

# GRAINE2018年気球実験準備状況

名古屋大学M1 中村悠哉



2017/10/15~17 宇宙素粒子若手の会:秋の研究会@東大柏キャンパス

# 自己紹介

- ・ 中村悠哉 名古屋大学(F研)M1

○F研の研究紹介

GRAINE( $\gamma$ 線)

ミュオンラジオグラフィ

NINJA(ニュートリノ実験)

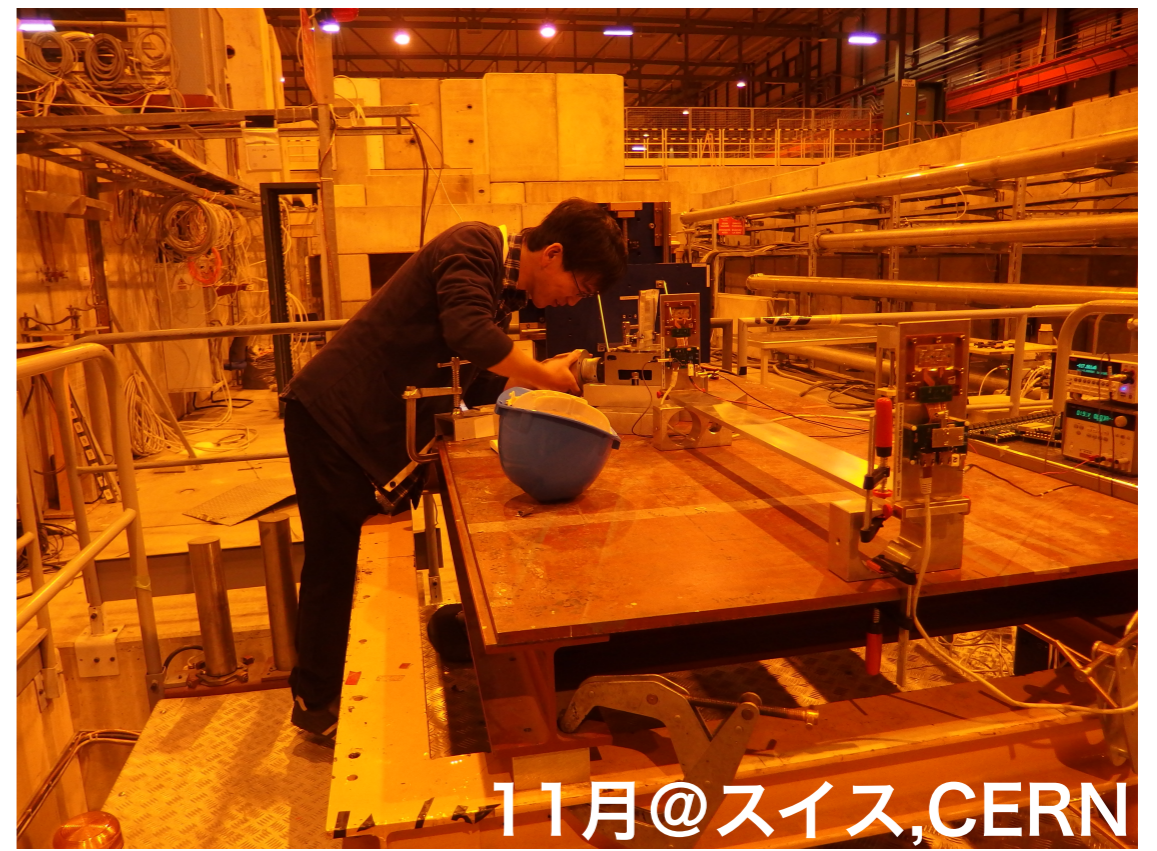
NEWSdm(ダークマター)

その他(超冷中性子,ニュートリノ,アクシオン)

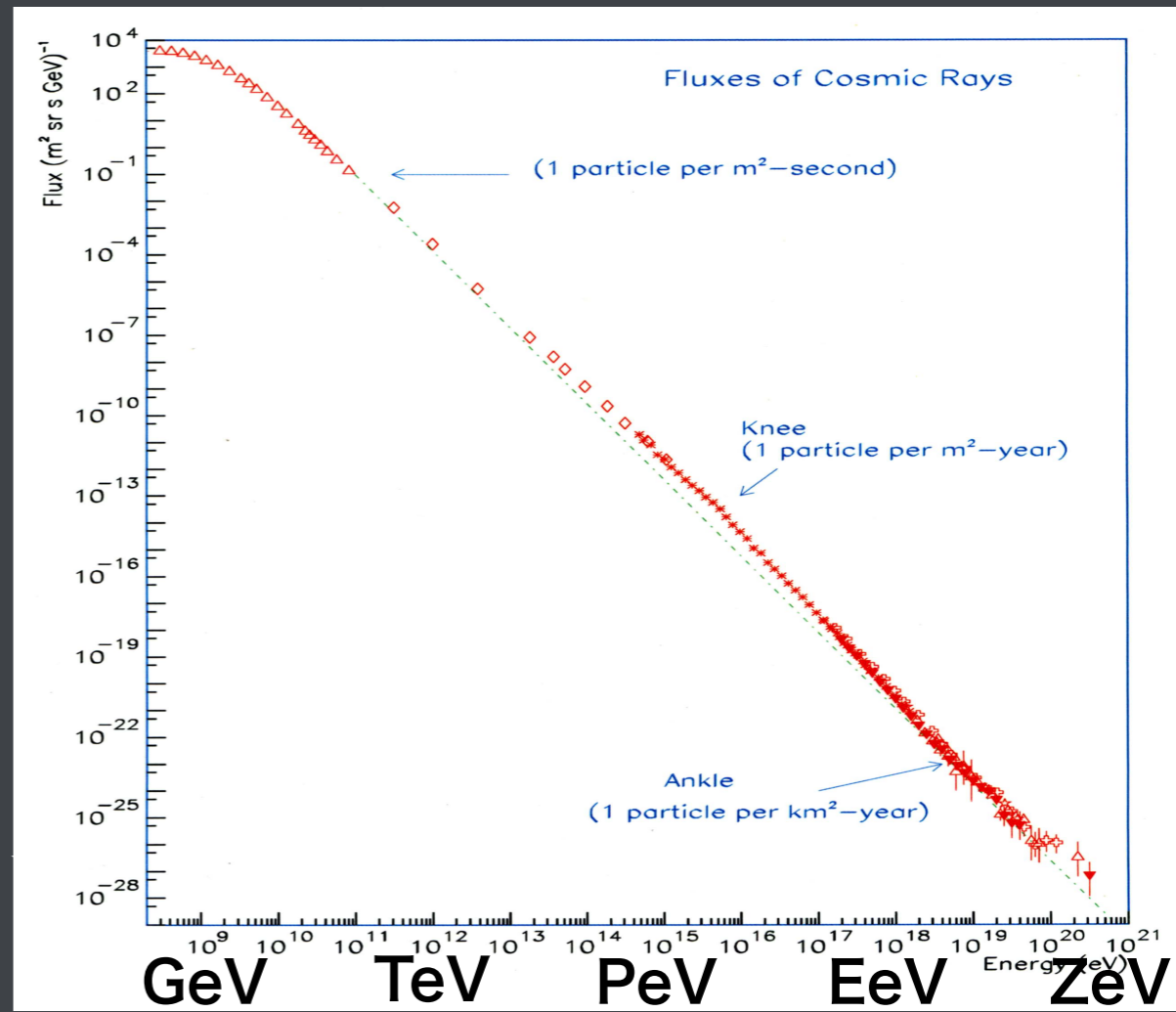
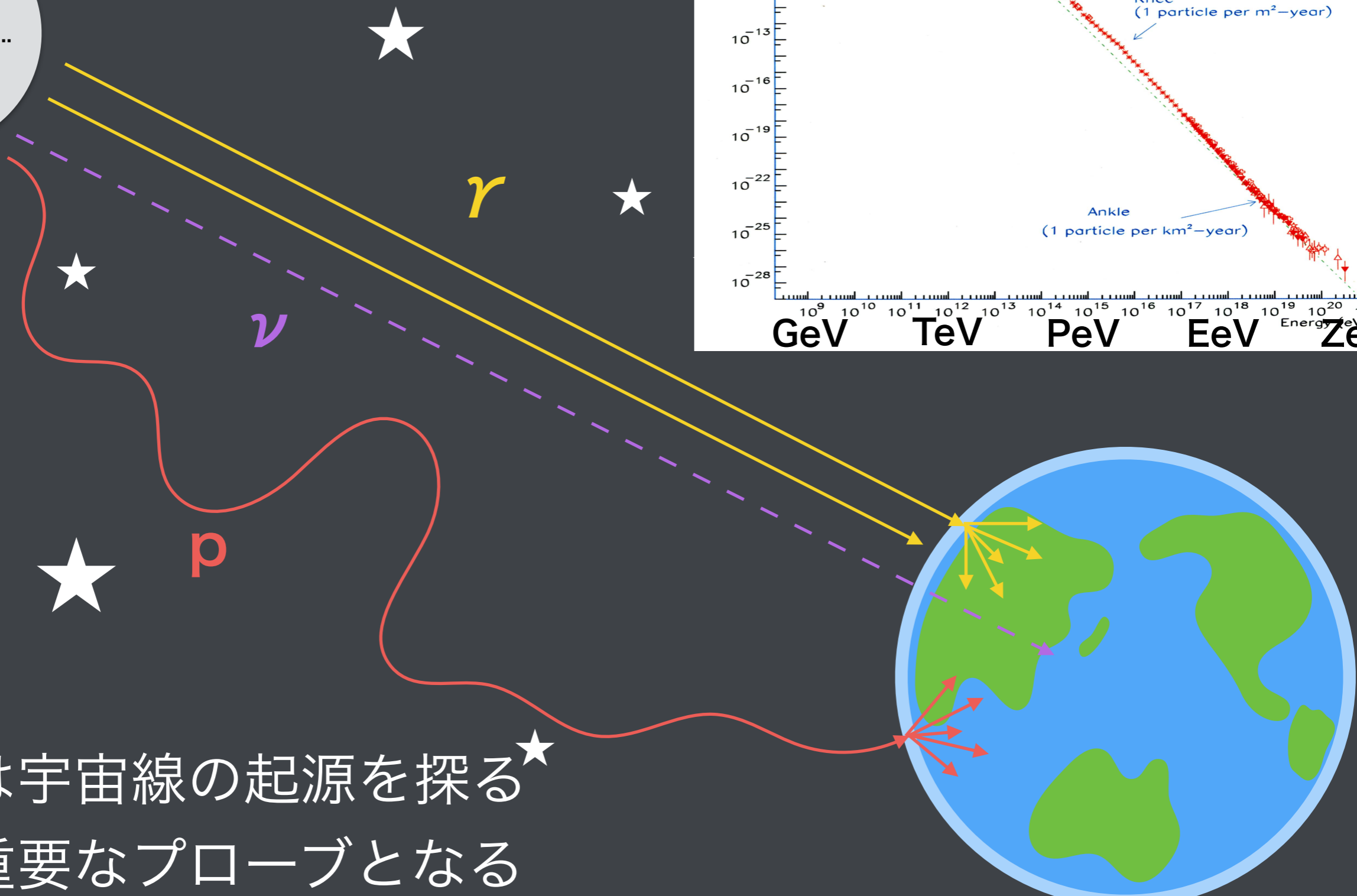
- ・ 学部4年の頃はいろんな実験に首を突っ込みまくっていた

- ・ その頃から本命はGRAINE

- ・ (趣味：サッカー)



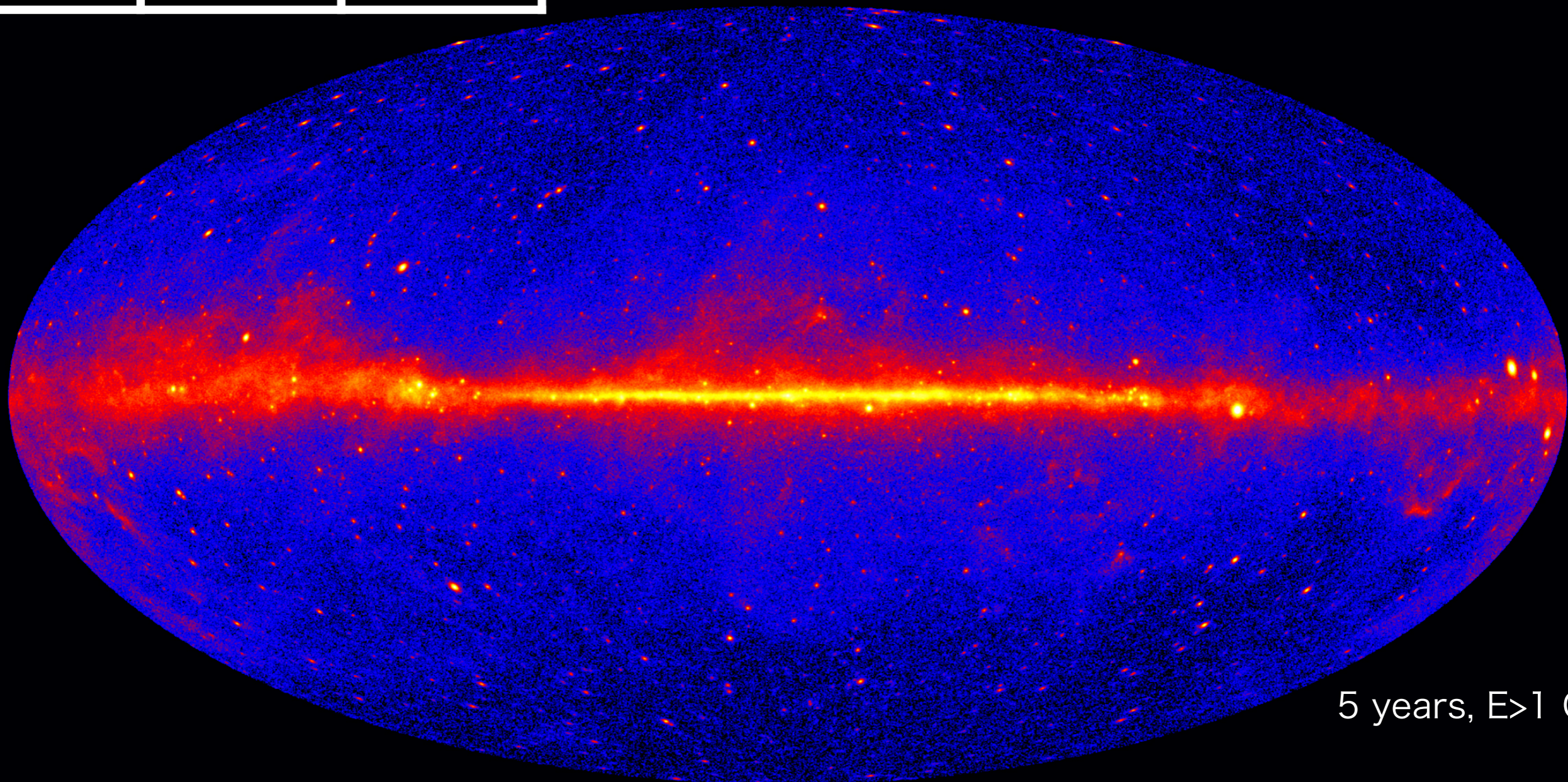
SNR,GRB,AGN...



$\gamma$  線は宇宙線の起源を探る上で重要なプローブとなる

# $\gamma$ 線天文学

	Telescope	detected sources
1990-2001	EGRET	271
2008-	Fermi-LAT	>3000

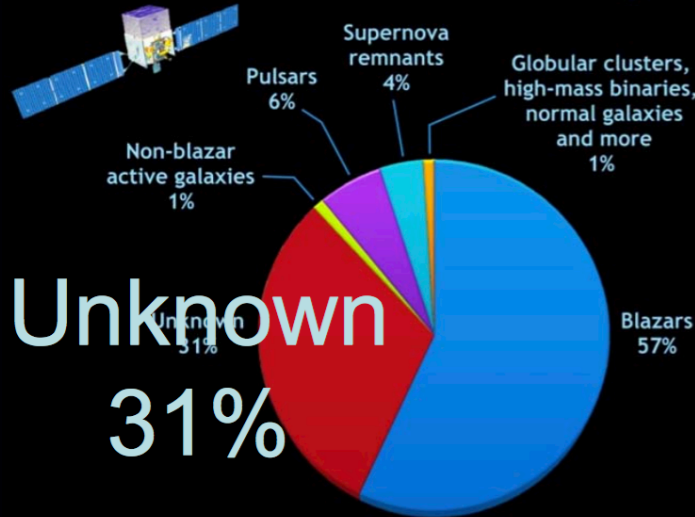


5 years,  $E > 1$  GeV

# $\gamma$ 線天文学

	Telescope	detected sources
1990-2001	EGRET	271
2008-	Fermi-LAT	>3000

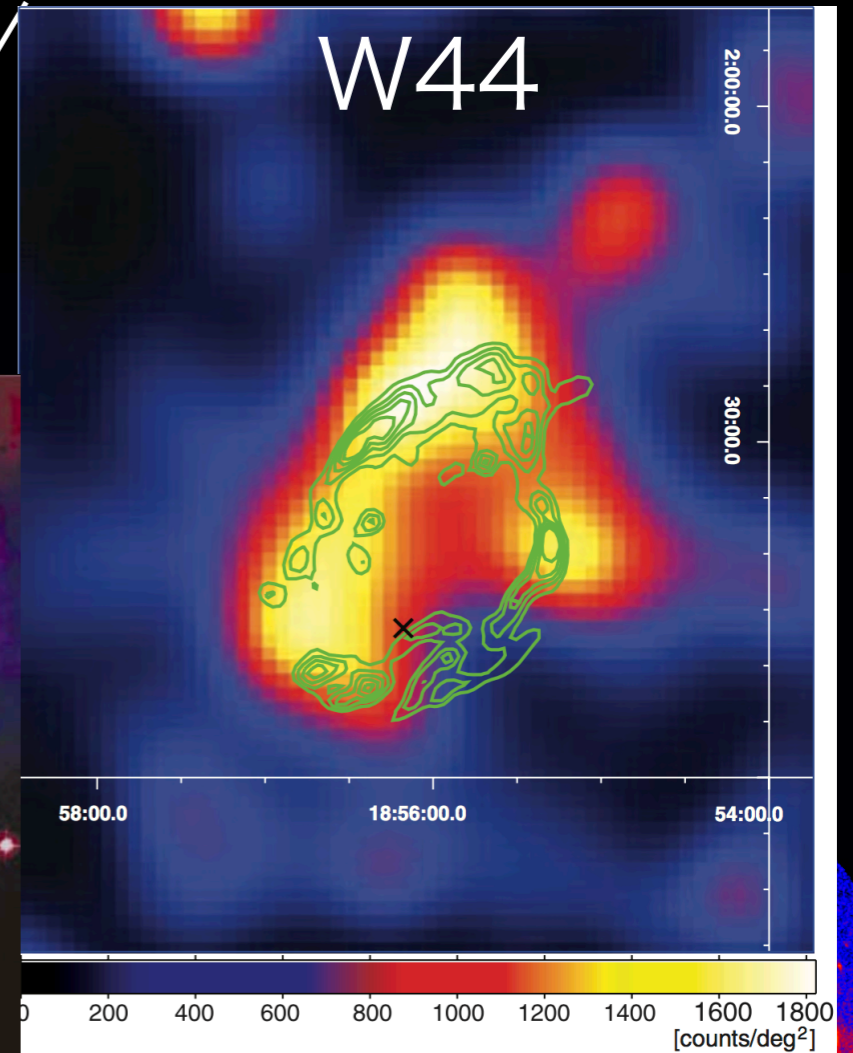
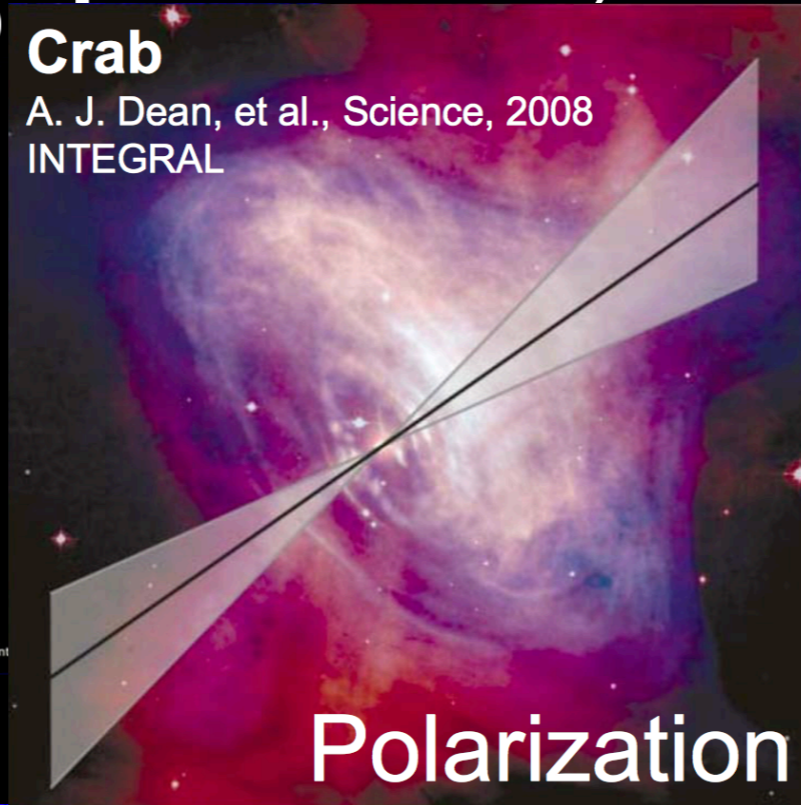
What has Fermi found: The LAT two-year catalog



Un-Identified

**Crab**

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

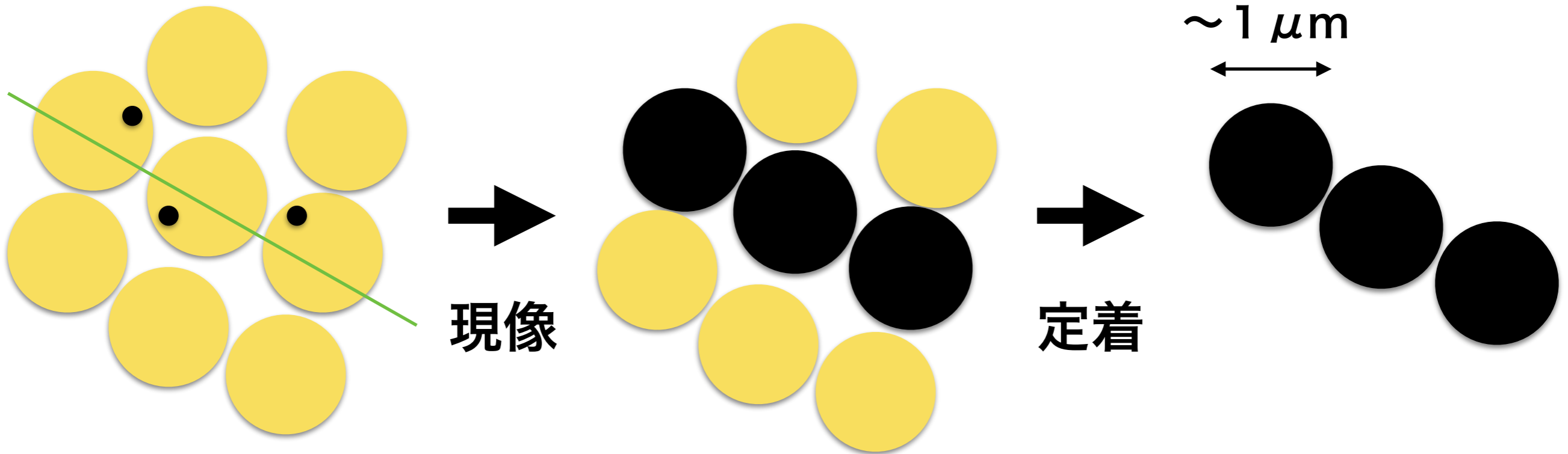


5 years  $E > 1$  GeV

大統計観測から精密観測への転換が必要！！

# 原子核乳剤(エマルション)

ゼラチン中にAgBr  
結晶を充填



荷電粒子の電離作用によりできた電子が銀イオンを還元し銀核が生成

一定数以上の銀核を持つ結晶のみを選択的に還元させ銀粒子を成長させる

未反応のAgBr結晶を溶かし出す

高い空間分解能を持ち、3次元の飛跡情報を記録できる

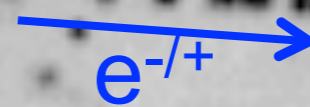
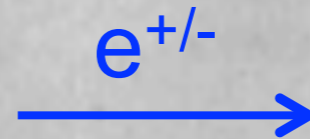
# 原子核乾板(エマルションフィルム)

顕微鏡画像

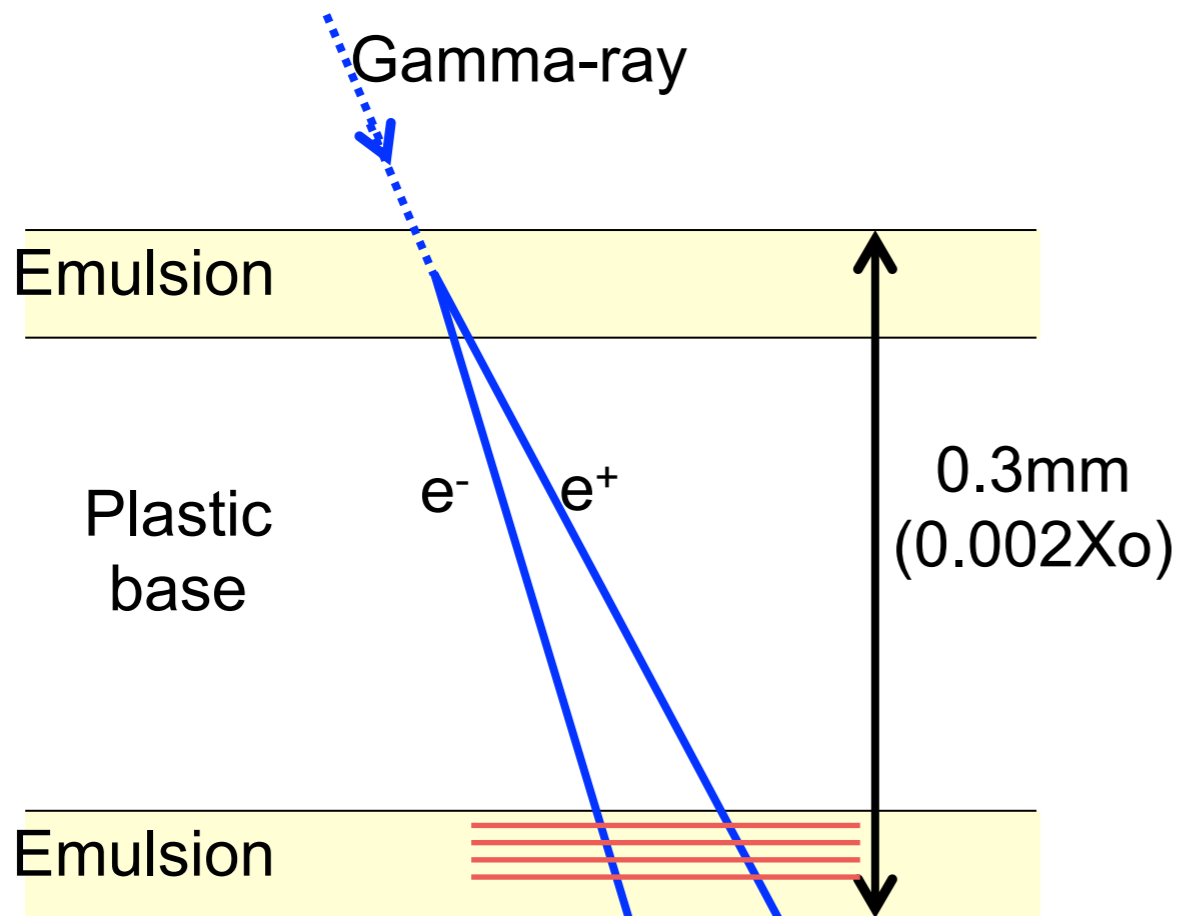
10 $\mu$ m



Gamma-ray

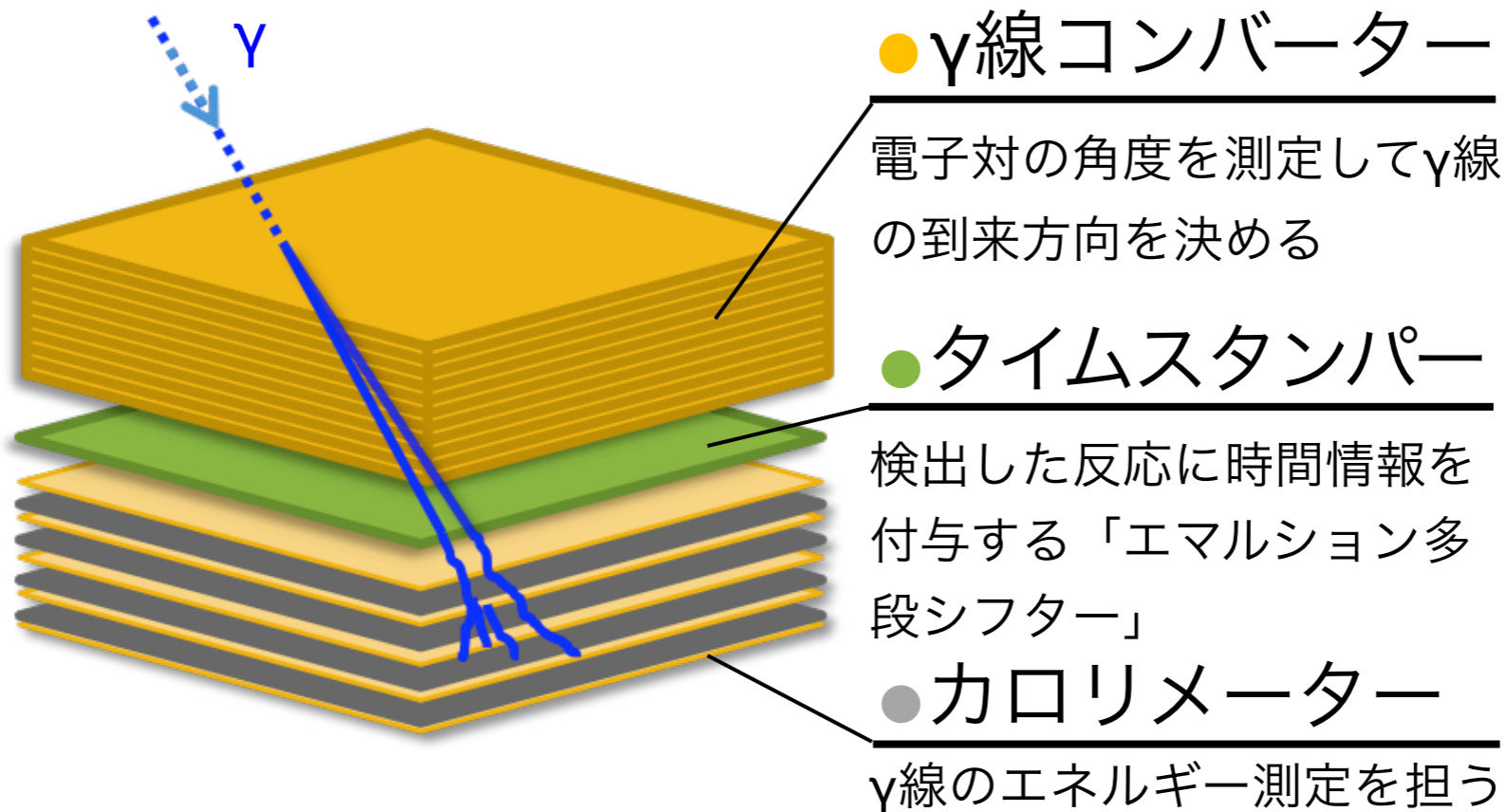


## エマルションフィルムの断面図



# GRAINE計画

原子核乾板を気球に搭載して高空(>高度35km)で大面積(10m<sup>2</sup>)での $\gamma$ 線精密観測を行う。



	Femir-LAT	GRAINE
角度分解能@100MeV	6.0°	1.0°
角度分解能@1GeV	0.90°	0.1°
偏光感度	-	あり
有効面積@100MeV	0.25m <sup>2</sup>	2.1m <sup>2</sup>
有効面積@1GeV	0.88m <sup>2</sup>	2.8m <sup>2</sup>

世界最高角度分解能

世界初偏光有感

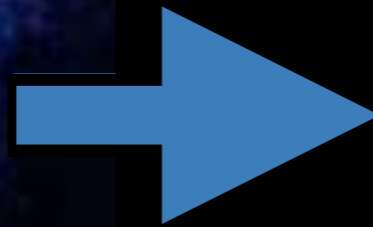
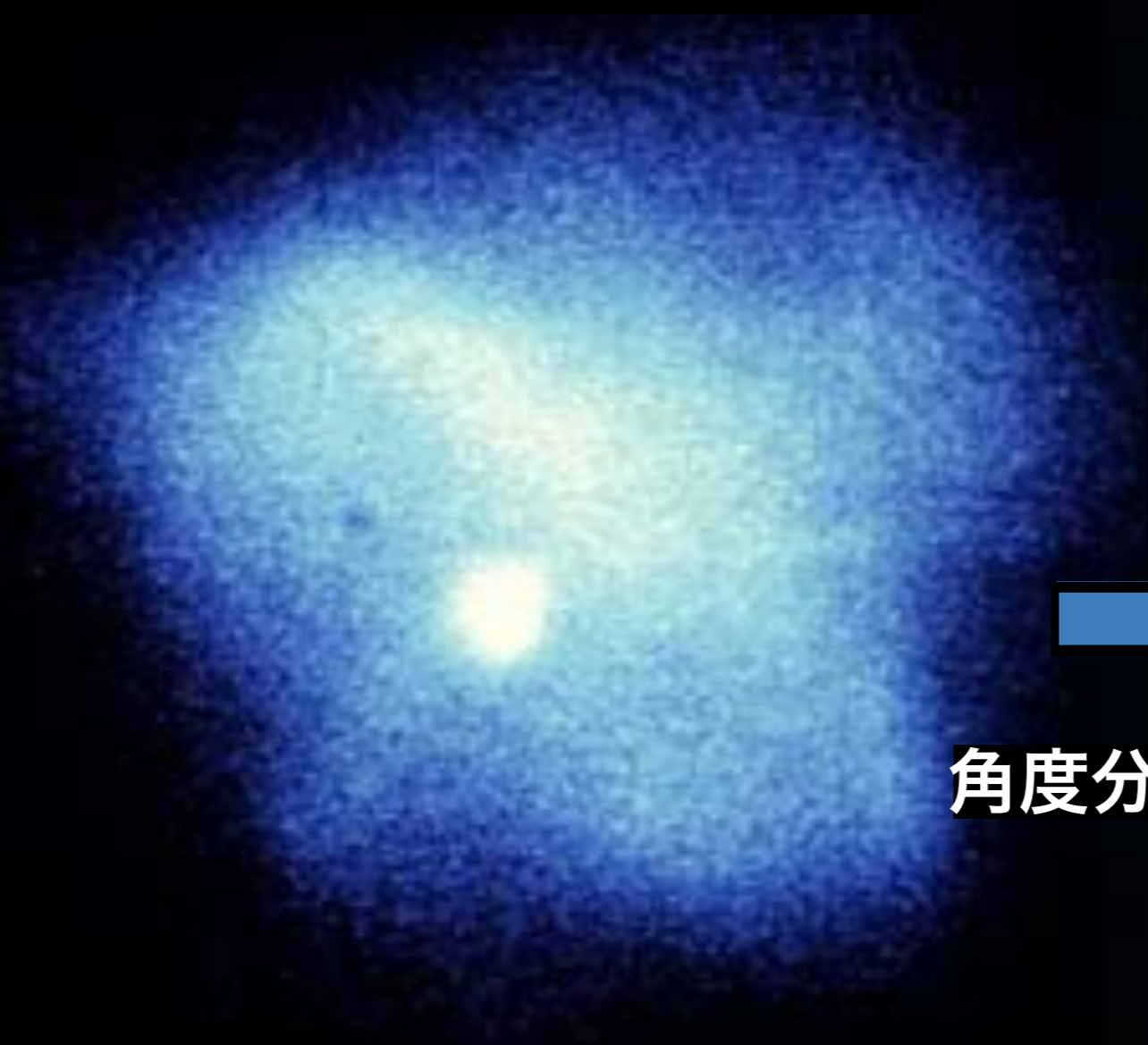
世界最大口径



# 分解能向上によるインパクト (X線の前例)

■ 1990年 ROSAT ( $\Delta\theta \sim 2\text{arcsec}$ )

■ 1999年 チャンドラ ( $\Delta\theta \sim 0.5\text{arcsec}$ )

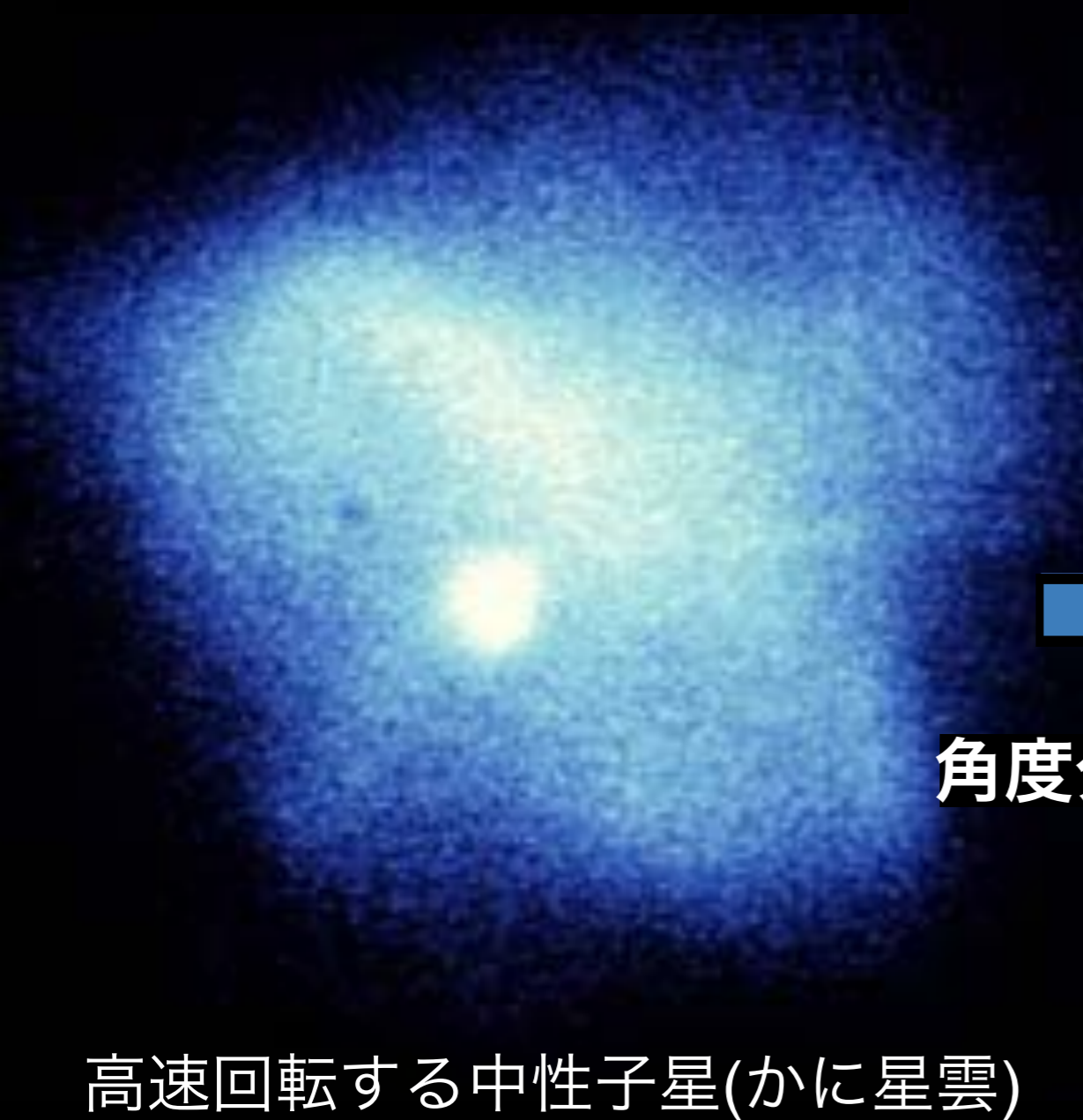


角度分解能 4 倍

高速回転する中性子星(かに星雲)

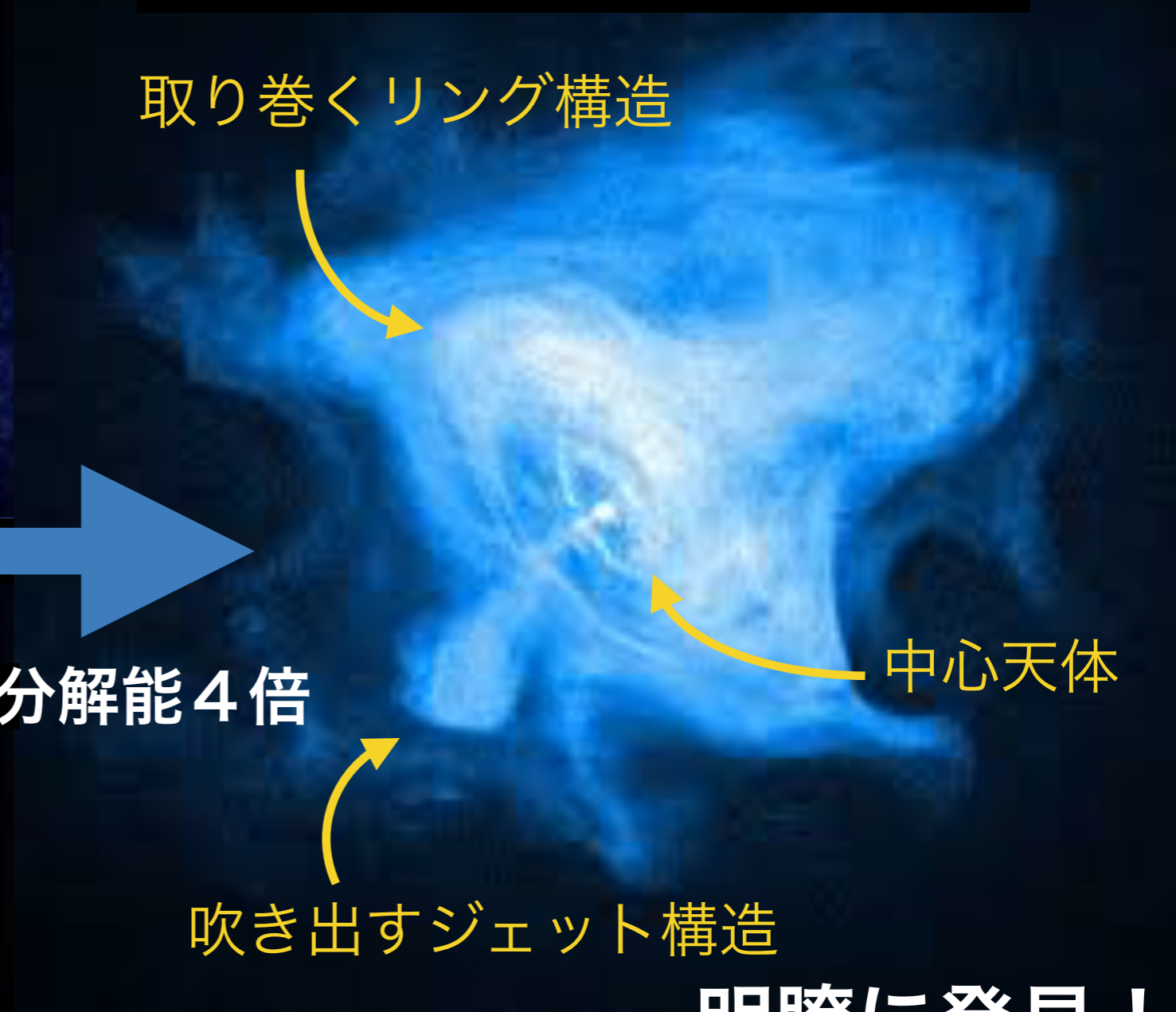
# 分解能向上によるインパクト (X線の前例)

■ 1990年 ROSAT ( $\Delta\theta \sim 2\text{arcsec}$ )



高速回転する中性子星(かに星雲)

■ 1999年 チャンドラ ( $\Delta\theta \sim 0.5\text{arcsec}$ )



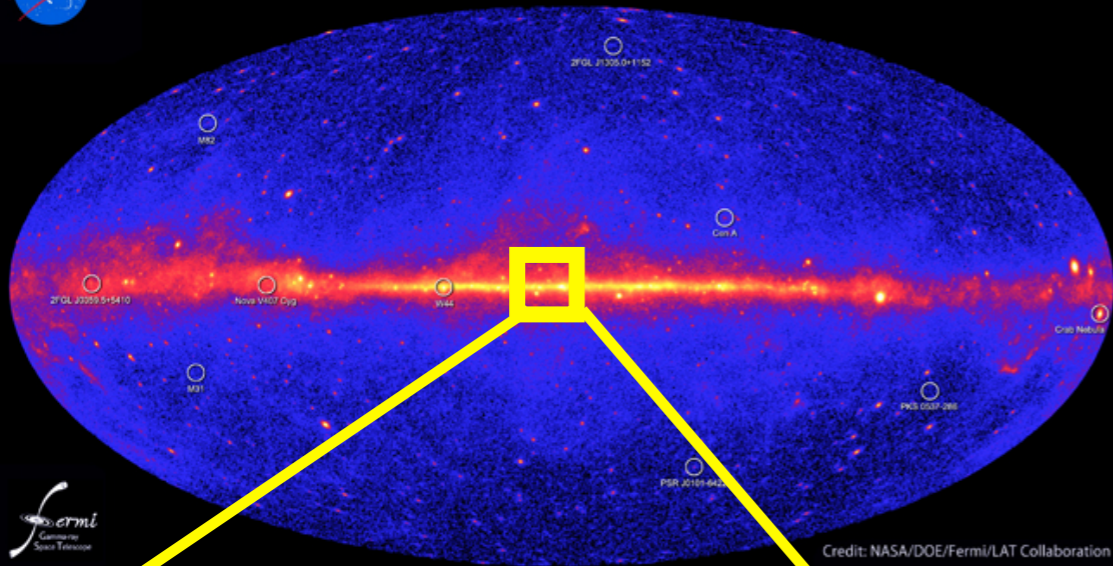
明瞭に発見!

観測機の改善によって新たな発見が期待できる

# 天の川銀河中心の観測

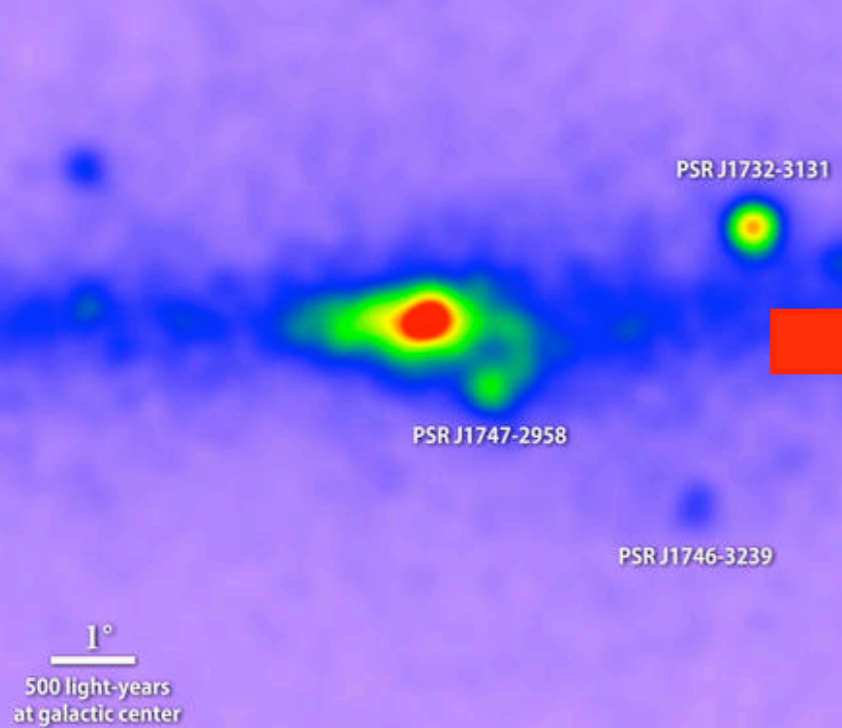


Fermi two-year all-sky map

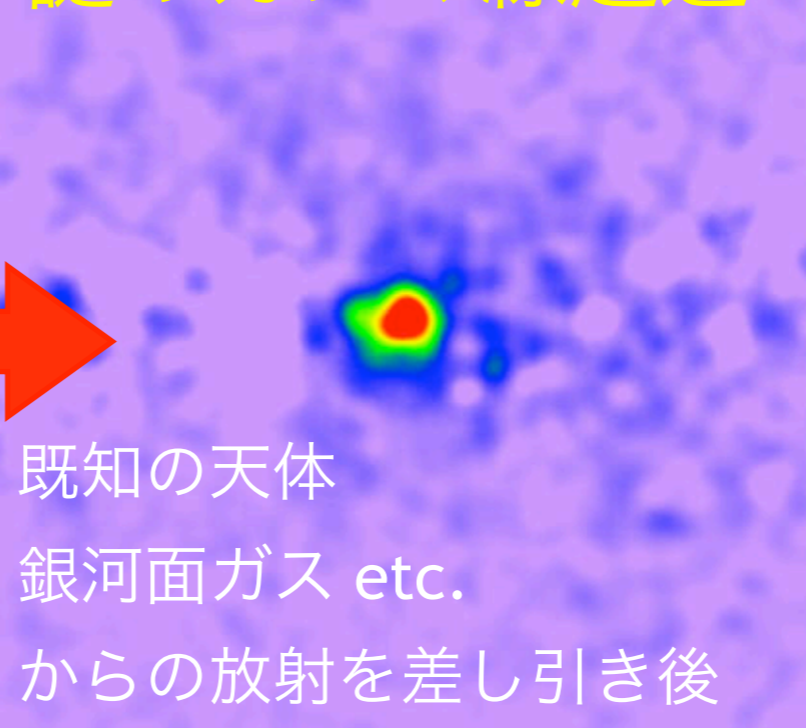


- 2014年 6年分のデータ
- 複数のグループが天の川銀河の中心でガンマ線の超過の存在を発表。
- D.Hooper et al. 他
- NASA HP
- 日本物理学会誌

## 1-3GeV 銀河中心領域



## 謎のガンマ線超過



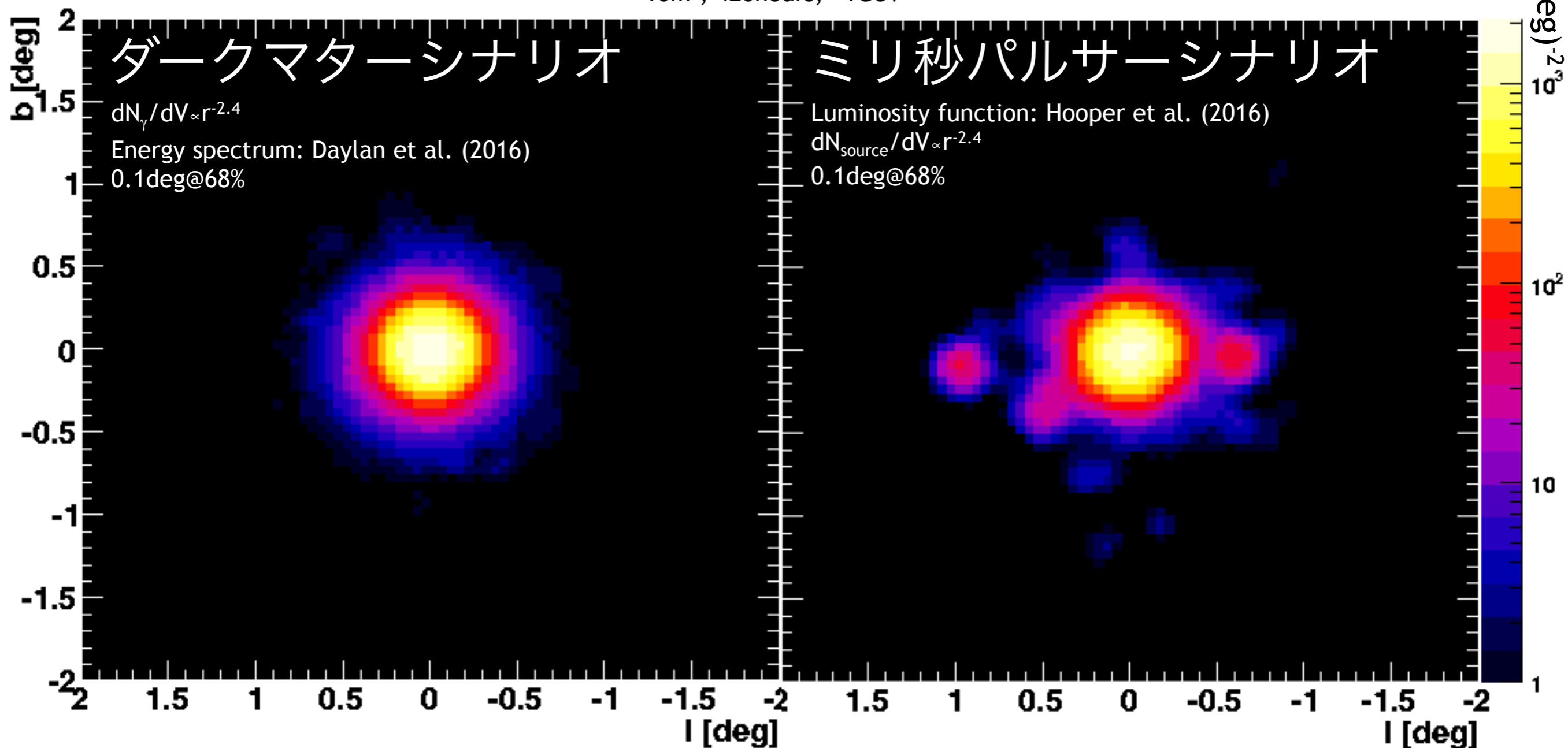
既知の天体  
銀河面ガス etc.  
からの放射を差し引き後

- 様々な解釈が乱立
  - 暗黒物質起源?
  - 未発見パルサー起源?
  - 銀河面モデルの不定性?
- 宇宙線国際会議 (ICRC2015) で特別セッション

銀河中心の高エネルギー現象の理解は混沌とした状況

# 銀河中心GeV excessのシミュレーション w/ 高角度分解能

10m<sup>2</sup>, 420hours, >1GeV



# GRAINE計画

## 2004年- 地上での技術開発

S.Takahashi et al. NIMA 620, 192 (2010)  
K.Ozaki et al. NIMA 833, 165 (2016)

## 2011年6月 JAXA国内気球実験

- 気球高度において観測コンセプトを実証  
H.Rokujo et al. NIMA 701, 127 (2013).  
S.Takahashi et al. PTEP 2015 043H01

## 2015年5月 JAXA国際気球実験

- 海外サイトでの実験スキーム確立
- 望遠鏡性能実証  
K.Ozaki et al., JINST 10, P12018 (2015)  
S.Takahashi et al. PTEP 2016, 073F01  
+テクニカルペーパー準備中

## 2018年4月 JAXA国際気球実験

- 天体検出による総合実証

2021年~

大面積望遠鏡による科学観測開始



## GRAINE 2015

- 2015年5月12日
- オーストラリア ABLS
- 口径面積：0.38m<sup>2</sup>
- 11.5時間@36-37km



解析中

準備中

# GRAINE2018 変更点,準備状況

- 2018年4月初頭
- オーストラリア アリススプリングス
- 口径面積：0.38m<sup>2</sup> フライト時間：24~30時間

エマルジョンフィルム: 銀量の変更、温度耐性改善

多段シフター: 有効面積の拡大、タイムスタンプ性能向上

スターカメラ: システムの冗長化

与圧容器ゴンドラ: 球から拡張性の高い繭型に変更



# GRAINE2018 変更点,準備状況

- 2018年4月初頭
- オーストラリア アリススプリングス
- 口径面積：0.38m<sup>2</sup> フライト時間：24~30時間

**エマルジョンフィルム:** 銀量の変更、温度耐性改善

**多段シフター:** 有効面積の拡大、タイムスタンプ性能向上

**スターカメラ:** システムの冗長化

**与圧容器ゴンドラ:** 球から拡張性の高い繭型に変更



# GRAINEでのフィルム開発

	GRAINE2011	GRAINE2015
名称	OPERAフィルム	高感度フィルム
AgBr体積充填率	銀:ゼラチン =30:70	銀:ゼラチン =55:45
飛跡検出効率	~80%	~98%
製造	富士フィルム 2003年終了	名古屋大学 2011年~

GRAINE2018ではさらに**潜像退行特性の改善**を目指す



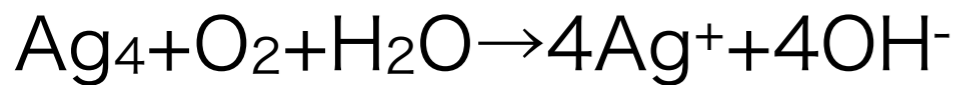
# 気球実験における回収遅延の影響



観測後、最高気温40°Cの  
オーストラリアの荒野に  
放置される

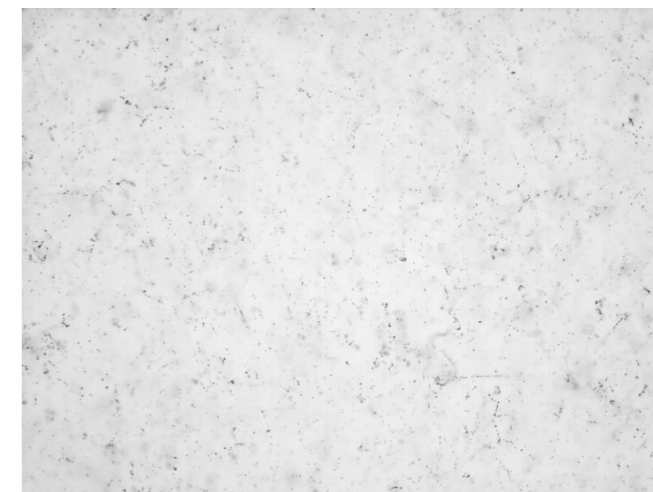
回収が困難な場所に落下  
した場合1週間程度時間か  
かかる可能性もある

フィルムが高温下に晒されると記録  
された飛跡が消えてしまう(潜像退行)



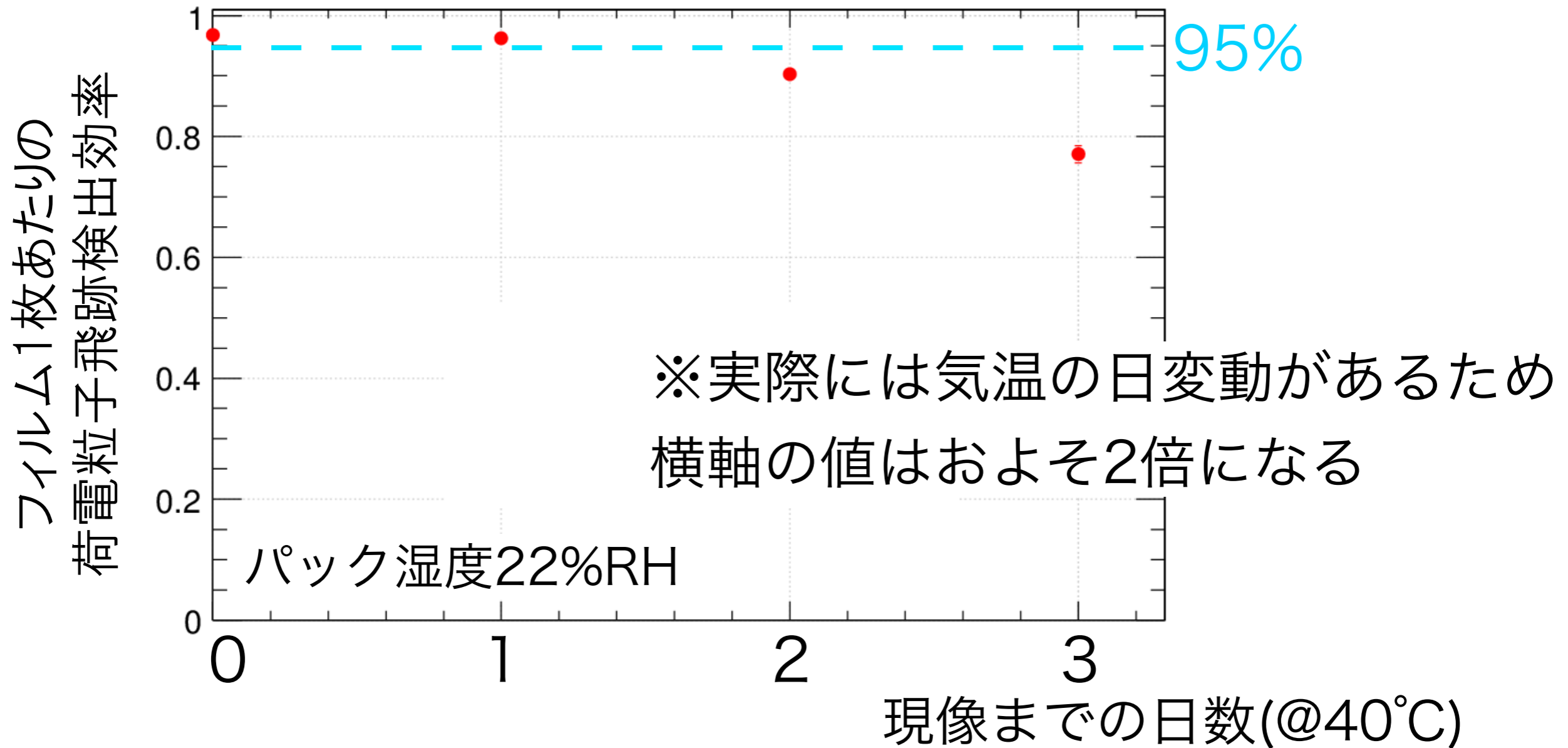
高温&水分量が多いほど促進する

フィルムを乾燥させてから密閉パッ  
クすることで防止する



潜像退行による飛跡の消失

# 高感度フィルムの潜像退行特性試験(2014年)



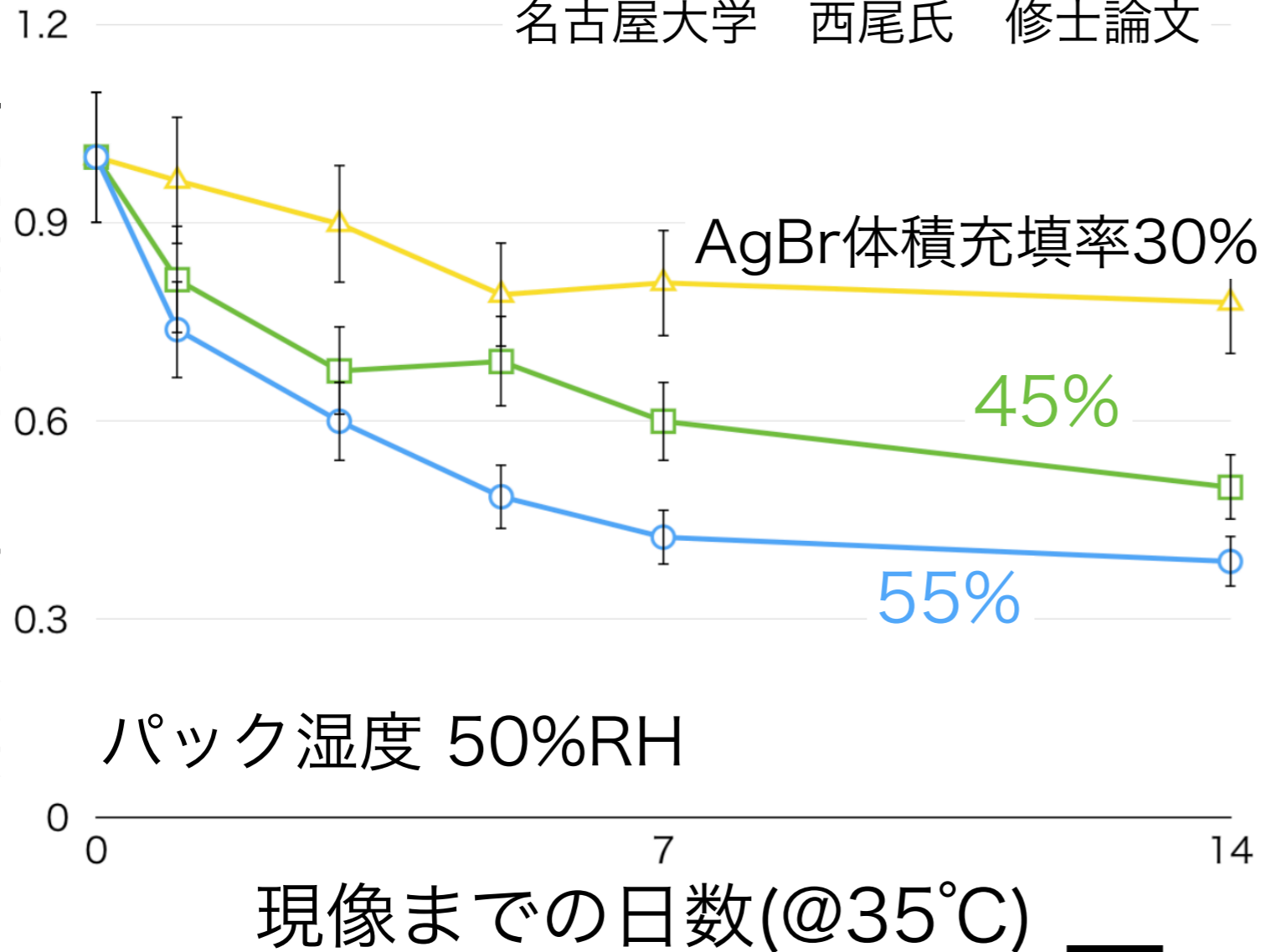
## 改善項目

- 回収までに3日以上かかると飛跡検出効率95%を下回る
- パック時の湿度が低く(22%RH)フィルムが割れるリスクが高い

# 銀:ゼラチン比の調整による潜像退行特性の改善

名古屋大学 西尾氏 修士論文

飛跡銀粒子密度保持率



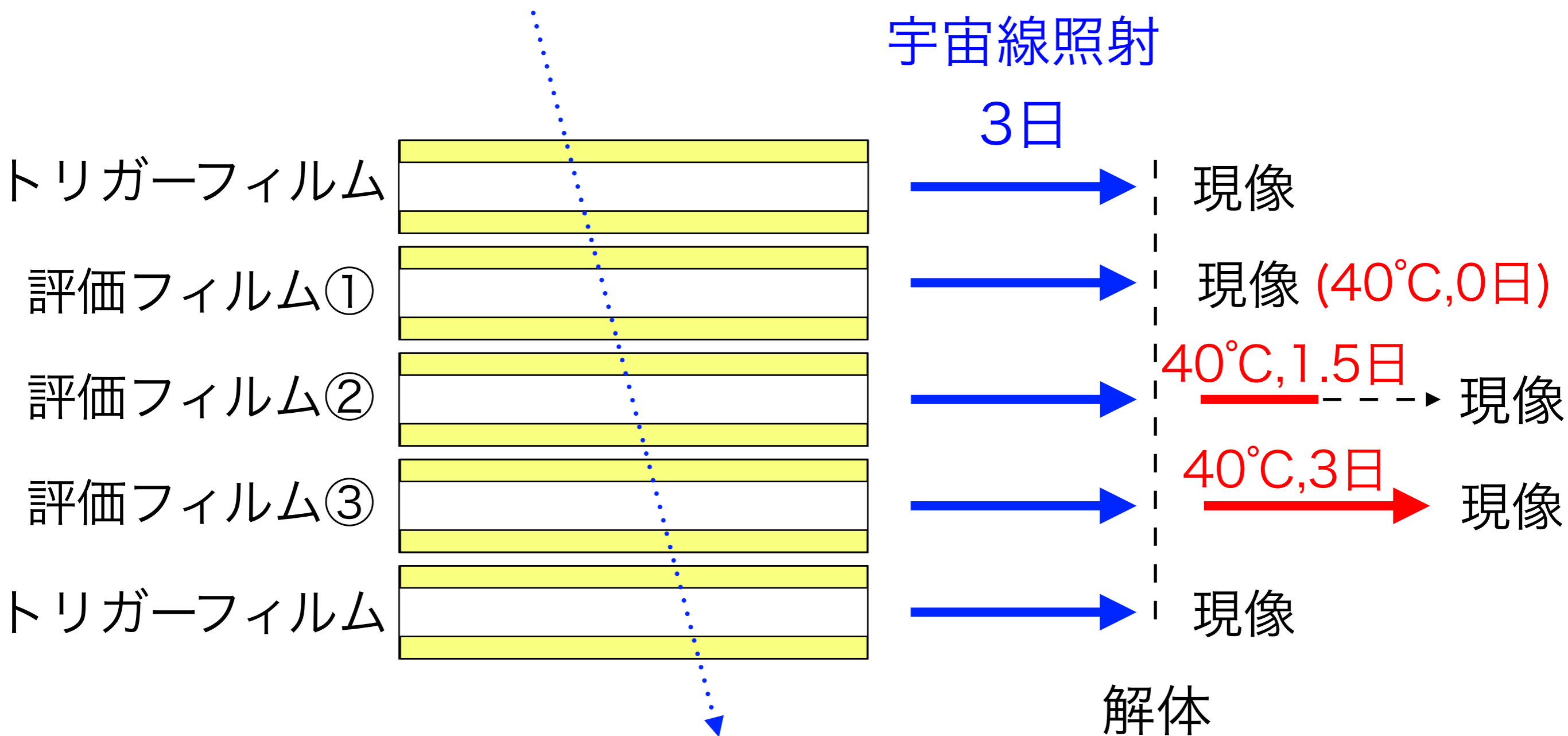
2018年実験では  
潜像退行特性改善の  
ために使用するフィル  
ムの変更を検討  
(AgBr体積充填率  
55%→45%)



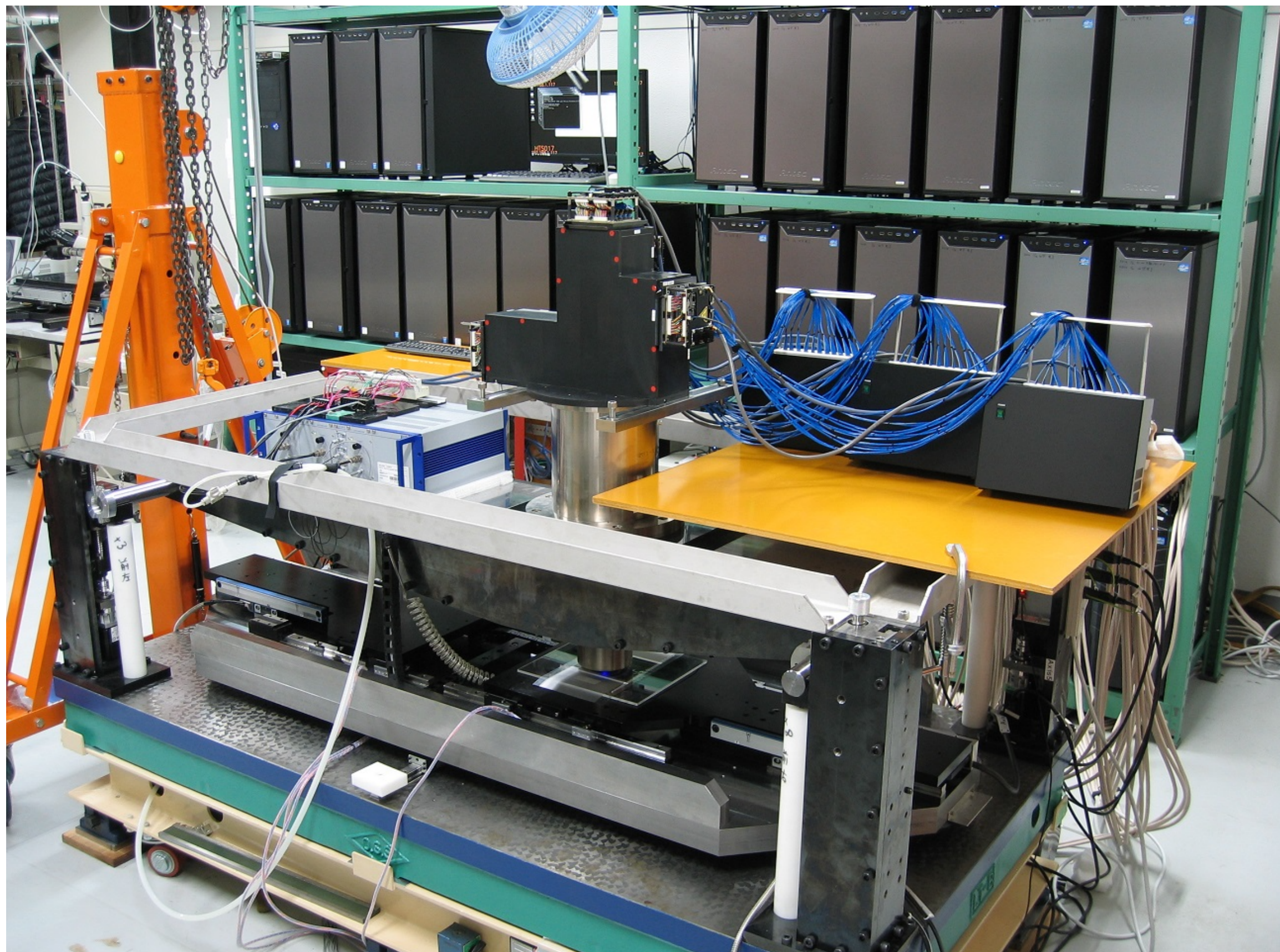
**気球実験での温度条件(40°C、3日)で  
潜像退行特性の評価試験を行った**

# 潜像退行特性評価試験

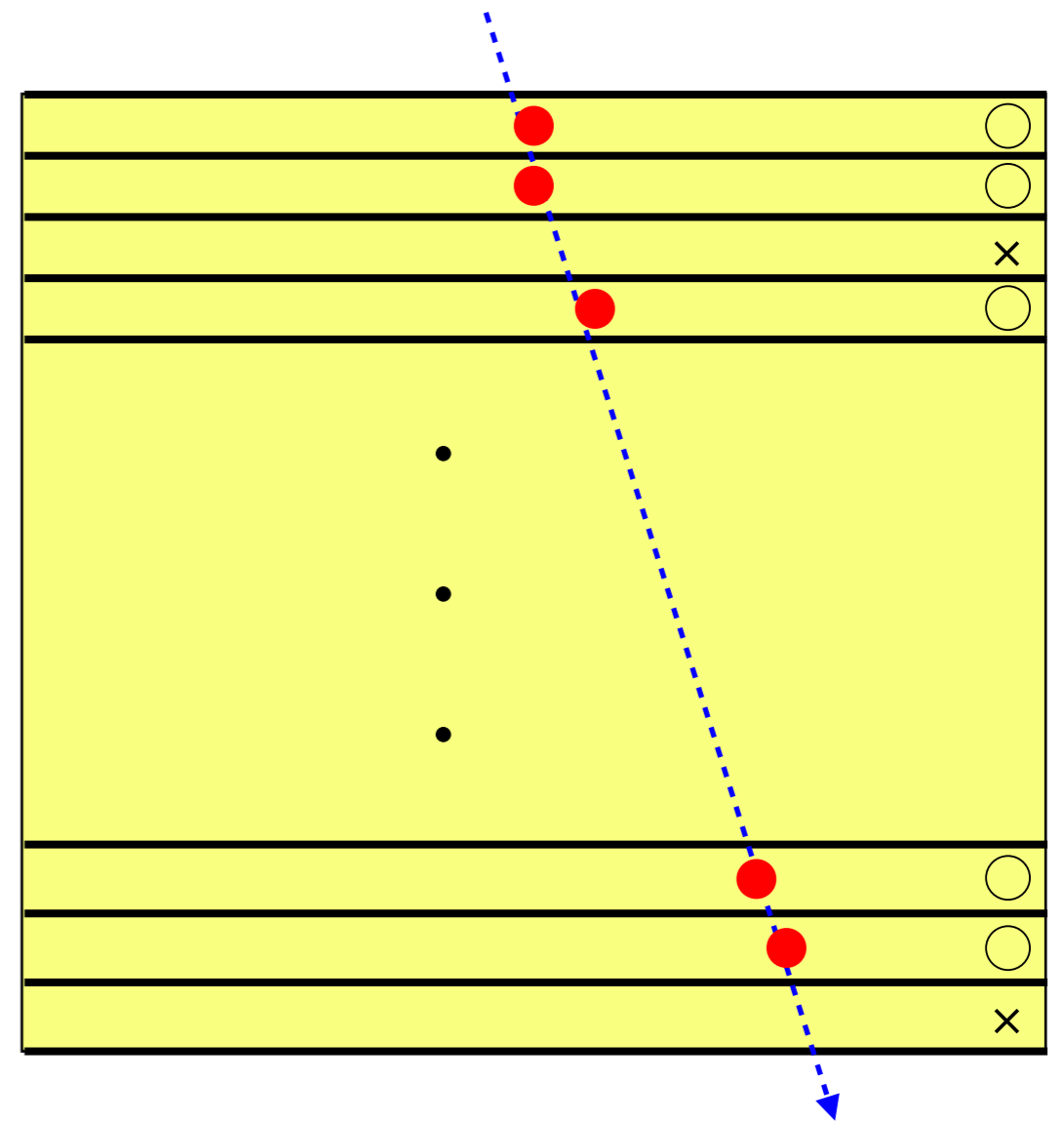
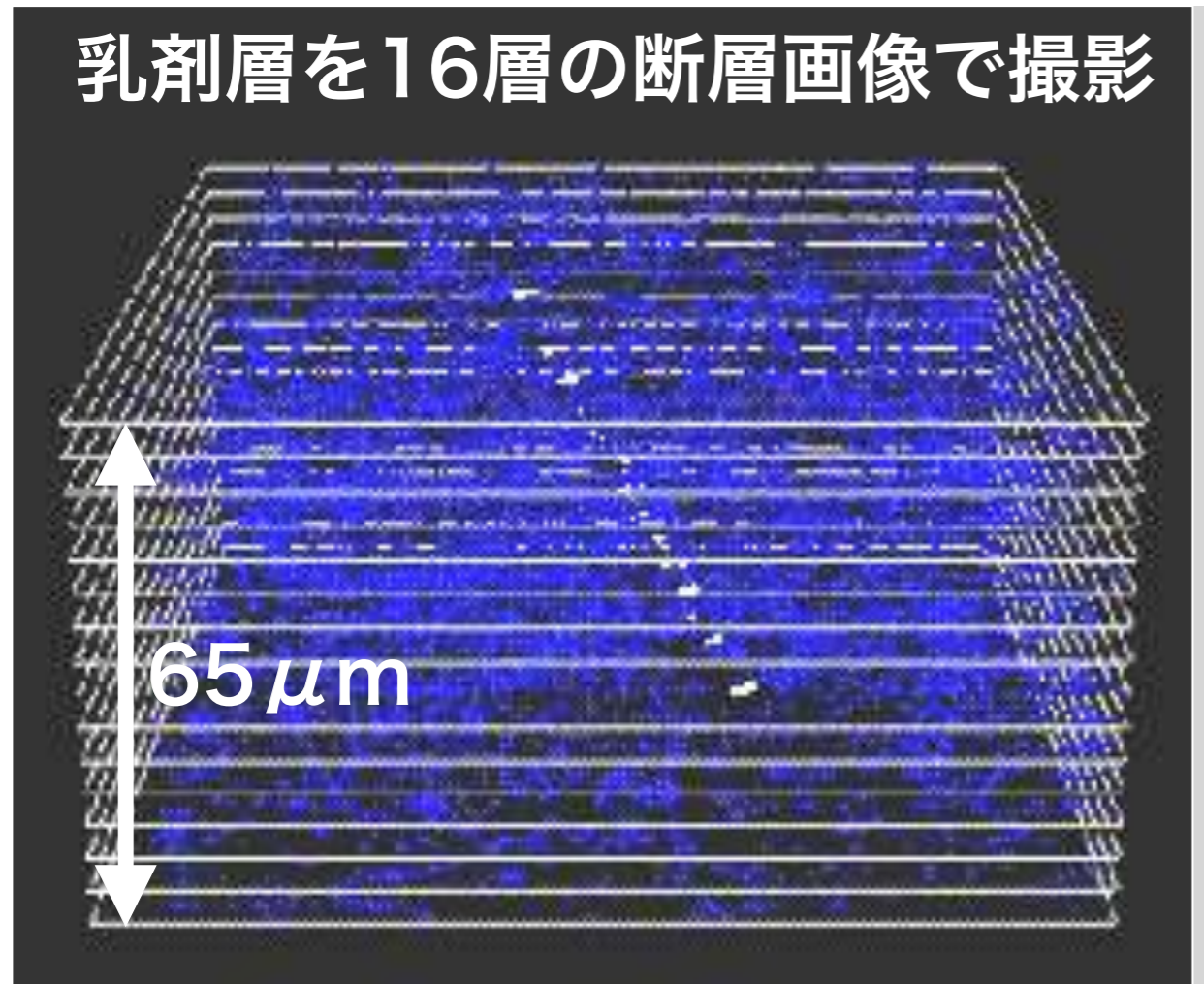
AgBr結晶体積充填率45%の原子核乳剤を使ったフィルムを製造  
相対湿度30%にて乾燥し1枚ずつ密閉パック



# 高速自動飛跡読み取り装置(HTS)



# 飛跡の自動読み出し



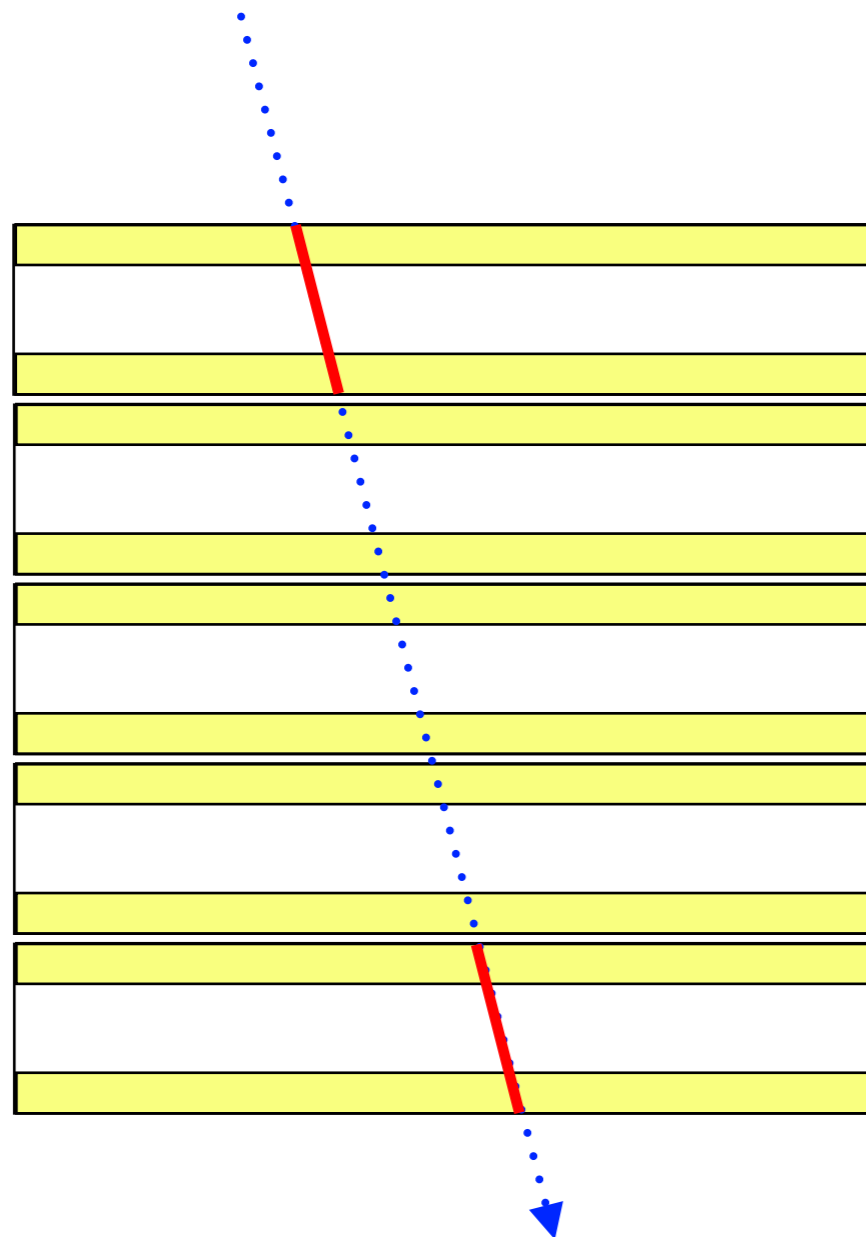
パルスハイト (ph) : 16層の内のヒットレイヤー数

今回は  $ph \geq 8$  の飛跡を出力した

読み取り角度範囲は  $|\tan \theta_{x,y}| < 1.4$

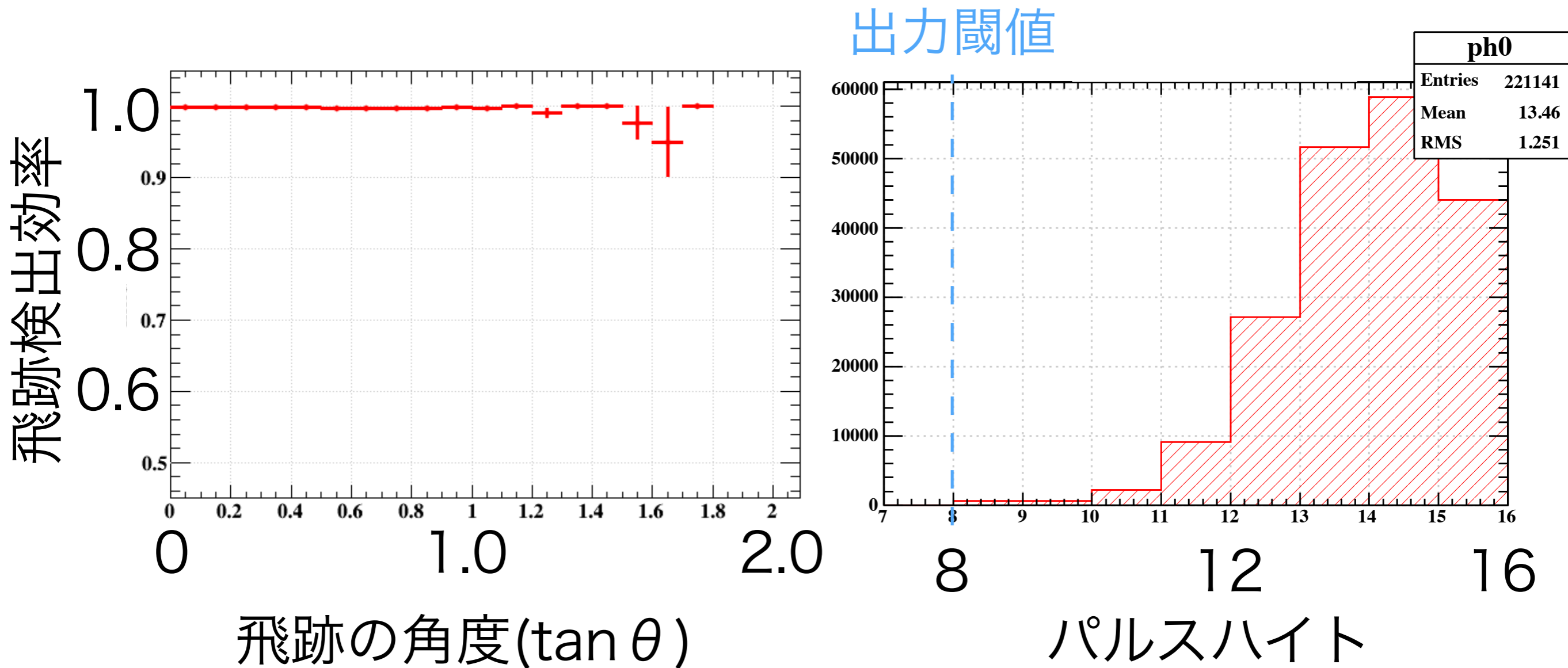
# 飛跡検出効率の求め方

$$\text{飛跡検出効率} = \frac{\text{トリガー\&評価フィルムでの接続本数}}{\text{トリガーフィルムでの接続本数}}$$



- トリガーフィルム
- ? 評価フィルム①(40°C、0day)
- ? 評価フィルム②(40°C、1.5day)
- ? 評価フィルム③(40°C、3day)
- トリガーフィルム

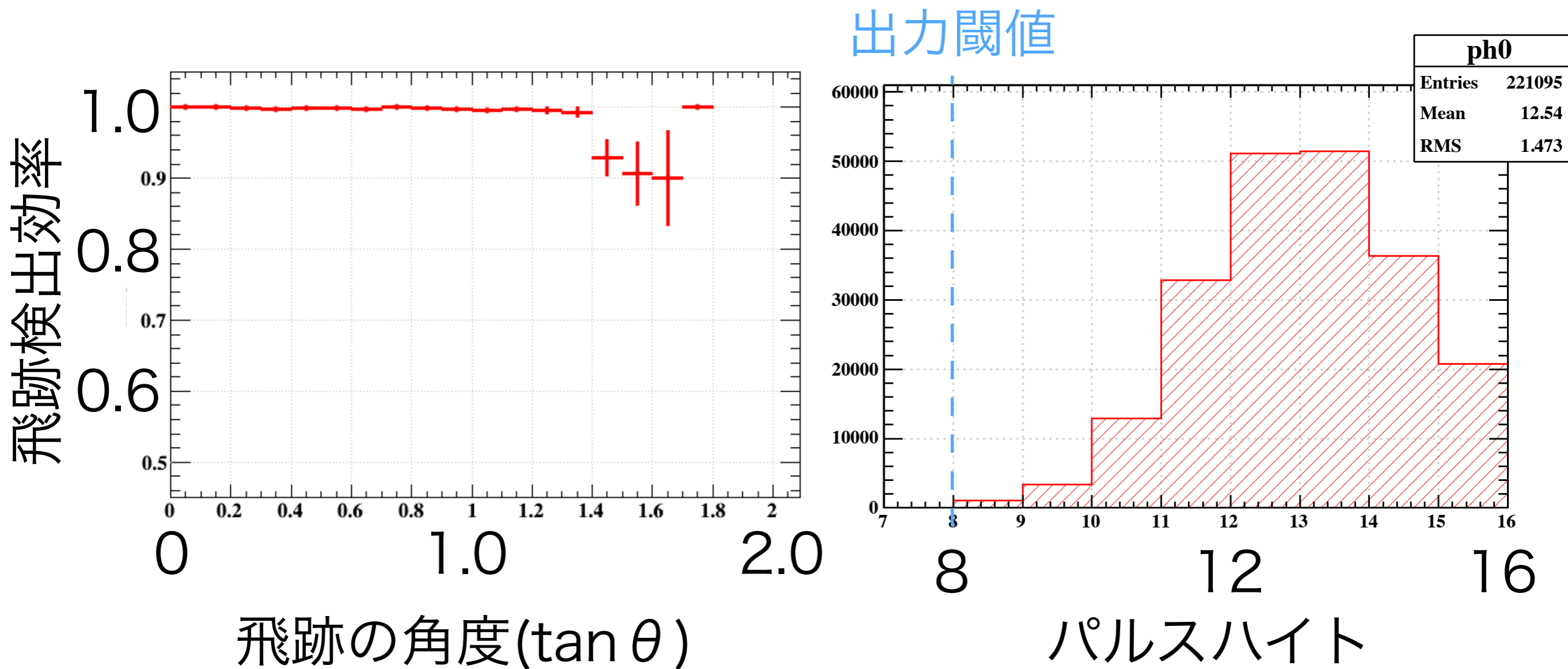
# 評価フィルム①(40°C、0day)の結果



角度平均飛跡検出効率 = 0.994

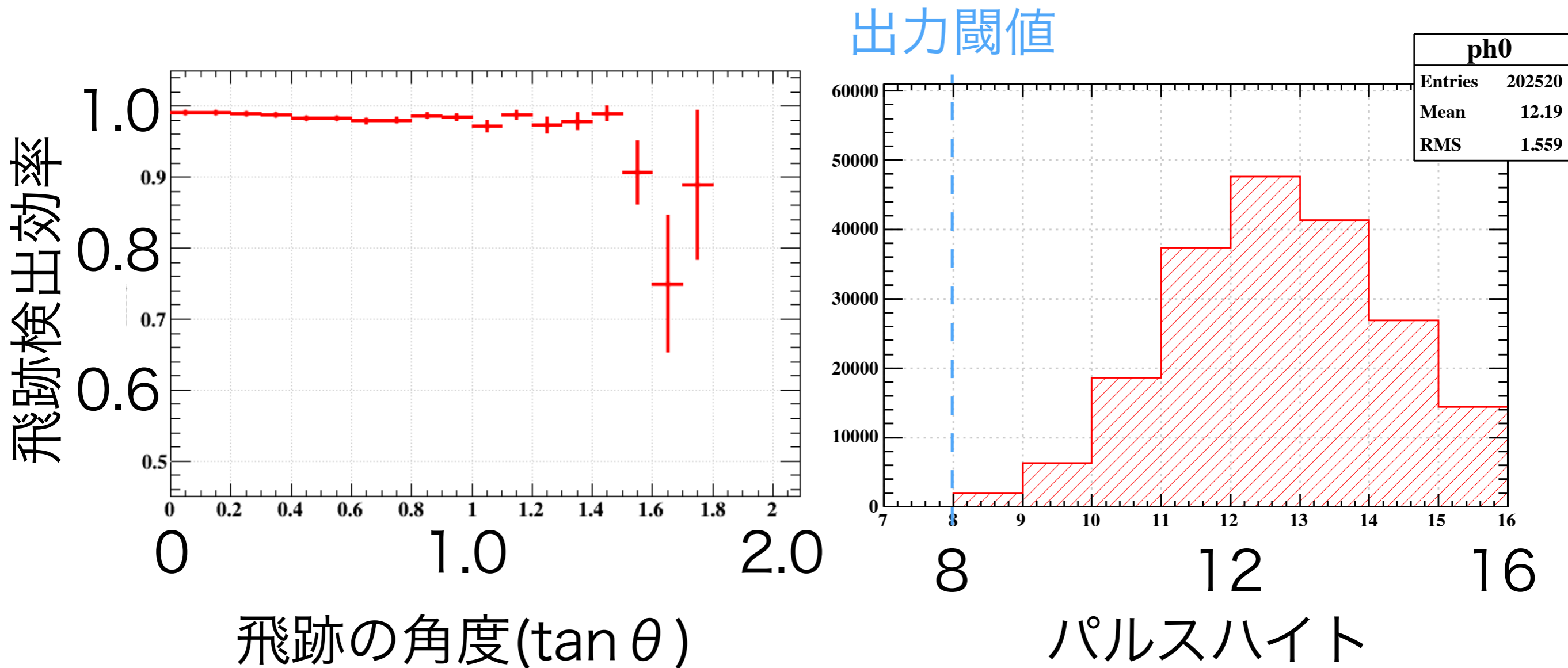


# 評価フィルム②(40°C、1.5day)の結果



角度平均飛跡検出効率 = 0.983

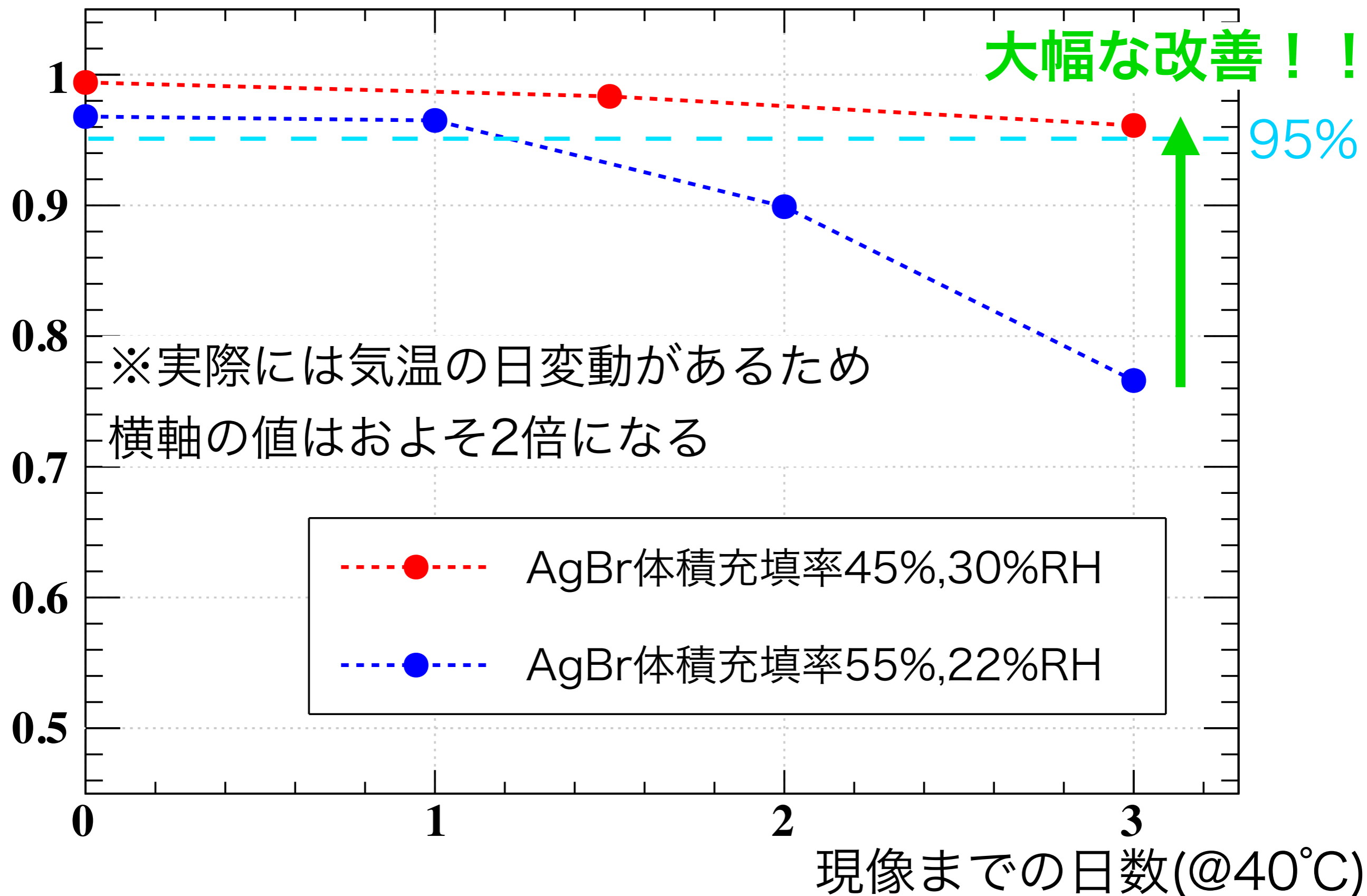
# 評価フィルム③(40°C、 3day)の結果



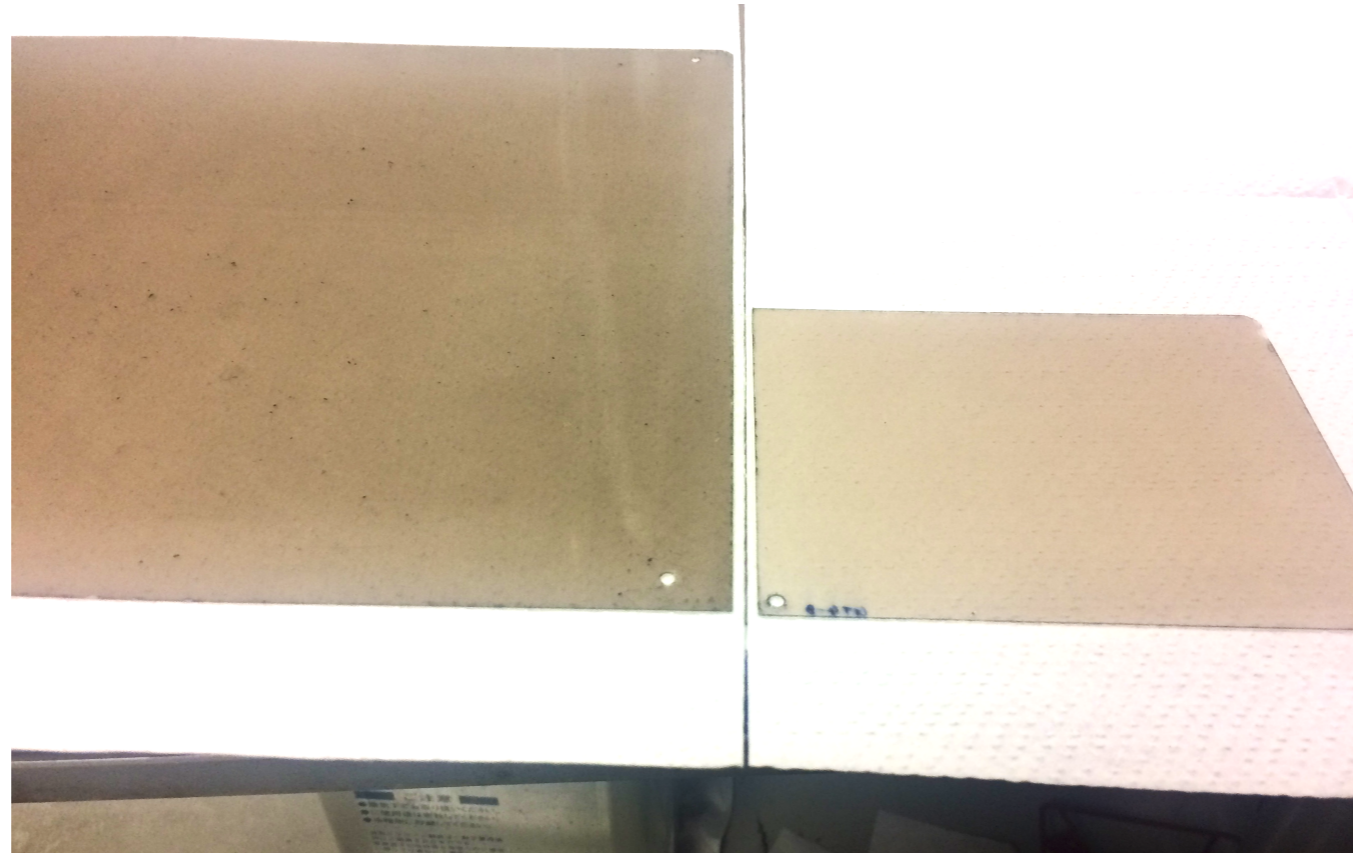
角度平均飛跡検出効率 = 0.961

# 高感度フィルム試験(2014年)との比較

飛跡検出効率

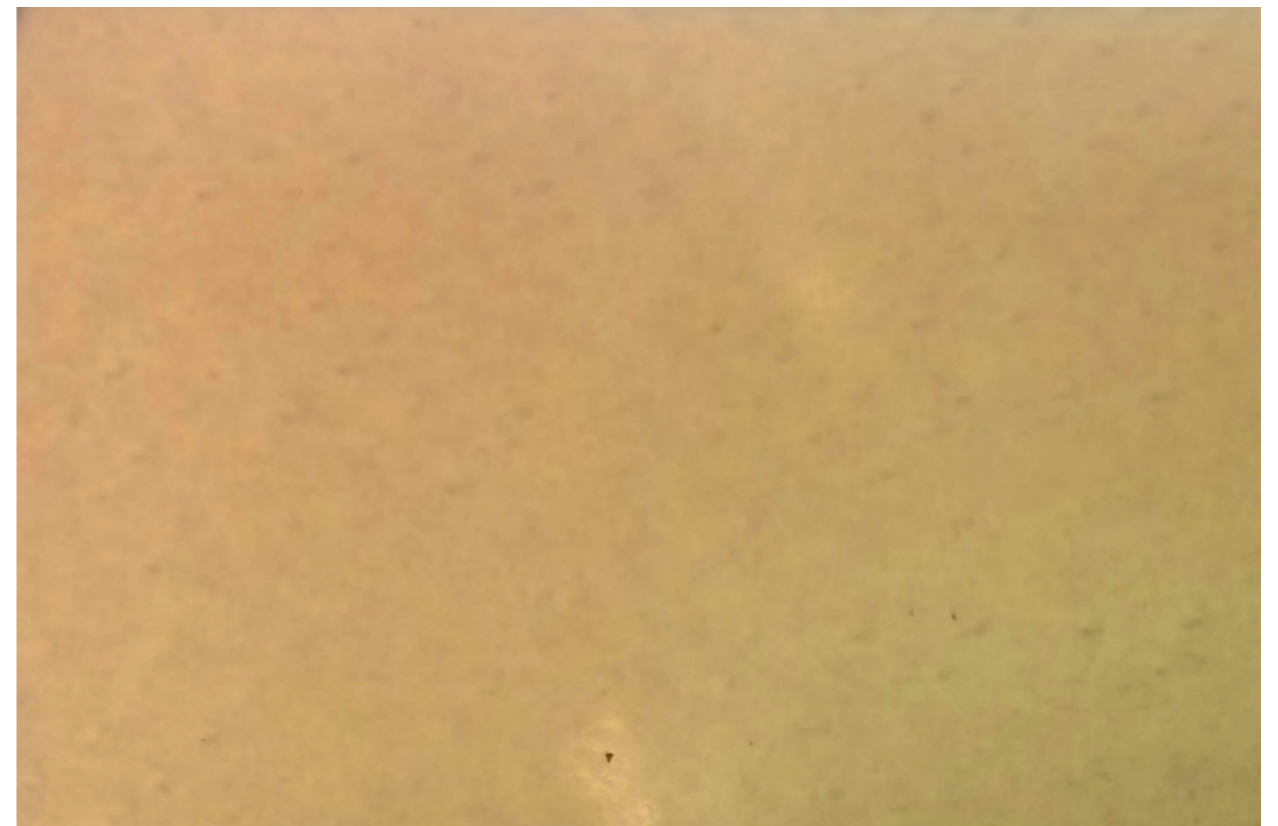


# 高感度フィルムとの見た目の比較



AgBr体積充填率  
55%フィルム

AgBr体積充填率  
45%フィルム



# コンバータフィルム変更点

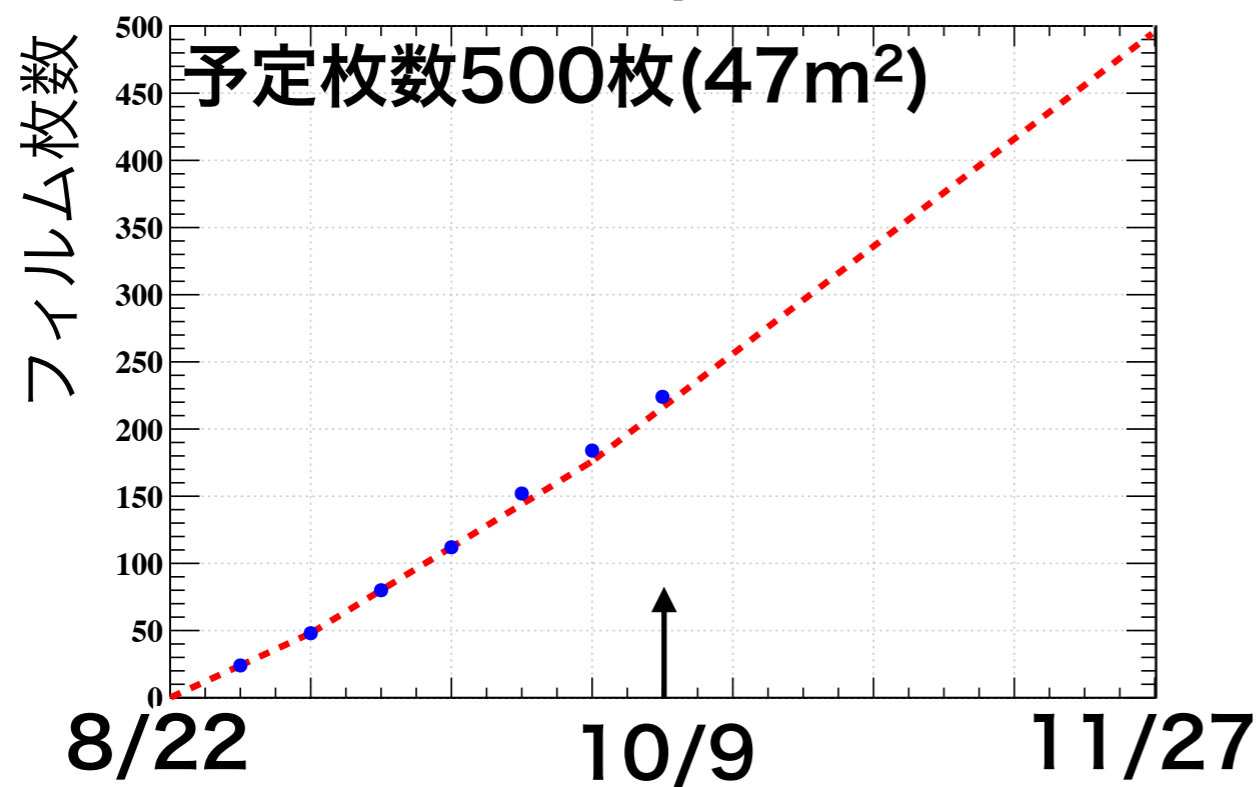
	GRAINE2015	GRAINE2018
AgBr体積充填率	銀:ゼラチン=55:45	銀:ゼラチン=45:55
パック湿度	20%	30%
潜像退行特性 ※日変動考慮	~3日	~6日
塗布厚み(片面)	70 $\mu$ m	75 $\mu$ m
フィルム枚数	100枚×4ユニット	100枚×4ユニット

**より割れにくく、潜像退行に強く、  
全面一様に検出効率の高いフィルムとなった**

# 2018年実験に向けたフィルム製造を開始



明室での塗布試験の様子



32~40枚/週を製造し  
ており実験に必要な  
~500枚を11月中に  
作り終える予定

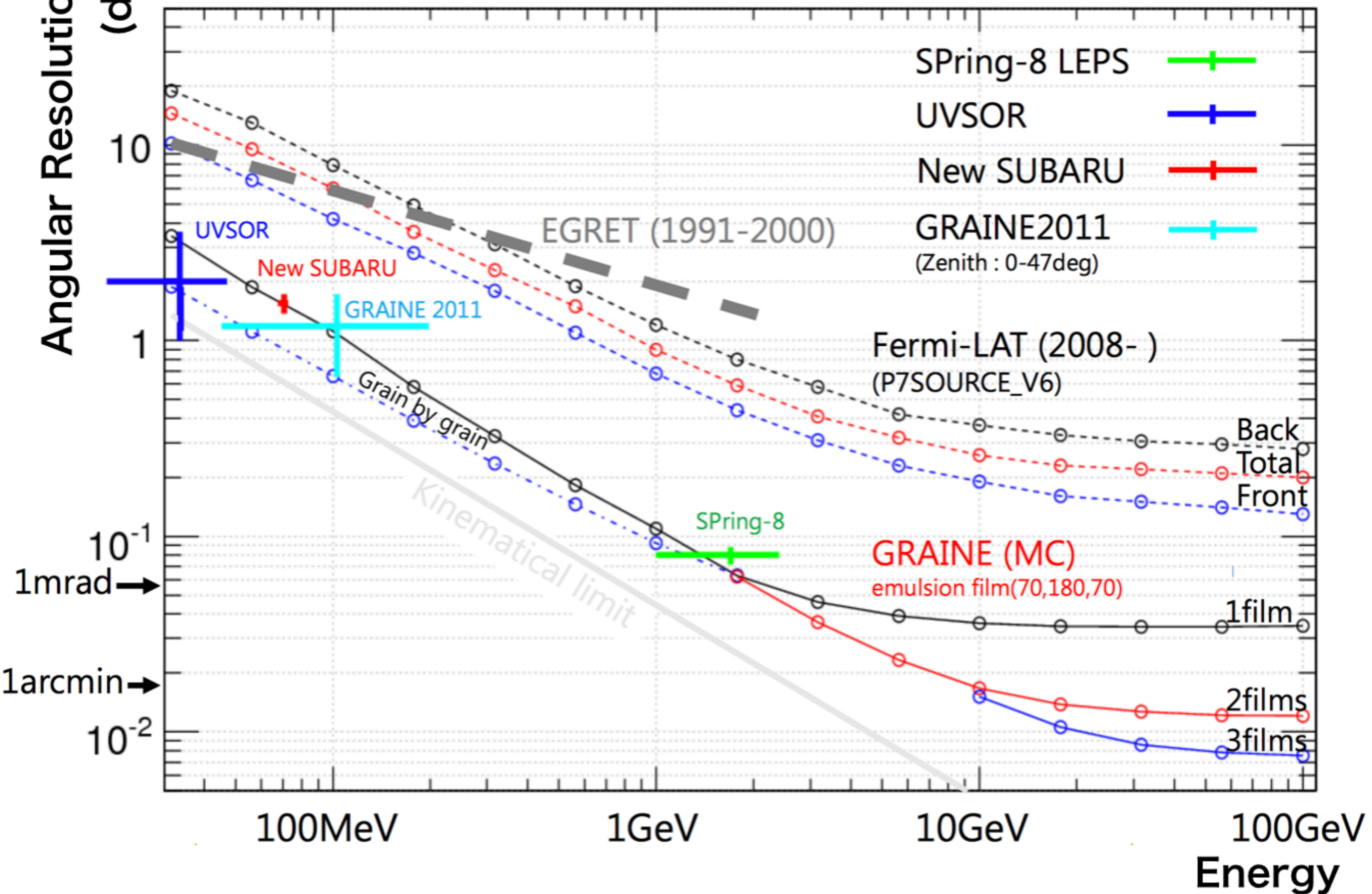
# まとめ

- ・ 気球搭載型エマルション $\gamma$ 線望遠鏡実験GRAINEでは2018年に次期フライトを行うことが決定し、現在は準備を進めているところ
- ・ 銀量を調整したフィルム(AgBr体積充填率55%→45%)を製造し、40°C環境での潜像退行特性を調べる試験を行い、大幅な改善が見られた
- ・ GRAINE2018年気球実験に向けてフィルムの量産が始まっており11月中には必要枚数が完成する予定
- ・ 春の学会の時はオーストラリアで準備をしている段階なので、実際のフライト結果は来年秋の学会にて

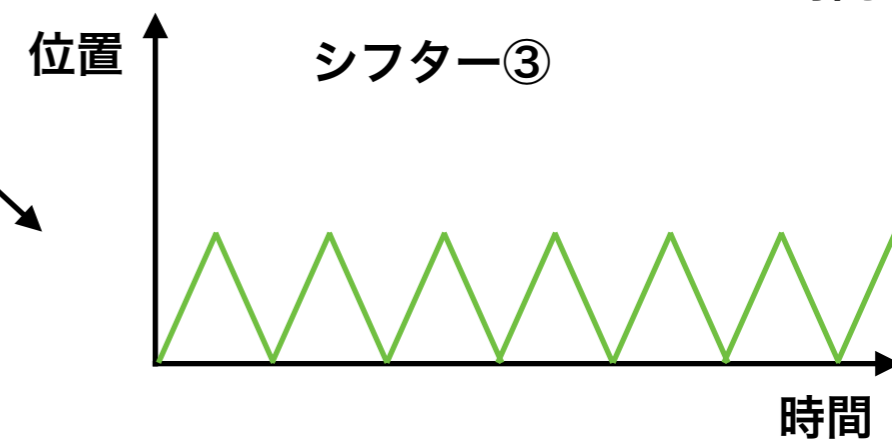
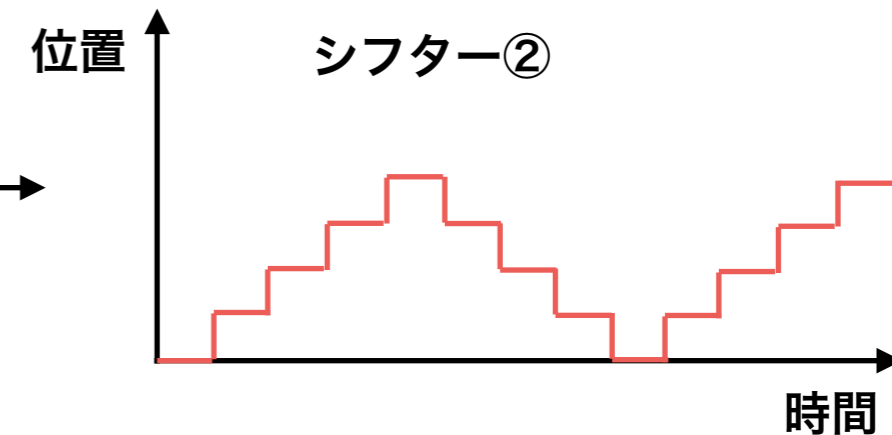
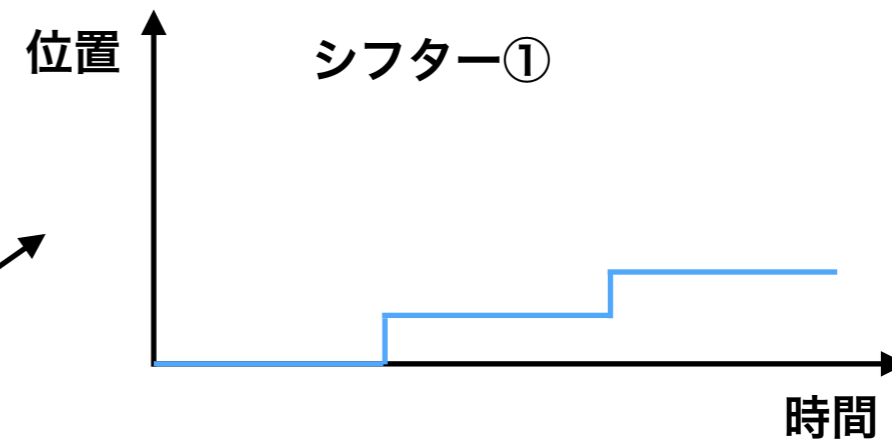
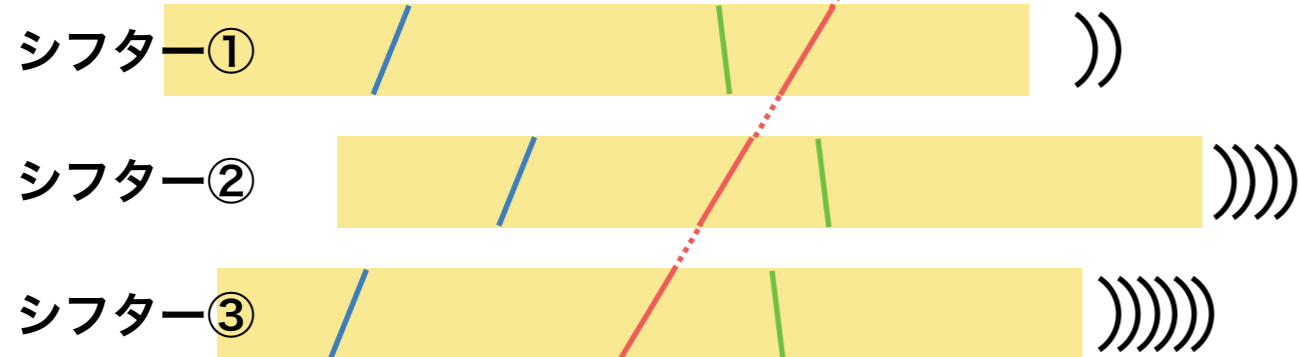
back up



# Angular resolution



# 多段シフター



# タイムスタンパー 多段シフター

呉坪, 15aU33-3

三鷹光器社と  
共同開発

80cm X 25cm X 2

## ハードウェアのマイナー変更

開口面積 $2500\text{cm}^2 \rightarrow 4000\text{cm}^2$

背板(CFRP)パックを導入

固定段を追加

駆動方向の遊び抑制

ステージ継手の遊び抑制

下段原点センサ羽の部材見直し

ギャップの制御及び低減  $\rightarrow$  S/N向上 ( $> \sim 2$ 倍)

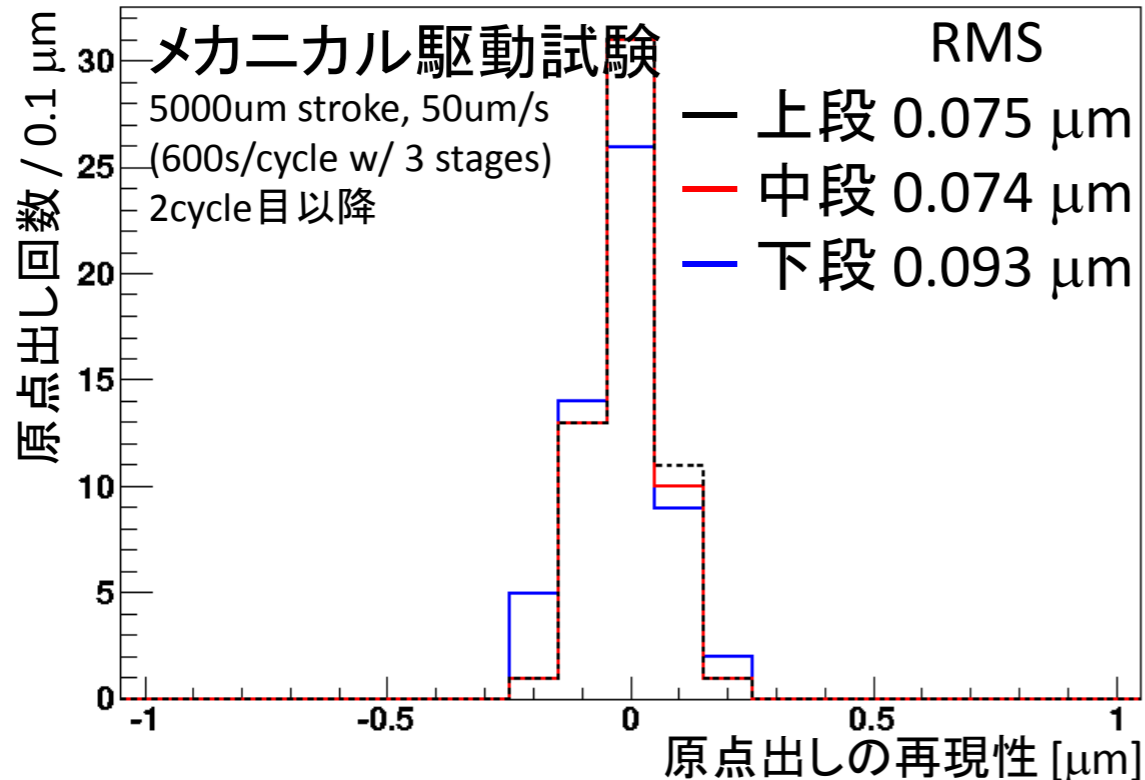
物質質量低減  $\rightarrow$  有効面積向上 ( $\sim 20\%$ @100MeV)

平面性向上

シフターへのギャップの制御及び低減  $\rightarrow$  S/N向上 ( $> \sim 2$ 倍)

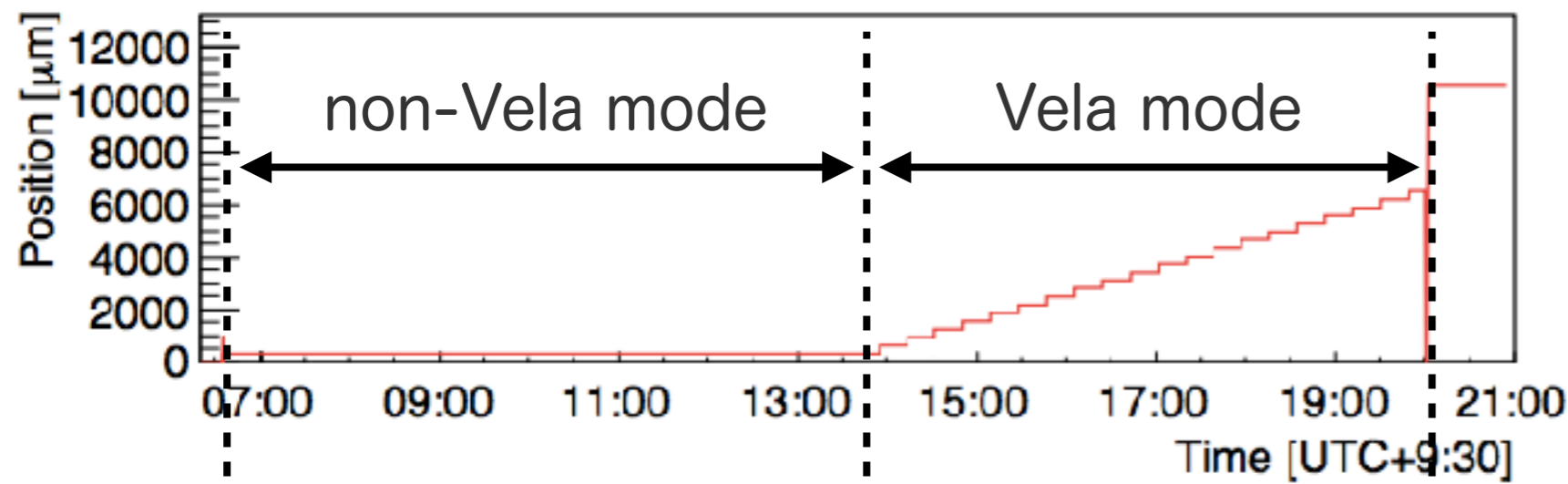
駆動精度の向上

原点出し再現性の温度変化特性の向上 ( $\sim 2$ 倍)

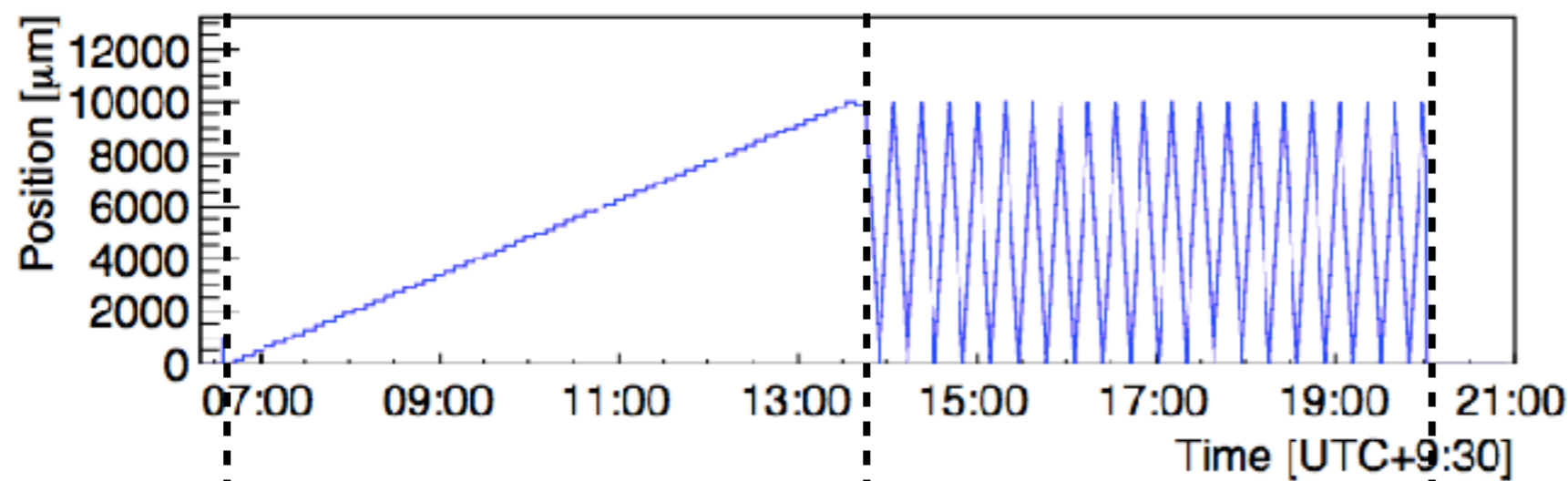


- ✓ CFRPケミカル試験 (2017年5月-)
- ✓ メカニカル試験 (8/7 - 18)
- ✓ フィルム搭載試験 (8/8 - 10)
- ✓ 低温低圧メカニカル試験 (8/21 - 23)
- ✓ 低温低圧フィルム搭載試験 (8/24 - 25)  
w/ 大気球実験室恒温恒圧槽 @ISAS/JAXA
- ゴンドラ実装 (9 - 10月)
- 大気球機器との噛み合わせ (10月)

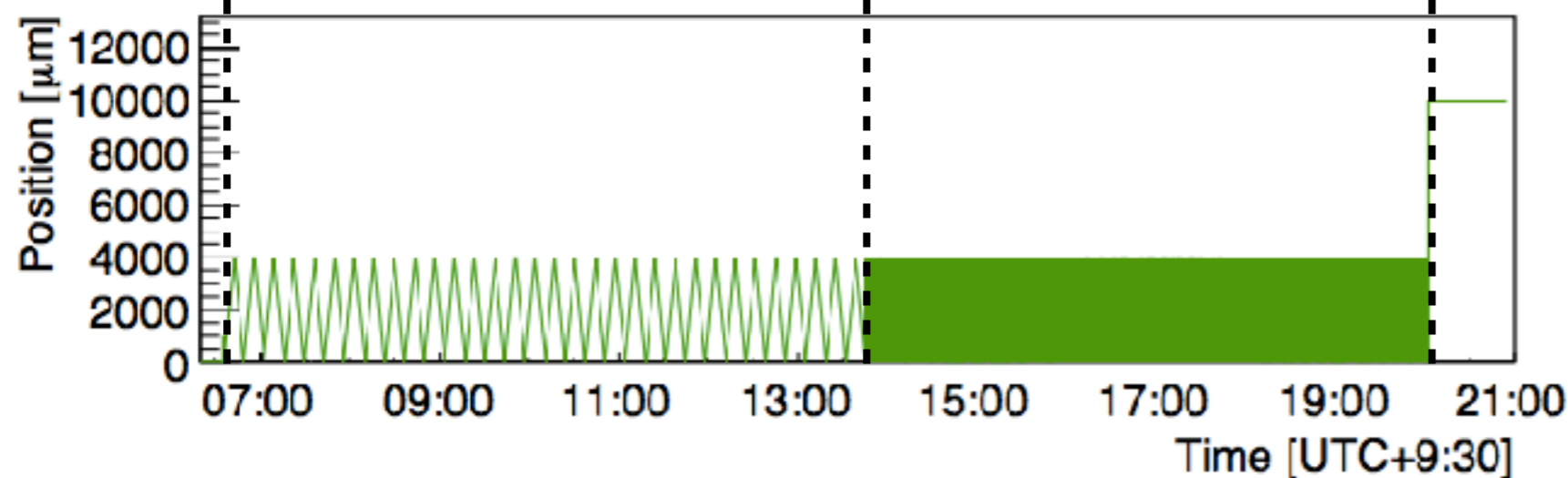
# GRAINE2015 シフターオペレーション



mode	step	時間分解
non-Vela	--	7.2h
Vela	310μm	18.8min

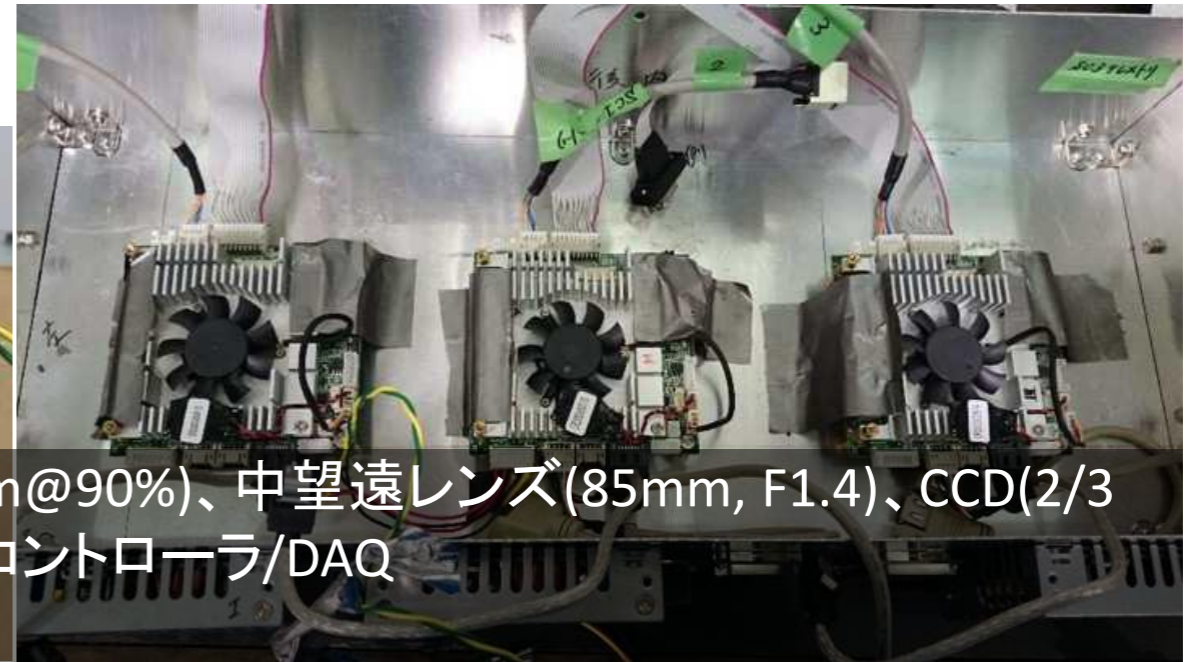


mode	step	時間分解
non-Vela	160μm	6.7min
Vela	80μm	9sec



mode	速度	分解能
non-Vela	10μm/s	~0.5sec
Vela	500μm/s	~0.01sec

# 姿勢モニター スターカメラ



## ✓2015年気球実験回収後の動作・性能試験

- 結像性能(0.012deg)、感度(~7等級)を確認

## ✓復旧可能なシステムを構築

- 電源接続/切り離し、システム起動/シャットダウン、リセット、システム/ストレージのディスク分離、ストレージディスク冗長化

## ✓長時間運転試験

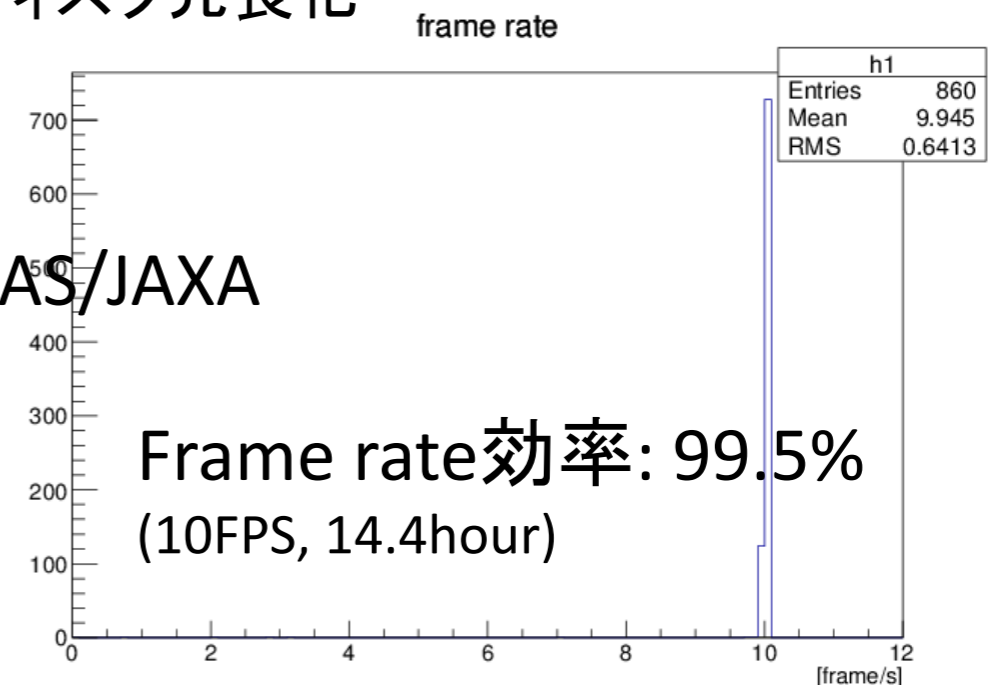
## ✓低温低圧長時間運転試験

w/大気球実験室恒温恒圧槽 @ISAS/JAXA

- 44時間連続運転を達成

- ゴンドラ実装(9 - 10月)

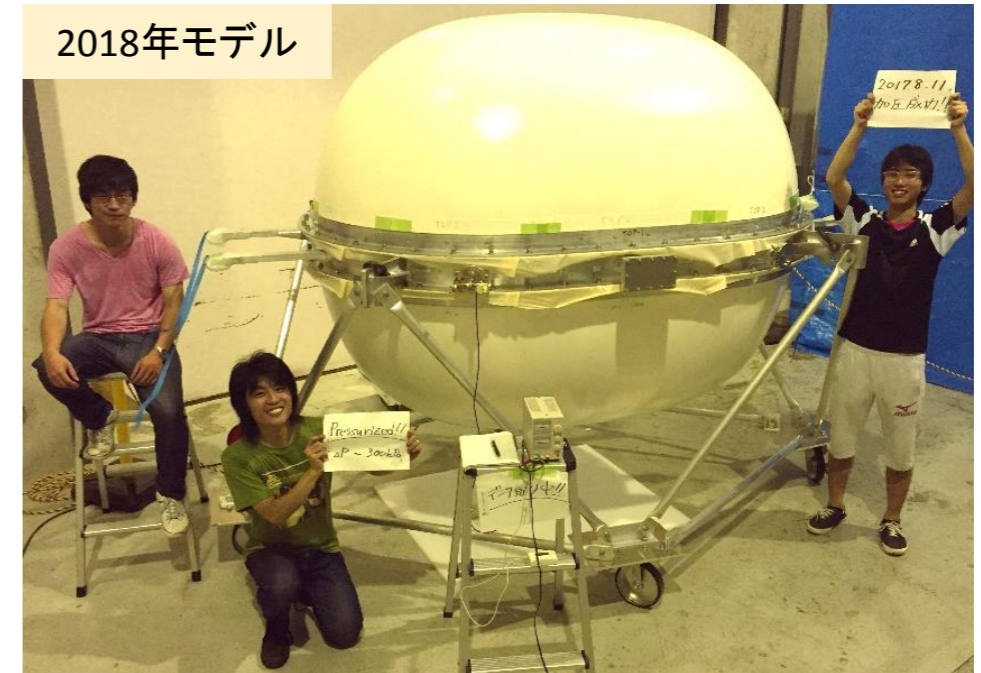
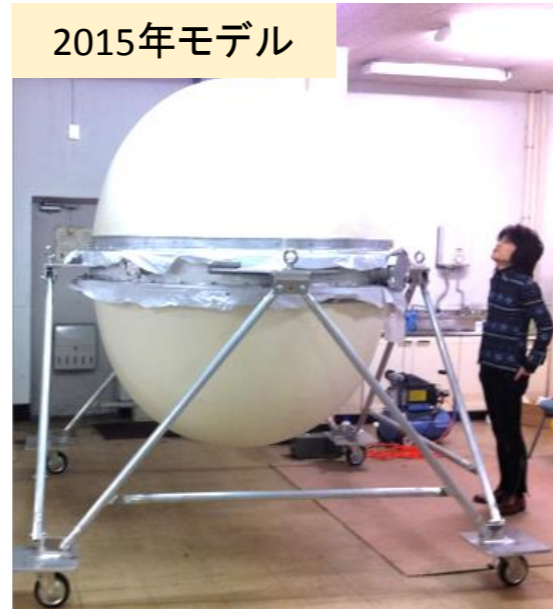
- 大気球機器とのかみ合わせ(10月)



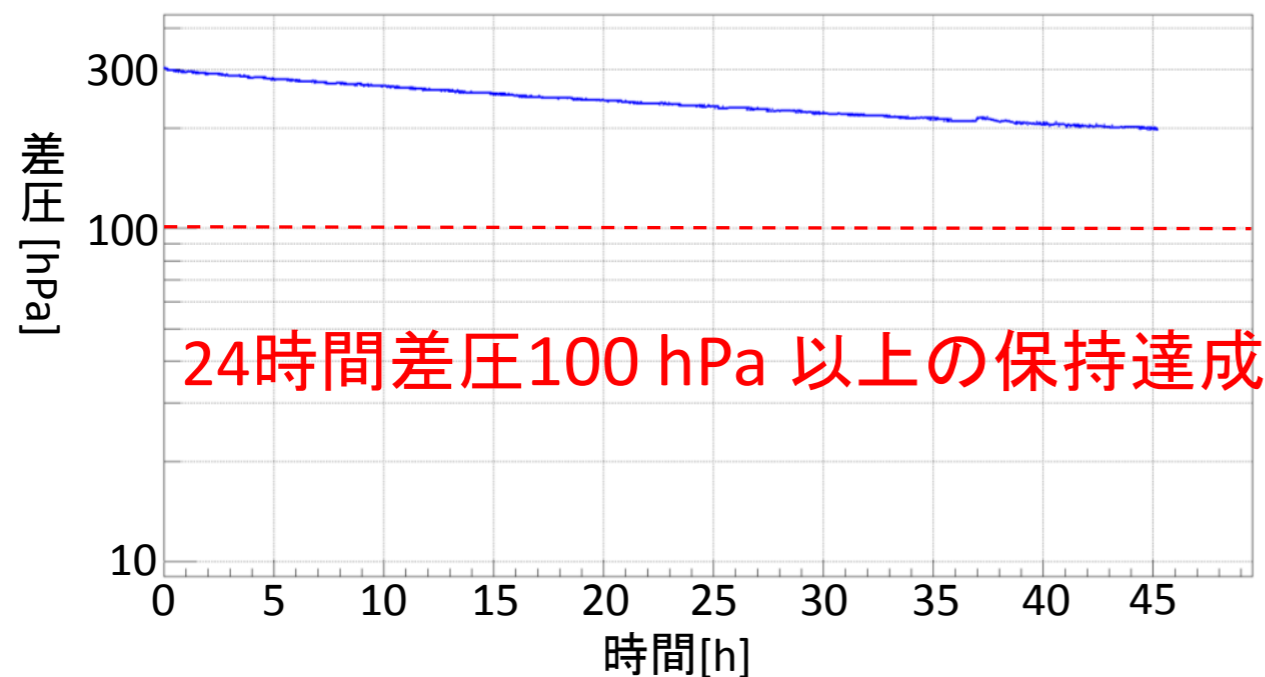
# 与圧容器ゴンドラ

## 球から繭へ

- ☆ 拡張性を持たせた繭型
- ☆ フレームの軽量化
- ☆ 膜材料の新規開発  
(強度、温度特性の向上)
- ☆ 長時間フライトに向けて  
環境性能を向上



## 気密性の確認



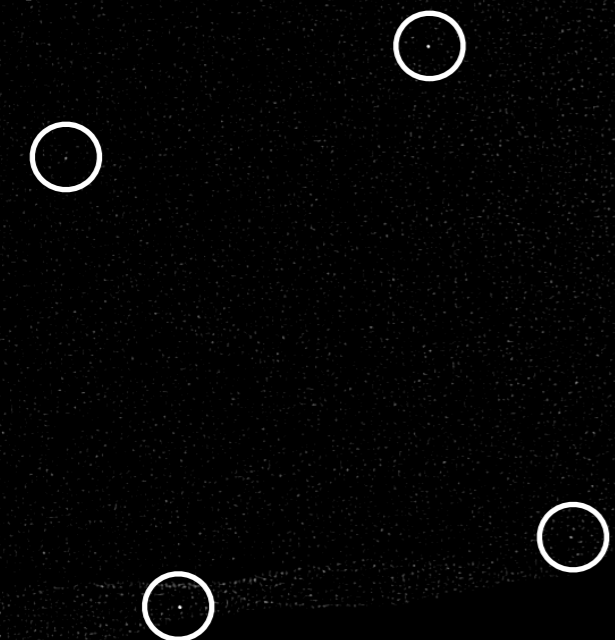
## 今後の予定

- 9月下旬 望遠鏡、スターカメラの  
マウント確認
- 10月上旬 低温環境での気密性の確認  
@宇宙研
- 11月 望遠鏡、スターカメラの  
アライメント測定/保証
- 年明け オーストラリアへ輸出

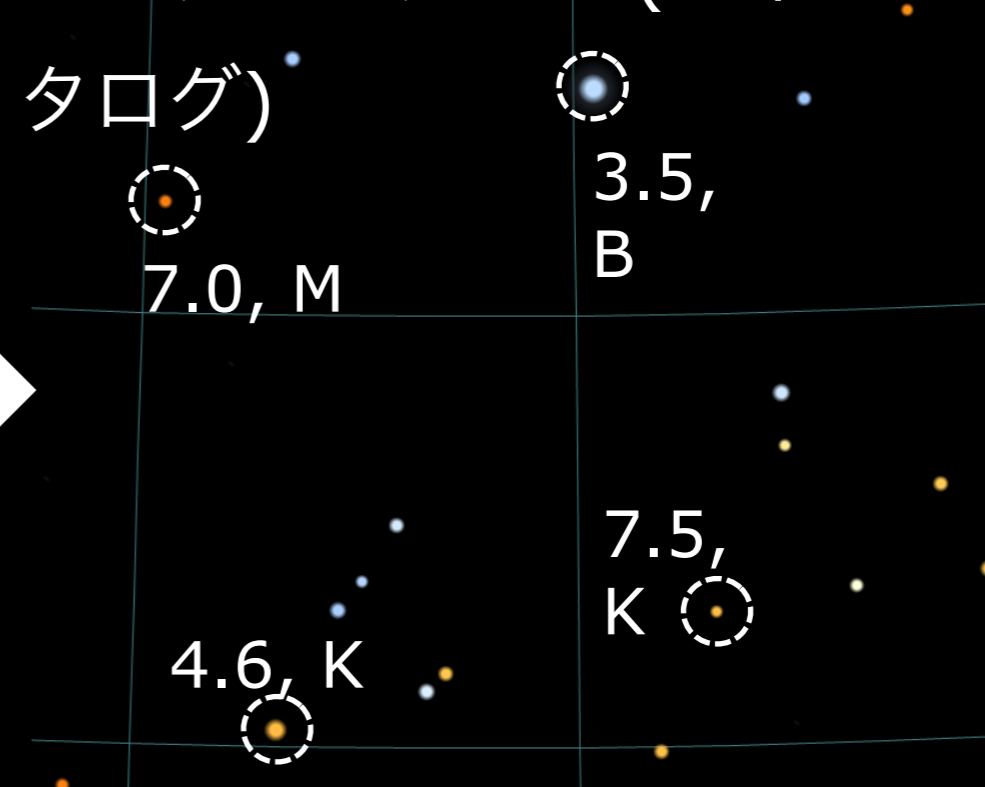
# パターンマッチ@16:26:43.79

▼SC3 画像処理

後



▼スターカタログ (ティコカタログ)



方位角：150.444度±0.002度

(=0.03mrad)

仰角：47.799度±0.001度

(=0.02mrad)

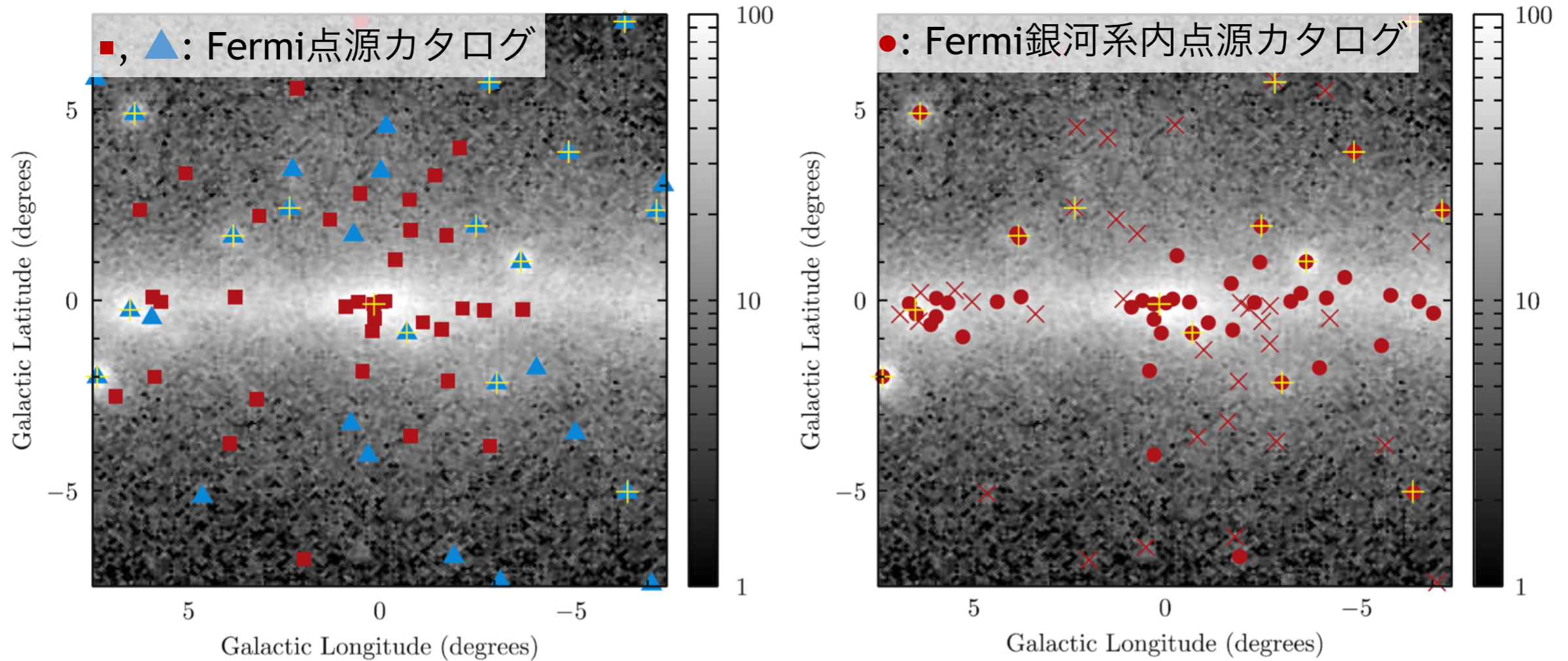
# 国際情勢 (sub-GeV – GeV mission)

	Fermi-LAT	GRAINE	eASTROGAM	ComPair	HARPO
Converter & Tracker	W (0.03/0.18Xo) & SSD	Emulsion	両面読みSSD	両面読みSSD	ガスTPC
Energy Range	20 MeV – 300 GeV	10 MeV – 100 GeV	10 MeV – 3 GeV (pair)	10 MeV – 0.5 GeV(pair)	MeV – GeV
角度分解能 @100MeV	6.0°	1.0°	1.5° (requirement)	1.5°	0.4°
角度分解能 @1GeV	0.9°	0.1°	0.2° (requirement)		
偏光感度		有り			有り
有感面積	1.96m <sup>2</sup> (有効面積0.25m <sup>2</sup> @100MeV)	10m <sup>2</sup> (有効面積2.1m <sup>2</sup> @100MeV)	0.9m <sup>2</sup>	0.9m <sup>2</sup>	未定 (有効面積0.03m <sup>2</sup> w/ 10kg Ar)
観測開始	2008	2021	未定 (早くて2029)	未定	未定
打ち上げ	NASA	JAXA (気球)	ESA?	NASA?	未定

原子核乾板技術でのみ実現可能



# 銀河中心領域におけるカタログソースの変遷



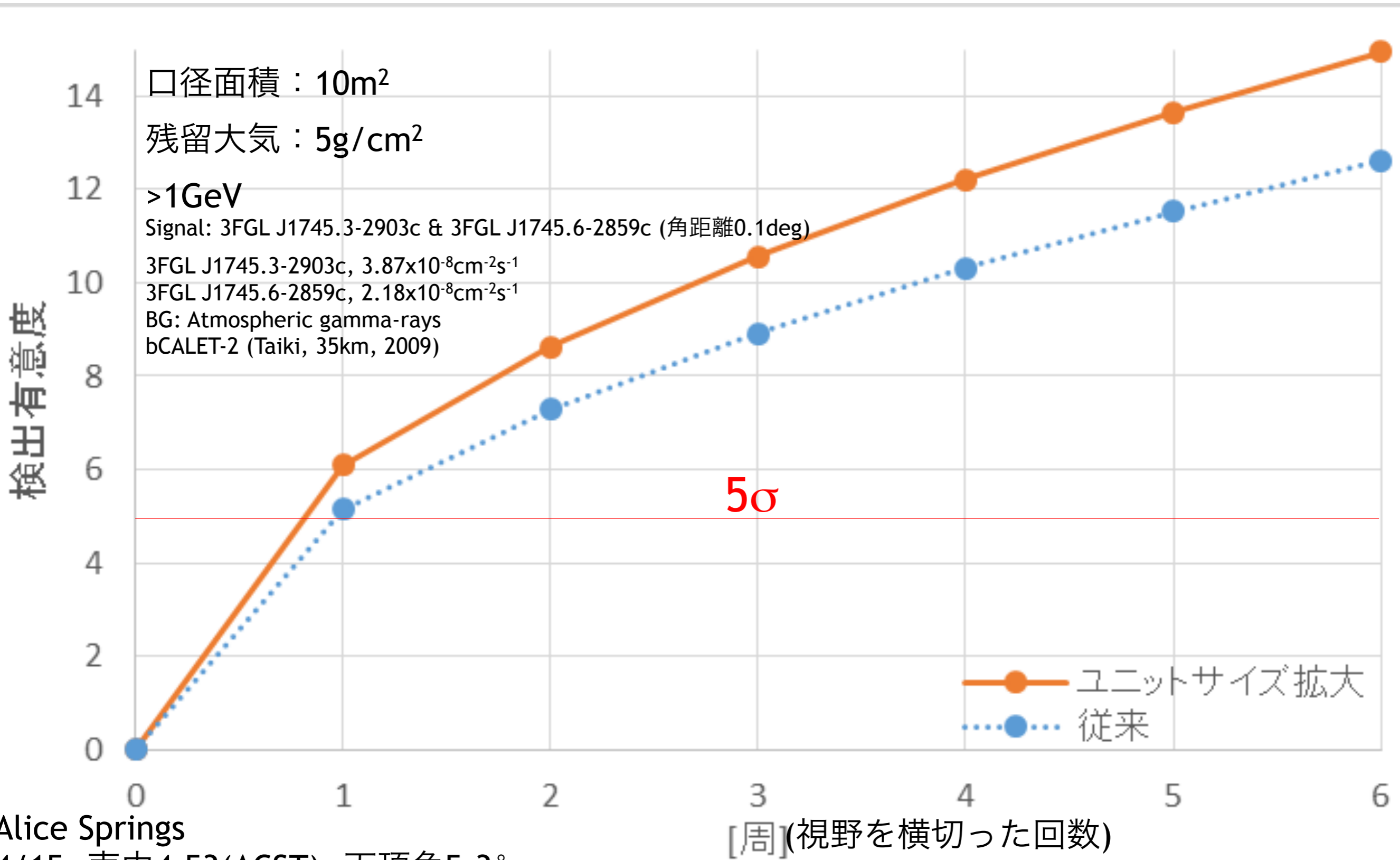
**Figure 7.** Point sources for 3FGL (left panel) and 1FIG (right panel, for Pulsars intensity-scaled IEM) overlaid on the total counts for the  $15^\circ \times 15^\circ$  region about the GC. Left panel symbol key: filled squares, “flagged” 3FGL sources; filled triangles, other 3FGL sources; upright crosses, 3FGL sources with a multi-wavelength association. Right panel symbol key: filled circles, 1FIG sources with  $TS \geq 25$ ; angled crosses, 1FIG source candidates with  $TS < 25$ ; upright crosses, as in left panel. Color scale is in counts per  $0.05^2$  degree pixel.

**FERMI-LAT OBSERVATIONS OF HIGH-ENERGY  $\gamma$ -RAY EMISSION TOWARD THE GALACTIC CENTER,**  
M. Ajello et al., ApJ 819 (2016)

- カタログごとにガンマ線源が変遷
- 銀河面放射モデルに依存
- **高角度分解能によって、モデルに依存しないガンマ線源の直接検出が可能**

# 銀河中心 検出感度

$$n_{\sigma} = \frac{N_s}{\sqrt{N_{BG}}}$$



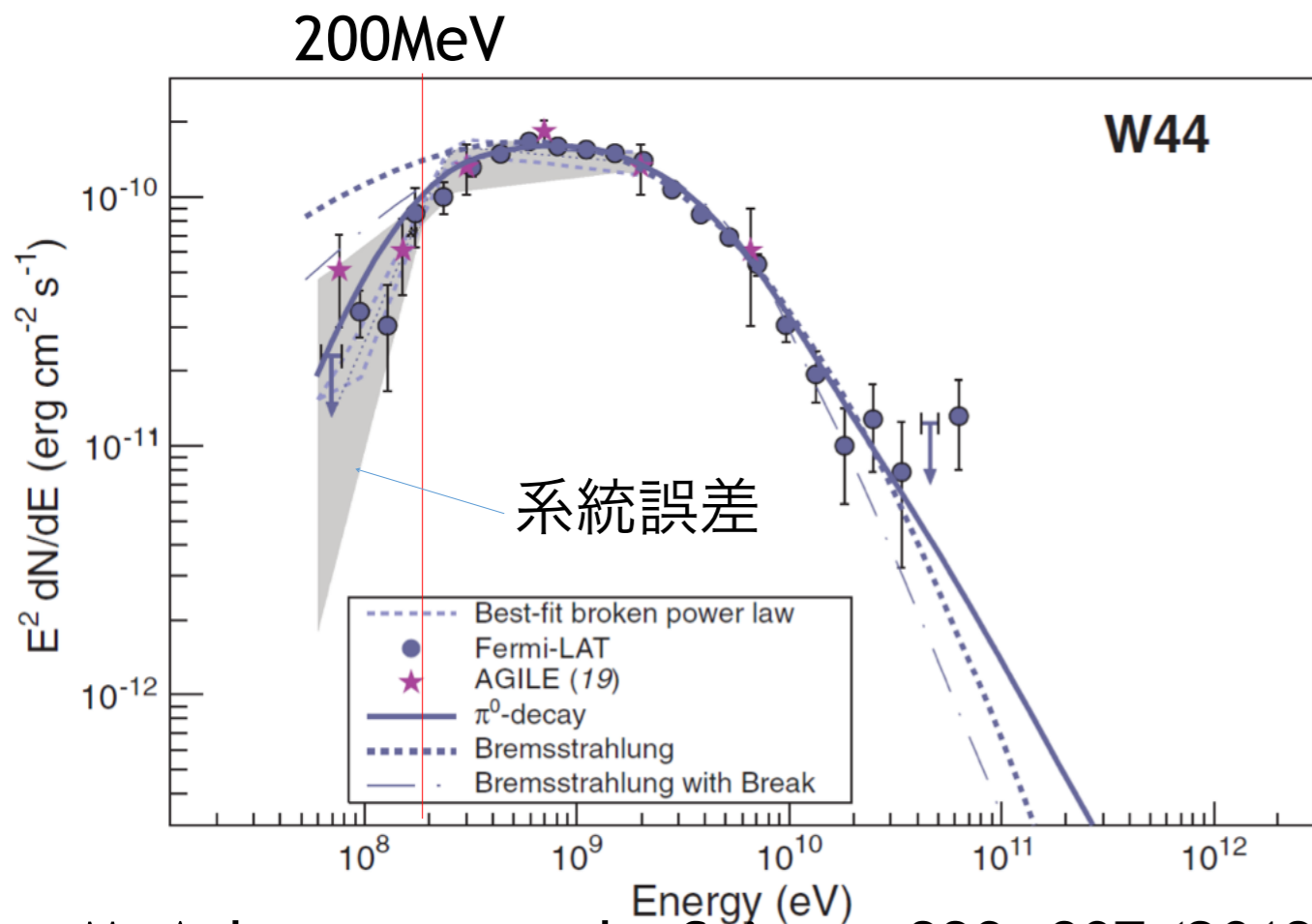
Alice Springs  
 4/15, 南中4:53(ACST), 天頂角5.3°  
 天頂角45度内1:31 - 8:16(6.75h/周)

N<sub>signal</sub>=132, N<sub>BG</sub>=78 @6周

# $\pi^0$ 放射：

## 陽子加速の直接証拠

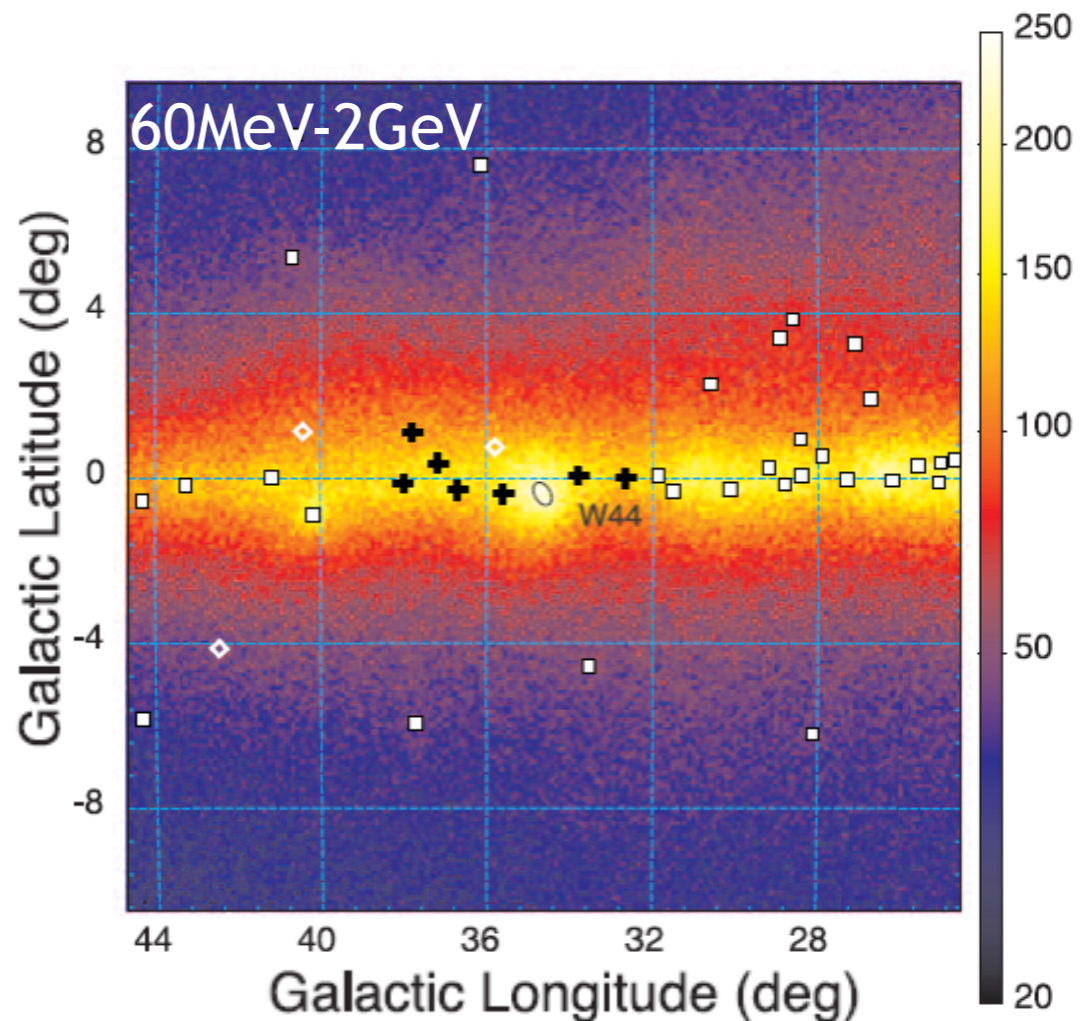
超新星残骸



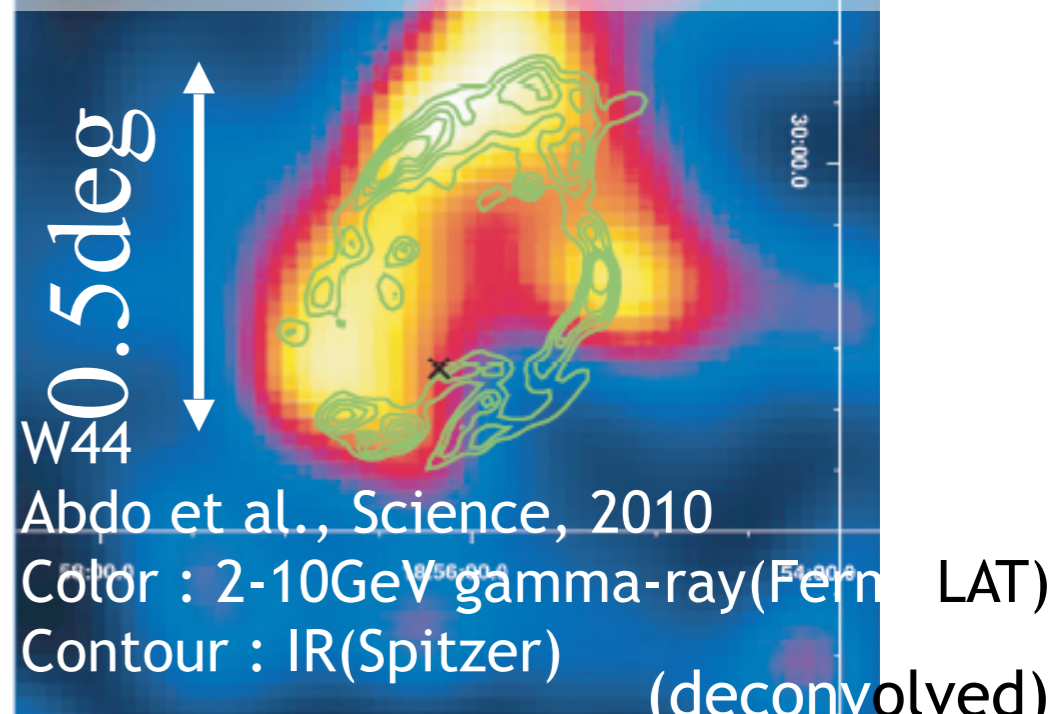
M. Ackermann et al., Science 339, 807 (2013)

200MeV以下での系統誤差を抑えた  
スペクトル測定

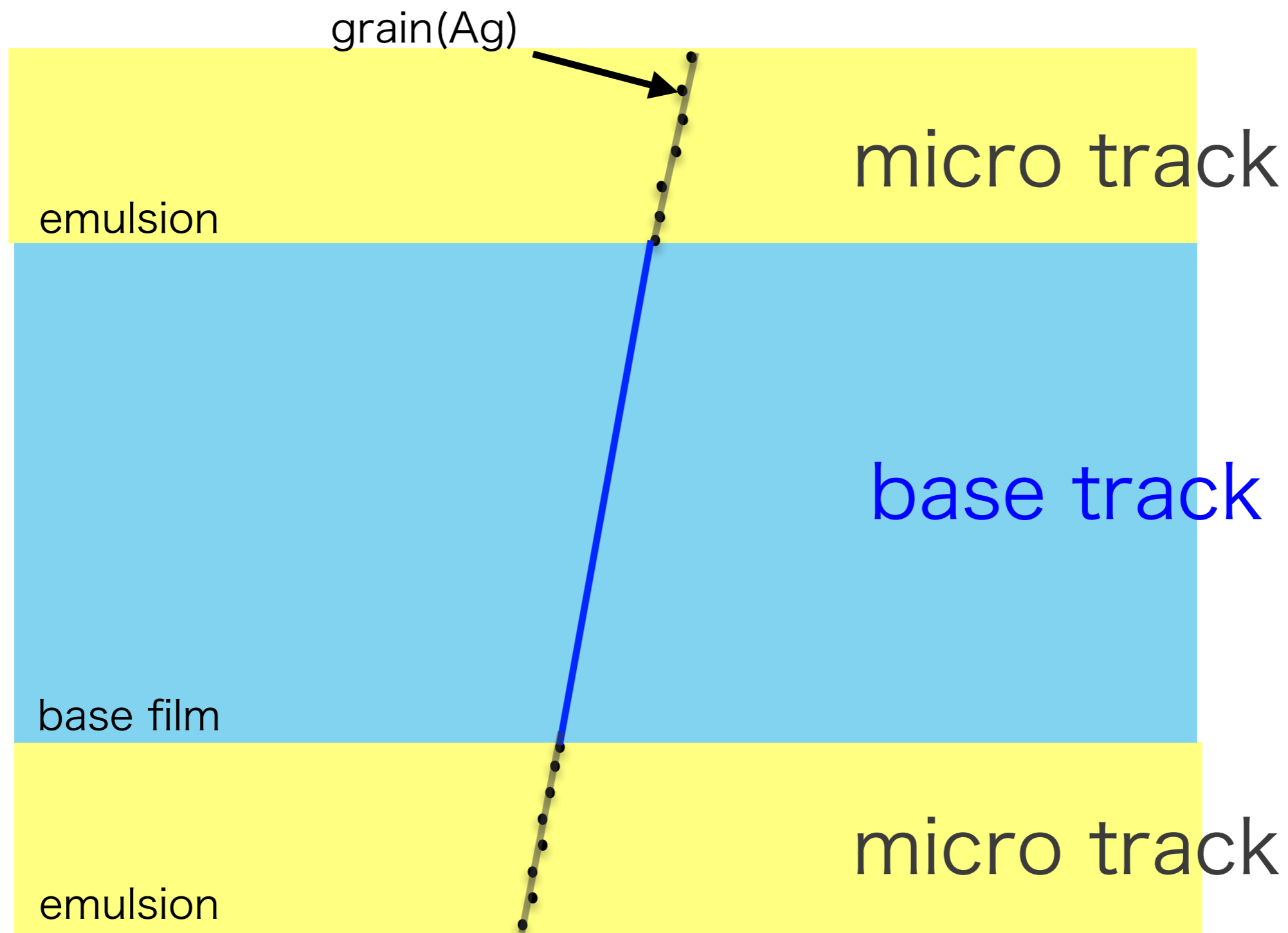
200MeV以上での空間構造の解明



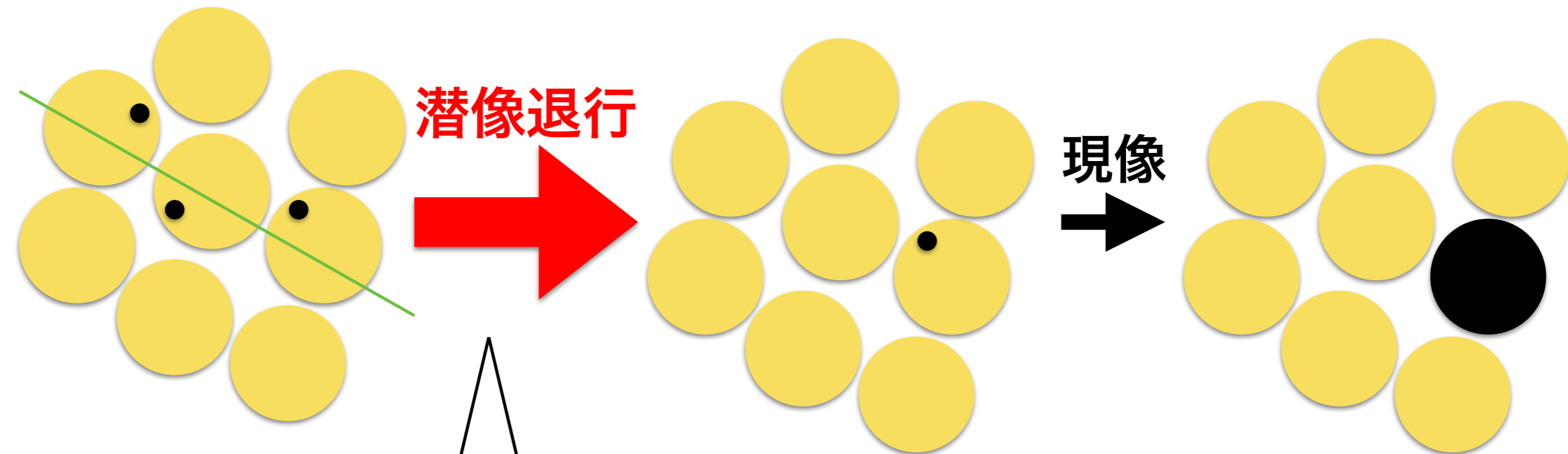
空間構造：  
放射機構に迫る



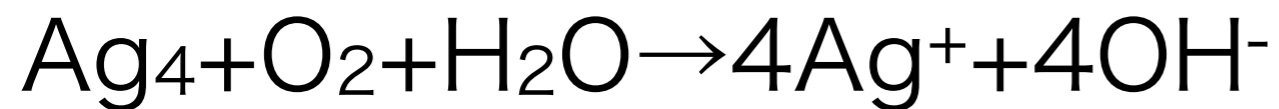
# ベーストラック



# 潜像退行(フェーディング)

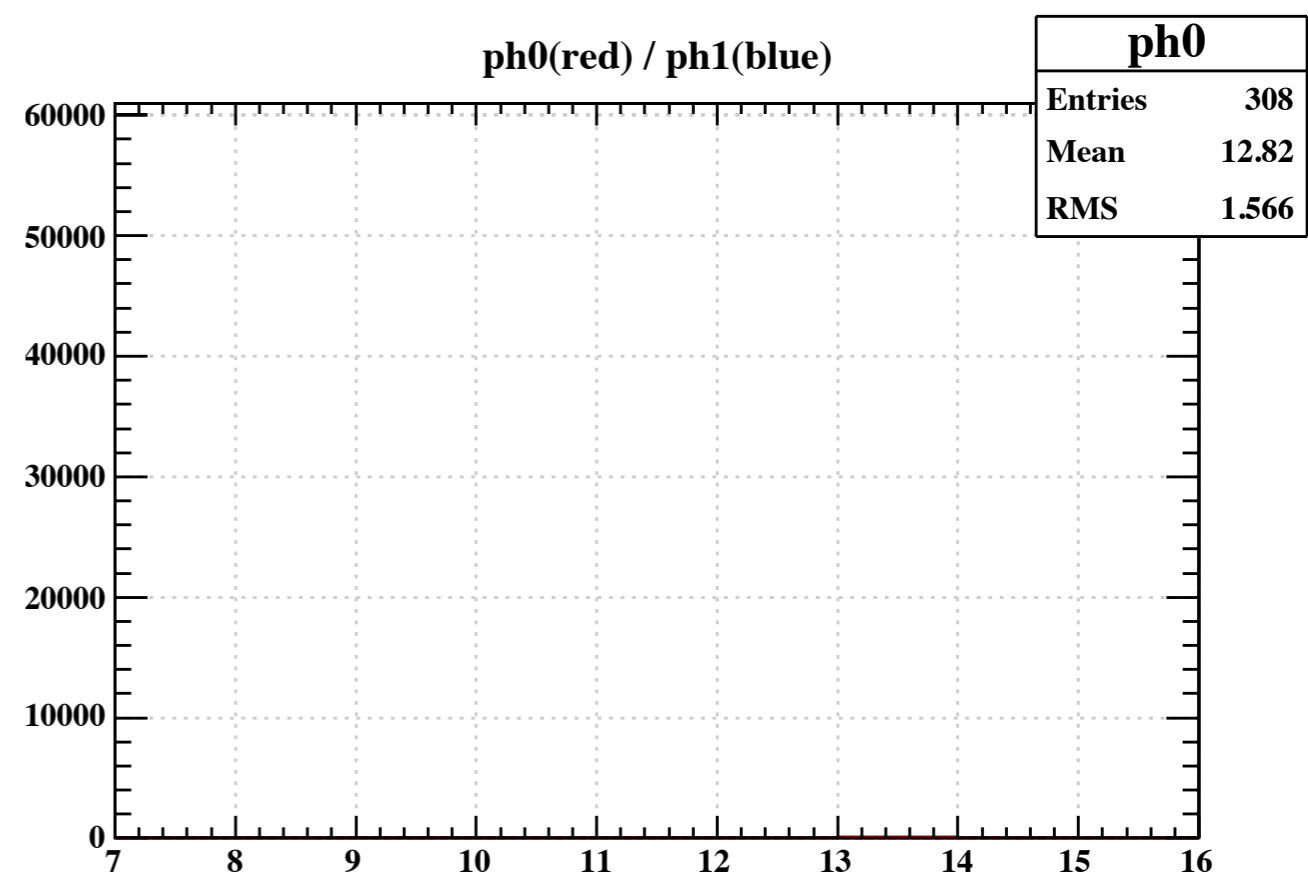
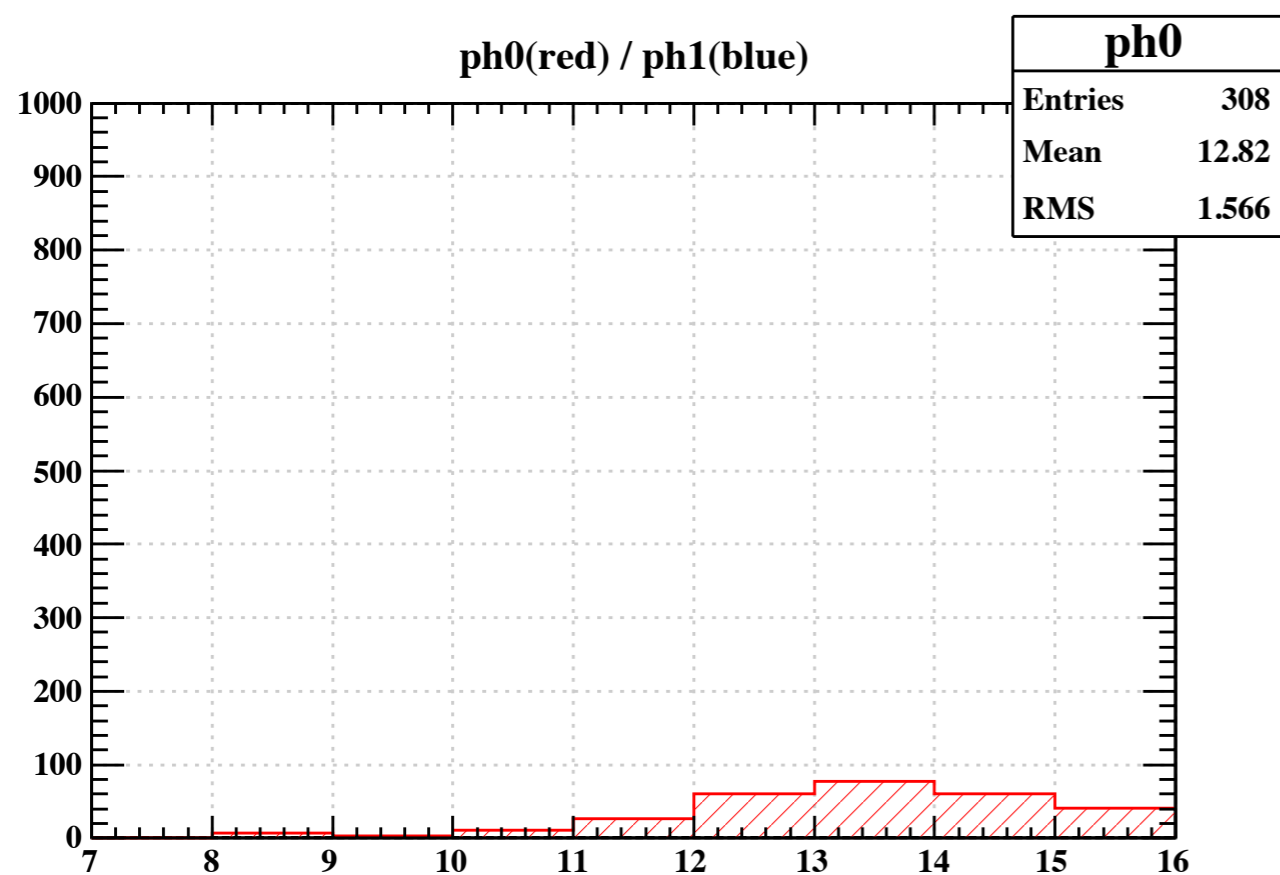
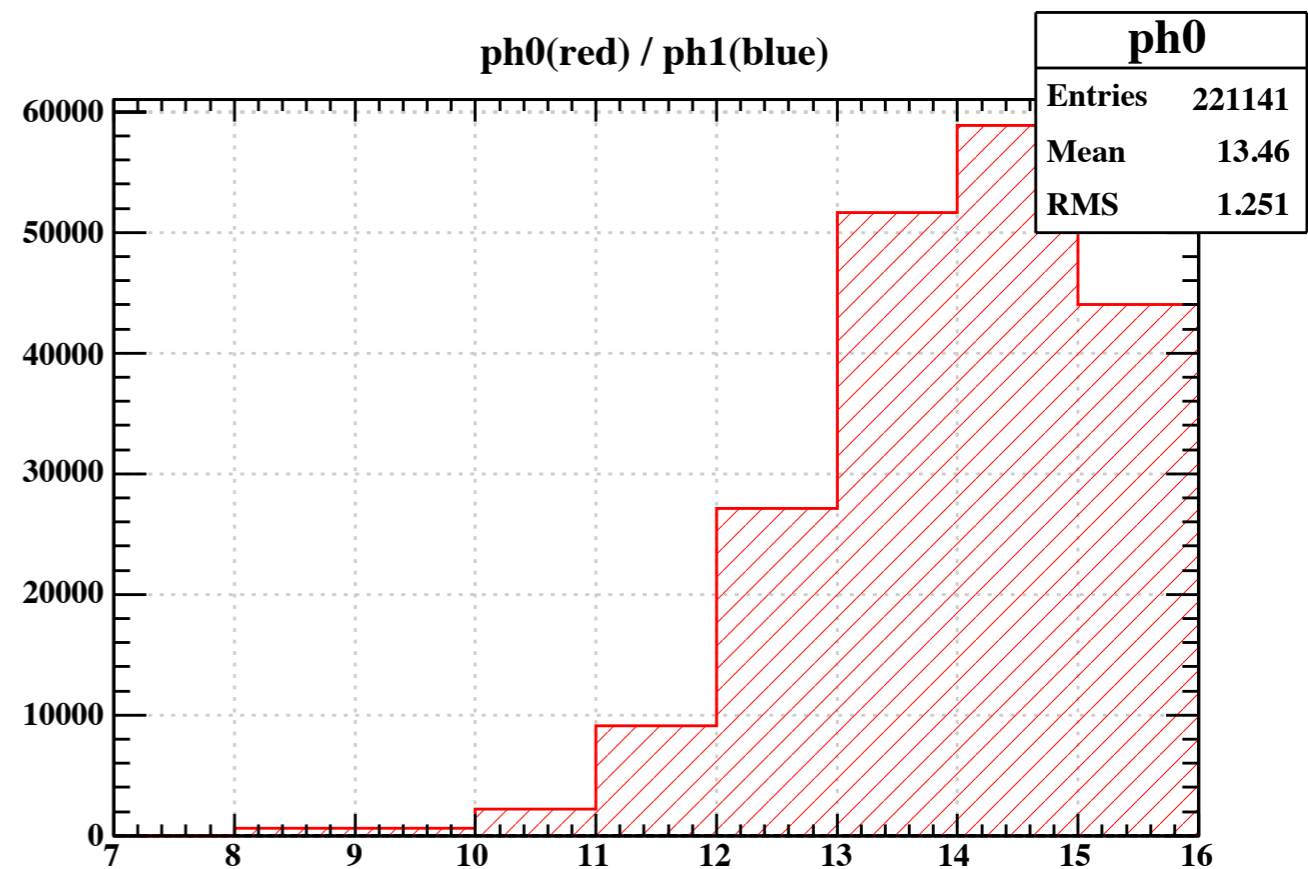


現像までに潜像が酸化作用で消えてしまう現象

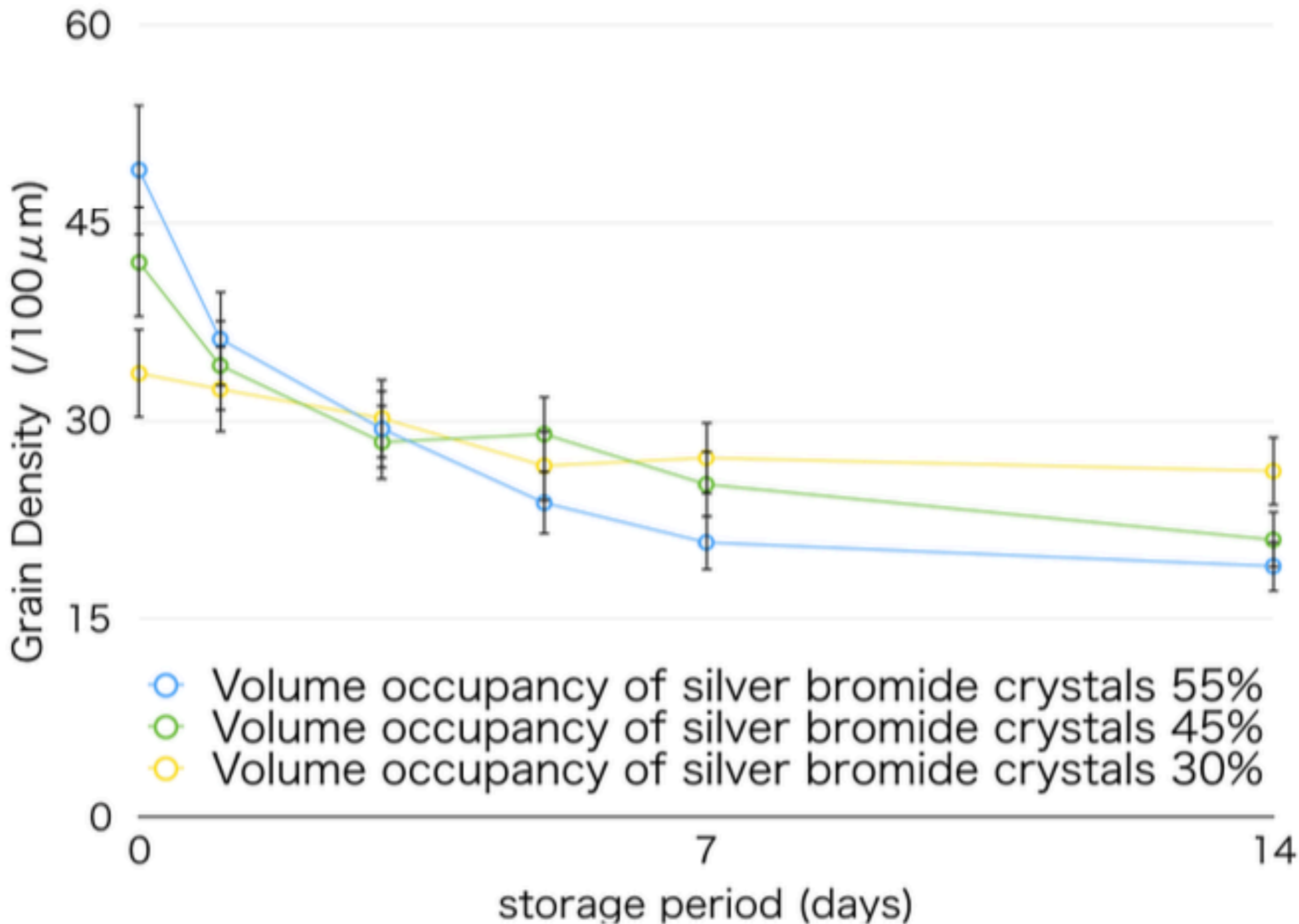


高温 & 水分含有量が多いほど起こりやすい

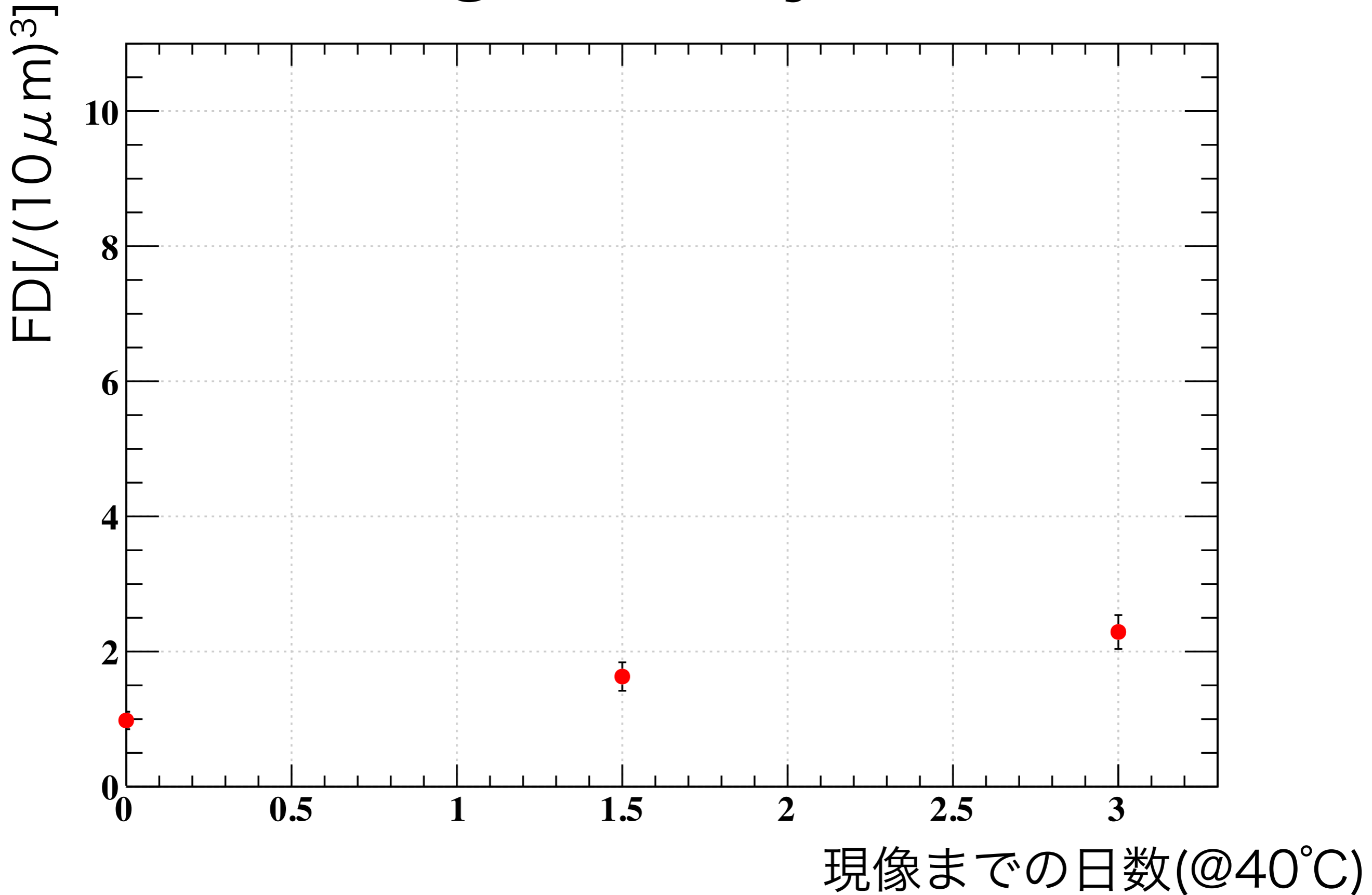
# ph分布のS/N比



# AgBr体積充填率と潜像退行特性

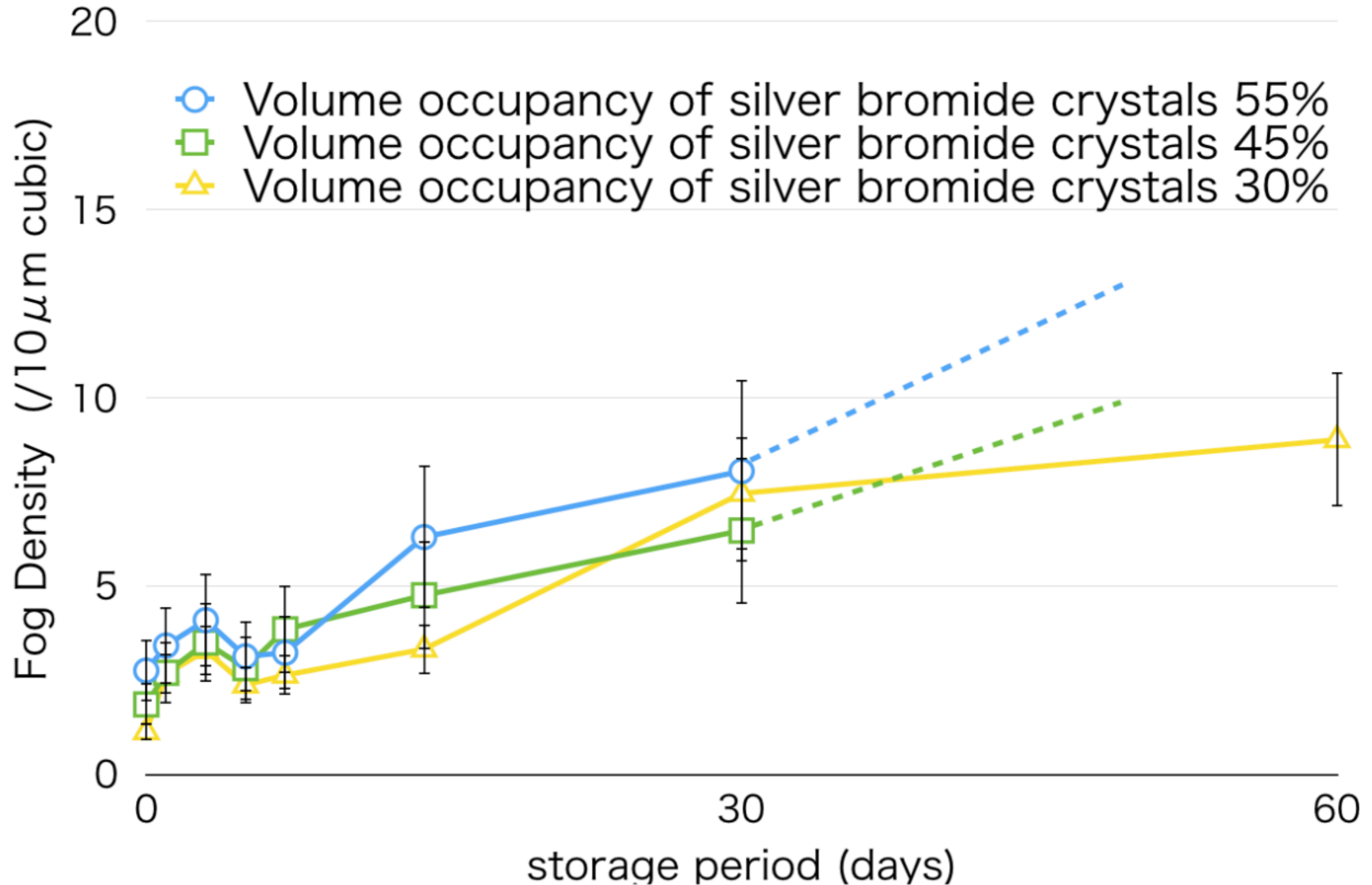


# FogDensity評価



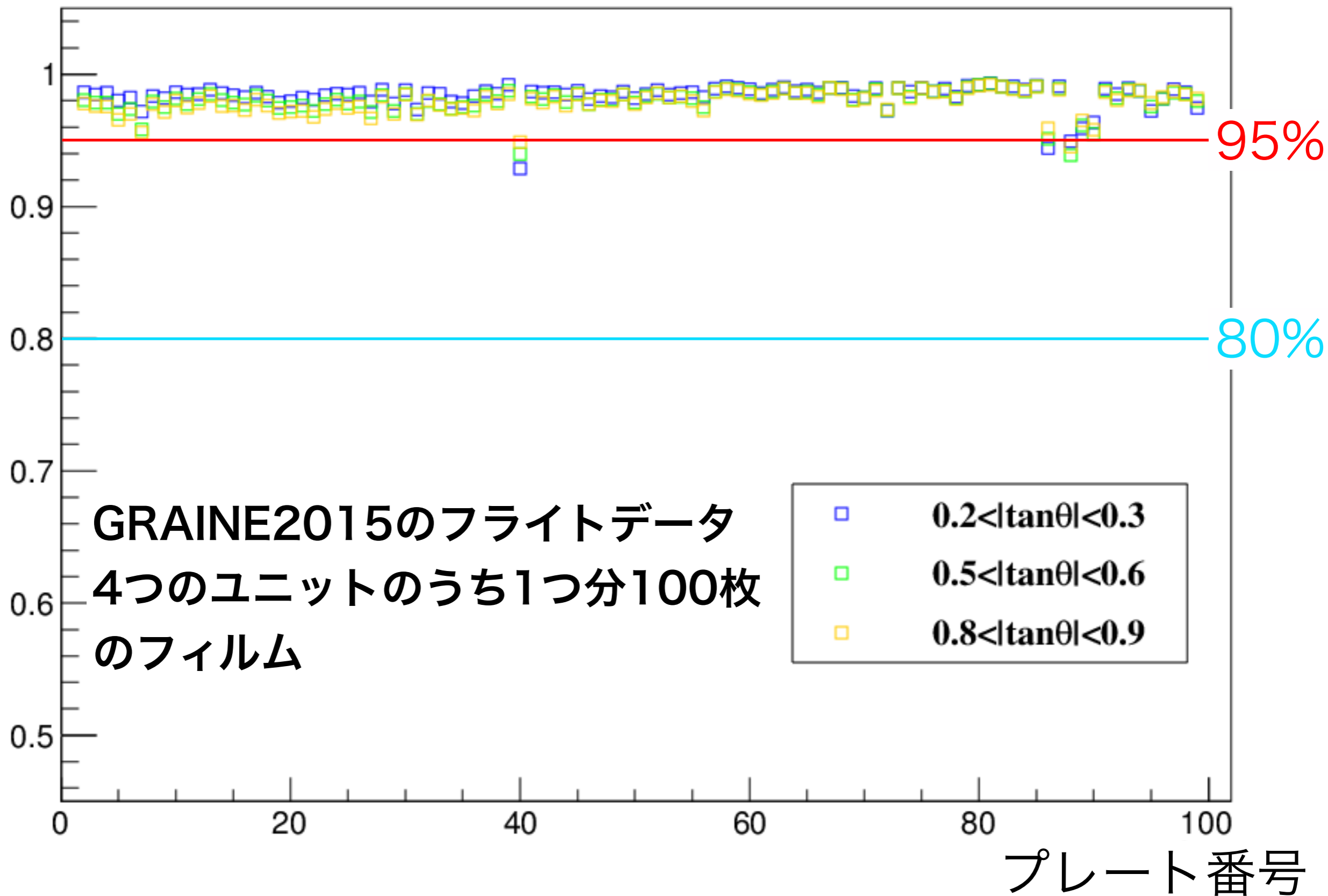


# AgBr体積充填率と Fog 増加の相関



# フィルム毎の検出効率

飛跡検出効率



Thermo Recorder TR-71wt  
12.8°C

TMD  
Suzuki

EYELA  
PERSONAL INCUBATOR SLIM D

HEATING

C

TEMP. CONTROLLER

SET  
MEAS.  
LOW HIGH  
PUSH

POWER

ON  
OFF



# 恒温槽温度ログ

