

第2回 新学術「地下宇宙」若手研究会
2021/11/25 – 2021/11/26 @神戸大学

方向に感度を持つ エマルジョン暗黒物質探索実験の為の 高速自動飛跡読み取り装置開発

名古屋大学 理学研究科

小林龍太 ; KOBAYASH RYUTA

Nuclear Emulsions for WIMP Search

– directional measurement

“方向感度を持った”暗黒物質直接探索実験

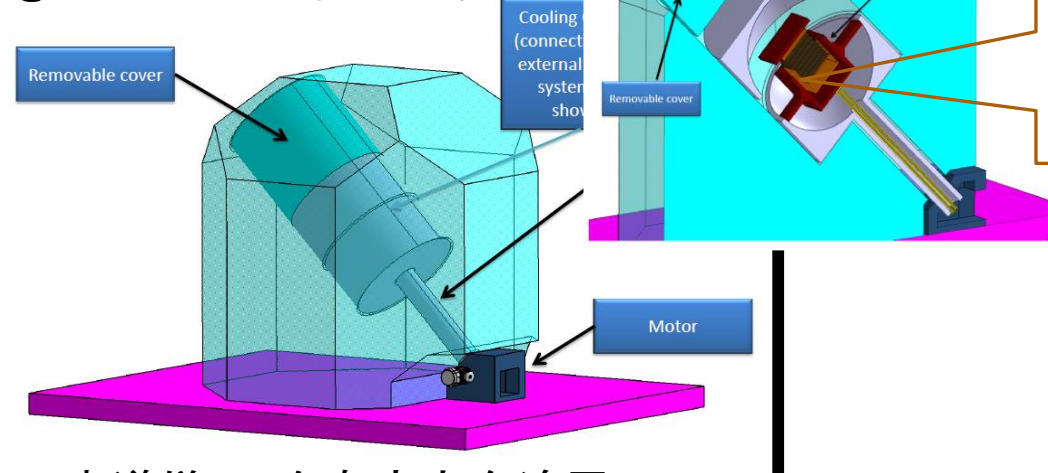
太陽系の公転方向に特徴づけられる暗黒物質の到来方向を捉える！！

白鳥座

WIMPS

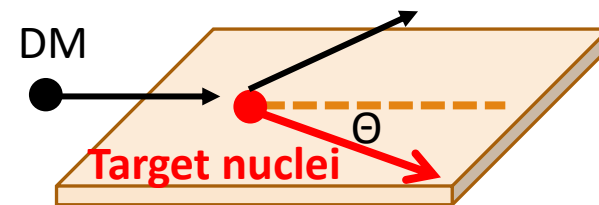
実験サイト

@ グランサツソ国立研究所

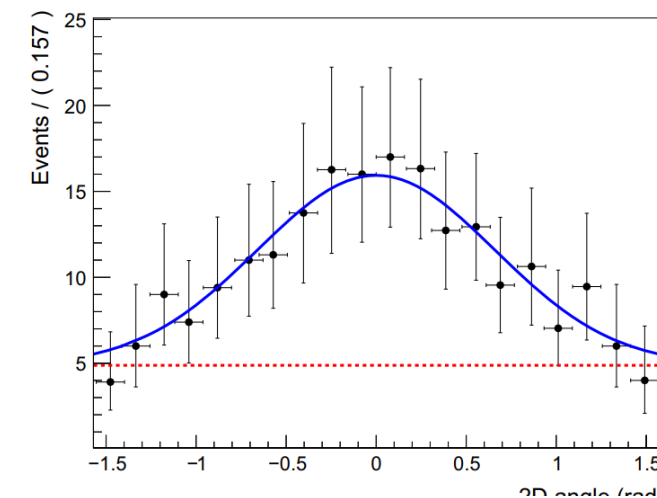


- ・赤道儀 : 白鳥座方向追尾
- ・冷凍機 : BG抑制 & 長期特性向上
- ・シールド : BG抑制

<検出器> 超微粒子原子核乾板 : NIT



信号の期待される角度分布



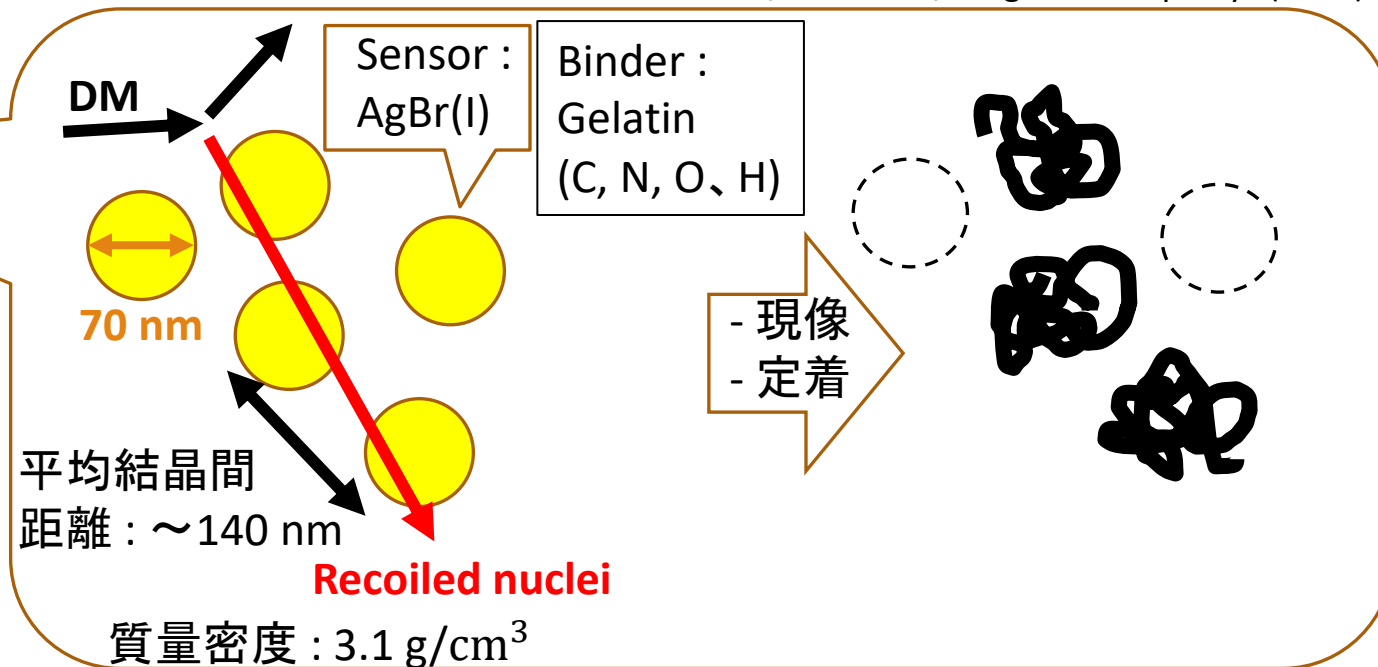
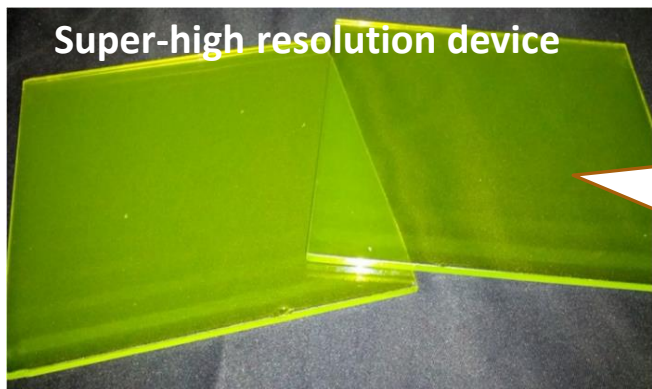
N. Agfanova *et al.* (NEWSdm collaboration)
Eur. Phys. J. C (2018) 78: 578

DAMA領域 (特に Na領域) についての方向情報を用いた検証
10 kg・yearスケールの実験実現を目指す

検出器 ~ Nano Imaging Tracker ~

T. Naka et al., Nucl. Inst. Meth. A 718 (2013) 519-521

T. Asada, T. Naka + , Prog Theor Exp Phys (2017) 2017 (6): 063H01



NITの組成比

	Mass (%)
Ag	41.5
Br	29.7
I	1.9
C	12.3
H	1.8
N	3.7
O	9.2

NITによって Sub-umスケールの飛跡の記録が可能に
→ 解析には記録された飛跡情報の取得が必要不可欠

$M_{DM} = 10 \text{ GeV}/c^2$ 付近を狙える
C,N,O targetを中心に
NIT応答理解を進めている

自動飛跡読み取り装置 Post Track Selector

NIT全体積に含まれる飛跡情報の高速読み出しを目的として開発

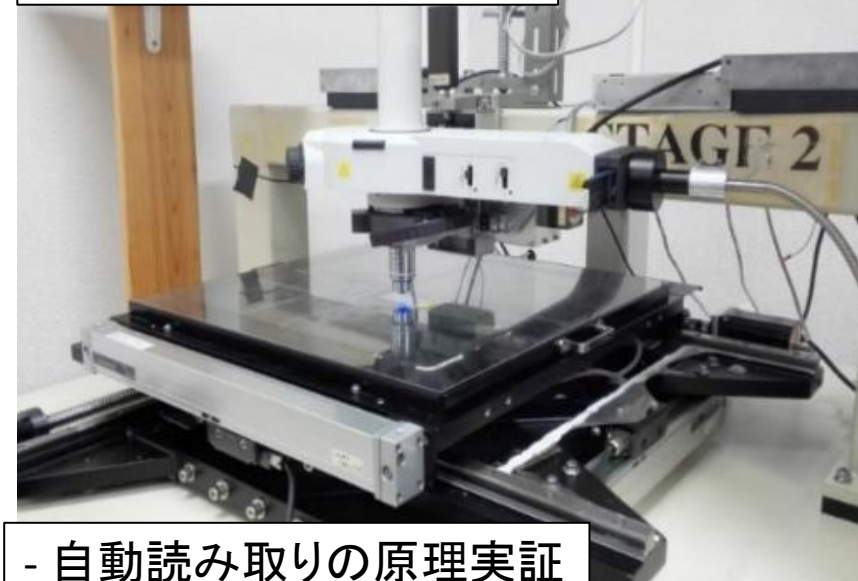
Sub-umの飛跡情報を読み出す為の光学系

- 高倍率・高分解能
- 落射光学系

+ カメラ、モータの自動制御による高速な飛跡読取を目指す。

光学分解能 : 214 nm
pixel分解能 : 55 × 55 nm

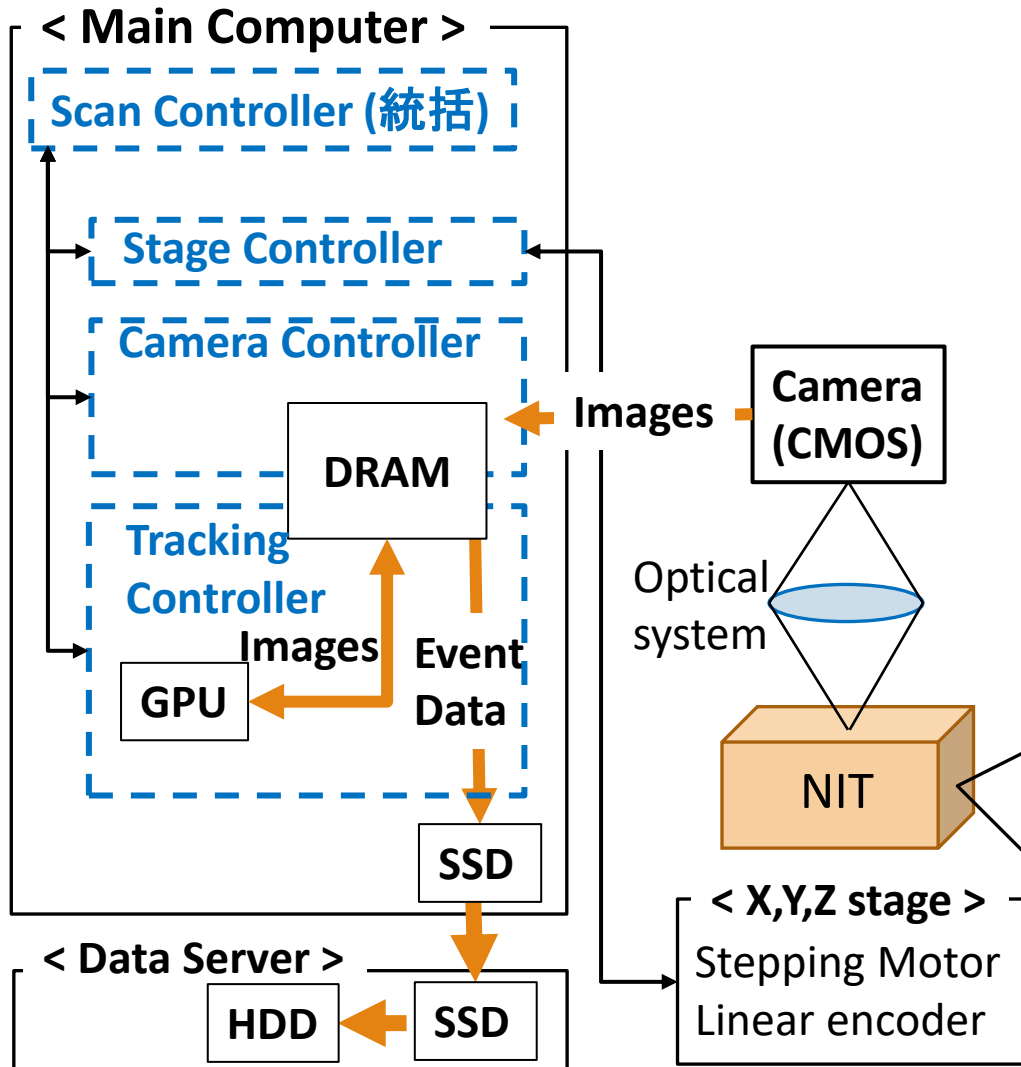
PTS2 (@名古屋大)



- 自動読み取りの原理実証
- ~1 g scale 解析
- 地上実験スキャン

T. Katsuragawa et al., JINST, 12, 04, T04002 (2017).

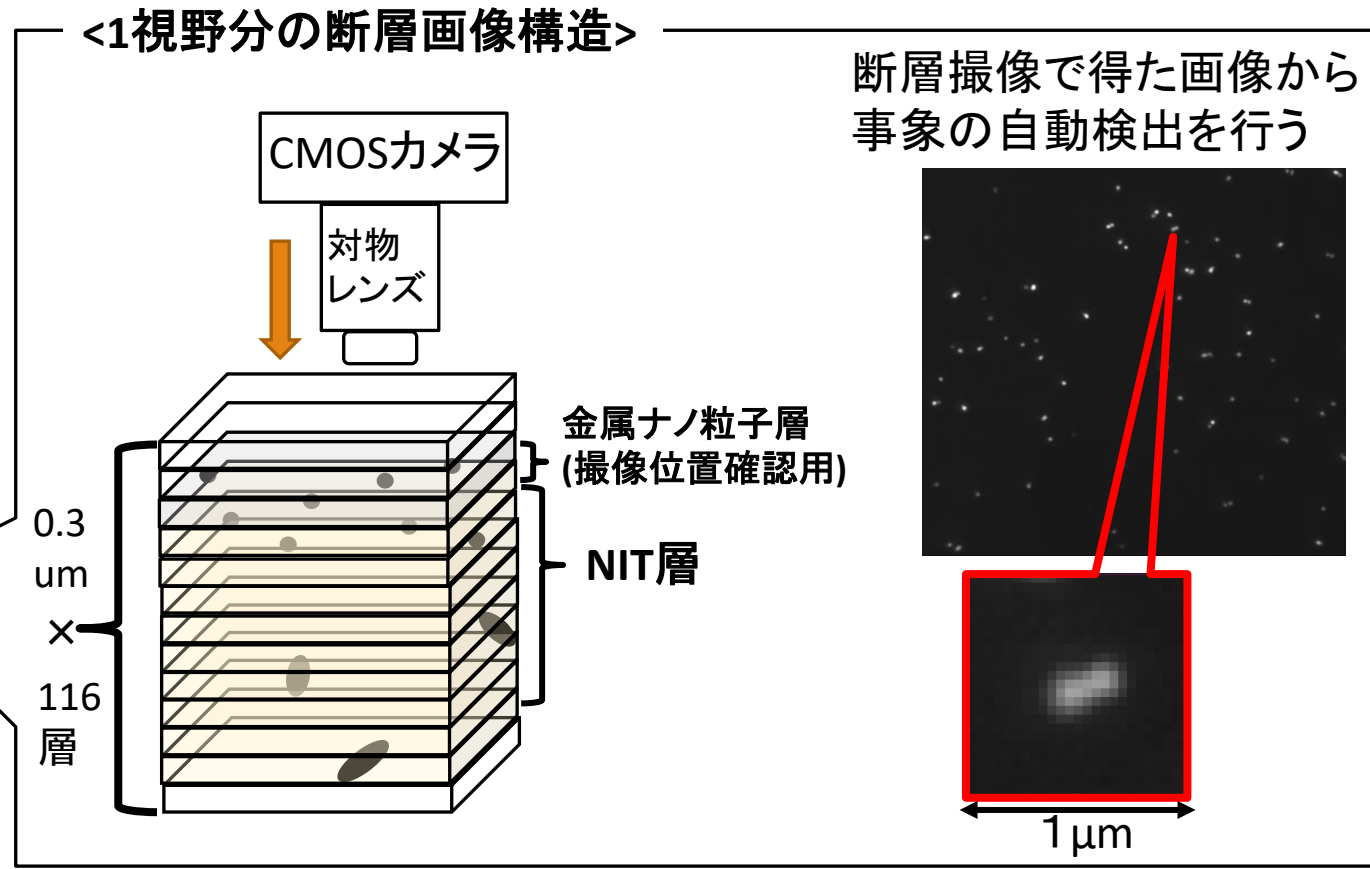
PTS's DAQ system



<Point!>
Scan Controllerで各種コントローラ

- Stage (モーター、エンコーダによる位置制御)
- Camera (画像取得)
- Tracking (CPU、GPUでの画像処理)

を統合的に制御し、NIT中の3次元情報取得を実現



PTSで取得する情報

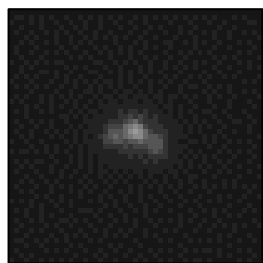
< 位置情報 >

- X,Y (55 nmピッチ, カメラpixel座標)
- Z (300 nmピッチ、断層画像数)

< 事象画像 >

(for マニュアルチェック, ML解析)

51 pixel * 51 pixel 画像 * 11枚
(best focus画像 ± 5 layer)

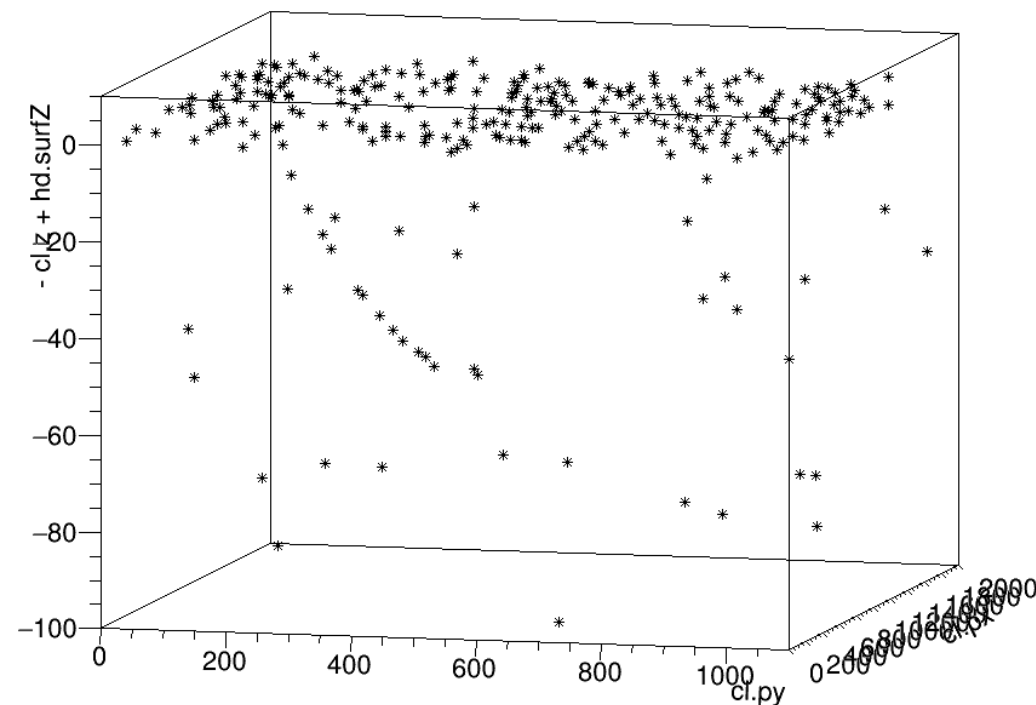


< 事象情報 >

- 輝度
- 飛跡情報
(飛跡らしさ、飛跡方向)

断層画像取得に由来するデフォーカスによるノイズも深さ方向へクラスタリングすることで排除

とある視野の3次元検出事象Map例



< ベストフォーカスセレクション >

(デフォーカス由来のノイズ画像除去)



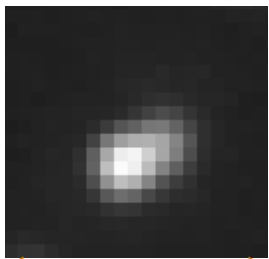
T. Katsuragawa et al., JINST, 12, 04, T04002 (2017). より引用

飛跡情報取得

<楕円形状解析>

光学像の形状から飛跡らしさを取得

100 keV C ion



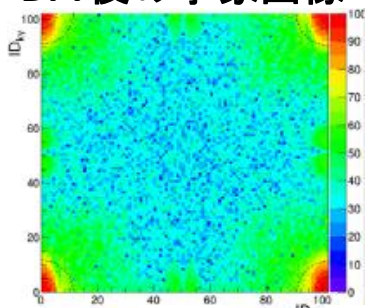
1 μm



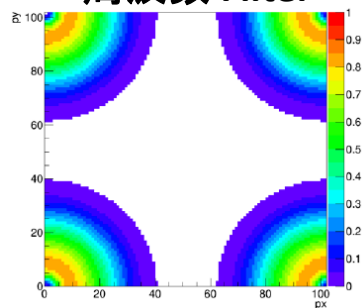
$$\text{楕円率} = \frac{\text{major}}{\text{minor}}$$

周波数空間での等方的な画像filtering処理

DFT後の事象画像



周波数 Filter



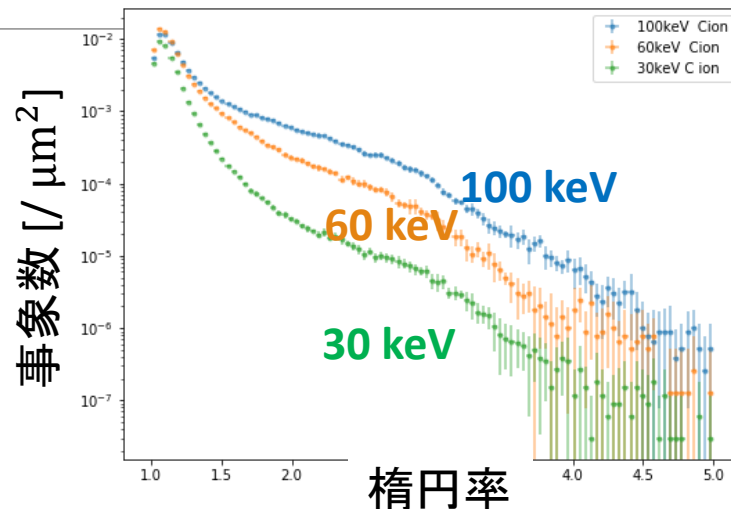
低 → 高 ← 低
x方向周波数成分

+ 輝度モーメントからの形状情報取得

M. Kimura and T. Naka, NIM A, **680** (2012) 12-17

A. Umemoto et al, PTEP, 2020, **10**, 103H02(2020)

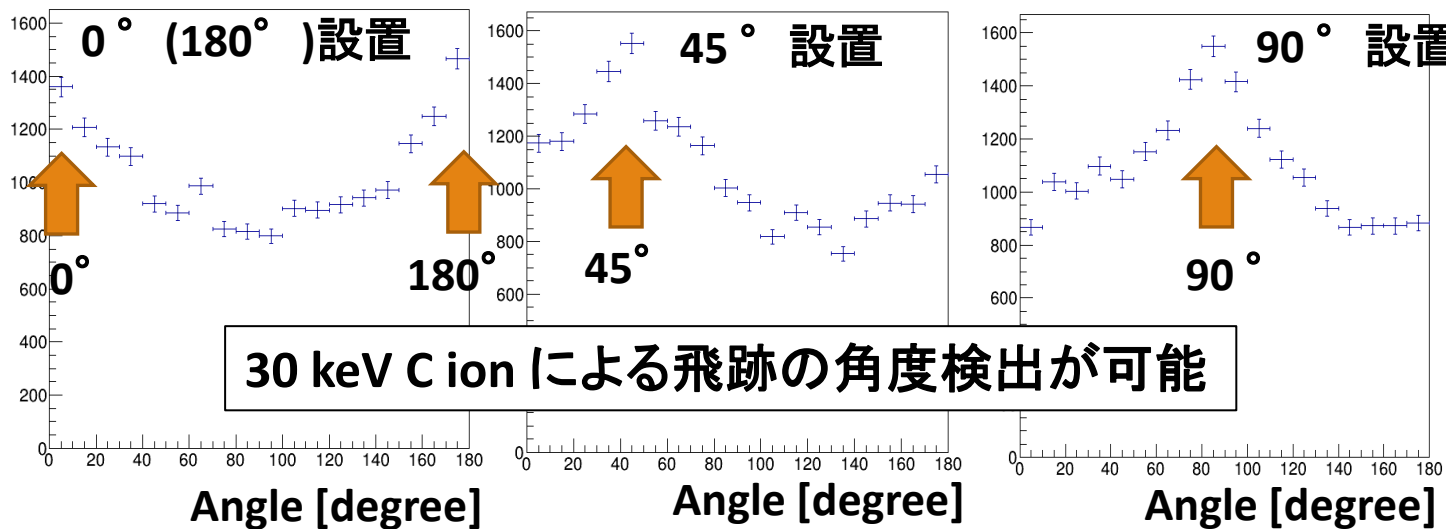
C ionエネルギーとellipticityの相関



楕円形状解析で
飛跡情報取得は
出来ている

30keV 炭素イオン サンプルでの設置角度と角度分布

↑ : 設置角



原理実証から実用化(大質量化)へ

PTS2の開発をもってNIT中のsub- μm スケール飛跡読み出しの原理実証が実現

< 現状の解析の流れ >

NITは蓄積型検出器

中の飛跡は半永久的に記録 -> 複数手法で多角的に解析可能

1stトリガー：全体積解析

PTS, 楕円形状解析



2ndトリガー以降：event Scan, 詳細解析

色、偏光 + ML等を活用した
超解像解析

PTSの読取速度は実験全体の解析可能量を
決定づける重要な要素

< PTSに要求される読み取り量 >

4000倍の違い

DAMA領域検証に必要な実験規模
10 kg・year

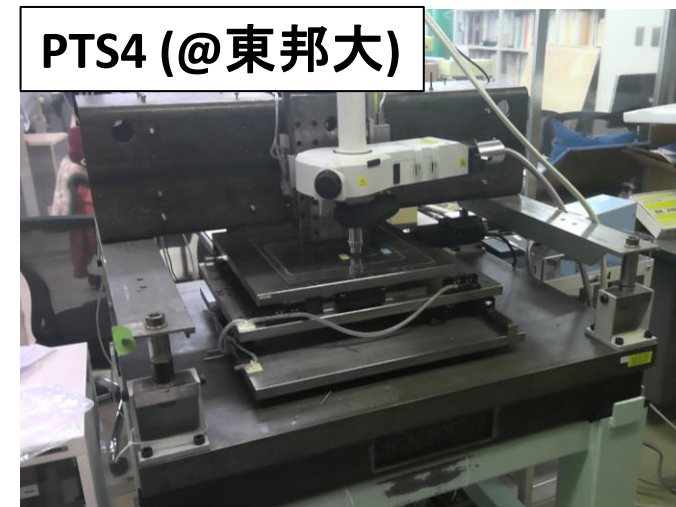
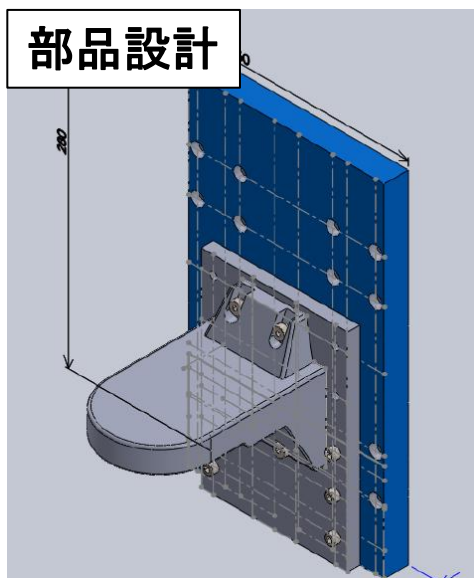


当初のPTS読み取り速度
年間 2.5g

実験規模拡大に向けてPTSの読取速度向上が必要不可欠

高速化に向けた装置開発

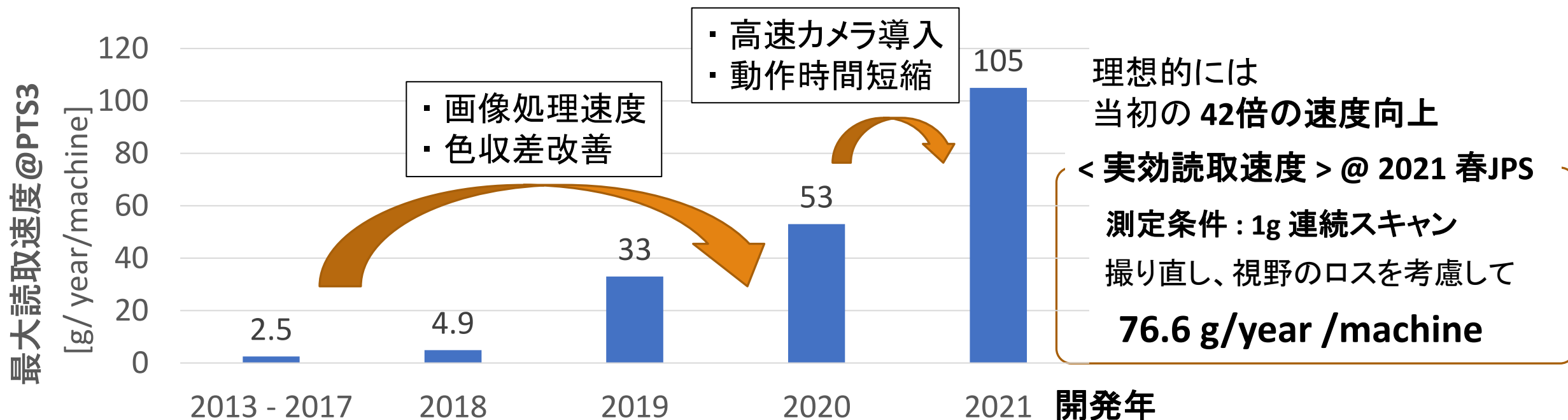
2017年から新たに高速化の為に読み取り装置開発を開始



これまでの高速化

< 目標 > 10 kg スケール実験実行可能な読取速度の達成

主に、駆動時間や画像処理時間短縮に伴う視野当たりのScan時間短縮によって高速化を実現

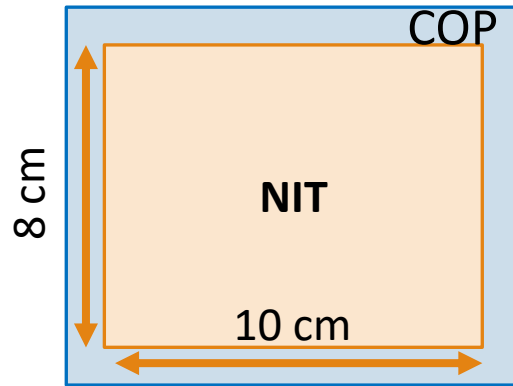


1カ月で5g程度の読取
gスケール実験での運用が可能に！！

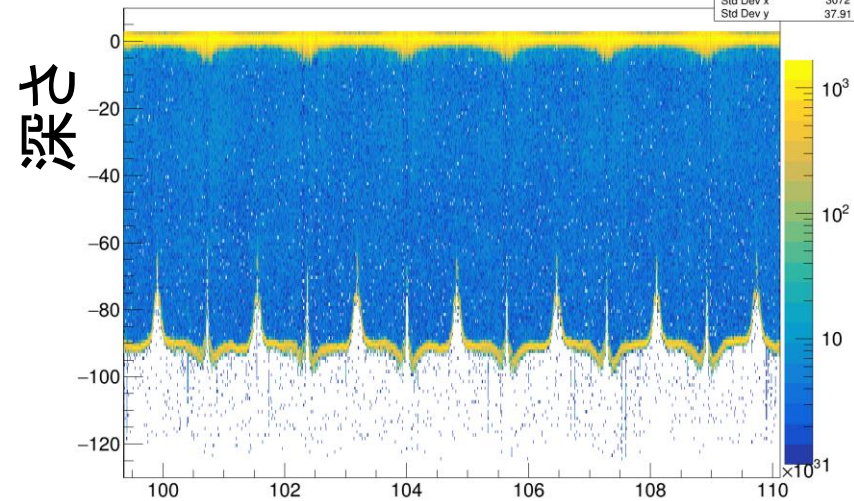
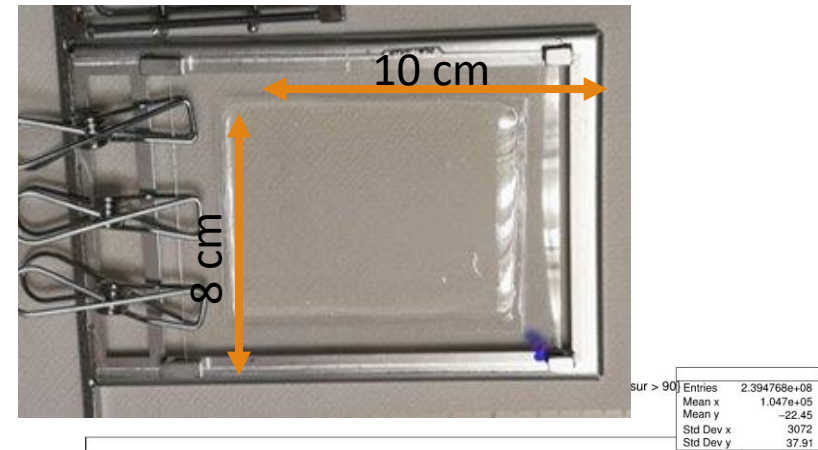
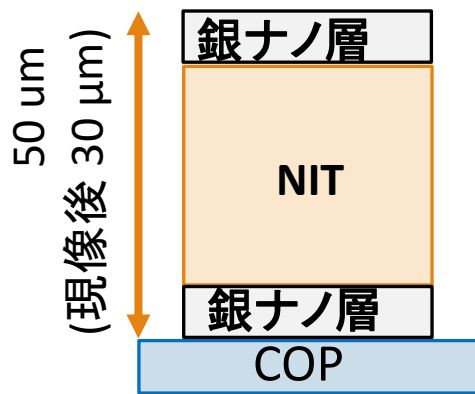
PTSでの g スケールの読み出し実証

実際に PTS3 を用いて数 g の NIT を読み出しを実行

・ Film の構造



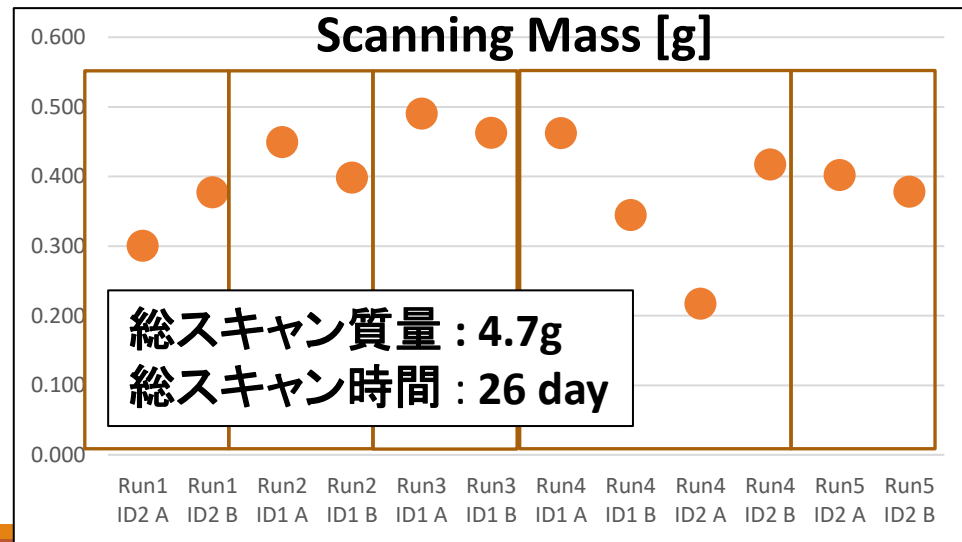
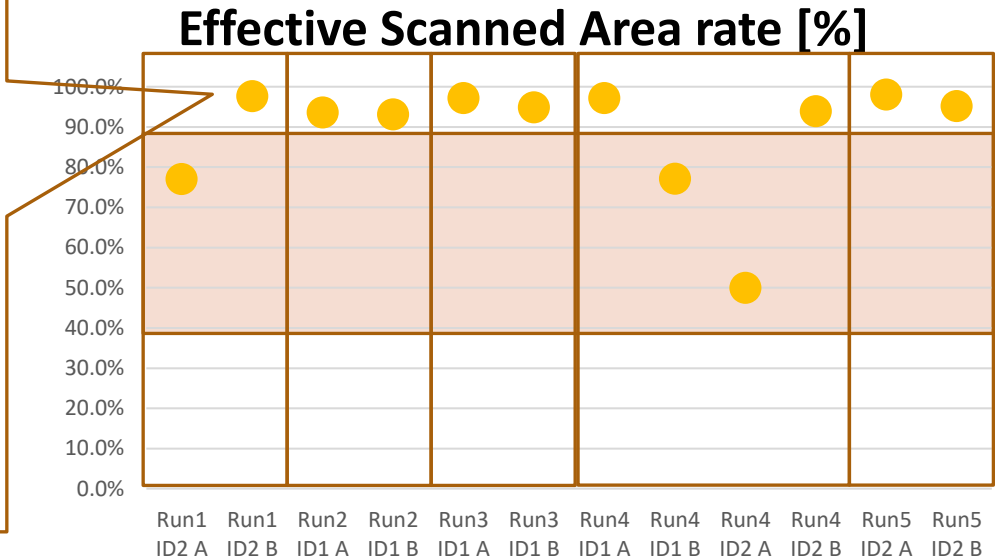
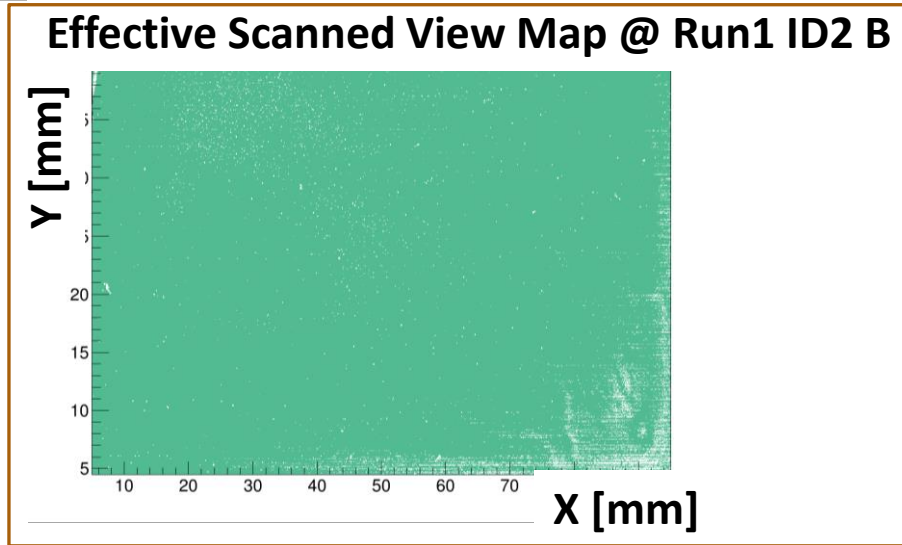
標的質量 : 2.56 g/枚



今回は1スキャンあたり1/4 film (~ 0.6 g) でスキャンを実行

視野番号

Scan結果



NITでの数 g 規模の飛跡情報取得を行った初めての実績

1カ月 5g 程度のScanが実現
 -> 数 g ~ 数 10 g Scale実験が実行可能な Scanning 能力を実証

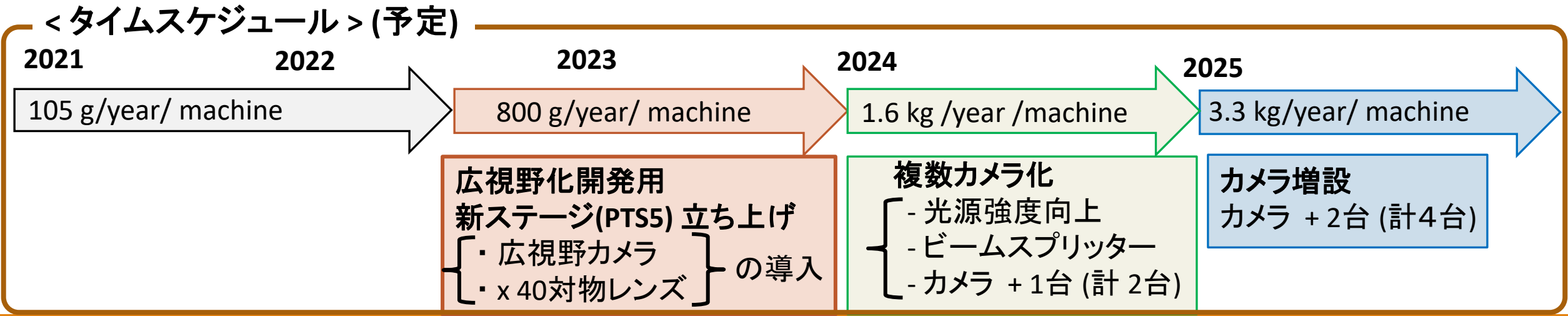
将来展望

開発方針：撮像時間短縮 → 広視野化による高速化

広視野化によるkgスケール読取実現の為の3 STEP

- 1st Step 広視野カメラの導入
(3.7倍；視野 11倍、速度 1/3)
- 2nd Step 低倍率化
(x 40対物レンズ：視野 2.25倍)
- 3rd Step 複数カメラでの同時撮像
(実効撮像速度：284 fps × 4台 => 1136 fps)

→ 同時達成で最大31倍高速化
(3.3 kg/year/machine)



広視野カメラ導入に向けた開発要素

導入できれば最大
視野 11倍 × 撮像速度 1/3 = 3.7倍の高速化が実現
(理想的には 390 g/year)

導入に向けた

- ・ カメラの性能評価
- ・ 実現可能なセットアップの検討
が絶賛進行中

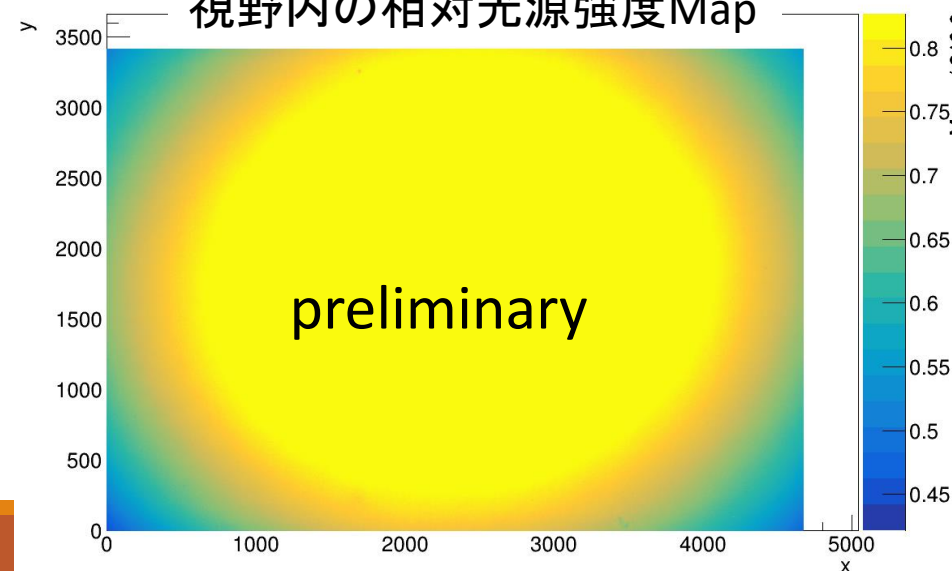
< 広視野カメラ導入に向けた開発要素 >

- ・ 視野の照明の一様性
 - 周辺部では最大光源強度 半分まで低下
 - 光学系の調整による強度の一様化
 - 光源強度と efficiency の関係のキャリブレーション
- ・ 光学像の歪み(光学収差)補正
 - 視野が広がったことで光学収差の影響増大
 - 画像処理による補正を予定

光子視野カメラ評価時の様子



視野内の相対光源強度Map



Summary

NEWSdm 実験

固体飛跡検出器である NITを用いた方向感度を持った暗黒物質直接探索実験

PTS : Post Track Selector

NIT中の数百nm長の飛跡の為の自動飛跡読み取り装置

PTSの読取速度が実験全体の規模を決定づける重要な要素

→ 実験規模拡大に向けた読み取り速度の高速化を進めてきた

現在のPTSの読取速度 :

理想的には 105 g/year (当初の 42倍)

(実効値 77g/year)

実際にNIT 4.7 gを 1ヵ月で読み出せることを実証

→ 数g ~ 数 10 g規模の実験遂行が可能な読み取り速度があることを示した。

将来展望 :

広視野化によって kg スケールの読み取り可能な能力実現を目指す。