

超微粒子原子核乾板における 溶解物理現像法を用いた方向 検出性能の低閾値化

東邦大学 陳 夏姫

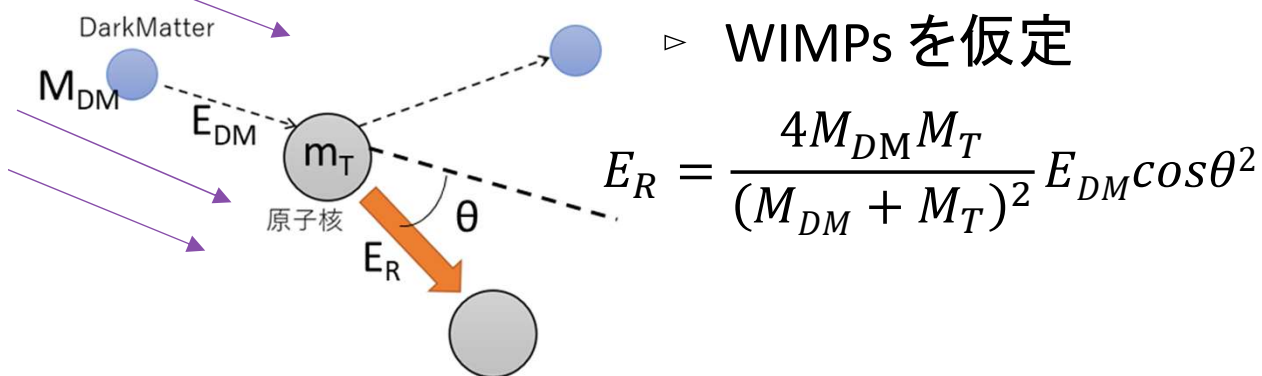
Introduction

NEWSdm 実験:

超微粒子原子核乾板(NIT)を用いた方向感度を持った暗黒物質直接探索実験

NITの作成 → 照射 → 現像 → 落射型顕微鏡で測定

From Cyg.

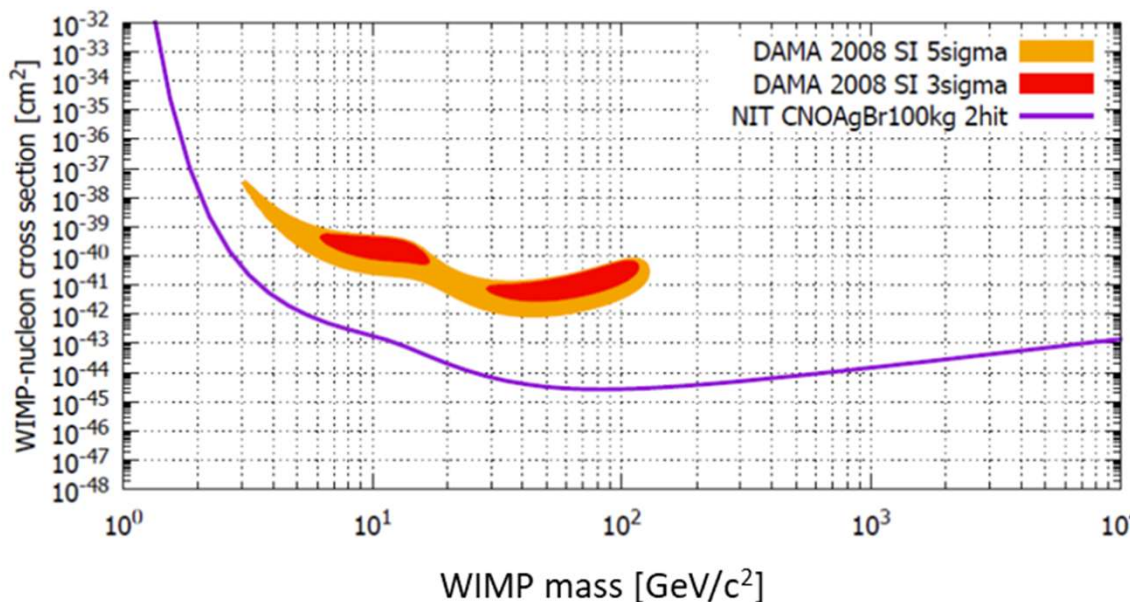


$$E_R = \frac{4M_{DM}M_T}{(M_{DM} + M_T)^2} E_{DM} \cos^2\theta$$



NIT
 AgBr(I)結晶サイズ: 70 nm
 密度: 3.2 g/cm³
 ターゲット原子:
 C, N, O, H, Ag, Br, I

WIMP cross section - 100kg365days 0BG 90CL CNOAgBr



WIMPs質量が低いほどNITとの
 反応断面積増加

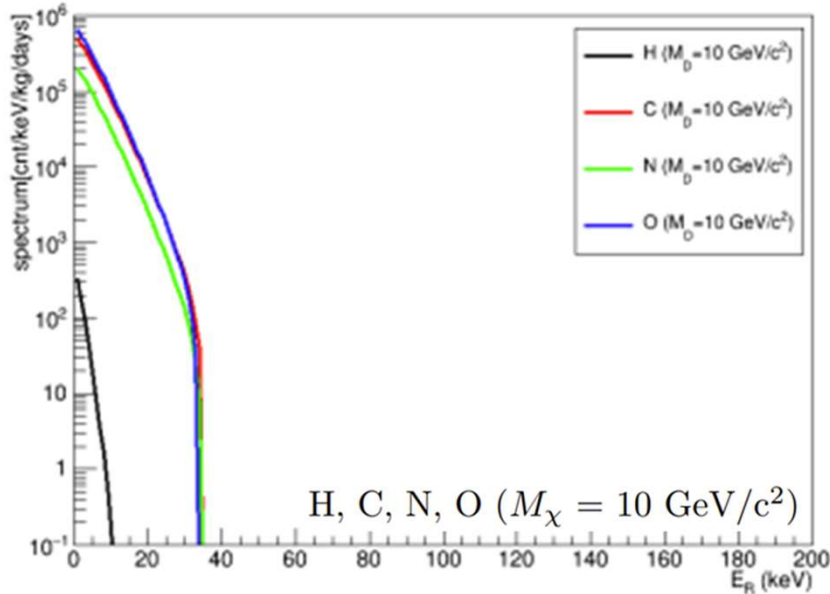
→ 検出可能事象数が低エネルギーで
 指数関数的に増加

検出器の低エネルギー閾値化

→ 低質量のWIMPsに対して感度を持つ
 → 暗黒物質探索の低エネルギー閾値化
 探索領域拡大

Introduction

SI interaction



▷ エネルギースペクトル $\frac{dR}{dE_R}$

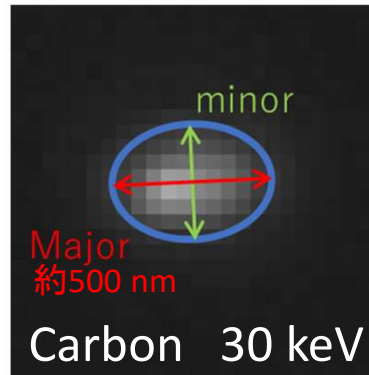
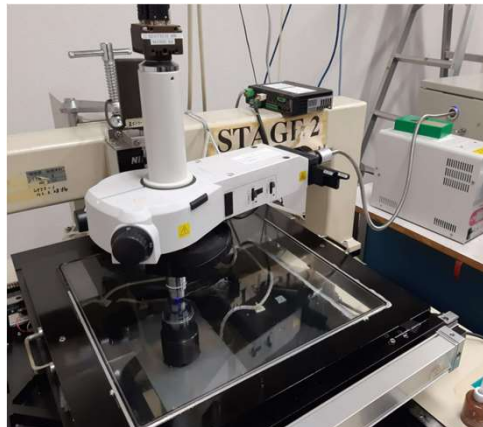
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{R_0}{E_0 r} \frac{k_0}{k} \frac{1}{2\pi v_0^2} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{1}{v} f(\mathbf{v}, \mathbf{v}_E) d^3v$$

R_0 : 総事象数 v_0 : 分散速度 k_0/k : 規格化定数
 v : WIMPs速度 v_c : 地球の速度

梅本篤宏(2020)原子核乾板を用いた暗黒物質方向探索実験の高感度化の研究, 名古屋大学大学院素粒子物理学専攻博士論文.

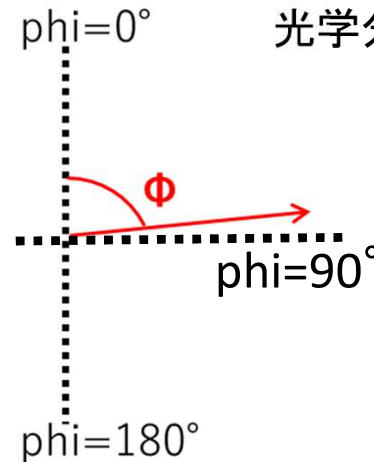
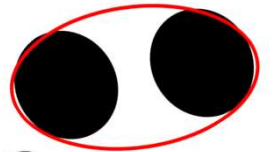
30 keV Carbonイオンを用いて検証 → 質量10 GeVの暗黒物質に対する検証

NITにおける 30 keV Carbonの平均飛程 100 nm
 (TRIM 2008 simulation)



<楕円形状解析>

数百nmの飛跡は顕微鏡の光学分解能により楕円形状をもつ
 光学分解能: 214 ± 8 nm



$$Ellipticity = \frac{Major}{minor}$$

S/N判別に楕円率1.5以上を採用

Motivation

30 keV Carbonのシグナルである楕円率1.5以上検出性能を高める

→10 GeVの暗黒物質の検出性能を高める

30 keV Carbon 事象数の見積もり: $6.2 / (10\mu\text{m})^2$

楕円率1.5以上の事象数: $0.2 / (10\mu\text{m})^2$

↳ 顕微鏡で認識される楕円率1.5以上の事象を増加

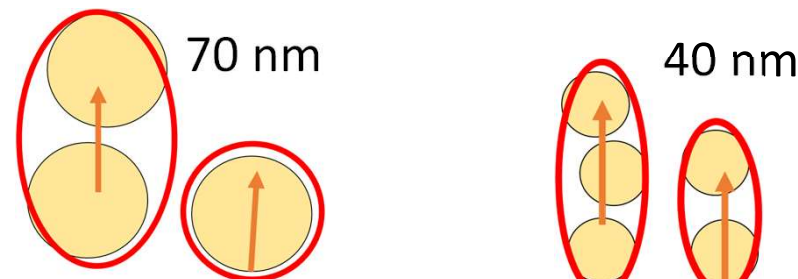
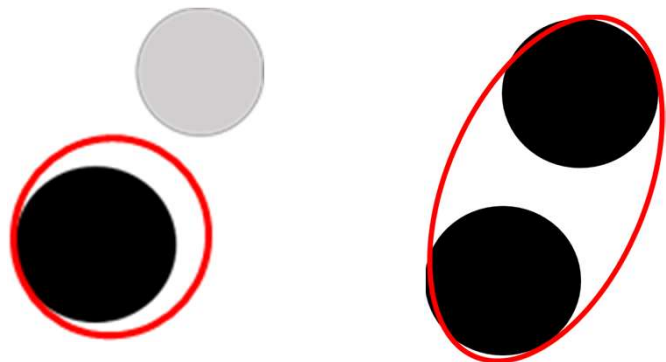
▷現像の改良

- ・輝度の上昇、高コントラスト
- ・現像銀の輝度の偏りを軽減させる



▷結晶貫通数の増加

- ・高密度化
- ・結晶サイズの微粒子化



30 keV Carbon結晶貫通数 概算

0.8 個

1.3 個

but... 粒子サイズ40 nm NITを用いた際の飛跡コントラストが低い

▷本来、局在表面プラズモン効果で40 nm銀は青色の反射率が高い

▷現像液による表面の硫化？

⇒現像銀表面を純粋な銀にする

▷フィラメントが40nmより小さい

⇒現像銀フィラメント構造を大きくする



40nm

80nm

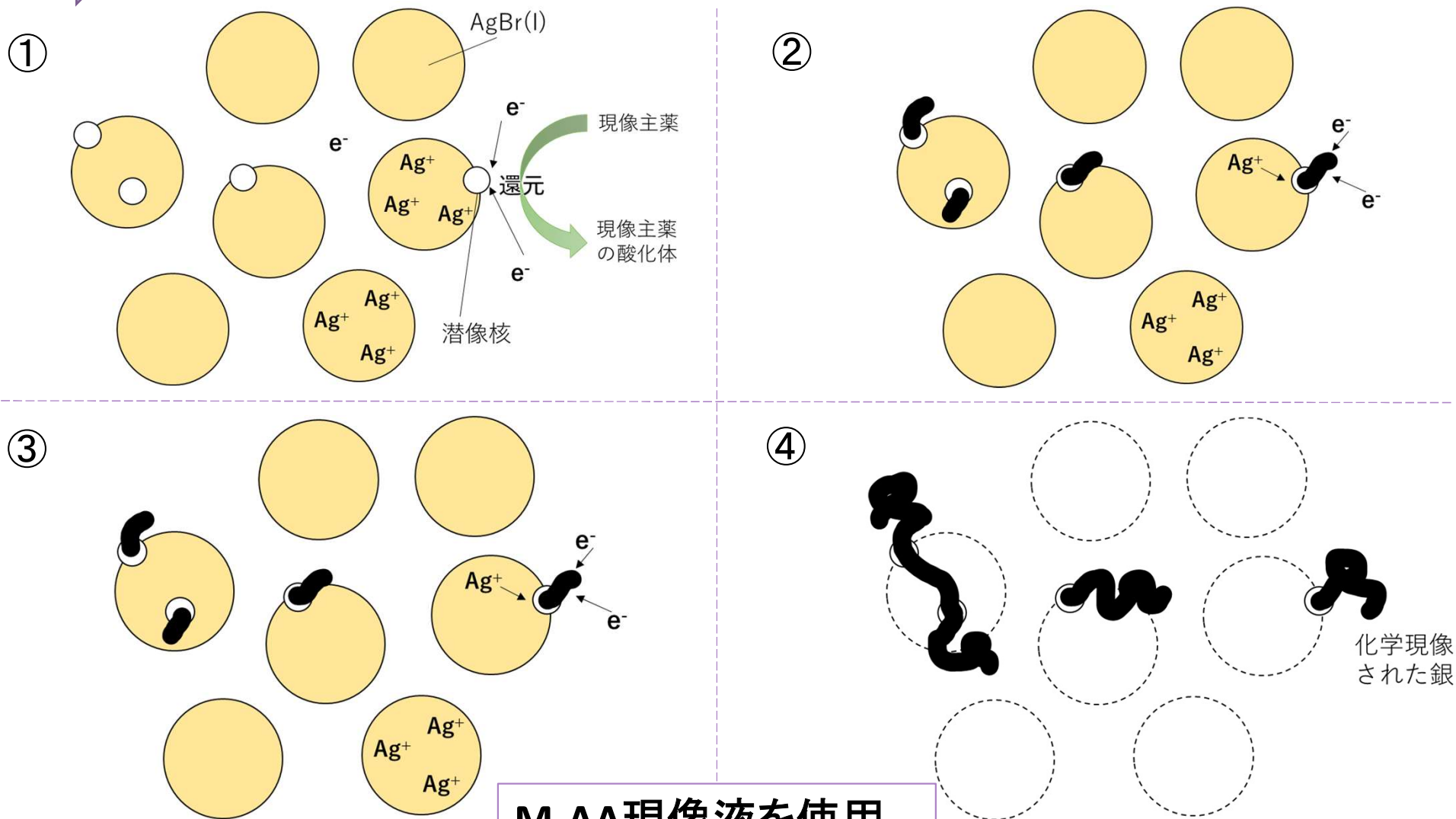
120nm

70 nm NITでの溶解物理現像法による輝度上昇による30 keV炭素検出性能の向上

NEWSdm実験における現在の標準的な現像法：化学現像法

現像液中の現像主薬が潜像核を還元することにより、 AgBr(I) 粒子中の Ag^+ が潜像核に供給されることで現像銀を形成する現像法

➡ 潜像核に供給される Ag^+ は潜像核のある AgBr(I) 結晶内の Ag^+ 量に制限される

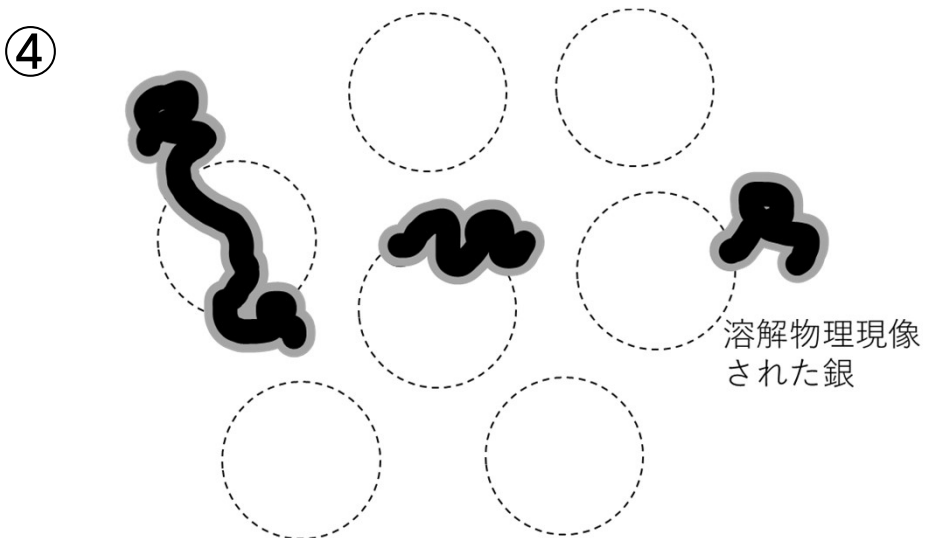
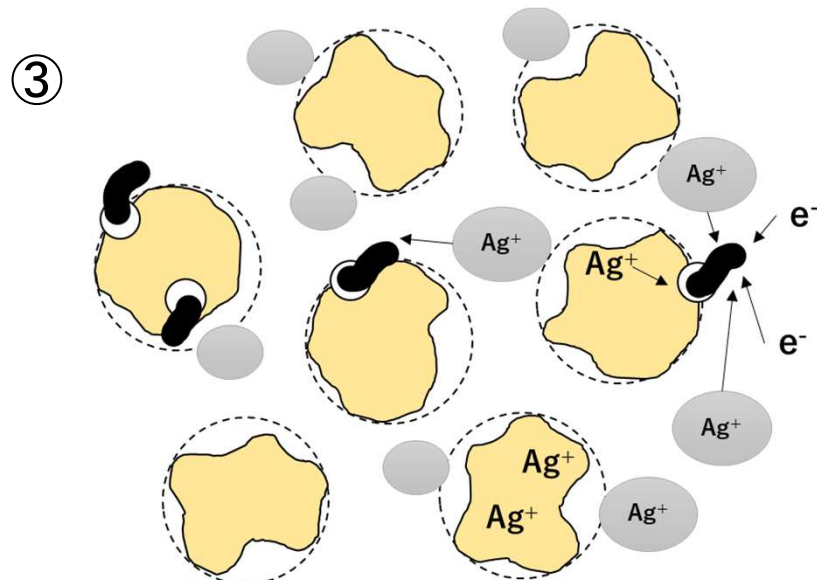
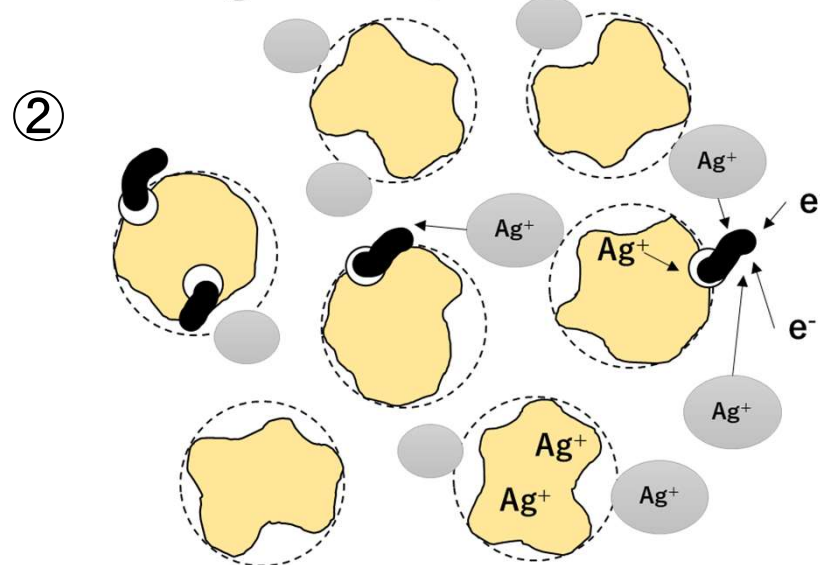
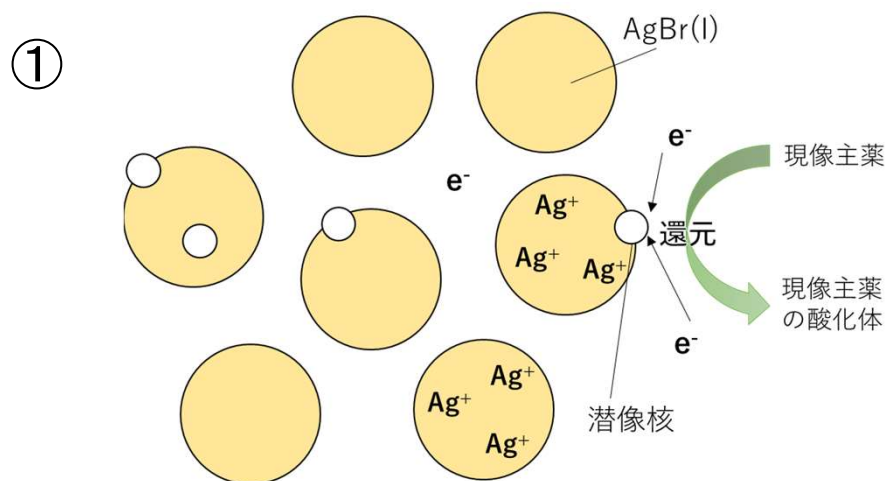


M-AA現像液を使用

溶解物理現像法 (post-fixation physical development)

亜硫酸塩を含む現像液に溶解されたAgBr(I)結晶中のAg⁺が潜像核や現像銀に供給される現像法

➡ 潜像核に供給されるAg⁺はAgBr(I)結晶内のAg⁺量に制限されない



現像液変更による ^{241}Am α 線 光学輝度の評価

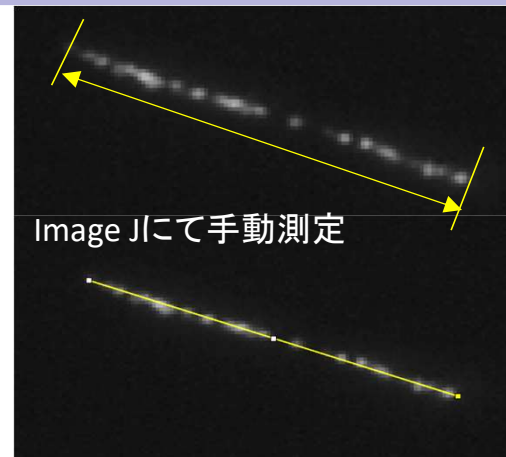
乳剤層厚 約 5 μm

<Fog density>

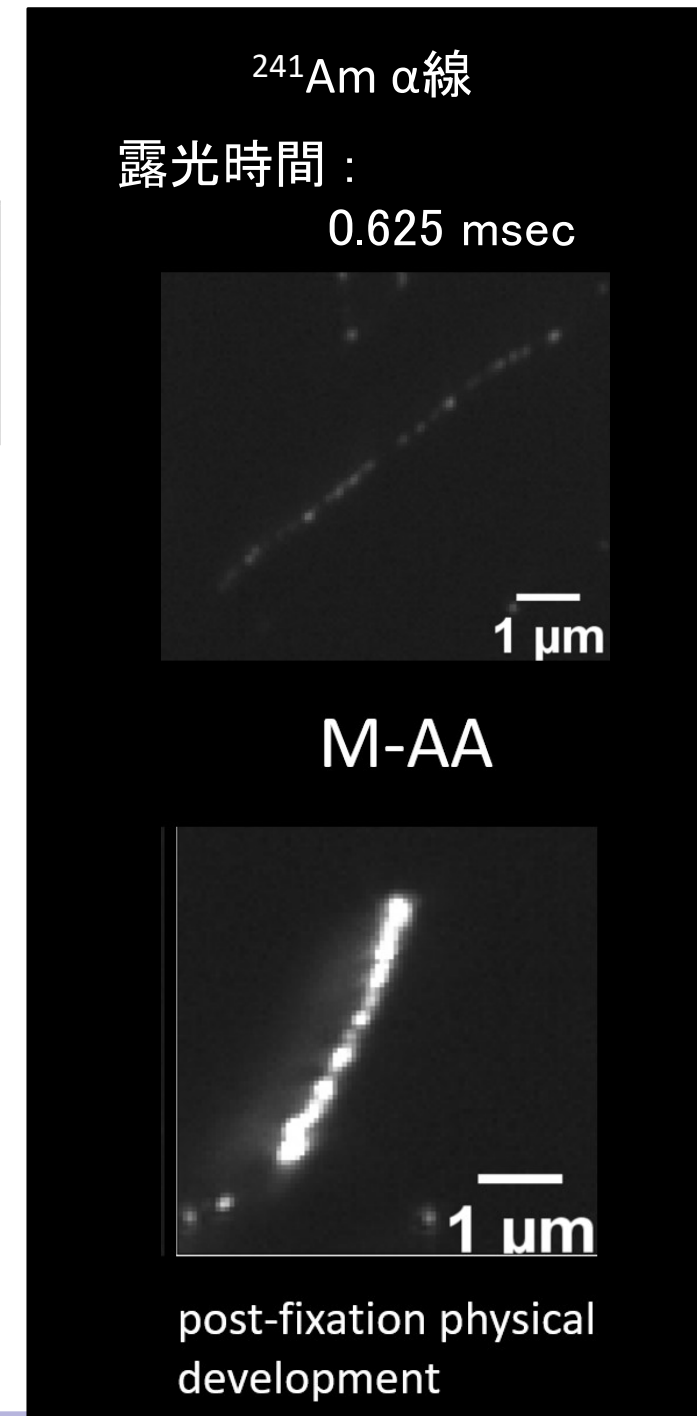
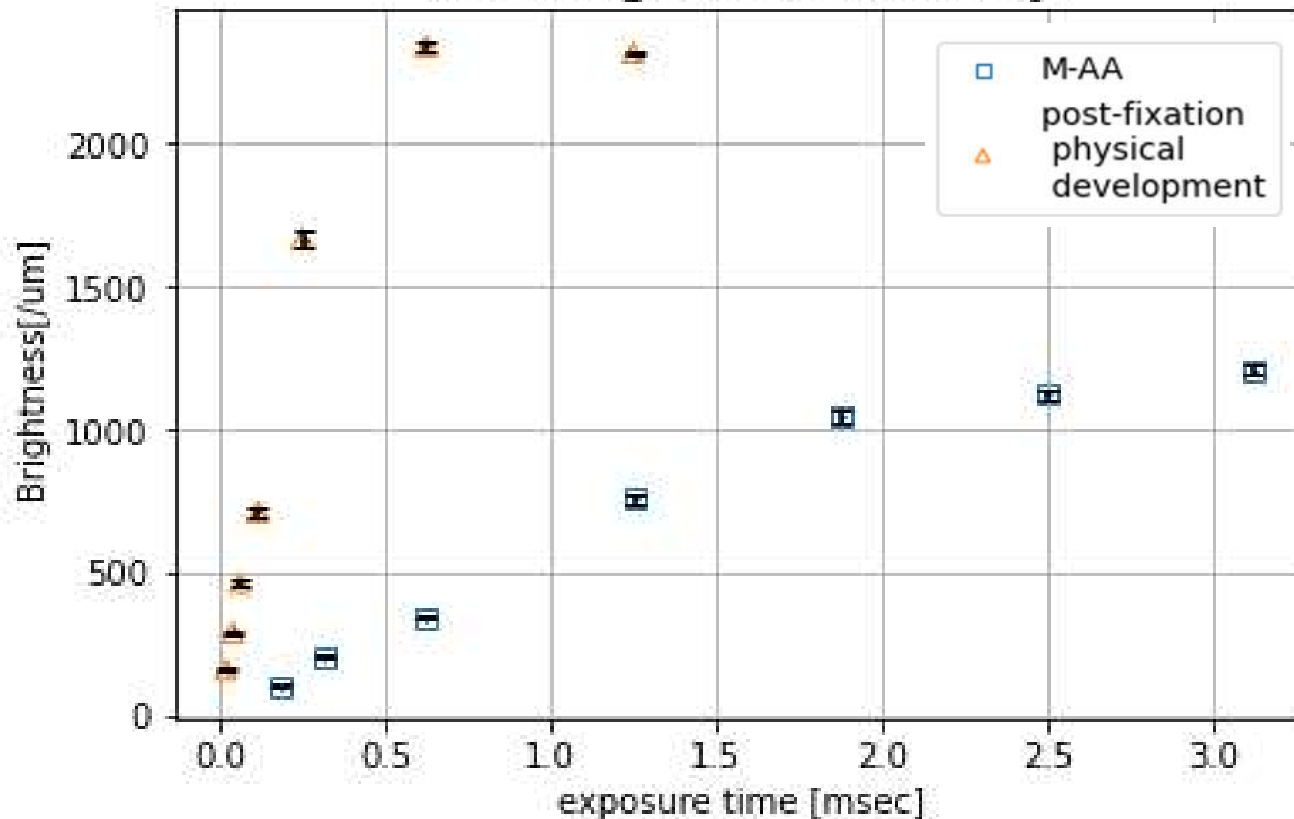
M-AA: 0.44 ± 0.04 [/($10\mu\text{m}$)³]

溶解物理現像法:

1.04 ± 0.06 [/($10\mu\text{m}$)³]

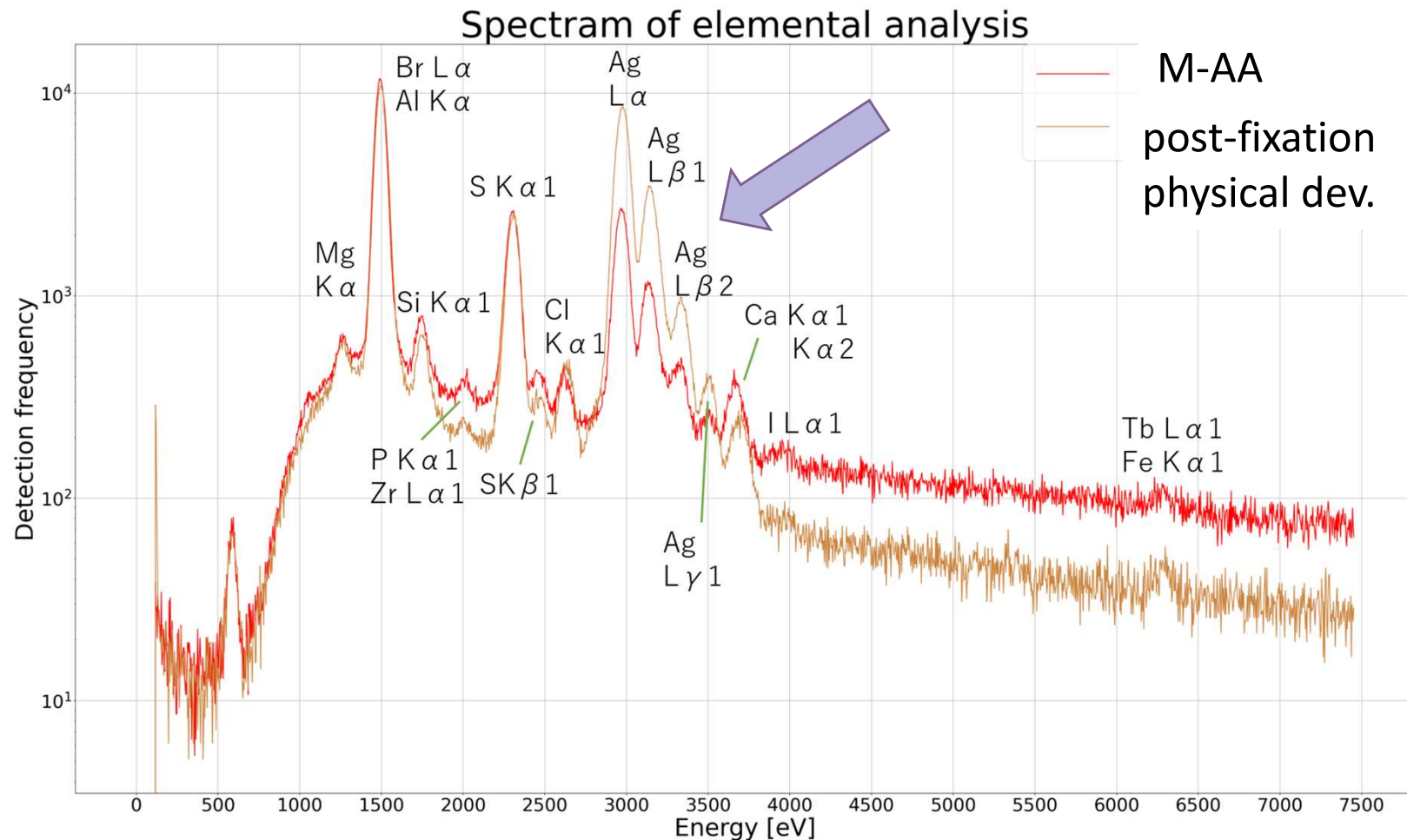
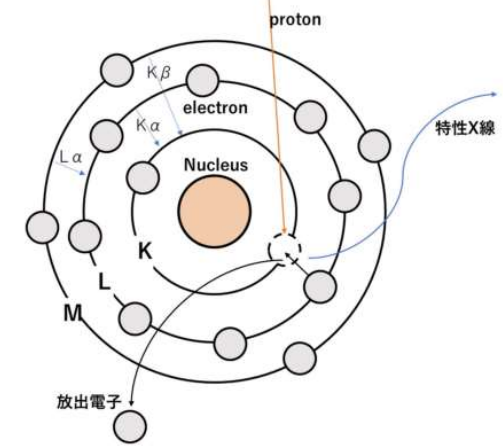


relationship between exposure and Brightness of α ray



PIXEによる現像銀の元素分析

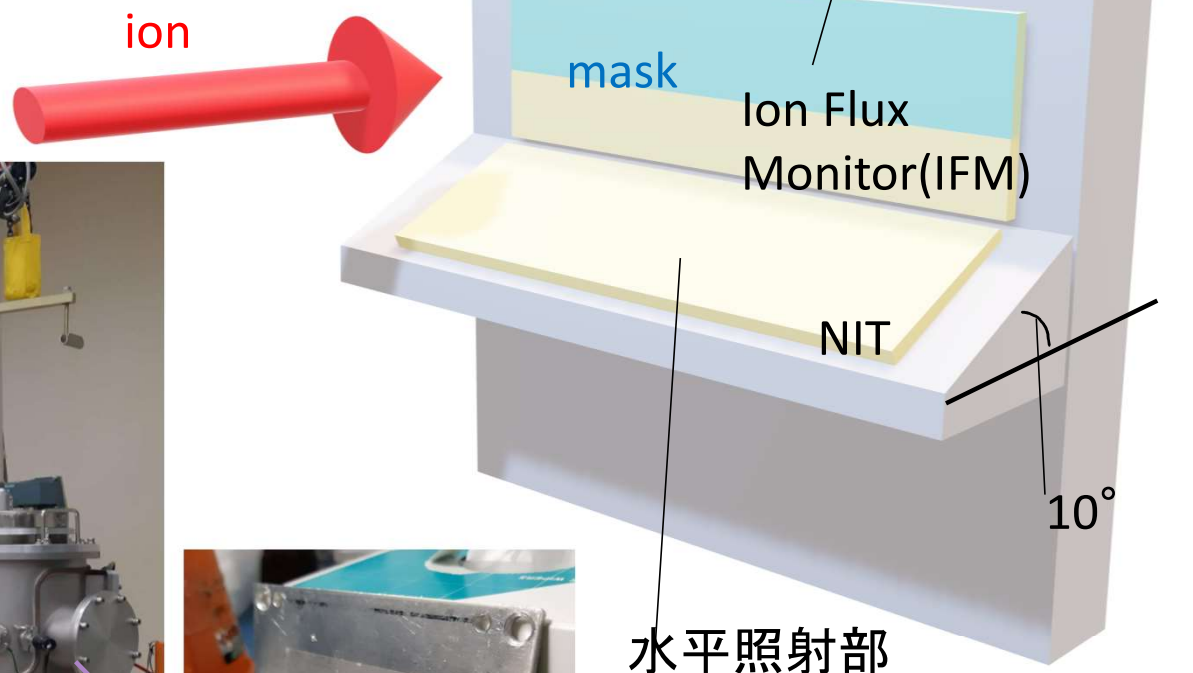
PIXE@神奈川大学による元素分析では
AgのスペクトルがM-AAの約2倍
→溶解物理現像法により現像銀量が増加



本質的な飛跡輝度向上の理解には現像銀の構造を見る必要がある

低速炭素イオン照射

名古屋大学先端技術共同研究施設
イオン注入装置



照射イオン Carbon 30 keV

設定Dose量: $2 \times 10^7 / \text{cm}^2$

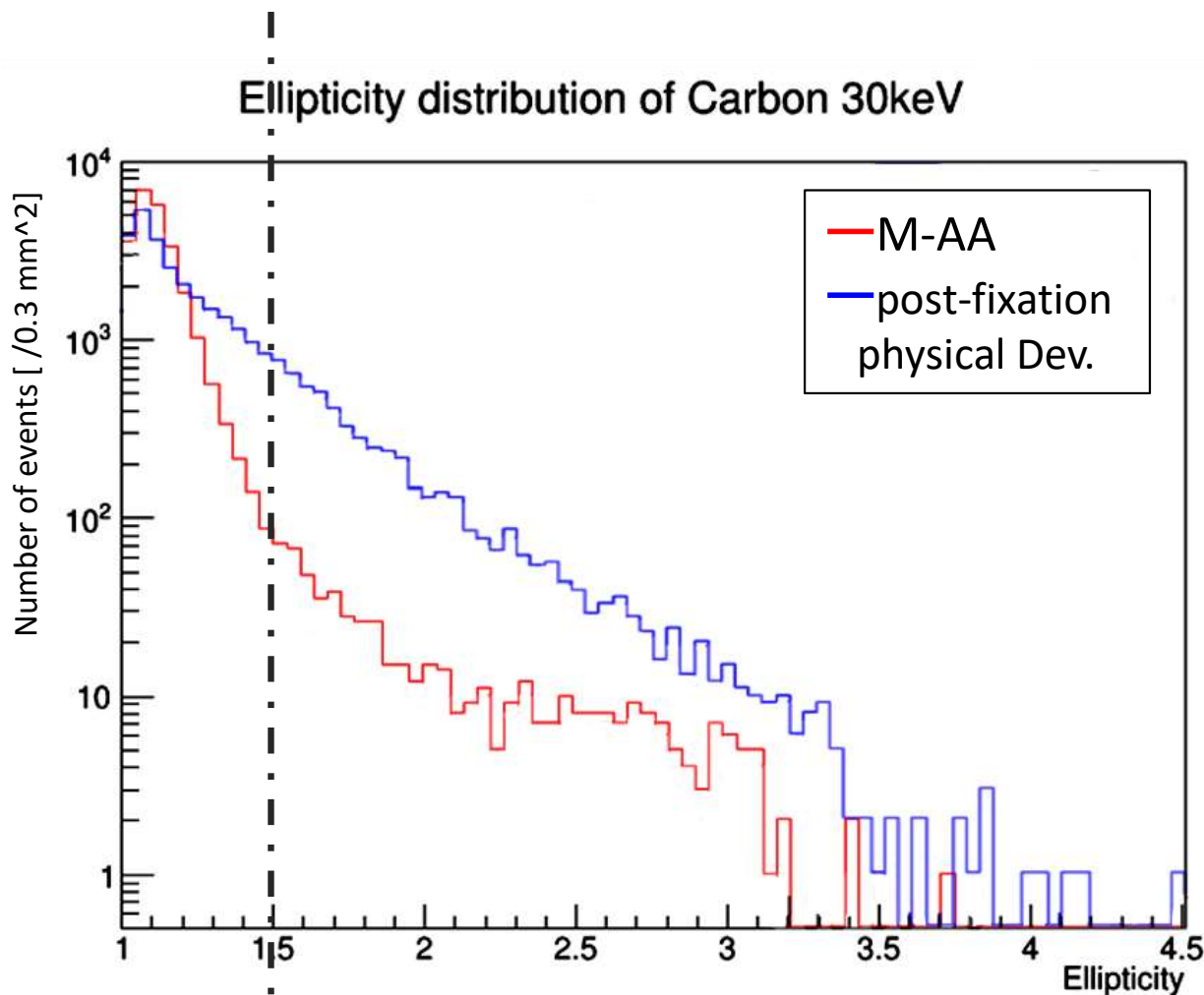
ビーム電流: 3.8 nA

乳剤層厚 約 5um

IFM測定から算出した
水平照射部の照射量:

$(0.62 \pm 0.1) \times 10^7 / \text{cm}^2$

30 keV Carbon の楕円率分布



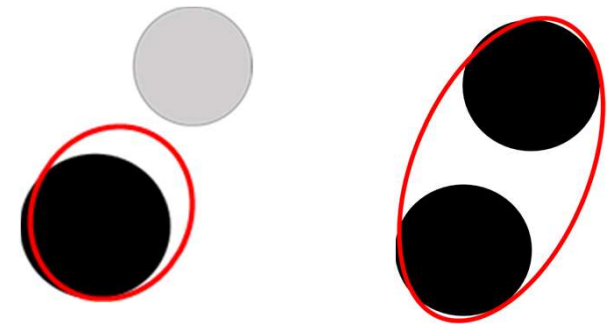
測定視野 0.3 mm²

露光時間

化学現像法(M-AA)... 0.094 msec

溶解物理現像法... 0.0059 msec

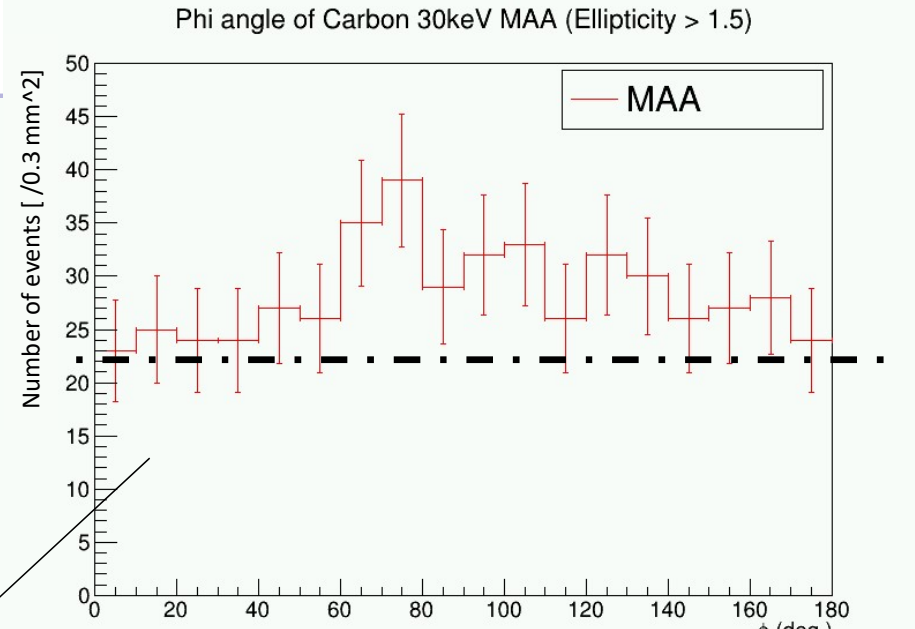
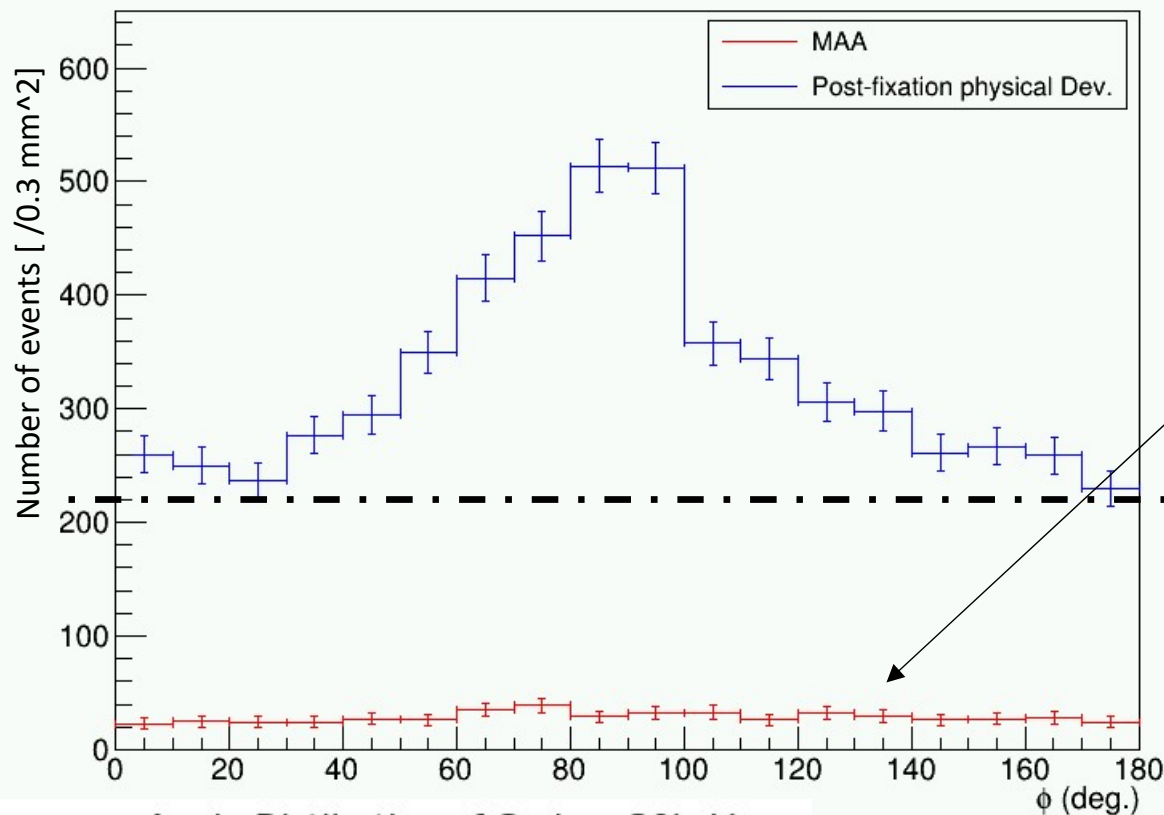
楕円率1.0の事象数の増加に比較し、
楕円率1.5以上の事象数の
事象数増加が顕著
→現像により方向情報が取得可能な
事象数が増えた



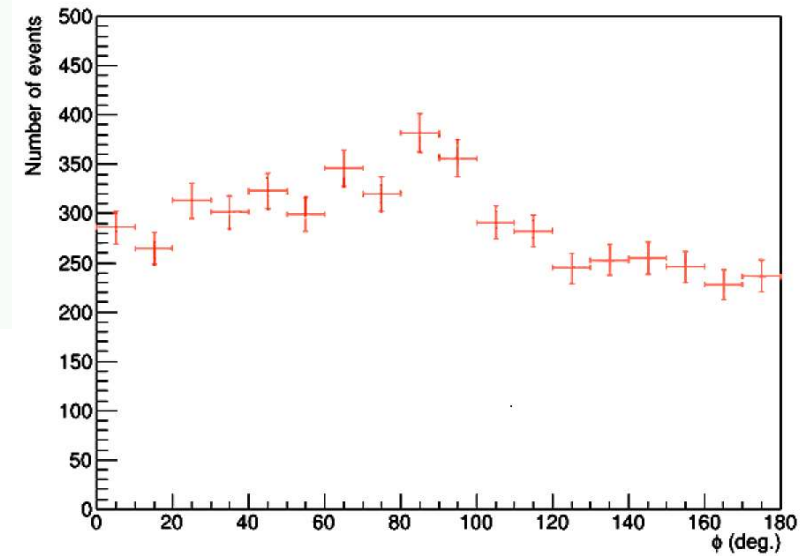
	M-AA		Post-fixation Physical dev.
Ellipticity > 1.5	$0.194 \pm 0.001 / (10 \text{ um})^2$	9.6 倍	$1.86 \pm 0.01 / (10 \text{ um})^2$
Ellipticity ≥ 1.0	$9.17 \pm 0.05 / (10 \text{ um})^2$	1.4 倍	$13.02 \pm 0.06 / (10 \text{ um})^2$

30 keV 炭素の角度分布

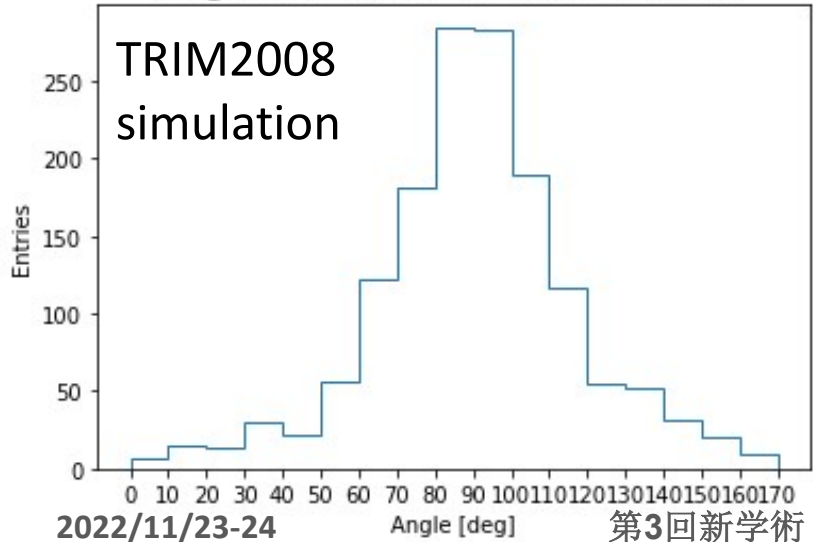
Phi angle of Carbon 30keV (Ellipticity > 1.5)



M-AA-scanning area x 9



Angle Distribution of Carbon 30keV

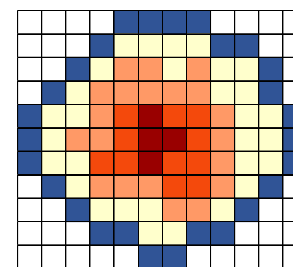


ピーク値/オフセット値の比率は優位に変わらない
→同スキャン視野でのシグナル数増加

乳剤層深さに対する飛跡の輝度

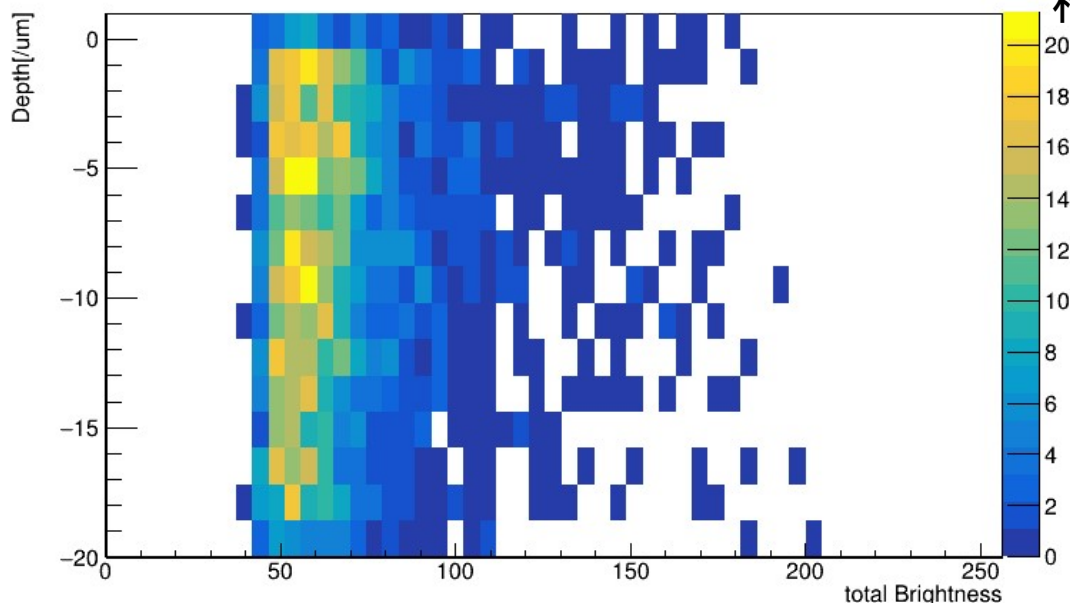
乳剤層厚 約20 μm

HIMAC@放射線医療研究所 He 600 MeV (150 MeV/n)



total Brightness
1飛跡中の
合計輝度

total Brightness vs Depth of M-AA



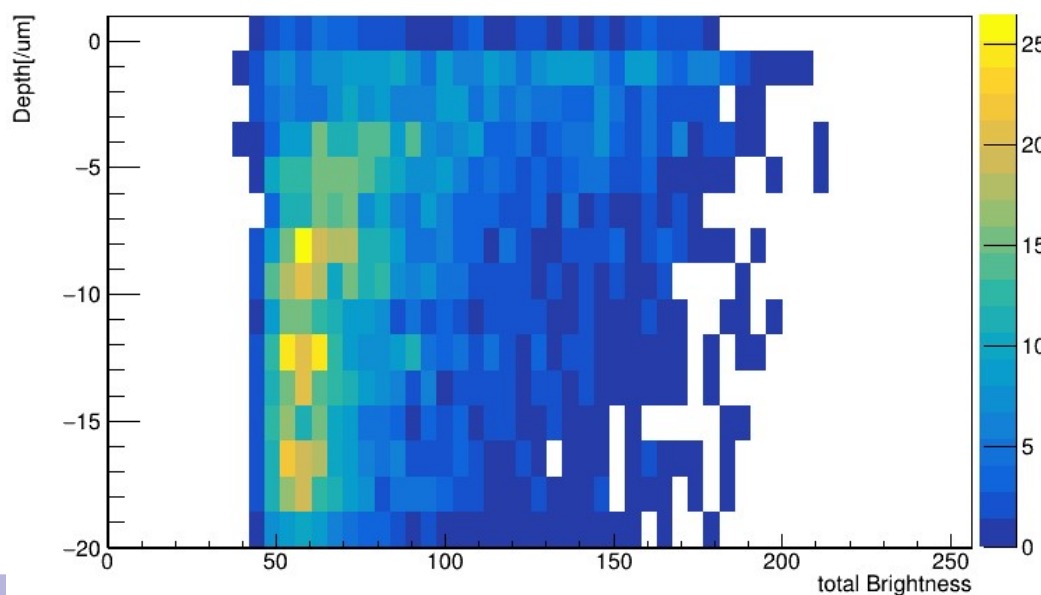
楕円率1.5以上の飛跡のtotal Brightness 分布の平均

	M-AA	溶解物理現像法
全層	2954	4141
0~5 μm	3182	5294
15~20 μm	2925	3406

溶解物理現像法では表面付近輝度の高い飛跡が分布している

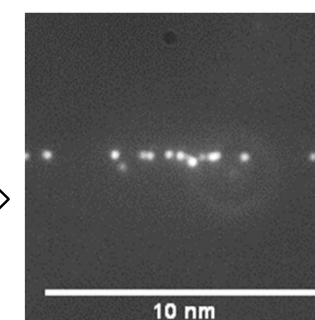
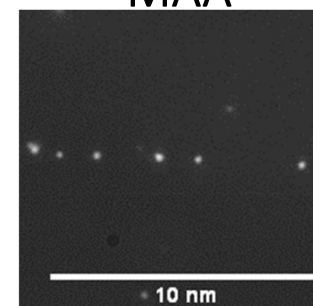
→表面付近とベース付近での輝度差

total Brightness vs Depth of post-fixation physical dev.

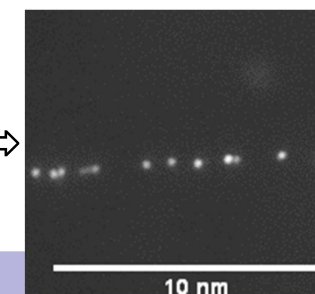
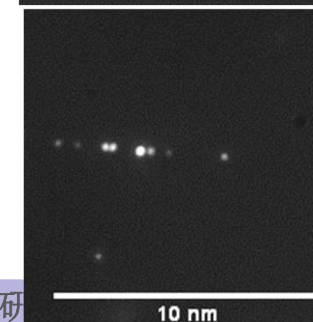


MAA

溶解物理現像法



⇐ top ⇒



⇐ bottom ⇒

溶解物理現像法における飛跡輝度の深さ依存への考察

・溶解物理現像法

先に現像される表面付近のフィラメントが成長

⇒現像銀表面積の大きい表面付近の現像銀に溶解された Ag^+ が付きやすい？

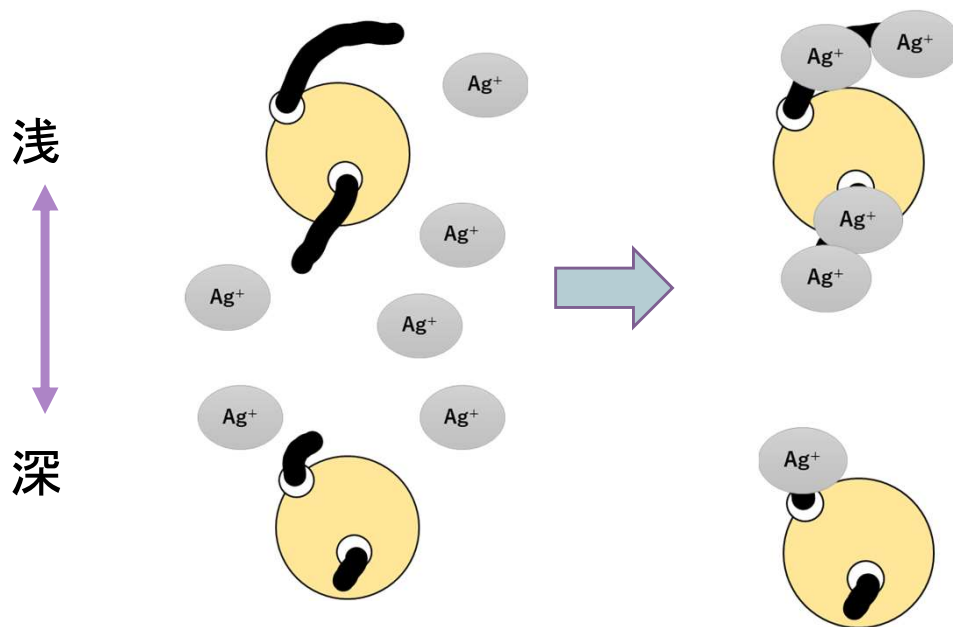


M-AA現像でフィラメントを満遍なく延ばしてから溶解物理現像法

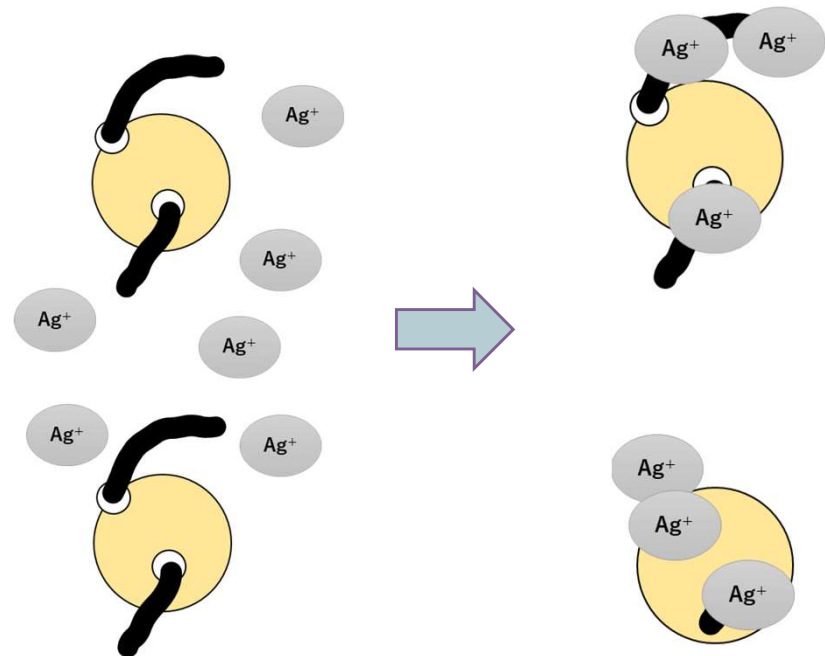
⇒表面積が同程度のフィラメントに Ag^+ を吸着させることで輝度の深さの非一様性を減らせる？

2浴現像法

<溶解物理現像法>



<2浴現像法>



2浴現像法

1浴目

M-AA現像

10 min

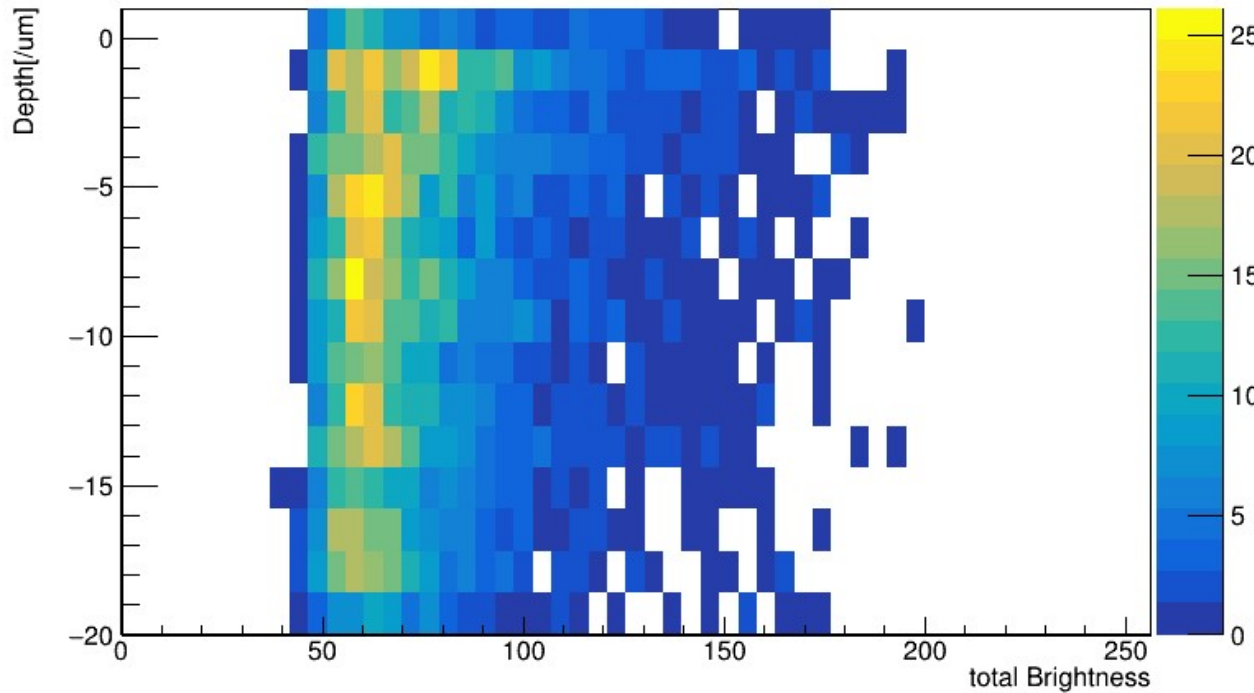


2浴目

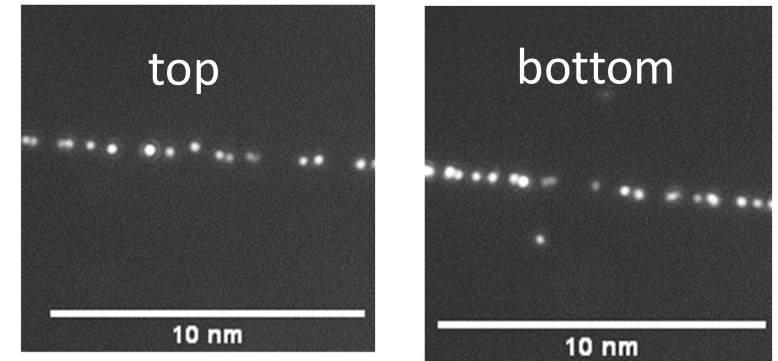
溶解物理現像法

5 min

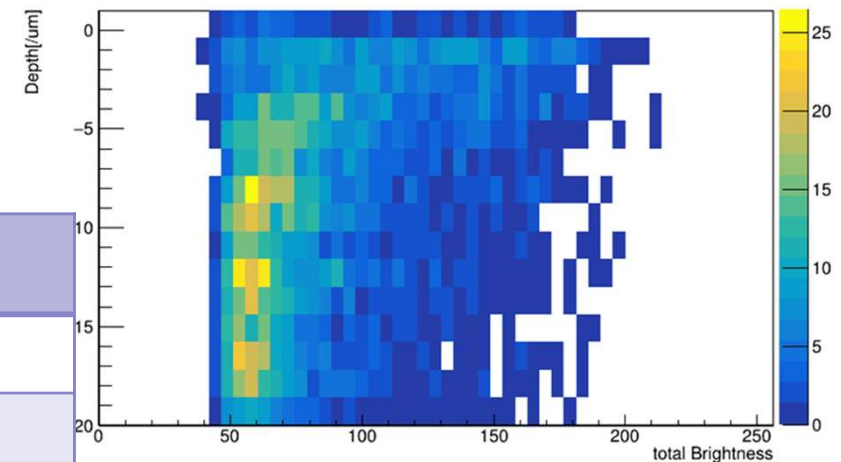
total Brightness vs Depth of 2bath dev.



2bath dev.



total Brightness vs Depth of post-fixation physical dev.



楕円率1.5以上の飛跡のtotal Brightness 分布の平均

	M-AA	溶解物理現像法	2浴現像
全層	2954	4141	3661
0~5um	3182	5294	3943
15~20um	2925	3406	3449

まとめ

10 GeV領域の暗黒物質方向探索: NIT中でCarbonに対して30 keV程度(100 nm)の飛跡
→楕円解析における30 keV Carbon検出性能の向上を現像法の変更によって目指す

▷溶解物理現像法における飛跡輝度の上昇

・楕円率1.5以上の飛跡のイベント数がM-AA現像に比較し溶解物理現像法で**9.6倍増加**
楕円率1.0以上のイベント数増加(1.5倍)に対して優位

・・・光学顕微鏡で観測されたシグナル数の増加

->10 GeVの暗黒物質の検出性能の上昇

暗黒物質探索における低エネルギー閾値化、方向探索可能領域の拡張

▷溶解物理現像法を用いた際の現像液の深さに対する輝度分布の偏り

→M-AA 10 min,溶解物理現像法 5 minの2浴現像法を用いた。

→2浴現像法においてM-AAに対し輝度が上昇し、溶解物理現像法よりも輝度の深さ依存が少ない。

展望

・実用的な現像法の開発の継続

→低Fog densityと高輝度かつS/Nの両立

・輝度を上昇させている要因の検証

→電子顕微鏡での現像銀観察

→表面状態の観察(硫化、銀量)

→カラーカメラ(開発中)での測定

) 局在表面プラズモン効果による光学応答の理解

・更なる検出性能の向上

→微結晶化.....現像法の変更は微結晶化による輝度が低いことに対する解決策となり得る