

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

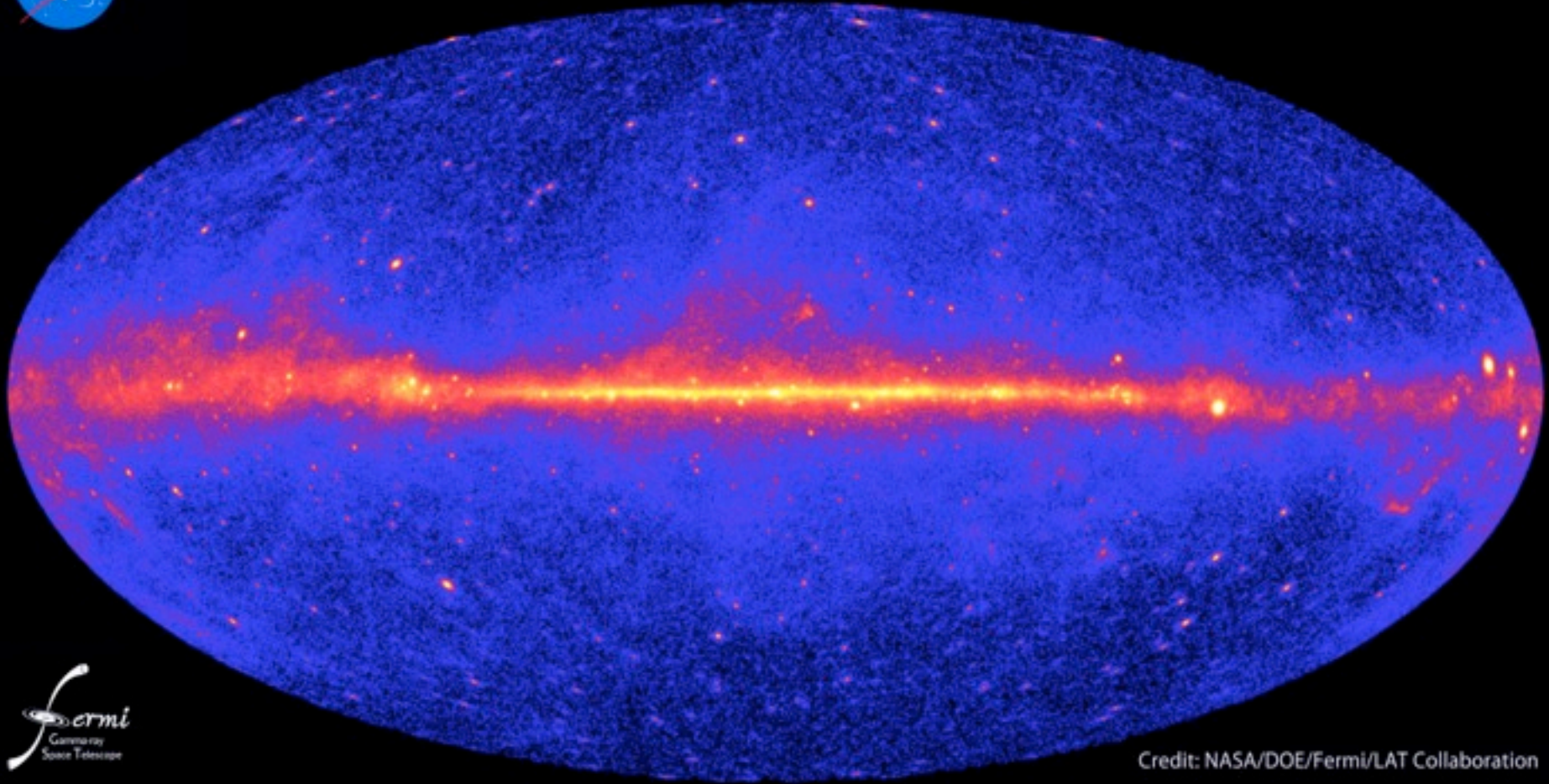
神戸大学、ISAS/JAXA、名古屋大学、
岡山理科大学、愛知教育大学、宇都宮大学

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 ($E_\gamma > 1\text{GeV}$)

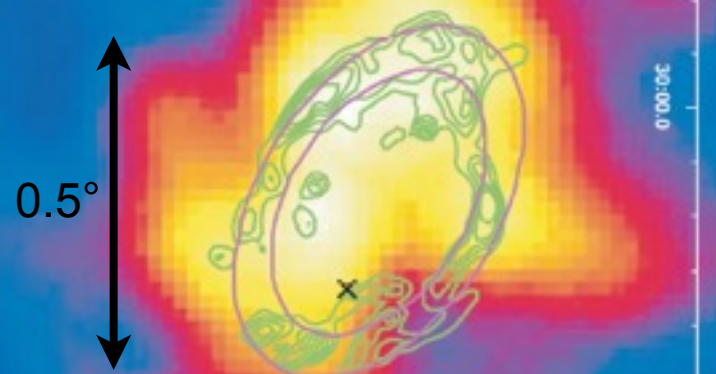


Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

1873 sources

超新星残骸(宇宙線起源?)

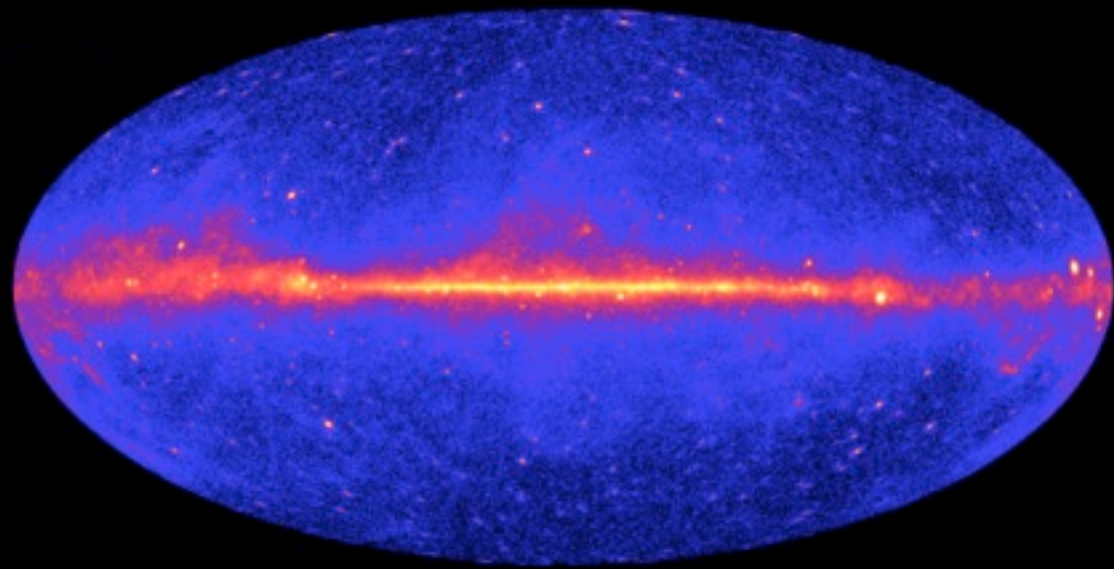
SNR W44



Abdo et al., Science, 2010

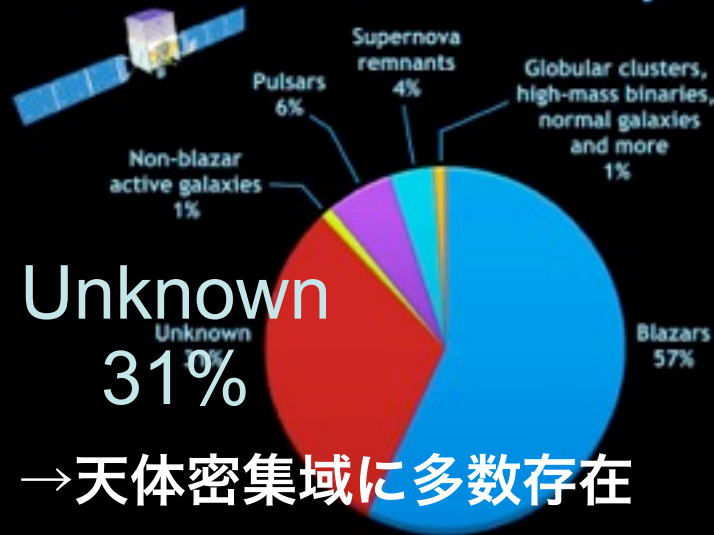
Color : 2-10GeV gamma-ray (Fermi LAT)

Contour : IR(Spitzer)



未同定天体の謎

What has Fermi found: The LAT two-year catalog



偏光観測

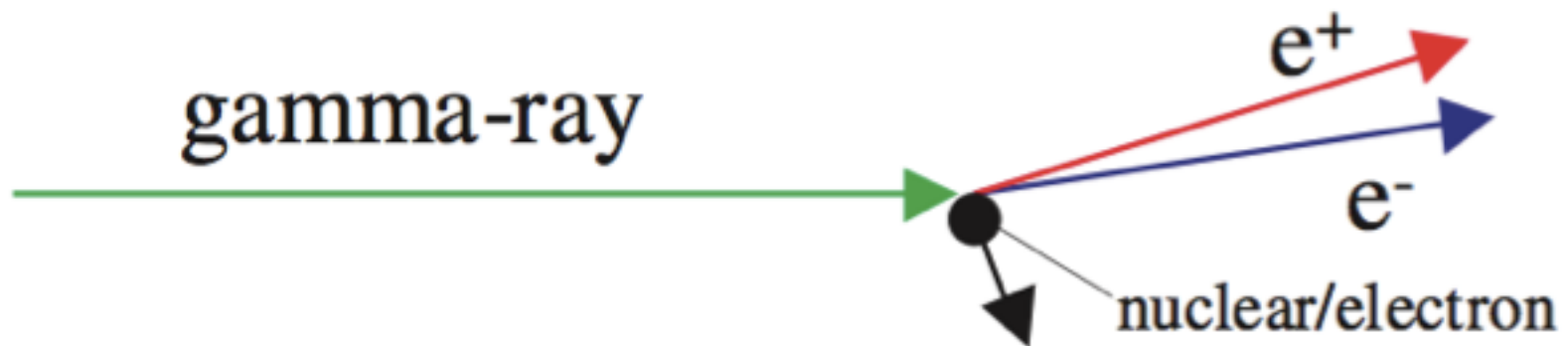
(放射機構の解明)



Crab

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

ガンマ線の到来方向決定



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

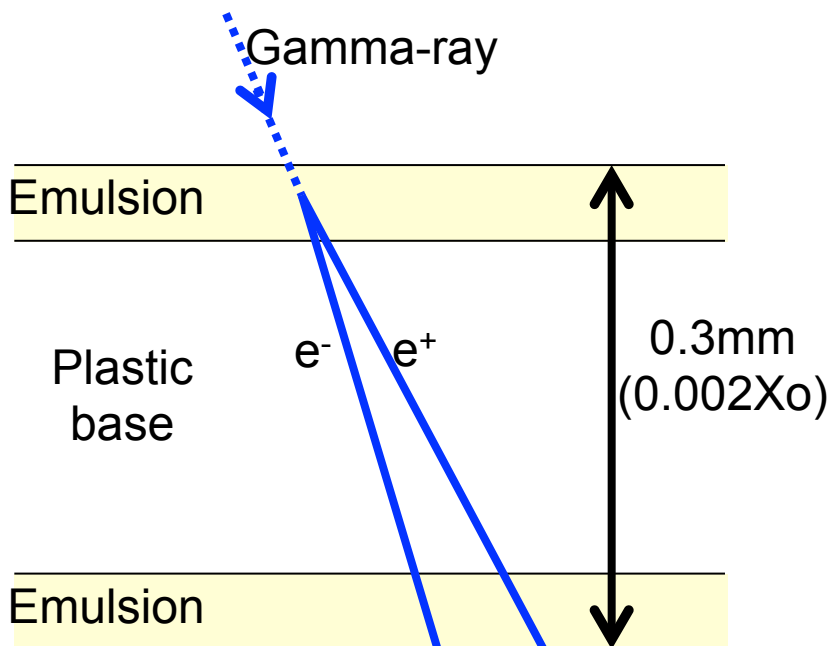
原子核乾板(エマルション)

Microscopic view
10micron

Gamma-ray
→

$e^{+/-}$
→
 $e^{-/+}$
→

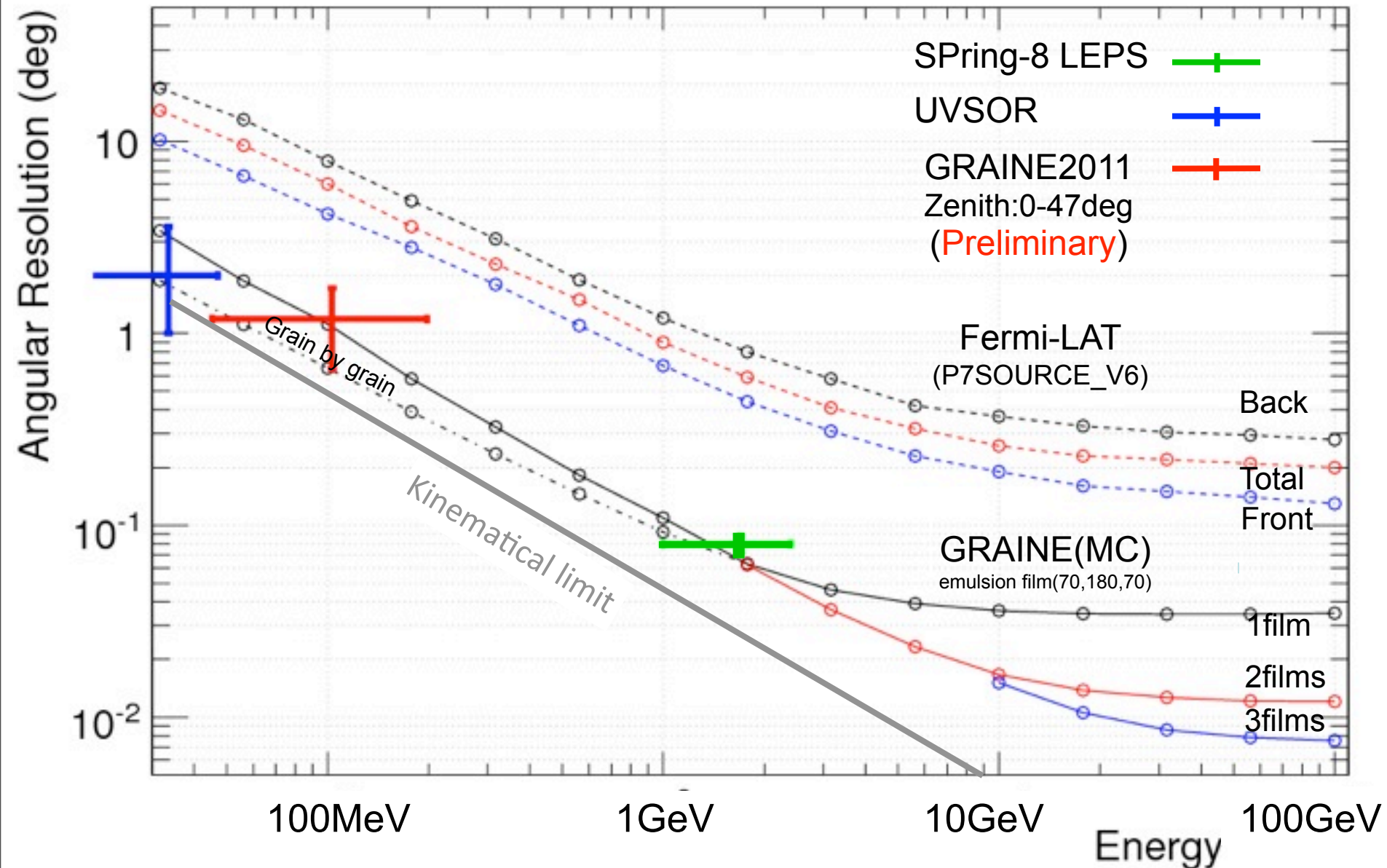
エマルションフィルムの断面図



- ◎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

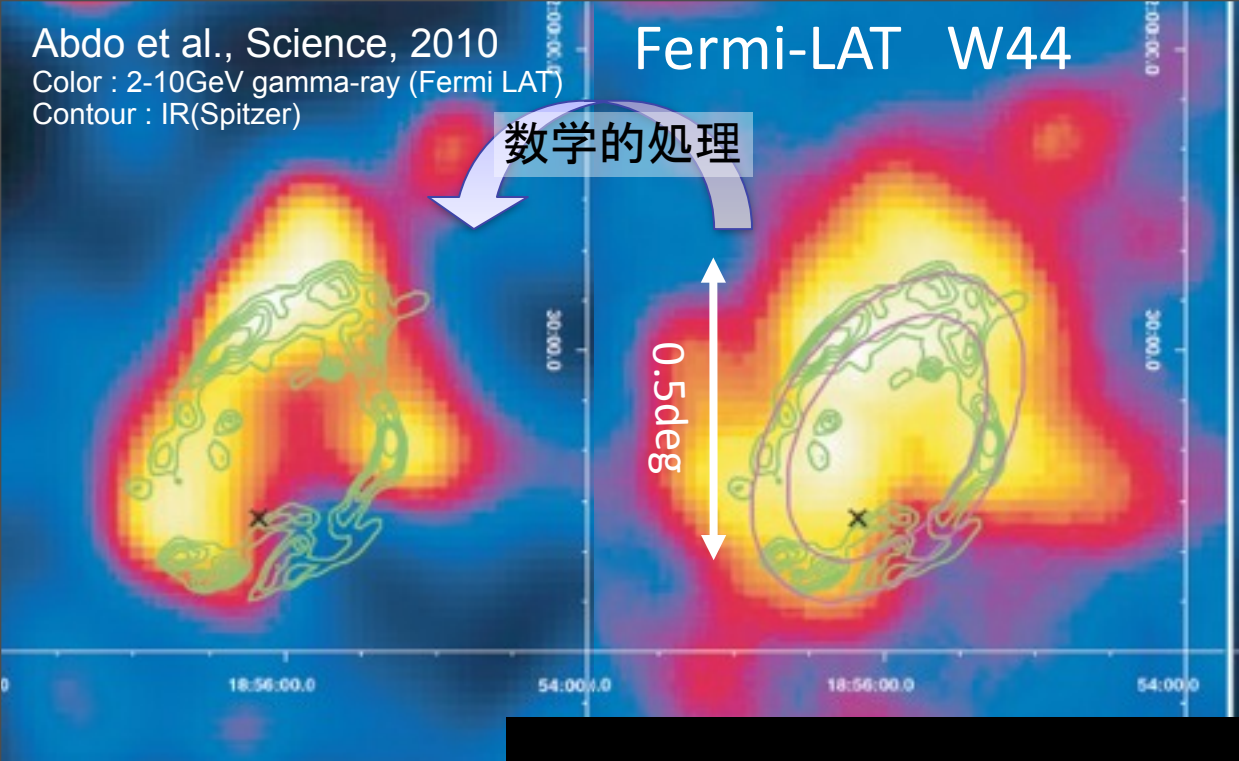
ガンマ線 角度分解能

PSF at normal incidence



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

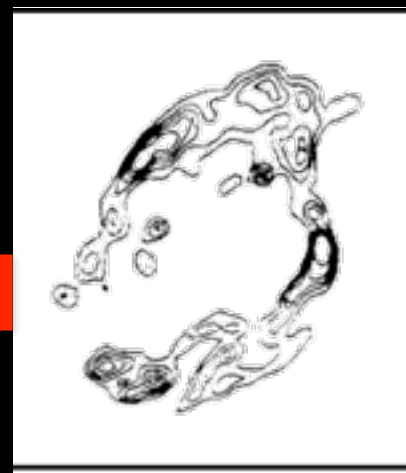
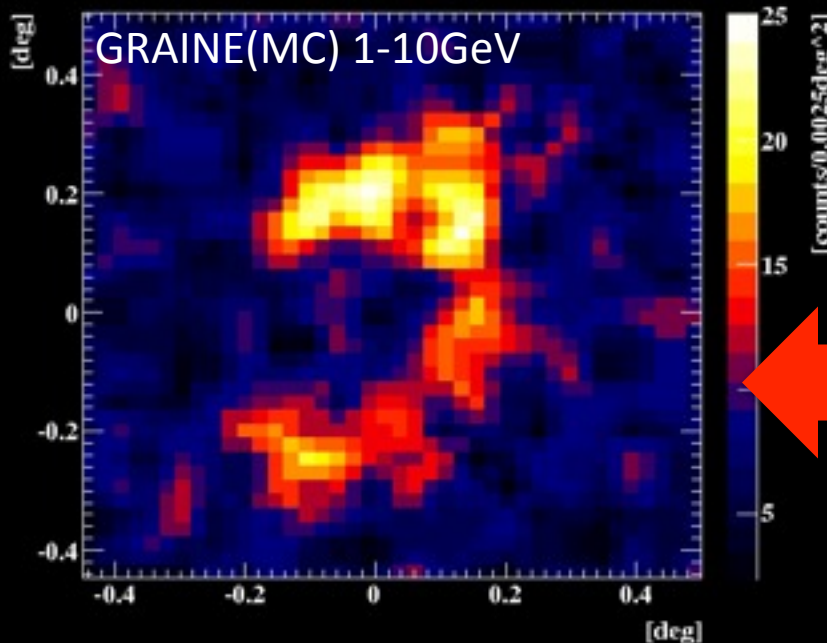
Fermi-LAT W44



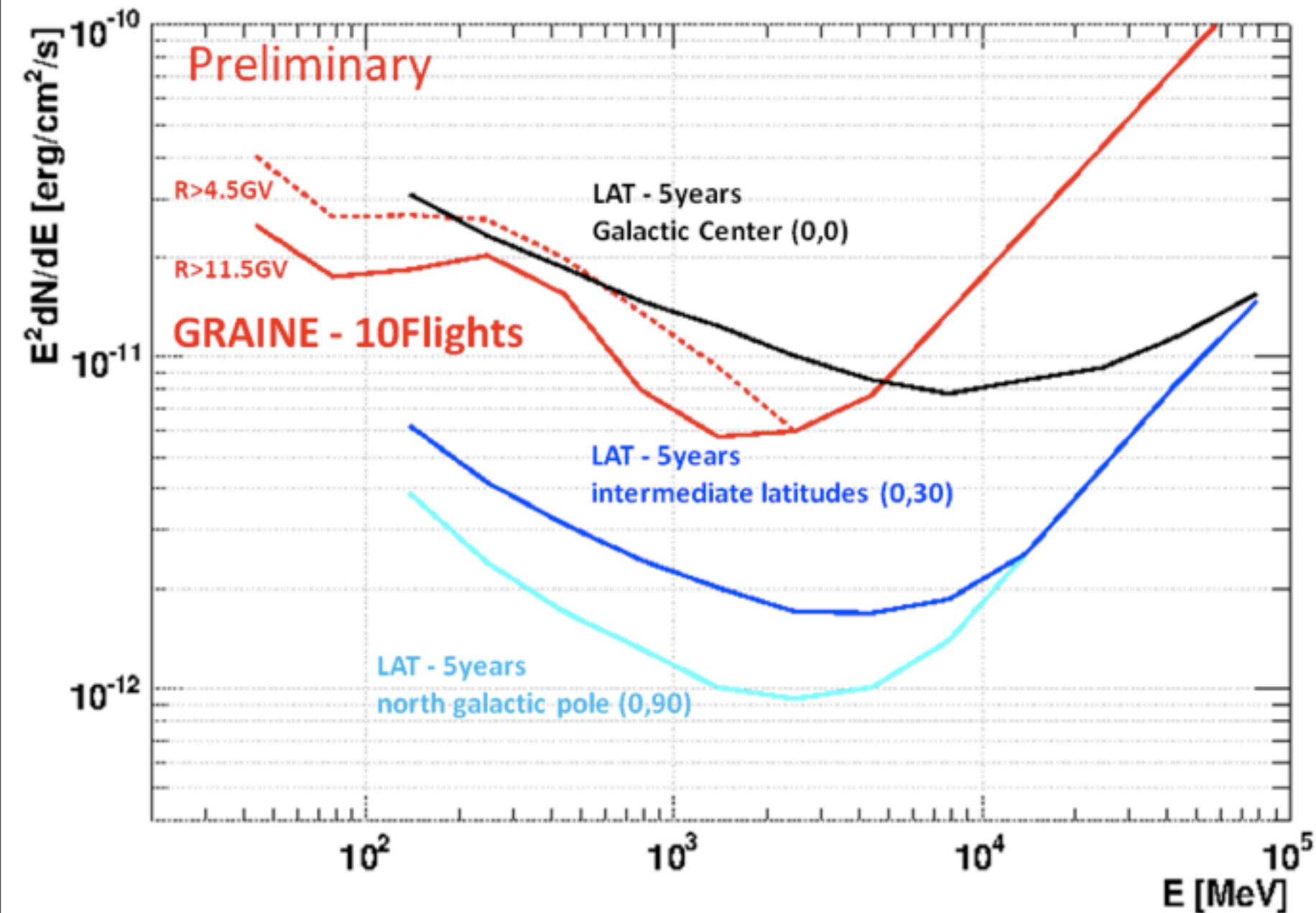
空間構造 の解明

Spitzer(4.5 μm 赤外)
のデータを真として
シミュレーション

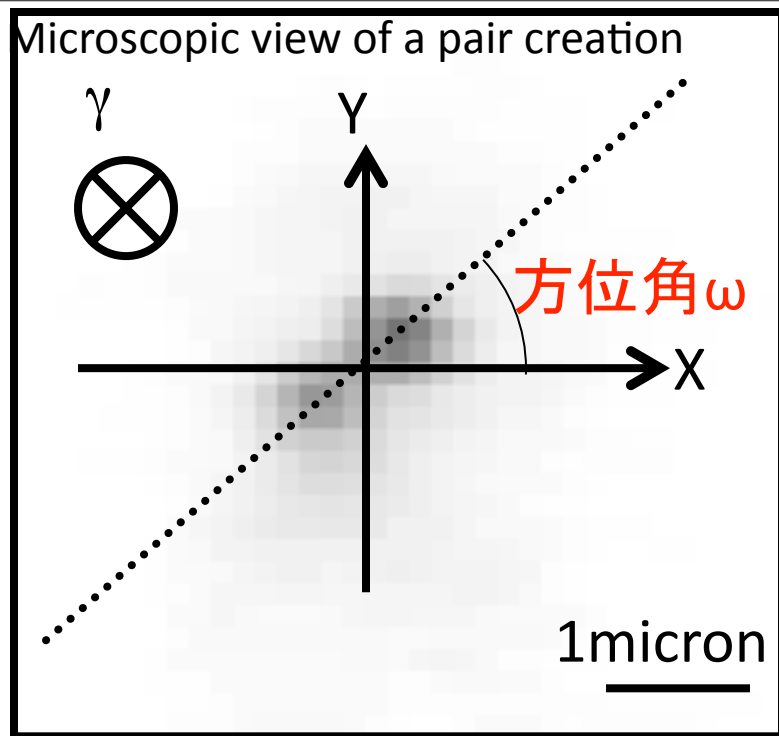
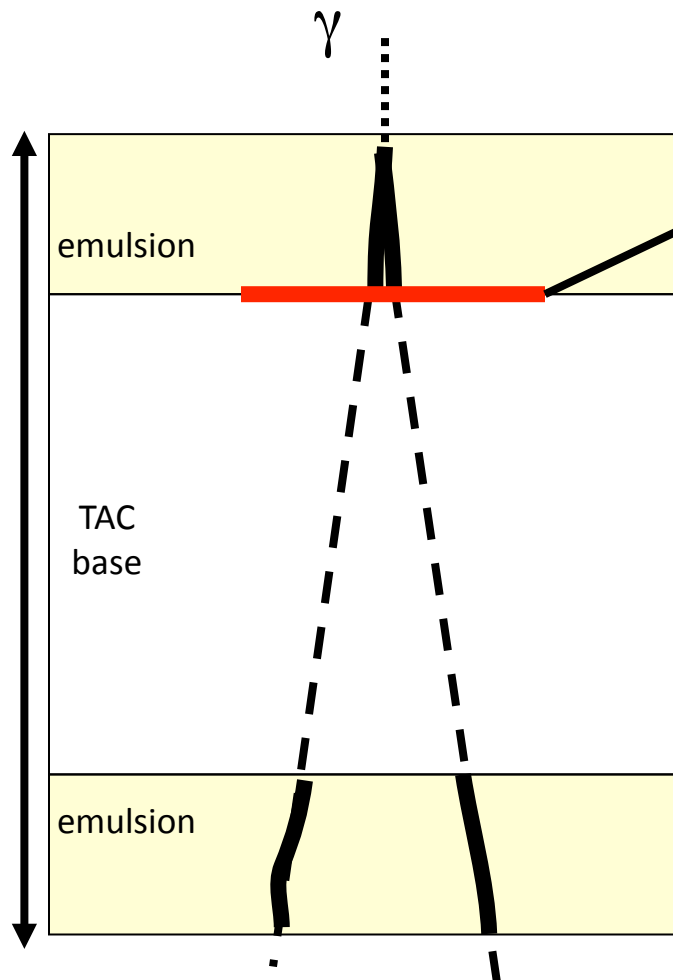
3Flight
(17day)
相当の観測



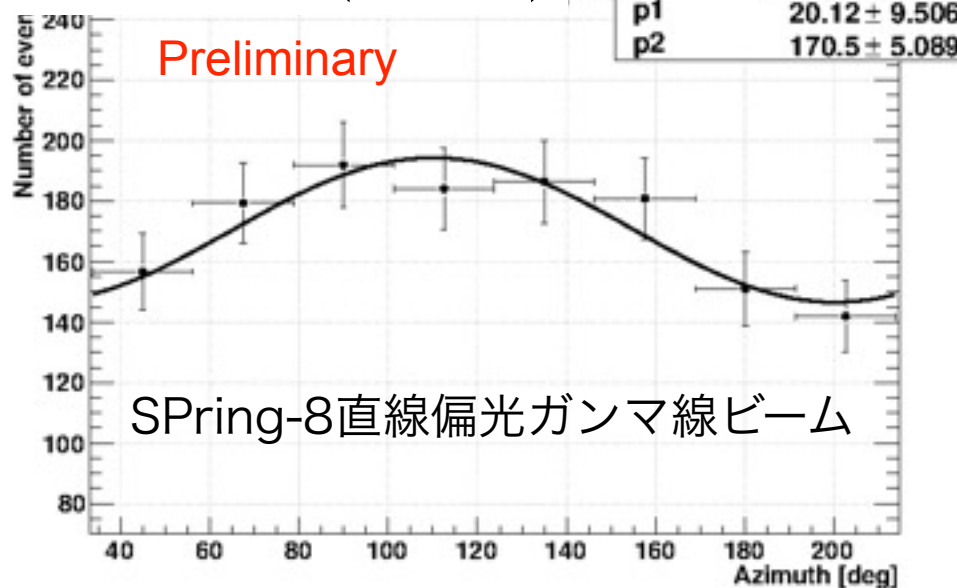
銀河中心領域の観測



偏光観測

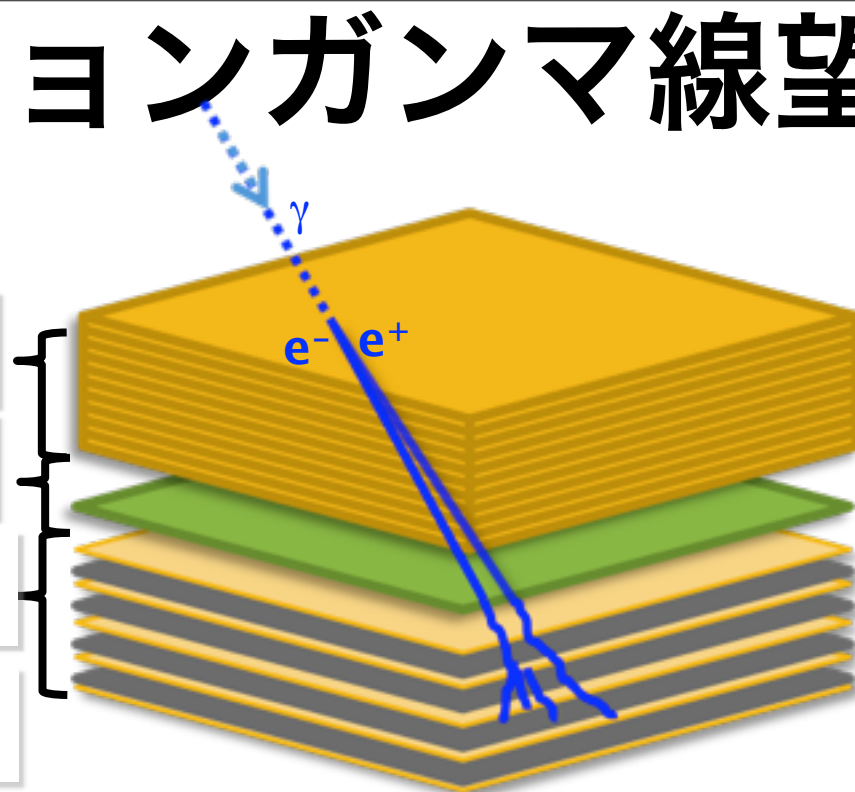


方位角分布(DATA)



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)	x1/6 →	1.0deg (17mrad)
@1GeV	0.90deg (16mrad)	x1/9 →	0.1 deg (1.7mrad)
Energy range	20MeV - 300GeV		10MeV - 100GeV
Polarization sensitivity	No		Yes
Effective area @ 100MeV	0.25m ²	x8 →	2.1m ² *
@ 1GeV	0.88m ²	x3 →	2.8m ² *
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

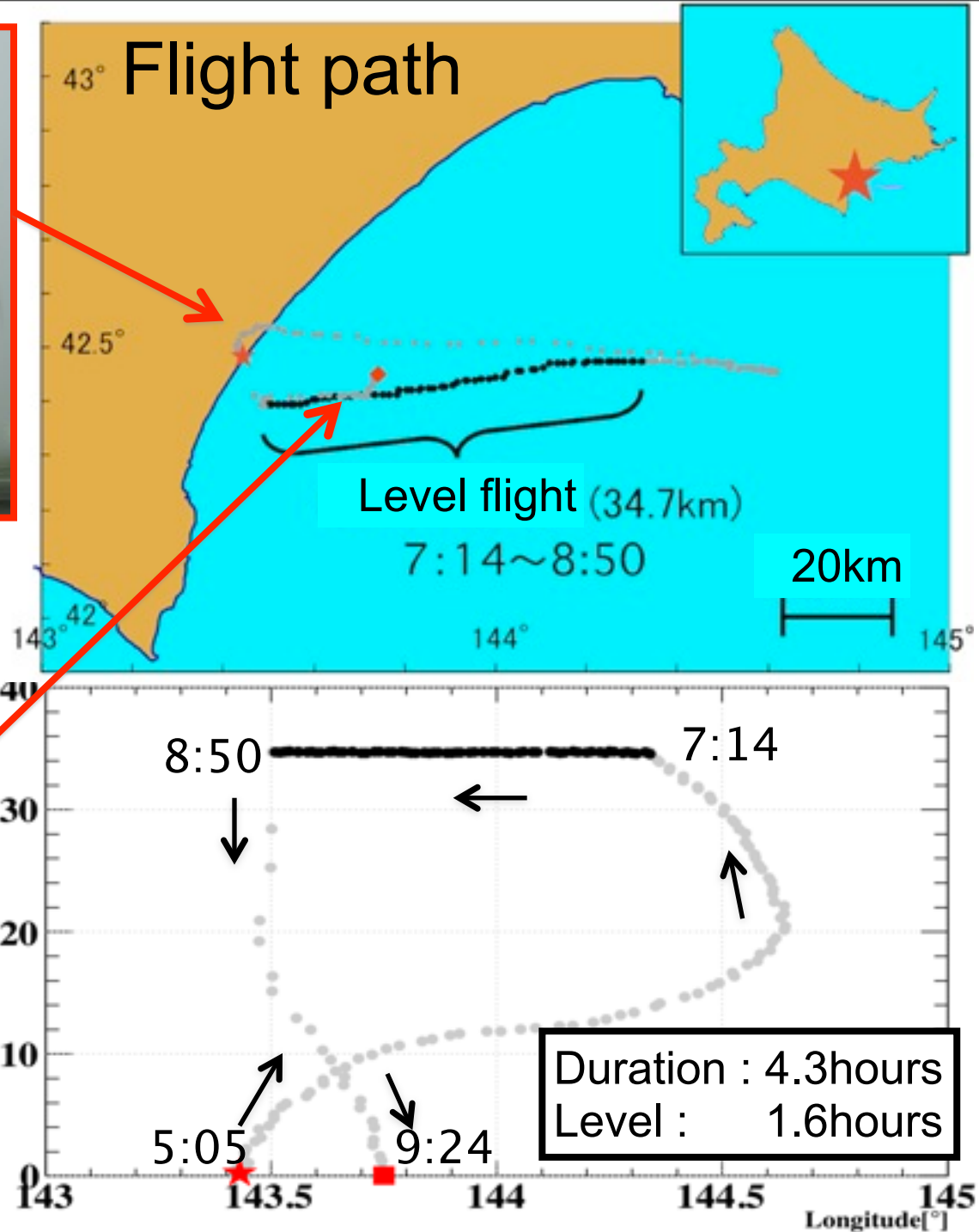
OPERAフィルム(一部に
新型原子核乳剤フィルム)
- 2014年度(予定), アリススプリングス(豪), JAXA国際大気球実験
口径面積：2500cm², フライト時間：1日
 - 既知のガンマ線天体の観測試験
 - 最高解像度での撮像
- 2015年度-
口径面積：10m², フライト時間：7日間を繰り返す
 - 科学観測開始

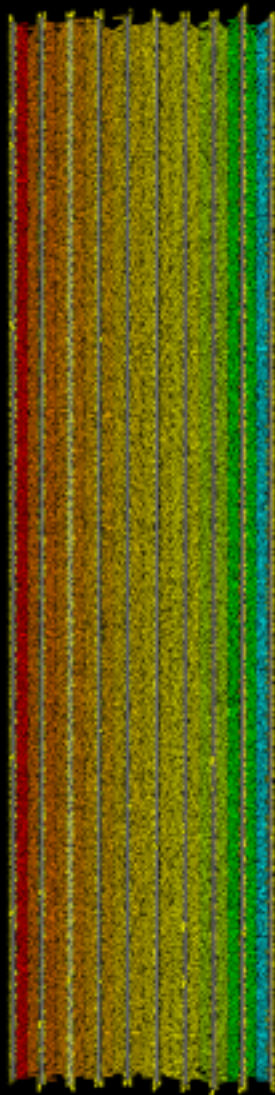
フィルム総面積~1500m²/フライト

TARF
8th June 2011
5:05

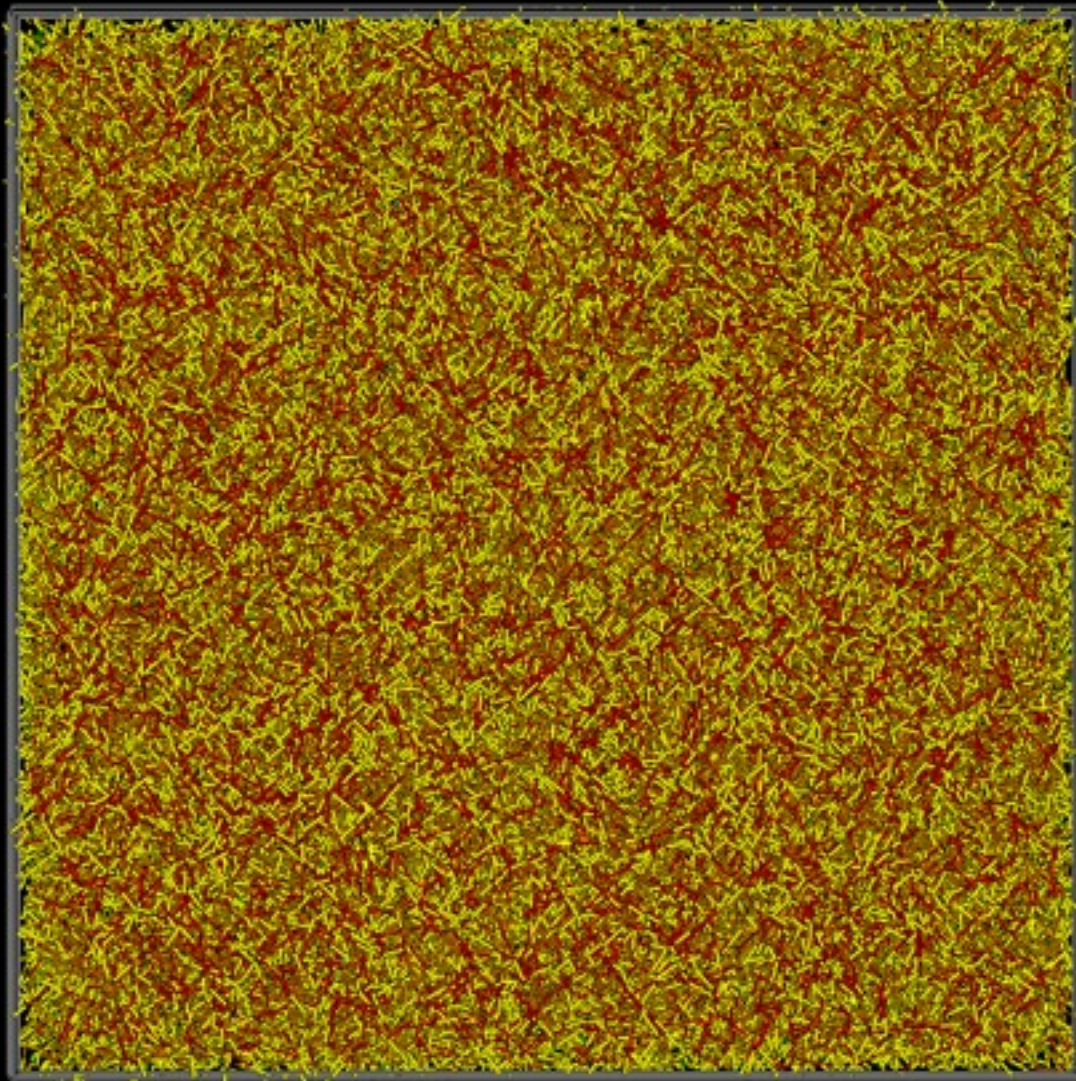


9:36

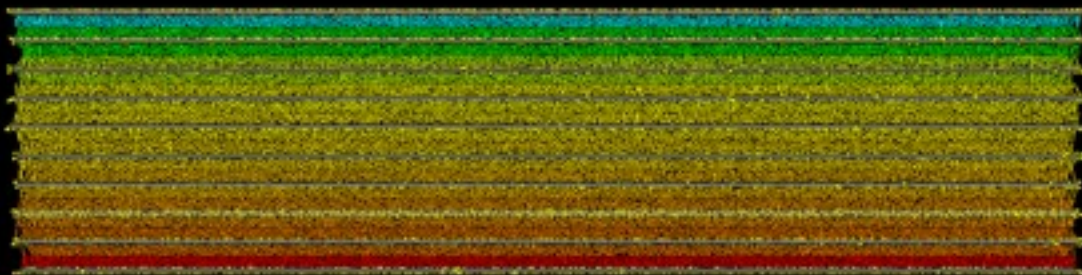




Y

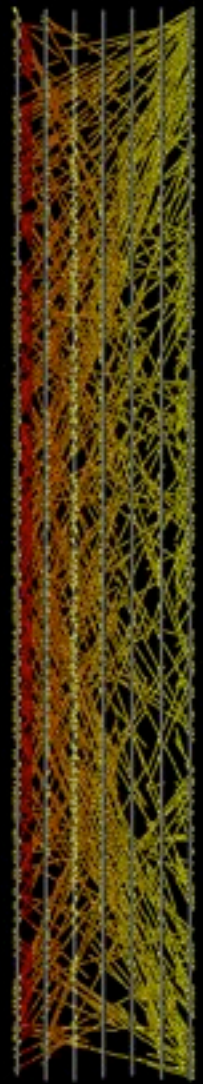


Z

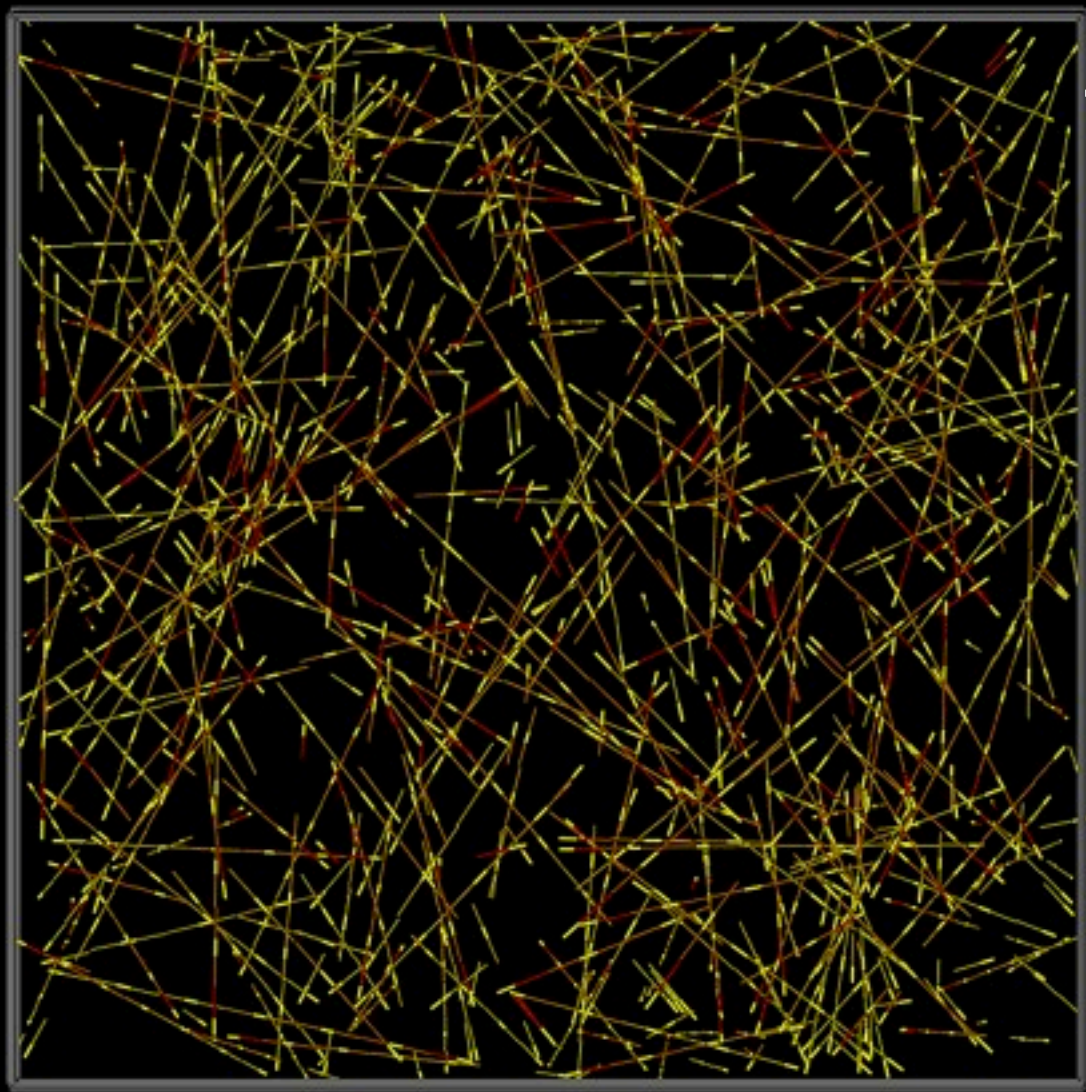


X

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

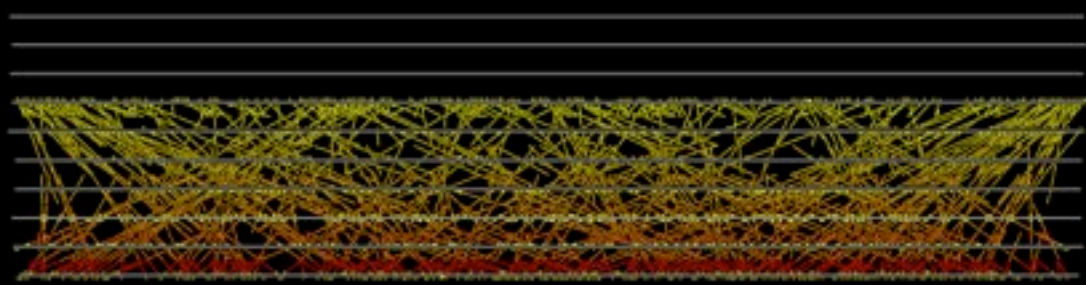


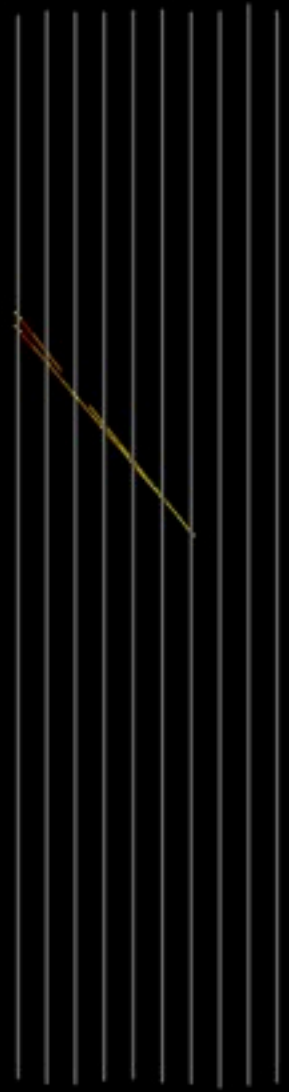
Y



Z

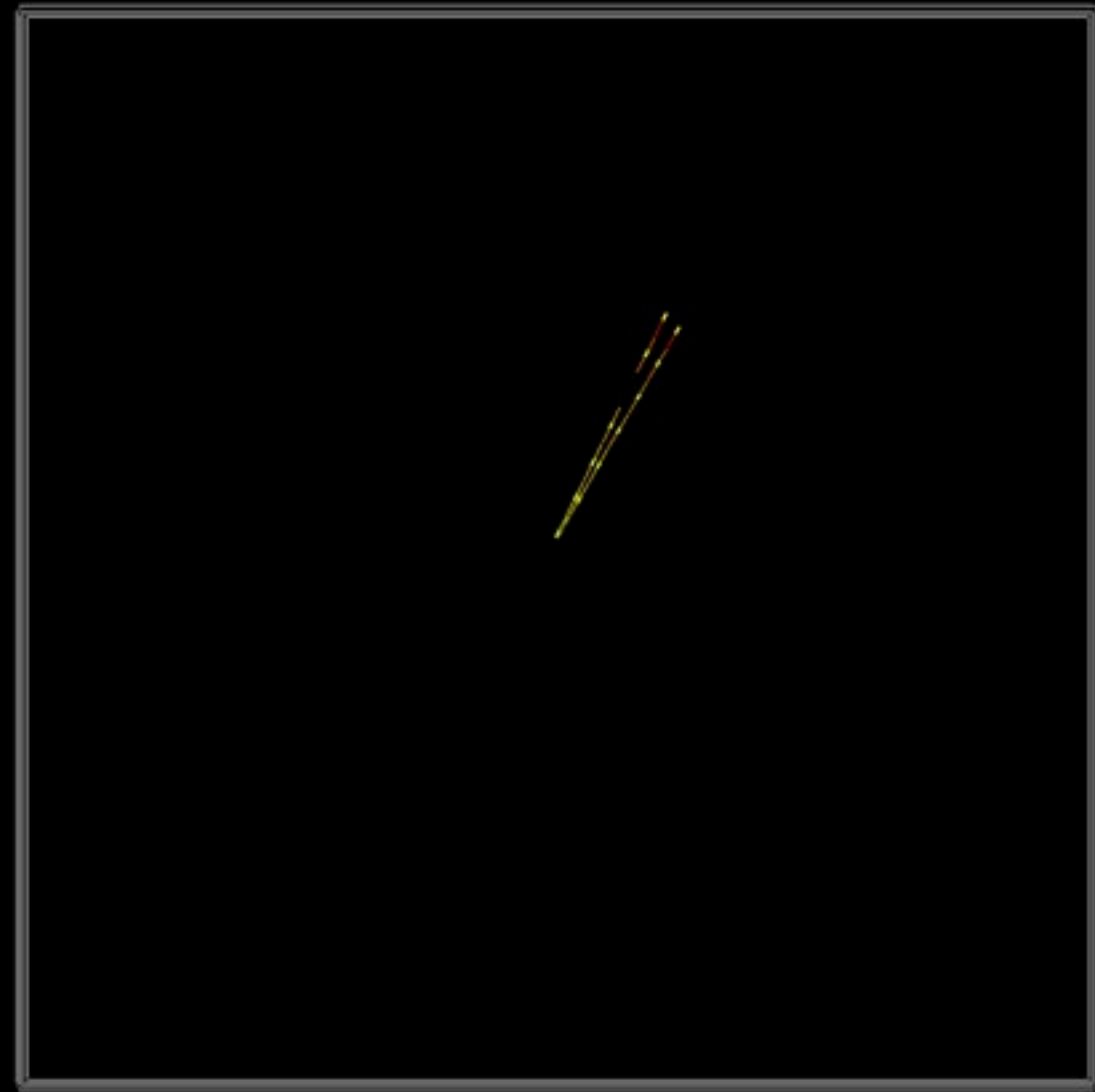
X



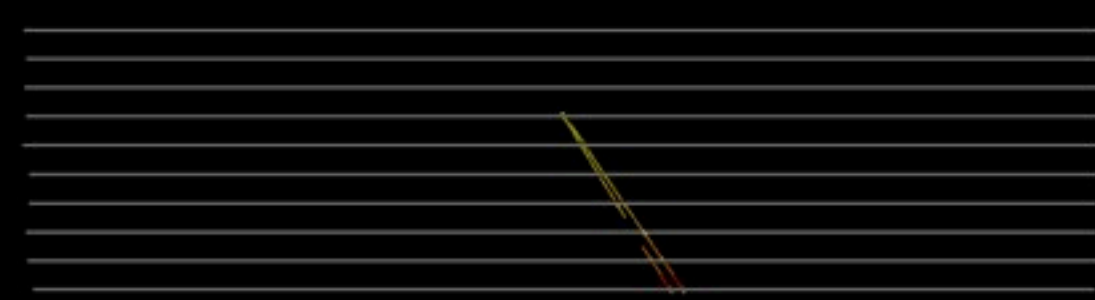


Y

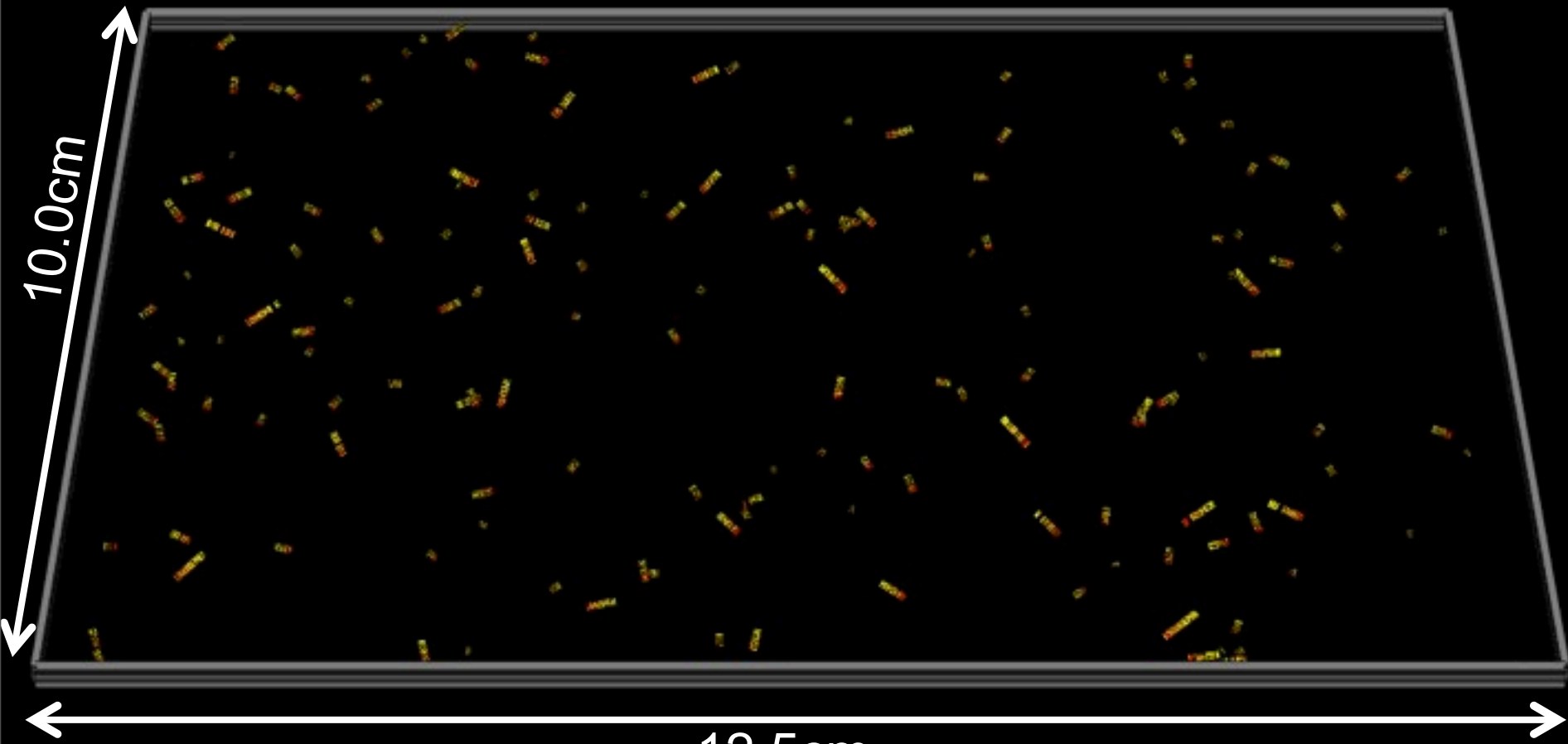
X



Z



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

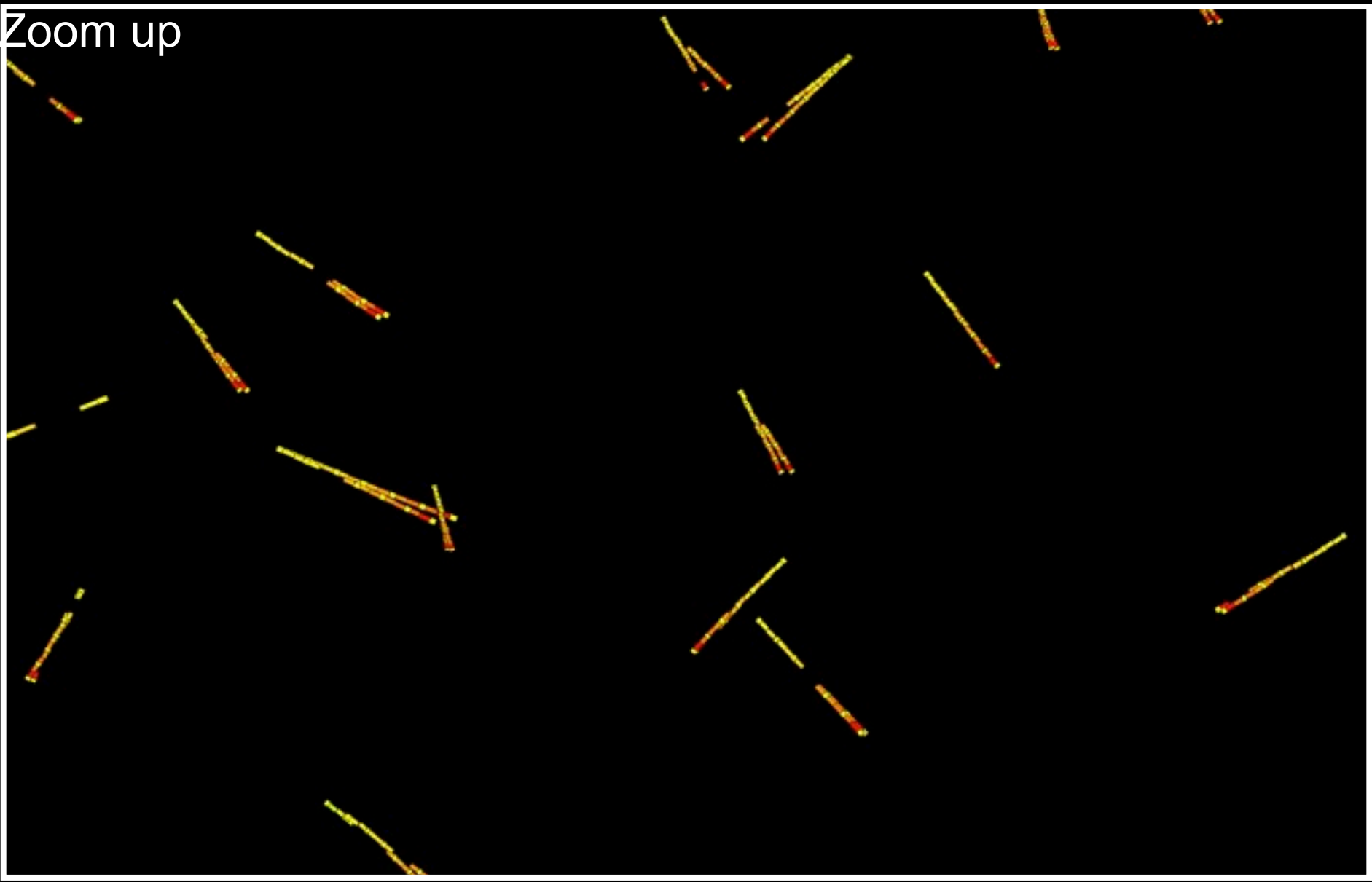


10.0cm

12.5cm

153events
Reliability 97%

Zoom up



ガンマ線事象例

Event : 71 6923485

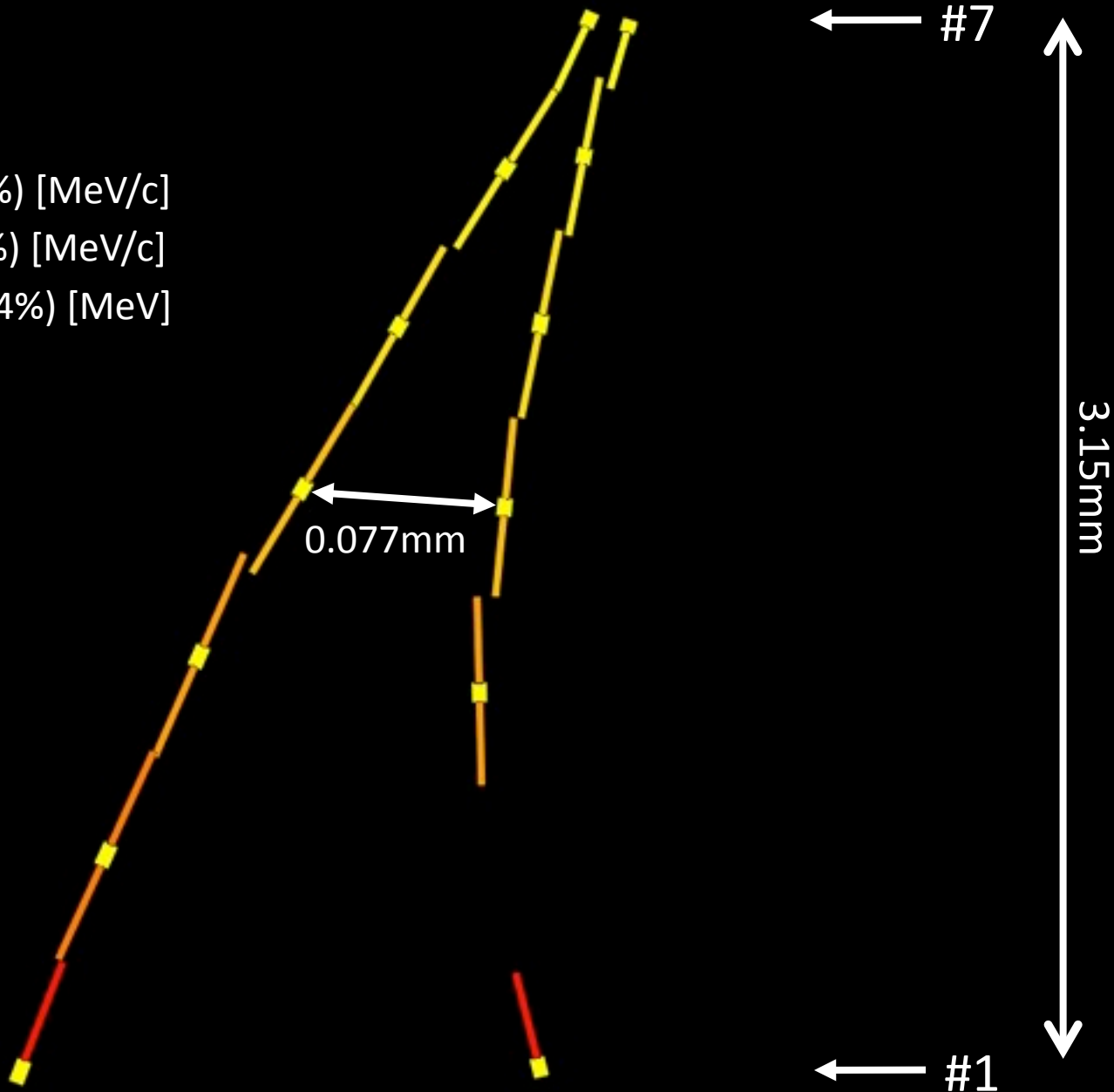
Start : #7

θ_{incident} : 9.748 [deg]

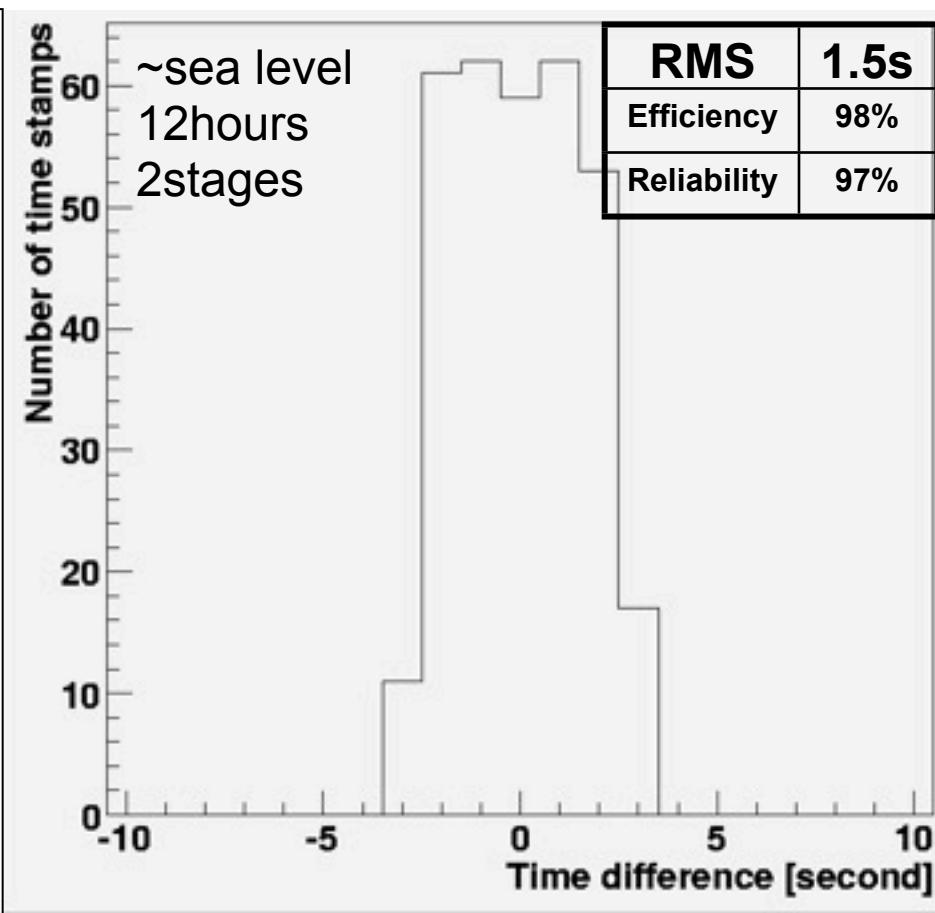
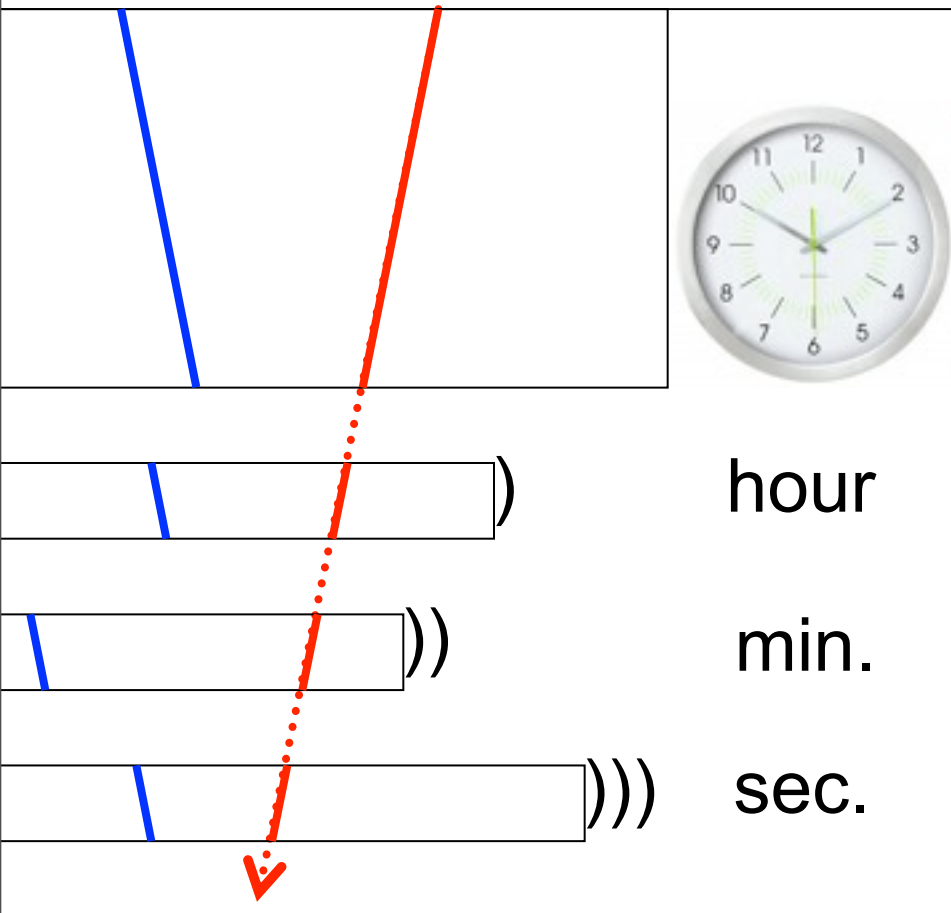
$p\beta_1(\text{左})$: 60 +20 -12 (25%) [MeV/c]

$p\beta_2(\text{右})$: 32 + 9 - 6 (22%) [MeV/c]

E_γ : 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

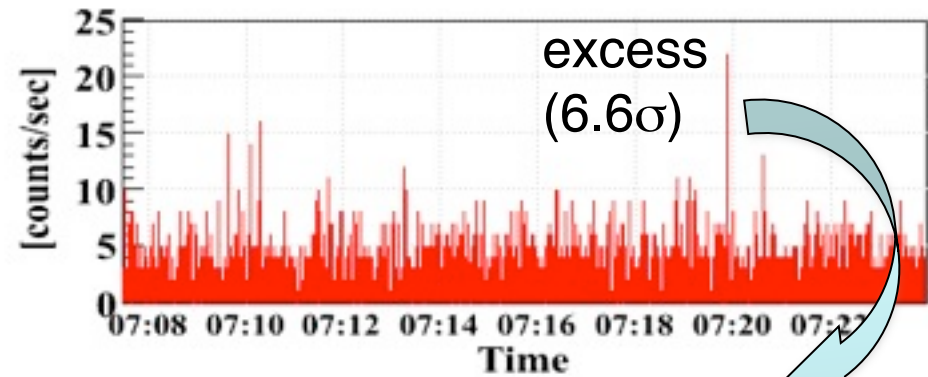
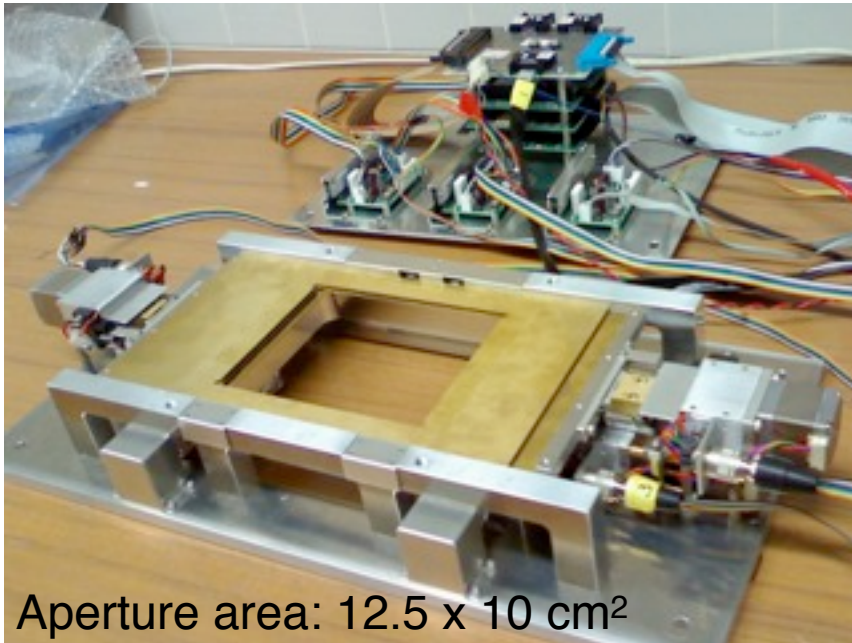
シンプルな構成、コンパクト、軽量、高電圧不要、低消費電力、デッドタイムフリー

Establishment of timestamp technique

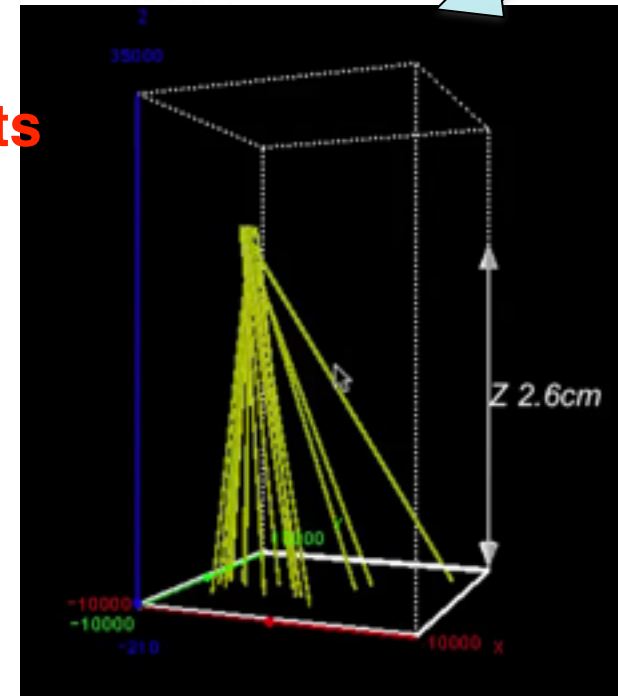
H.Rokujo, et al., NIM A, 701 (2013)

@GRAINE2011

“Multi-stage shifter” 1st model Track rate measurement@35km



Detection of hadron events

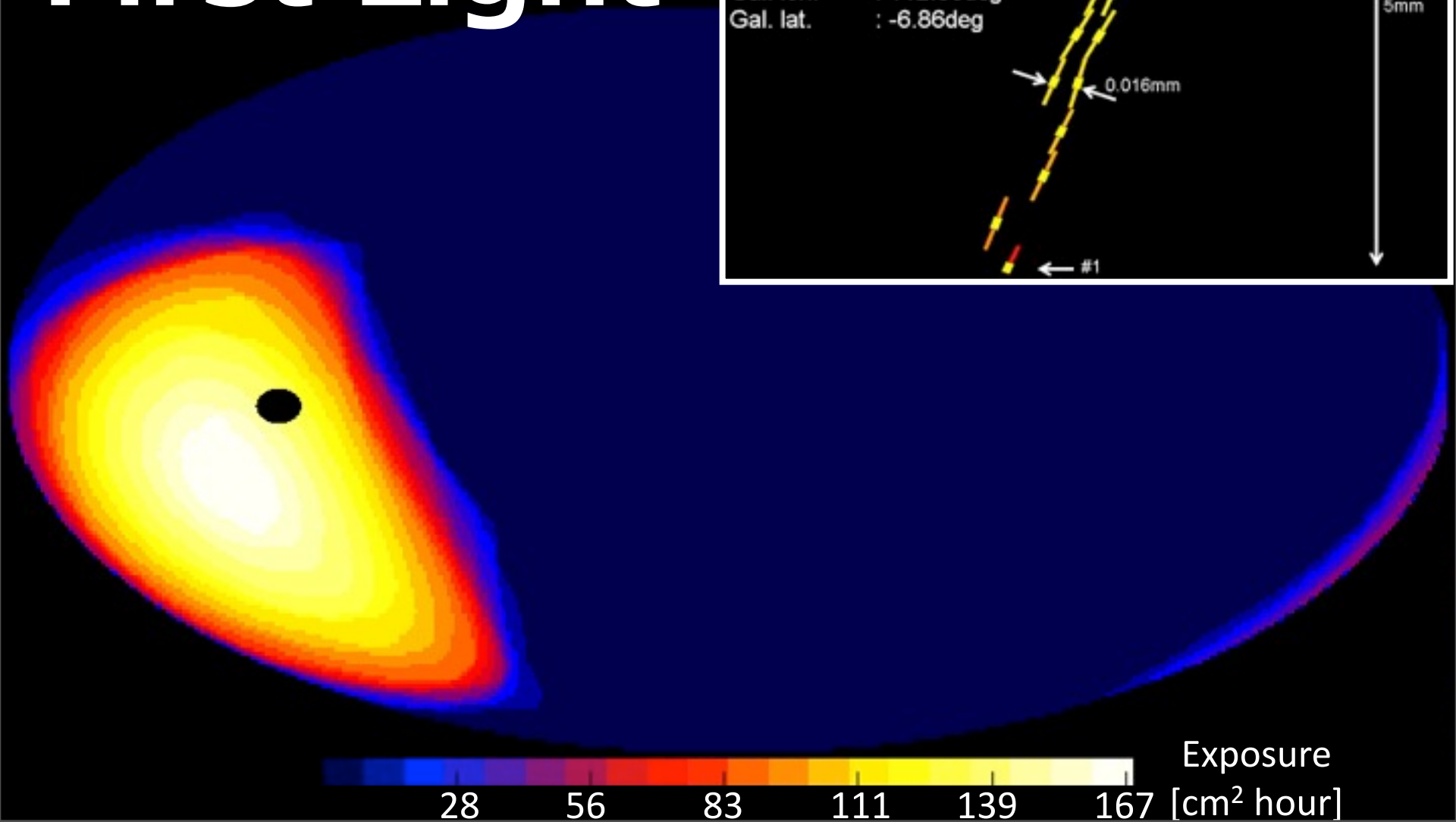
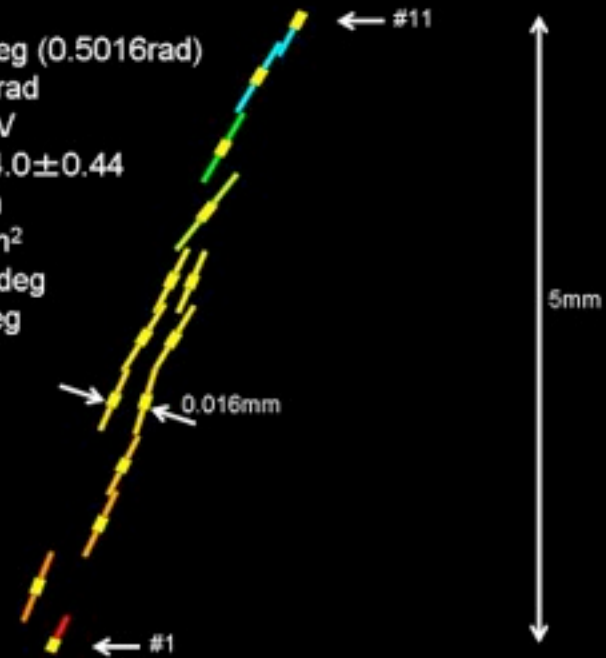


- Correct operation during whole observation time
- Giving time info. to all penetrating tracks
- Detection of hadron shower tracks by timing and 3-D spatial analysis
- Time resolution: 0.15 sec

GRAINE

First Light

Event : 111 2986322
Start : #11 up
 θ_{incident} : 26.64deg (0.5016rad)
 θ_{open} : 0.0059rad
 $E_{\gamma}(\theta_{\text{open}})$: 340MeV
JST : 8:24:44.0 \pm 0.44
Altitude : 34.6km
Atm. depth : 6.6g/cm²
Gal. lon. : 112.06deg
Gal. lat. : -6.86deg



Exposure
[cm² hour]

28 56 83 111 139 167

Hadron induced event

E_v : 2438038

E_γ : 45+33-10[MeV]

θ_γ : 46.61[deg]

7:18:34.5 (JST)

$\Delta t = \pm 0.5s$

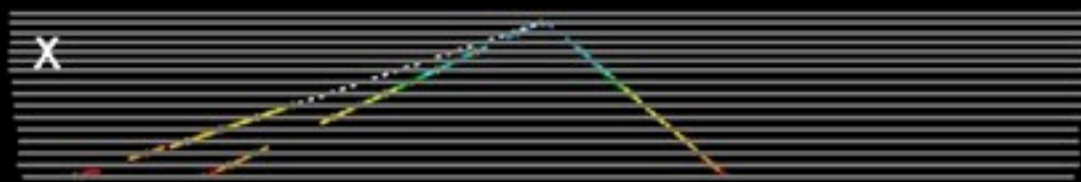
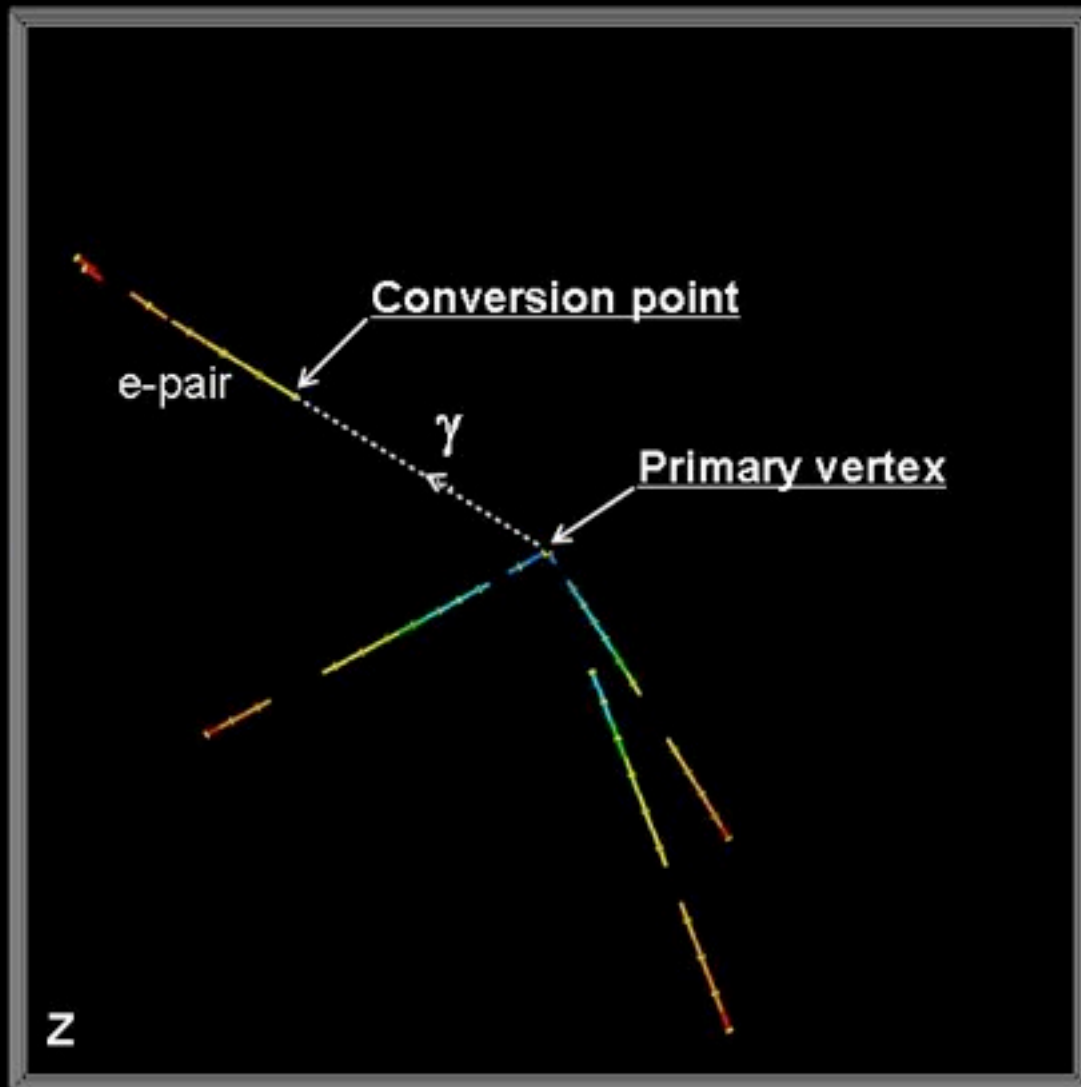
Convergence

1.2cm x 1.2cm
x 16films

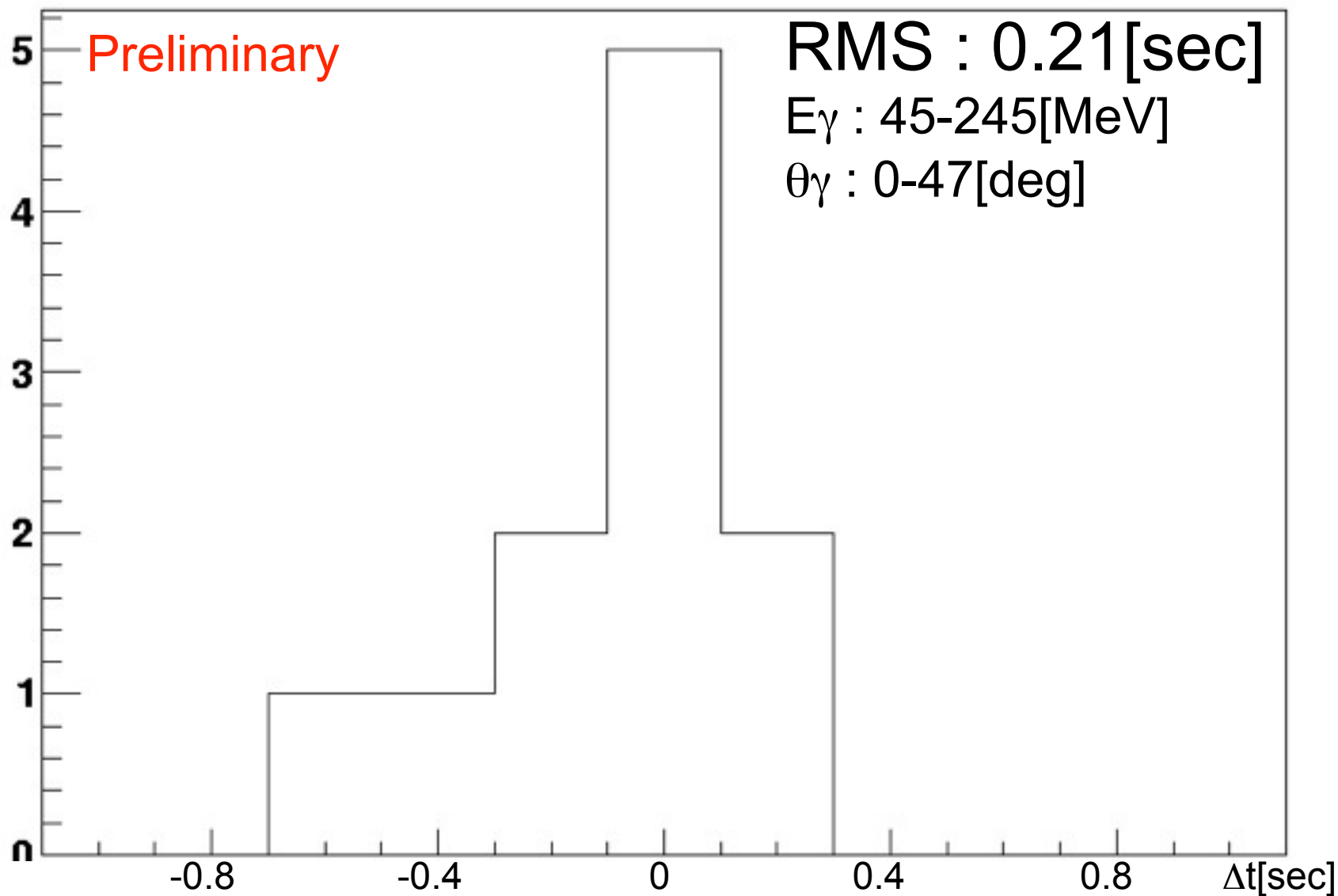
Pointing accuracy

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

(0.0114rad)



ガンマ線 タイムスタンプ精度



GRAINE ロードマップ

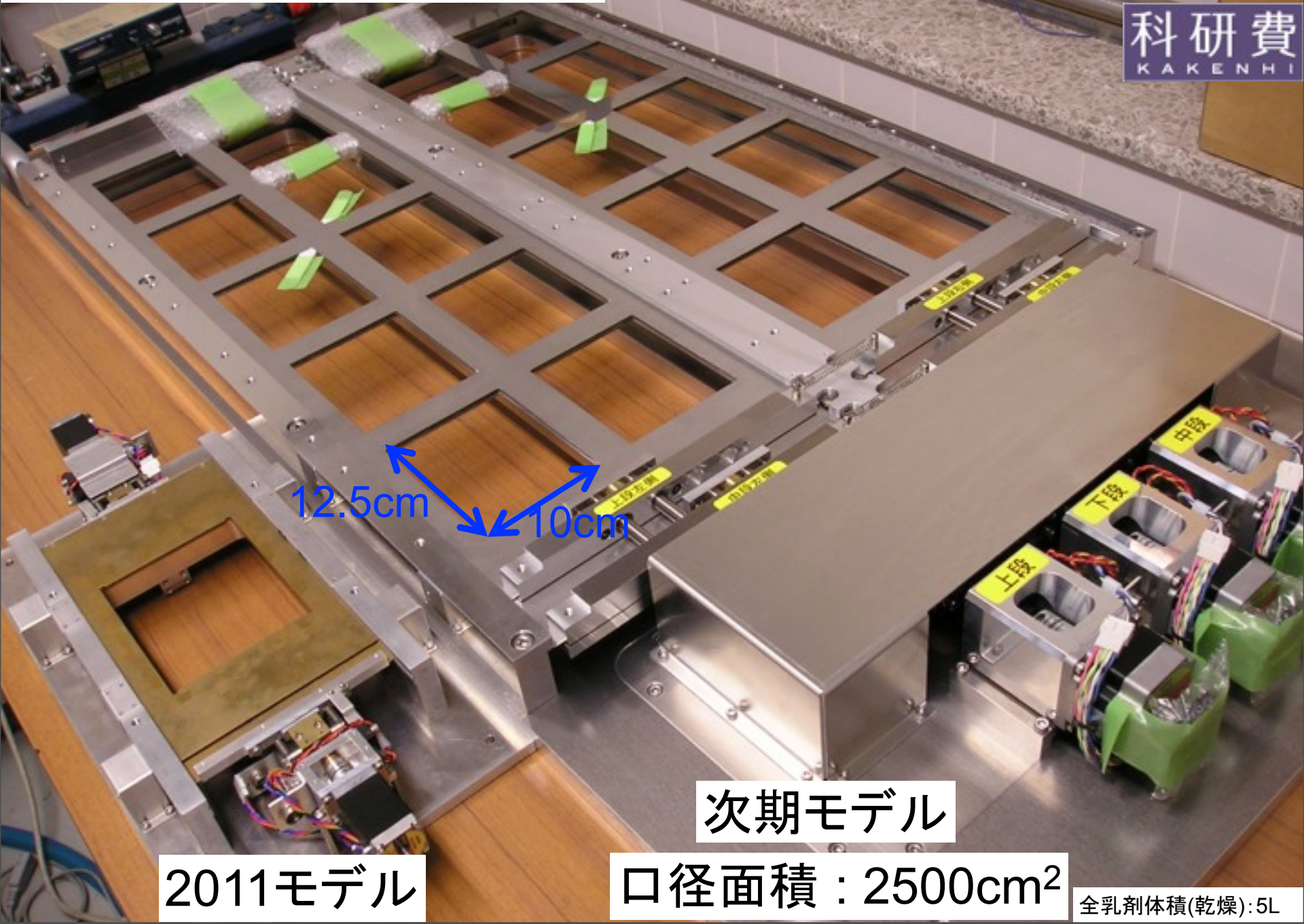
- 2011年6月8日, 大樹航空宇宙実験場(北海道), JAXA大気球実験
口径面積：12.5cm x 10cm, フライト時間：4.3時間 (1.6時間@35km)
 - 各構成要素の動作・性能実証、及び連動実証
 - 大気ガンマ線の実測
- 2014年度(予定), アリススプリングス(豪), JAXA国際大気球実験
口径面積：2500cm², フライト時間：1日
 - 既知のガンマ線天体の観測試験
 - 最高解像度での撮像
- 2015年度-
口径面積：10m², フライト時間：7日間を繰り返す
 - 科学観測開始

フィルム総面積~1500m²/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

2011モデル

次期モデル

口径面積 : 2500cm²

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

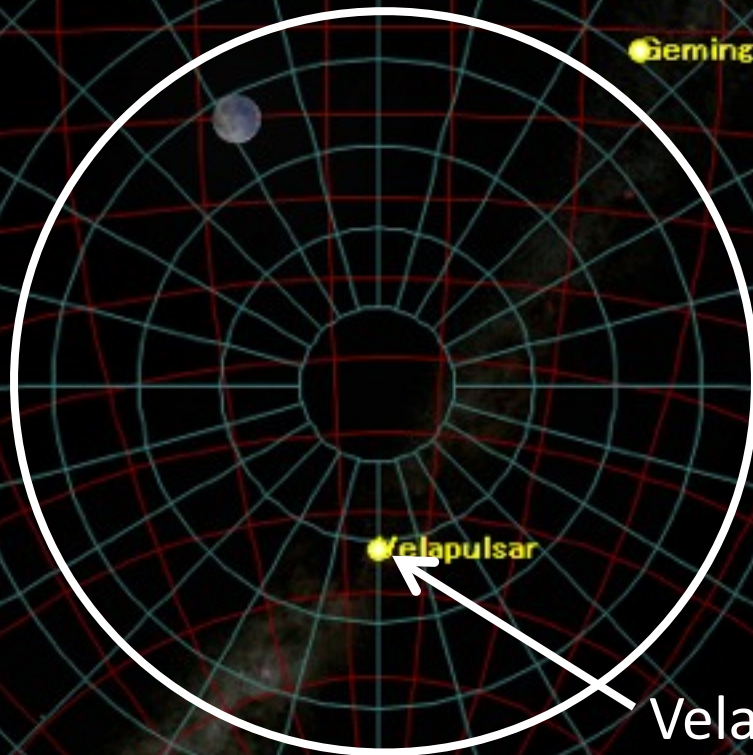
5:05(NT)

(-0:30(JST))

東

西

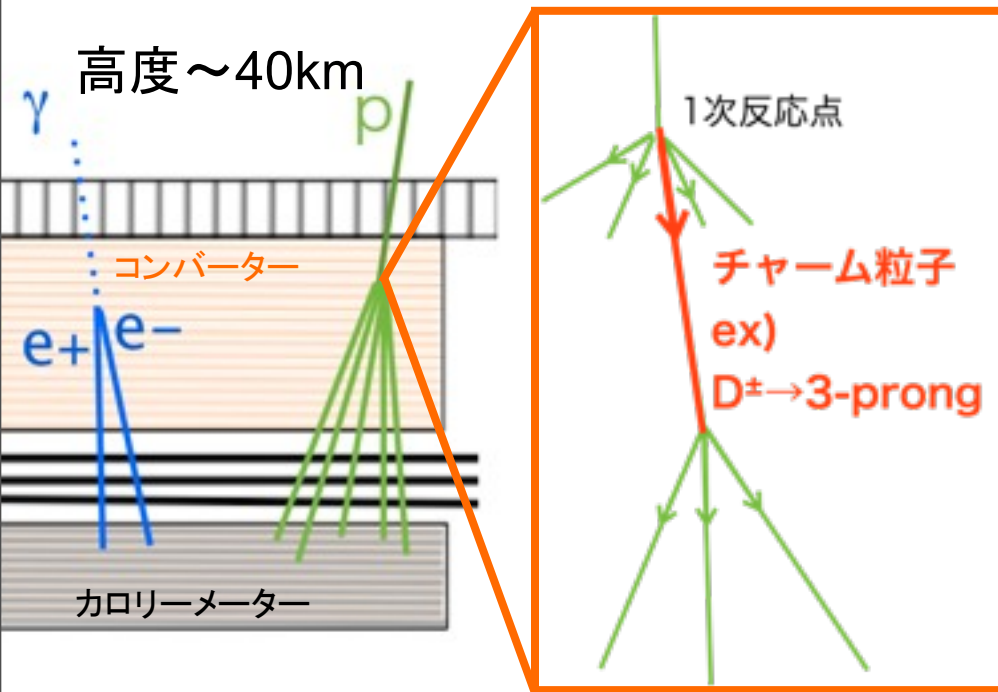
望遠鏡視野相当
天頂角45度



Vela
視野内6.5時間
(1:50-8:20)

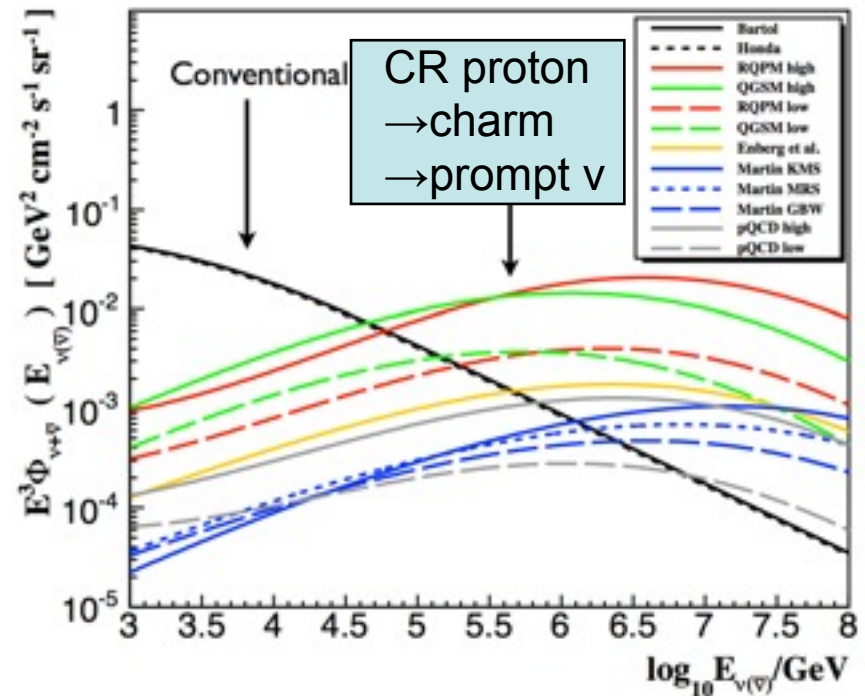
6.5時間の観測により 5σ 以上で検出可能

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 ² 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。