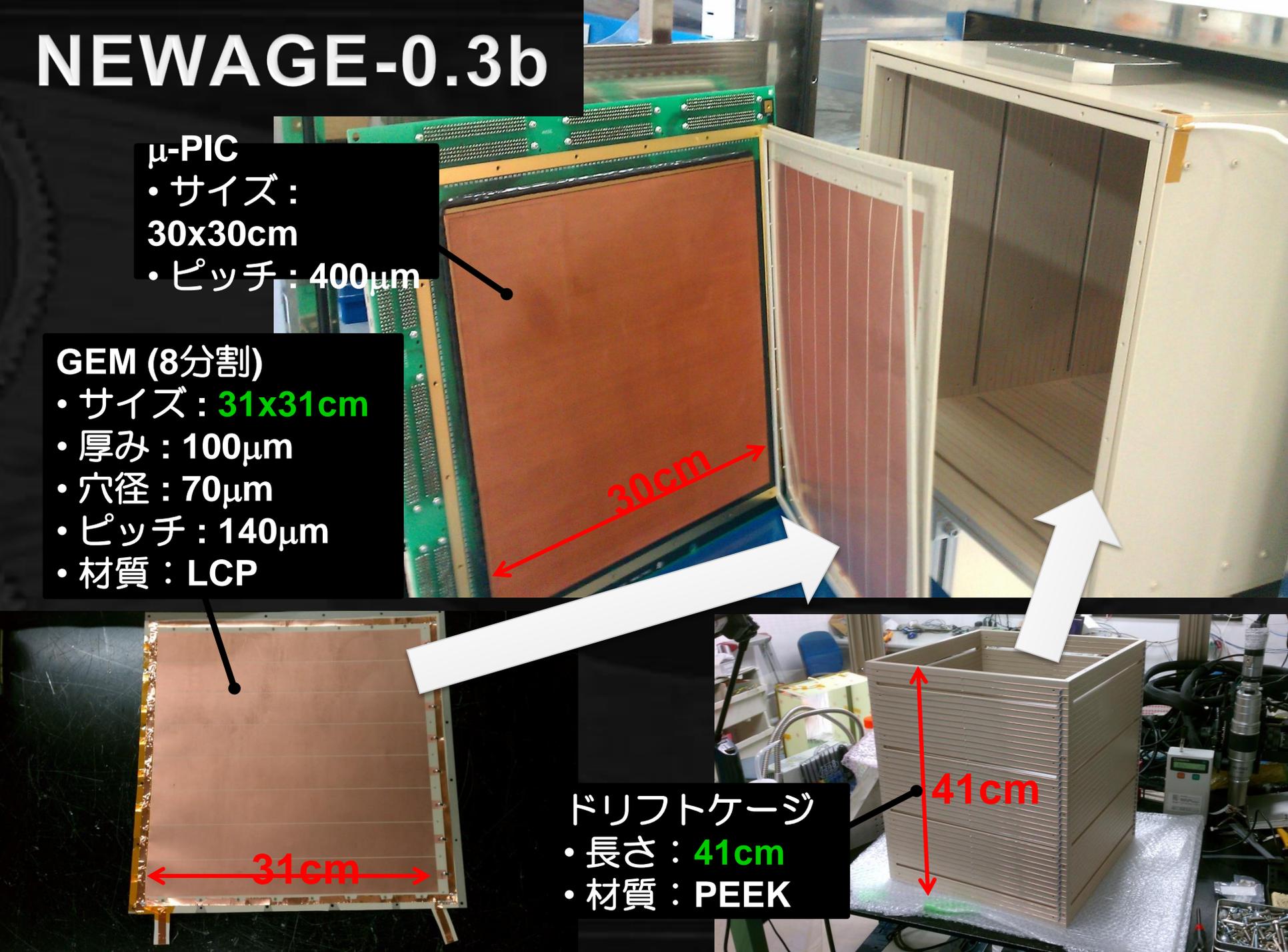
30cm

31cm

ドリフトケージ

- ・長さ：**41cm**
- ・材質：PEEK

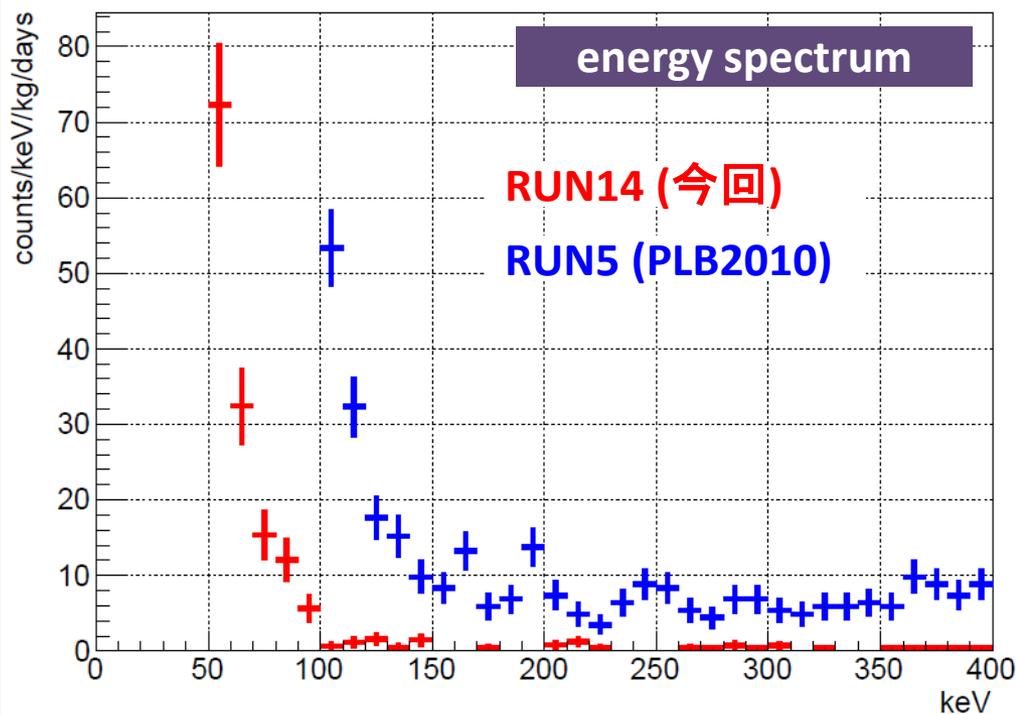
41cm



現状把握(地下測定結果)

RUN14の条件

- period : 2013/7/20-8/11, 10/19-11/12
- live time : 31.6 days
- fiducial volume : 28x24x41cm³
- mass : 10.36g
- exposure : 0.327 kg·days



正味のエネルギースペクトル

- threshold : 100 ⇒ 50keV
- BG : ~1/10 @100keV

方向分布

およそ等方的

Direction-sensitiveな制限

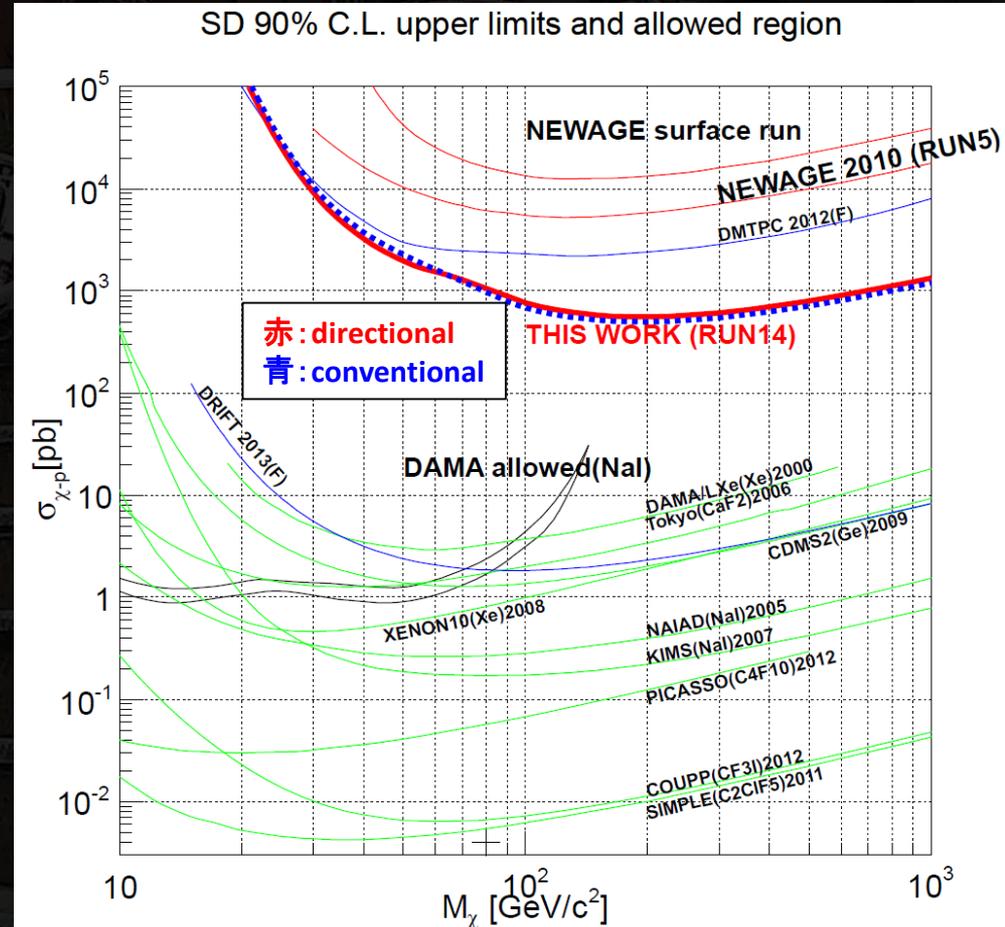
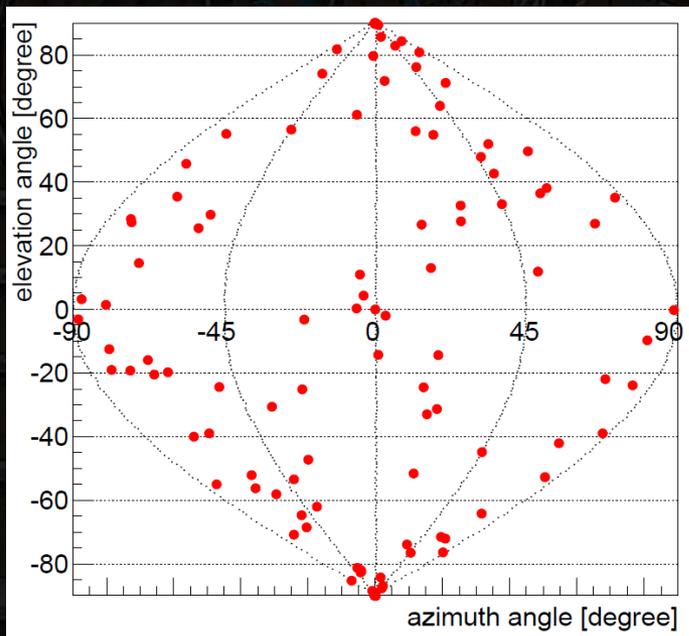
中村D論

2014

submitted for
PTEP

- Directionalな世界最良のlimit: **557pb @200GeV**
- 前回の測定(RUN5)を一桁更新

50-400keV
C,F SKYMAP



バックグラウンドスタディ

目的

- ・低エネルギーのバックグラウンド(BG)を理解する

高エネルギーBG

- ・内部由来(U/Thコンタミからの α 線)

中村D論

低エネルギーBG

- ・外部由来(環境ガンマ、環境中性子)
- ・内部由来(U/Thコンタミからの α 線)

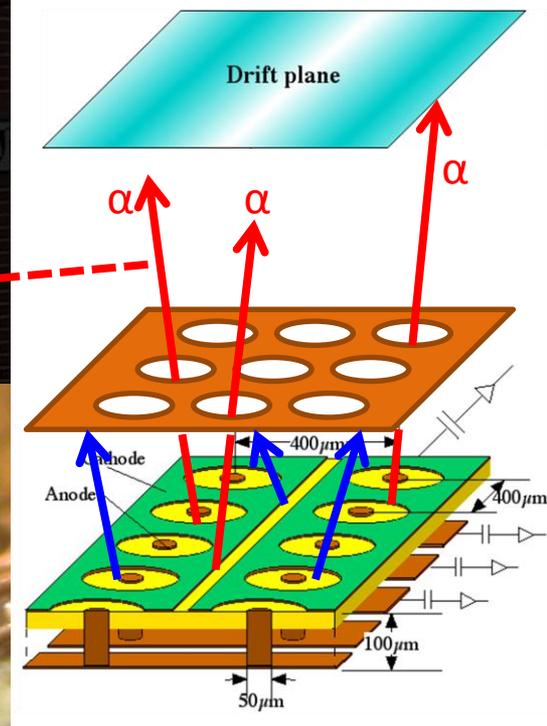
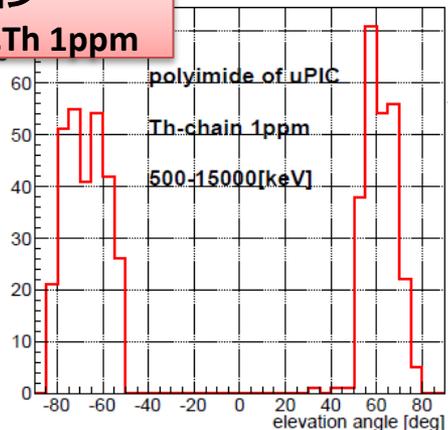
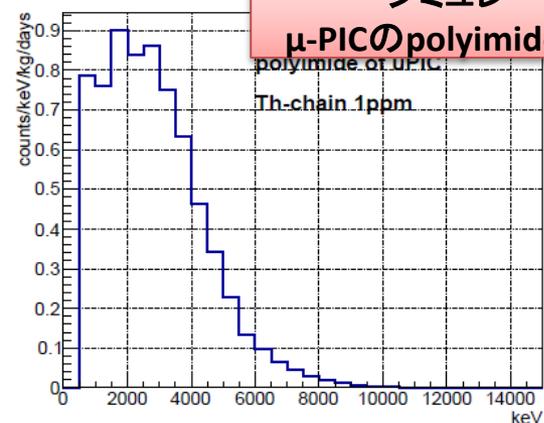
NEW

内部由来 U/Thコンタミ含有量測定

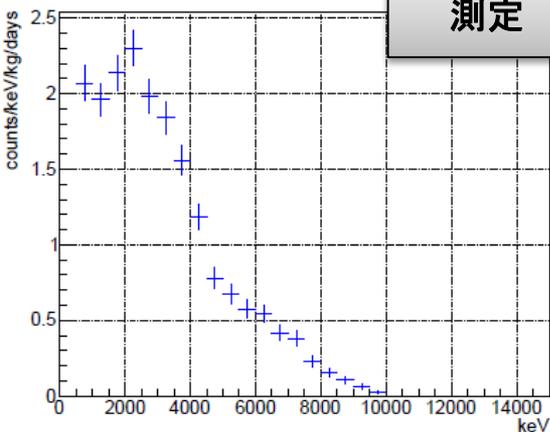
高エネBG

シミュレーション

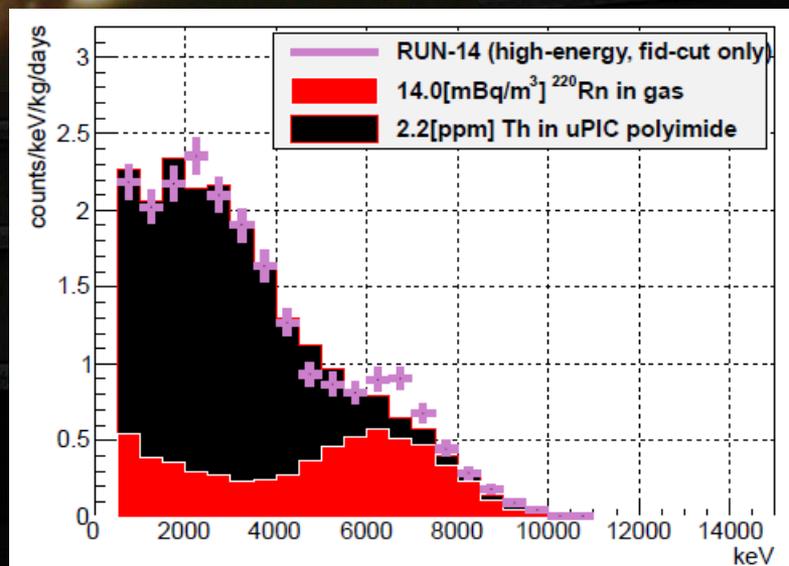
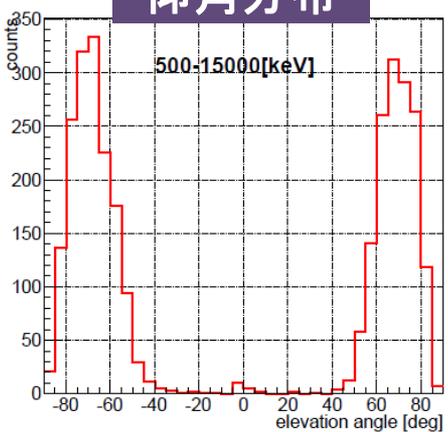
μ -PICのpolyimideにTh 1ppm



測定



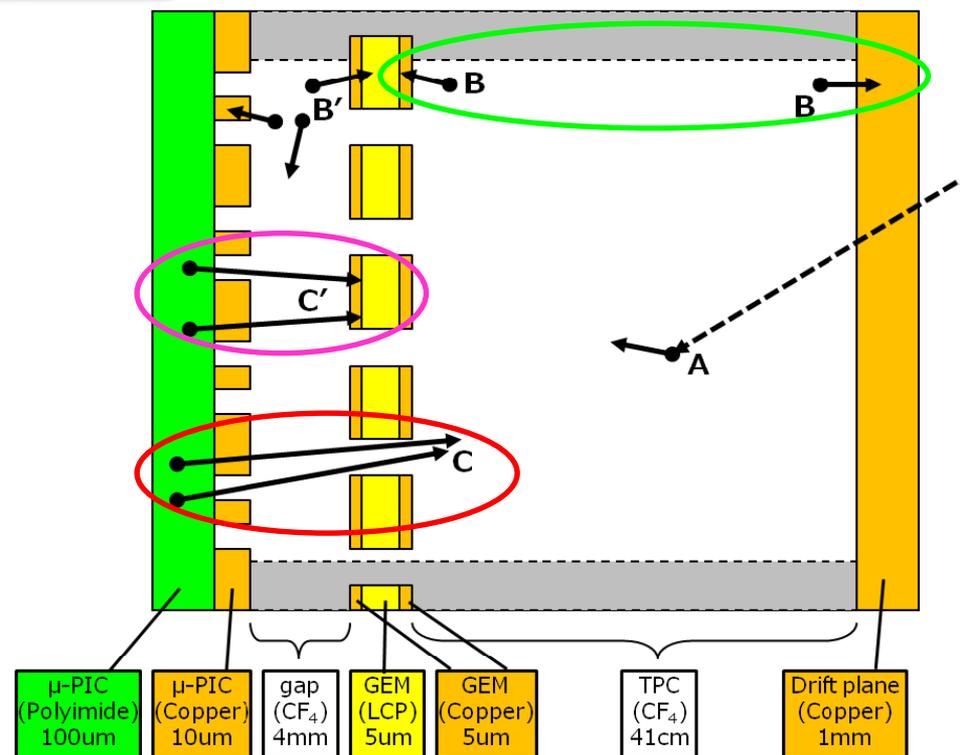
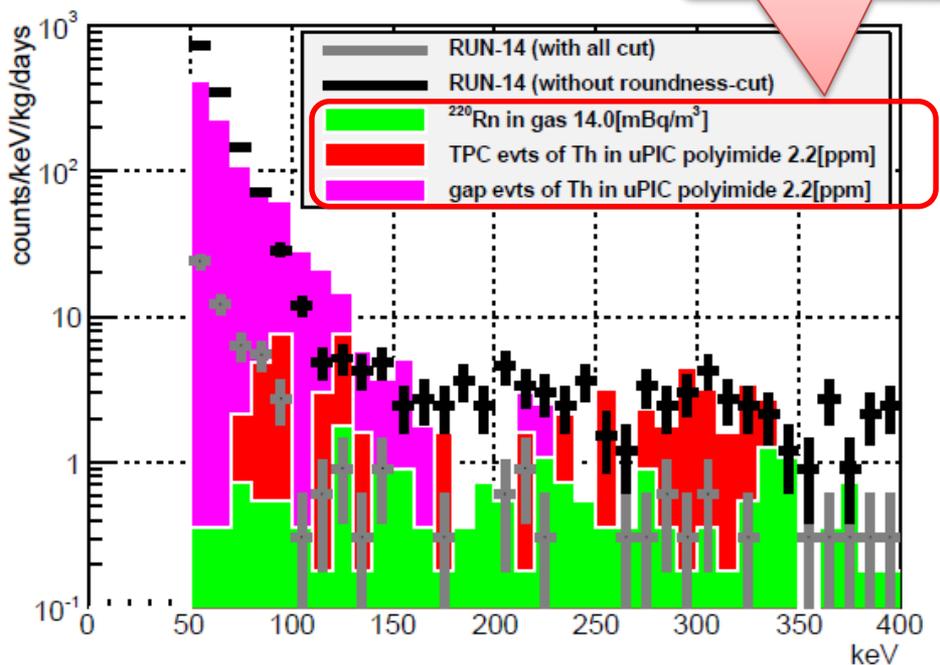
仰角分布



- 高エネBGを特定し、量を見積もった
- 詳細なジオメトリでのシミュレーション中

低エネBG

高エネBG-studyから
求めた値

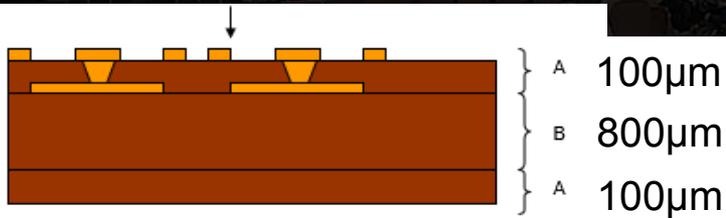


※ A,B'はneglidgebleだった

高エネのBG-studyで特定した内部BGで低エネBGを説明

BG測定 によるアプローチ

東大 蓑輪研 Ge検出器を用いた測定
μPIC 材料(ポリイミド) 測定



μ-PIC断面図(A,Bともにガラス繊維強化ポリイミド)



放射平衡を仮定
誤差は系統誤差

^{238}U [ppm]

^{232}Th [ppm]

ポリイミド

0.450 ± 0.096

1.95 ± 0.41



バックグラウンド

高エネルギーBG

- 内部由来 (U/Thコンタミからの α 線)

二つのアプローチによるBG源解明 中

低エネルギーBG

- 外部由来 (環境ガンマ、環境中性子)
- 内部由来 (U/Thコンタミからの α 線)

NEW

内部由来 U/Thコンタミ含有量測定

本計画研究での目標：

U Th含有量が現行の1/100以下の材料を用いた μ PICの製作

方向に感度を持つ、
スピンの依存しない探索
(田中)

◆ CF₄?

● スピンに依存した探索

クロスセクション

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

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

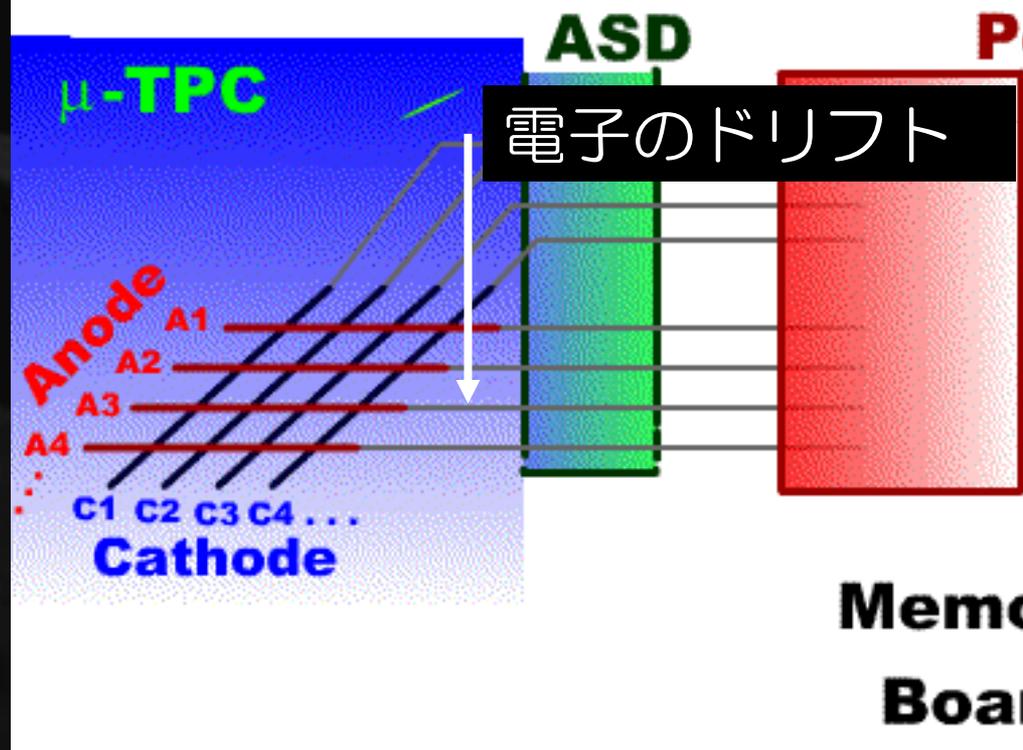
Isotope	unpaired	abundance	$\lambda^2 J(J+1)$
⁷ Li	p	92.5%	0.411
¹⁹ F	p	100%	0.647
²³ Na	p	100%	0.041
⁷³ Ge	n	7.8%	0.065
¹²⁷ I	p	100%	0.023

● 電子拡散が小さい (使いやすい) ガス

拡散

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2DL}{W}}$$

D : 拡散係数
L : ドリフト距離
W : ドリフト速度



「MAGBOLTZ」計算結果

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2DL}{W}}$$

D : 拡散係数
L : ドリフト距離
W : ドリフト速度

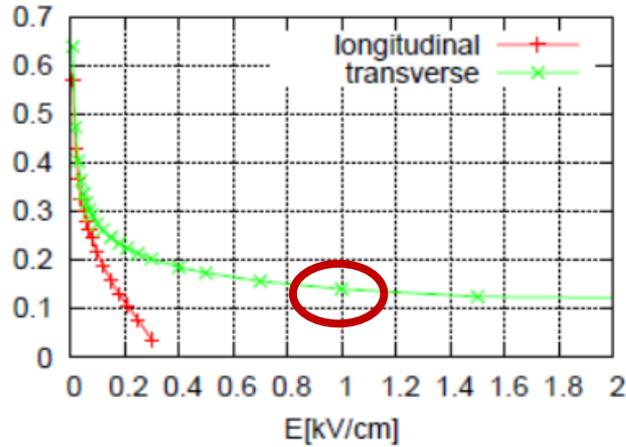
CF₄ 0.15mm @1cm
Ar+C₂H₆ 0.5mm @1cm

3倍程度拡散が小さい

角度分解能が良い

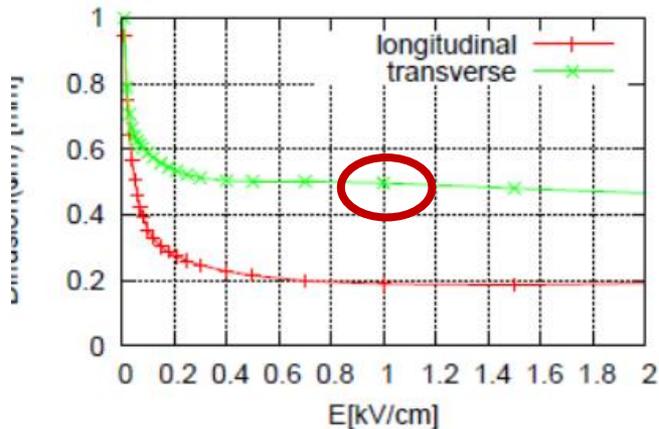
拡散[mm]@1cm

CF₄ 100%



Ar+C₂H₆ 9:1

拡散[mm]@1cm



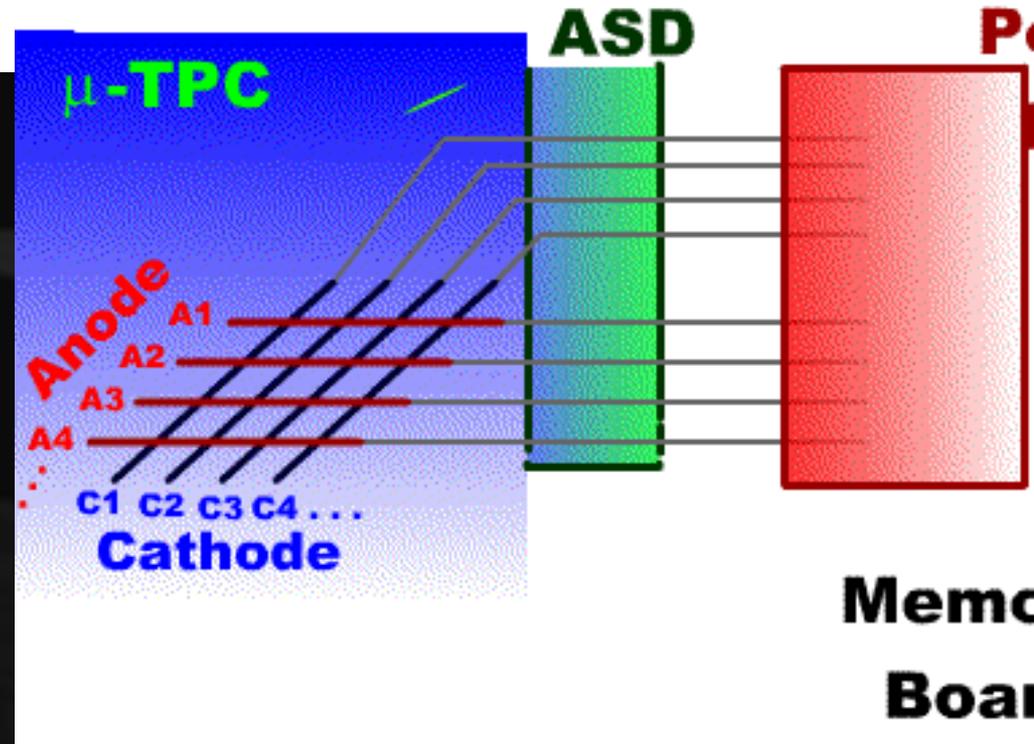
◆ スピンに依存しない探索

クロスセクション

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

$$C \propto A^2$$

- ArやXeが候補
- 拡散の影響を抑える
→ 光トリガーによるTO測定



実測に基づく提案、地下実験へ

B02班まとめ

◆ 原子核乾板

- 試作から低バックグラウンド装置へ

◆ ガス (NEWAGE)

- 低バックグラウンド化
- SIガス検討