

超微粒子原子核乾板NITの  
飛跡形成シミュレーションと  
AgBr(I)結晶の飛跡形成のエネルギー閾値評価

○佐伯加奈,中竜大,白石卓也,梅本篤宏<sup>A</sup>,小林龍太<sup>A</sup>,轟祈<sup>A</sup>,久下謙一<sup>B</sup>,  
佐藤修<sup>C</sup>,小平聡<sup>D</sup>,星野靖<sup>E</sup>

東邦大理, 名大理<sup>A</sup>, 千葉大アイソトープ<sup>B</sup>, 名大IMASS<sup>C</sup>, 放射線医学総合研究所<sup>D</sup>,  
神奈川大理<sup>E</sup>

# 検出対象 WIMPs

- WIMPs(Weakly Interaction Massive Particles)

非相対速度,相互作用が弱い性質

宇宙初期の高温プラズマ中での生成・消滅の熱的平衡状態からの残存粒子

->暗黒物質の対消滅断面積  $\approx 2.8 \times 10^{-26} \text{cm}^3 / \text{s}$

->質量範囲：GeV～TeV

一致  
(70桁)

WIMPs  
Miracle

電弱相互作用の対称性の破れに関わる素粒子

LSP(Lightest Supersymmetric Particle)

余剰次元模型による第一励起粒子

質量範囲：数100GeV

->暗黒物質の有力候補の1つ

# NEWSdm実験

- Nuclear Emulsions for WIMPs Search-directional measurement

<検出対象>

WIMPs

<検出方法>

反跳原子核の方向分布の非対称性を検出

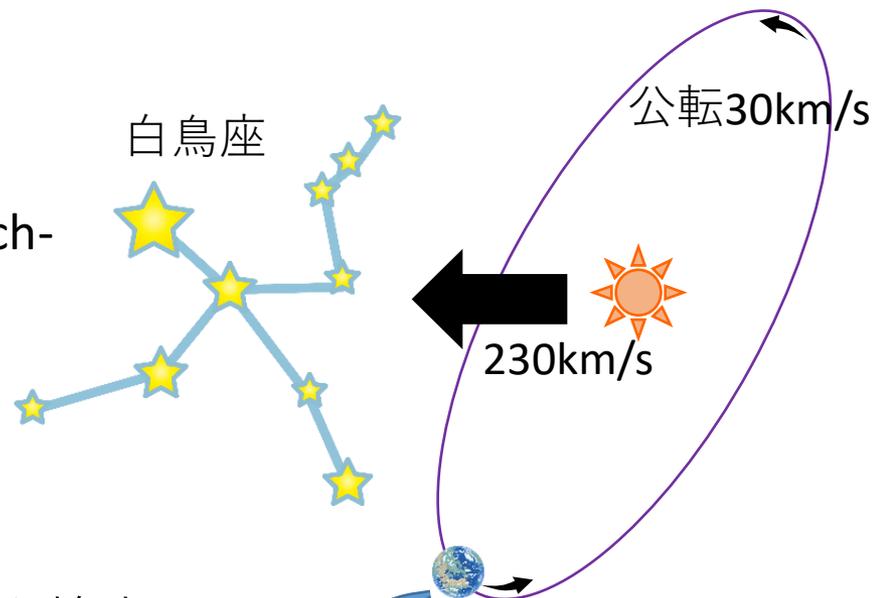
->ベクトル量のため、速度分布に対してより感度を持つ

<検出器>

超微粒子原子核乾板NIT

一般的な素粒子物理学では、  
ほぼ光速の粒子が対象

WIMPs  
 $\beta \sim 10^{-3}$  (300km/sec)  
ド・ブロイ波長  
約1fm



背景事象  
放射性同位体や環境中性子由来事象  
ゼラチン中の $^{14}\text{C}$ による電子事象(数keV以下(止まりがけの電子に感度を持つため), 100nm)

シグナル

検出器中の原子核(C,N,Oを想定)の反跳飛跡  
2結晶貫通した(方向情報取得のため)約100nmの飛跡

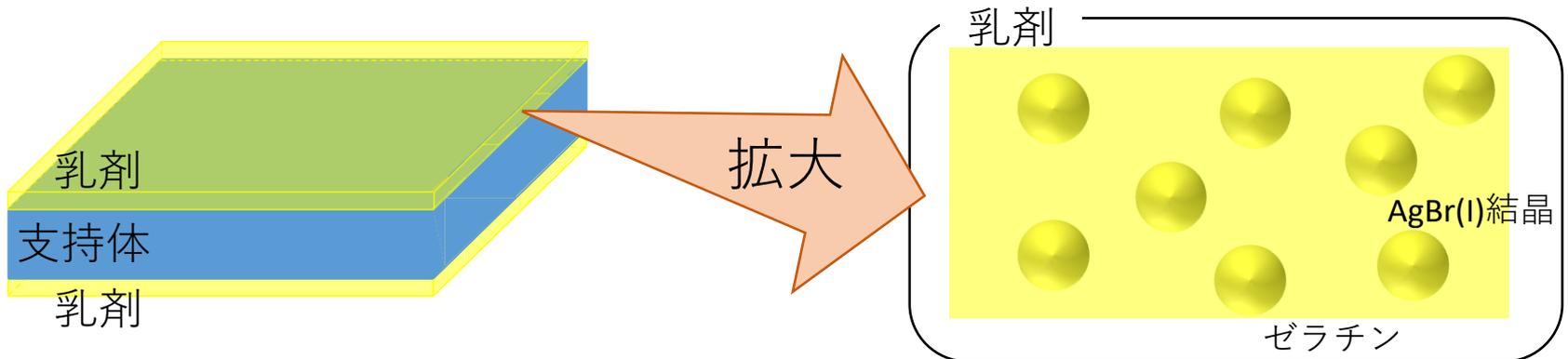
# 超微粒子原子核乾板(NIT)

ゼラチン中に60nmサイズ(40~80nmで可変)のAgBr(I)結晶を3000個/ $\mu\text{m}^3$ の高密度で分散  
(従来の原子核乾板のAgBr(I)は200nm)

AgBr(I)結晶1個1個がナノ半導体の荷電粒子センサーとして飛跡を形成

AgBr(I)の感度は可変(増感方法、現像方法、結晶サイズ等に依存)

30keVの炭素イオンで方向感度は実証済み->固体検出器として圧倒的な分解能の高さ



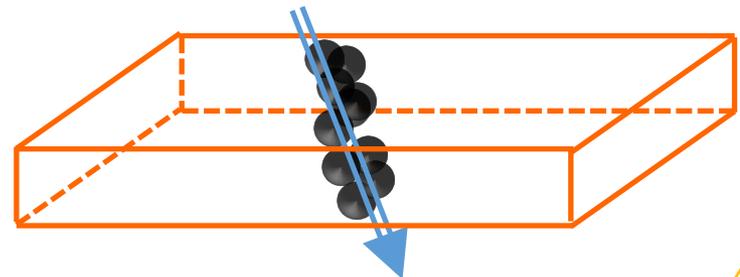
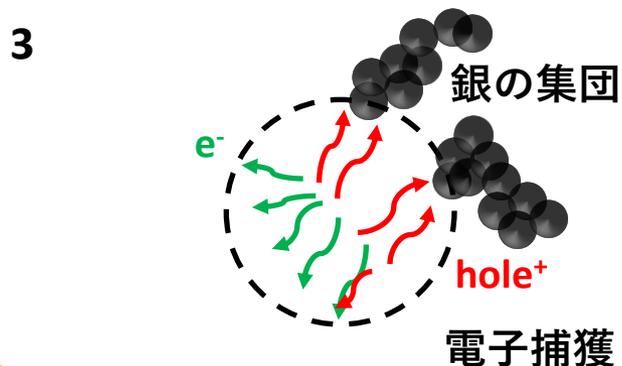
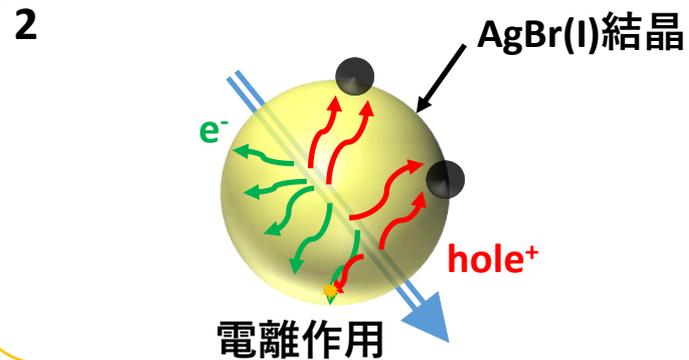
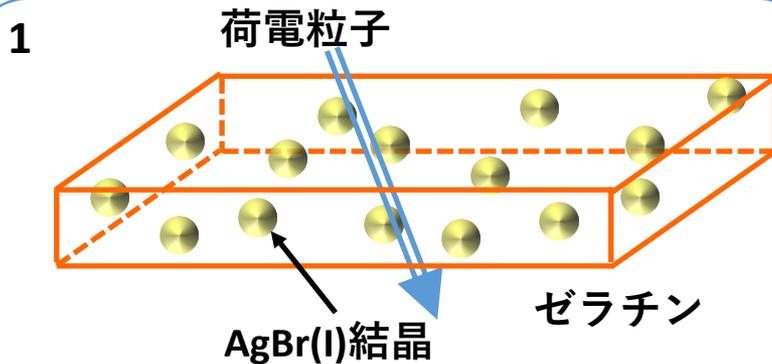
# 飛跡形成が行われるまで

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

2 励起電子が捕獲され、結晶内の格子間銀イオンと結合し銀原子が生じる(b)

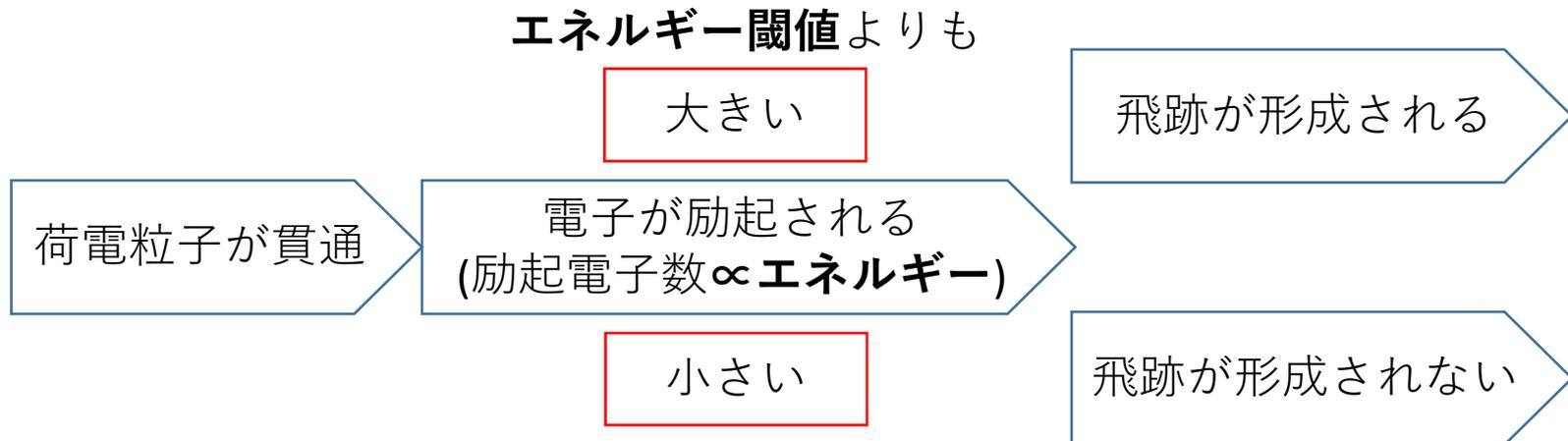
3 (a),(b)を繰り返す

4 銀の集団に成長し、現像銀の連なりが飛跡として観測される



# 目的

- 荷電粒子センサーとして飛跡を形成する AgBr(I)結晶 の理解  
量子感度の評価方法の確立・定量化  
統一された定義が存在しない  
量子感度の  $dE/dx$  依存性の評価  
量子感度から飛跡形成に必要なエネルギー閾値の見積もり



# 研究手順

## <理論値>

乾燥後の乳剤密度



平均貫通結晶数

$y_{theo} [/\mu\text{m}]$

比較

## <測定値>

$dE/dx$ の異なるイオンを照射



現像銀数密度(GD)

$y_i [/\mu\text{m}]$

誤差( $\sigma_i$ )は統計誤差

測定は落射顕微鏡(ハロゲンランプ光源)

$$X^2 = \sum \left( \frac{y_i - y_{theo}}{\sigma_i} \right)^2$$

の値が最小のときを

**量子感度**とし、

信頼区間90%

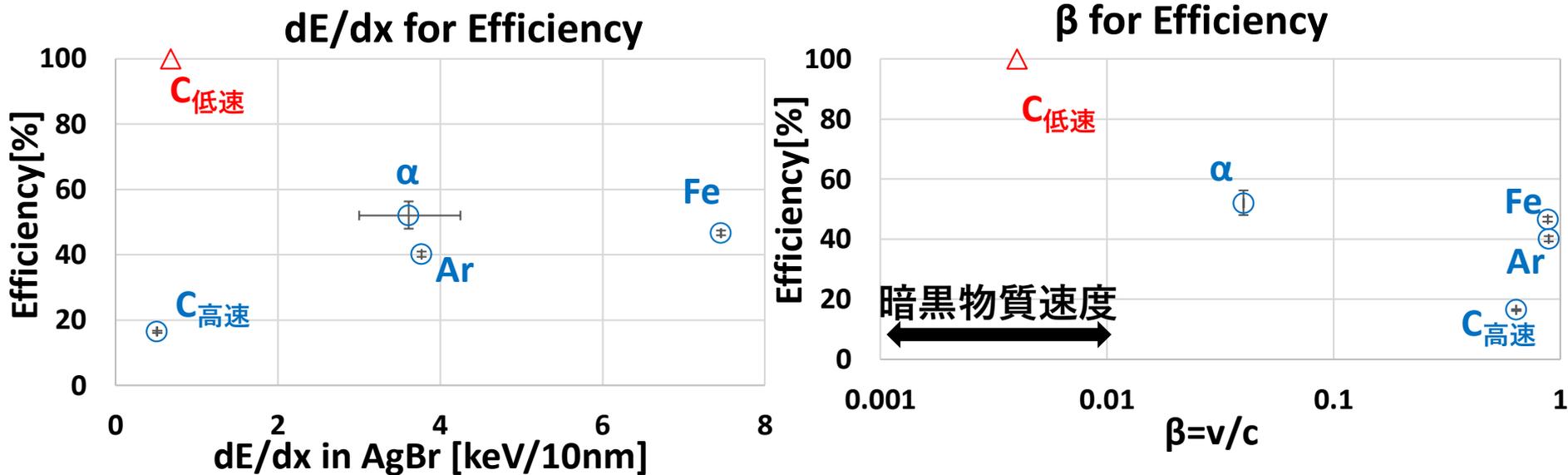
$$\text{量子感度} = \frac{\text{現像銀数}/\mu\text{m(GD)}}{\text{平均貫通結晶数}}$$

平均貫通結晶距離 ×  $dE/dx$   
から**エネルギー閾値**算出

	E[MeV]	$dE/dx$ [keV/10nm]
C <sub>高速</sub>	3480	0.51
$\alpha$	3	1.35
Ar	20000	3.77
Fe	28000	7.46
C <sub>低速</sub>	0.03	0.68

C<sub>低速</sub>は暗黒物質の反跳原子核を想定

# 結果 量子感度



量子感度の評価方法を確立

dE/dxが小さいにも関わらず、C<sub>低速</sub>の量子感度が最大となった

->量子感度には入射粒子速度が依存している可能性を示唆

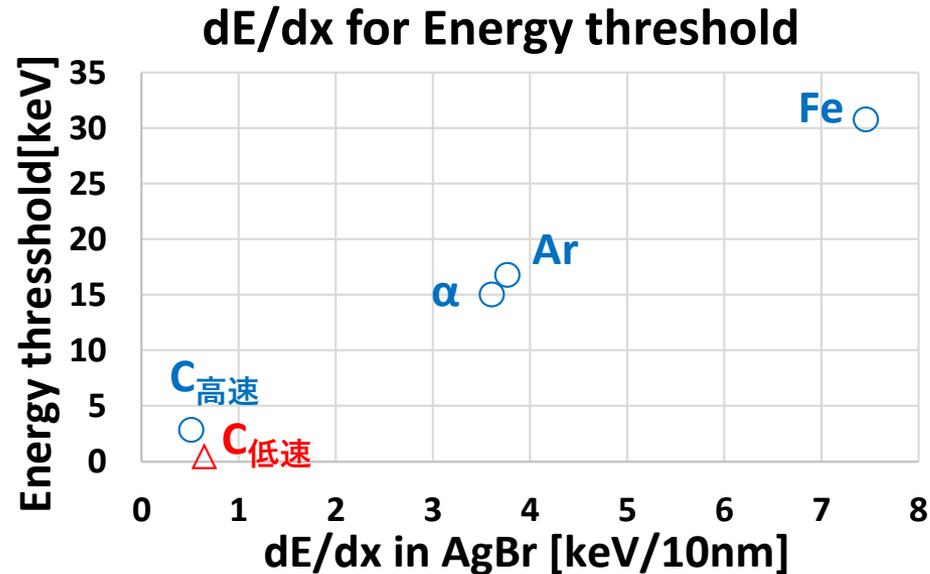
高速イオンは量子感度が50%で頭打ちになっている

NITは暗黒物質に対して十分な検出感度を持っている

既知の飛跡形成メカニズムには入射粒子速度は考慮されていない

->新しいメカニズムの考察が必要

# 結果 エネルギー閾値



※C<sub>低速</sub>は量子感度が100%であったため、>0keVとなり下限値のみの評価である

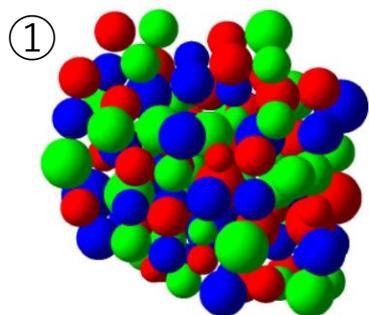
エネルギー閾値は一定であると仮定していたが、dE/dx依存性があることを見出した

S(反跳原子核)とN(電子)の差別化する指標としてのエネルギー閾値の価値を示唆

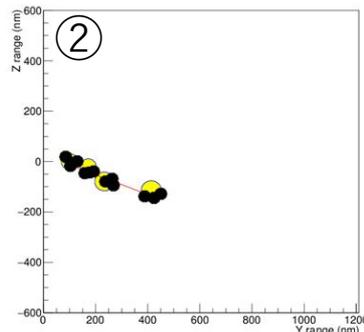
# 今後 エネルギー閾値の利用

NITはAgBr(I)結晶のみが感度を持つ

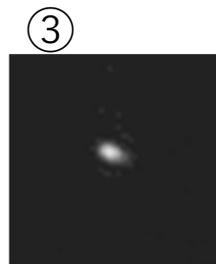
->結晶レベルの粒子トラッキング+光学シミュレーションが必須  
独自に開発している飛跡形成シミュレーションを開発



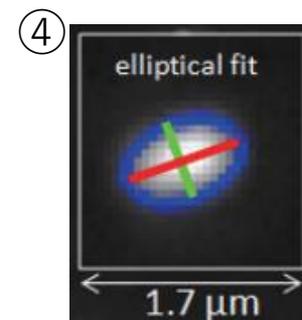
結晶配置を生成



粒子を照射し、  
貫通した全結晶に現像銀を形成



光学像の生成



楕円解析  
楕円率 = 短軸/長軸  
を指標として、選別する

図2. 現在の飛跡形成シミュレーションの概要

①結晶配置を生成

②粒子を照射し、貫通した全結晶に現像銀(現像液はMAAを想定)を形成(低速イオンの場合)

③光学像の生成

④光学像を楕円解析し、S/Nを見積もる

# まとめ

- NEWSdm実験では暗黒物質の到来方向を検出し、積極的な存在証拠とする
  - 検出器には超微粒子原子核乾板NITを使用
  - AgBr(I)結晶理解のために量子感度と飛跡形成エネルギー閾値を評価した
  - 高速イオンにおける量子感度の $dE/dx$ 依存性が認められた
  - 高速イオンにおける量子感度は約50%で頭打ち
  - $dE/dx$ が小さいにも関わらず低速イオンの量子感度は100%で最も高かった
  - 量子感度には入射粒子速度が依存している可能性を示唆
  - NITの暗黒物質による反跳原子核の検出感度が十分にあることを示した
- <今後>
- 飛跡形成シミュレーションにエネルギー閾値を組み込み、S/Nの最適化を行う

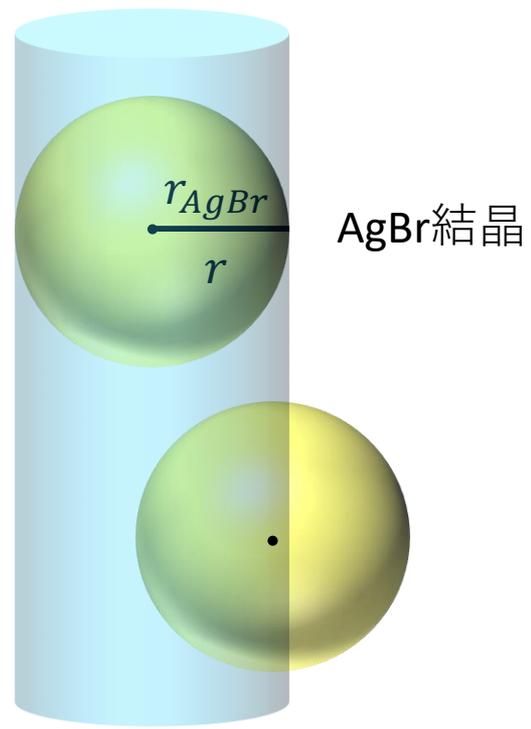
Backup

# 結晶数理論値算出方法

- 乾燥後の乳剤の密度と AgBr の密度 (=6.47g/cm<sup>3</sup>) とゼラチン溶液の密度 (=1.3g/cm<sup>3</sup>) から乾燥後の乳剤に対する AgBr(I) の体積比率を算出
- AgBr(I) 結晶の体積(半径  $r$ ) から、半径  $r$ 、高さ  $1\mu\text{m}$  の円柱の体積あたりの結晶数  $N'$  を算出し、 $1\mu\text{m}$  あたりの結晶数と定義

→ Path Length が短い結晶も貫通結晶数に含む

→ 円柱の半径に依存した数



AgBr 粒径 (TEM 画像より測定)  
(Entries 61)  $60.2 \pm 5.6 \text{ nm}$

# 結果

誤差は $\sqrt{(\text{計測したGrain})/(\text{測定Range})}$

