

# Lindhard領域の速度をもつイオンに対する超微粒子原子核乾板の感度測定

○陳夏姫<sup>A</sup>, 中 竜大<sup>B</sup> (A名古屋大, B東邦大)

## 阻止能

荷電粒子が単位長さを進む間に失うエネルギー

### ◆電気的阻止能

・入射粒子の速度:

軌道電子速度よりも十分に速い(高速)

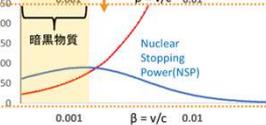
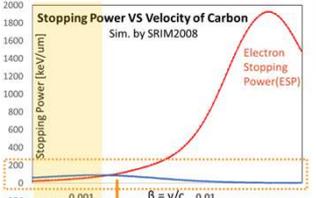
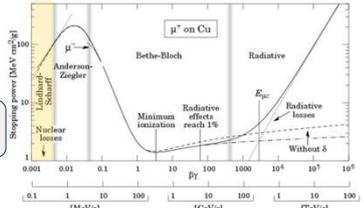
阻止能: Bethe-Blochの式によって近似

- ・標的原子の電離、励起
- ・電荷の移動
- ・個々の電子との散乱モデル

Bethe-Blochの阻止能公式:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m_e v^2} N Z_2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e v^2}{I} \right) + \ln \left( \frac{1}{1-\beta^2} \right) - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} \right]$$

$Z_1$ : 入射粒子の電荷数,  $Z_2$ : 標的原子番号,  $e$ : 電気素量,  $m_e$ : 電子質量,  $v$ : 入射粒子速度,  $N$ : 標的原子密度,  $I$ : 平均励起エネルギー



SRIM: 1) J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, and J. P. Biersack, Nucl. Instrum. Meth. B 268 1818, (2010)

### ◆核的阻止能

・入射粒子の速度:

軌道電子速度よりも十分に遅い(低速)

阻止能: Lindhardの理論による近似

個々の電子との散乱モデルが使用できない

Lindhardの理論:

- ・原子を原子核のクーロンポテンシャルで束縛された電子雲とみなす
- 連続的な電荷密度で近似
- ・Thomas-Fermi 模型に基づいた、低速領域における電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合を理論的に与えるモデル。

粒子速度の低下に伴い電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合が変化する

→単純なエネルギー損失率だけではなく阻止能の機構の変化が検出器の物性応答に影響を与える可能性がある。

## 暗黒物質

### ◆暗黒物質の性質:

- ・電気的に中性
- ・重力相互作用をする
- ・宇宙年齢より寿命が長く安定
- ・非相対論的な速度で運動(Cold DM)

現在の標準模型で説明が不可→新しい物理があると期待

### ◆暗黒物質の信号: 検出器中の標的原子核との弾性散乱を用いた観測により検出

・WIMP: Weakly Interacting Massive Particle  
弱く相互作用をする重い暗黒物質モデル

- ・凍結機構による暗黒物質の残存量を良く説明できる。
- ・Thermal relic WIMPの質量は、理論的には  $1 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ PeV}/c^2$  まで許されている。

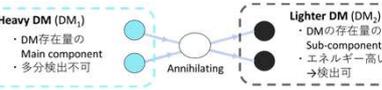
$$E_r = \frac{4M_{DM}M_T}{(M_{DM}+M_T)^2} E_{DM} \cos^2\theta$$

10 GeV/c<sup>2</sup> のWIMP →炭素原子核反跳の運動エネルギー 30 keV

・Multi Component Boosted Dark Matter(MCDBM):

暗黒物質の対消滅プロセスで加速する機構

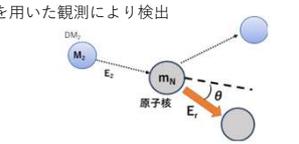
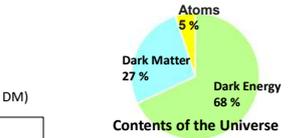
・重い暗黒物質( $\omega_1, DM_1$ )がより軽い暗黒物質( $\omega_2, DM_2$ )に対消滅、バリオンと相互作用をするモデル



MeV帯の粒子と標的核との散乱エネルギー

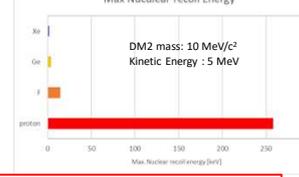
$$E_r = \frac{2m_N\beta^2 E_2^2 \cos^2\theta}{(E_2 + m_N)^2 - \beta^2 E_2^2 \cos^2\theta}$$

DM<sub>2</sub> mass: 10 MeV/c<sup>2</sup>, Kinetic Energy: 5 MeV →水素原子核反跳の運動エネルギー 250 keV



・Keiko I. Nagao, Tatsuhiro Naka, and Takaaki Nomura, JCAP04(2025)030 (E01協力と協力)  
・2025 学術変革領域(A)  
「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化」領域研究会

・DM<sub>1</sub>とDM<sub>2</sub>の質量差が到来する暗黒物質の運動エネルギー  $M_1 > M_2$   
 $M_1 = E_2 = M_2 + T_2$   
 $T_2 = M_1 - M_2$   
DM<sub>2</sub>: MeVスケール

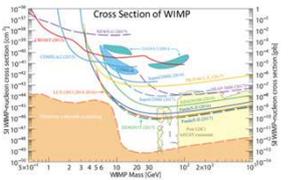


シグナルの運動エネルギーは数十~数百 keV →速度  $\beta = 10^{-3}$

## 暗黒物質探索実験

→暗黒物質と核との弾性散乱によって生じる飛跡の検出により探索可能なパラメータスペース(質量, 断面積など)に制限を与える。

→検出器の性能が探索感度を直接的に決定する



### ◆荷電粒子と検出器応答に関する研究

高速領域: 数多く行われている(高エネルギー物理)  
低速領域: 十分に議論されていない(暗黒物質探索がメイン)

暗黒物質からのシグナル:  $\beta = 10^{-3}$ の速度領域 →核的阻止能が優位

### 高速粒子に対する検出器応答とは物性的に異なる応答を示す可能性

クエンチングファクター(ガス、シンチレータ)  
フェーディング、潜像形成(原子核乾板)  
発光量(シンチレータ) ...等

暗黒物質探索: Lindhard領域の速度の粒子に対する検出器応答の理解が重要

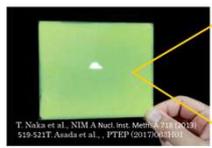
## 超微粒子原子核乾板(NIT<sup>2)</sup>)

<sup>2)</sup> T. Asada, T. Naka, K. Kuwabara, and M. Yoshimoto, PTEP, 2017, 6, (2017) 063H01

- ・ゼラチン中にAgBr(I)結晶が分散(密度: 3.1 g/cm<sup>3</sup>)
- ・ナノ半導体結晶(固体飛跡検出器)
- ・素粒子実験のために改良された写真フィルム的一种

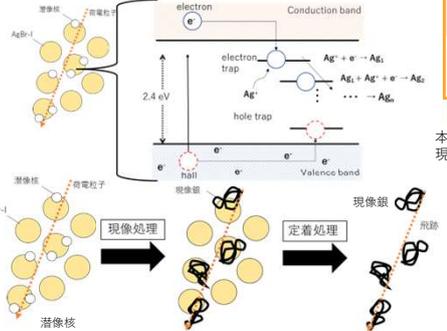
結晶サイズ: 約 70 nm (Nano Imaging Tracker:NIT)

→数nmの位置決定精度をもつため、サブミクロンの荷電粒子の3次元飛跡トラッキング、方向探索が可能



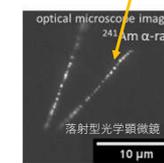
通常厚み: 約 40 μm (現像後) 結晶上の突起は電子線によって焼きだされた銀

### ◆検出原理:



Element	Atomic fraction [%]
Ag	8.4
Br	8.1
I	0.3
C	22.7
N	5.2
O	12.5
H	42.8

本ポスターではこの1つ1つの現象銀像を「グレイ」と呼ぶ



## 目的

### NITの低速イオンに対する1結晶感度測定

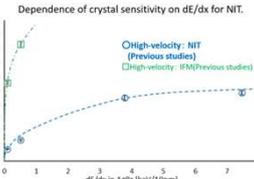
→従来手法が使えないため評価手法の開発

### ◆使用したサンプル:

- ・超微粒子原子核乾板(NIT): 70 nm  
→感度測定対象。暗黒物質探索に使用
- ・イオンフラックスモニター(IFM): 200 nm  
照射量が装置の保証外(〜10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup>)  
→先行研究<sup>3)</sup>の感度測定から、エネルギー損失率が低い領域でも十分に感度があることが示されている  
→本研究の探索範囲では感度100%を前提

## 先行研究<sup>3)</sup>: 高速イオン

高速イオンのlong trackは通過した直線上のグレイの密度(Grain Density:GD)から1結晶感度の測定が可能



Nuclide	Energy [GeV]	dE/dx [keV/10 nm]
He	0.6	0.14
C	3.48	0.51
Ar	20	3.78
Fe	28	7.47

<sup>3)</sup> K.Saeki, K. Kuge, T. Naka, T. Shirashi, and S. Kodaira, Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan. Vol. 34 No. 2 (2024).

## 低速イオン測定用サンプル作製

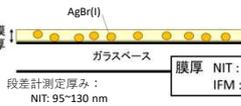
- ◆課題1: 数十keVの低エネルギーの炭素イオンの飛跡長1 μm以下 →1飛跡を構成するグレイ数は数個
- ◆課題2: 測定時のエネルギー、カウントの不定性

【低速炭素イオンのデータ】

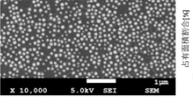
Energy of Carbon ion	β(=v/c)	dE/dx [keV/10 nm]	Track length
30 keV	2.27 × 10 <sup>-3</sup>	2.0	~100 nm
60 keV	3.21 × 10 <sup>-3</sup>	2.5	~180 nm
100 keV	4.15 × 10 <sup>-3</sup>	2.9	~300 nm

### ◆塗布の改良:

→結晶サイズ分の厚み



SEM画像 結晶サイズ70 nm(NIT)

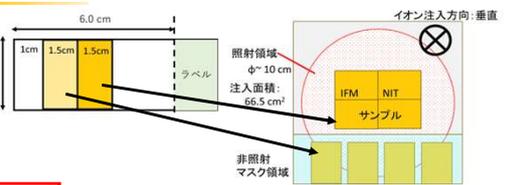


## 低速炭素イオン評価手法の確立

### ◆照射セットアップ

@名古屋大学先端技術共同研究施設(日新電機社製NH-20SR-WMH)

- ・設定照射量: 2 × 10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup>
- ・サンプルに対して垂直に照射

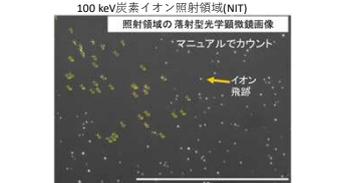


### ◆感度の定義

$$\text{感度} = \frac{\text{NITの照射領域のイオン飛跡数}}{\text{NIT結晶に入射したイオンの数}}$$

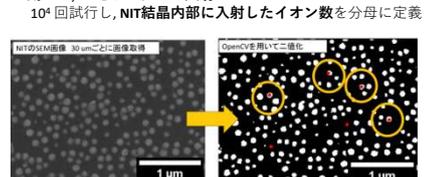
・NITの照射領域のイオン飛跡数 = 照射領域グレイ数 - 非照射領域グレイ数

= 100 keV炭素イオン照射領域(NIT)



### ・NIT結晶に入射したイオンの数

- ・光学顕微鏡を用いて目視でIFMのグレイ数を測定(N1)
- ・IFMのSEM画像解析から測定した結晶面積占有率(S1)から、全照射量を算出(N<sup>1</sup>=N1/S1)
- ・NITの二値化画像にモンテカルロシミュレーション(MC)を用いて、N1をランダムに入射。
- 10<sup>4</sup>回試行し、NIT結晶内部に入射したイオン数を分母に定義



検出素子のAgBr(I)1結晶の低速イオンに対する感度を測定可能

## まとめ・展望

- ・暗黒物質探索はLindhard領域の速度の原子核反跳信号を測定
- ・検出器の感度が直接的に探索感度に利く
- この速度領域の検出器応答の理解が重要
- 従来手法が使用できないため、NITの低速イオンに対する結晶感度の測定手法を構築
- この手法を用いて既存研究との整合性検証を含めた低速イオンの感度評価を進める

# Lindhard領域の速度をもつイオンに対する超微粒子原子核乾板の感度測定

○陳夏姬<sup>A</sup>, 中 竜大<sup>B</sup> (A名古屋大, B東邦大)

## 阻止能

荷電粒子が単位長さを進む間に失うエネルギー

### ◆電気的阻止能

・入射粒子の速度：  
軌道電子速度よりも十分に速い(高速)

阻止能: Bethe-Blochの式によって近似

- 標的原子の電離、励起
- 電荷の移動
- 個々の電子との散乱モデル

Bethe-Blochの阻止能公式：  

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m_e v^2} N Z_2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e v^2}{I} \right) + \ln \left( \frac{1}{1-\beta^2} \right) - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} \right]$$
 $Z_1$ : 入射粒子の電荷,  $Z_2$ : 標的原子番号,  $e$ : 電気素量,  $m_e$ : 電子質量,  $v$ : 入射粒子速度,  $N$ : 原子密度,  $I$ : 平均イオン化エネルギー

### ◆核的阻止能

・入射粒子の速度：  
軌道電子速度よりも十分に遅い(低速)

阻止能: Lindhardの理論による近似  
個々の電子との散乱モデルが使用できない

Lindhardの理論：  
 ・原子を原子核のクーロンポテンシャルで束縛された電子雲とみなす  
→連続的な電荷密度で近似  
 ・Thomas-Fermi 模型に基づいた、低速領域における電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合を理論的に与えるモデル。

粒子速度の低下に伴い電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合が変化する  
→単純なエネルギー損失率だけではなく阻止能の機構の変化が検出器の物性応答に影響を与える可能性がある。

## 暗黒物質

### ◆暗黒物質の性質：

- 電的に中性
- 重力相互作用をする
- 宇宙年齢より寿命が長く安定
- 非相対論的な速度で運動(Cold DM)

現在の標準模型で説明が不可 → 新しい物理があると期待

### ◆暗黒物質の信号：

検出器中の標的原子核との弾性散乱を用いた観測により検出

・WIMP: Weakly Interacting Massive Particle  
弱く相互作用をする重い暗黒物質モデル

・凍結機構による暗黒物質の残存量を良く説明できる。  
・Thermal relic WIMPの質量は、理論的には  $1 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ PeV}/c^2$  で許されている。

$$E_T = \frac{2M_{DM}M_T}{(M_{DM} + M_T)^2} (1 - \cos\theta) E_{DM}$$

10 GeV/c<sup>2</sup> の WIMP → 炭素原子核反跳の運動エネルギー 30 keV

・Multi Component Boosted Dark Matter(MCDBM):  
暗黒物質の対消滅プロセスで加速する機構

・重い暗黒物質( $\nu_{DM}$ )がより軽い暗黒物質( $\nu_{DM_2}$ )に対消滅、バリオンと相互作用をするモデル

・DM<sub>1</sub>とDM<sub>2</sub>の質量差が到来する暗黒物質の運動エネルギー  $M_1 > M_2$   

$$M_1 = E_2 = M_2 + T_2 \rightarrow T_2 = M_1 - M_2$$
 DM<sub>2</sub>: MeVスケール

MeV帯の粒子と標的核との散乱エネルギー  

$$E_T = \frac{2m_N \beta^2 E_2^2 \cos^2 \theta}{(E_2 + m_N)^2 - \beta^2 E_2^2 \cos^2 \theta}$$
 DM<sub>2</sub> mass: 10 MeV/c<sup>2</sup>, Kinetic Energy: 5 MeV  
→ 水素原子核反跳の運動エネルギー 250 keV

10 GeV/c<sup>2</sup> の WIMP → 炭素原子核反跳の運動エネルギー 30 keV

・Keiko I. Nagao, Tatsuhiro Naka, and Takaaki Nomura, JCAP04(2025)030 (E01協力と協力)  
・2025 学術変革領域(A)  
「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化」領域研究会

・DM<sub>1</sub>とDM<sub>2</sub>の質量差が到来する暗黒物質の運動エネルギー  $M_1 > M_2$   

$$M_1 = E_2 = M_2 + T_2 \rightarrow T_2 = M_1 - M_2$$
 DM<sub>2</sub>: MeVスケール

Max Nuclear recoil Energy  
 DM<sub>2</sub> mass: 10 MeV/c<sup>2</sup>  
 Kinetic Energy: 5 MeV

シングナルの運動エネルギーは数十~数百 keV → 速度  $\beta = 10^{-3}$

## 暗黒物質探索実験

→ 暗黒物質と核との弾性散乱によって生じる飛跡の検出により探索可能なパラメータスペース(質量, 断面積など)に制限を与える。

→ 検出器の性能が探索感度を直接的に決定する

## ◆荷電粒子と検出器応答に関する研究

高速領域: 数多く行われている (高エネルギー物理)  
 低速領域: 十分に議論されていない(暗黒物質探索がメイン)

暗黒物質からのシグナル:  $\beta = 10^{-3}$  の速度領域 → 核的阻止能が優位

## 高速粒子に対する検出器応答とは

物性的に異なる応答を示す可能性

クエンチングファクター (ガス、シンチレータ)  
 フェーディング、潜像形成 (原子核乾板)  
 発光量(シンチレータ) ...等

暗黒物質探索: Lindhard領域の速度の粒子に対する検出器応答の理解が重要

## 超微粒子原子核乾板(NIT<sup>2)</sup>)

・ゼラチン中にAgBr(I)結晶が分散 (密度: 3.1 g/cm<sup>3</sup>)  
 ・ナノ半導体結晶(固体飛跡検出器)  
 ・素粒子実験のために改良された写真フィルム的一种

結晶サイズ: 約 70 nm (Nano Imaging Tracker:NIT)  
 →数nmの位置決定精度をもつため、サブミクロンの荷電粒子の3次元飛跡トラッキング、方向探索が可能

通常厚み: 約 40  $\mu\text{m}$  (現像後) 結晶上の突起は電子線によって焼きだされた線

◆検出原理:  
 潜像核 → 現像処理 → 定着処理 → 飛跡

Element Atomic fraction [%]  
 Ag 8.4, Br 8.1, I 0.3, C 22.7, N 5.2, O 12.5, H 42.8

本ポスターではこの1つ1つの現象銀像を「グレイ」と呼ぶ

## 目的

### NITの低速イオンに対する1結晶感度測定

→従来手法が使えないため評価手法の開発

### ◆使用したサンプル:

- 超微粒子原子核乾板(NIT): 70 nm  
→感度測定対象。暗黒物質探索に使用
- イオンフラックスモニター(IFM): 200 nm  
照射量が装置の保証外( $\sim 10^7$ /cm<sup>2</sup>)  
→先行研究<sup>3)</sup>の感度測定から、エネルギー損失率が低い領域でも十分に感度があることが示されている  
→本研究の探索範囲では感度100%を前提

## 先行研究<sup>3)</sup>: 高速イオン

高速イオンの long track は通過した直線上のグレイの密度(Grain Density:GD)から1結晶感度の測定が可能

Dependence of crystal sensitivity on dE/dx for NIT.

①理想的  
 ②ゼラチン層(密度1.3g/cm<sup>3</sup>)でエネルギーが減衰  
 ③2結晶を通った時、ダブルカウントしてしまう

GD法、厚みを持つサンプルの利用が不可

Nuclide	Energy [GeV]	dE/dx [keV/10 nm]
He	0.6	0.14
C	3.48	0.51
Ar	20	3.78
Fe	28	7.47

## 低速炭素イオン評価手法の確立

### ◆照射セットアップ

@名古屋大学先端技術共同研究施設 (日新電機社製NH-20SR-WMH)

- 設定照射量:  $2 \times 10^7$  /cm<sup>2</sup>
- サンプルに対して垂直に照射

### ◆感度の定義

感度 =  $\frac{\text{NITの照射領域のイオン飛跡数}}{\text{NIT結晶に入射したイオンの数}}$

・NIT結晶に入射したイオンの数  
 ・光学顕微鏡を用いて目視でIFMのグレイ数を測定(N1)  
 ・IFMのSEM画像解析から測定した結晶面積占有率率(S1)から、全照射量を算出(N<sup>1</sup>=N1/S1)  
 ・NITの二値化画像にモンテカルロシミュレーション(MC)を用いて、N1をランダムに入射。  
 10<sup>4</sup>回試行し、NIT結晶内部に入射したイオン数を分母に定義

・NITの照射領域のイオン飛跡数  
 = 照射領域グレイ数 - 非照射領域グレイ数  
 = 100 keV炭素イオン照射領域(NIT)の飛跡数 - 非照射領域の飛跡数

検出素子のAgBr(I)1結晶の低速イオンに対する感度を測定可能

## 低速イオン測定用サンプル作製

### ◆課題1:

数十keVの低エネルギーの炭素イオンの飛跡長1 $\mu\text{m}$ 以下  
 →1飛跡を構成するグレイ数は数個

【低速炭素イオンのデータ】

Energy of Carbon ion	$\beta$ (=v/c)	dE/dx [keV/10 nm]	Track length
30 keV	$2.27 \times 10^{-3}$	2.0	~100 nm
60 keV	$3.21 \times 10^{-3}$	2.5	~180 nm
100 keV	$4.15 \times 10^{-3}$	2.9	~300 nm

値数: 1個 Sim. by SRIM2008

### ◆塗布の改良:

→結晶サイズ分の厚み

SEM画像  
 結晶サイズ70 nm(NIT)

SEMで撮像したNITの結晶占有面積割合

①理想的  
 ②ゼラチン層(密度1.3g/cm<sup>3</sup>)でエネルギーが減衰  
 ③2結晶を通った時、ダブルカウントしてしまう

GD法、厚みを持つサンプルの利用が不可

## まとめ・展望

→従来手法が使用できないため、NITの低速イオンに対する結晶感度の測定手法を構築

→この手法を用いて既存研究との整合性検証を含めた低速イオンの感度評価を進める

・暗黒物質探索はLindhard領域の速度の原子核反跳信号を測定  
 ・検出器の感度が直接的に探索感度に利く  
 →この速度領域の検出器応答の理解が重要

# Lindhard領域の速度をもつイオンに対する超微粒子原子核乾板の感度測定

○陳夏姫<sup>A</sup>, 中 竜大<sup>B</sup> (A名古屋大, B東邦大)

## 阻止能

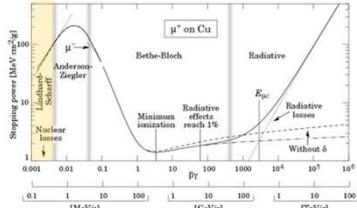
### ◆電気的阻止能

・入射粒子の速度:

軌道電子速度よりも十分に速い(高速)

阻止能: Bethe-Blochの式によって近似

式詳細



### 核的阻止能

・入射粒子の速度:

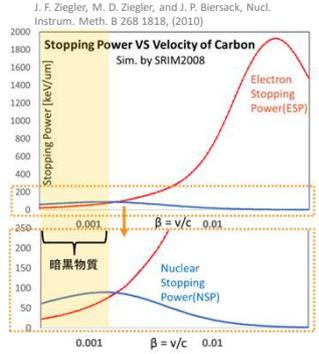
軌道電子速度よりも十分に遅い(低速)

阻止能: Lindhardの理論による近似

### Lindhardの理論:

- ・原子を原子核のクーロンポテンシャルで束縛された電子雲とみなす
- ・Thomas-Fermi模型に基づいた、低速領域における電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合を理論的に与えるモデル。

式もう少し詳しく



粒子速度の低下に伴い電気的阻止能と核的阻止能の寄与割合が変化する。

→単純なエネルギー損失率だけではなく阻止能の機構の変化が検出器の物性応答に影響を与える可能性がある。

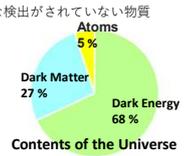
- ・高速領域: 高エネルギー物理で多くの素粒子実験で調べられている
- ・低速領域: 素粒子物理分野ではほとんど議論されない

## 暗黒物質

様々な宇宙観測から存在が示唆されているが、未だに直接的な検出がされていない物質

### ◆暗黒物質の性質:

- ・電気的に中性
- ・重力相互作用をする
- ・宇宙年齢より寿命が長く安定
- ・非相対論的な速度で運動(Cold DM)



現在の標準模型で説明が不可→新しい物理があると期待

### ◆暗黒物質の信号:

- ・WIMP: Weakly Interacting Massive Particle 弱く相互作用をする重い暗黒物質モデル

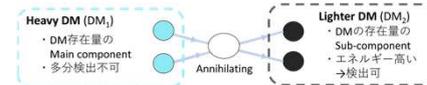
- ・凍結機構による暗黒物質の残存量を良く説明できる。
- ・Thermal relicなWIMPの質量は、理論的には  $1 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ PeV}/c^2$  まで許されている。

$$E_r = \frac{2M_{DM}M_T}{(M_{DM} + M_T)^2} (1 - \cos\theta) E_{DM}$$

10 GeV/c<sup>2</sup>のWIMP →炭素原子核反跳の運動エネルギー 30 keV

- ・Multi Component Boosted Dark Matter(MCDBM): 暗黒物質の対消滅プロセスで加速する機構

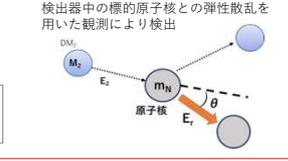
- ・重い暗黒物質( $\psi_H, DM_H$ )が軽い暗黒物質( $\psi_L, DM_L$ )に対消滅、バリオンと相互作用をするモデル



MeV帯の粒子と標的核子との散乱エネルギー

$$E_r = \frac{2m_N\beta^2 E_1^2 \cos^2\theta}{(E_2 + m_N)^2 - \beta^2 E_2^2 \cos^2\theta}$$

DM<sub>2</sub> mass: 10 MeV/c<sup>2</sup>, Kinetic Energy: 5 MeV →水素原子核反跳の運動エネルギー 250 keV

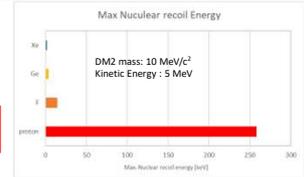


検出器中の標的原子核との弾性散乱を用いた観測により検出

DM<sub>1</sub>とDM<sub>2</sub>の質量差が到来する暗黒物質の運動エネルギー  $M_1 > M_2$

$$M_1 = E_2 + T_2 \rightarrow T_2 = M_1 - M_2$$

DM<sub>2</sub>: MeVスケール



シグナルの運動エネルギーは数十~数百 keV →速度  $\beta=10^{-3}$

## Motivation:

### 暗黒物質探索実験

- 暗黒物質と核子との弾性散乱によって生じる飛跡の検出により探索可能なパラメータスペース(質量, 断面積など)に制限を与える。
- 検出器の性能が探索感度を直接的に決定する

・荷電粒子と検出器応答に関する研究

- 高速領域: 数多く行われている (高エネルギー物理)
- 低速領域: 十分に議論されていない(暗黒物質探索がメイン)

物性的に異なる? クエンチングファクター(ガス)、フェーディング(原子核乾板)等

直す

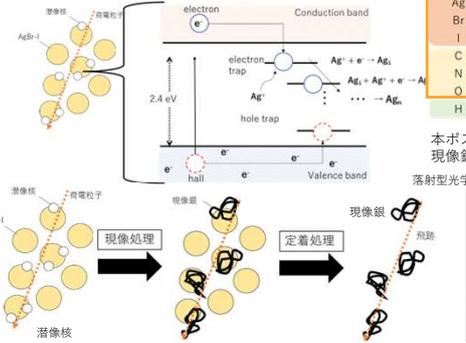
暗黒物質からのシングル $\beta=10^{-3}$ の速度領域 → 核的阻止能が優位

暗黒物質探索: Lindhard領域の速度の粒子に対する検出器応答の理解が重要

## 超微粒子原子核乾板(NIT<sup>2)</sup>)

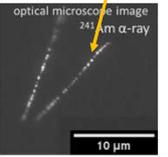
<sup>21</sup>T. Asada, T. Naka, K. Kuwabara, and M. Yoshimoto, PTEP, 2017, 6, (2017) 063H01

### 検出原理:



Element	Atomic fraction (%)
Ag	8.4
Br	8.1
I	0.3
C	22.7
N	5.2
O	12.5
H	42.8

本ポスターではこの1つ1つの現象銀像を「グレイ」と呼ぶ



目的 検出素子のAgBr(I)1結晶の低速炭素イオンに対する感度を測定

### サンプル作製!~おける課題

long trackは1直線のグレイの密度(Grain Density:GD)から1結晶密度の測定が可能

しかし、数十keVの低エネルギーのイオンの飛跡長は1μm以下 1飛跡を構成するグレイ数は数個

GD法使えない 100keV 約300nm/60 keV で約180nm, 30 keV で約100nm

→塗布の改良 →結晶サイズ1つ分の厚みを持つ乾板

直す

## 低速炭素イオン照射実験

### ◆照射量

Energy	$\beta=v/c$	dE/dx [keV/10nm]
30 keV	$2.27 \times 10^{-3}$	2.0
60 keV	$3.21 \times 10^{-3}$	2.5
100 keV	$4.15 \times 10^{-3}$	2.9

@名古屋大学先端技術共同研究施設 (日新電機社製NH-20SR-WMH)

### 先行研究: 高速イオン

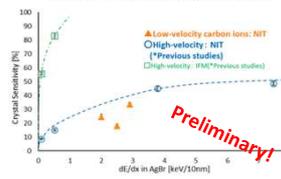
Nuclide	Energy [GeV]	dE/dx [keV/10nm]
He	0.6	0.14
C	3.48	0.51
Ar	20	3.78
Fe	28	7.47

@HIMAC(電子科学技術研究開発機構, 重粒子線がん治療装置)

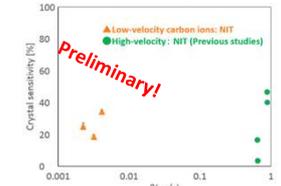
## 結果

IFM照射領域 (N1)	全照射量 (N1/S1)	MCで結晶を透過した量	NIT照射領域 グレイ数
30 keV	$2.8 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$6.68 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$2.11 \times 10^7 / \text{cm}^2$
60 keV	$2.4 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$6.48 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$1.61 \times 10^7 / \text{cm}^2$
100 keV	$3.0 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$7.43 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$4.83 \times 10^6 / \text{cm}^2$

Dependence of crystal sensitivity on dE/dx for NIT.



Dependence of crystal sensitivity on velocity for NIT.



速度	感度
30keV	25.0 ± 2.1%
60keV	18.6 ± 1.4%
100keV	34.3 ± 1.2%

先行研究<sup>4)</sup>では 30~100 keVの炭素イオンの結晶感度はほぼ100%と示されており矛盾

数μmの厚みのNIT + SRIMシミュレーションと結晶配置から計算

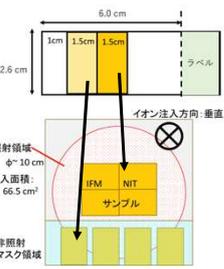
<sup>4)</sup>浅田貴士 名古屋大学博士論文(2017)

### ■超微粒子原子核乾板(NIT): 70 nm

→感度測定対象。暗黒物質探索に使用

### ■イオンフラックスモニター(IFM): 200 nm

- 照射量が装置の保証外
- 先行研究<sup>3)</sup>の感度測定から、エネルギー損失率が低い領域でも十分に感度があることが示されている
- 本研究の探索範囲では感度100%を前提



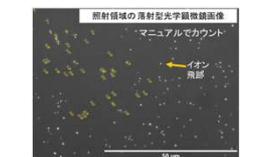
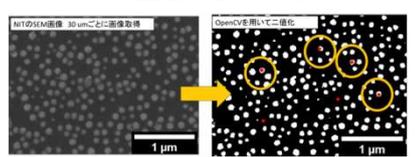
<sup>3)</sup> K. Saeki, K. Kuge, T. Naka, T. Shiraiishi, and S. Kodaira, Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan. Vol. 34 No. 2 (2024).

$$\text{感度} = \frac{\text{NITの照射領域のイオン飛跡数}}{\text{NIT結晶に入射したイオンの数}}$$

$$\text{NITの照射領域のイオン飛跡数} = \text{照射領域グレイ数} - \text{非照射領域グレイ数}$$

### NIT結晶に入射したイオンの数

- ・光学顕微鏡を用いて目視でIFMのグレイ数を測定(N1)
- ・IFMのSEM画像解析から測定した結晶面積占有率(S1)から、全照射量を算出(N1=N1/S1)
- ・NITの二値化画像にモンテカルロシミュレーション(MC)を用いて、N1をランダムに入射。
- ・10<sup>4</sup>回試行し、NIT結晶内部に入射したイオン数を分母に定義



IFMの結晶占有面積率 S1 [%]	NITの結晶面積占有率 S2 [%]
30keV	41.9%
60keV	37.0%
100keV	40.4%

## 考察

薄くしたことで増感? 母数?

## まとめ・展望