

# 超微粒子原子核乾板NITの性能評価

東邦大学  
佐伯加奈

# 超微粒子原子核乾板NIT

- ・ 原子核乾板

荷電粒子の飛跡を3次元的に捉えることが可能な銀塩写真フィルムゼラチン溶液中にAgBr(I)結晶が分散された構造

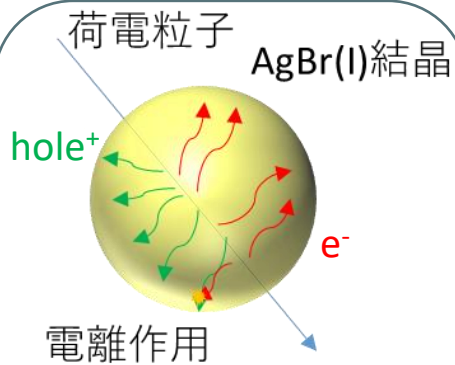
- ・ 超微粒子原子核乾板NIT(Nano Imaging Tracker)

AgBr(I)結晶を微粒子化(標準NIT：70nm)

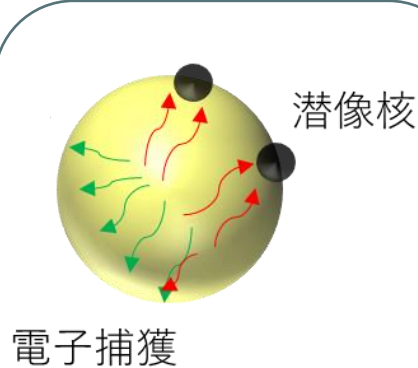


図1. NIT(Nano Imaging Tracker)

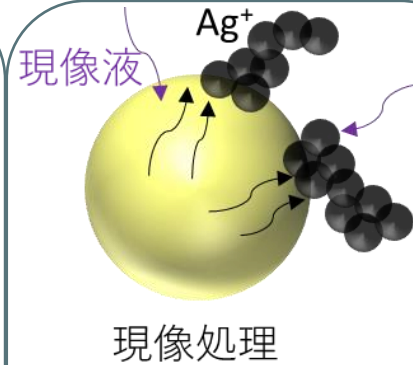
# 検出原理



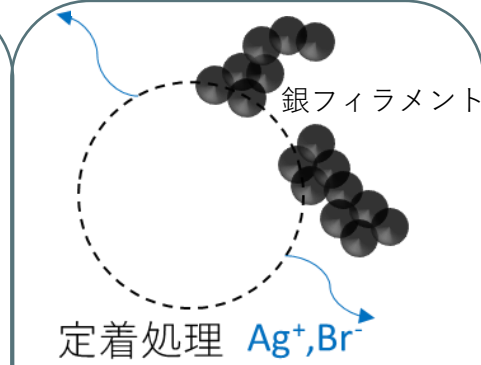
①電離作用によって電子が励起  
励起電子数  $\propto$  結晶に落とされたエネルギー



②励起電子が捕獲  
結晶内の格子間銀イオンと結合  
銀原子が生じる  
①②を繰り返して潜像核が生成



現像処理により、  
潜像核に電子が供給  
可視サイズのフィラメント状に成長



定着処理により、  
AgBr(I)結晶は溶解  
成長した銀フィラメントのみが残る  
現像銀として観察可

# 研究背景

励起電子数  $\propto$  結晶に落とされたエネルギー

$dE/dx$ の値を感度因子としてきた( $\beta=v/c \sim 1$ )

しかし、

暗黒物質は $\beta \sim 10^{-3}$

$\beta \sim 10^{-3}$ と $\beta \sim 1$ では阻止能のメカニズムが異なる

同じ $dE/dx$ として扱って良いか 従来の検出原理が暗黒物質に適用できるのか

バックグラウンド( $\beta \sim 10^{-1}$ )：検出器中の $^{14}\text{C}$ の $\beta$ 崩壊による電子事象

シグナルとバックグラウンドで飛跡形成に何か違いがないだろうか？

感度に差をつけられる可能性有？

NITの基礎特性理解

# 研究目的

## <結晶1個に対する結晶感度のdE/dx依存性>

励起電子数 $\propto$ 結晶に落とされたエネルギー

$\beta \sim 10^{-3}$ と $\beta \sim 1$ では阻止能のメカニズムが異なる

→従来の検出原理が暗黒物質に適用できるのか

## <電子事象の除去>

低温下で40nm-NITと20nm-NITで電子感度が下がることがわかっている<sup>[1]</sup>

->①低温での運用

②事象選別での除去

->3個以上の現像銀が連なった事象(中性子-原子核反応)を信号事象と定義

S(中性子-原子核反応 @産総研 単色中性子ビーム)/N(<sup>241</sup>Amによる電子事象)

比が向上するかどうか

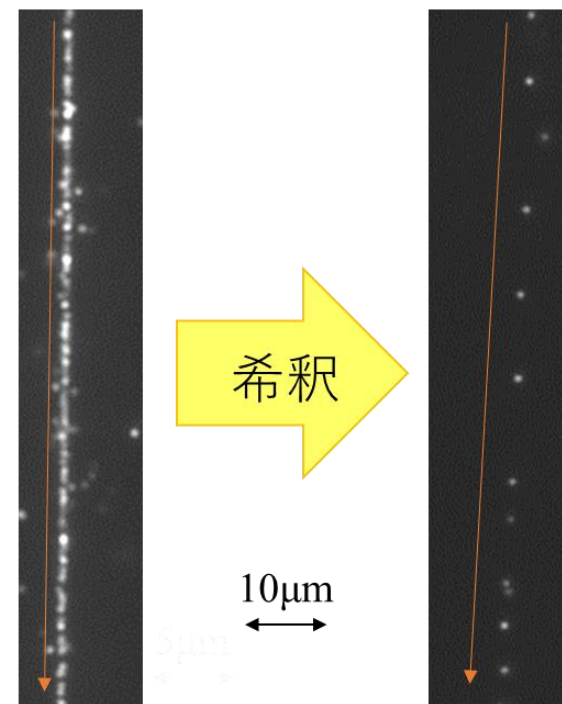
# 結晶感度のdE/dx依存性

Fe :500MeV/n  
@放射線医学総合研究所重粒子がん治療装置(HIMAC)

	E[MeV]	dE/dx [keV / 10nm in Crystal]	
Carbon	3480	0.51	疑似BG
Carbon	0.03	0.76	疑似信号
<sup>241</sup> Am alpha ray	3	1.35	
Argon	20000	3.77	
Iron	28000	7.46	

信号：NIT中のCNO反跳

BG：ゼラチン中の<sup>14</sup>Cのβ崩壊による電子事象

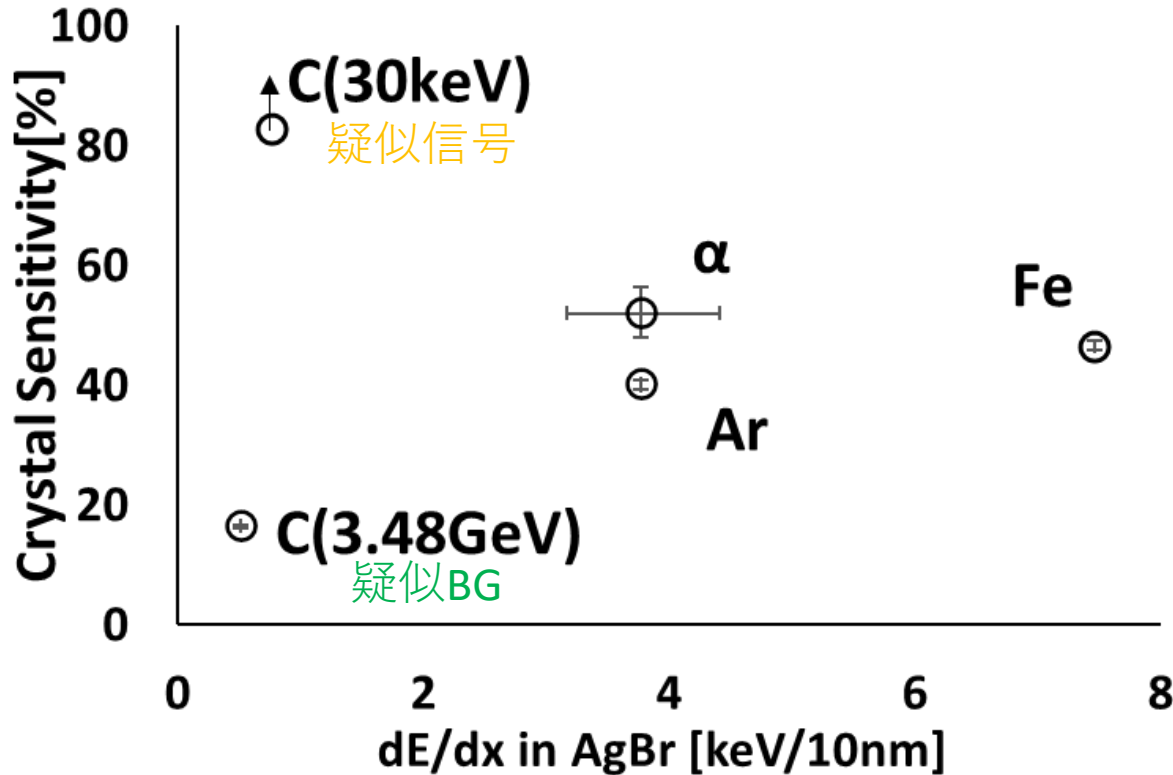


ゼラチン溶液で希釈し、  
結晶間距離を広げた乳剤を作製

結晶感度=現像銀数/結晶数(乳剤密度から算出)

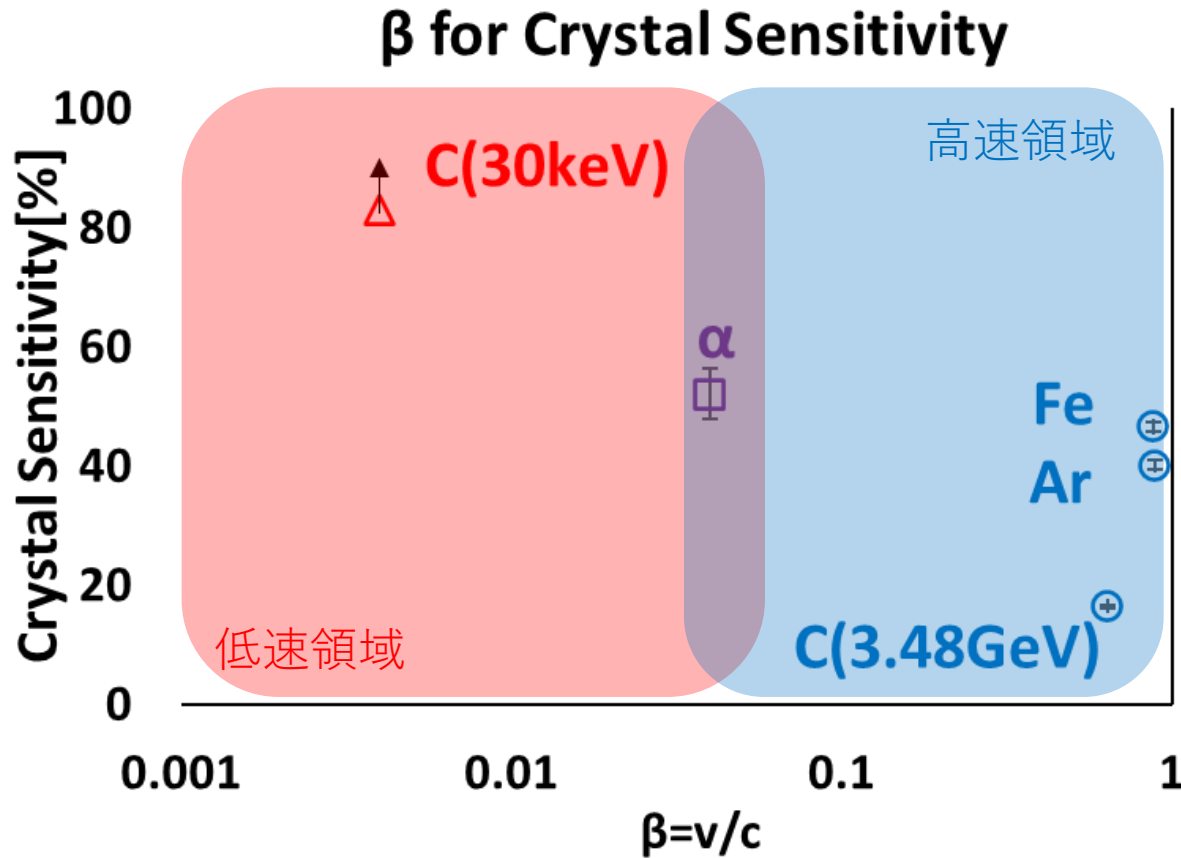
# 結晶感度のdE/dx依存性

## Energy Loss for Efficiency



結晶感度のdE/dx依存性は認められない  
30keV CのdE/dxは小さいが、  
結晶感度は80.7%以上と最も高い結晶感度

# 結晶感度の $\beta$ 依存性



(1)  $\beta$ の影響は大きい  
 $dE/dx$ の評価では不十分

$\beta \sim 10^{-2}$ を境に

(1) 低速領域  
(2) 高速領域

(2)  $\beta$ の影響は  
それほど大きくない

で結晶感度の振舞いは異なる



# 考察

<阻止能  $S = dE/dx$ >

$$S = S_e + S_n$$

$S_e$  : 電子的阻止能

物質中の電子を励起・電離することによるエネルギー損失

$S_n$  : 核的阻止能

物質中の束縛電子を含む原子核の反跳によるエネルギー損失

高速 : Betheの阻止能	$v > 10^{-1}$	C(3.48GeV), Ar, Fe	$S \approx S_e$ ※
中間 : Betheの阻止能+内殻補正	$v \sim 10^{-2}$	$\alpha$ 線	$S = S_e + \text{補正項}$
低速 : LSSの阻止能	$v < 10^{-2}$	C(30keV)	$S = S_n + S_e$

※核的阻止能は電子的阻止能の1/1000程度の値となり無視できる

阻止能のメカニズムの違いが飛跡形成にどのような影響を与えているかは現状不明

30keV C(疑似信号)と3.48GeV C(疑似BG)で結晶感度に差がある

発生電子数 :  $(1.8 \pm 0.5) \times 10^6$  /kg/day

->検出数をO(1)/kg/day程度まで低減させたい

# 研究目的

<結晶1個に対する結晶感度の $dE/dx$ 依存性>

励起電子数 $\propto$ 結晶に落とされたエネルギー

$\beta \sim 10^{-3}$ と $\beta \sim 1$ では阻止能のメカニズムが異なる

→従来の検出原理が暗黒物質に適用できるのか

## <電子事象の除去>

低温下で40nm-NITと20nm-NITで電子感度が下がることがわかっている<sup>[1]</sup>

->①低温での運用

②事象選別での除去

->3個以上の現像銀が連なった事象(中性子-原子核反応)を信号事象と定義

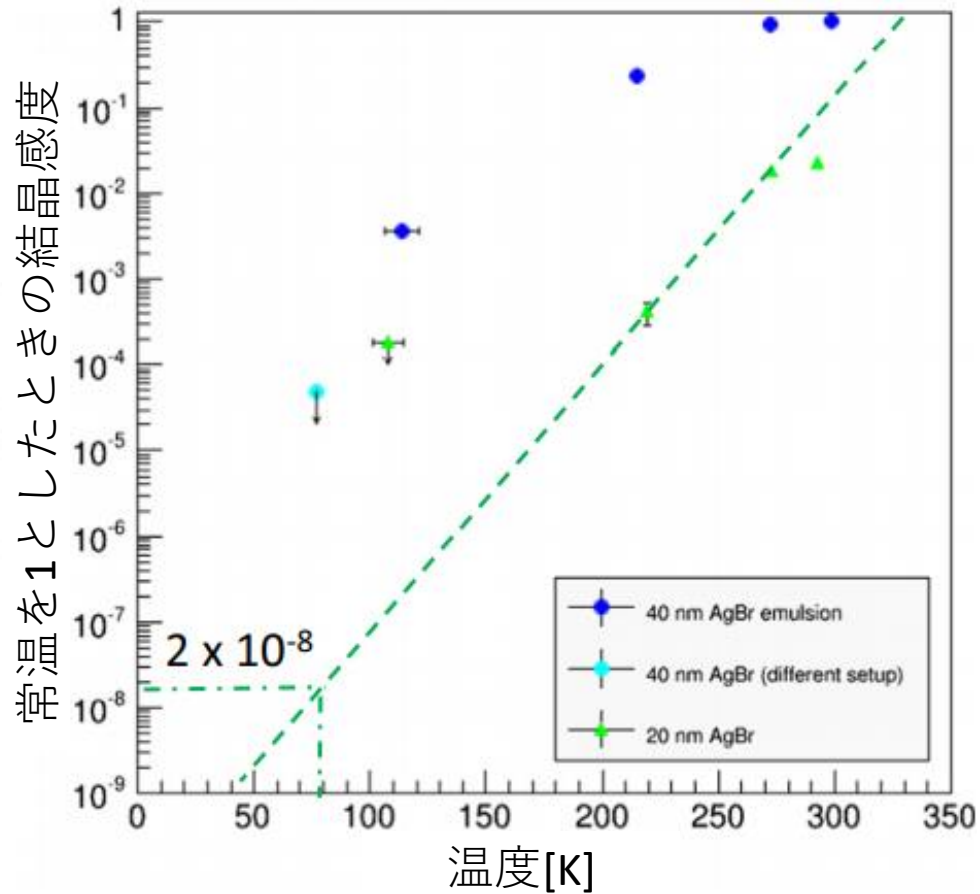
$S$ (中性子-原子核反応 @産総研 単色中性子ビーム)/ $N$ ( $^{241}\text{Am}$ による電子事象)

比が向上するかどうか

# 電子に対する結晶感度の温度依存性

1つの電子が1つの現像銀を生成するとして、  
 感度 = 計測した現像銀数 / 期待される電子数  
<sup>241</sup>Am線源使用(2.9MBq)

NIT-40, NIT-20の電子に対する結晶感度の温度依存性



常温に対する-50°C付近の感度

- 40nm : ~10<sup>-1</sup>
- 20nm : ~10<sup>-3</sup>

方向情報取得->2結晶貫通以上を要求  
 検出効率->感度の2乗

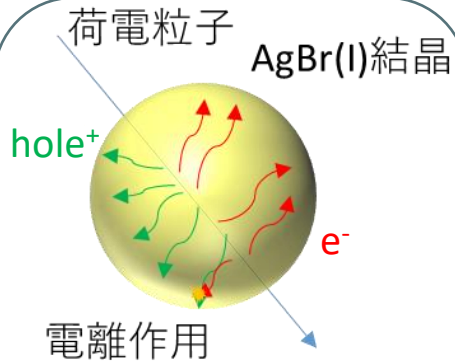
- 40nm : ~10<sup>-2</sup>
- 20nm : ~10<sup>-6</sup>

- ・結晶サイズ依存性がある
- ・現在の評価パラメータを使用していない

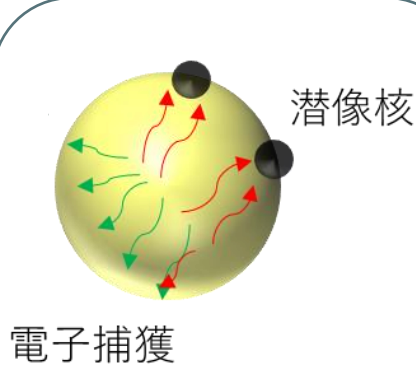
70nm-NITの感度評価とシグナルに対する感度の評価

# 検出原理

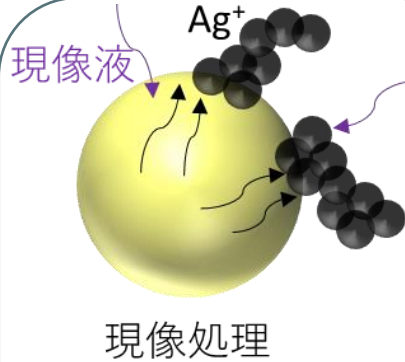
低温下では格子間銀イオンの移動が制限されるため、  
潜像核が生成されにくくなる



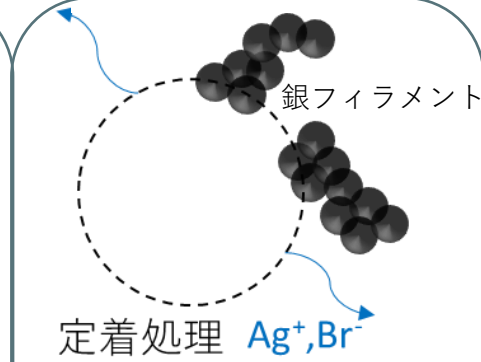
①電離作用によって  
電子が励起  
励起電子数  $\propto$  結晶に  
落とされたエネルギー



②励起電子が捕獲  
結晶内の格子間銀イ  
オンと結合  
銀原子が生じる  
①②を繰り返す  
潜像核が生成



現像処理により、  
潜像核に電子が供給  
可視サイズのフィラ  
メント状に成長



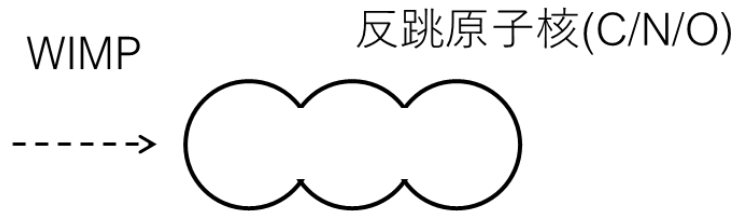
定着処理により、  
AgBr(I)結晶は溶解  
成長した銀フィラメ  
ントのみが残る  
現像銀として観察可

# 事象選別

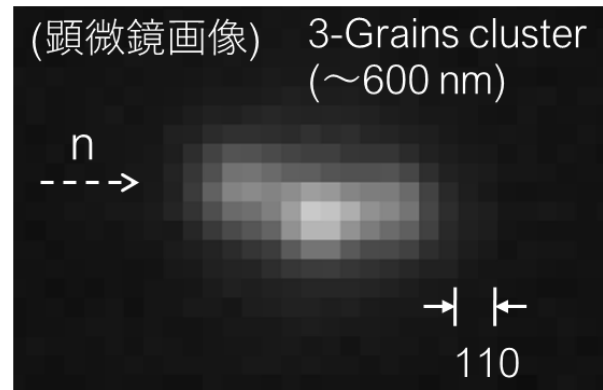
WIMP-原子核反応による反跳原子核を信号事象  
事象選別の第一歩として、

3個以上の現像銀が連なった事象を信号事象として定義

WIMP事象による反跳原子核の模式図



中性子事象による反跳原子核



畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いて画像データ(PTSで撮像)から特徴量を抽出し、その特徴量を用いた事象選別法を使用

# 低温による検出効率

<信号(中性子-原子核反応による反跳原子核事象)>

照射温度	相対検出効率※
-25°C	-
-50°C	58%

※中性子フルエンスを考慮した-25°Cに対する-50°Cの相対的な検出効率  
2021年物理学会秋季大会  
大島さんのスライドより抜粋

<BG( $^{241}\text{Am}$   $\gamma$ 線による電子事象)>

照射温度	検出効率
RT	$2.8 \times 10^{-2} \%$
-25°C	$2.2 \times 10^{-3} \%$
-50°C	$8.0 \times 10^{-5} \%$

**-50°CのS/Nは-25°CのS/Nの約16倍**

# まとめ

超微粒子原子核乾板NITの基礎特性理解と暗黒物質探索に向けて結晶感度のdE/dx依存性を評価した

→dE/dxのみではなく入射粒子速度も考慮する必要有

→30keV C(疑似信号)と3.48GeV C(疑似BG)で結晶感度に差がある

支配的な背景事象はゼラチン中の $^{14}\text{C}$ による電子事象と期待

発生電子数： $(1.8 \pm 0.5) \times 10^6 / \text{kg/day}$  →  $O(1) / \text{kg/day}$

除去方法：低温で運用 + 事象選別

-50°CのS/Nは-25°CのS/Nの約16倍

<展望>

セットアップ上可能である-80°CでのS/Nの評価

結晶感度の絶対値の評価

反跳原子核事象と電子事象の感度特性の違いの理解