

# GRAINE実験

## Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion

青木茂樹(神戸大)/六條宏紀(名古屋大)

and GRAINE collaboration

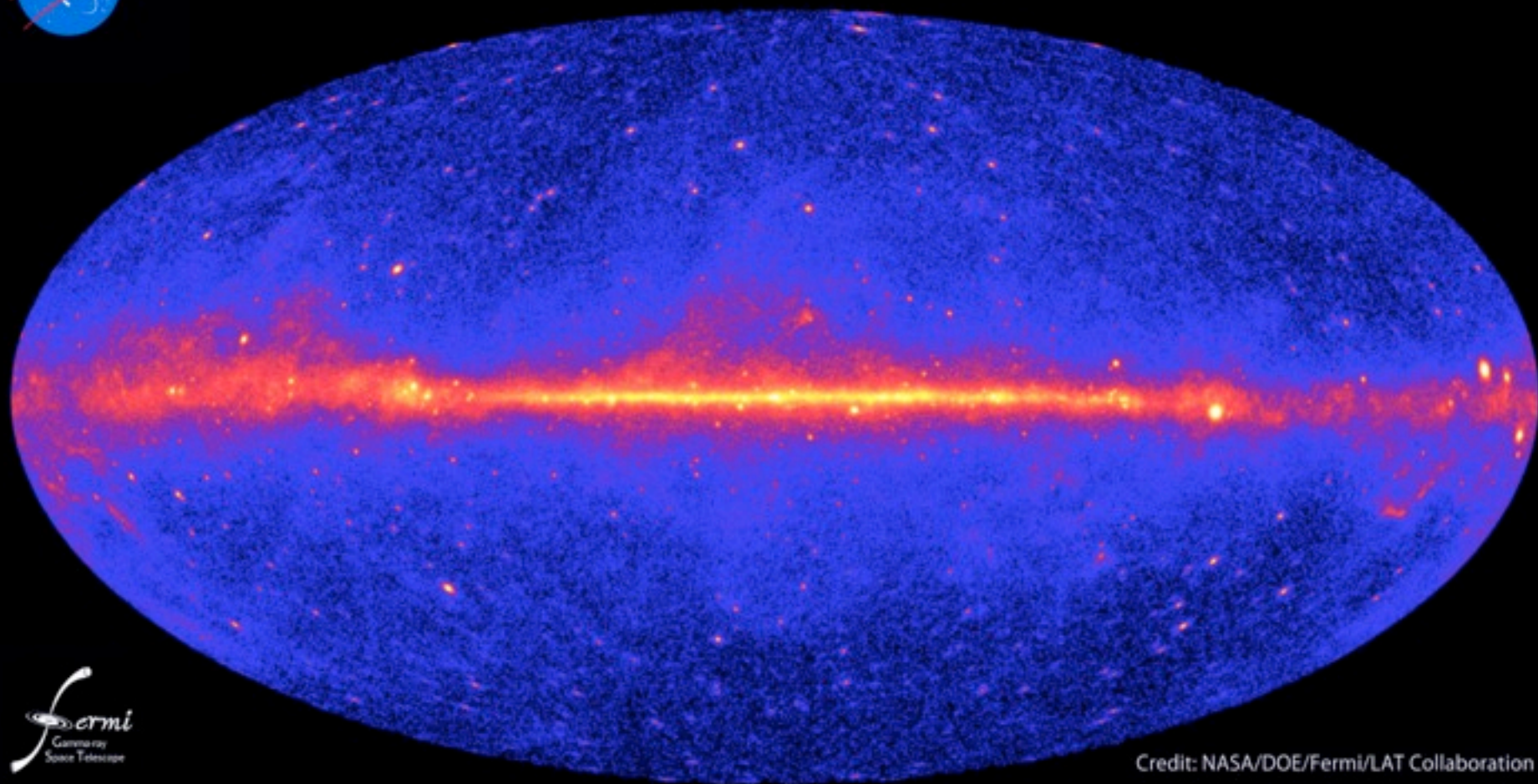
神戸大学、ISAS/JAXA、名古屋大学、  
岡山理科大学、愛知教育大学、宇都宮大学

B01:「超高解像度ニュートリノ検出器の開発」  
⇒他分野へのアプリケーション

photo : GRAINE 1st flight (2011) @ JAXA大樹航空宇宙実験場



# Fermi two-year all-sky map ( $E_\gamma > 1\text{GeV}$ )



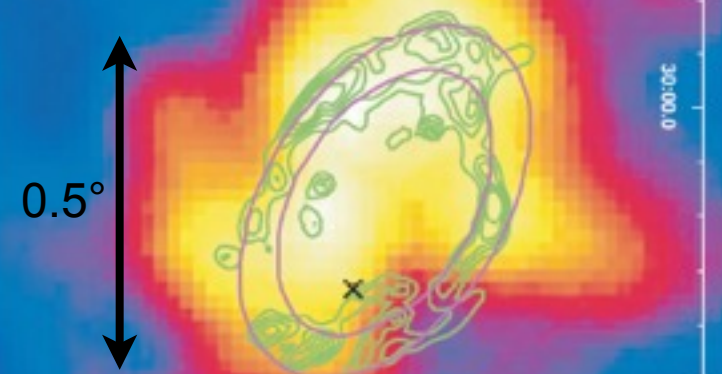
Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

## 1873 sources

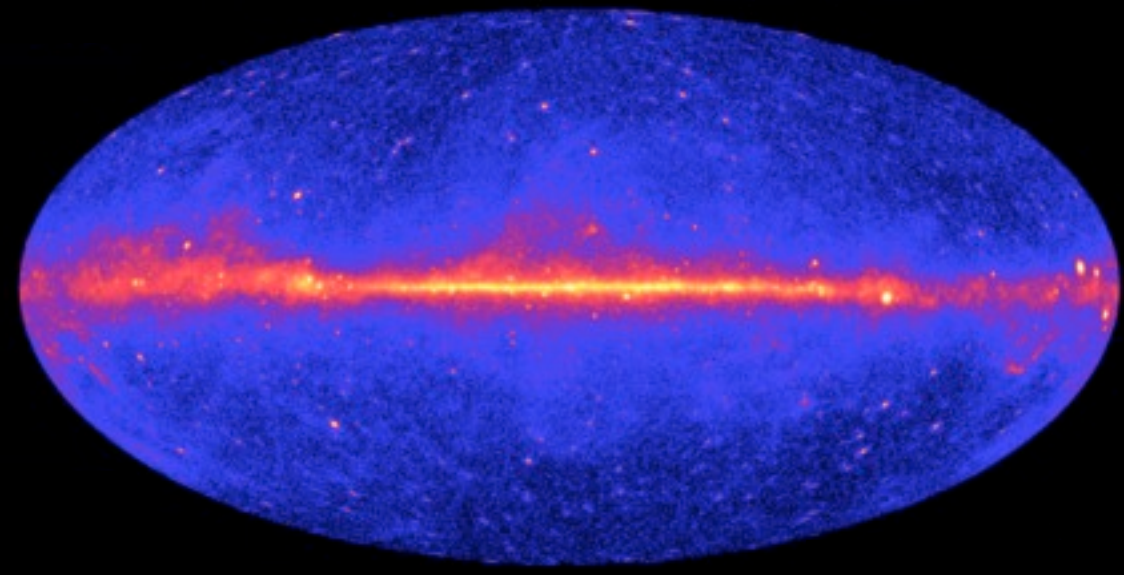


# 超新星残骸(宇宙線起源?)

## SNR W44

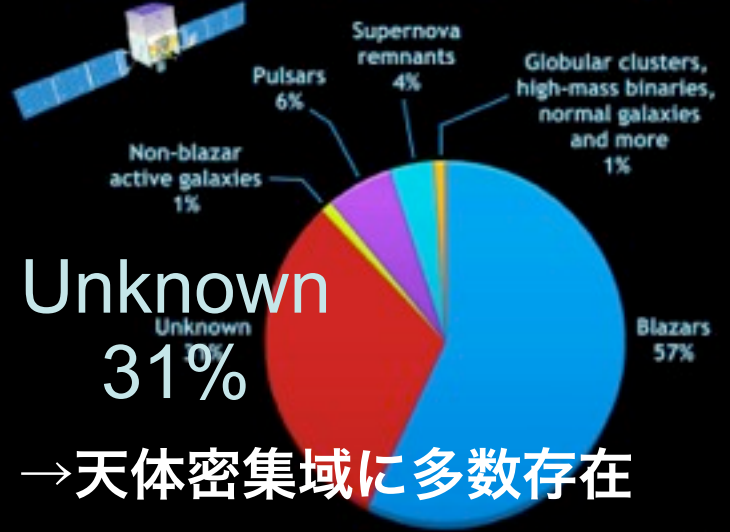


Abdo et al., Science, 2010  
 Color : 2-10GeV gamma-ray (Fermi LAT)  
 Contour : IR(Spitzer)



# 未同定天体の謎

### What has Fermi found: The LAT two-year catalog



→天体密集域に多数存在

# 偏光観測

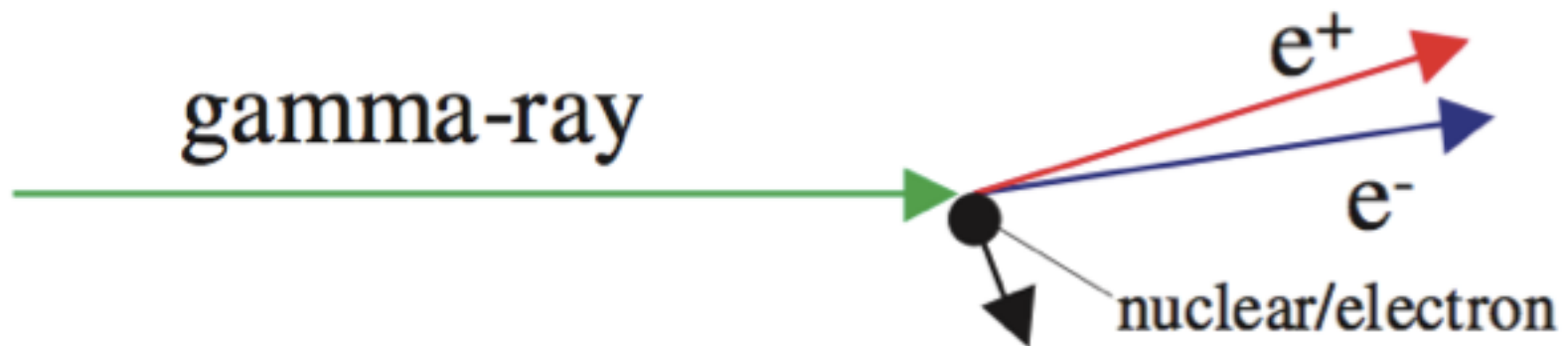
## (放射機構の解明)



### Crab

A. J. Dean, et al., Science, 2008.  
INTEGRAL

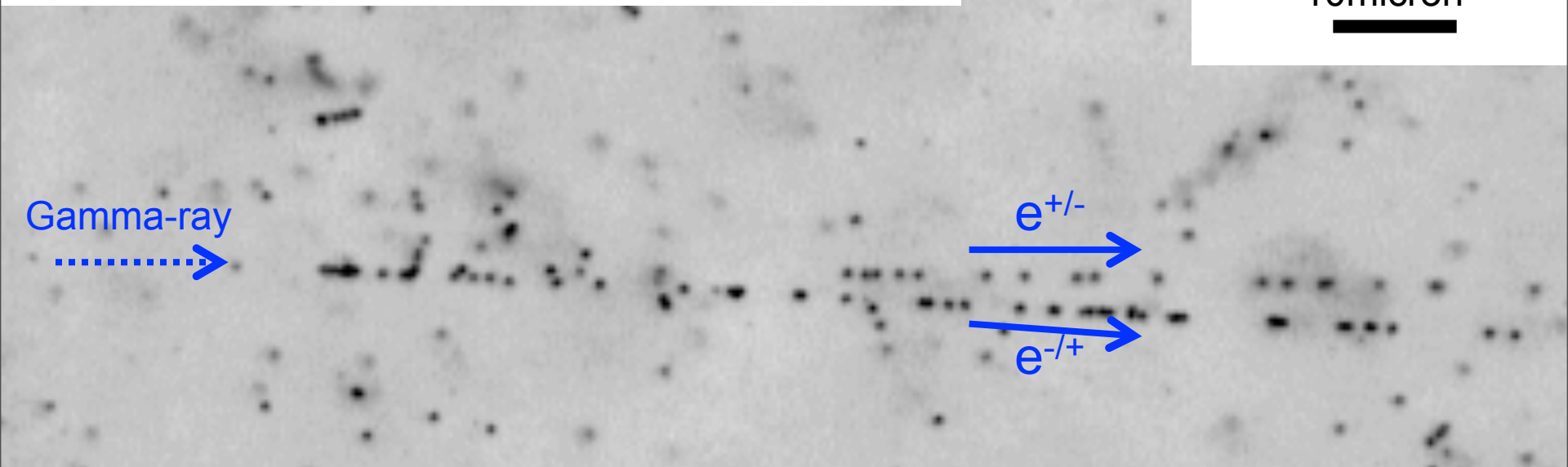
# ガンマ線の到来方向決定



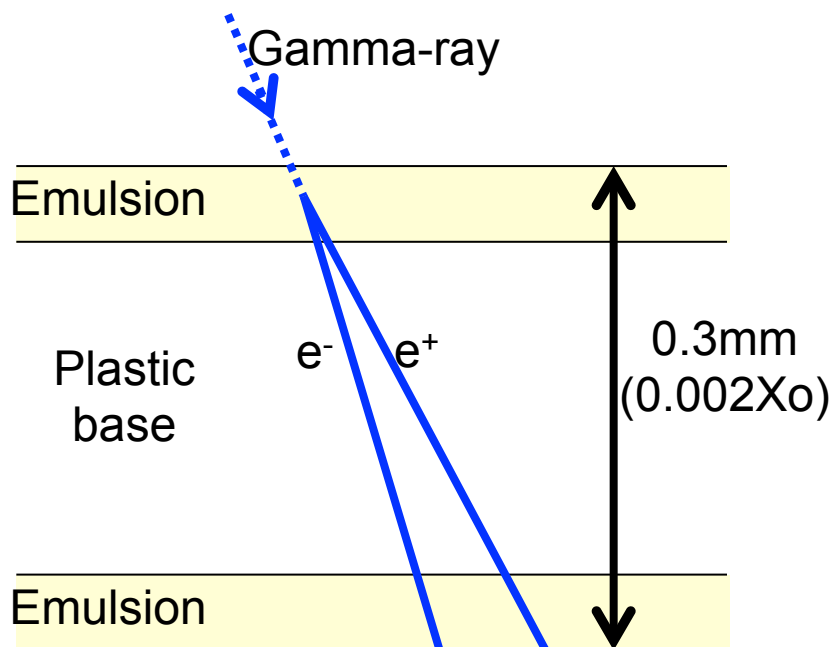
$$\tan \theta_{\gamma} = \frac{P_e \sin \theta_e + P_p \sin \theta_p}{P_e \cos \theta_e + P_p \cos \theta_p}$$

# 原子核乾板(エマルション)

Microscopic view  
10micron



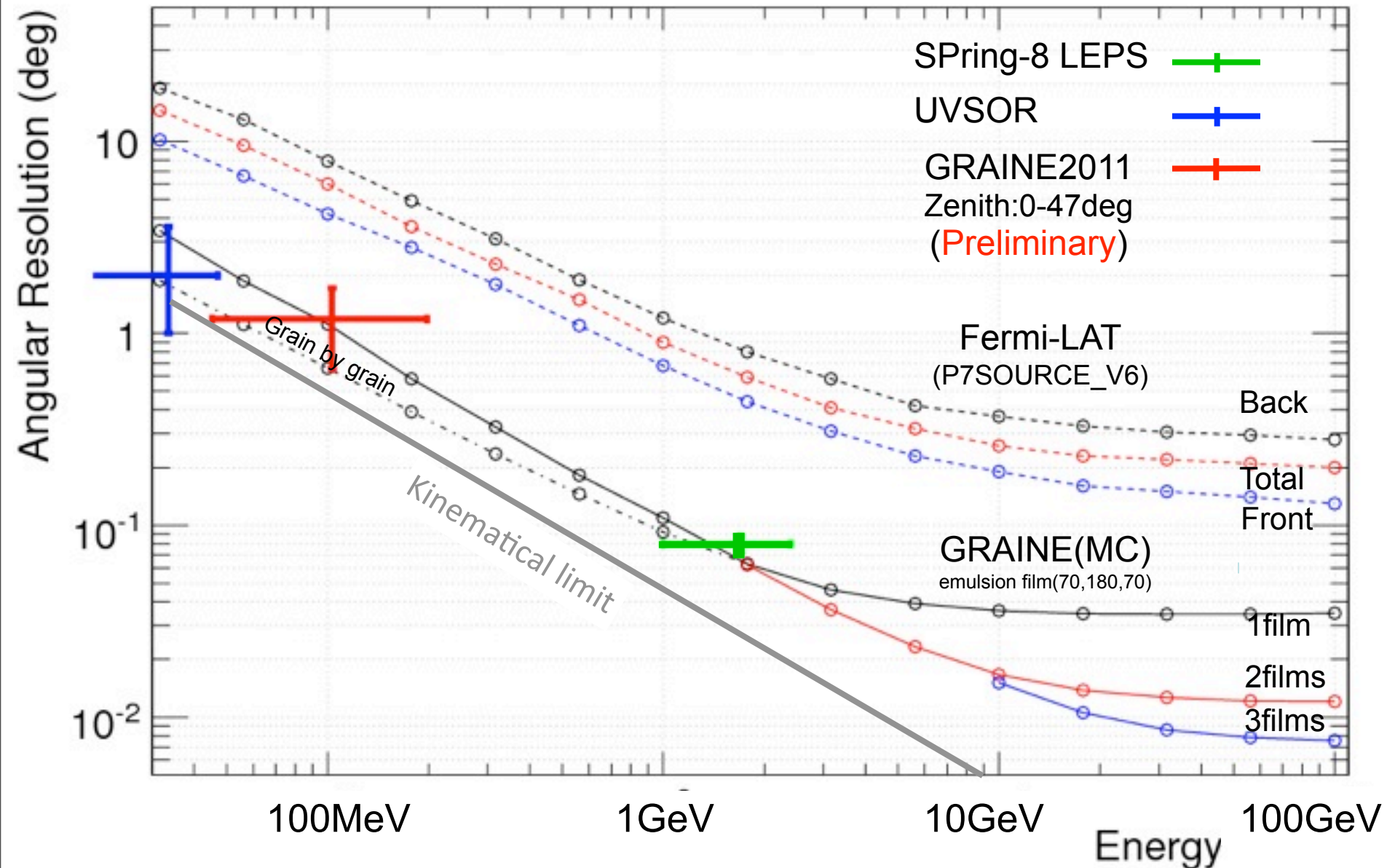
## エマルションフィルムの断面図



- ◎優れた空間分解能
- ◎少ない通過物質質量
- ◎軽量
- ◎大面積化可能
- ◎安価

# ガンマ線 角度分解能

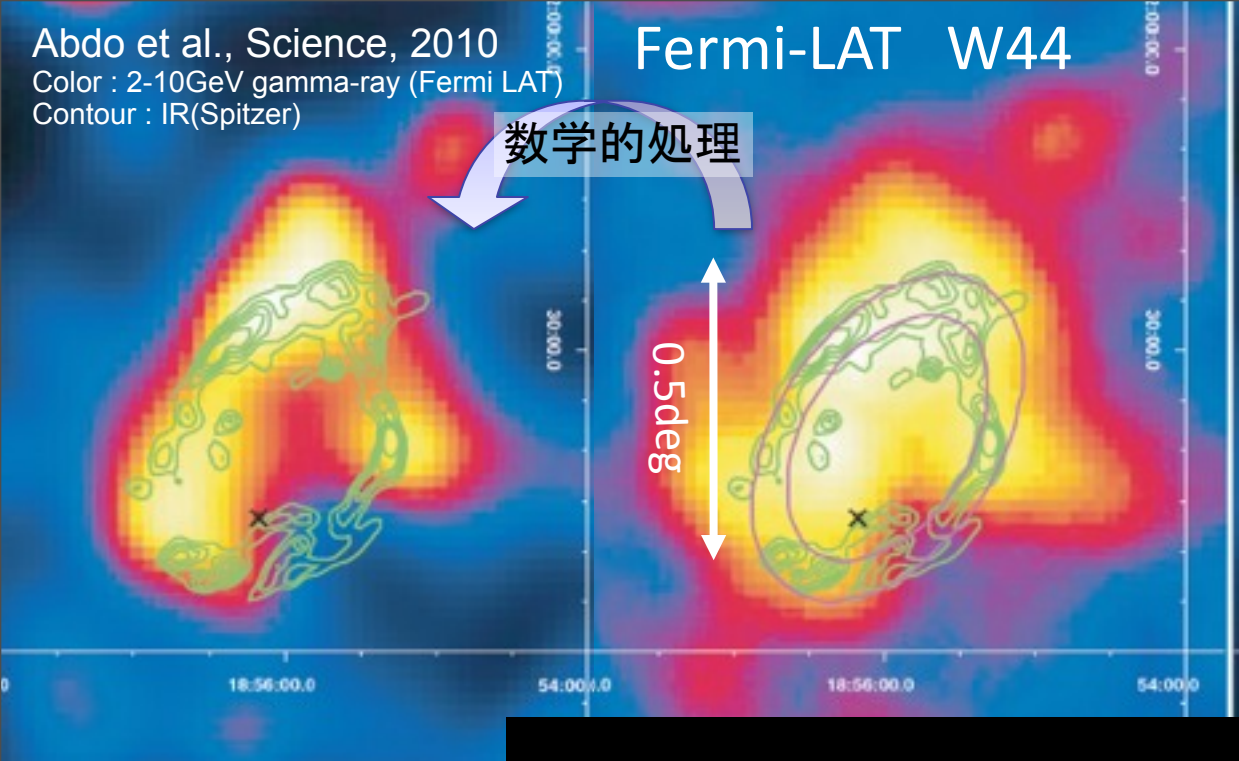
PSF at normal incidence





Abdo et al., Science, 2010  
Color : 2-10GeV gamma-ray (Fermi LAT)  
Contour : IR(Spitzer)

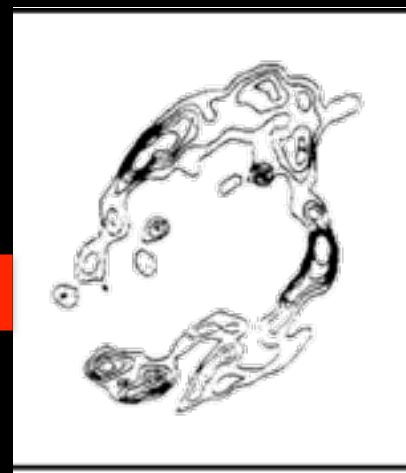
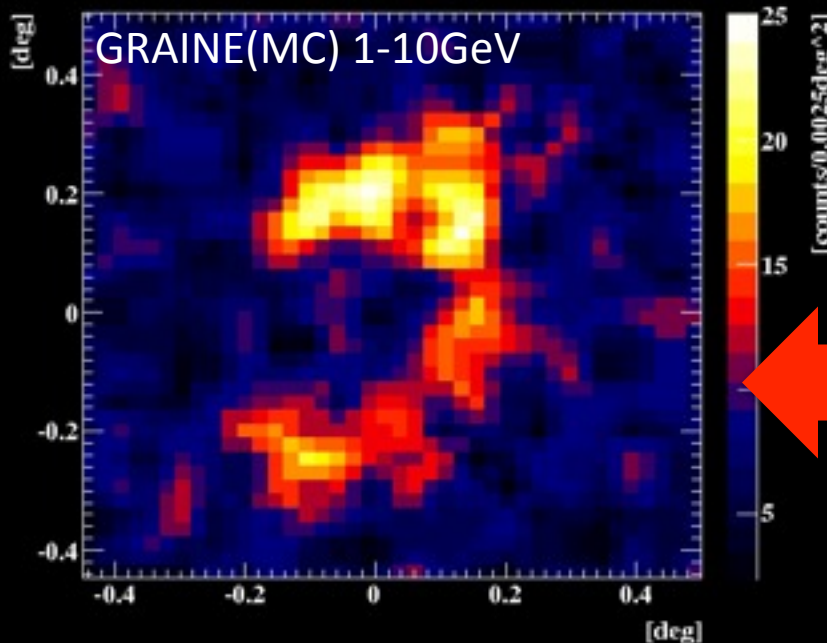
Fermi-LAT W44



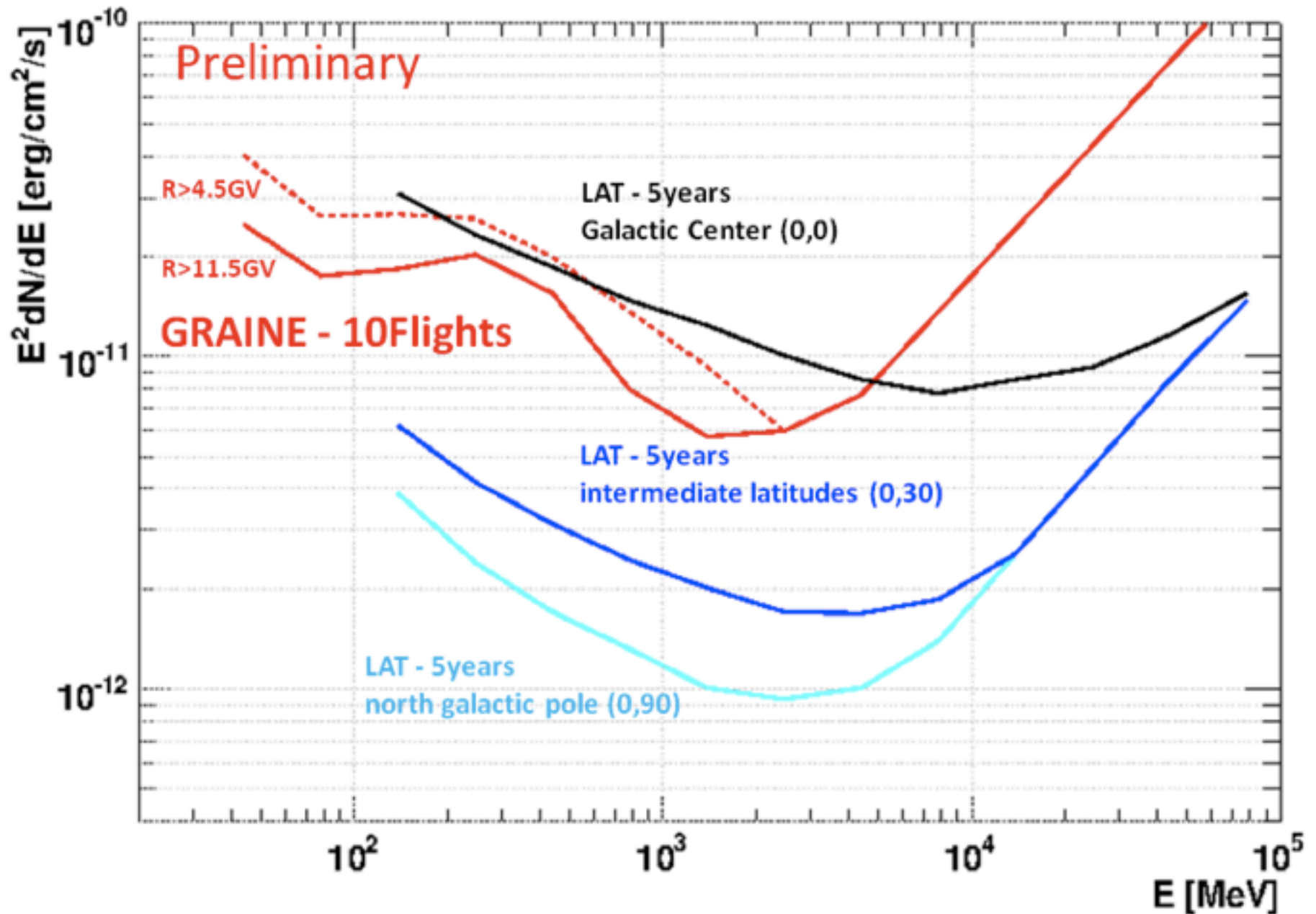
# 空間構造 の解明

Spitzer(4.5 $\mu\text{m}$ 赤外)  
のデータを真として  
シミュレーション

3Flight  
(17day)  
相当の観測

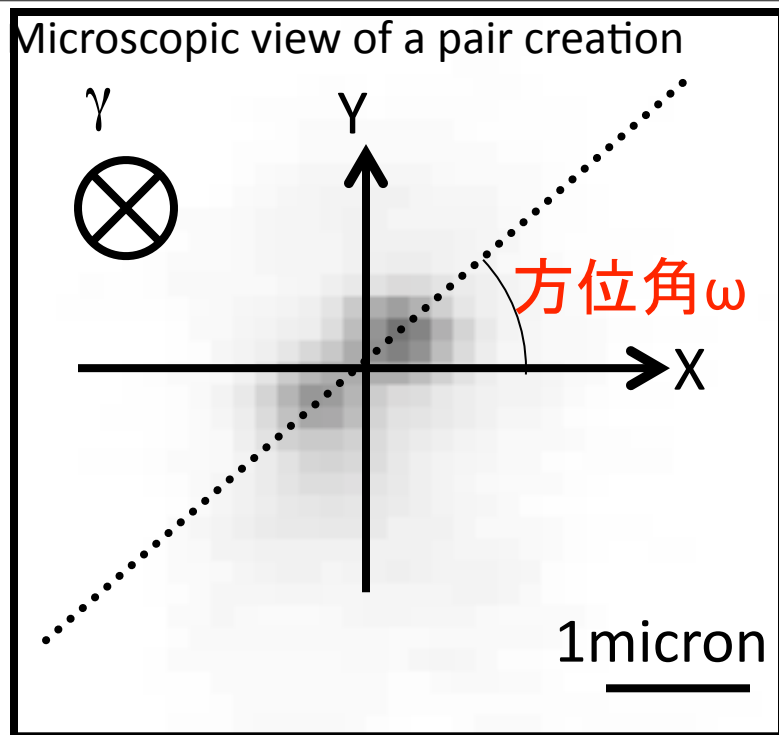
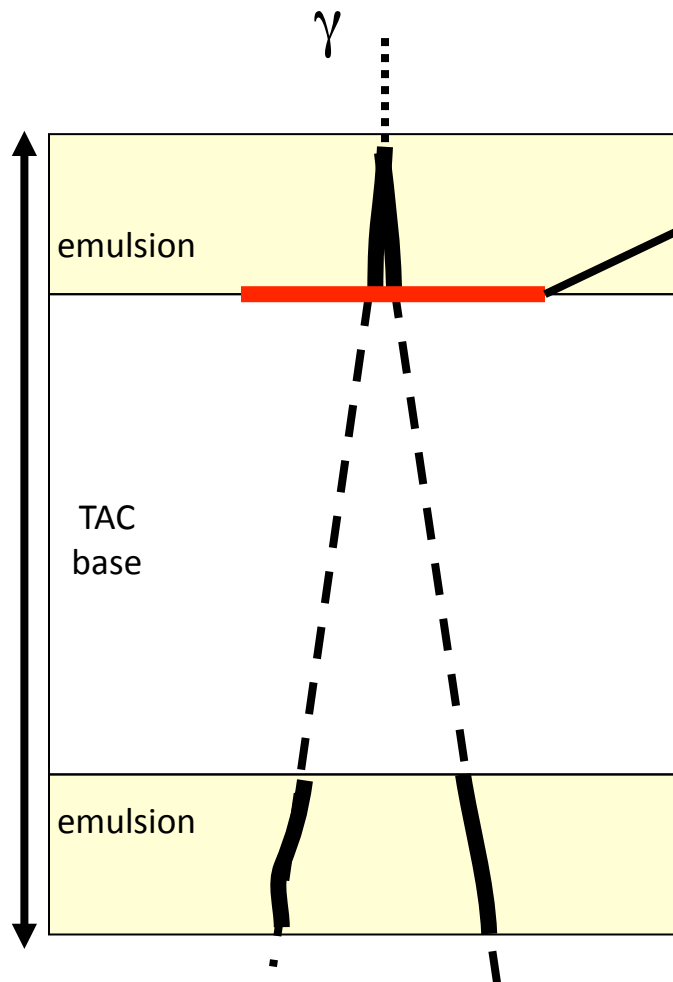


# 銀河中心領域の観測

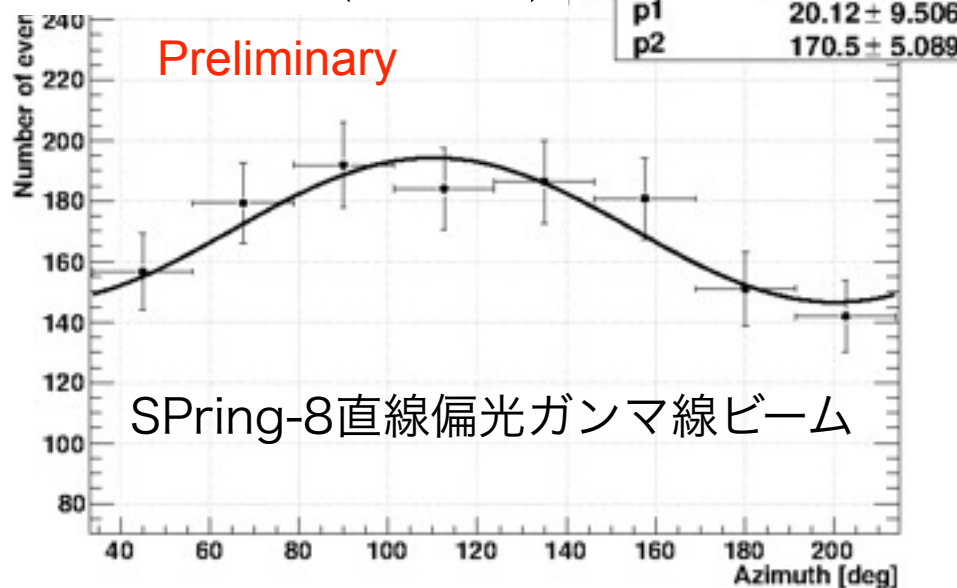




# 偏光観測

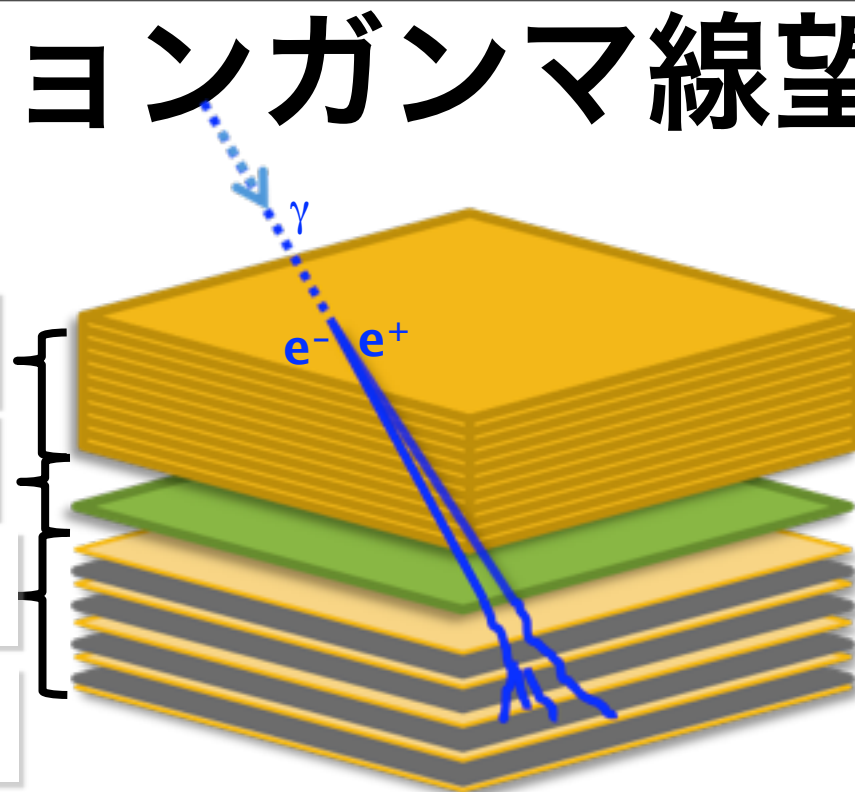


方位角分布(DATA)



3.5σで実証

# エマルションガンマ線望遠鏡



## Converter

Emulsion + Copper foil

## Timestamper

Multi-stage shifter

## Calorimeter

Emulsion + metal plate

## Attitude monitor

Star camera

\*  $10\text{m}^2 \cdot \epsilon_{\text{trans}} \cdot \epsilon_{\text{conv}} \cdot \epsilon_{\text{det}}$

	Fermi LAT		GRAINE
Angular resolution@100MeV	6.0deg (105mrad)	<b>x1/6</b> →	1.0deg (17mrad)
@1GeV	0.90deg (16mrad)	<b>x1/9</b> →	0.1 deg (1.7mrad)
Energy range	20MeV - 300GeV		10MeV - 100GeV
Polarization sensitivity	No		Yes
Effective area @ 100MeV	0.25m <sup>2</sup>	<b>x8</b> →	2.1m <sup>2</sup> *
@ 1GeV	0.88m <sup>2</sup>	<b>x3</b> →	2.8m <sup>2</sup> *
Dead time	26.5 μsec (readout time)	→	Dead time free

# GRAINE ロードマップ

- 2011年6月8日, 大樹航空宇宙実験場(北海道), JAXA大気球実験  
口径面積：12.5cm x 10cm, フライト時間：4.3時間 (1.6時間@35km)
  - 各構成要素の動作・性能実証、及び連動実証
  - 大気ガンマ線の実測

OPERAフィルム(一部に  
新型原子核乳剤フィルム)
- 2014年度(予定), アリススプリングス(豪), JAXA国際大気球実験  
口径面積：2500cm<sup>2</sup>, フライト時間：1日
  - 既知のガンマ線天体の観測試験
  - 最高解像度での撮像
- 2015年度-  
口径面積：10m<sup>2</sup>, フライト時間：7日間を繰り返す
  - 科学観測開始

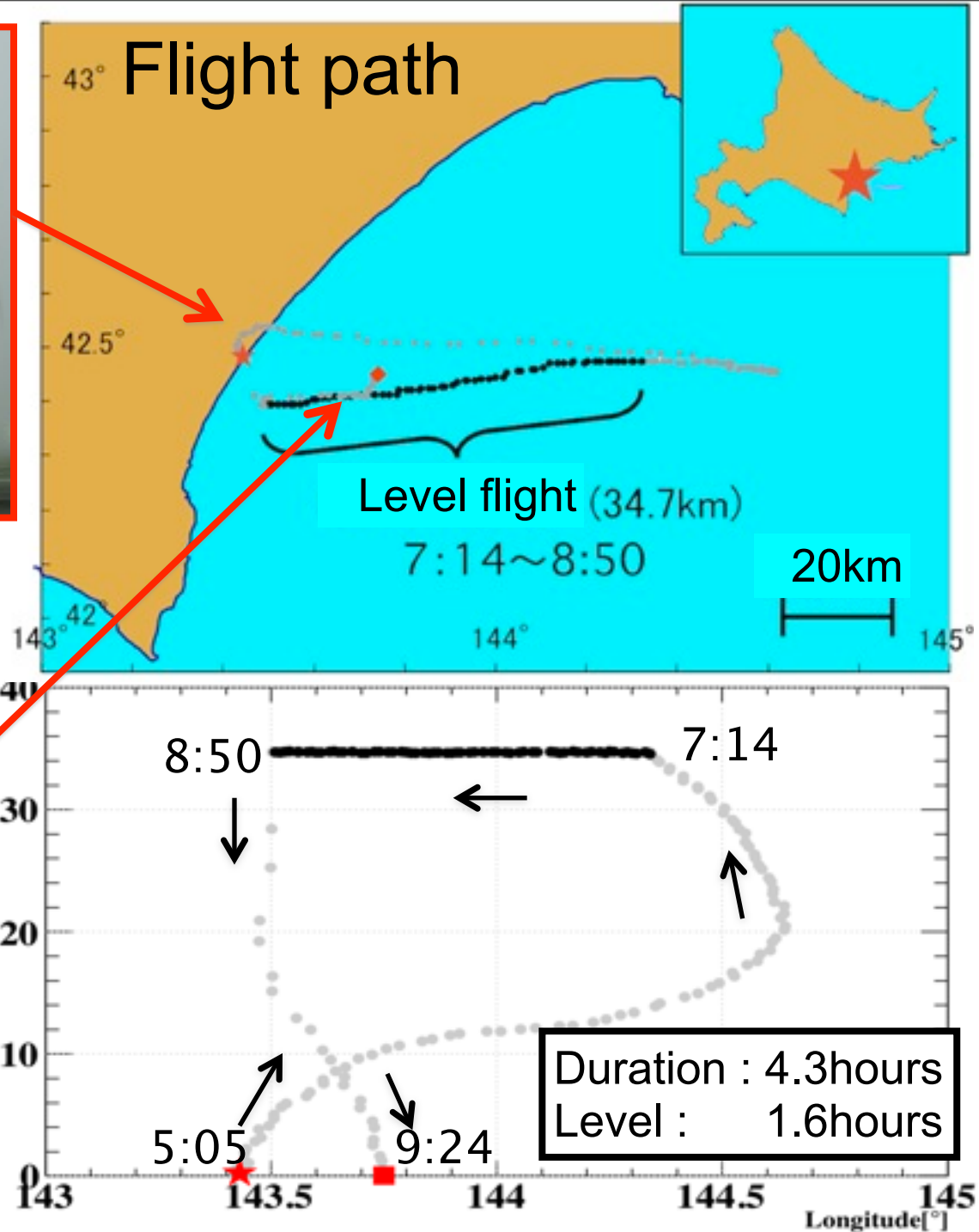
フィルム総面積~1500m<sup>2</sup>/フライト

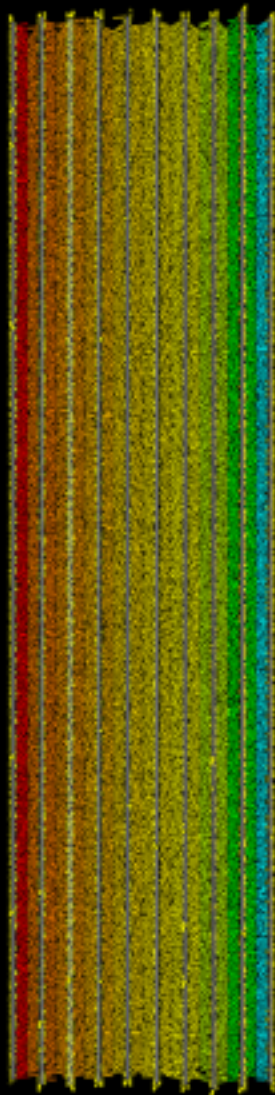


TARF  
8<sup>th</sup> June 2011  
5:05

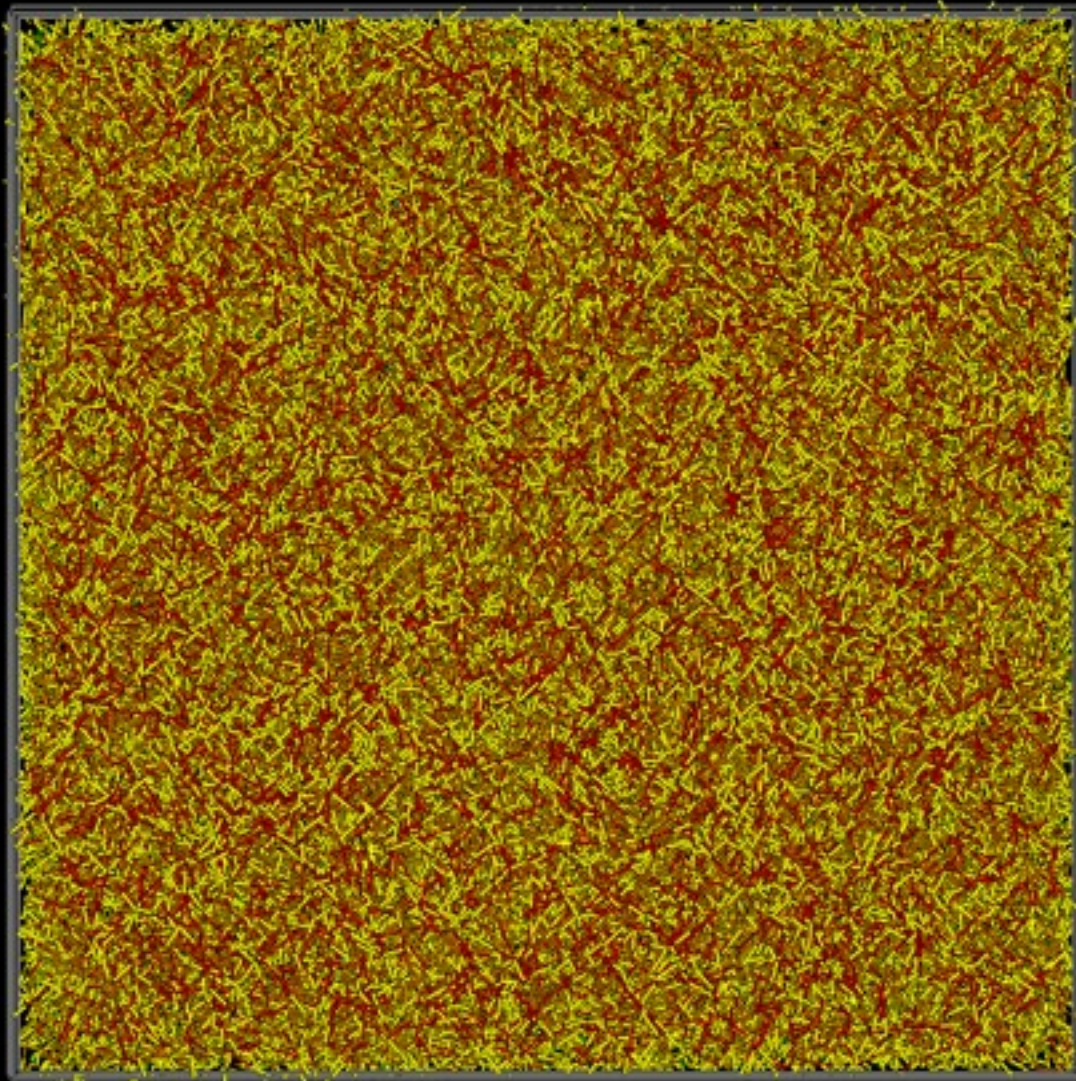


9:36

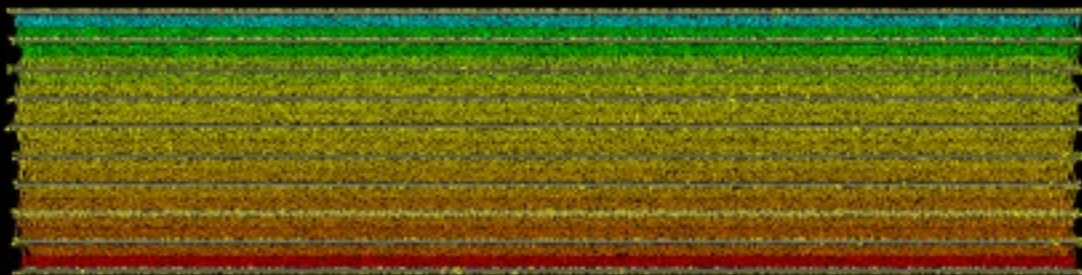




Y



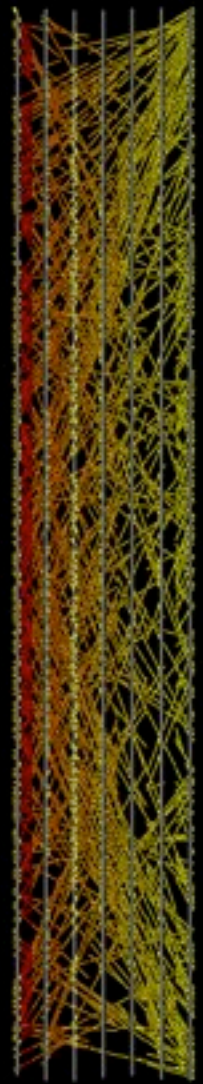
Z



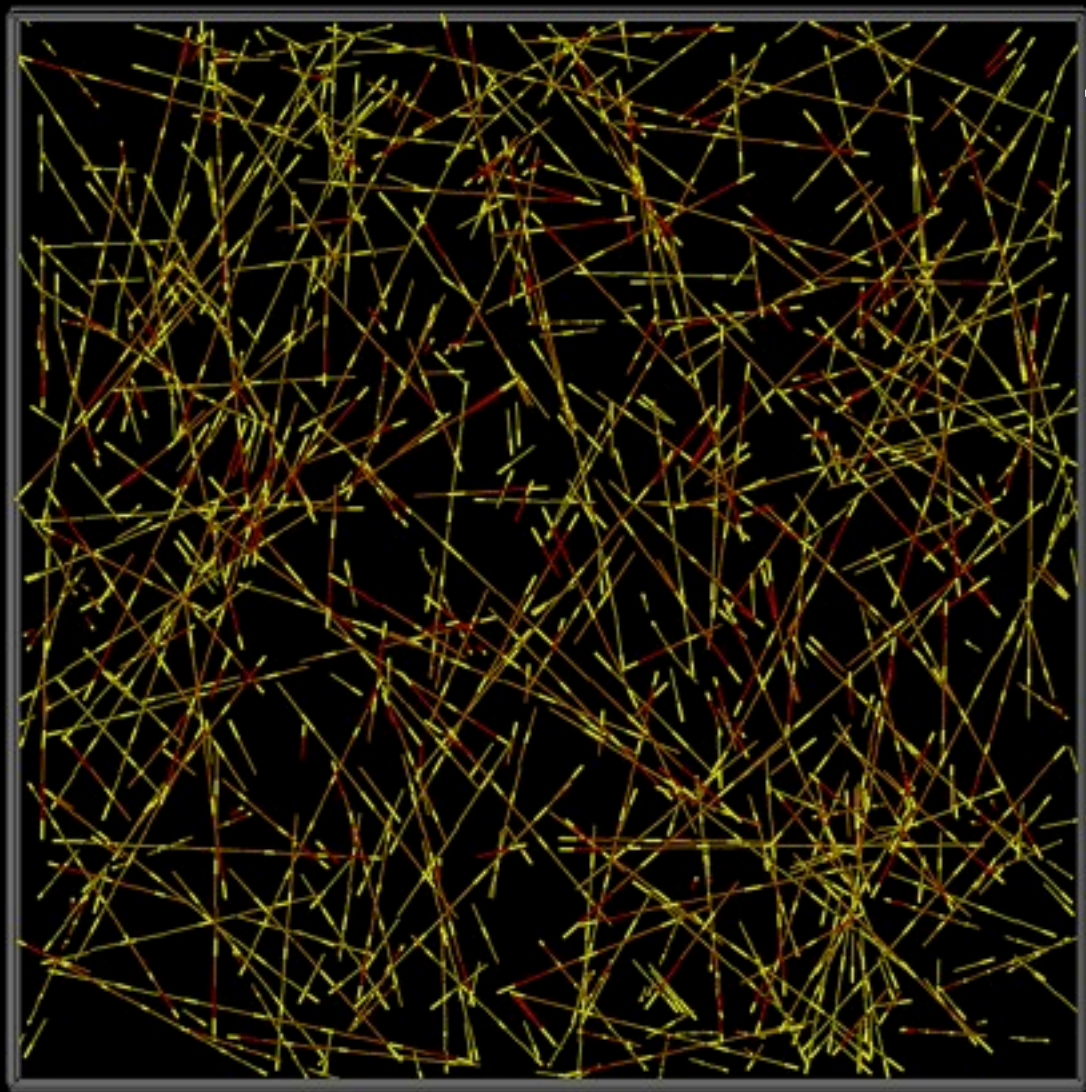
X

$(5\text{mm})^2 \times 10\text{films}$   
 $2 \times 10^4\text{tracks}$



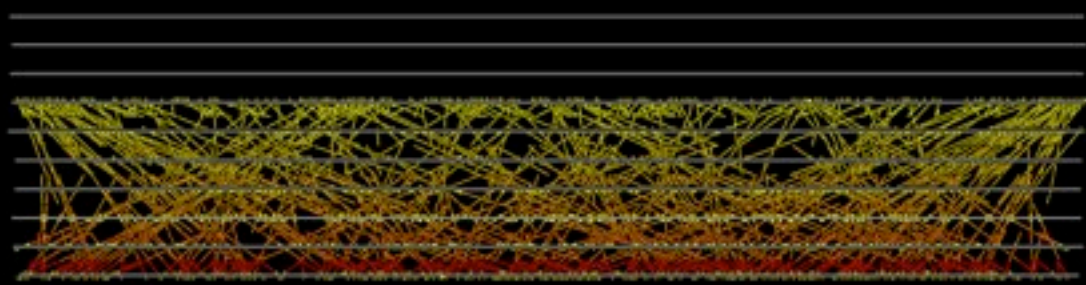


Y

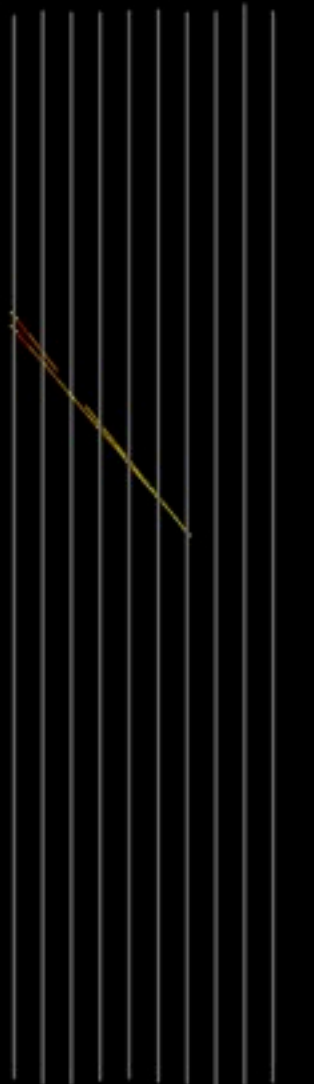


Z

X

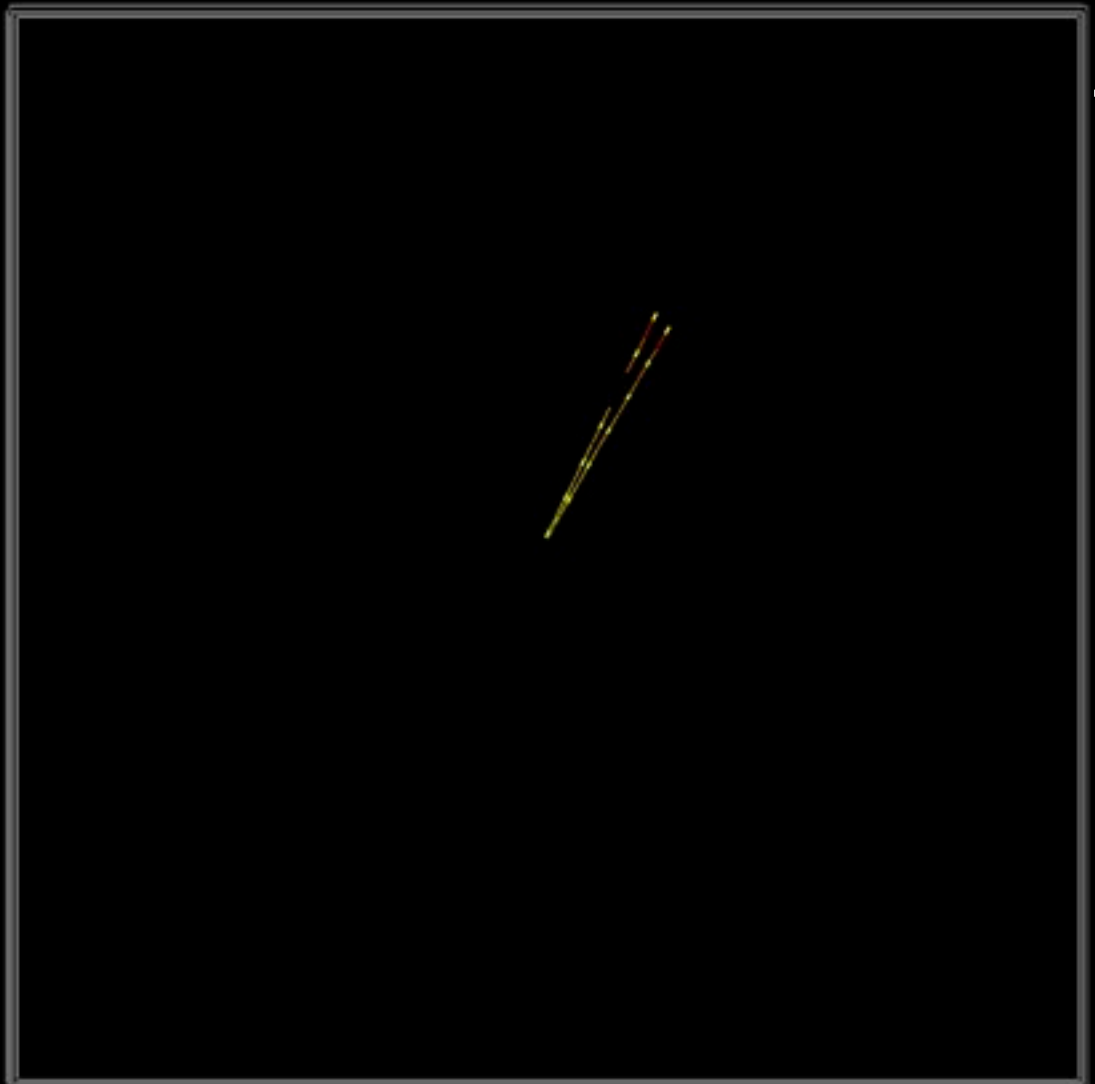




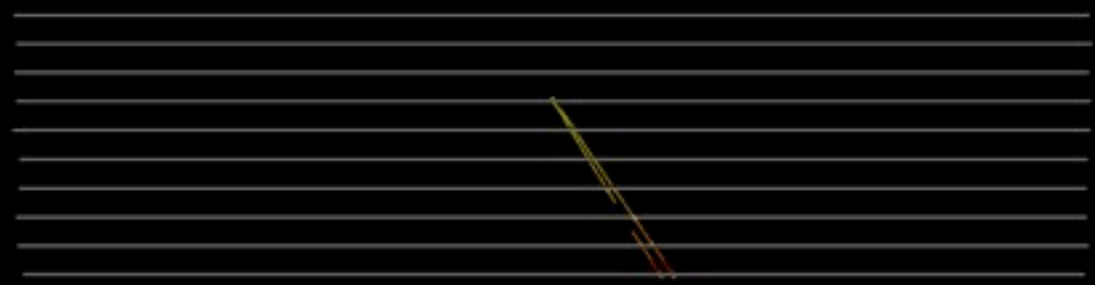


Y

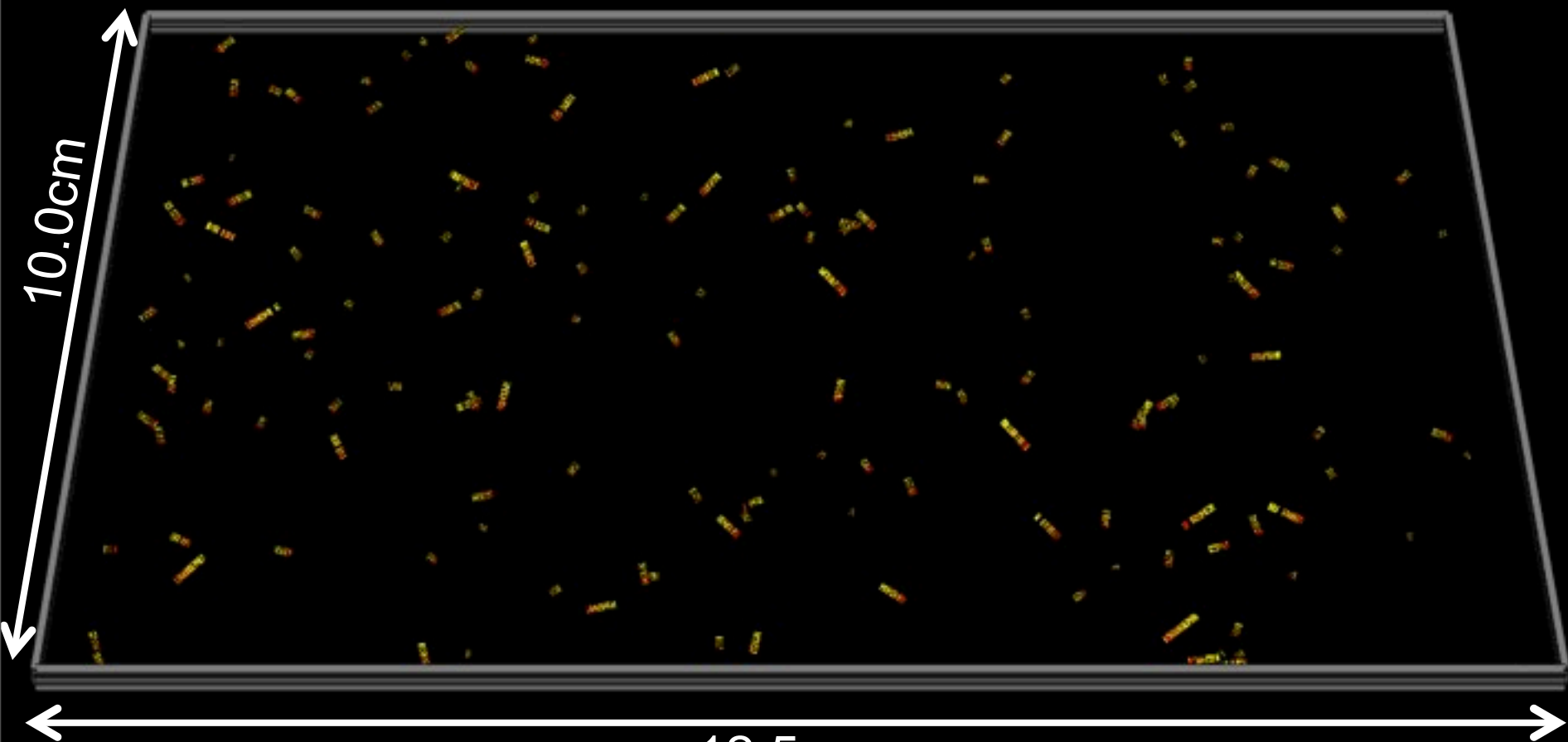
X



Z



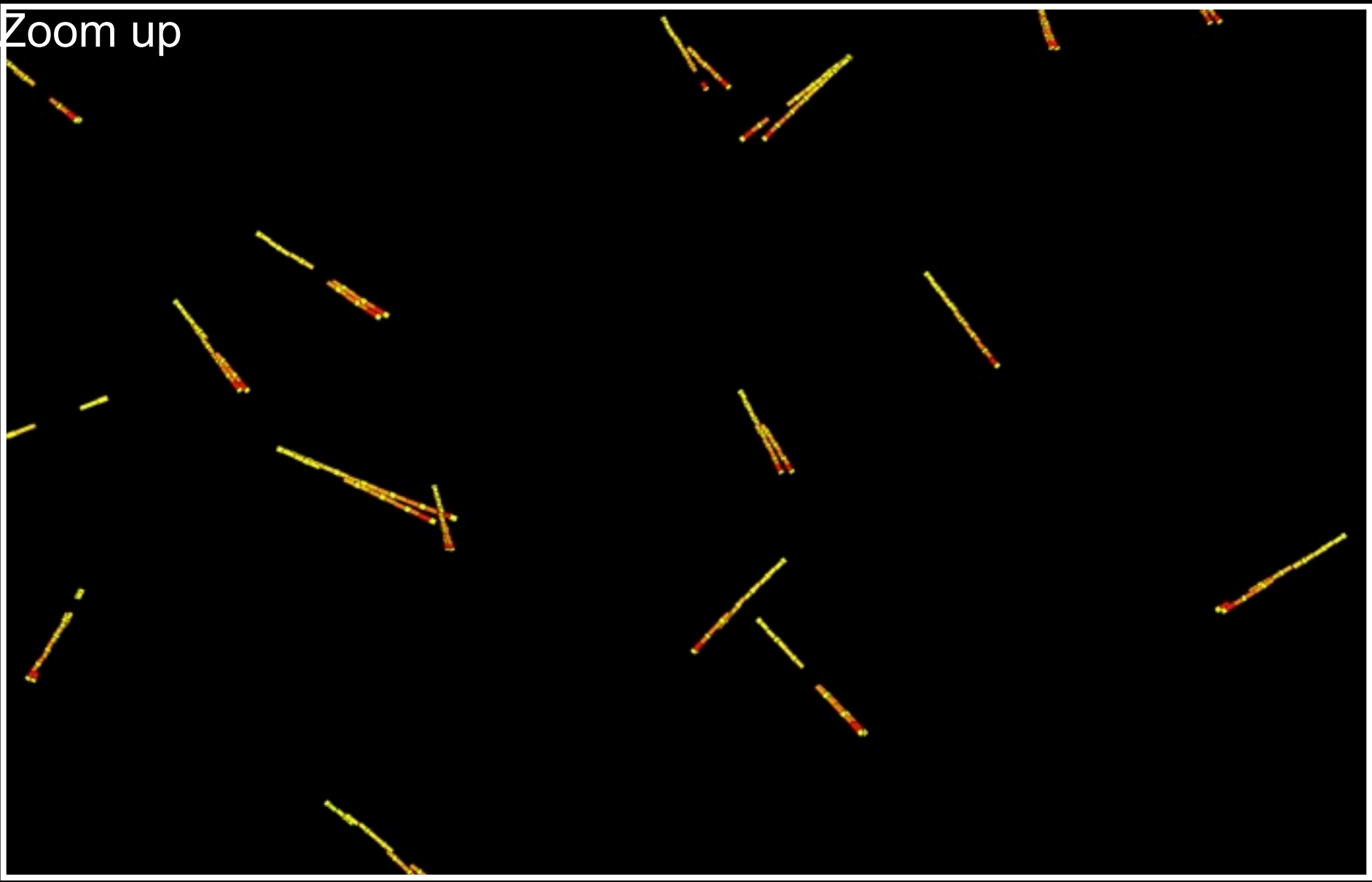
$E_\gamma > 50\text{MeV}$   
 $|\tan\theta_{\text{proj}}| < 1.0$



12.5cm

153events  
Reliability 97%

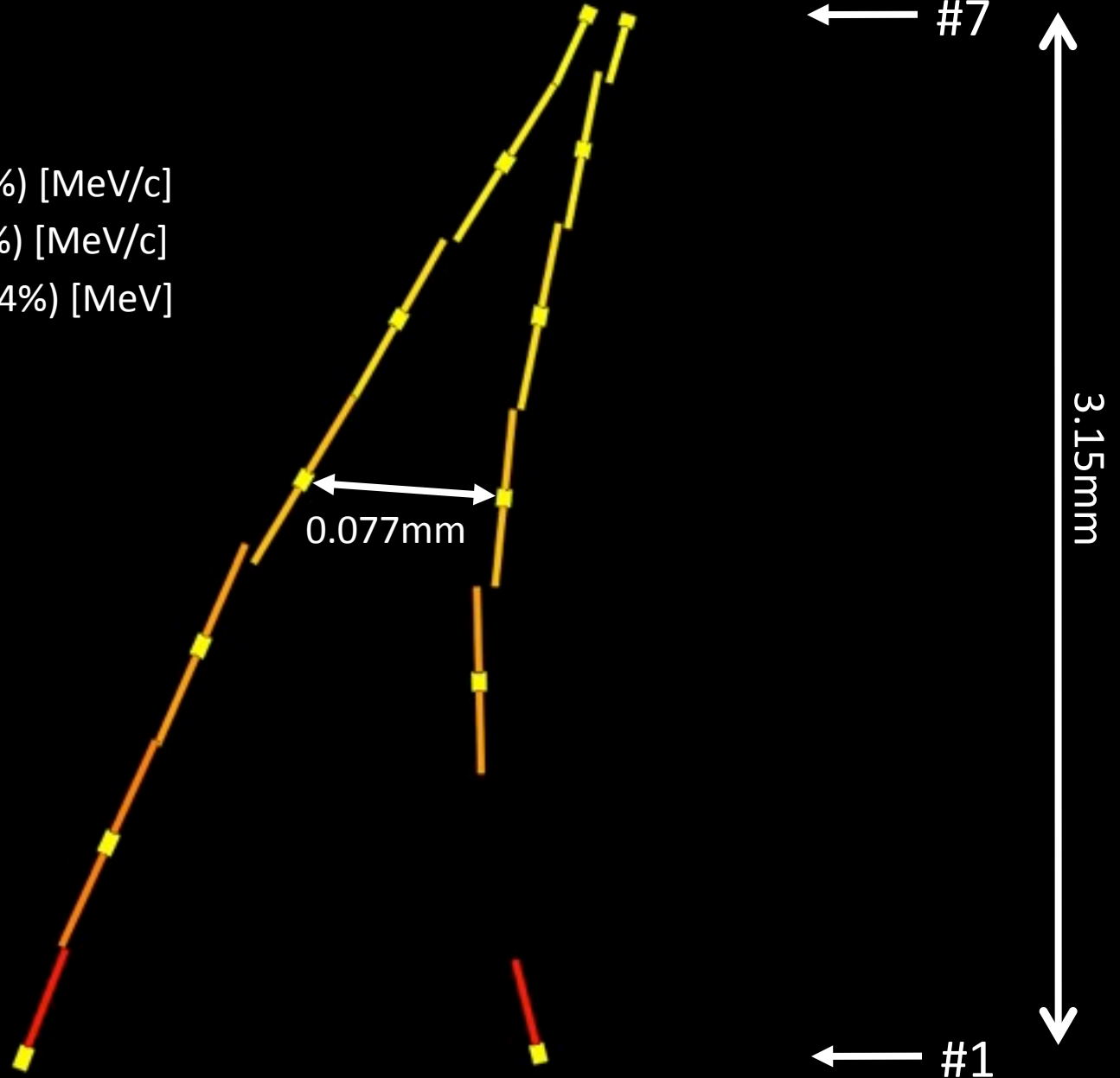
Zoom up



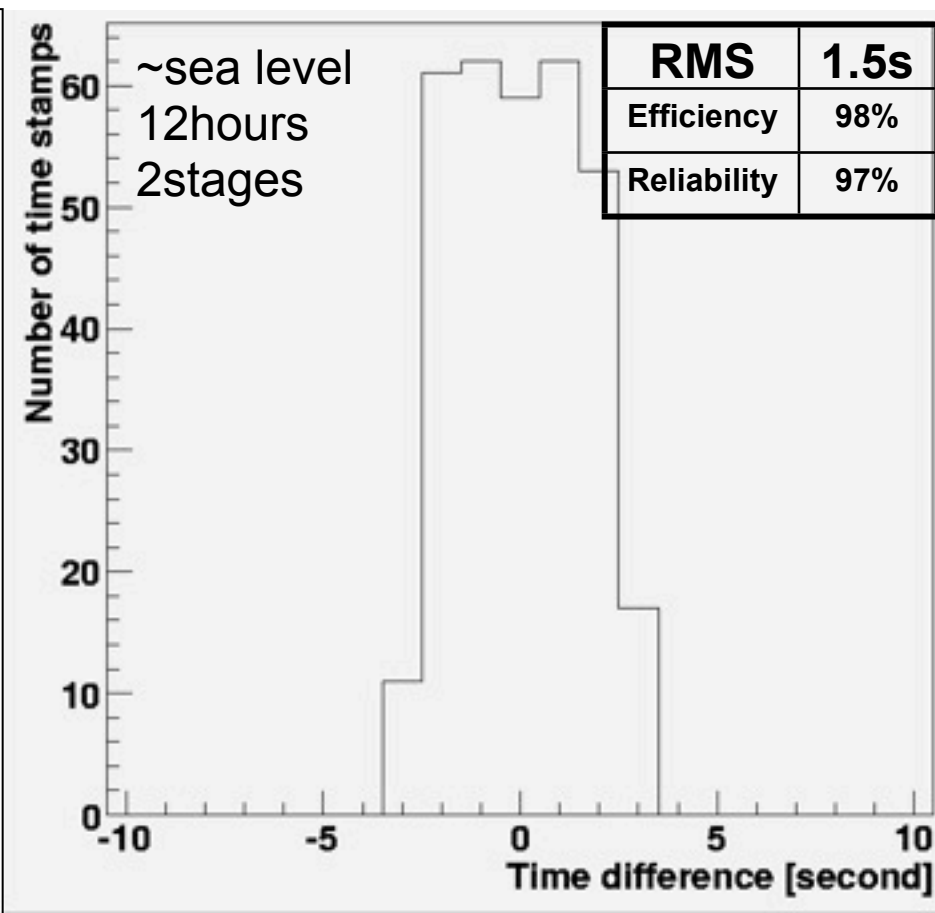
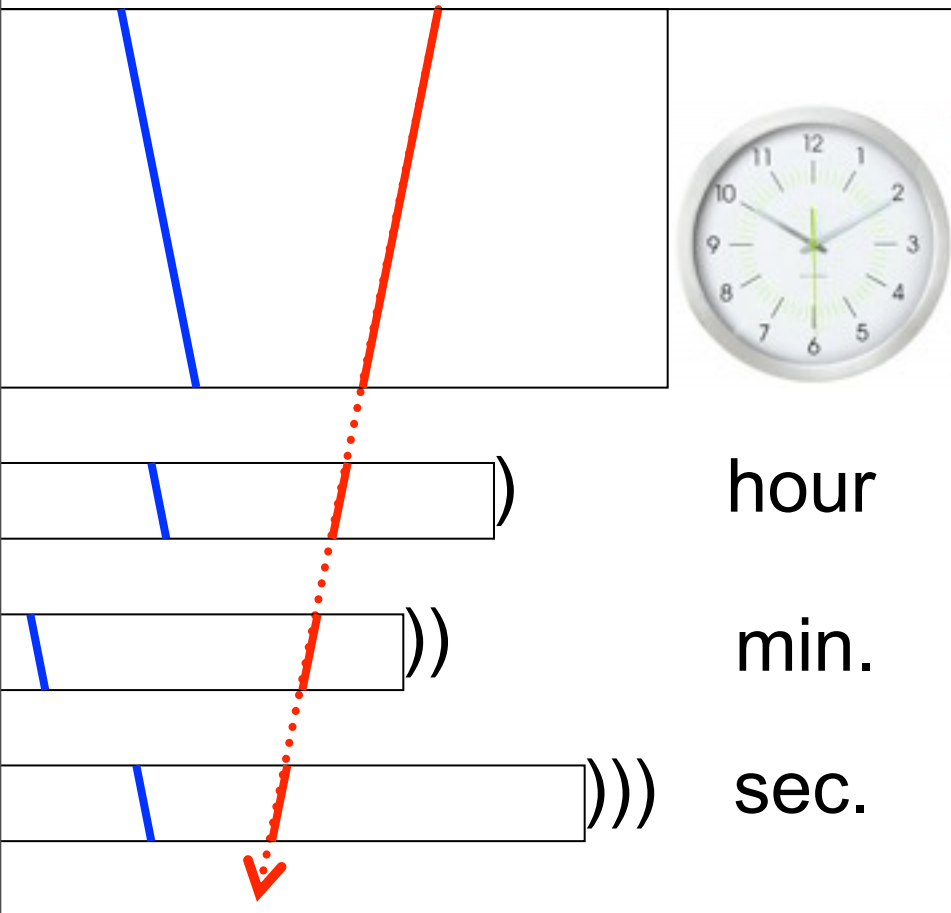


# ガンマ線事象例

Event : 71 6923485  
Start : #7  
 $\theta_{\text{incident}}$  : 9.748 [deg]  
 $p\beta_1(\text{左})$  : 60 +20 -12 (25%) [MeV/c]  
 $p\beta_2(\text{右})$  : 32 + 9 - 6 (22%) [MeV/c]  
 $E_\gamma$  : 92 +22 -13 (+24% -14%) [MeV]



# 原子核乾板に時間情報を与える “多段シフター”



S.Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 620 (2010) 192-195

少ない物質質量、高い位置・角度分解能をもつエマルジョンフィルムから構成  
→低運動量閾値、高信頼性、高効率、大面積化可能

シンプルな構成、コンパクト、軽量、高電圧不要、低消費電力、デッドタイムフリー

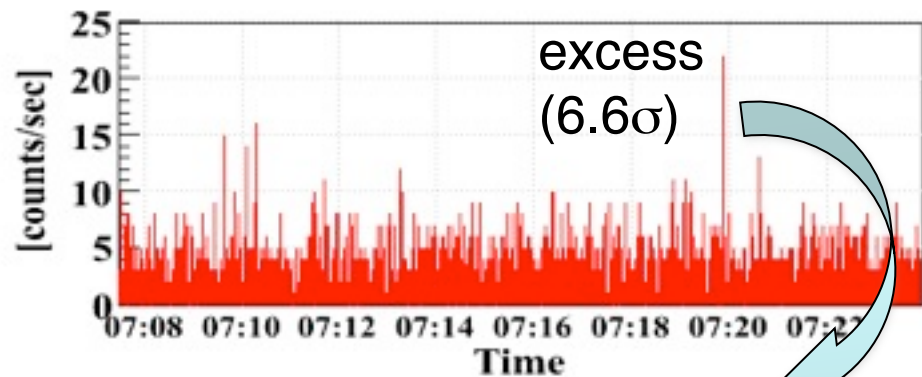
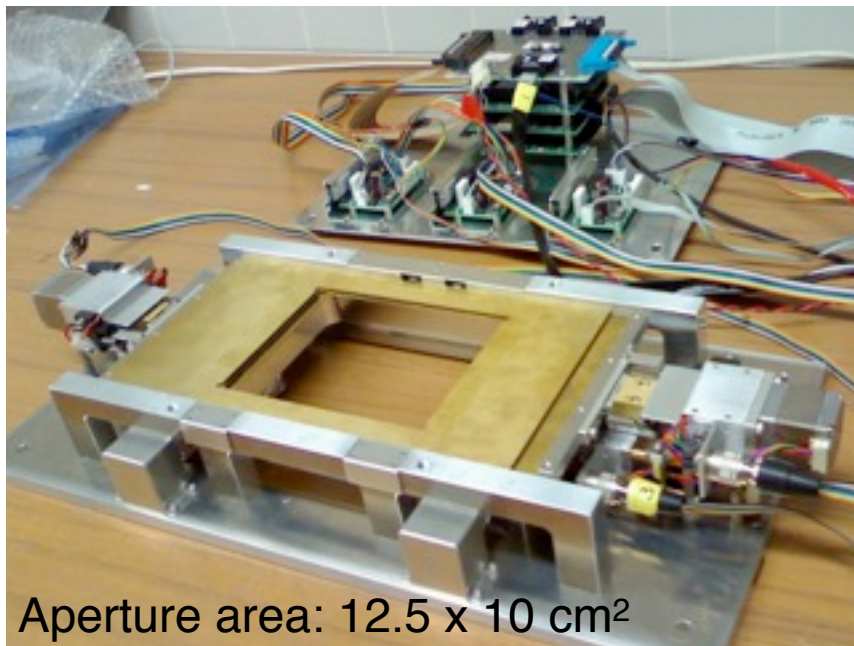
# Establishment of timestamp technique

H.Rokujo, et al., NIM A, 701 (2013)

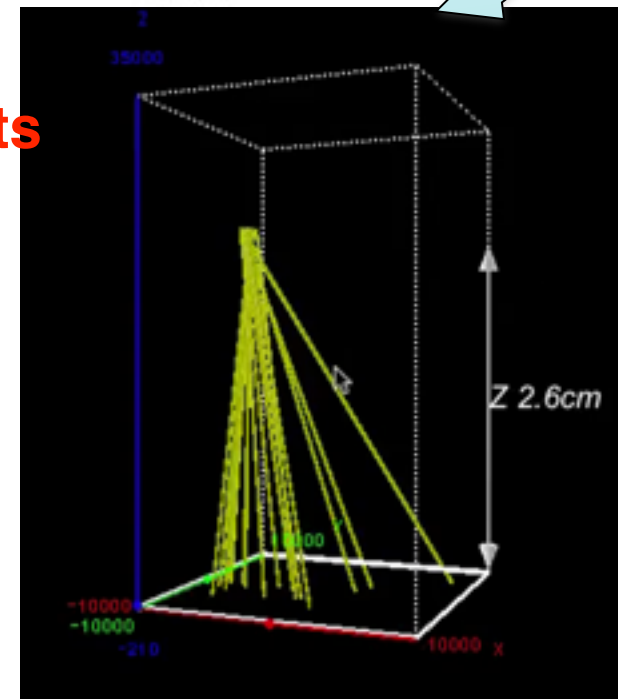
@GRAINE2011

“Multi-stage shifter” 1st model

Track rate measurement@35km



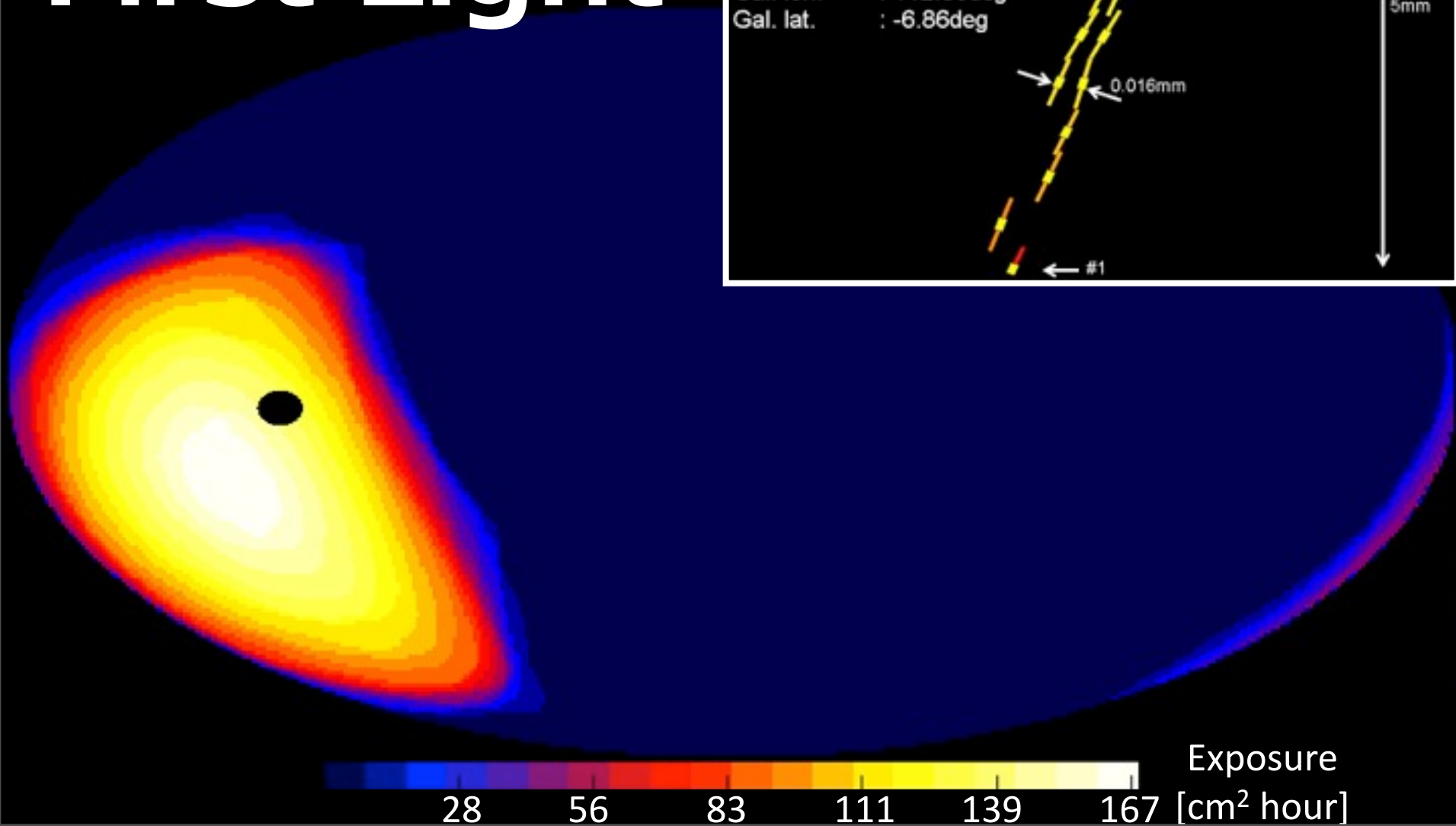
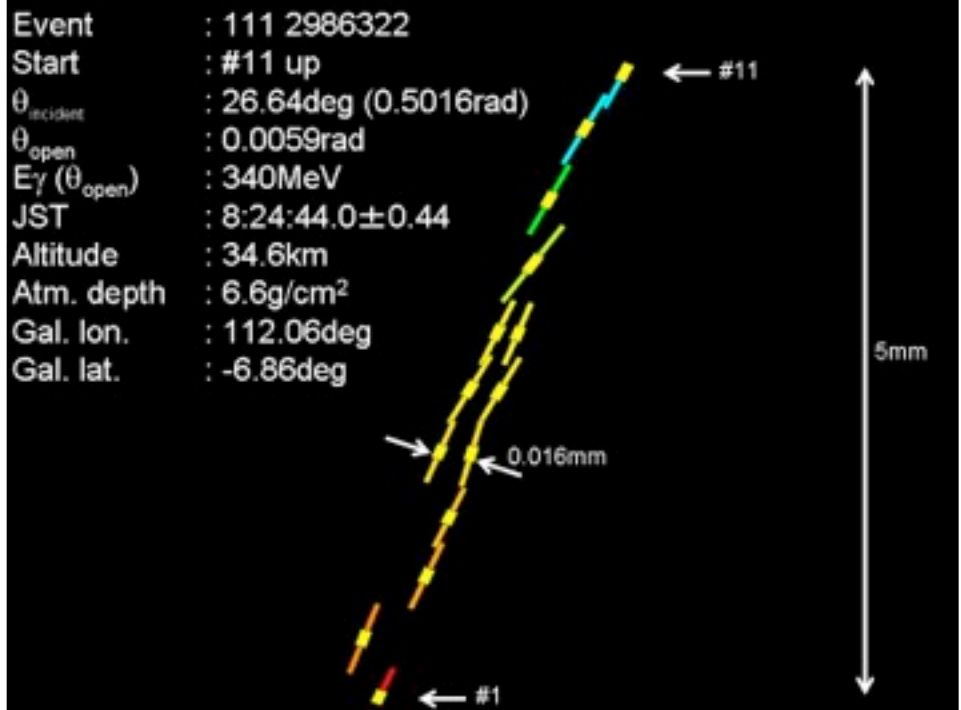
Detection of hadron events



- Correct operation during whole observation time
- Giving time info. to all penetrating tracks
- Detection of hadron shower tracks by timing and 3-D spatial analysis
- Time resolution: 0.15 sec

# GRAINE

## First Light



Exposure  
[cm<sup>2</sup> hour]

28 56 83 111 139 167

# Hadron induced event

$E_v$  : 2438038

$E_\gamma$  : 45+33-10[MeV]

$\theta_\gamma$  : 46.61[deg]

7:18:34.5 (JST)

$\Delta t = \pm 0.5s$

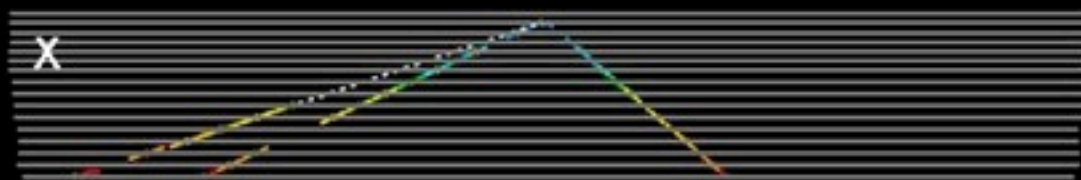
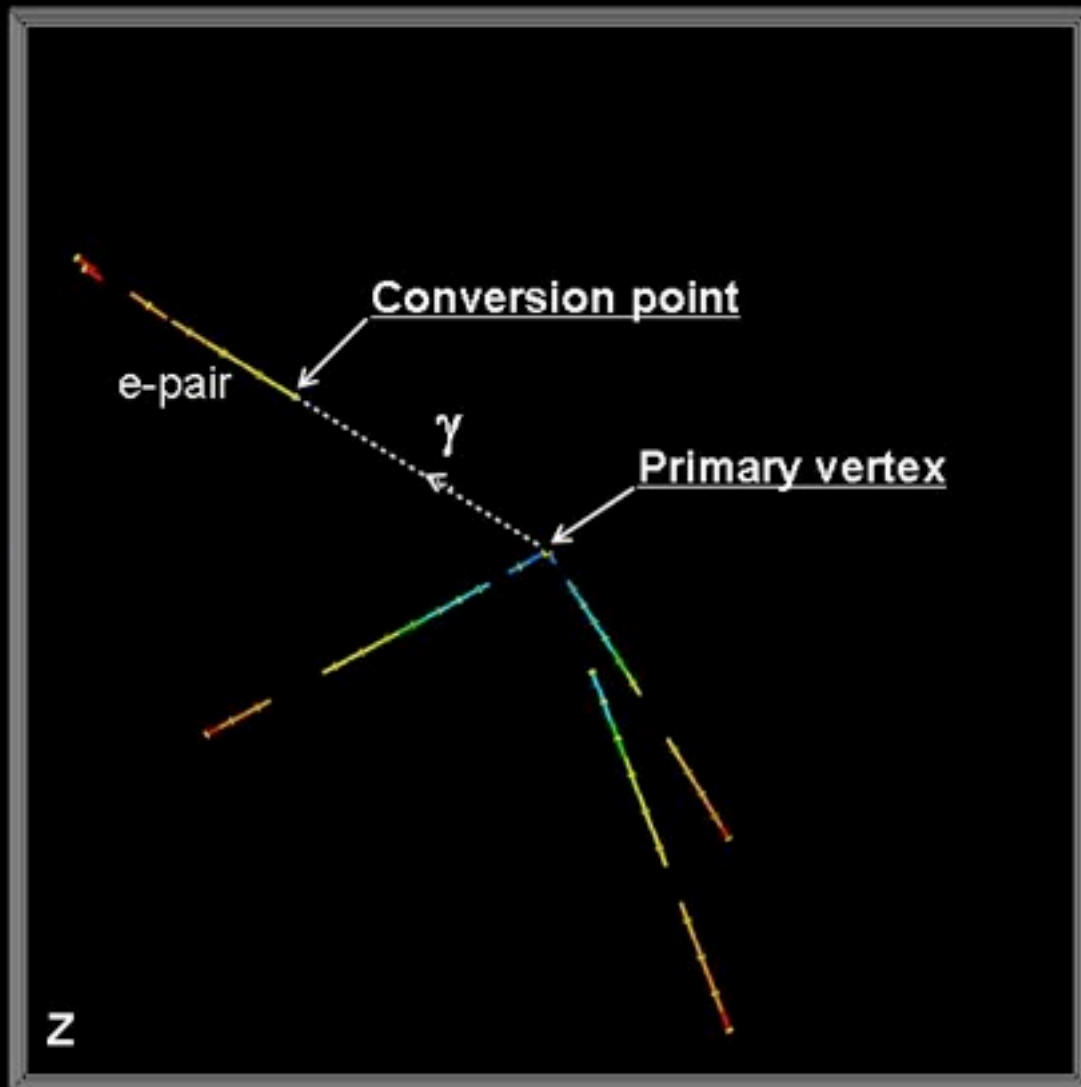
Convergence

1.2cm x 1.2cm  
x 16films

**Pointing accuracy**

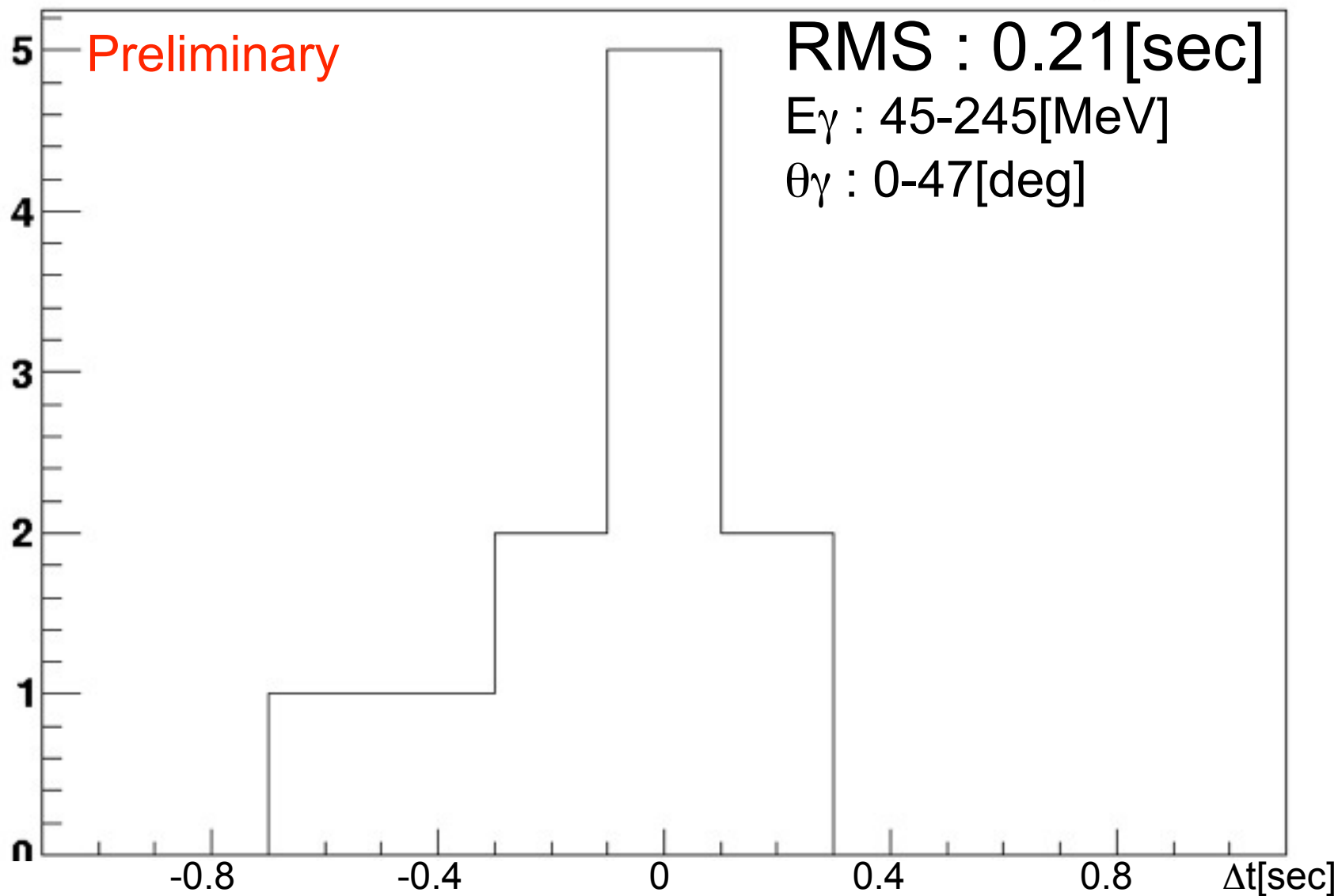
$\Delta\theta_{\text{space}}$  : 0.65deg

(0.0114rad)





# ガンマ線 タイムスタンプ精度



# GRAINE ロードマップ

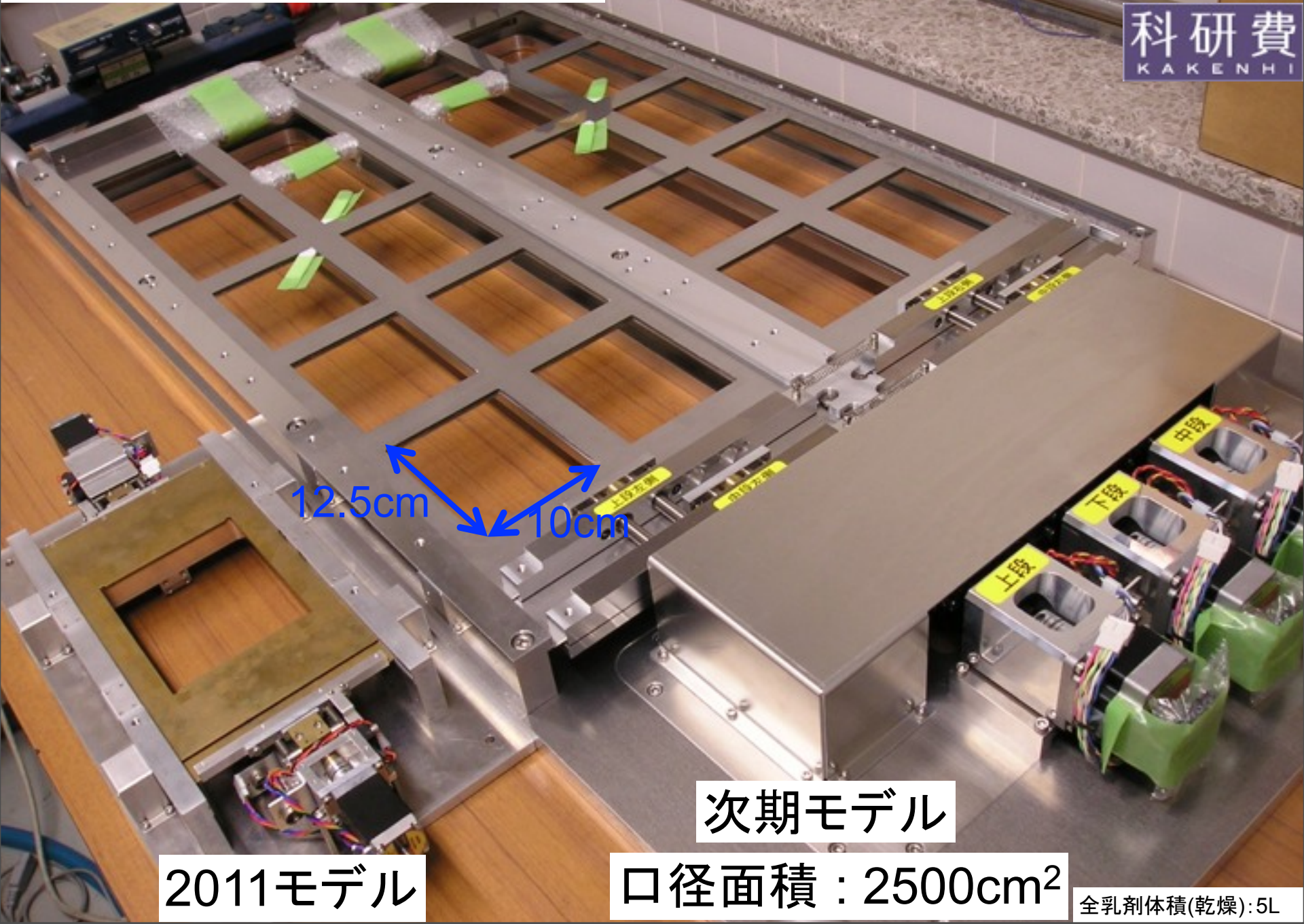
- 2011年6月8日, 大樹航空宇宙実験場(北海道), JAXA大気球実験  
口径面積 : 12.5cm x 10cm, フライト時間 : 4.3時間 (1.6時間@35km)
  - 各構成要素の動作・性能実証、及び連動実証
  - 大気ガンマ線の実測
- 2014年度(予定), アリススプリングス(豪), JAXA国際大気球実験  
口径面積 : 2500cm<sup>2</sup>, フライト時間 : 1日
  - 既知のガンマ線天体の観測試験
  - 最高解像度での撮像
- 2015年度-  
口径面積 : 10m<sup>2</sup>, フライト時間 : 7日間を繰り返す
  - 科学観測開始

フィルム総面積~1500m<sup>2</sup>/フライト

# 多段シフター フライトモデル

三鷹光器社との共同開発

科研費  
KAKENHI



12.5cm  
10cm

次期モデル

2011モデル

口径面積 : 2500cm<sup>2</sup>

全乳剤体積(乾燥): 5L



# 天球図@オーストラリア

Alice Springs

緯度:  $-23^{\circ}40'$

経度:  $133^{\circ}50'E$

11月15日

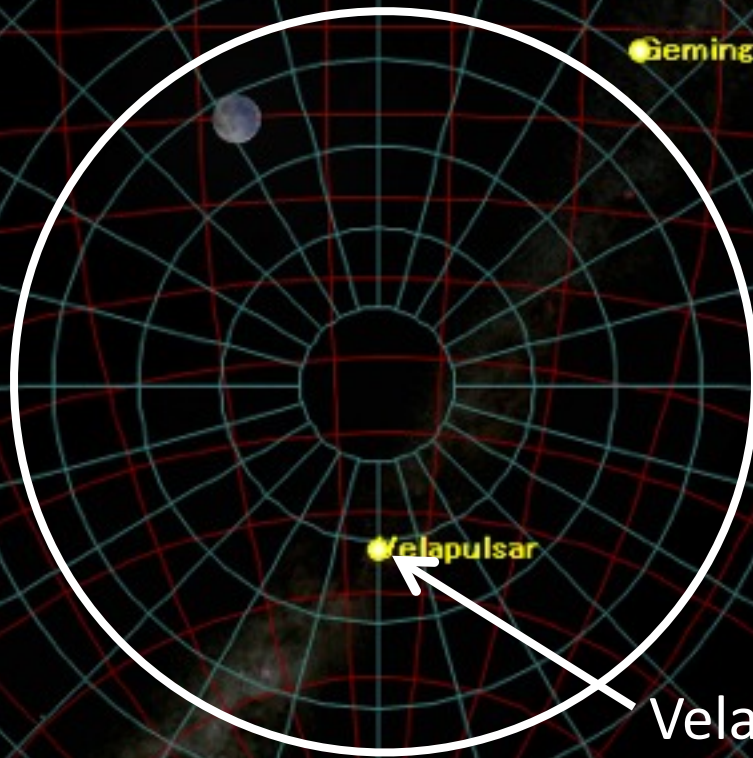
5:05(NT)

(-0:30(JST))

東

西

望遠鏡視野相当  
天頂角45度



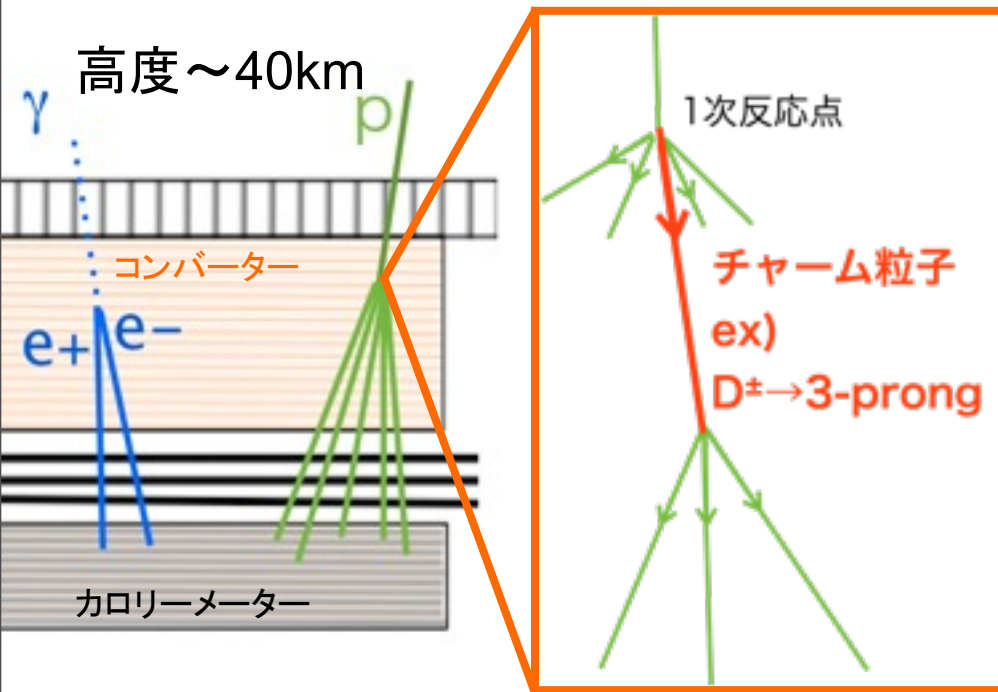
Vela

視野内6.5時間

(1:50-8:20)

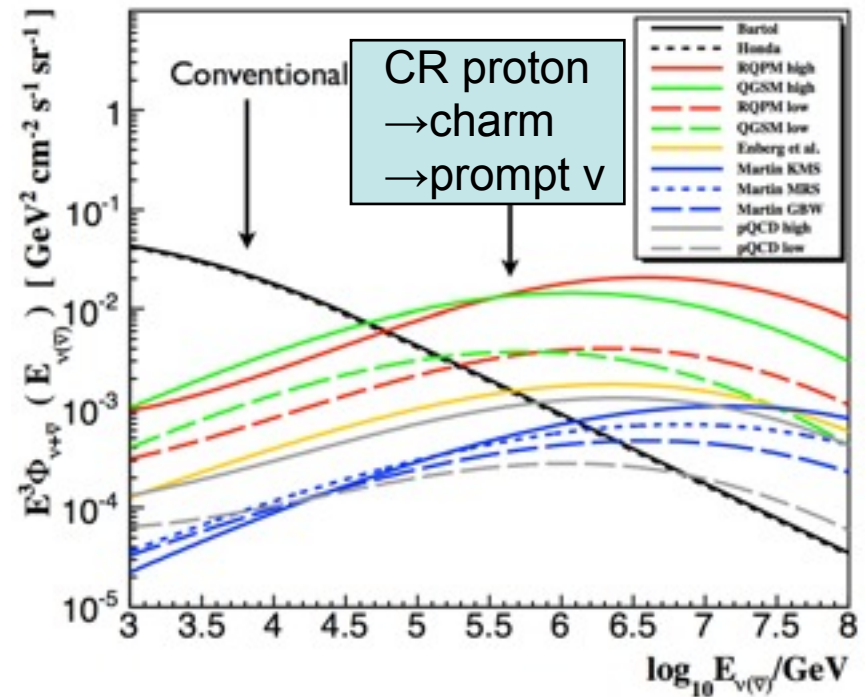
6.5時間の観測により $5\sigma$ 以上で検出可能

# 気球高度での宇宙線由来 チャーム粒子生成レート測定手法開発



1972 X粒子発見  
1980's FNAL E653 etc

Models for prompt neutrino fluxes



GRAINE2014での  
チャーム生成期待値

コンバーター	～10個
カロリメーター	～10 <sup>2</sup> 個

宇宙線チャーム生成レート(未実測)  
→prompt νのpredictionにfeedback



# まとめと展望

- **B01: 「超高解像度ニュートリノ検出器の開発」**  
**高い空間分解能を最大限に活かすアプリケーション**
  - ⇒ **気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡(GRAINE実験)**
    - 超新星残骸からのガンマ線イメージング
    - 天体密集領域の高感度観測
    - ガンマ線偏光測定
- **2011年、初気球実験を実施**
  - 上空でのガンマ線検出→時間情報付与( $\delta t \sim 0.1$ 秒)
    - 姿勢決定→イベントポイントニングを確立。
- **2014年豪州でのフライトに向けて準備進行中。**
  - 高感度フィルムを全面的に導入する。
  - Velaの検出、最高精度での結像を目指す。