

方向に感度のあるWIMP直接探索実験

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

京大理・宇宙線

身内賢太郎 + 西村 広展

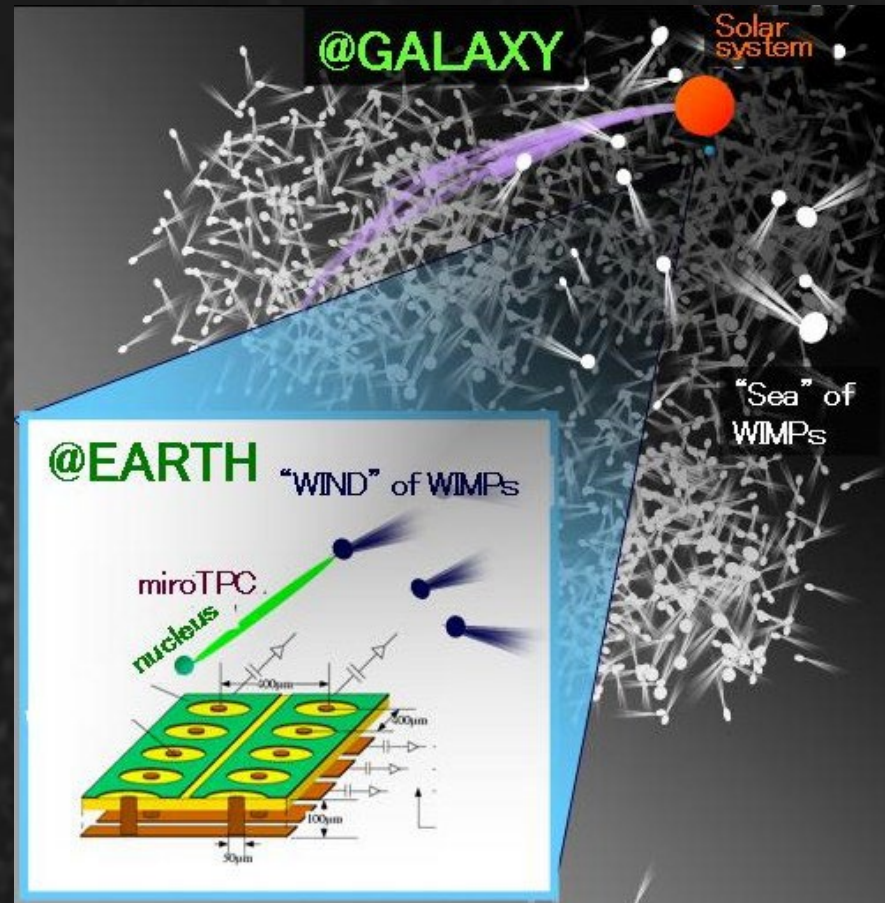
谷森達 窪秀利

土屋兼一 株木重人 高田淳史

服部香里 上野一樹 黒澤俊介

井田知宏 岩城智

竹田敦 (ICRR) 関谷洋之 (ICRR)



P.V. available at

http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/mu-PIC/NEWAGE/newage_e.htm

2007年9月30日

Direction Sensitive
WIMP-search
NEWAGE

内容

- 1、全体像（身内） PLB 578 (2004) 241
- 2、地上実験（身内） PLB 654 (2007) 58
- 3、地下実験（西村）

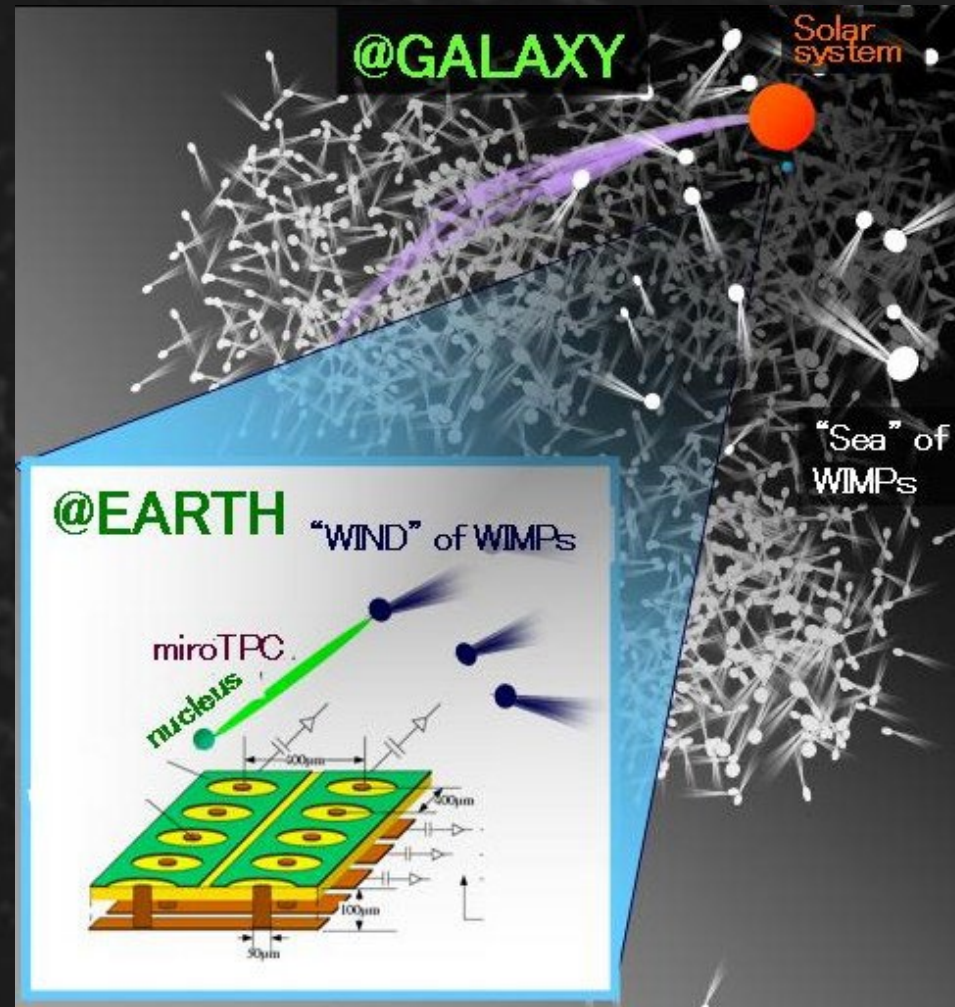
1. 全体像

◀ 究極的な目標:

暗黒物質の「風」を検出

さらには

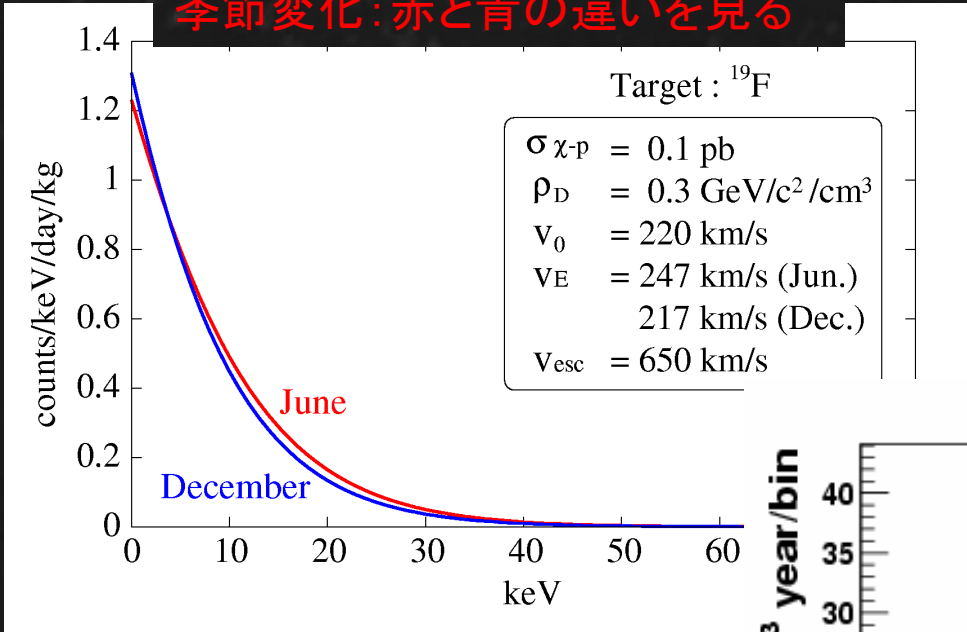
暗黒物質の銀河内での運動の観測



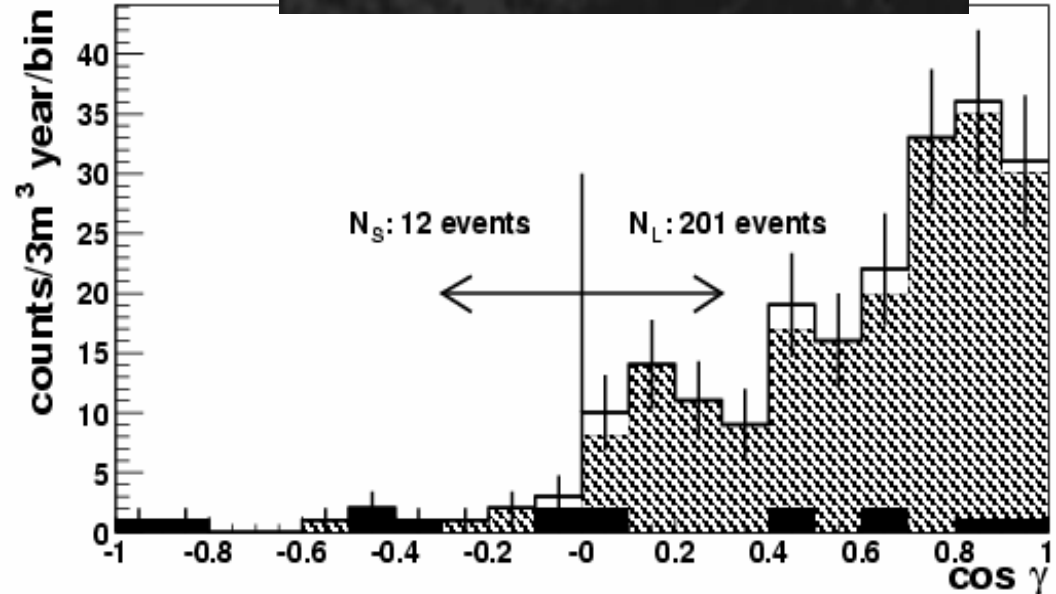
方向に感度をもった暗黒物質探索

- 提唱: 20年前 Spergel et.al. PRD37 (1988) 1353
- モチベーションは「確実な検出」

季節変化: 赤と青の違いを見る



原子核反跳方向の角度分布:
等方でないのは確実な証拠



◀ 方向に感度をもった暗黒物質探索

- 提唱: 20年前 Spergel et.al. PRD37 (1988) 1353

- DAMAや東大みのわ研のスチルベン実験
結晶の異方性で7%程度光量が変わる

方向に感度のある
最初の結果

Bernabei et.al. Eur Phys J. C 28 (2003) 203

Sekiya IDM2004 pp378

ちなみにIDM2008は2008年8月@ストックホルムにて

- 低圧カガスを用いた飛跡検出 PRL73(1994)1067
DRIFT実験(英) 10年以上R&D

なにが難しいか:

1/50気圧のガス 5mm程度の飛跡

- 最近の動向 国際ワークショップCYGNUS07など

<http://www.pppa.group.shef.ac.uk/cygnus2007/>

2007年9月30日



◆ DRIFT実験(大先輩)

DRIFT IIa design & dimensions

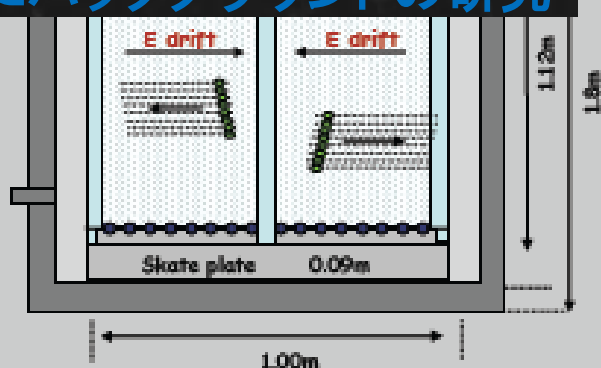
1 m³ 2台目(3台目も完成。)



- 1 m³ active volume - back to back MWPCs
 - Gas fill 40 Torr CS₂ => 167 g of target gas
- ▲ 2 mm pitch anode wires left and right
 - Grid wires read out for Δy measurement
 - Veto regions
 - Central cathode
 - Drift field 624 V/cm
 - Modular design for modest scale-up

ピッチが少々荒い
3次元飛跡が取りづらい

地下で1年以上稼働
主にバックグラウンドの研究



相手の弱点について
「NEWAGE」開始
(funded 2004~)

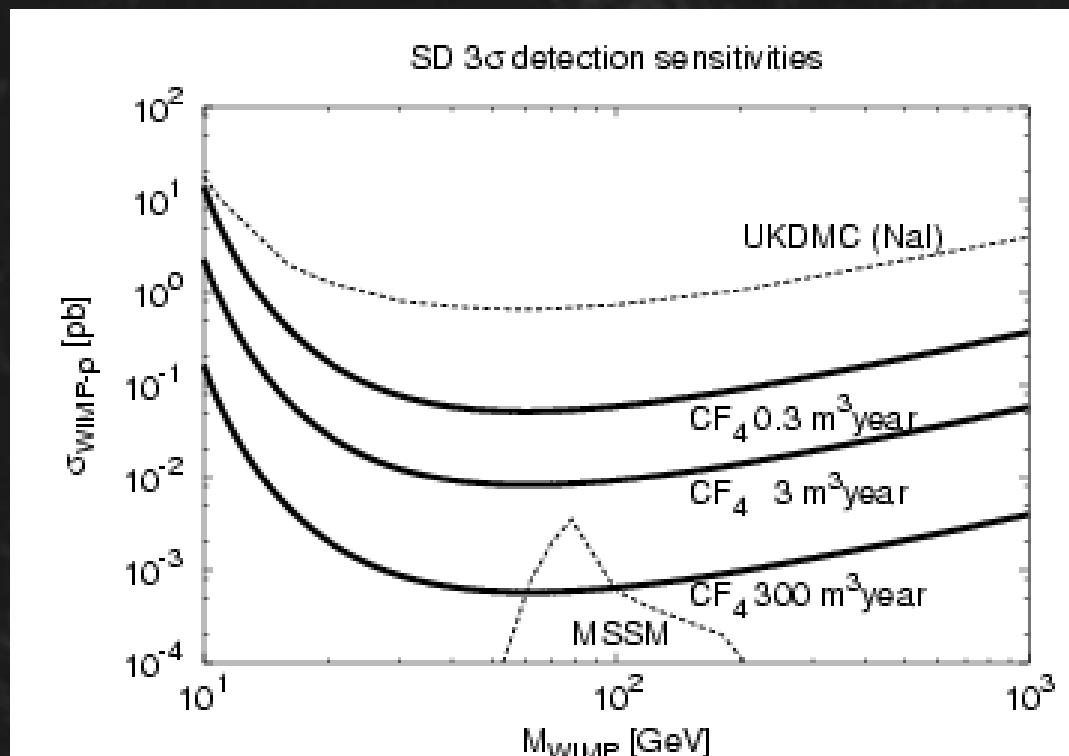
DRIFT実験との比較

項目	DRIFT	NEWAGE
検出器ピッチ	2mm	0.4mm
読み出し方法	1+1+1 次元(MWPC) (3次元飛跡検出研究中)	2+1 次元(μ PIC) (3次元飛跡検出実績あり)
使用ガス(現行)	CS ₂ (スピン依存しない カップリングを探れる)	CF ₄ (スピン依存のカップリングを探る。 飛跡検出器の性能は良い)
サイズ(現行)	1m角(170g)	30cm角 (10g)
暗黒物質実験	未	やりました
開発	1990年代前半	2002~
地下実験	2001~	2007~

◆ 感度とでかさ

これから3年で60cm角TPCを製作予定

最後は100m³以上の装置 (例えば10×10×3m³)で観測を



◆ ついでにXMASSとの比較

● 大質量検出器 (XMASS)

- 統計が稼げる: 制限曲線を押し下げる
- 証拠は季節変動に頼らざるを得ない

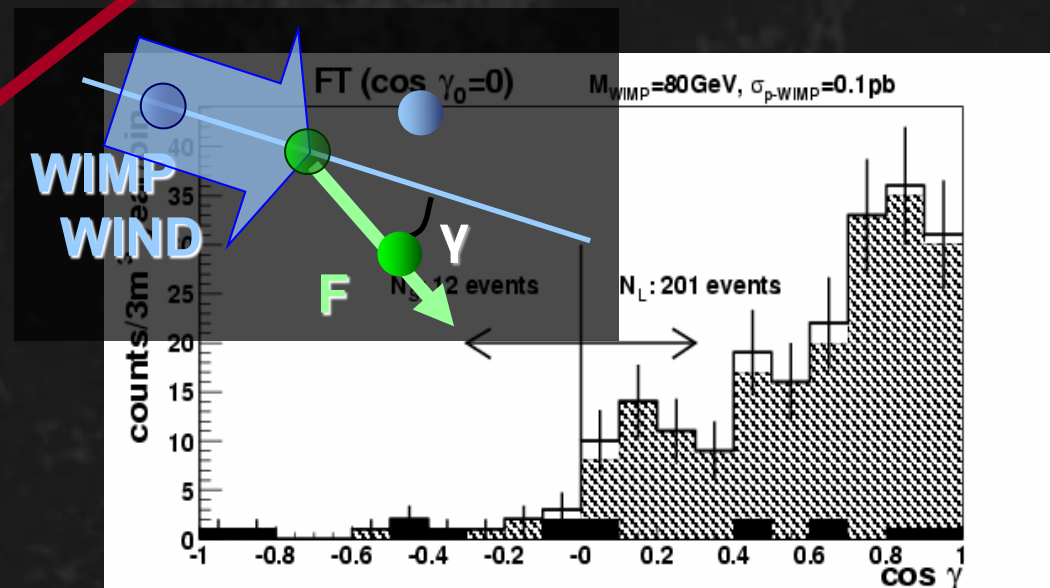
● 方向性検出器 (NEWAGE)

- 「原子核反跳の非対称性」という強い証拠
- 統計は少ない (ただし、**1/1000**の統計で同等の感度)

3 σ で見るとは

季節変動 5% ~10000発

非対称性 10倍 ~10発



◆ XMASSとの比較 (2)

- 検出感度: XMASS 1t \Leftrightarrow NEWAGE 1kg
- 容積: Liq Xe 1tの安全バッファー \sim 170m³
CF₄ ガス(30 torr)F 1kg \sim 7.5m³

Complementary
&
Comparable

◆ という風に

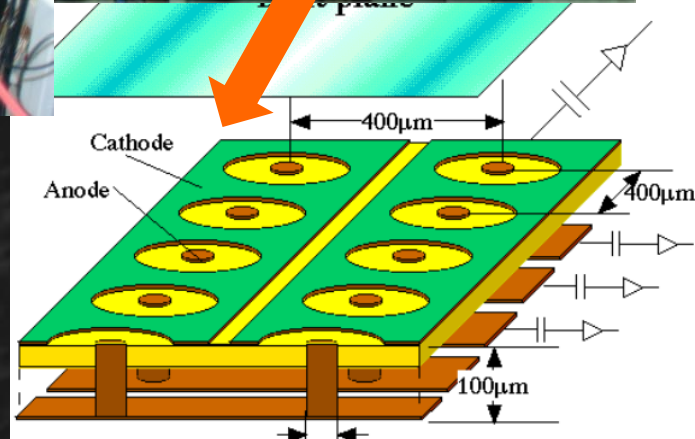
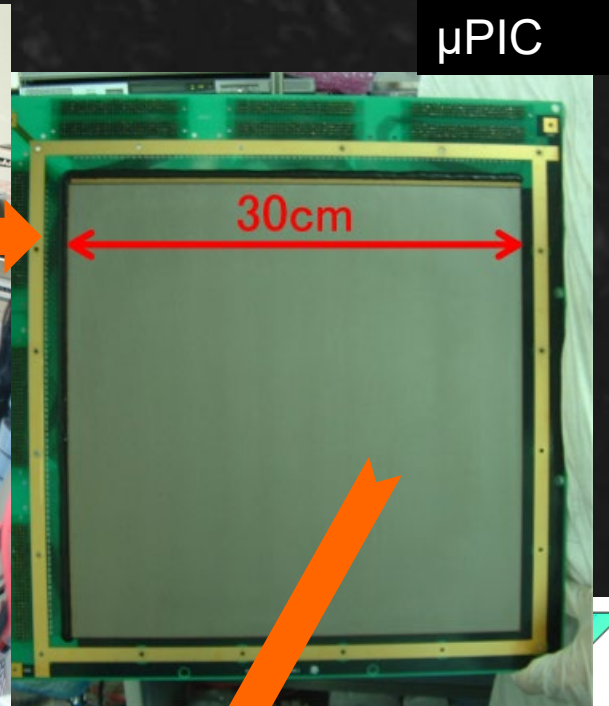
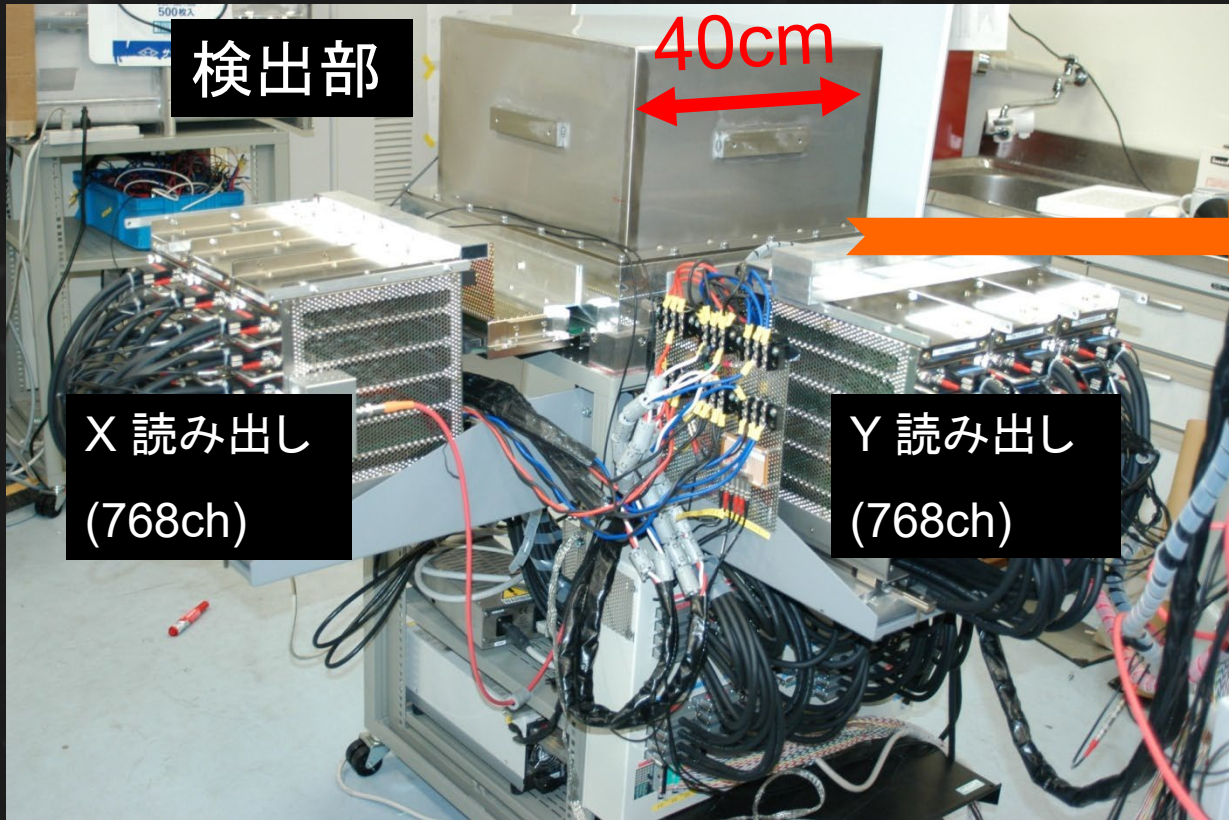
大先輩DRIFT とか 巨艦XMASS とかに

一方的に挑んだのが2004年秋の学会

それから3年後、 のはなし

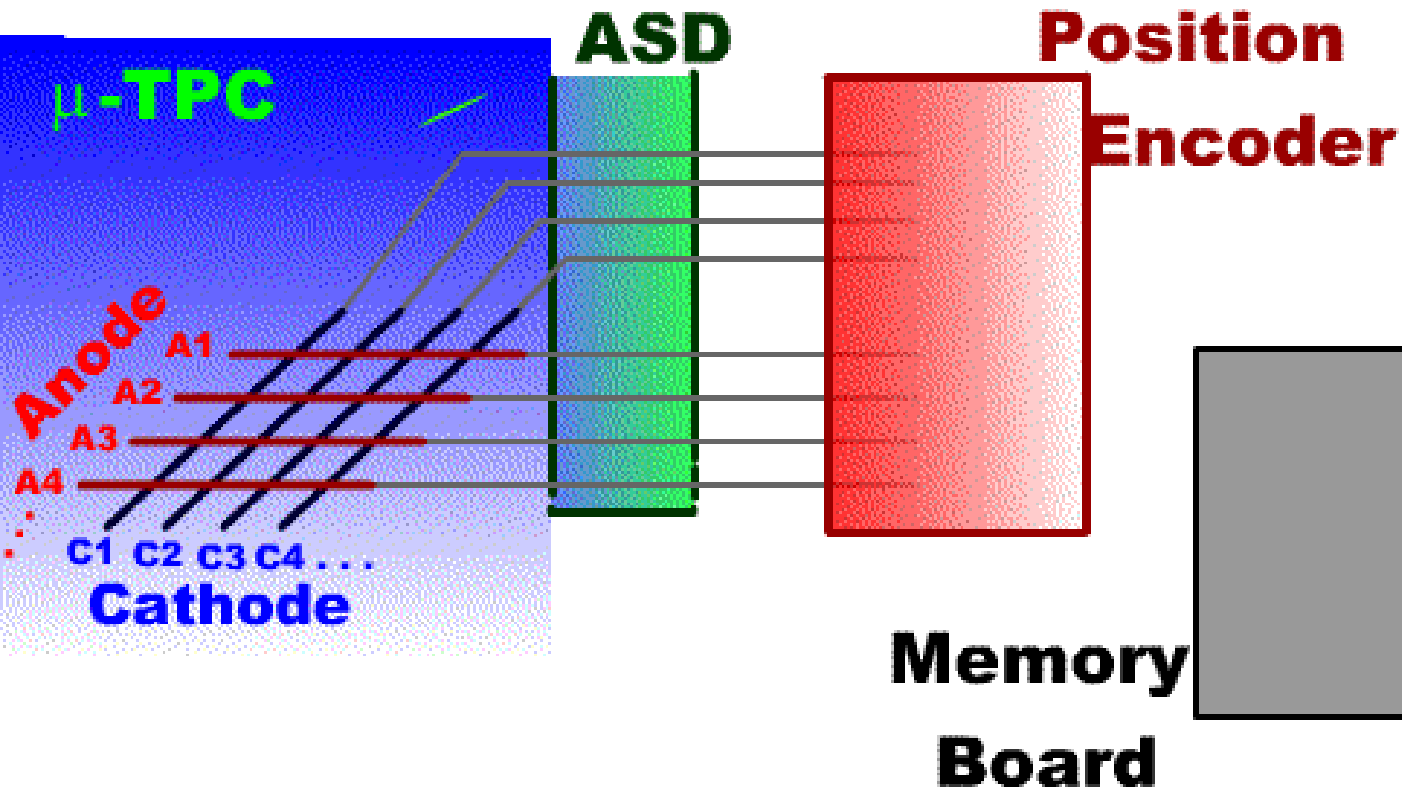
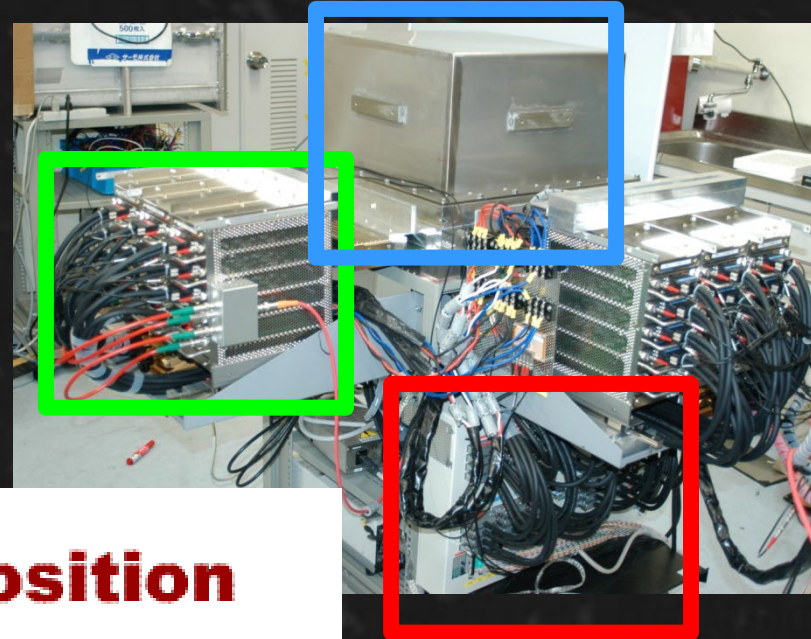
2. 地上実験

◆ ちょっとだけ検出器 μ PIC (「谷森detector」)



3次元飛跡をとる仕組み

- 「TPC」:一般的な手法
+独自の「パイプライン方式」



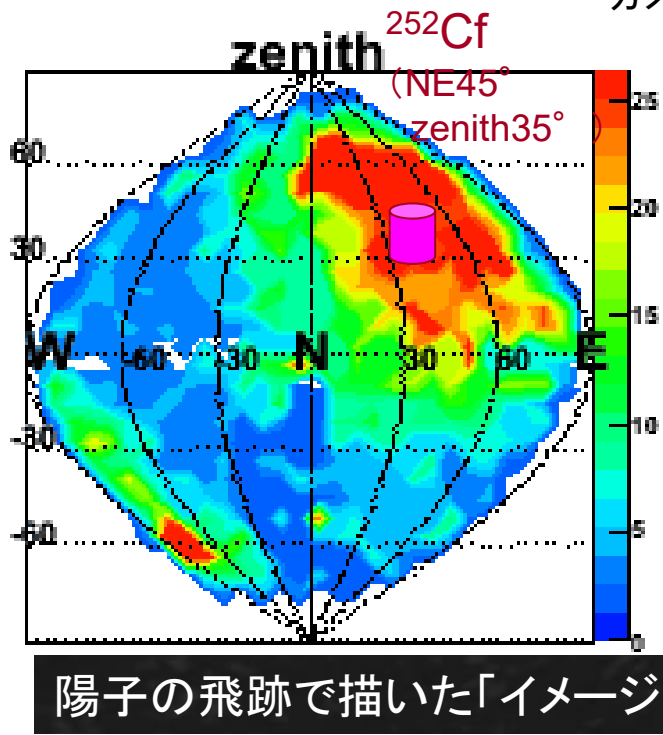
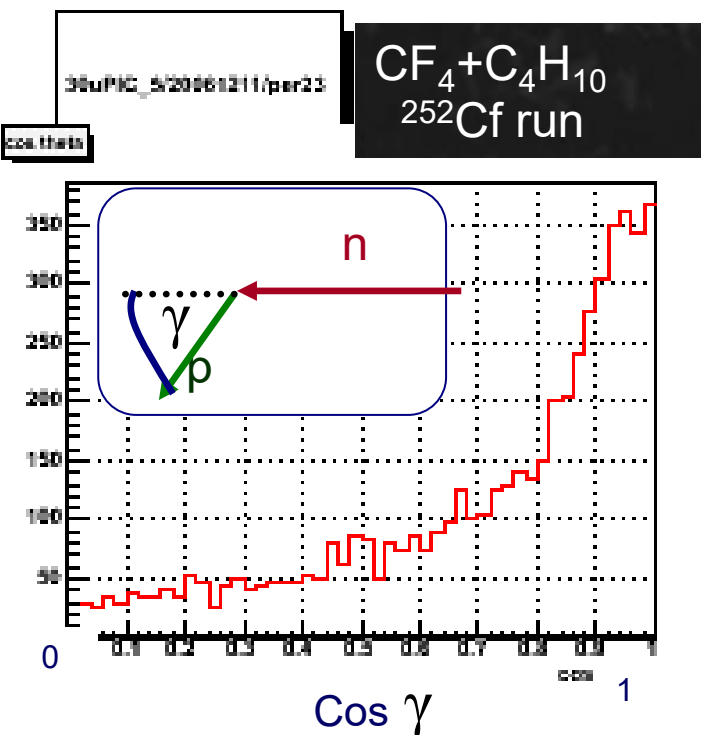
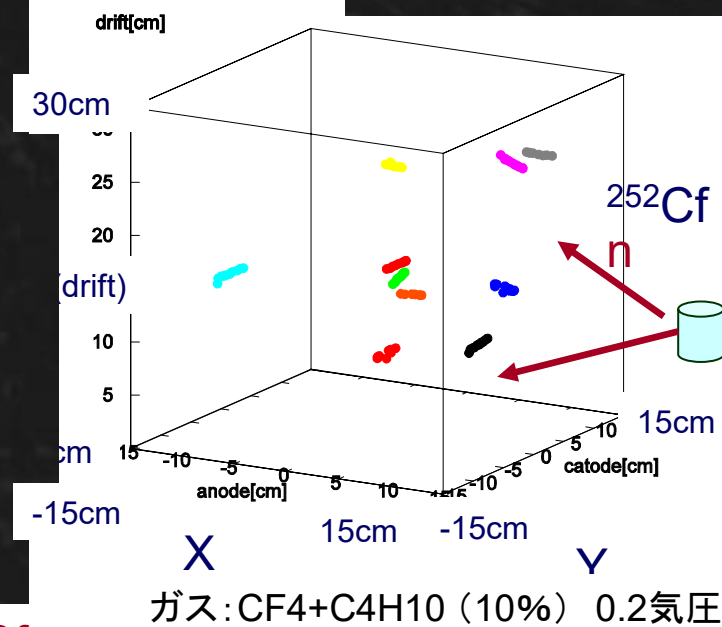
◆ ガス検出器の特徴

- 原子核の飛跡検出(3次元)
- ガンマ線バックグラウンド排除

飛跡検出、イメージング

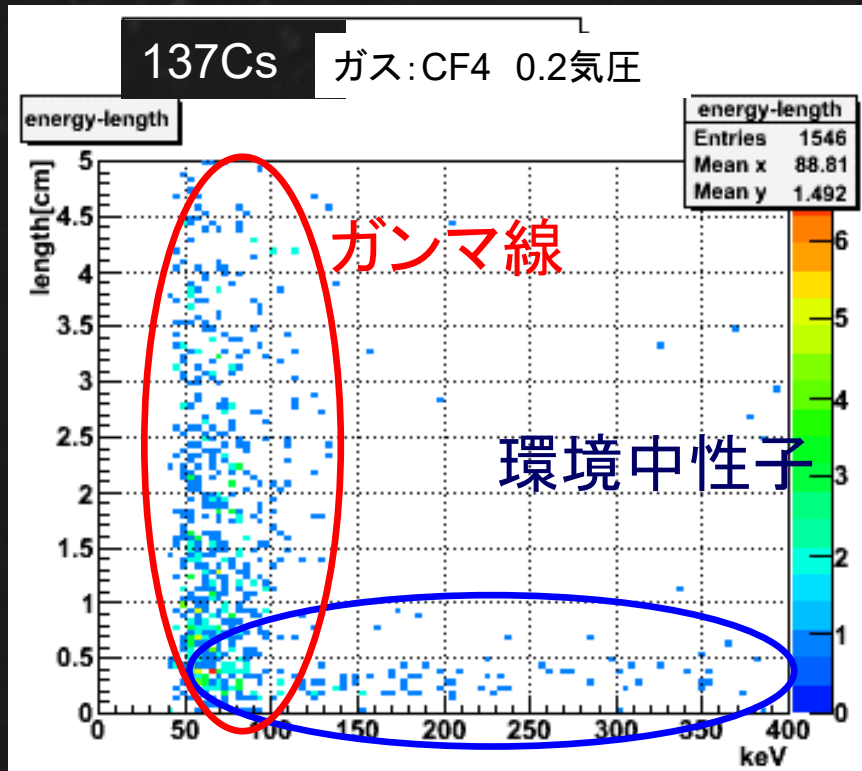
- 中性子に反跳された陽子を検出
- 前方に散乱される様子が見えている
- WIMP → フッ素の反跳で見たい現象をエミュレート

陽子飛跡の例



ガンマ線BGの除去

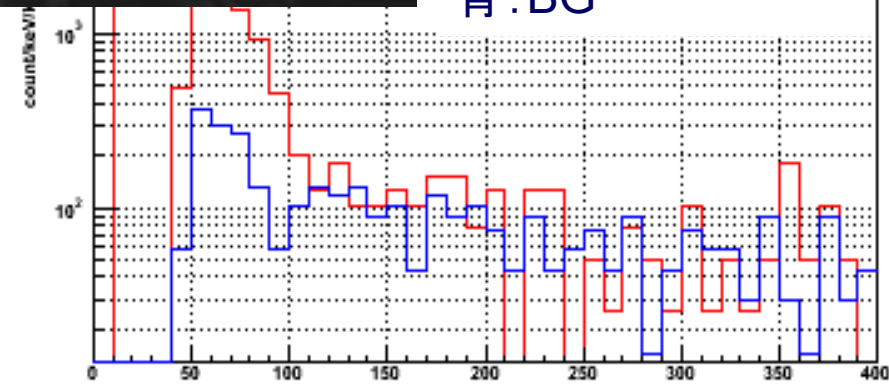
- ガンマ線:最大のBG源
- ^{137}Cs からのガンマ線を照射



スペクトル
(飛跡1cm以下)

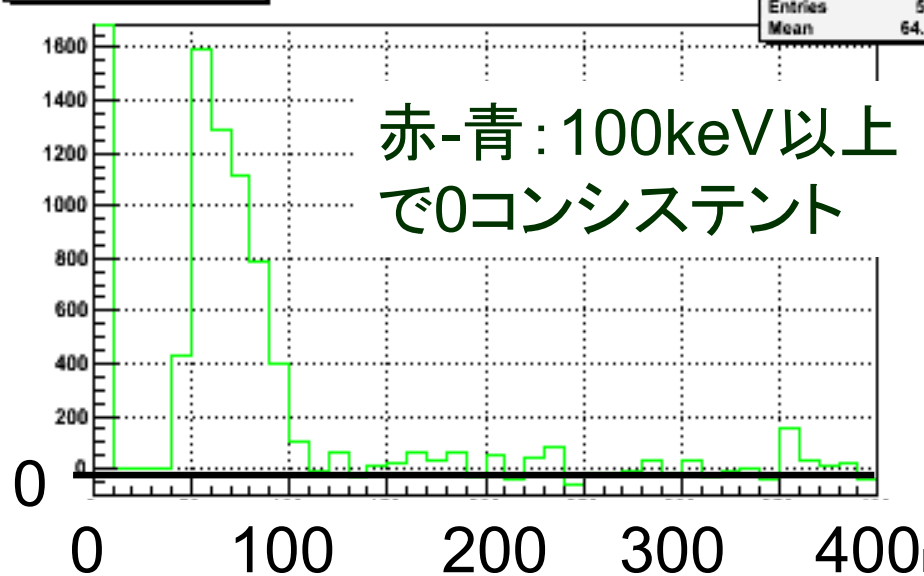
赤: ^{137}Cs 照射

青: BG



subtraction

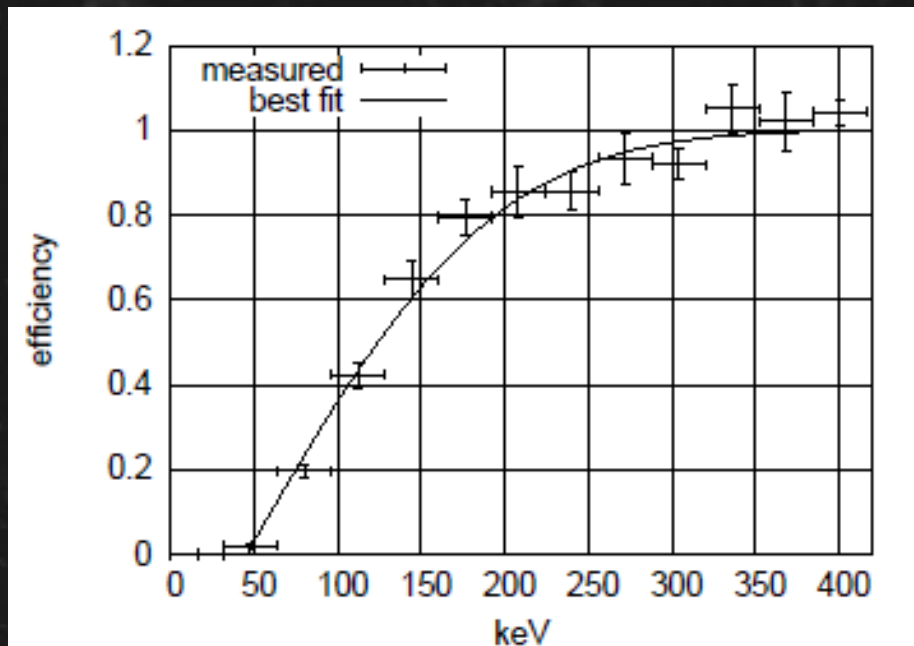
subtraction



100keV以上では 99.98%以上の除去力

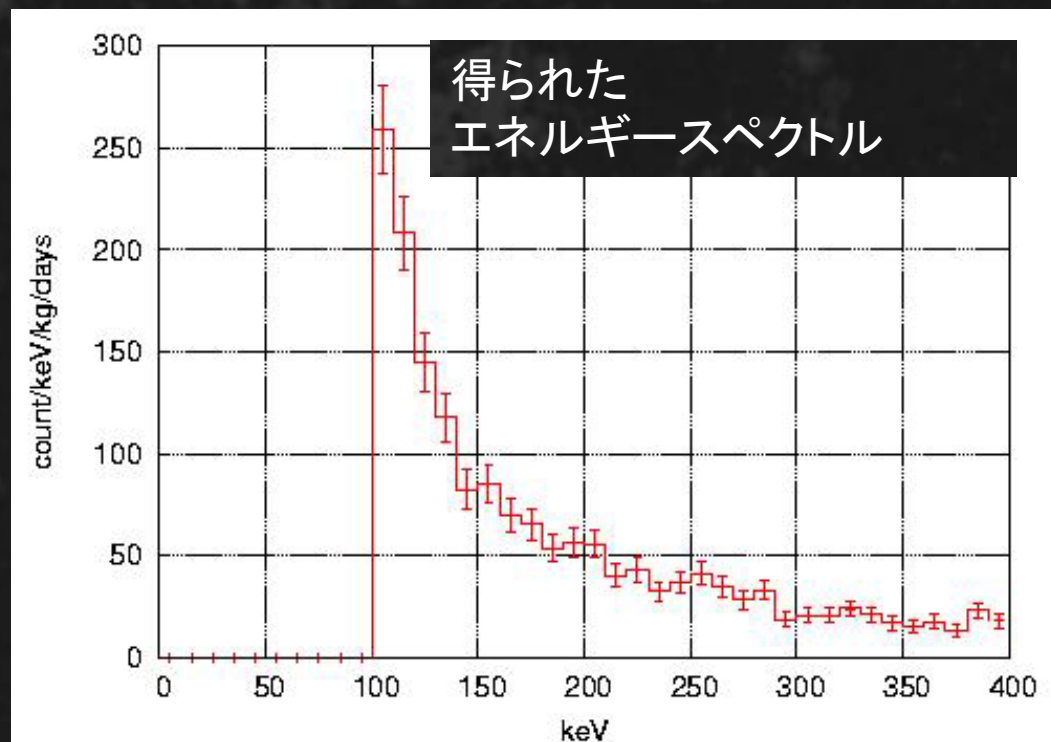
その他、検出器の性能 @100keV (まだまだ発展途上)

- エネルギー分解能 70%FWHM
- 位置分解能 800 μ m
- 角度分解能 25%HWHM
- 原子核飛跡検出効率 40%



地上でのDM探索実験

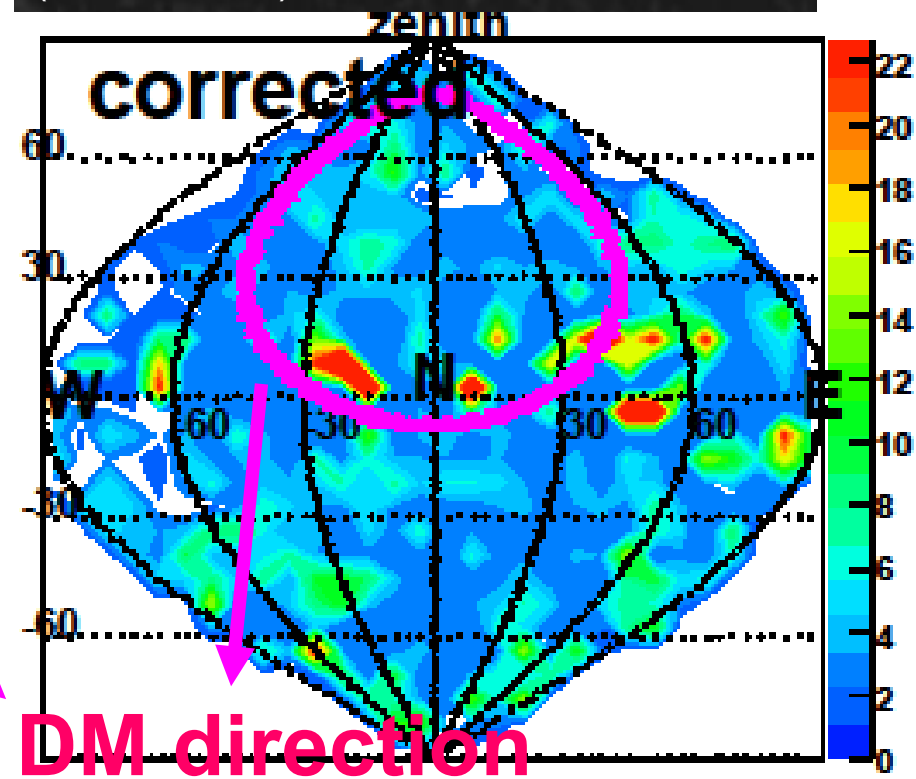
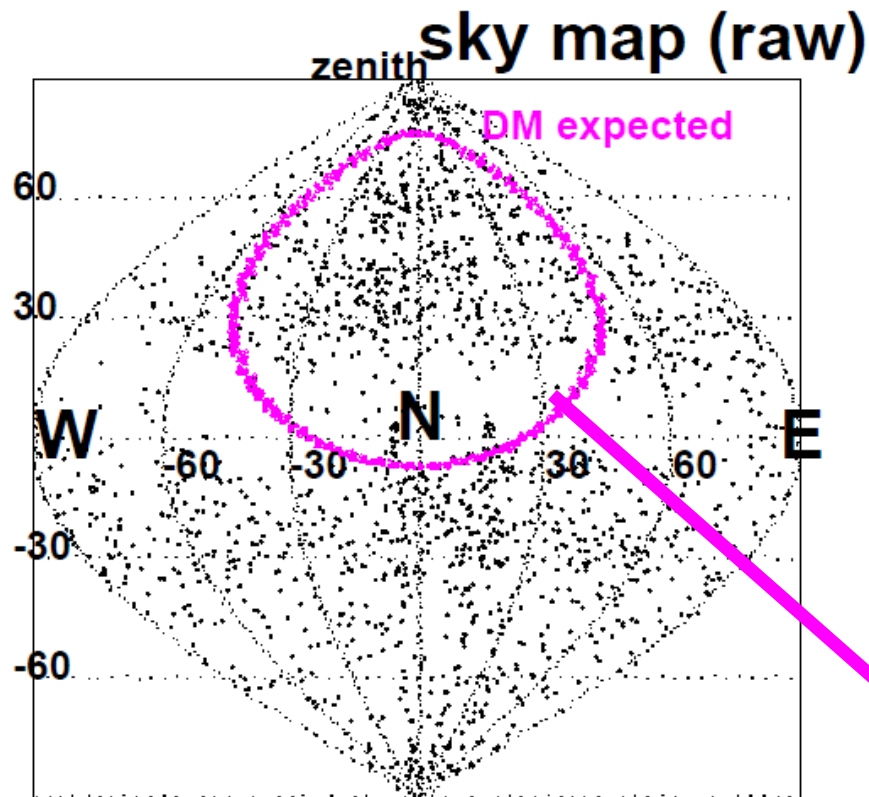
- (悪いのは承知で)とにかく制限をつけれることを示す
- 原子核飛跡を用いた手法では初めて
- 2006年11月1日～11月27日
- exposure 0.15 kg days
- @京大 (北緯35.03 東経135.783)
- シールドなし



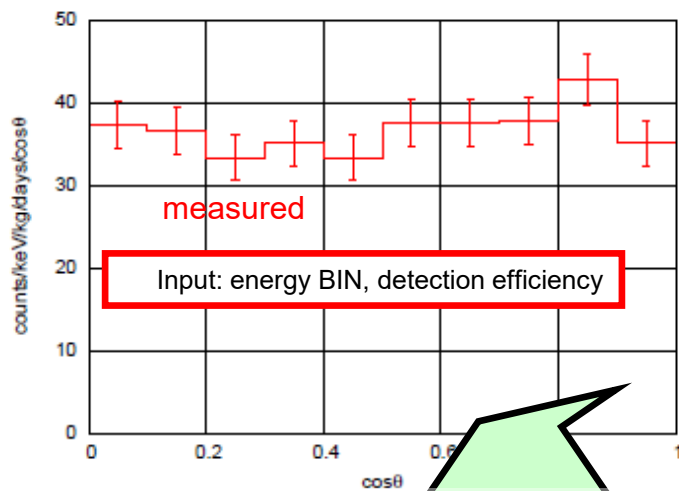
● 方向に感度を持った解析

- 原子核飛跡で描いた半天マップ(左が生 右が検出器応答を考慮したもの)
- 検出器応答を考慮すると、地上での等方的な中性子BGが見えている。
- ピンクが「CYGNUS」方向

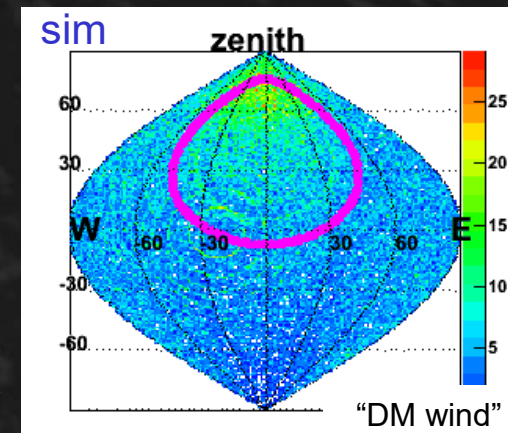
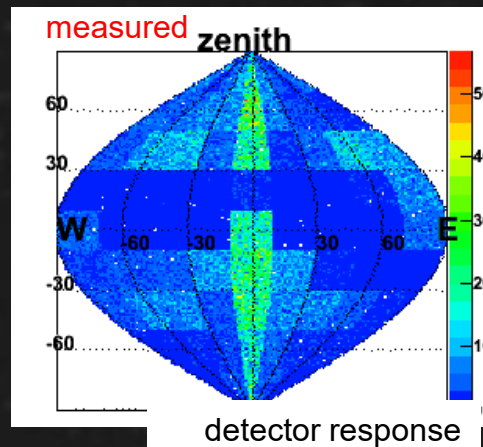
North sky view seen by C and F nuclei
(100-400keV)



DATA



simulation



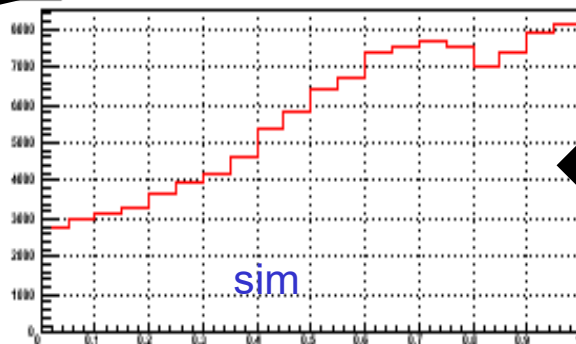
×

Input: E resolution, angular resolution, WIMP mass, energy BIN

comparison

cross section

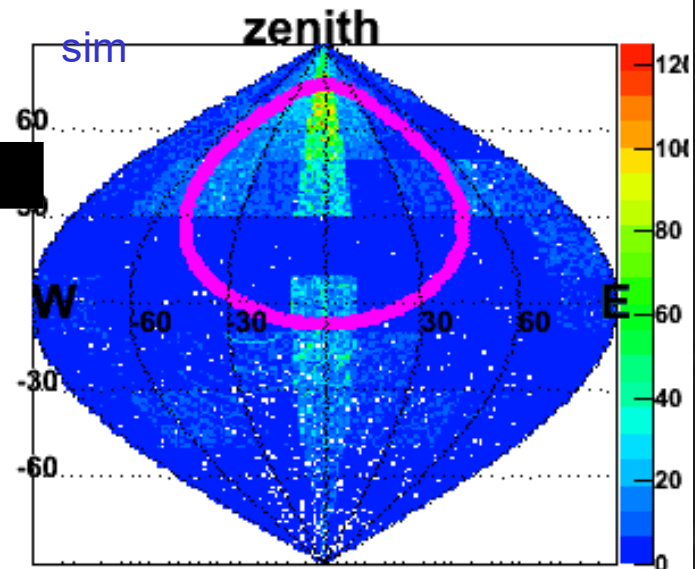
For given WIMP mass, energy bin



Expected $\cos\theta$ distribution (DM)

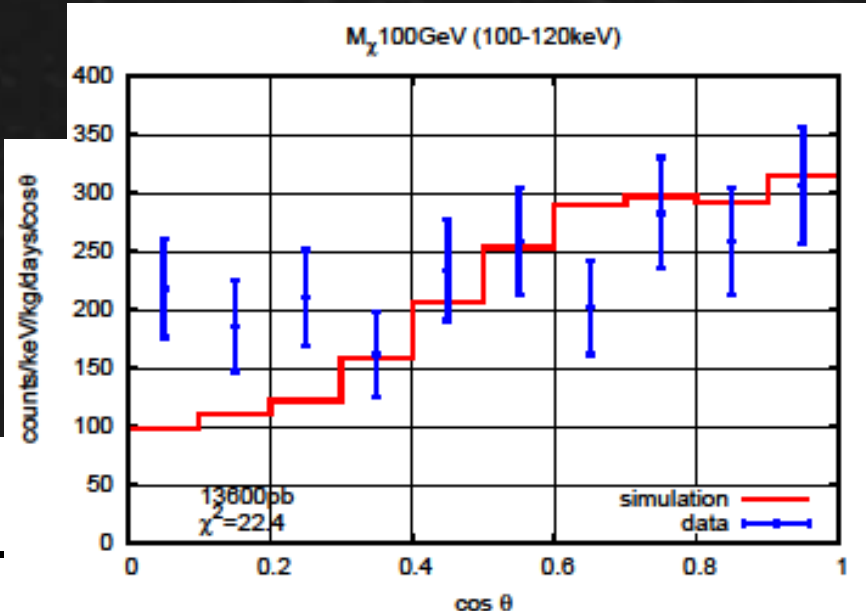
given WIMP mass, energyBIN

仮定:
等方ハロー
マクスウエル分布
($v_0=220\text{km/s}$)
 $V_{\text{esc}}=650\text{km/s}$



Expected "DM wind"

Cosθ 分布
(100-400keV)

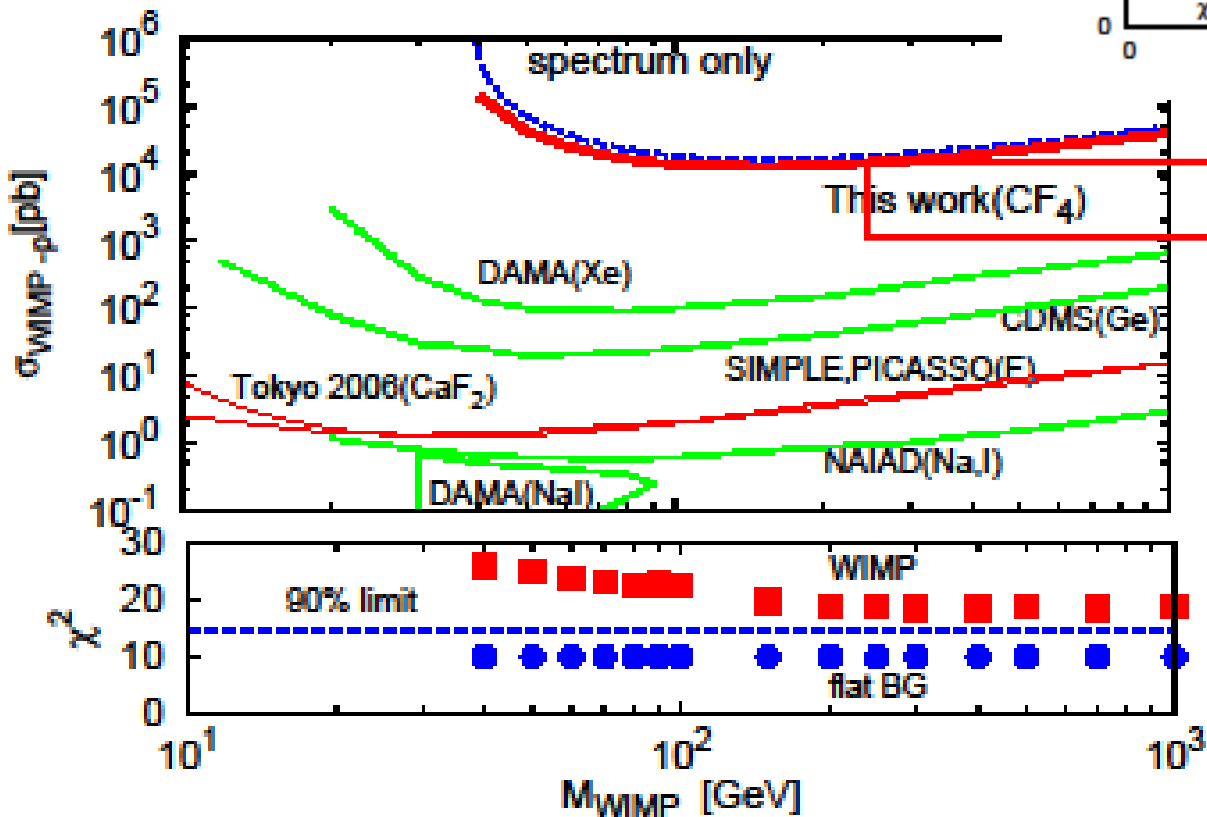


結果

- DMの信号は χ^2 テストで排除
- 方向に感度をもった初の制限
- BGを減らすことで感度向上を。

DM limit

SD 90% upper limits



- ものすごくエキゾチックなハローモデルは制限できていないはず。



そして地下実験へ(西村)

NEWAGE

～神岡地下実験報告～

2007年9月29、30日 暗黒物質と銀河構造 於 ウェルサンピア伊勢

京都大学 理学研究科 西村 広展

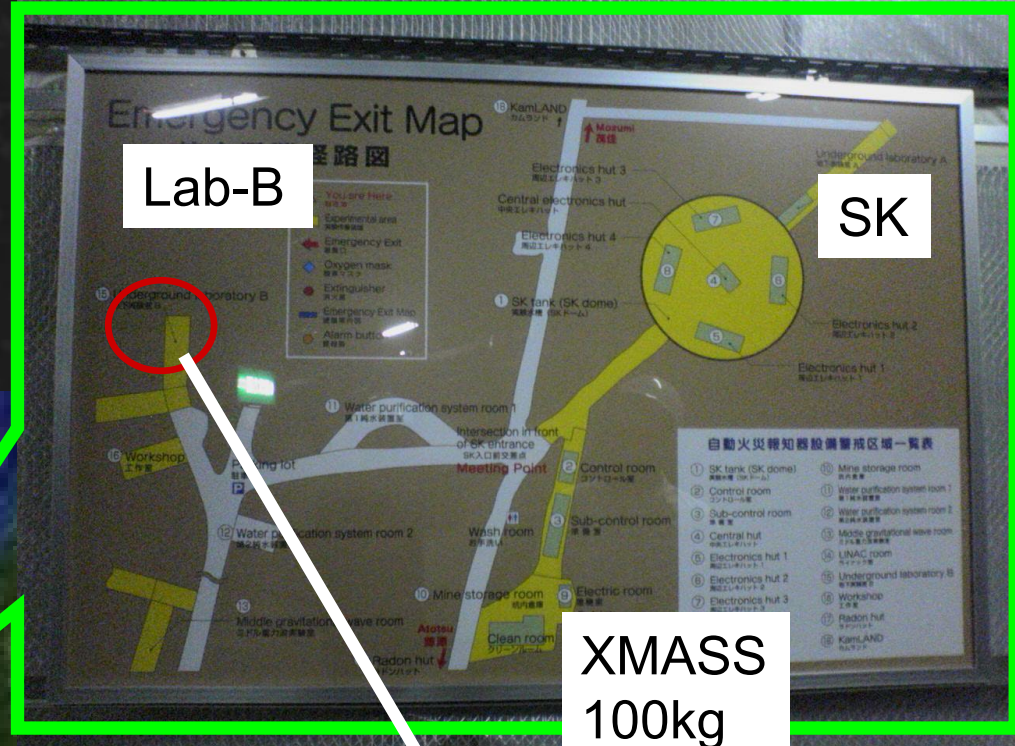
谷森達, 窪秀利, 身内賢太郎, 土屋兼一, 株木重人, 高田淳史,
服部香里, 上野一樹, 黒澤俊介, 井田知宏, 岩城智



NEWAGE @ 神岡

- 神岡鉱山
- 2700m w.e depth

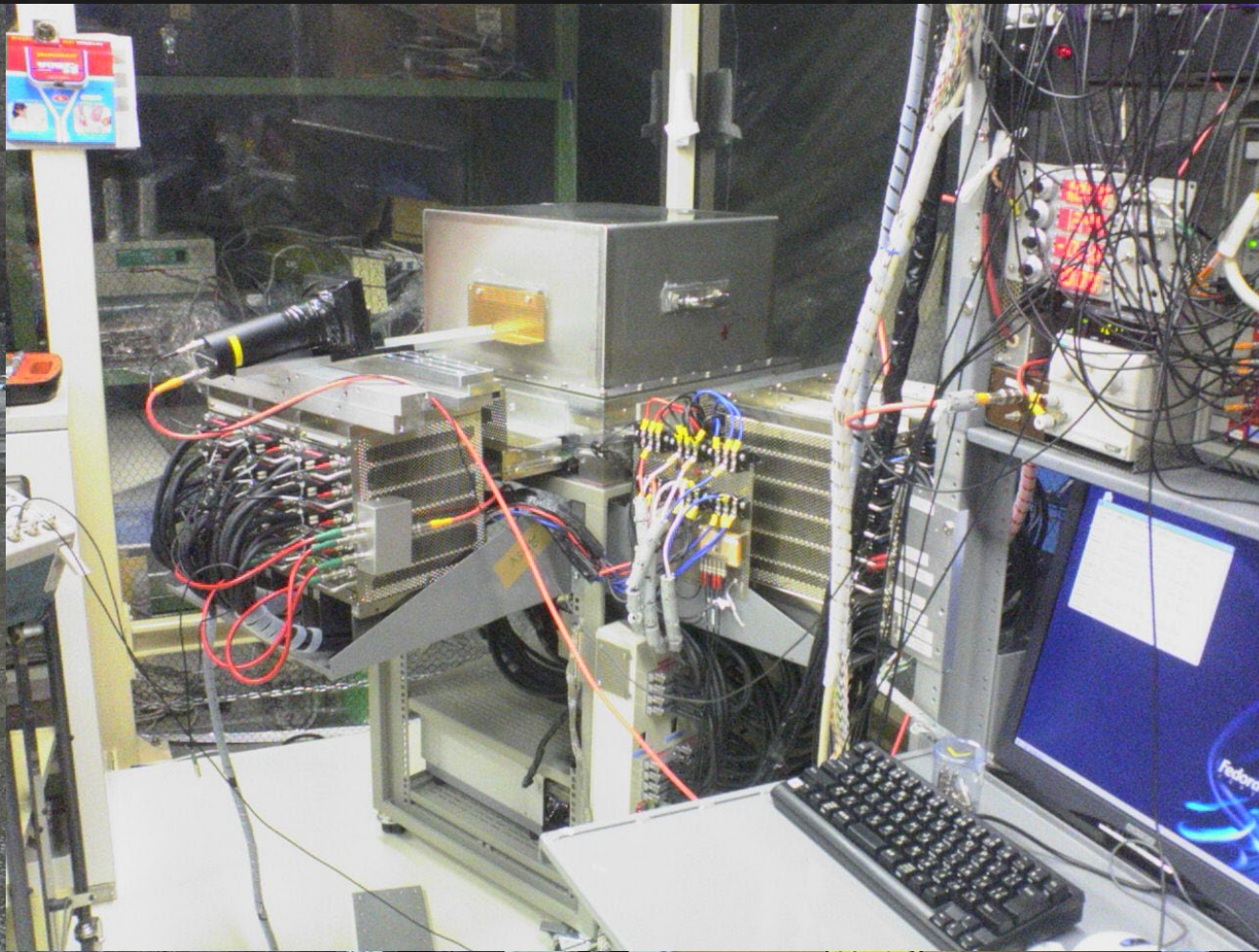
- 目的
- 安定動作確認
 - Background Study



旧重力波実験室
旧(?) 蓑輪研実験室
を利用



検出器の搬入・組み立て

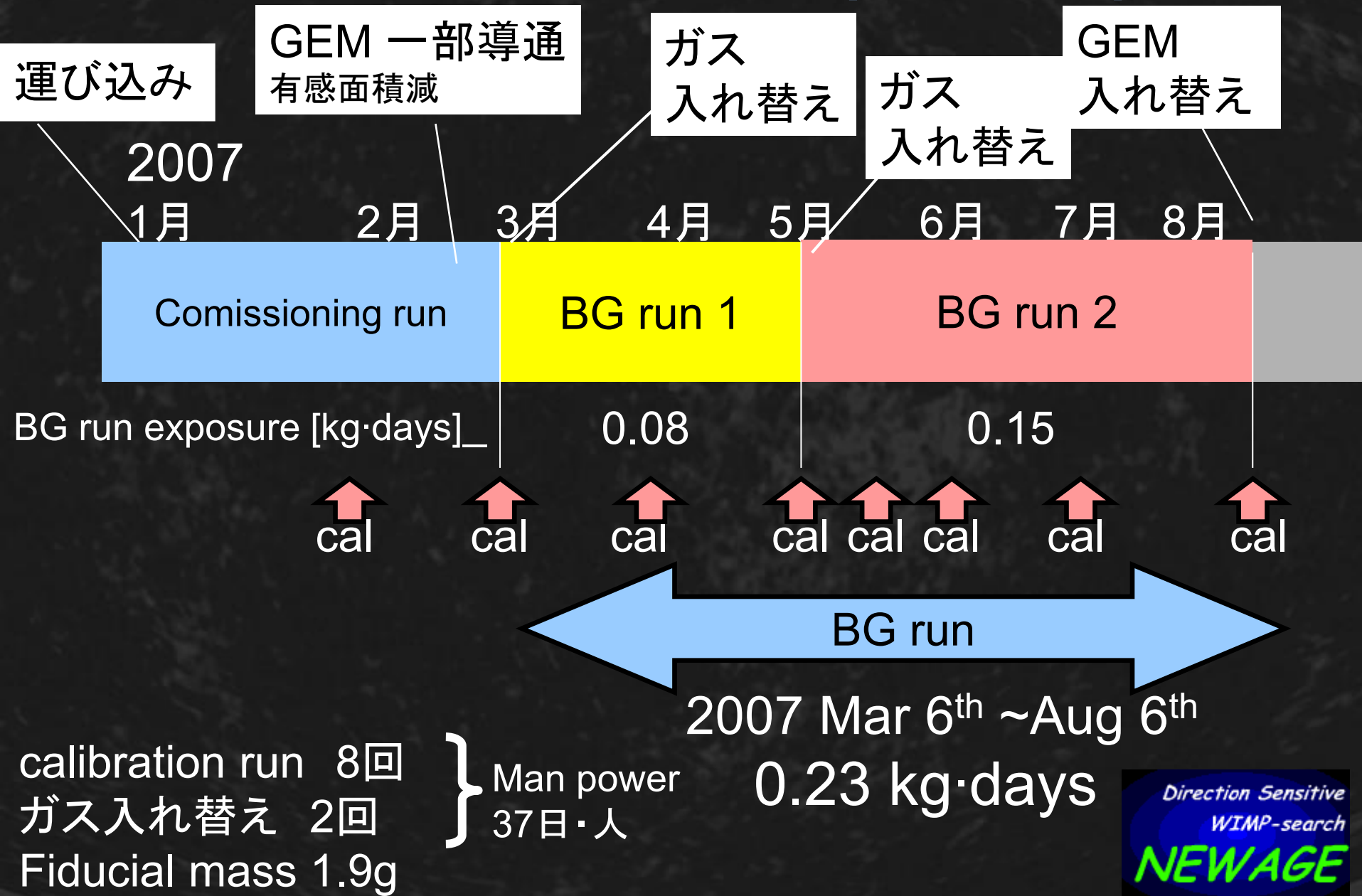


◀ 1/16 搬入

◀ 1/19
測定開始

8人・days

神岡operation 2007 (上半期)



Stability(BGrun2)

● Gas gain

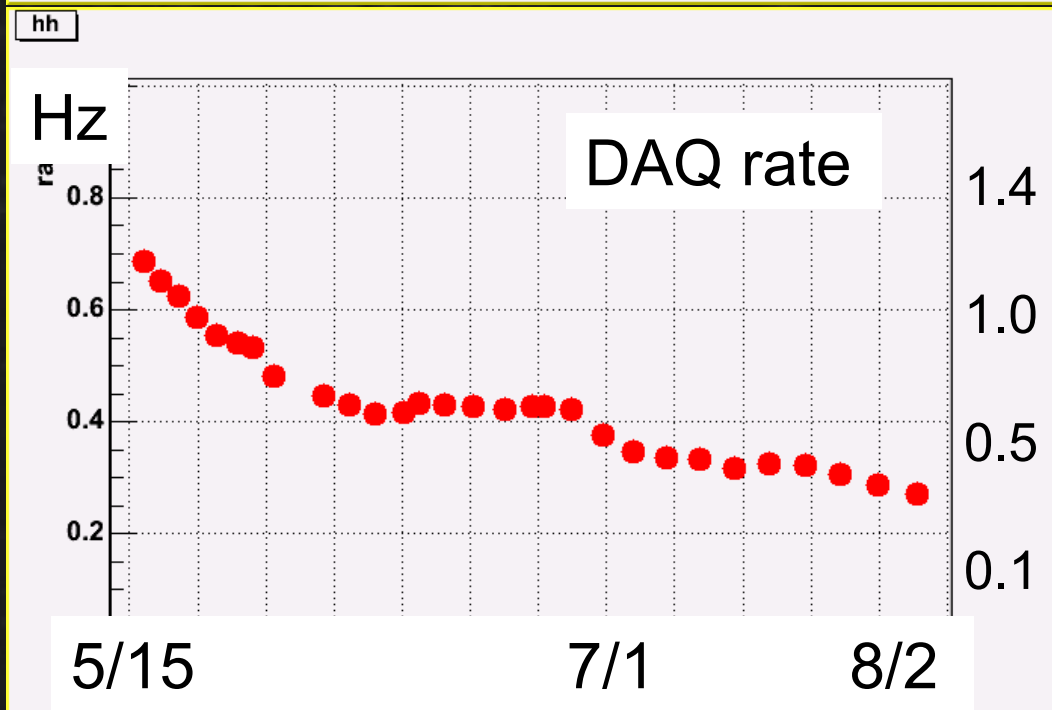
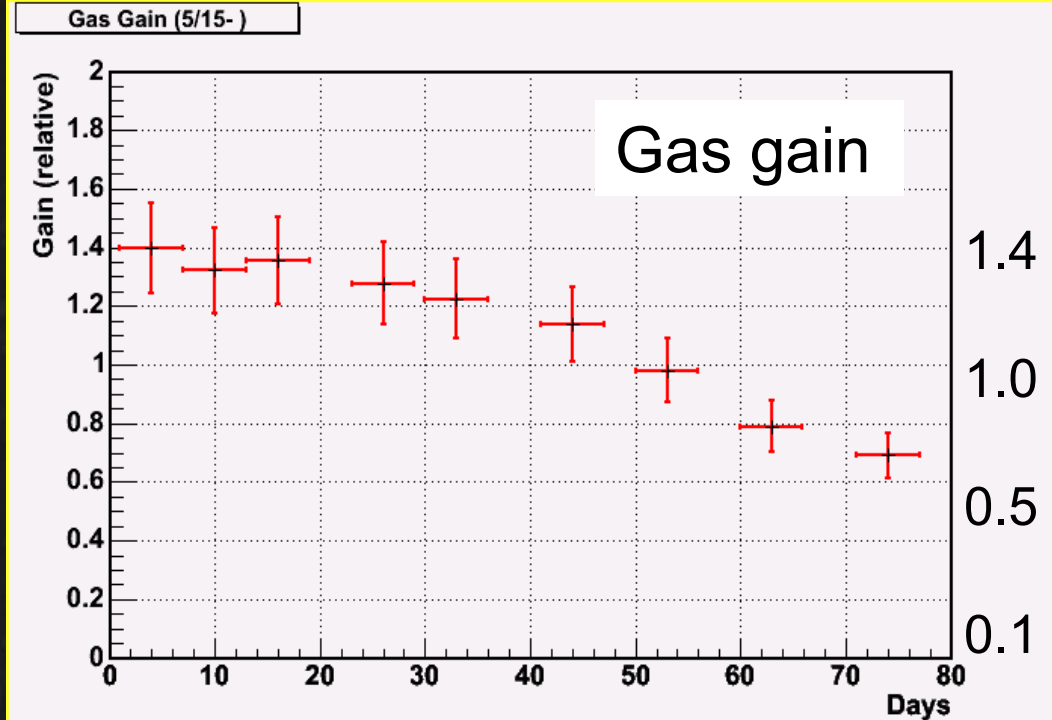
&DAQ rate:

ゆるやかな落ち込み

10%~20% / month

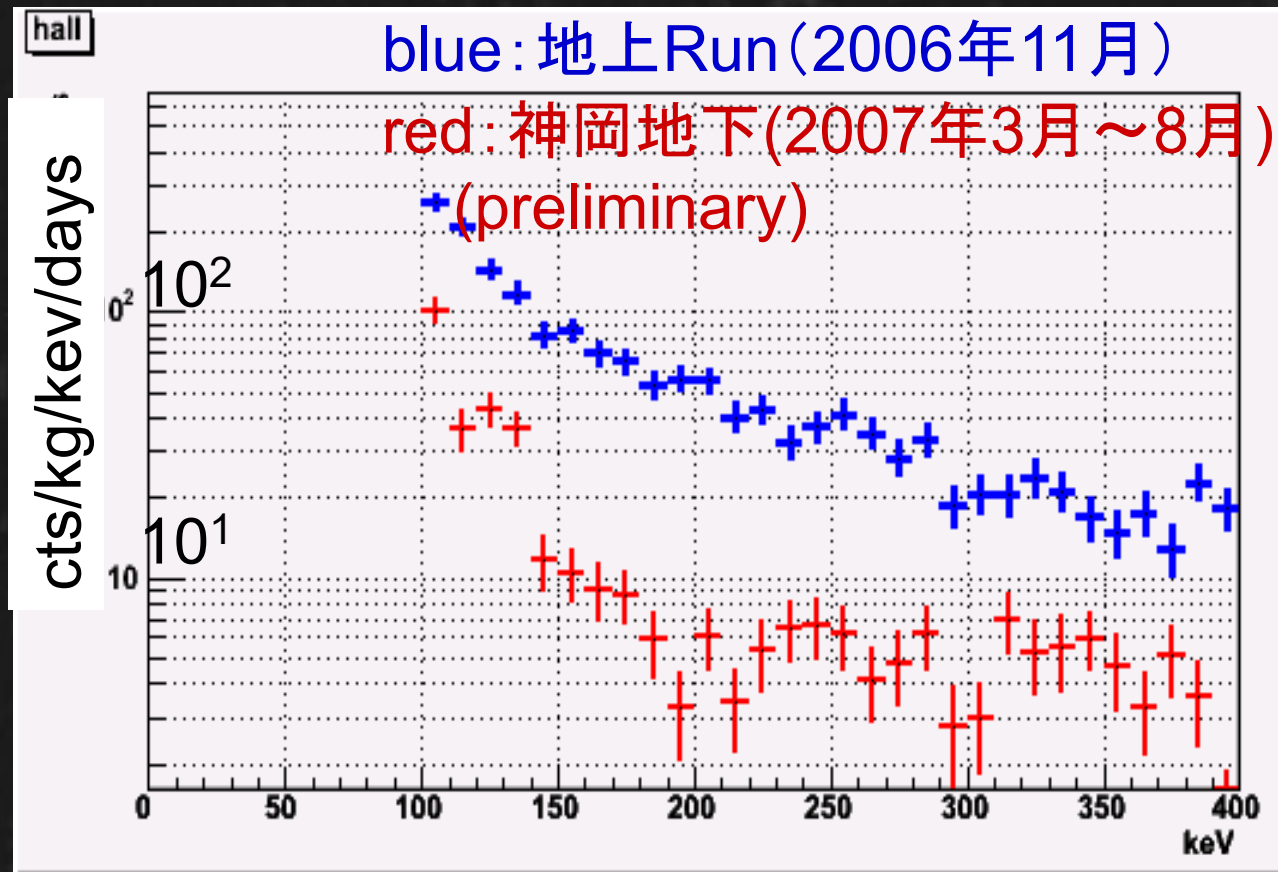
→解析時に補正可能

→ガス入れ替えて復活



Spectrum (preliminary)

- BGrun1 + BGrun2 2007年 3月~8月
- 0.23kg·days
- BGは40%減 @100keV



地上よりは少ないけどまだまだある。→検出器起源

Background排除能力について(現状)

◆ 荷電粒子線

Fiducial cut により横方向からのものは排除
内部発生及び上下方向からは排除不可

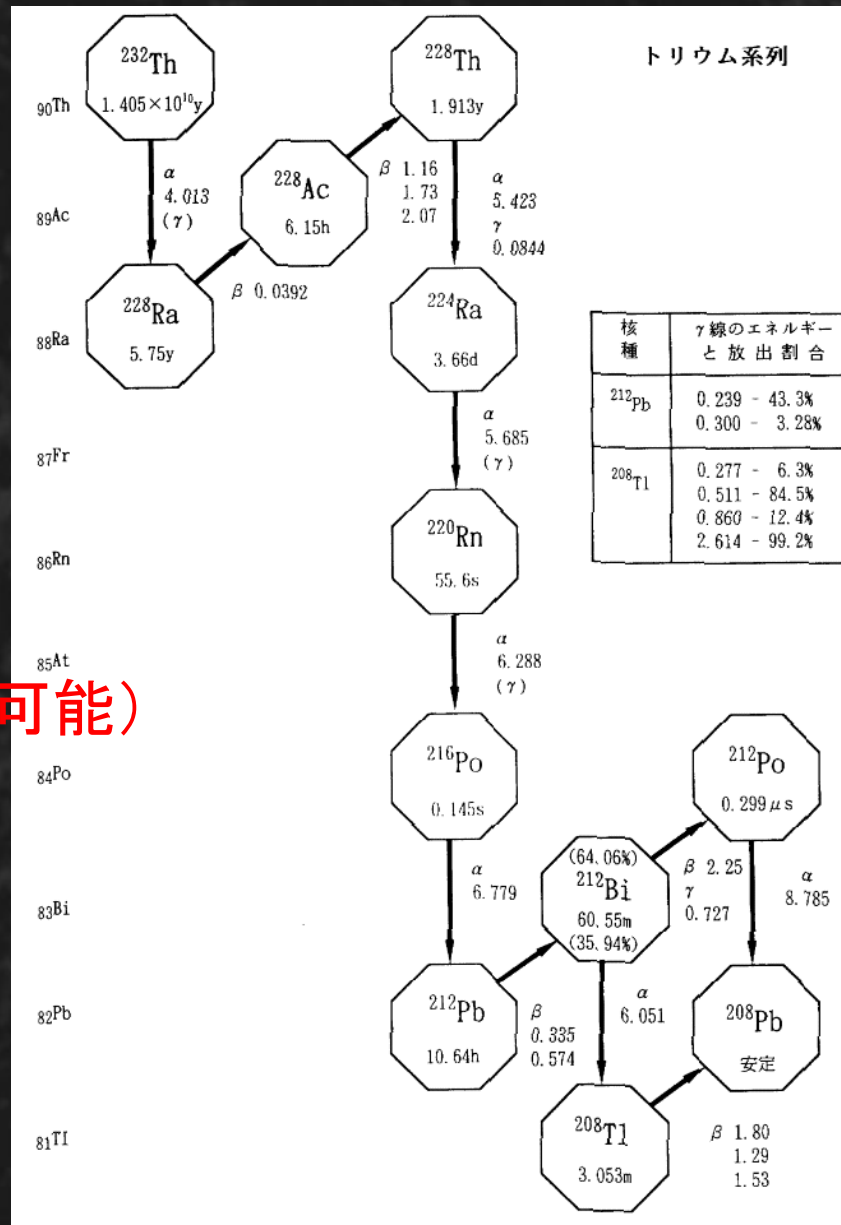
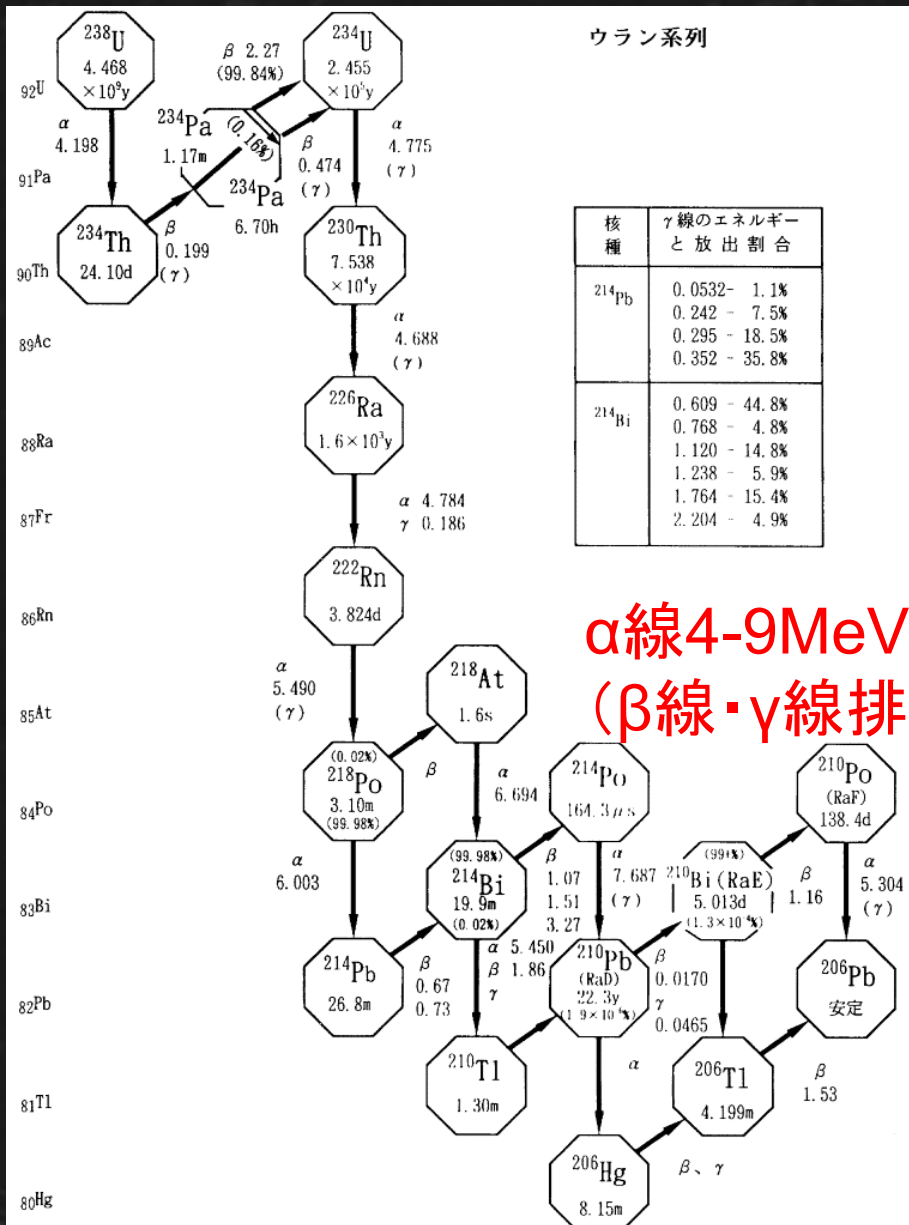
◆ γ 線・ β 線

dE/dxの違いにより排除可能。

◆ 中性子

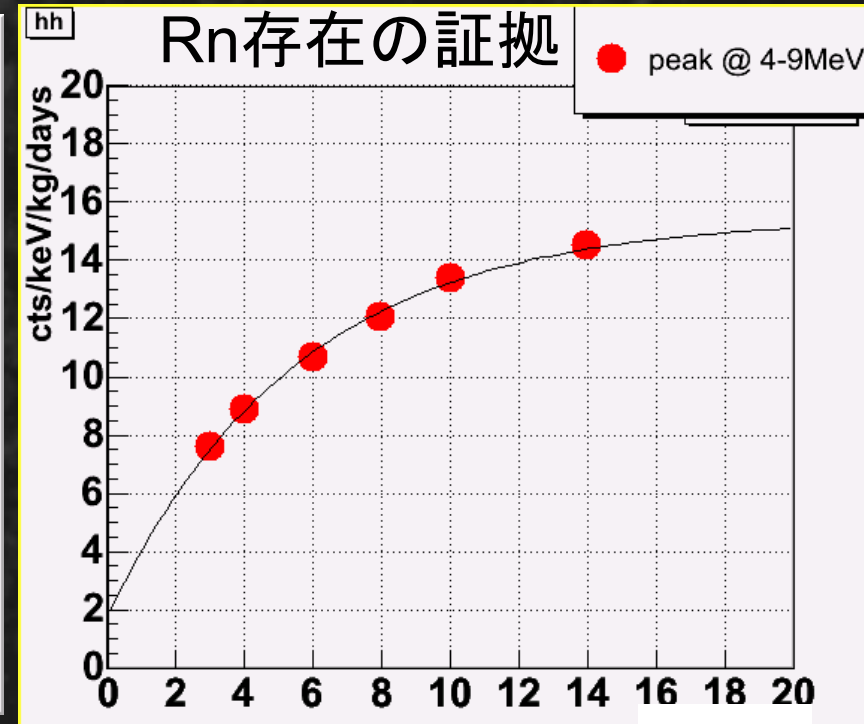
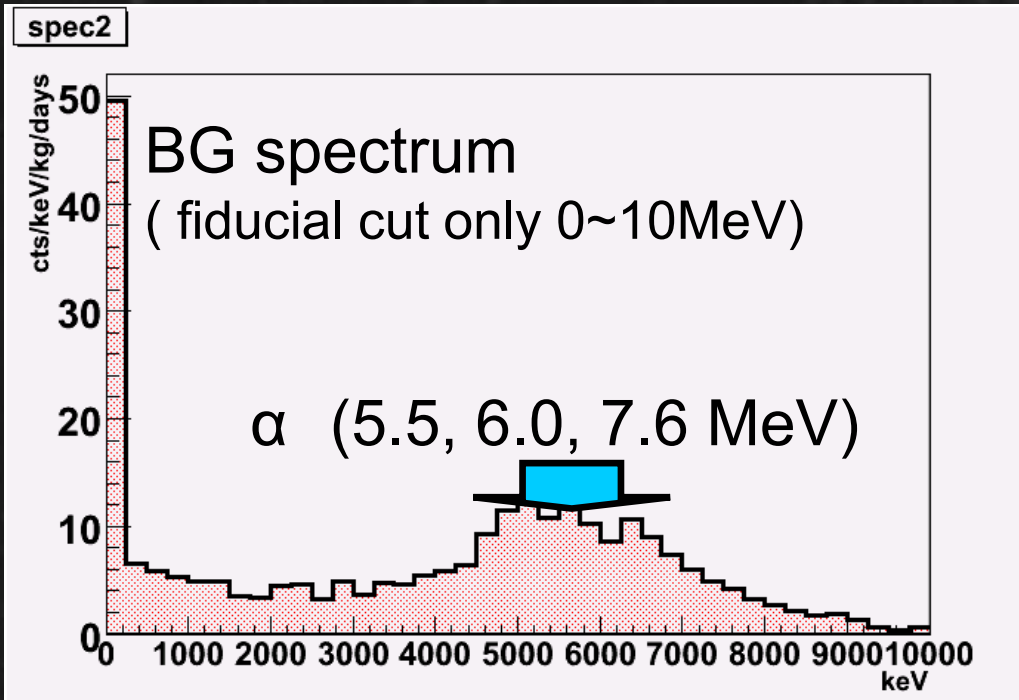
排除不可能。WIMPイベントと弁別負荷
ただし Surface : mine $\sim 1:10^{-3}$

BG源 U, Th



Rn 成分(3.8days)

BG中の6MeV近辺のピークがガス入れ替え時より
3.8日の時定数で増大



他に原因があるかもしれませんが。。

現在、具体的数値を見積もり中

Background対策(これから)

◆ Chamber内の α 線

- Rn → フィルターにより除去
→U、Thを含む部品の削減
- 天井と床(Drift plane とGEM)
→U、Thの削減

→どちらもz方向の絶対値がわかれば排除可能？

BGが2桁3桁落ちれば、

◆ 環境中性子

- ポリエチレン壁でshield

まとめ

◆ NEWAGE 30cmサイズ 基本開発完了

- 地上試験 完了 → 地下でのR&Dへ。

◆ 地下R&D

- 安定動作の確認
- 内部BGの確認

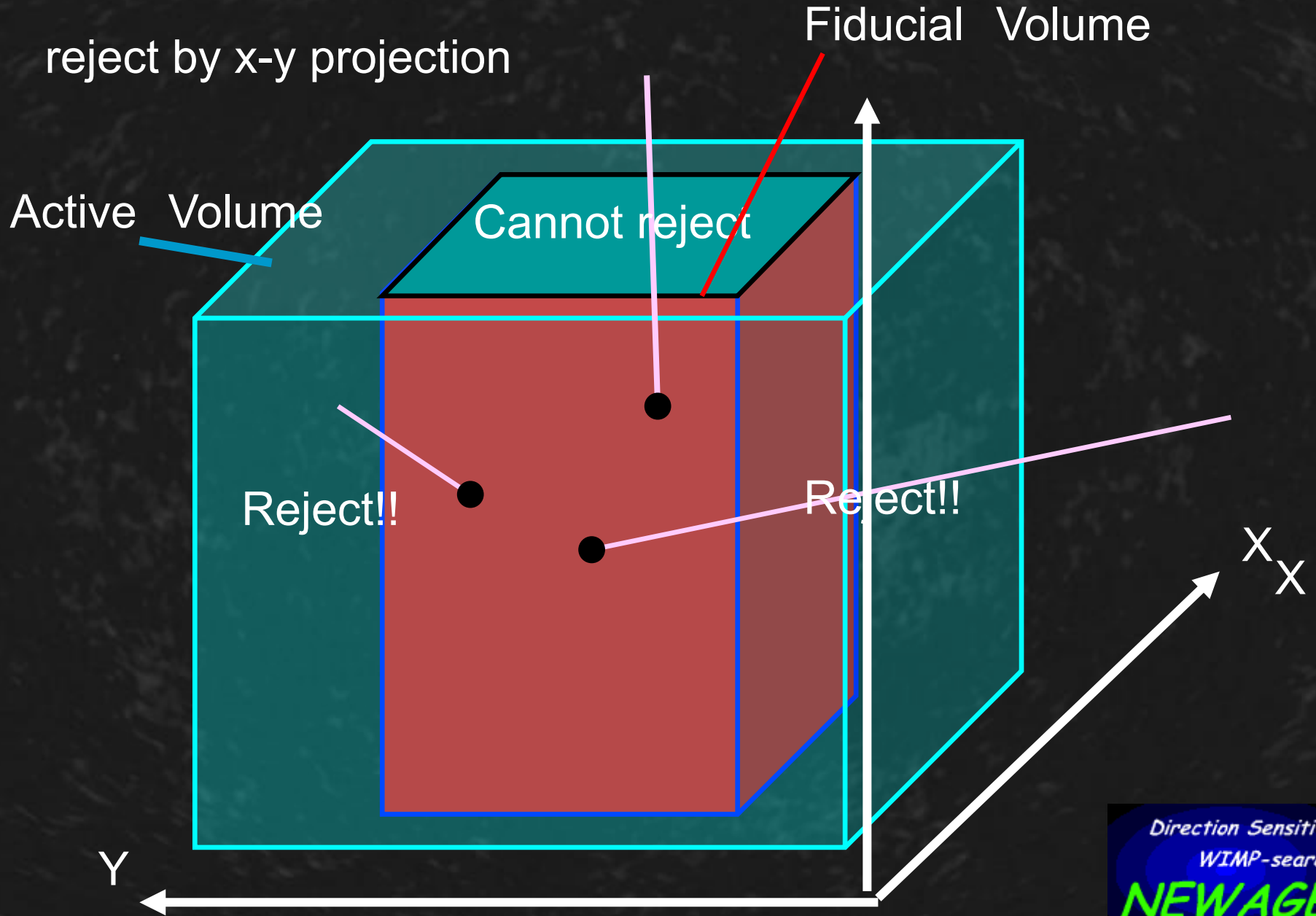
暗黒物質探索実験の仲間入り??

◆ 大型化(本格探索)にむけ

- BGの低減が重要。
Rn・U・Th除去 Z方向測定
- 低圧動作
- Head-Tail 判別

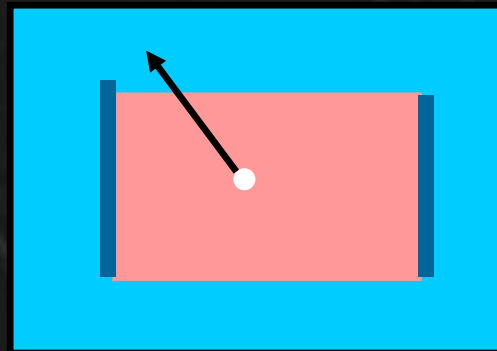
おわり

Fiducial cut



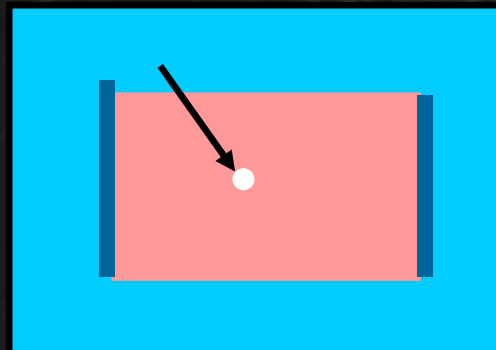
U、Th 系列による低エネルギー成分1

◆ VETOがない領域への α 線抜け(主にRn崩壊)



Fiducial内に一部のエネルギーを落とし外部に

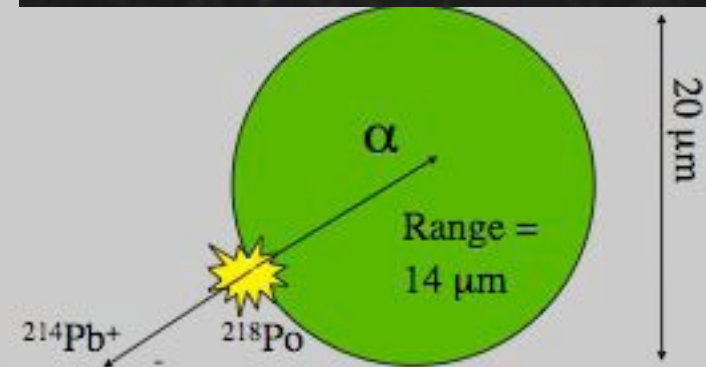
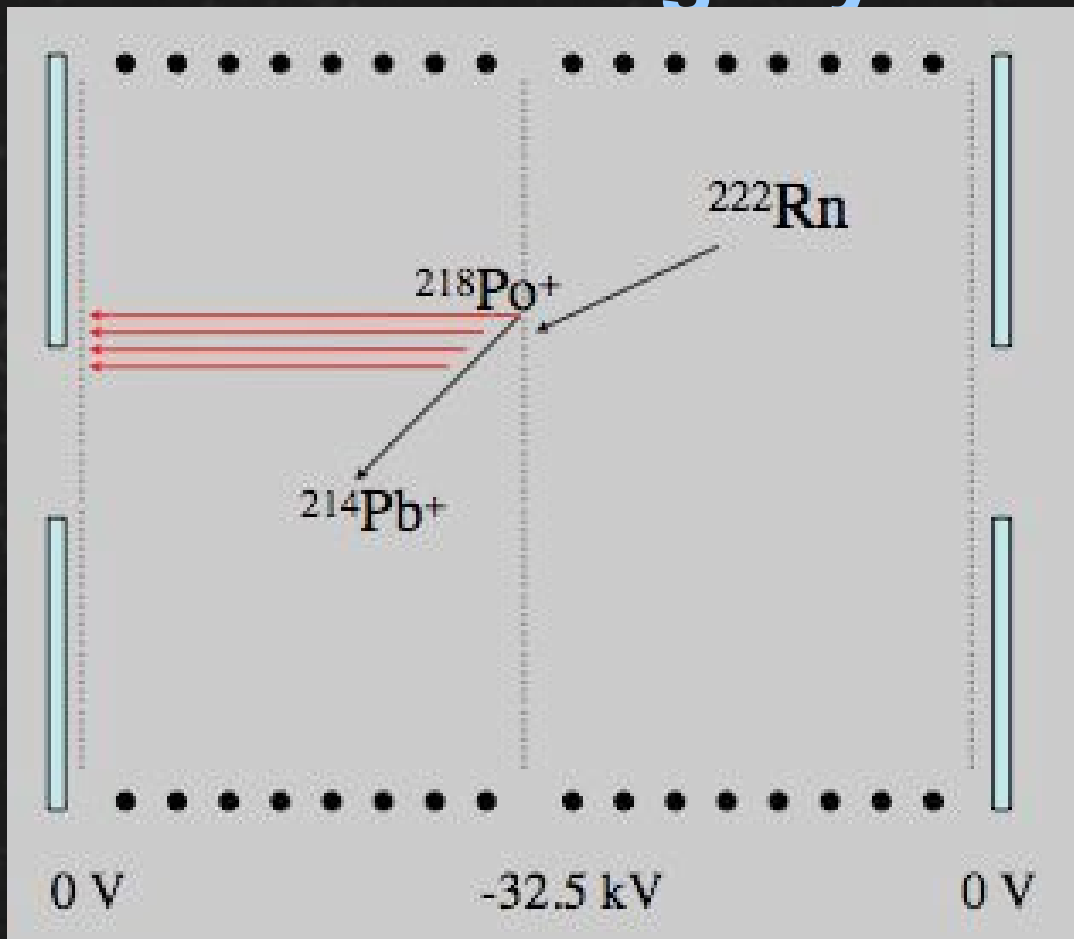
◆ VETOがない領域からの α 線(主に天井から)



外部である程度エネルギーを落としてから内部に。

U、Th 系列による低エネルギー成分2

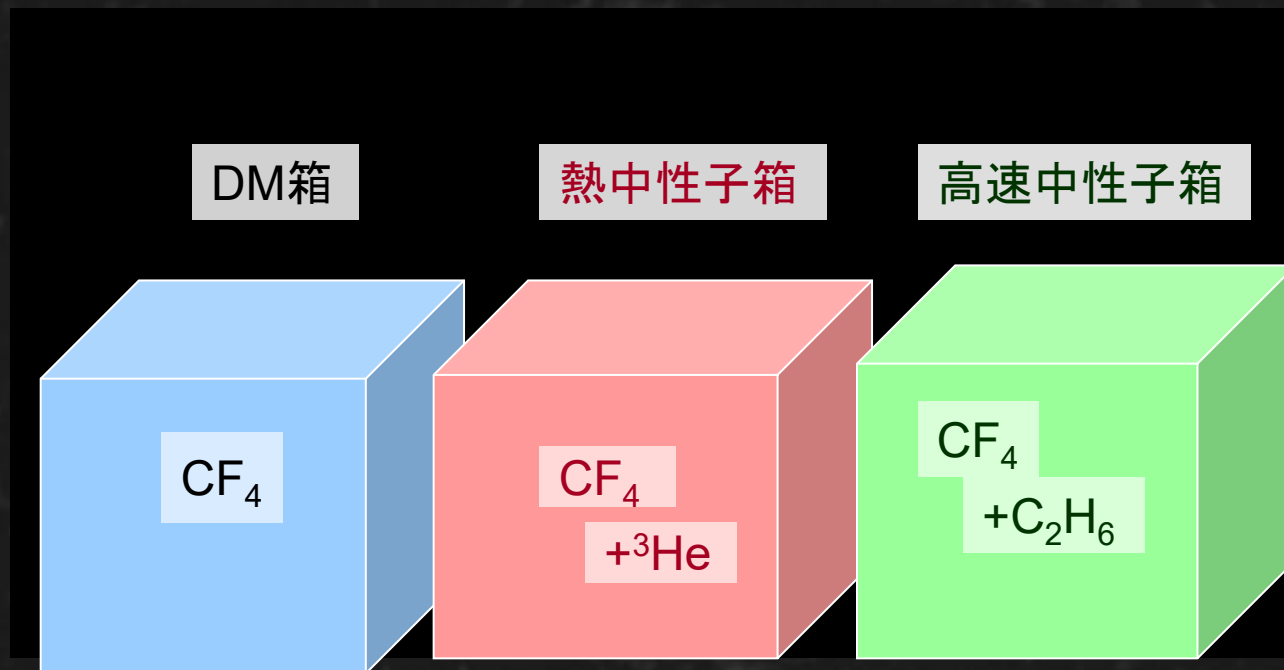
Radon Progeny Recoils



Pbイオンのエネルギーは100~150keV。

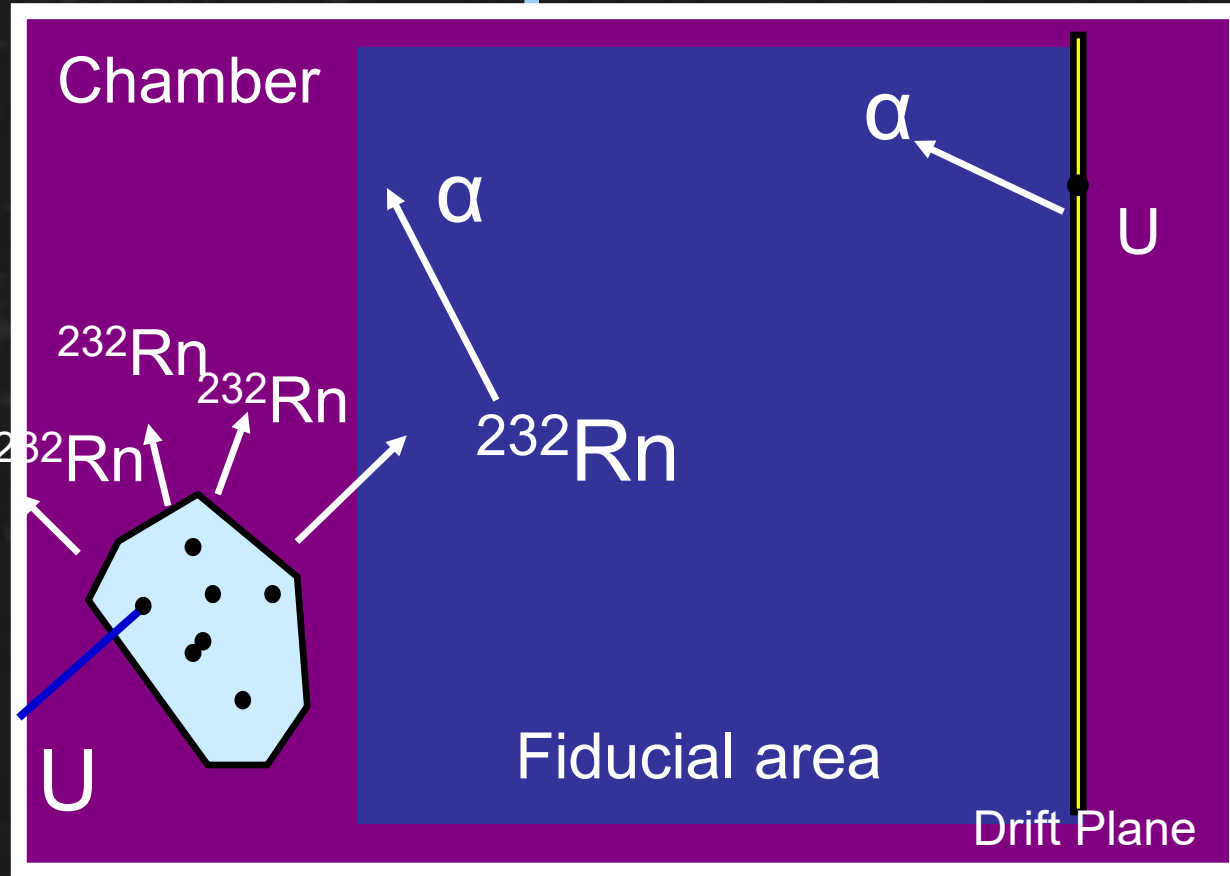
異種ガスによる環境BGの測定

- ◆ ^3He 、H等を混ぜれば中性子検出感度up

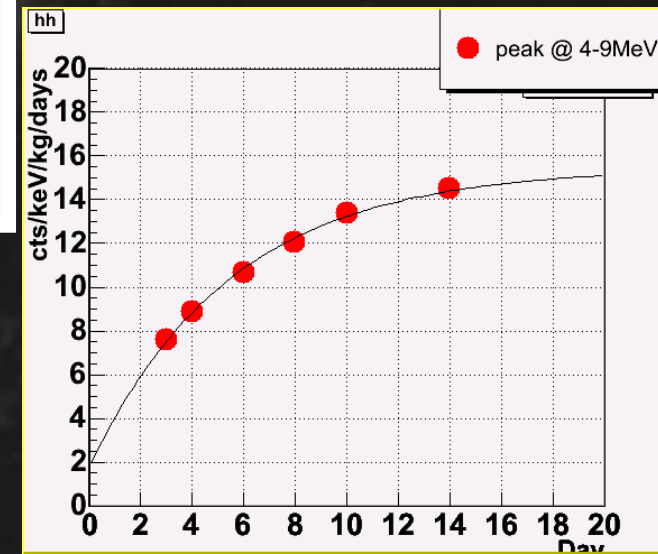


中性子BGモニターとして使用可
神岡坑内での測定計画中

^{222}Rn emanation and alpha from drift plane



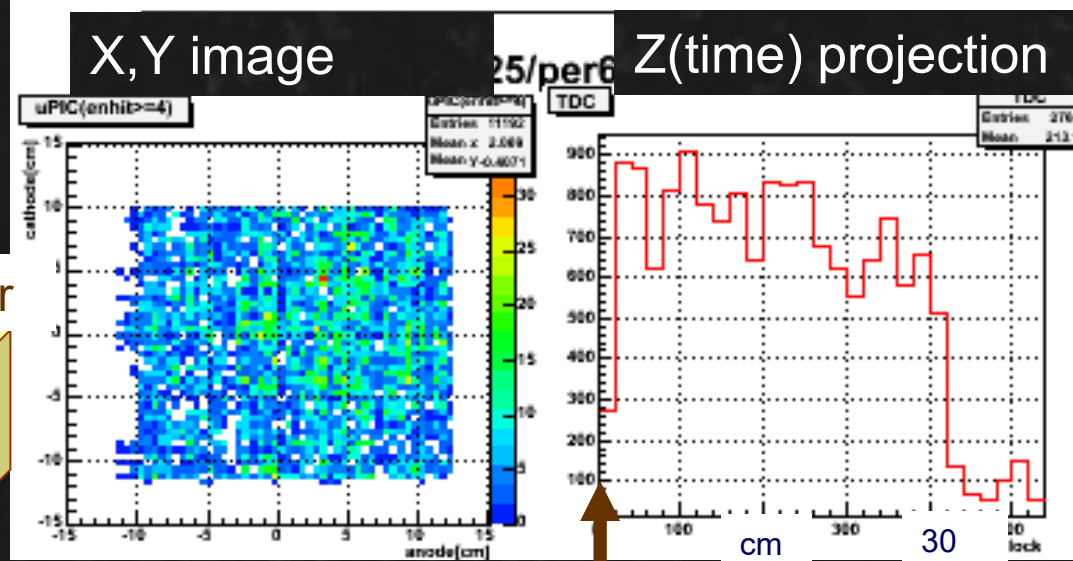
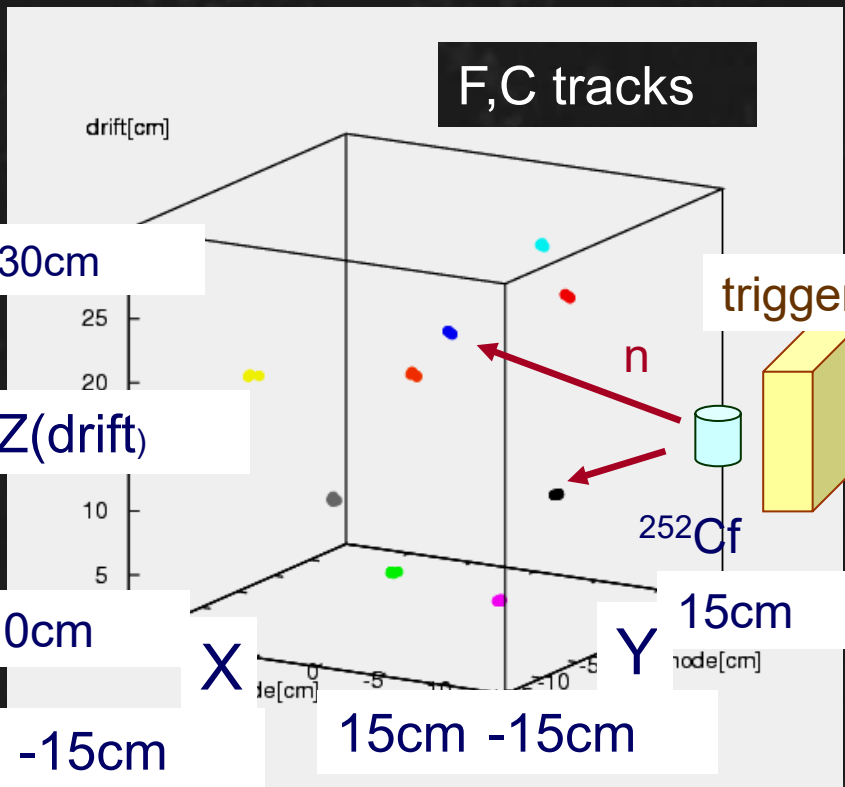
Increase of peak @ 6MeV
With decay constant of Rn (3.8days)



TPC performance tracking

Neutron response

Preprints: physics/070118 K.Miuchi et.al



Trigger: z=0

- F 500keV 5~6mm in 0.2atm CF_4

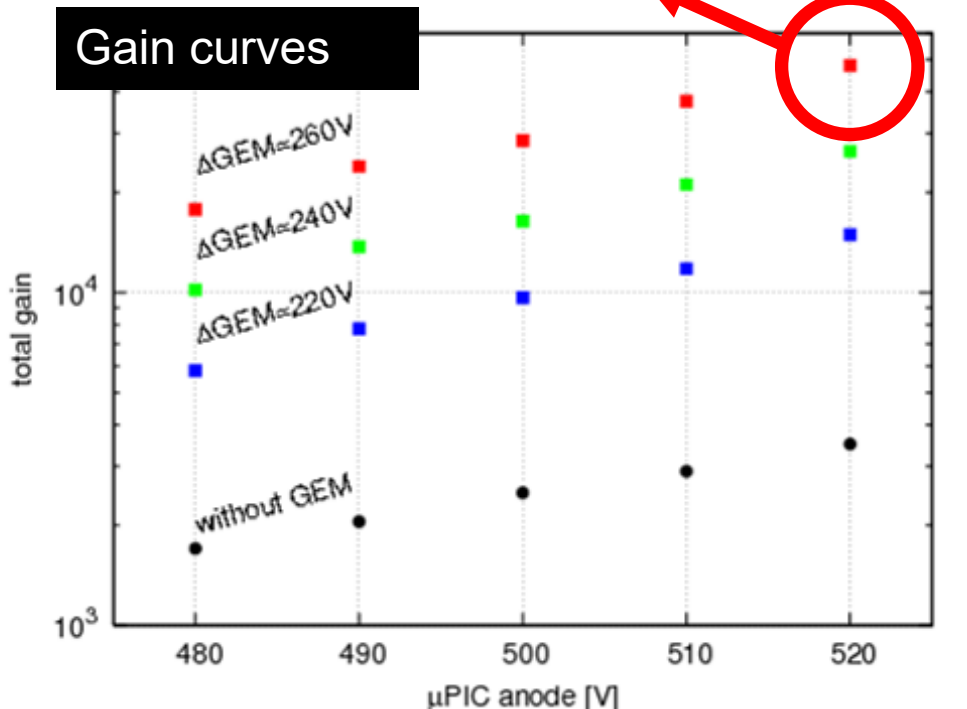
- Fiducial $24 \times 21.5 \times 31\text{cm}^3$ (CF_4 8.9g) FLAT response



TPC performance (with Ar+C2H6 gas)

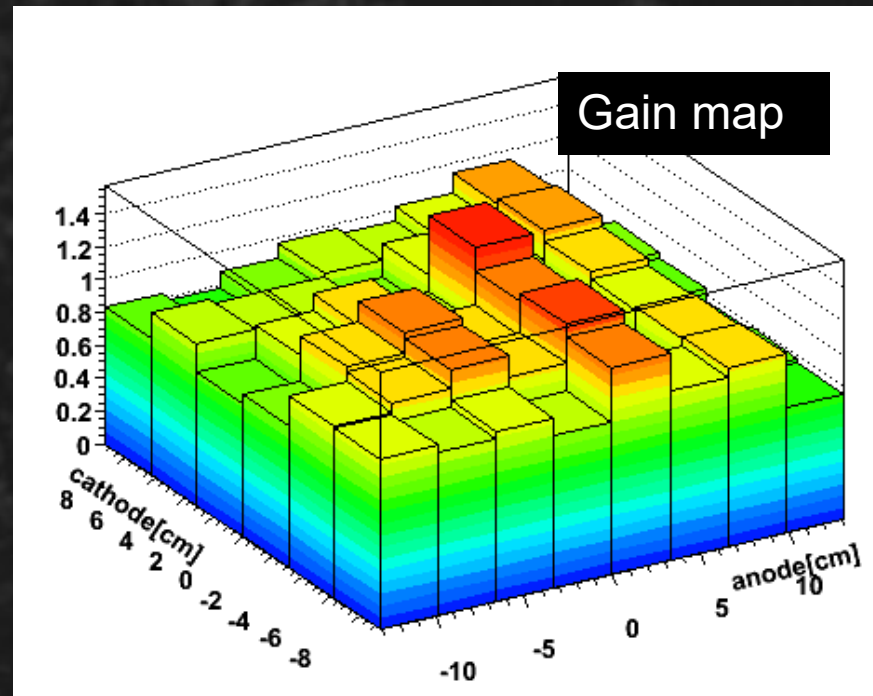
Gas gains

- operation gain for MIPs $\sim 50,000$



Gain uniformity

- Maximum / minimum = 2.2



Sensitivity to WIMPs

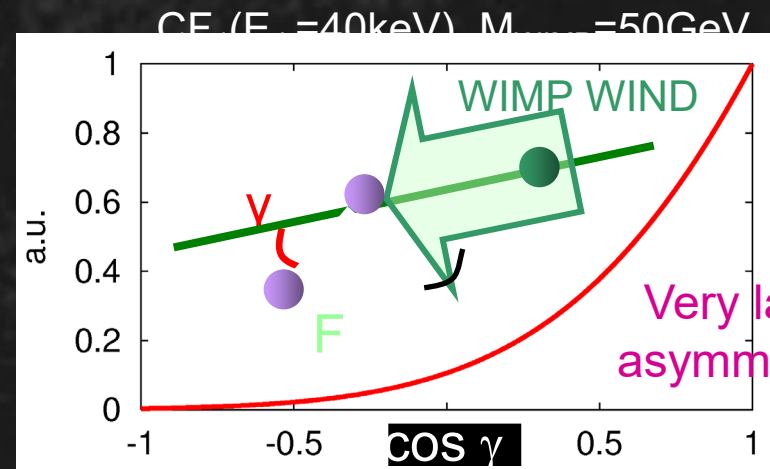
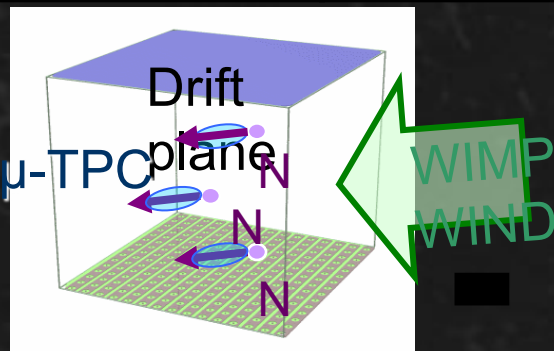


Properties of μ TPC

Track length threshold : 3 mm
 dE/dx threshold : 10 keV/cm
 with electron/nuclear recoil discrimination ability
 recoil direction sensitivity (Bragg curves)

gas	Pressure [Torr]	Density [g/m ³]
Xe	5	38
CF ₄	20	90

Need to study low-pressure μ TPC



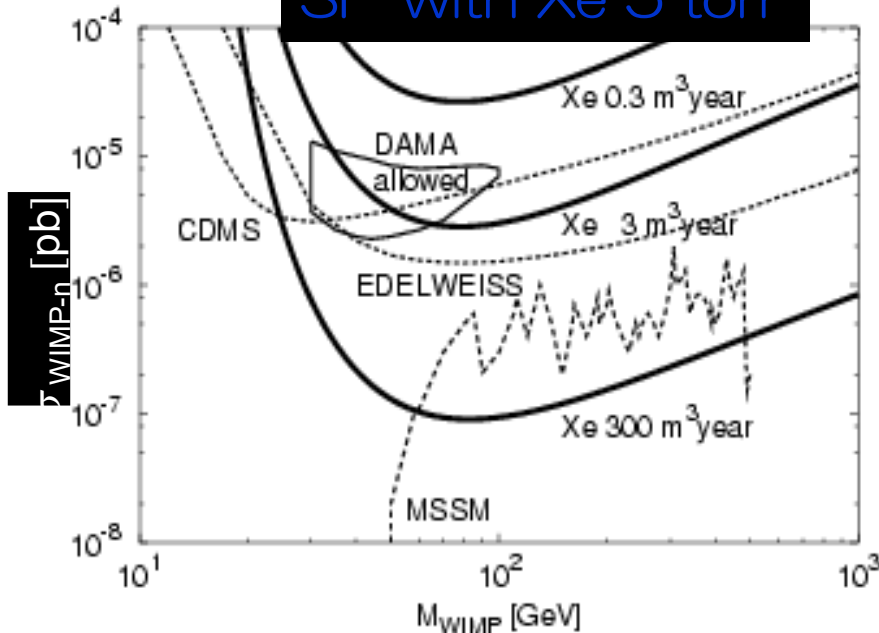
Sensitivity to WIMPs



“Detection” by Forward/Backward 3σ asymmetry

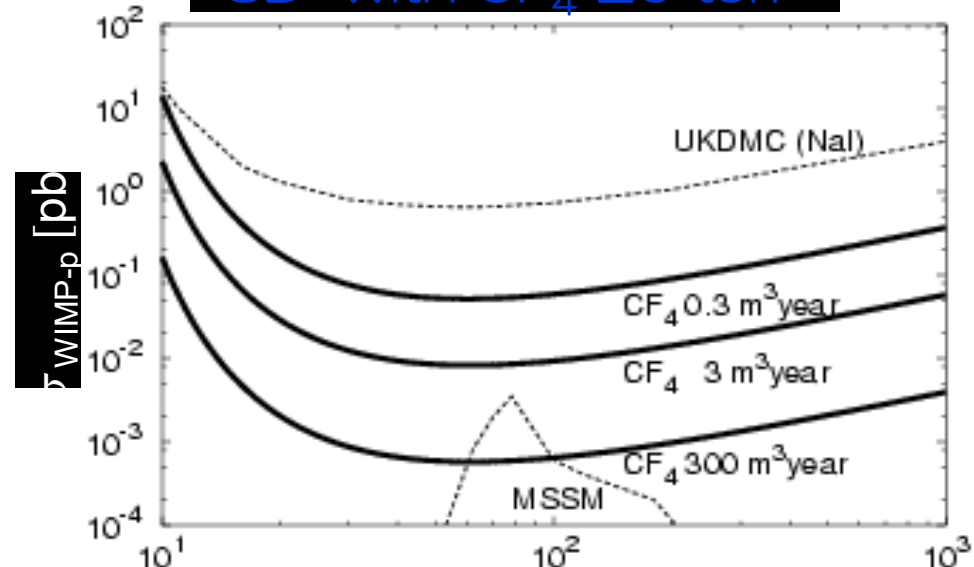
At Kamioka Observatory (1000 m.w.e)

SI with Xe 5 torr



M_{WIMP} [GeV]

SD with CF_4 20 torr



M_{WIMP} [GeV]

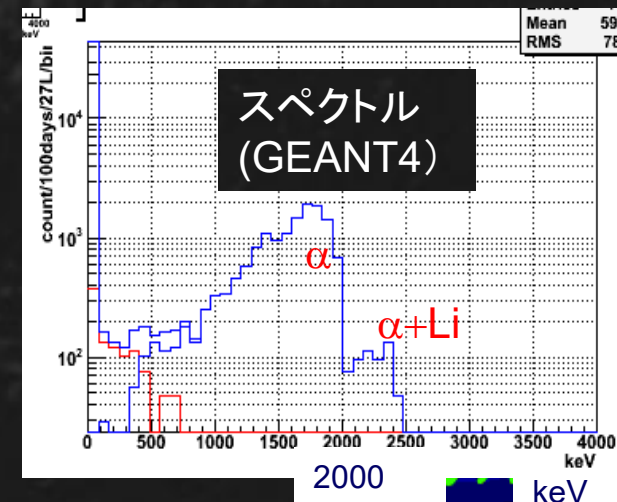
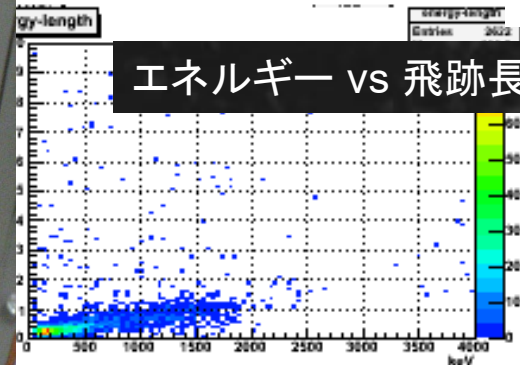
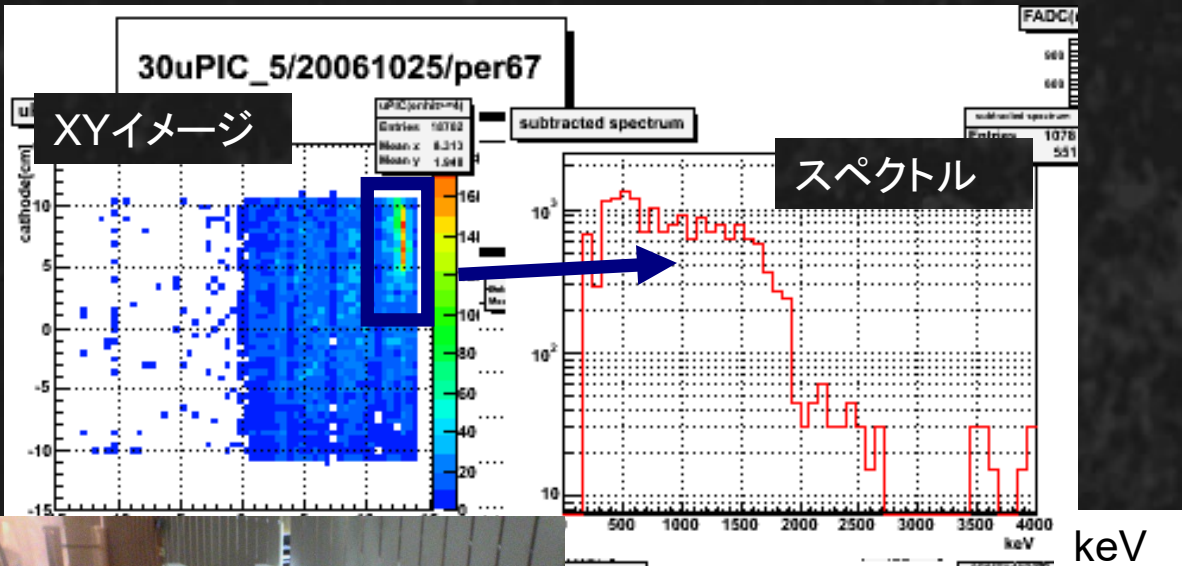
0.3 m³year exposure reach the best sensitivity.
300 m³year exposure will test the MSSM prediction.



検出器応答

エネルギー校正

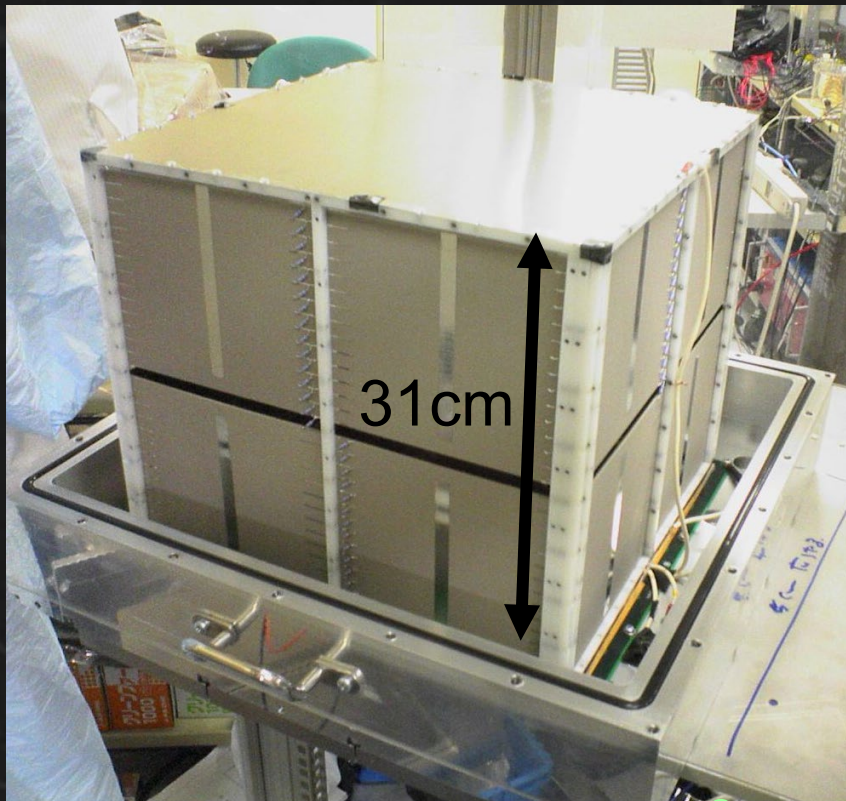
- ガラスに蒸着した ^{10}B (厚さ $0.6\mu\text{m}$)
- ドリフトケージ内部にセット、外から ^{252}Cf の中性子を減速して照射
- $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応 ($Q=2.70\text{MeV}$ 1.8MeV for α)
- 原子核による校正、低エネルギーへの線形性は別途確認示す必要あり
- 現状では、校正には6時間程度、見せる絵には12時間程度かかっている



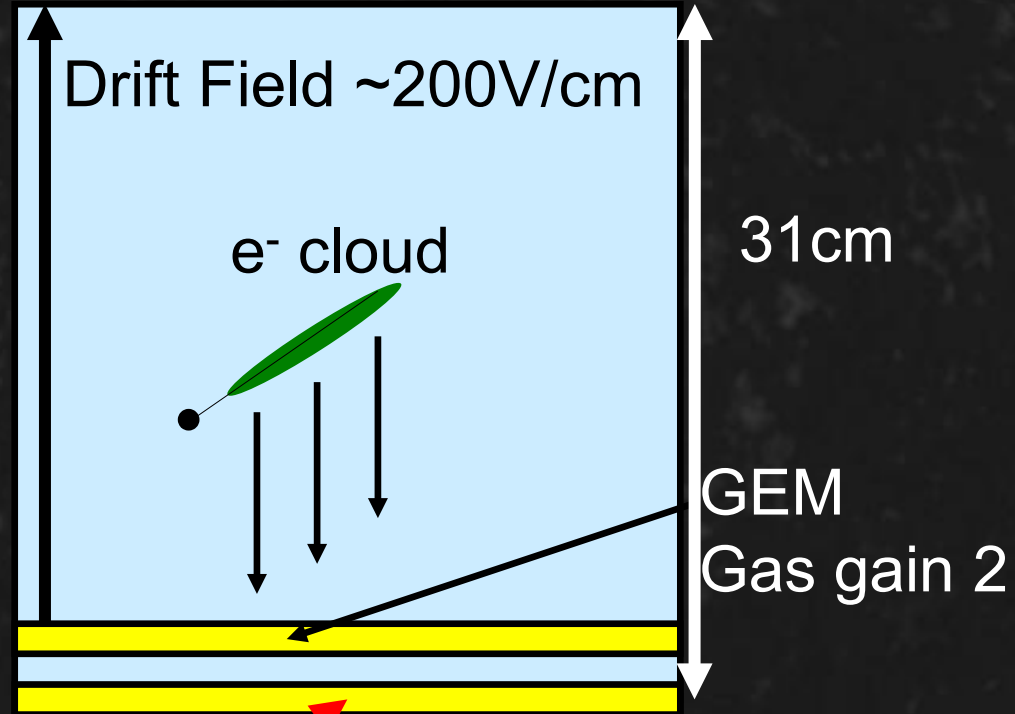
micro-TPC principle

Gas volume

- DRIFT length 31cm
- CF4 0.2bar gas, sealed



$23 \times 28 \times 31 \text{ cm}^3$



μ -PIC : fine pitch 2D gas device

What's μ -PIC?
What's GEM?



● **μ -PIC (gas gain 2000)** Takada et. al. NIM

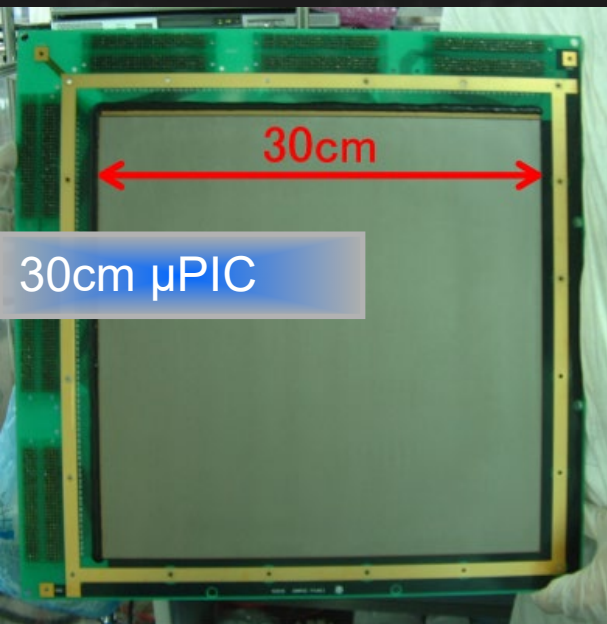
cf. F. Sauli

- Micro pixel chamber
- 589,824 pixels 400 μ m pitch
- 768+768 readout

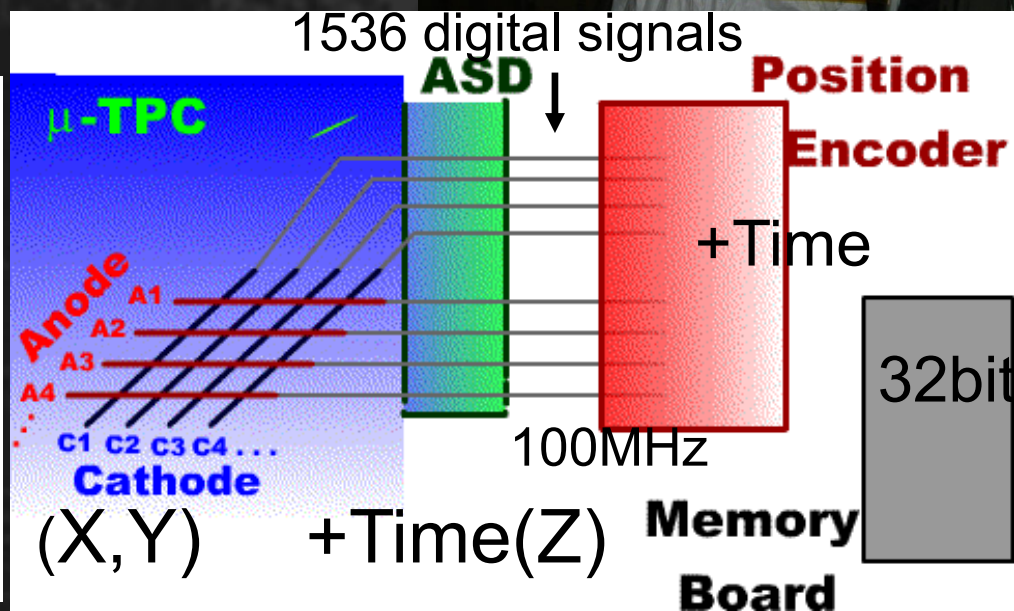
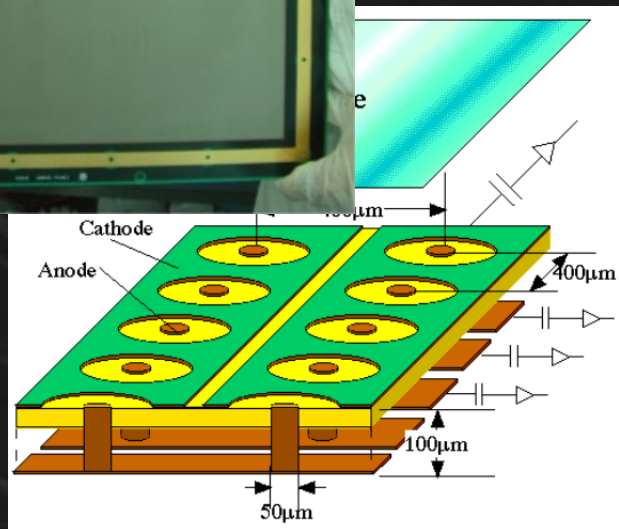
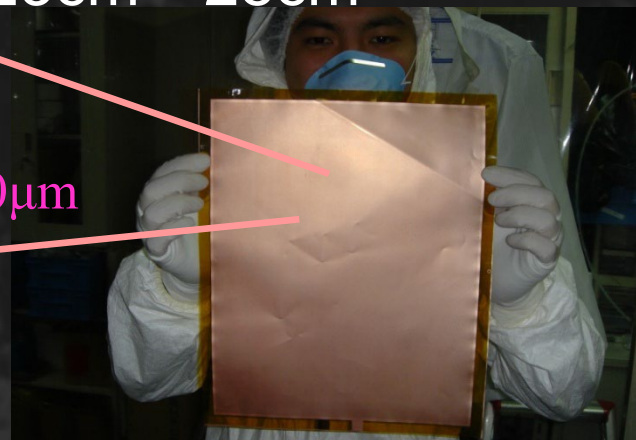
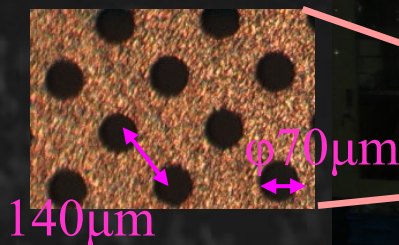
● **GEM (gas gain 1~2)**

Gas electron multiplier

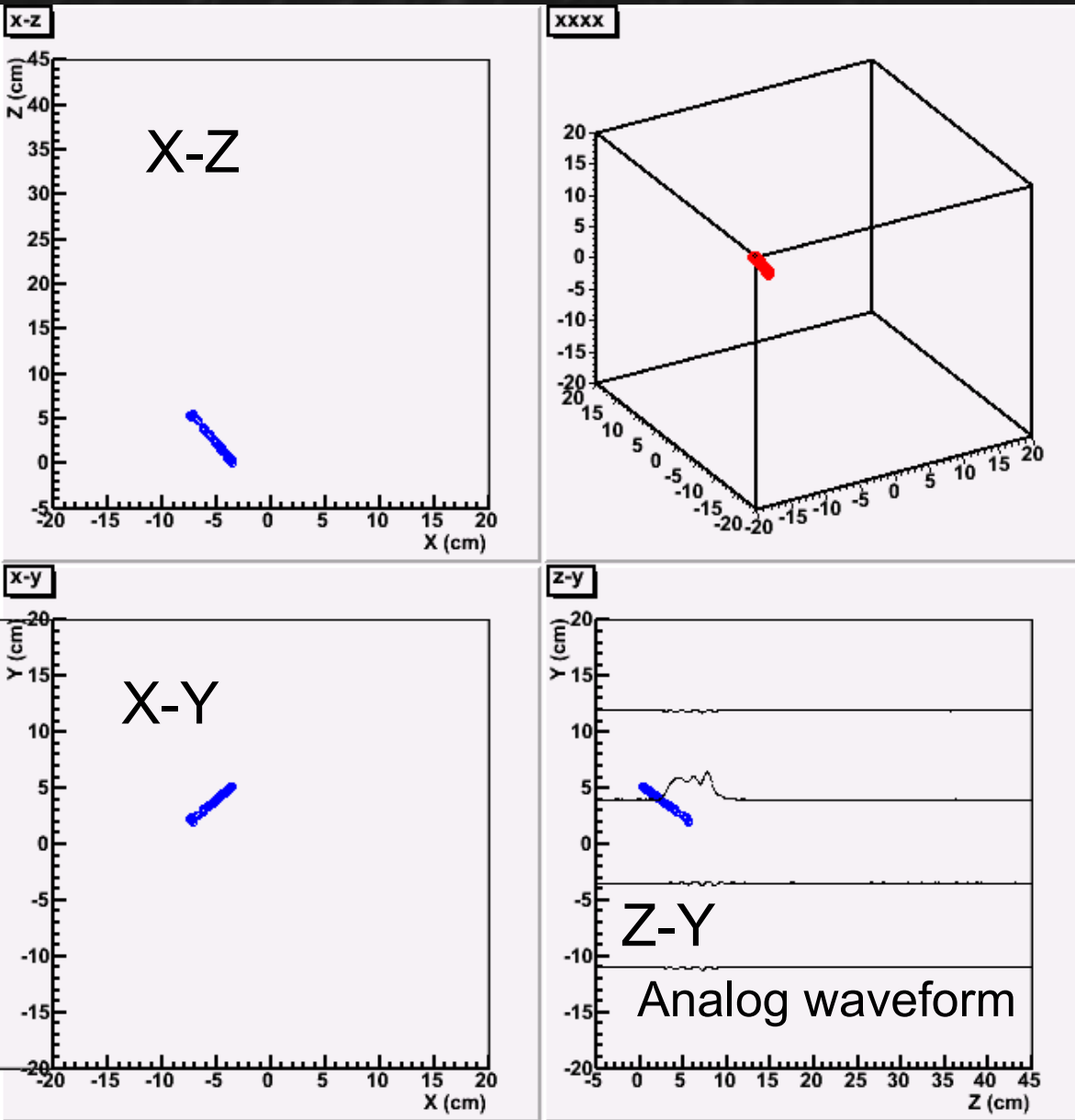
- 23cm \times 28cm



30cm μ PIC



TPC performance tracking



• Example

Gas CF_4 0.2bar

Alpha-Particle Event

$N_{\text{hit}}=18$

Energy=6.5MeV

Length=10.2cm

3D spatial resolution

~ 800 μm

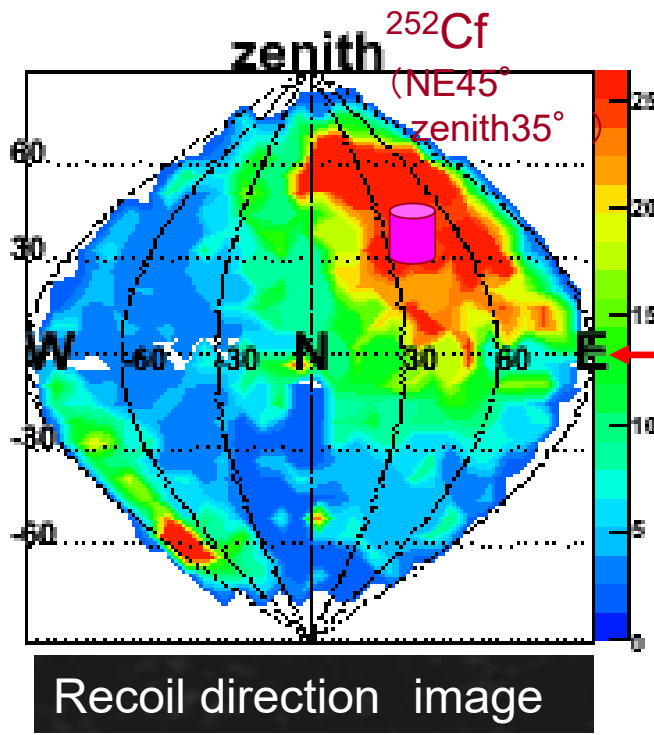
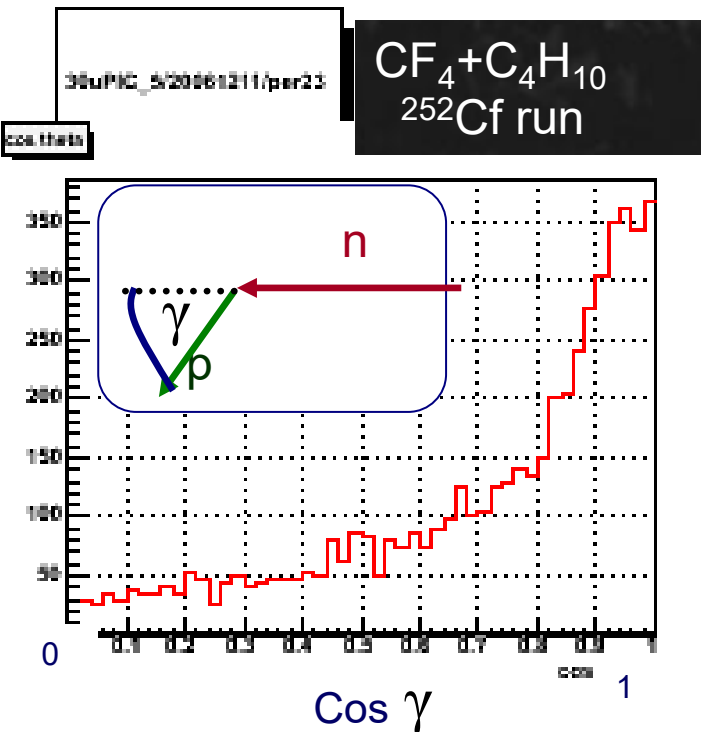
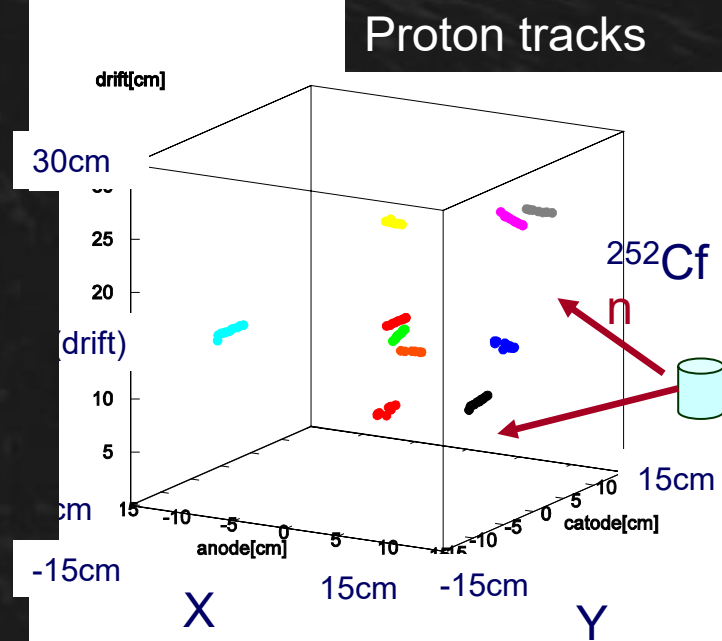
cf. F(100keV) run 800 μm

Detect both

Track and Energy!

TPC performance direction

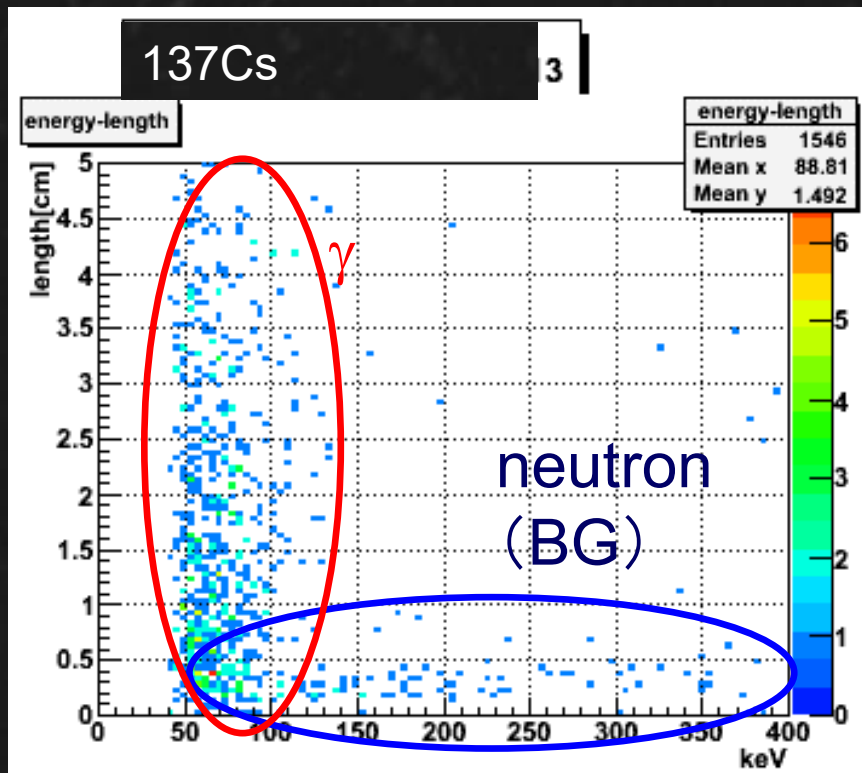
- $\text{CF}_4 + \text{C}_4\text{H}_{10}$ (9:1) 0.2bar
- Protons have longer tracks
- $n \rightarrow p$ forward scattering are seen (this is what we want to do with WIMP $\rightarrow F$ scatterings)



TPC performance

gamma-ray rejection

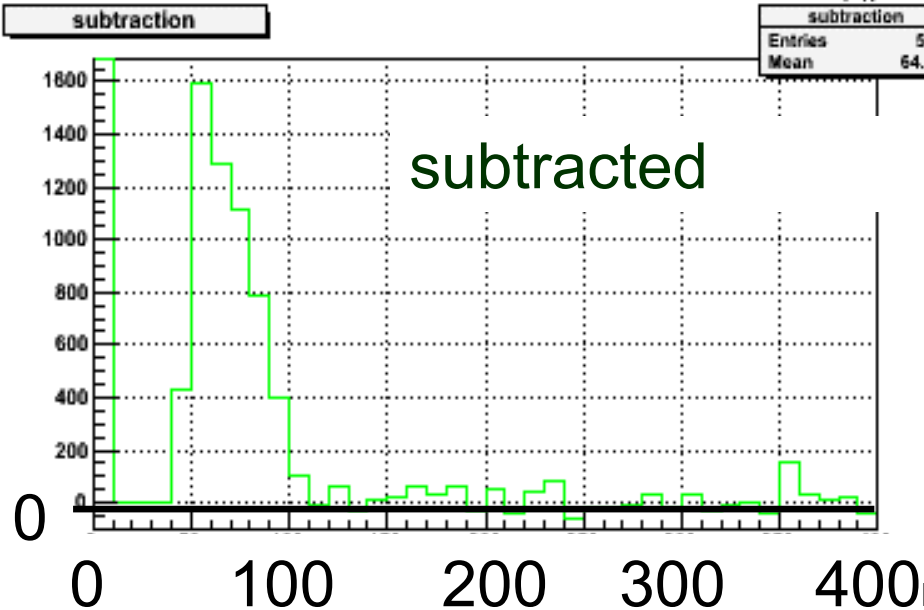
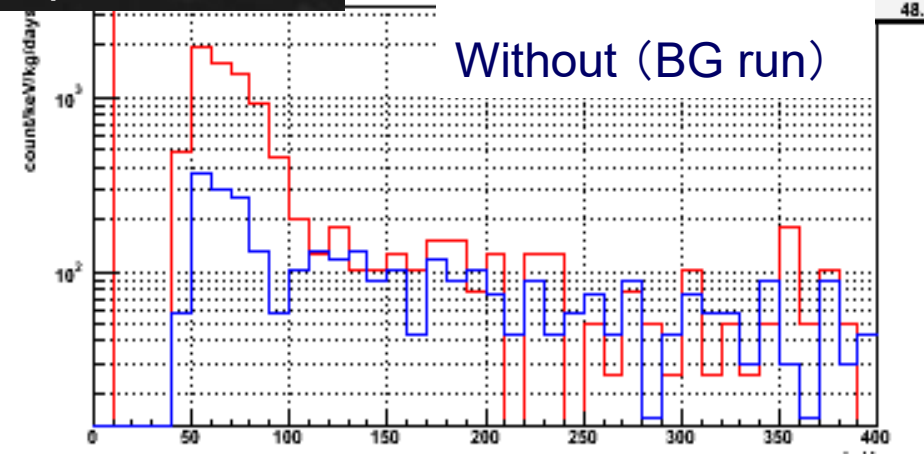
- gamma-rays from ^{137}Cs



Spectrum

With ^{137}Cs

Without (BG run)

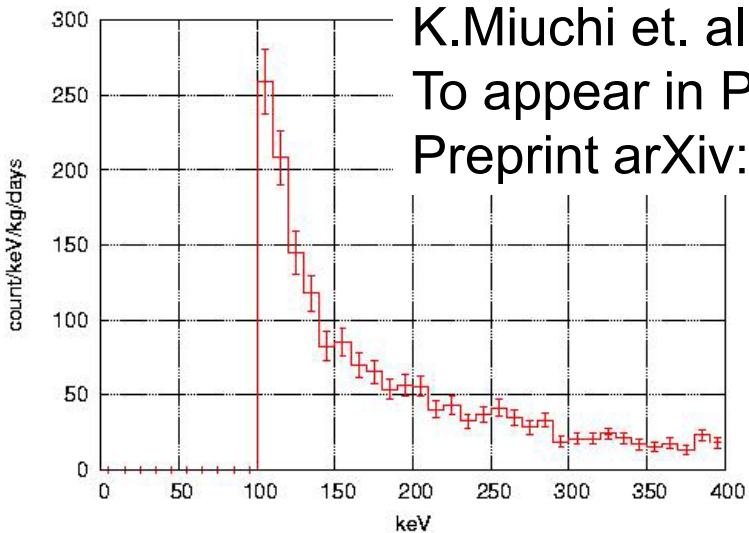


gamma efficiency $< 2e-4$ (statistics limited)

$\geq 100\text{keV}$

地上RUN

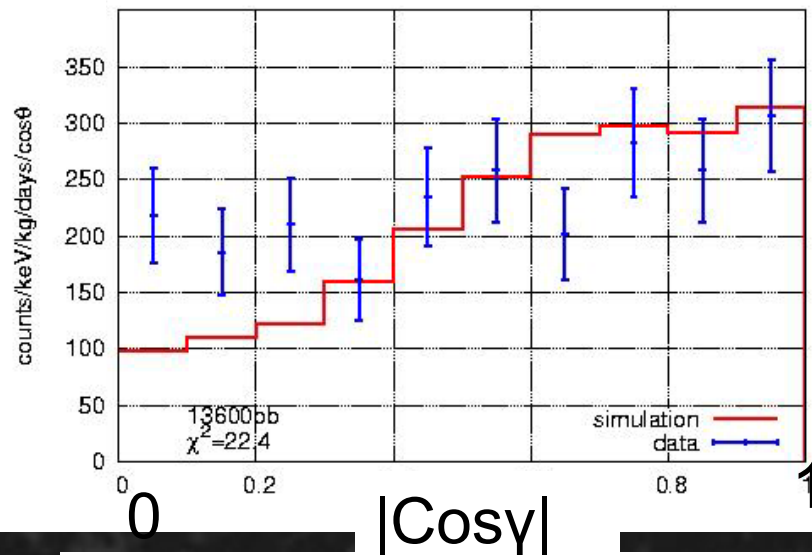
K.Miuchi et. al.
To appear in PLB
Preprint arXiv:0708.2529



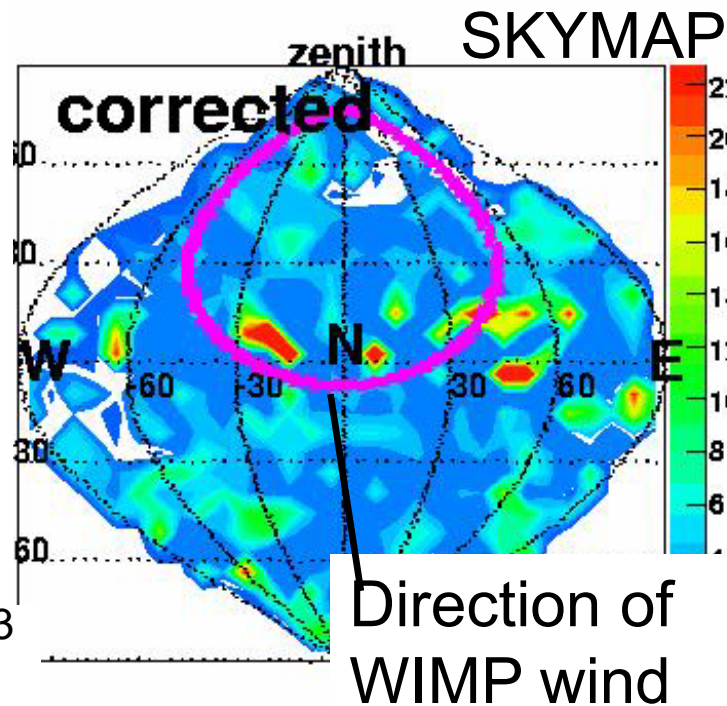
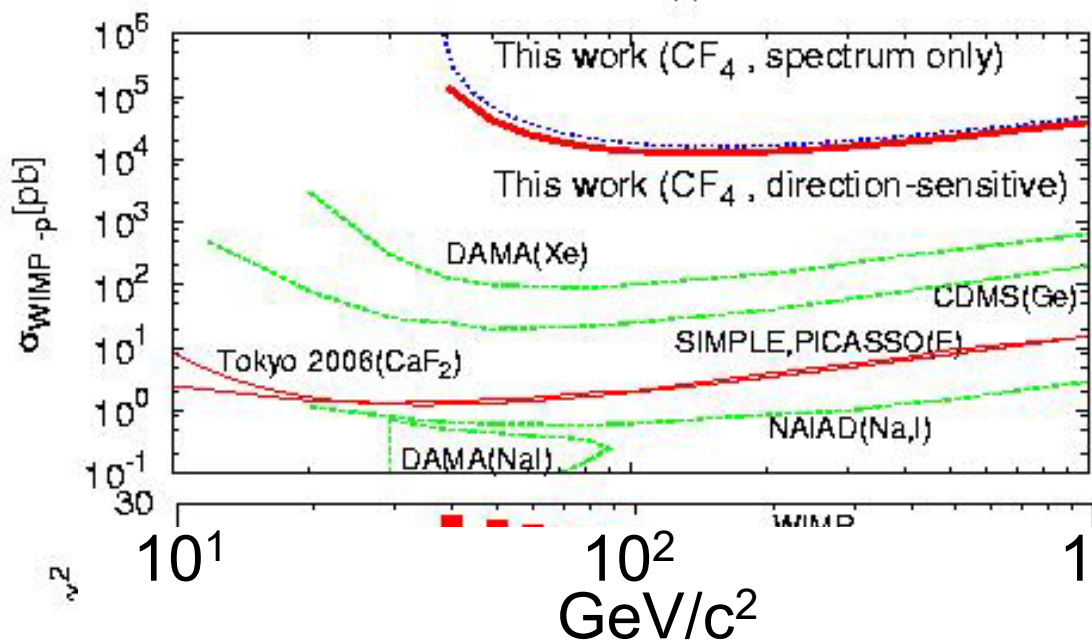
Cosy distribution

dru

$M_\chi 100\text{GeV} (100-120\text{keV})$



SD 90% C.L. upper limits



◆ Our Plan of direction sensitive DM serch

- Gas target + 3D tracking device (next section)

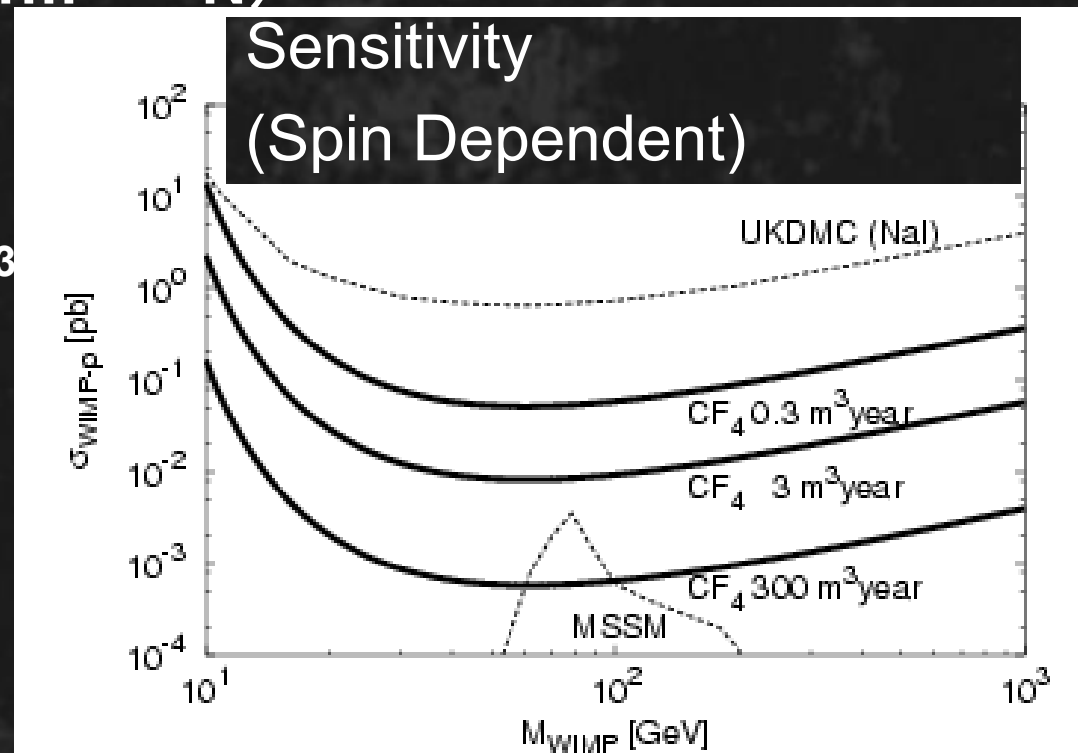
- Tracking recoil nucleus
- Gamma rejection by dE/dx

- **Goal: Detect the WIMP-wind (2010~)**

- underground-low pressure (CF_4 0.05 bar)
- large volume ($1\text{m}^3 \times N$)

- **CURRENT:**

- CF_4 0.2 bar
- $23 \times 27 \times 30 \text{ cm}^3$



- ◆ 1月 2名 × 4日
- ◆ 2月 1名 × 5日 1名 × 1日
- ◆ 3月 2名 × 3日
- ◆ 4月 1名 × 4日
- ◆ 5月 1名 × 5日 2名 × 2日
- ◆ 6月 1名 × 2日
- ◆ 7月 1名 × 2日