

方向感度を持った暗黒物質探 索実験NEWSdmの為の高速 自動飛跡読み取り装置の開発

名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

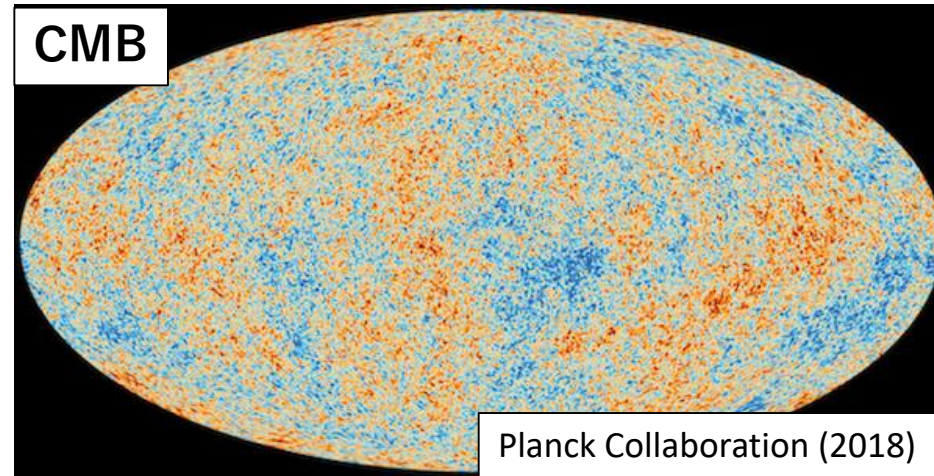
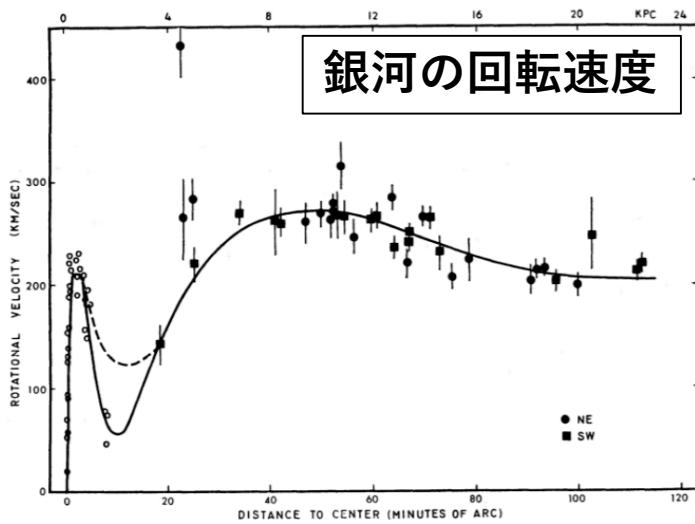
小林龍太

暗黒物質

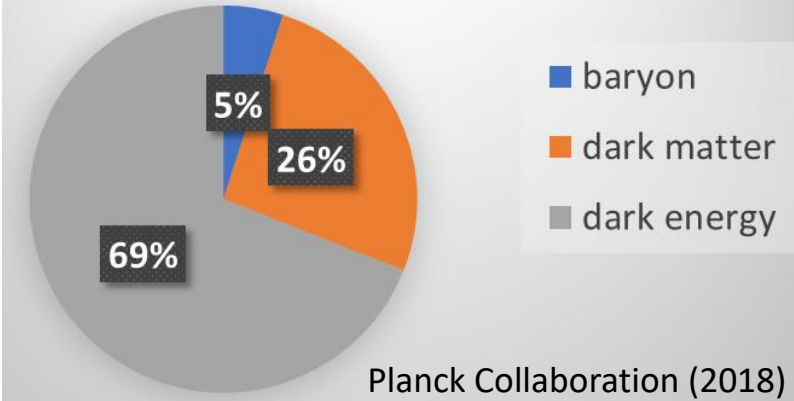
1933年 F. Zwickyが髪の毛座銀河団の質量欠損から存在を示唆

- ・ 質量を持っている
 - ・ 電氣的に中性
 - ・ 長寿命
- という性質をもつと考えられている

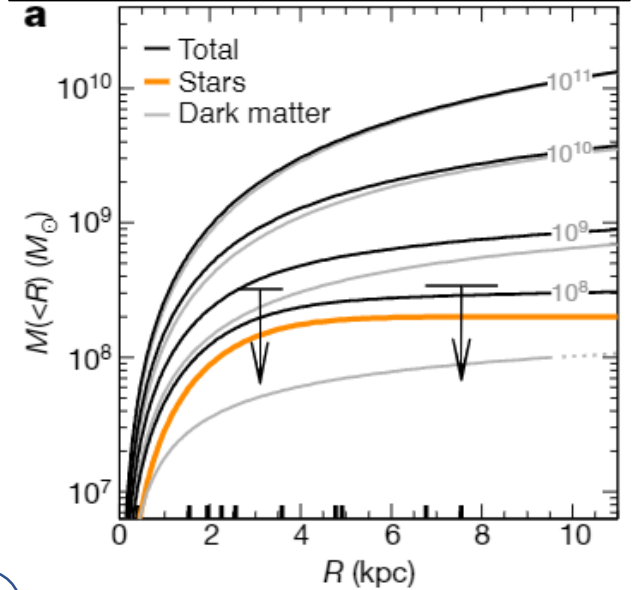
宇宙観測による様々な存在証拠



component of universe



暗黒物質の存在しない銀河



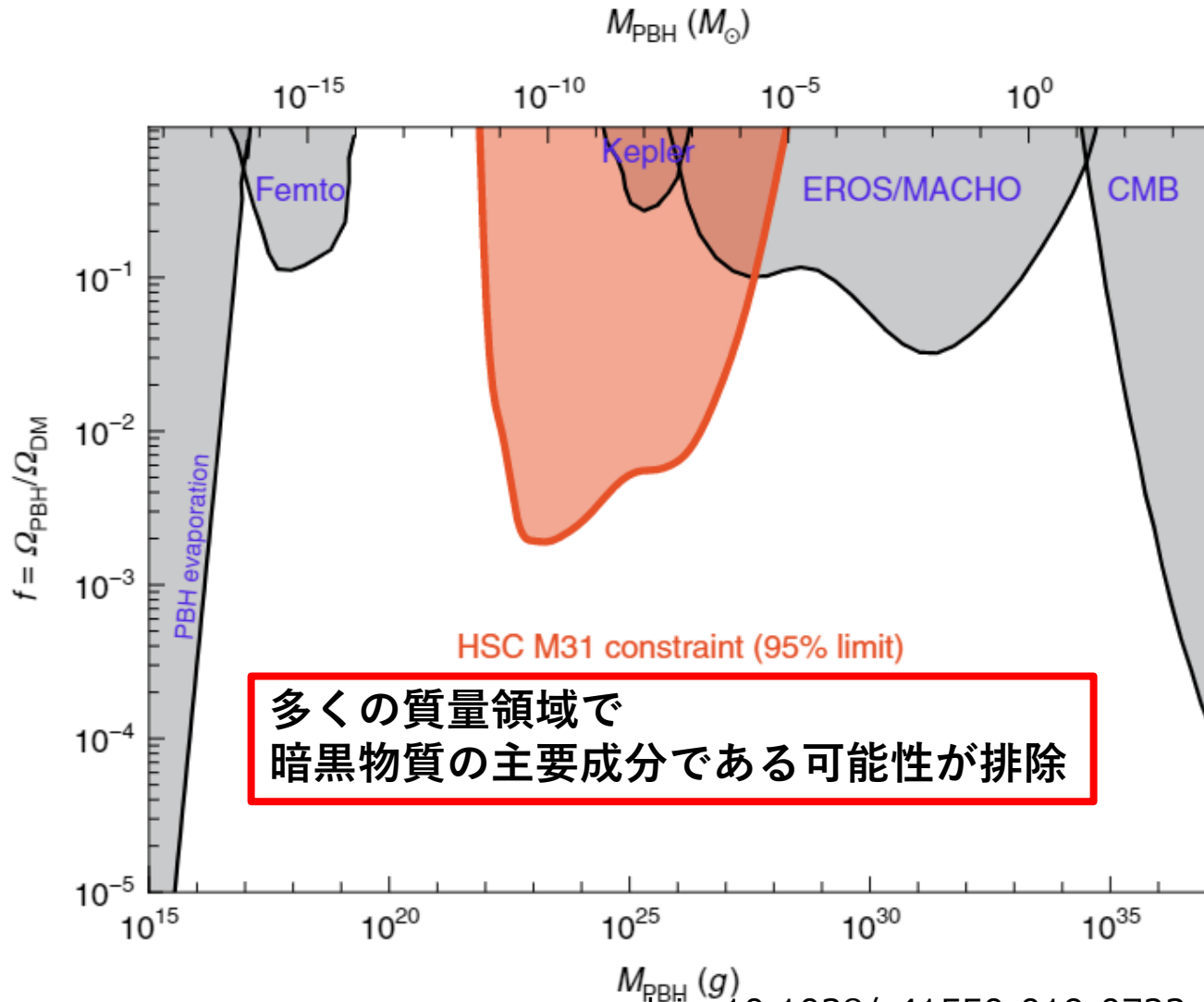
Doi : 10.1038/ nature 25767

- ・ 宇宙の成り立ちを知るうえで大きな手掛かり
- ・ 新粒子であれば、標準模型を超える新物理

- 星の形成
- 宇宙の大規模構造
に暗黒物質が大きく影響

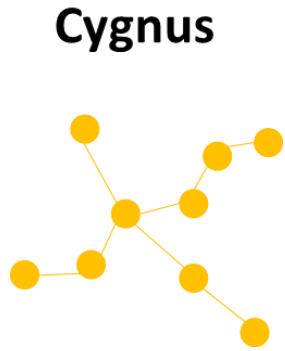
天体的な暗黒物質の存在可能性

重力レンズ効果による原始ブラックホール観測結果



素粒子的な暗黒物質探索を行うことが重要！！

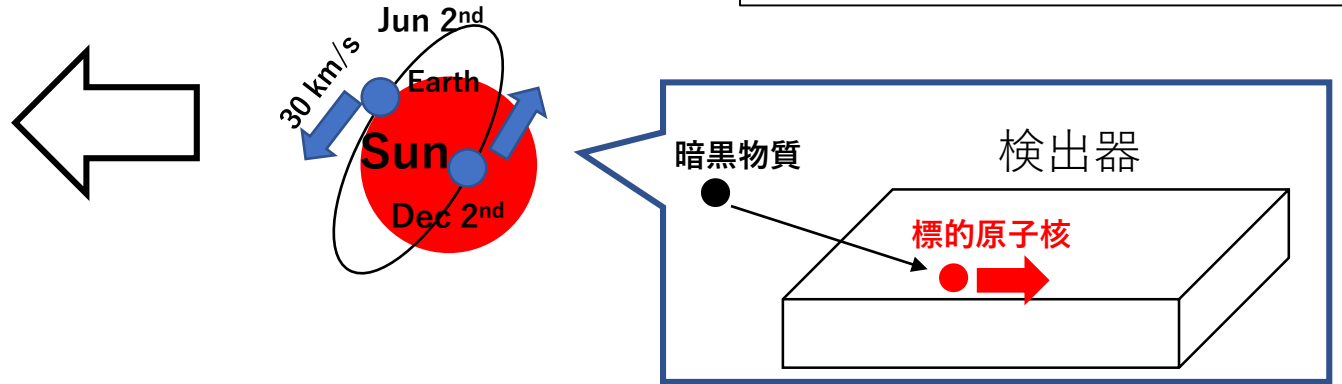
方向感度を持った暗黒物質直接探索



暗黒物質
密度 : 0.4 GeV/cm^3

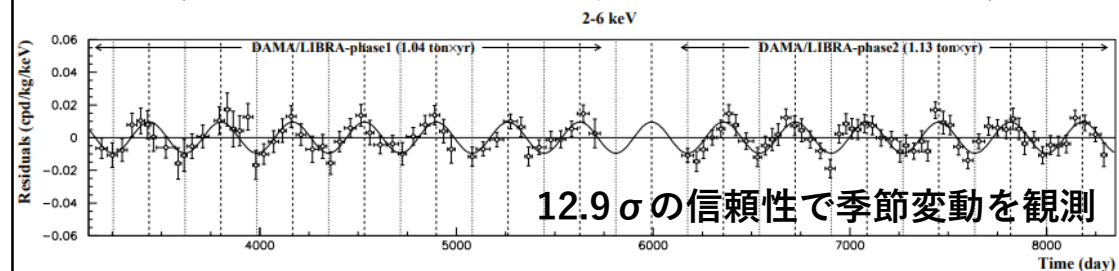
地球速度
 $v_E \sim 244 + 15 \sin(2\pi y) \text{ km/s}$

暗黒物質到来量
 $\sim 10^7 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
@ 暗黒物質質量 = 10 GeV



従来実験 - 暗黒物質到来量の季節変動

DAMA/LIBRA実験によって観測された信号の季節変動



DOI: [10.3390/universe4110116](https://doi.org/10.3390/universe4110116)

多くの他の実験で未検証 → 混沌とした状況

方向感度を持った暗黒物質直接探索実験 信号の到来方向

利点

- 季節変動以外で暗黒物質の検証が可能
- 季節変動より小統計での観測でOK
- 大規模化した際にニュートリノフロアを超えられる。

DOI: [10.1103/PhysRevD.92.063518](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.063518)

多くの方向探索実験では
気体検出器で観測が行われている。

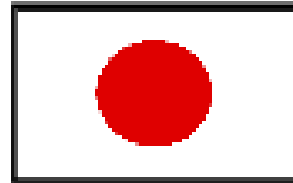
Nuclear *E*mulsions for *W*IMP Search - *d*irectional *m*easurement



<http://news-dm.lngs.infn.it>

NEWS: Nuclear Emulsions for WIMP Search
Letter of Intent
(NEWS Collaboration)

<https://arxiv.org/abs/1604.04199>



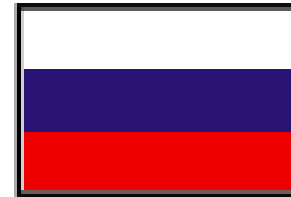
Chiba
Nagoya
Toho



METU Ankara



Bari
GSSI
LNGS
Napoli
Roma



LPI RAS Moscow Gyeongsang
JINR Dubna
SINP MSU Moscow
INR Moscow
Yandex School of Data Analysis



5か国, 14機関

NITの構成元素

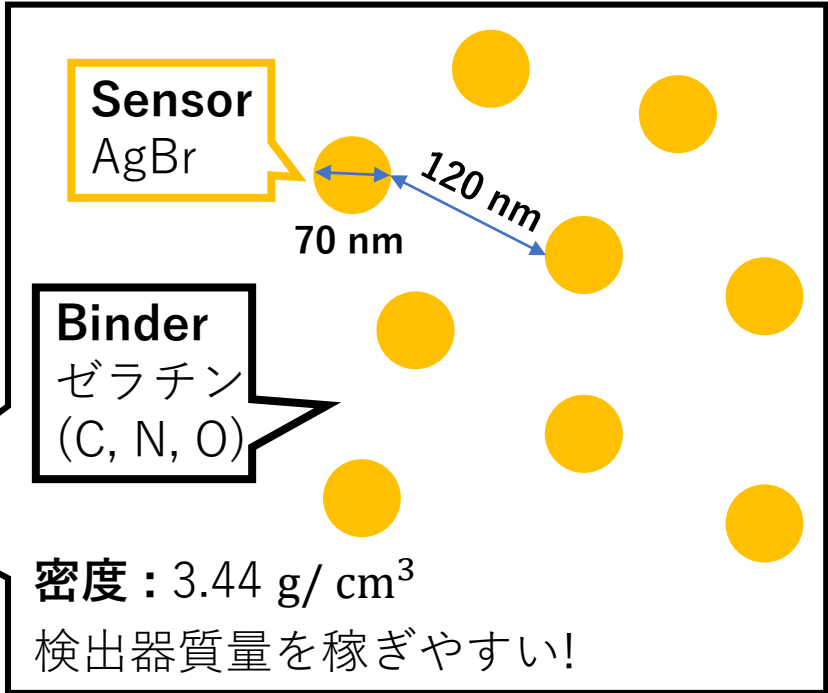
Nano Imaging Tracker : NIT

固体飛跡検出器 (超微粒子原子核乾板)
 Sub-um飛跡を記録するために名古屋大学で独自開発

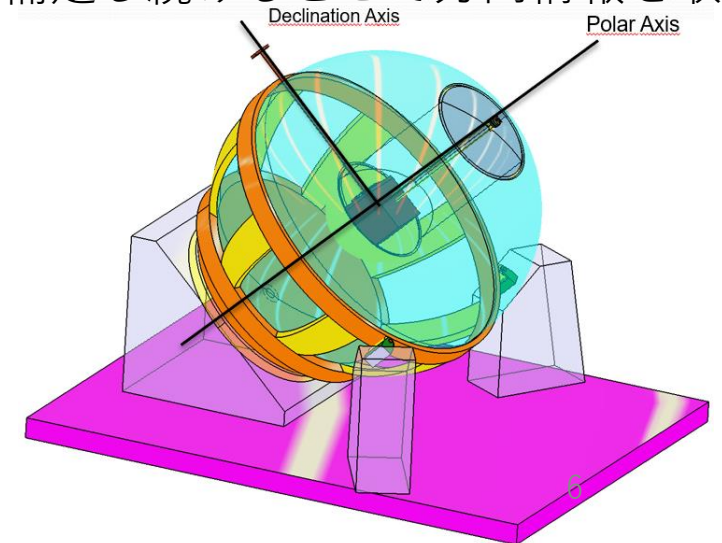
Element	Mass%	Atom%	
Heavy nucleus	Ag	44.5	10.5
	Br	31.8	10.1
	I	1.9	0.4
light nucleus	C	10.1	21.4
	N	2.7	4.9
	O	7.4	11.7
	H	1.6	41.1

Point : AgBr結晶の微粒子化、高密度化

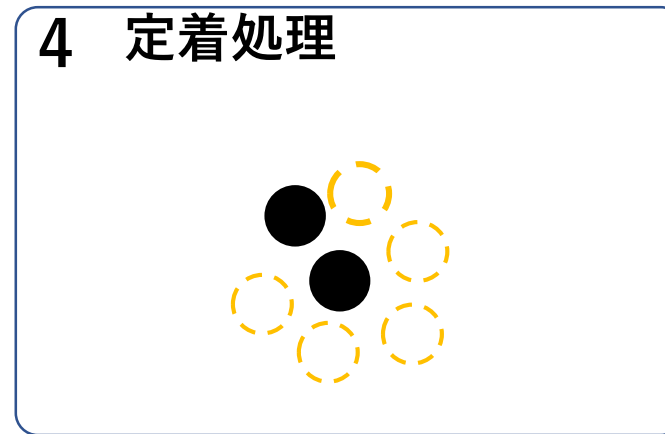
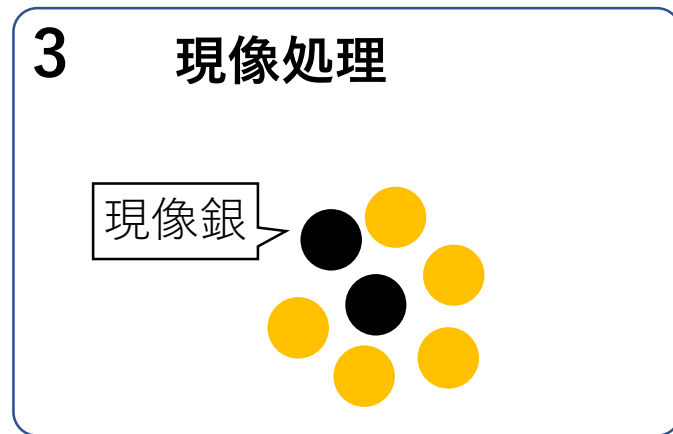
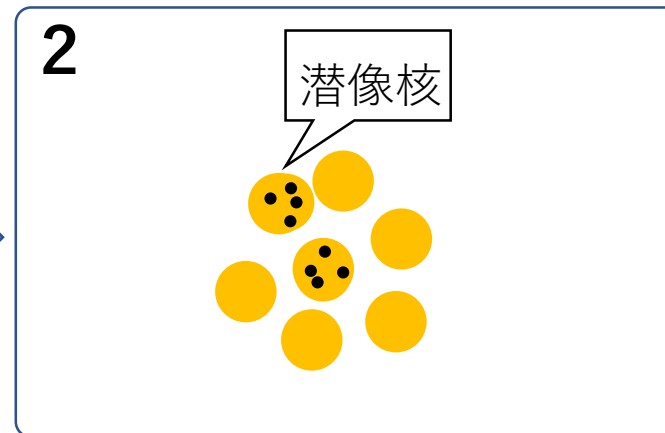
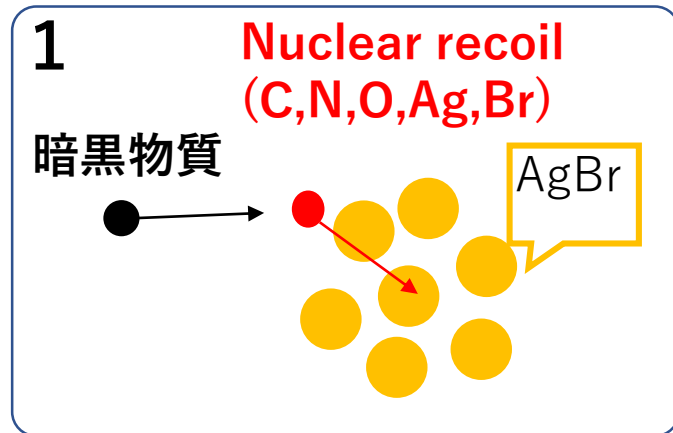
NIT



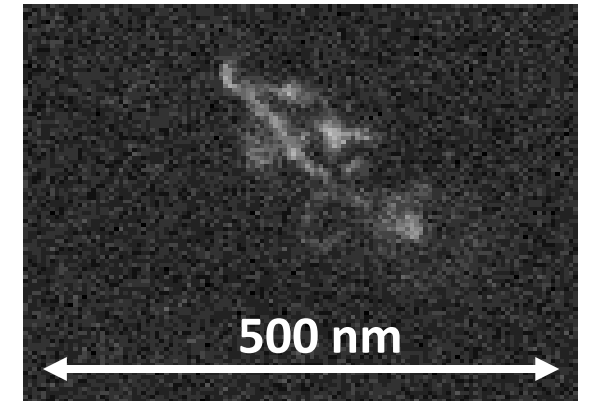
時間情報なし
 → 赤道儀に乗せて白鳥座の方向を
 補足し続けることで方向情報を取得



NITでの飛跡検出



Ex) 100 keV C ion
電子顕微鏡



Sub-um飛跡の記録が可能に

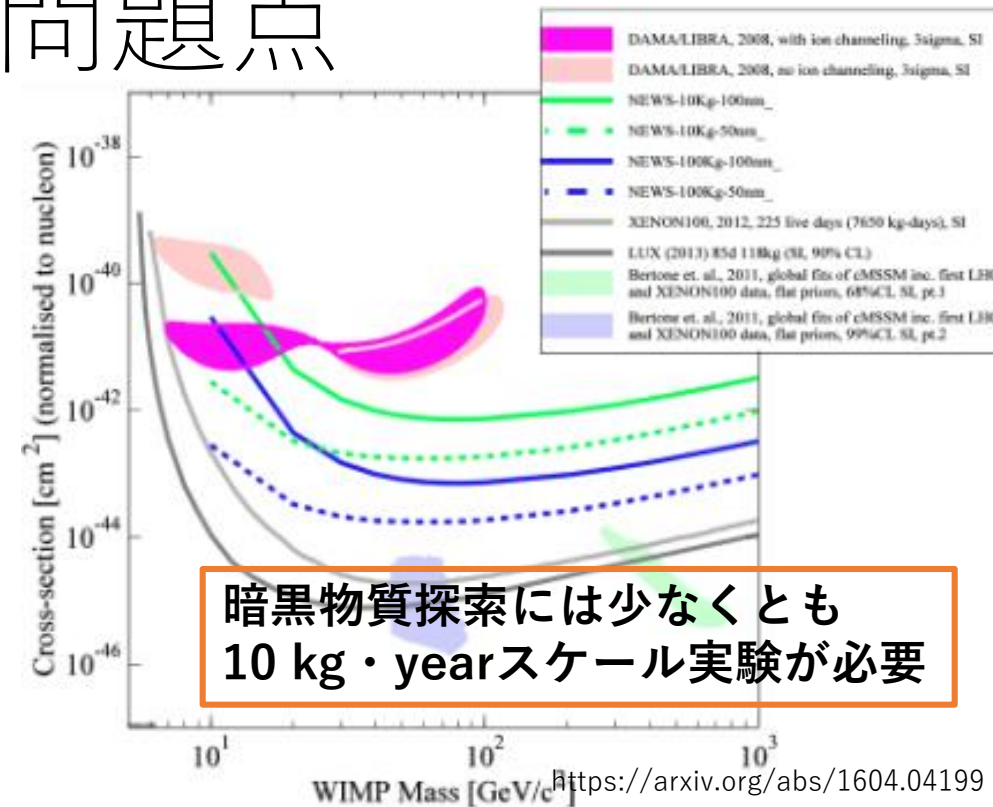
NIT中の事象解析における問題点

NITによってsub-um飛跡の記録は可能

一方で...

解析には顕微鏡による飛跡観察が必須

マニュアルでは
< 0(0.1)g/year



NITを用いた暗黒物質探索実現には
- 解析の自動化
- 高速化
が必要不可欠

解析対象 複数grainで構成されている事象を選別したい

fog

400keV Krイオン

X線顕微鏡

光学顕微鏡

桂川貴義氏 博士論文 (2017)

Sub-um飛跡自動読み出しの為に必要な条件

ハードウェア

- ・ 高分解能、高倍率
- ・ 高コントラスト

ソフトウェア

- ・ sub-um飛跡読み出しに特化した解析アルゴリズム

高速な情報取得が可能な**光学顕微鏡**で
年間kg以上のNITを解析できる装置を構築したい

Post Track Selector : PTS

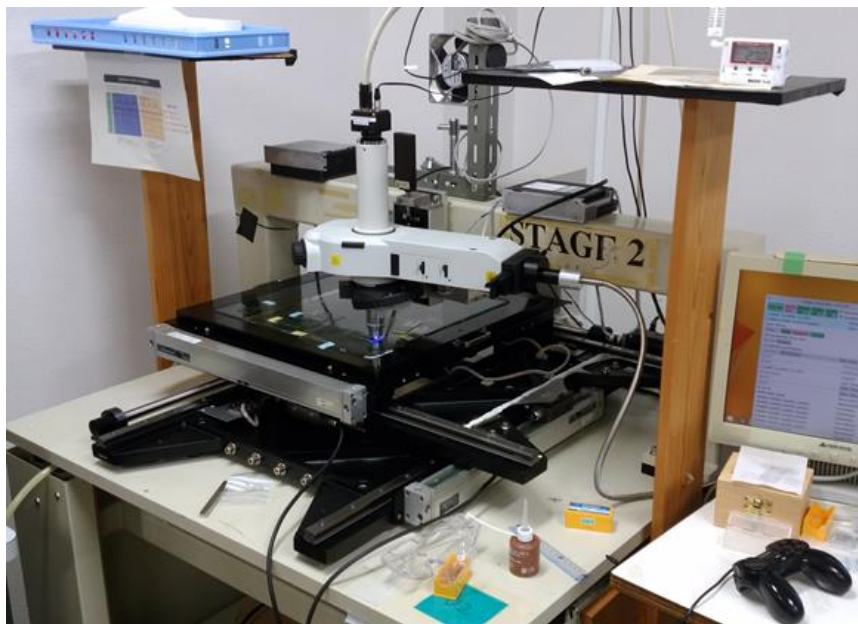
T. Katsuragawa et al., JINST, 12, 04, T04002 (2017).

NIT中の事象情報を読み出すのに特化した自動飛跡読み取り装置

特徴

- X100, NA = 1.45の対物レンズ
- 落射光学系

sub-um飛跡情報読み出し可能な光学系を構築



PTS2 (Post Track Selector unit-2)

Sub-um飛跡全自動読み取りの為の実証機

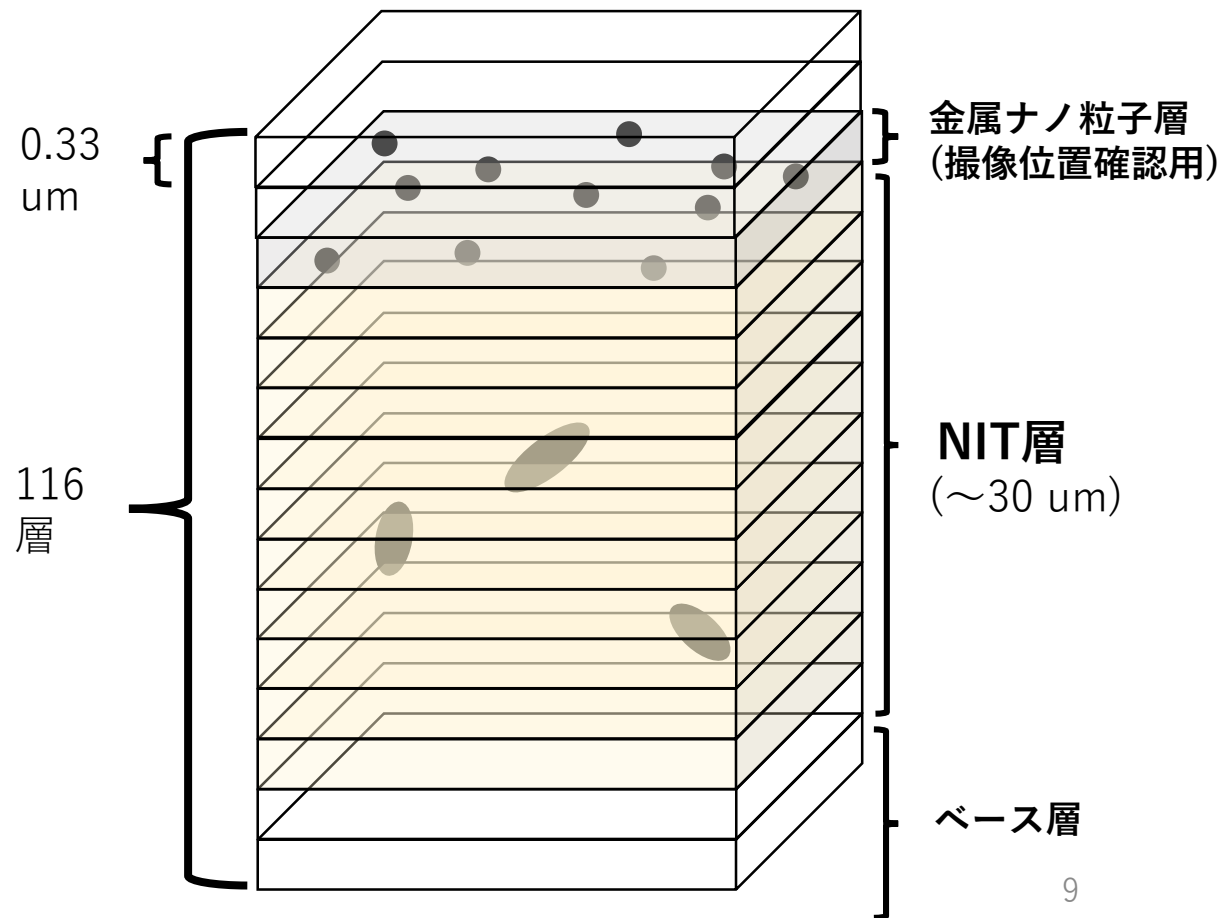
光学分解能 :
191 nm
pixel分解能 :
55 × 55 nm

CMOSカメラ

対物
レンズ

Point!

断層画像を取得することで
3次元情報の取得が可能



Sub-um飛跡情報の自動取得

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

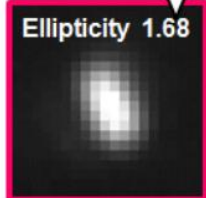
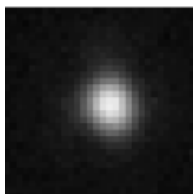
楕円形状解析

光学像の形状から飛跡らしさを取得

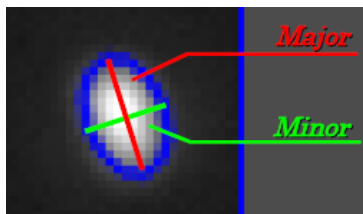
fog

400keV Krイオン

光学
顕微鏡



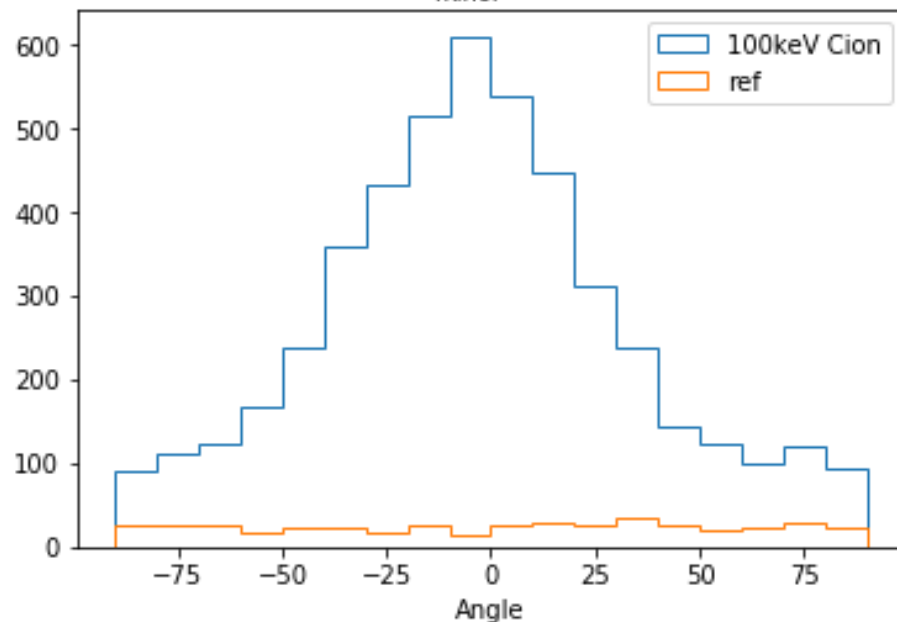
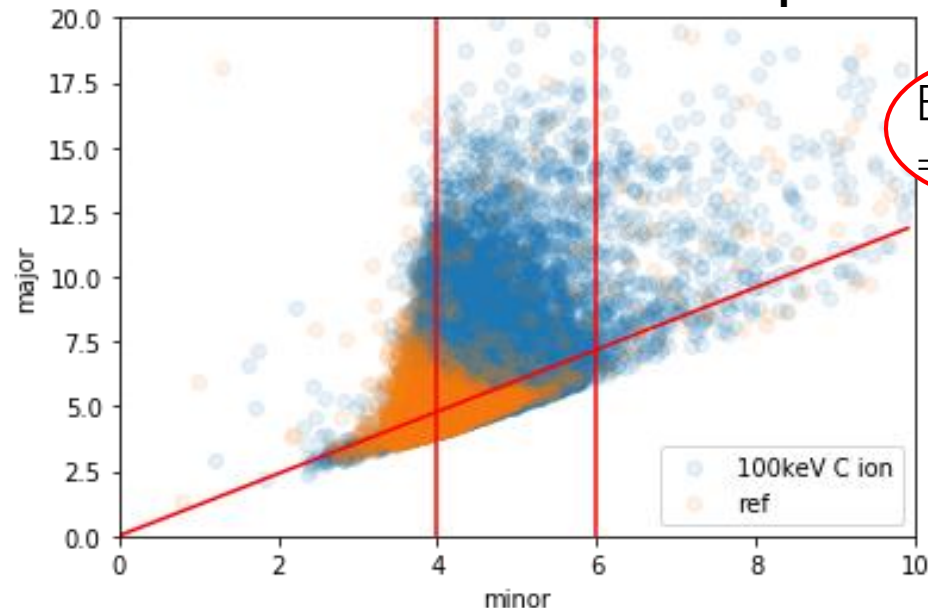
桂川貴義氏 博士論文 (2017)



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

飛跡方向 : major の方向

100 keV C ion VS ref sample

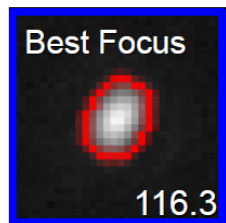
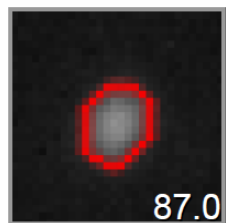
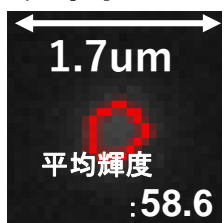


ベストフォーカスセレクション

ピンボケした像によるノイズを除去

表面

底面



PTS開発の次へのステップ

PTS2までの成果

- ・ 光学顕微鏡によるSub-um飛跡の自動飛跡読み取り実証
- ・ NIT及びBGについてのR&Dを可能に
- ・ 2.5 g/yearの読み取り速度達成



次のPTSへの課題

読み取り速度高速化による
NIT O (10 kg · year) 実験の実行可能な環境構築

高分解能
高倍率

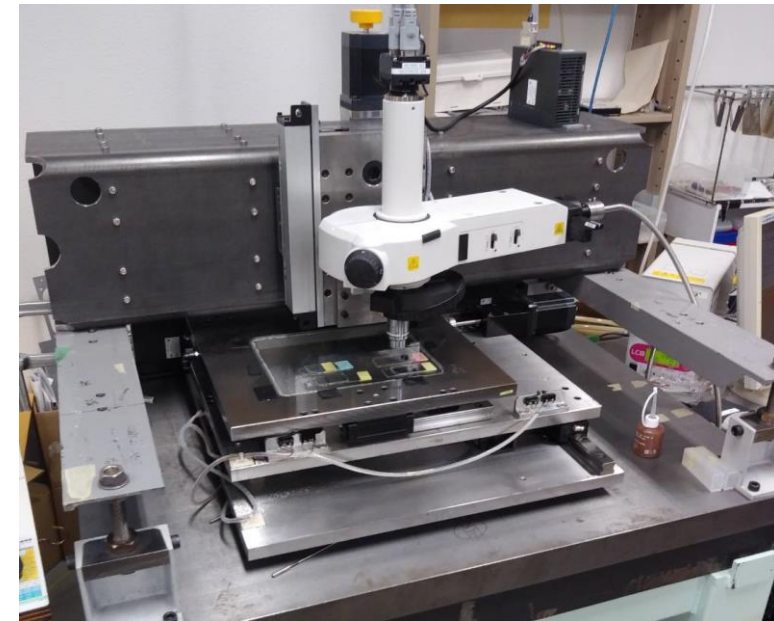


解析速度

Point

高倍率、高分解能という条件下で
いかにして高速化を進めていくか？

初の大規模実験用の実用機の開発を目指して
2016/ 12よりPTS3の開発スタート



PTS3 : Post Track Selector unit-3

高速化に向けた課題

$$\text{読み取り速度} = \frac{\text{解析量}}{\text{解析時間}} = \frac{1 \text{視野の体積} [cm^3 / \text{view}] \times \text{NIT密度} [g/cm^3]}{1 \text{視野当たりの解析時間} [s / \text{view}]}$$

解析速度の決定要素

解析時間

ハードウェアの動作時間

- ステージ移動時間
- 振動待ち時間
- カメラの撮像時間

プログラムの処理時間

- 画像filtering
- 飛跡認識

解析体積

- ハードウェア

- カメラの素子サイズ
(2M pixel : 116um × 63 um)

- 解析による制限

- 収差による形状の歪み

ステージの移動時間短縮

これまでのステージ動作時間

振動による歪みの効果を気にしてゆっくり動作

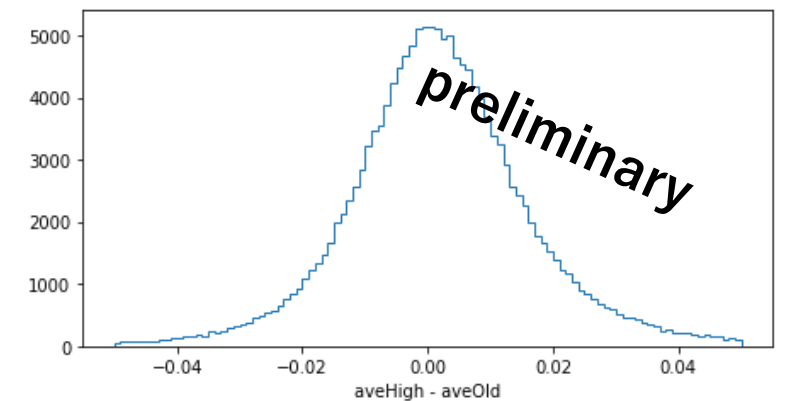
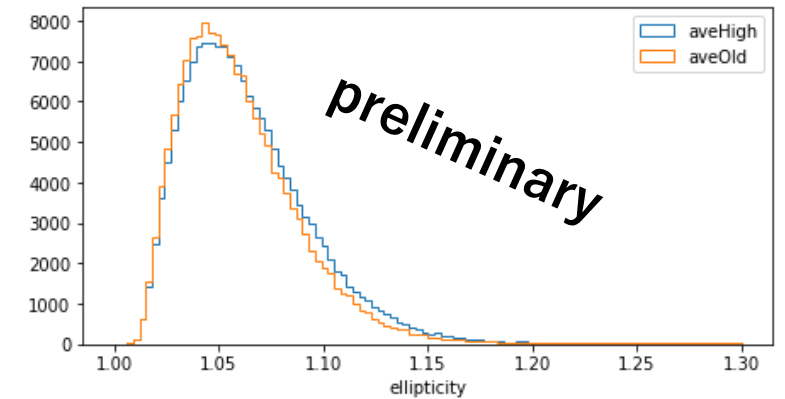
撮像速度が上がったことで
これまでのステージ移動速度を見直し

process		Time [s/view]	Time [s/view]
次の視野への移動	次の視野への移動	0.34	0.05
	振動待ち	0.10	0.00
撮像の為の準備	速度設定の為の通信	0.03	0.00
	速度安定待ち	0.05	0.04
	撮像後の復帰動作	0.06	0.06

ステージの移動時間

0.6 s/view -> 0.2 s/view

ステージの速度変化前後で
40 nm銀ナノ粒子の楕円率の比較



高速化に向けた課題

$$\text{読み取り速度} = \frac{\text{解析量}}{\text{解析時間}} = \frac{1 \text{視野の体積} [cm^3 / \text{view}] \times \text{NIT密度} [g/cm^3]}{1 \text{視野当たりの解析時間} [s / \text{view}]}$$

解析速度の決定要素

解析時間

ハードウェアの動作時間

- ステージ移動時間
- 振動待ち時間
- カメラの撮像時間

プログラムの処理時間

- 画像filtering
- 飛跡認識

解析体積

- ハードウェア

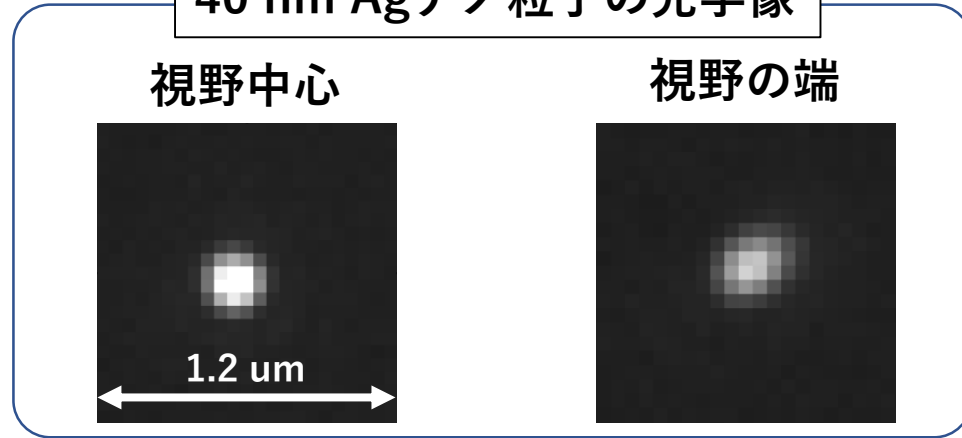
- カメラの素子サイズ
(2M pixel : 116um × 63 um)

- 解析による制限

- 収差による形状の歪み

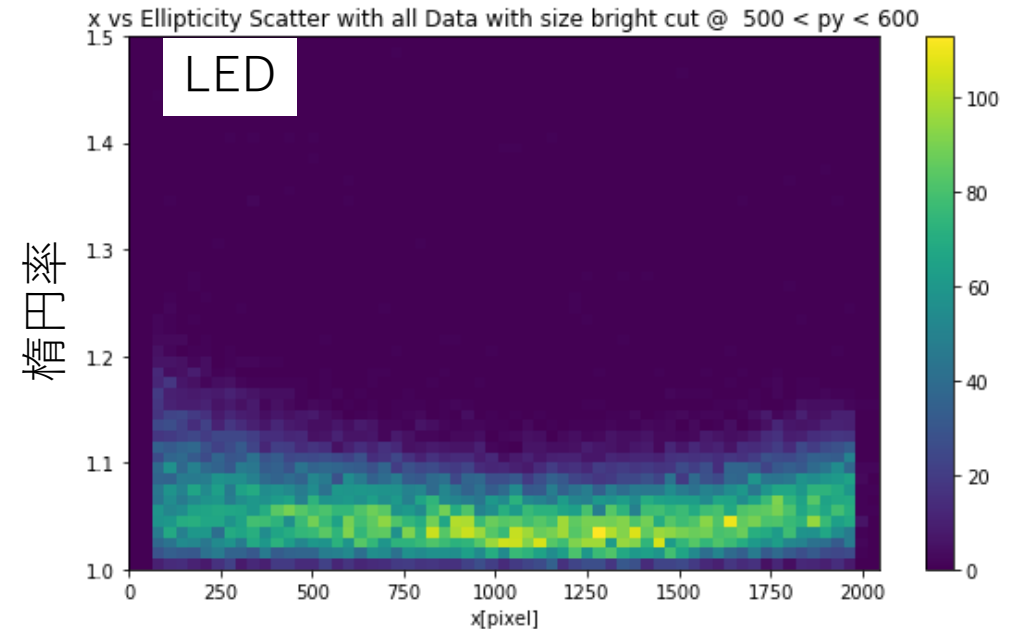
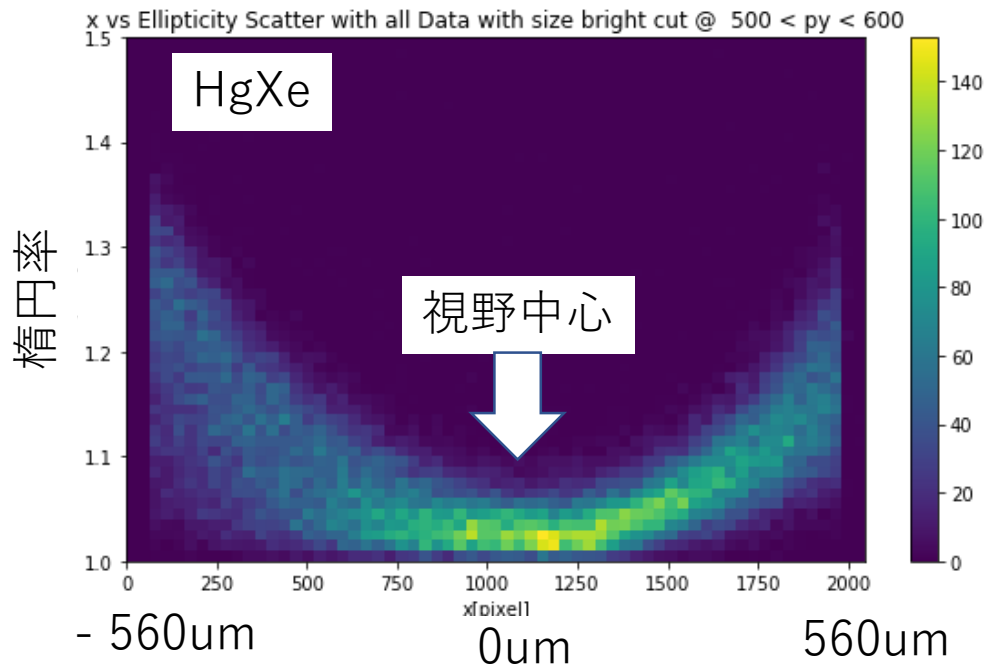
光学系最適化による像の歪みの改善

40 nm Agナノ粒子の光学像



光源を
HgXe -> LED (455 nm単色)
に変更し光学系を最適化

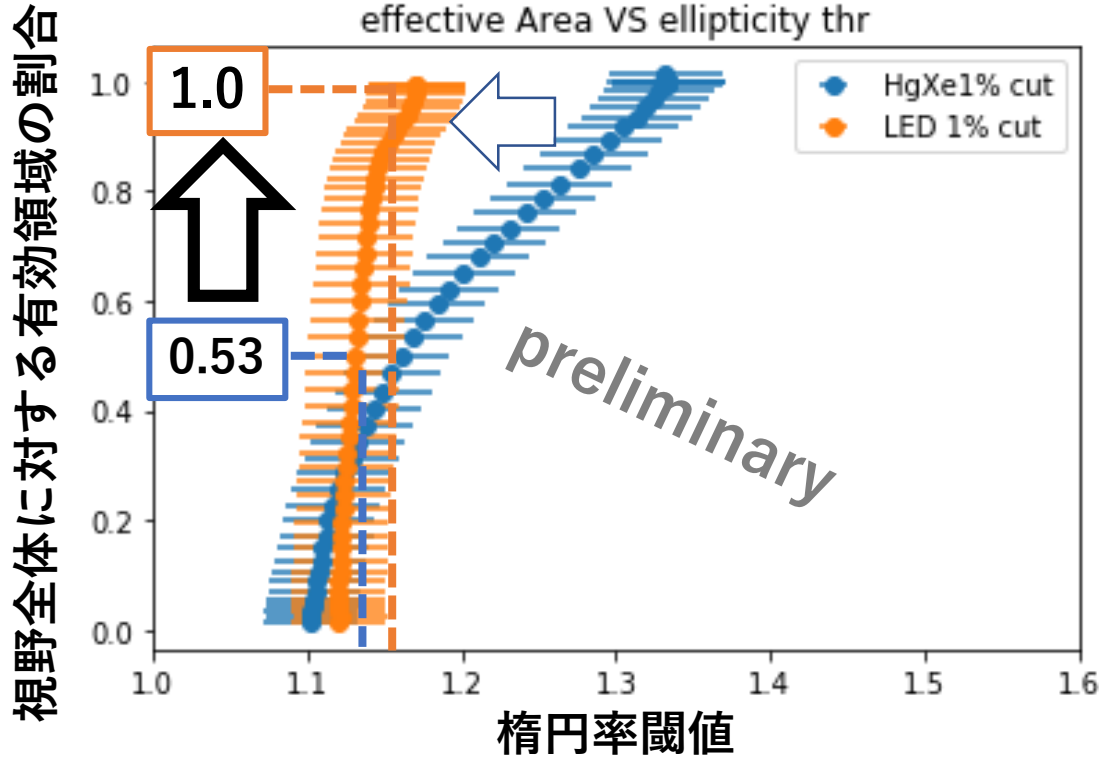
40nm Agナノ粒子の歪みの大きさと方向の場所依存性
(x方向へプロジェクション)



楕円形状解析における検出能力評価

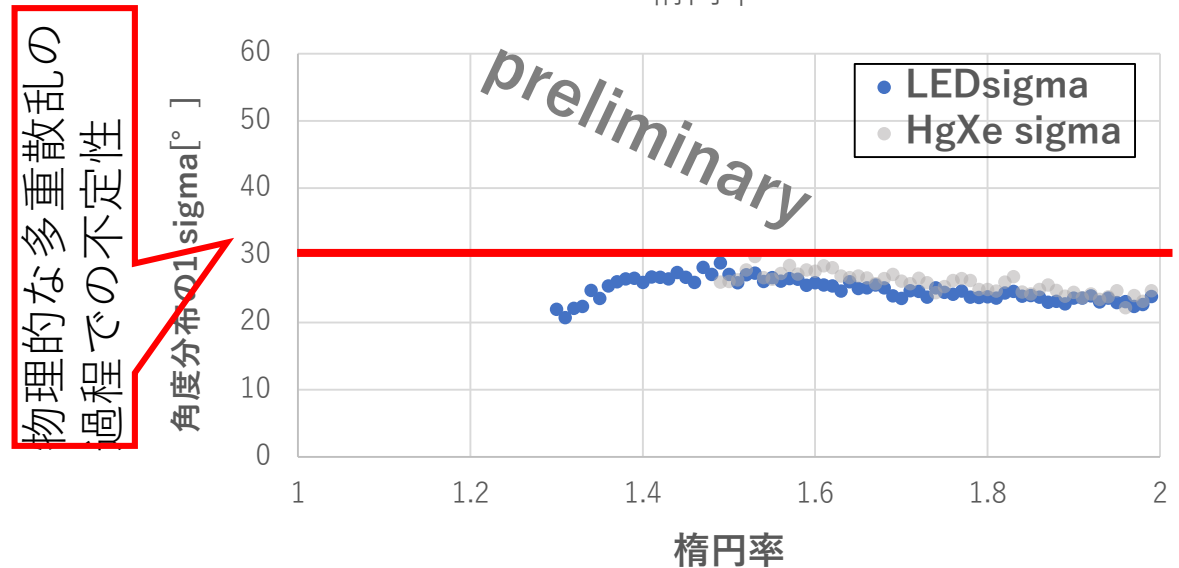
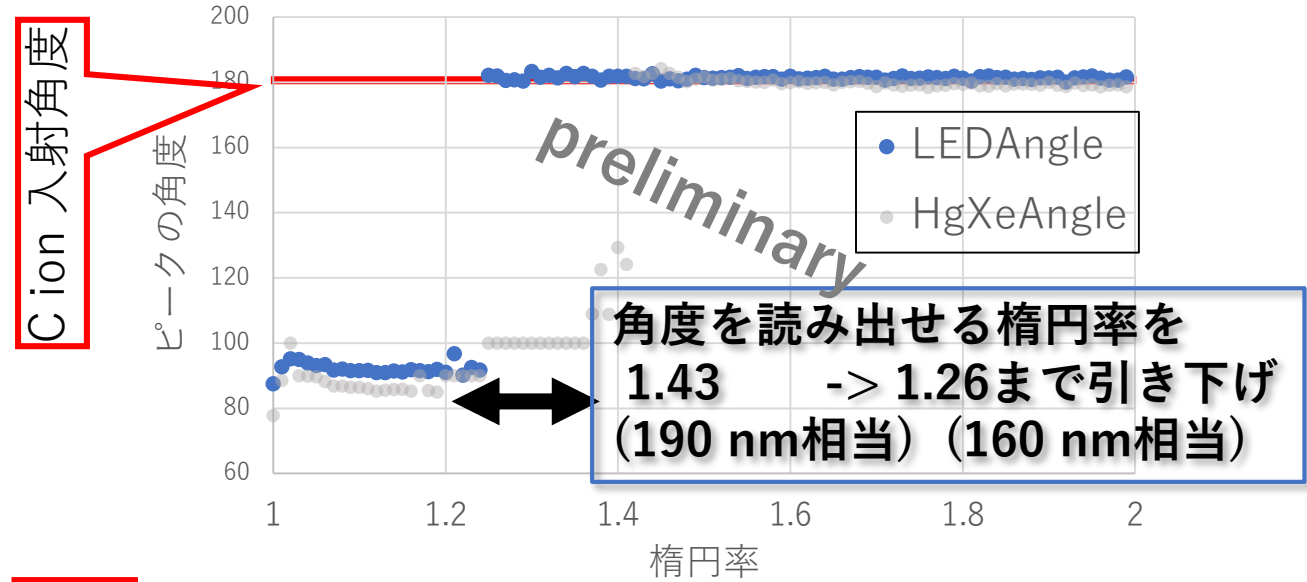
直径40nmの銀ナノ粒子で光学系の原理的なBG識別能力を評価

楕円率閾値ごとに銀ナノ粒子の1%の事象が染み出す領域 → 有効領域として定義



楕円率が保証された領域が視野全体に拡大

100keV C ion事象で楕円率ごとの角度の読み出し性能を評価



PTS高速化の現状と将来展望

現状の処理時間

撮像	画像filter
0.4s	0.1s
ステージ動作	飛跡認識
0.2s	0.2s

処理時間：
0.63 s/view

解析可能視野：

解析速度：
52.5 g/year/machine

(DAMAまで残り $O(10^3)$ 倍)

処理時間の短縮 (630 ms \rightarrow 300 ms/view)

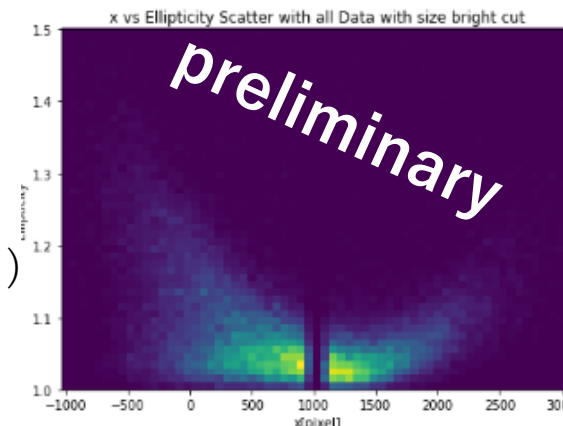
カメラの高速化
高速カメラの導入
(撮像時間 0.4 s \rightarrow 0.116 s)

Online 事象選別
画像処理すべき事象を削減
0.2 s \rightarrow 0.1 s

解析体積の拡大 (視野 8倍)

撮像可能体積の拡大
複数カメラの使用
(2M \rightarrow 16 M pixel)
- 光源強度増強
- 収差改善
(画像処理による収差補正)

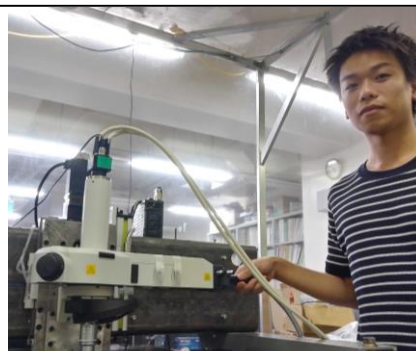
視野を広げた際の
銀ナノの楕円率場所依存性



上記達成で $\sim 1\text{kg} / \text{year} / \text{machine}$ の解析速度達成

複数台の読み取り装置立ち上げ

PTS4



@東邦大学

将来的には複数台の読み取り装置合計で
10 kg/yearの読み取り速度を達成へ

まとめ

- NEWSdm実験は方向感度を持った暗黒物質直接探索実験である。
- 固体飛跡検出器であるNIT及び、内部の飛跡を読み出す為の自動飛跡読み取り手法を開発し、sub-umの飛跡情報を取得することが可能となっている。
- 10 kg・year 実験を初めて可能にするための実用機として高速自動飛跡読み取り装置PTS 3を開発中であり、現在は52 g/year/machineで解析が可能となっている。