

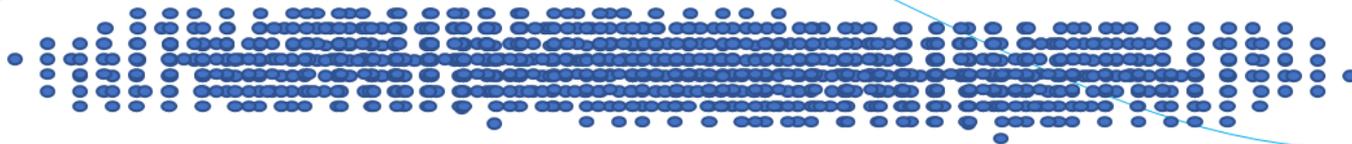
# 超冷中性子用原子核乾板による 重力場中の量子状態の観測

名大 長縄直崇

# 超冷中性子 (Ultracold Neutron (U.C.N.))

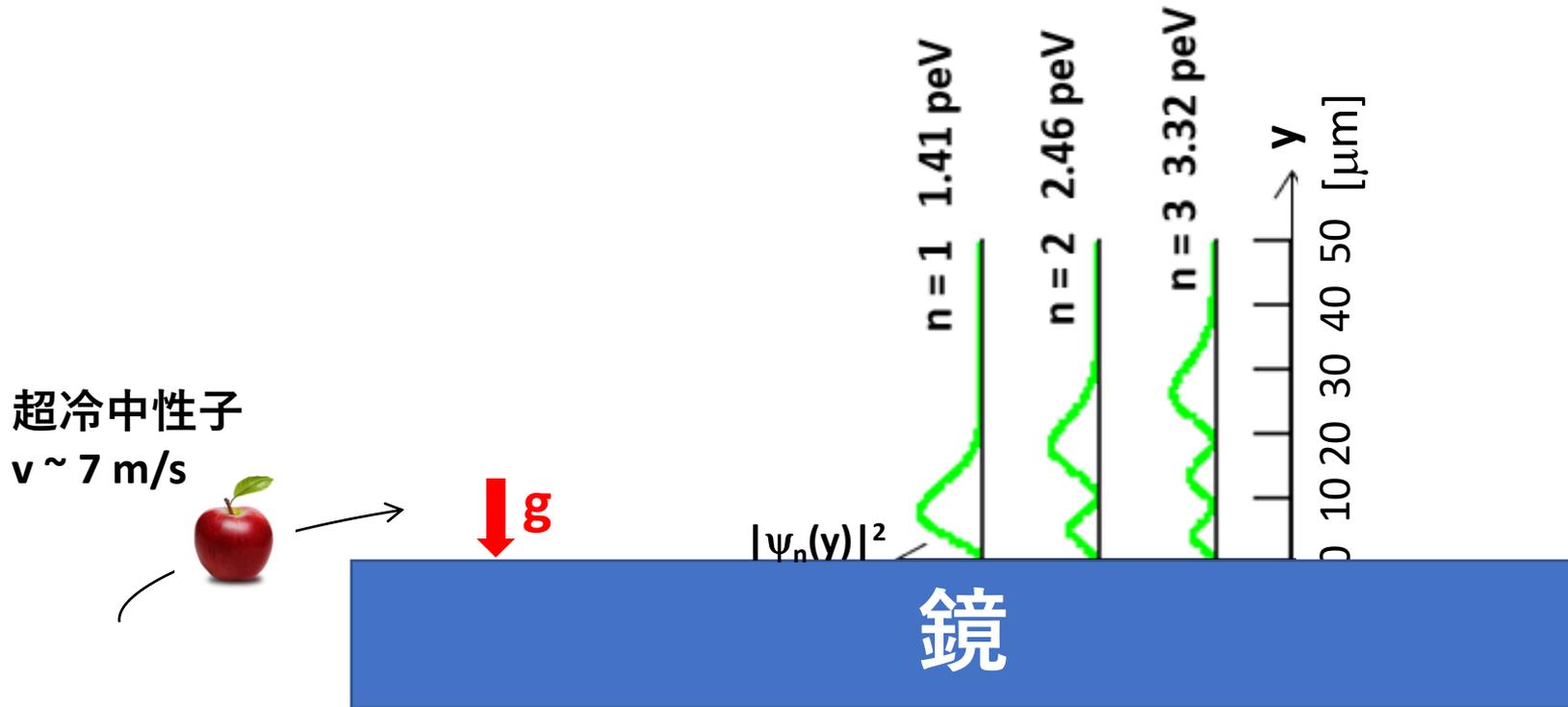
呼称	超冷中性子	極冷中性子	冷中性子	熱中性子	熱外中性子	高速中性子
温度 [K]	$\leq 2.9 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-1}$	$2.3 \times 10^1$	$3 \times 10^2$	$1 \times 10^5$	$6 \times 10^9$
エネルギー [eV]	$\leq 2.5 \times 10^{-7}$ 250[neV]	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-2}$ 25 [meV]	$1 \times 10^1$	$\geq 5 \times 10^5$ 0.5 [MeV]
速度 [m/s]	$\leq 6.9$	$1 \times 10^2$	$6 \times 10^2$	$2.2 \times 10^3$	$4.4 \times 10^4$	$1 \times 10^7$
波長 [m]	$\geq 5.7 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-14}$

$$\lambda = h/mv$$



- Ni ( $V_F \sim 250$  neV) 等の表面で全反射される。  
→ 鏡による反射、容器に貯蔵可能
- 重力、寿命、EDM等の実験に好都合。

# 重力場中の鏡上の量子状態



$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

$$\longrightarrow V(y) = mgy$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + V(y) \right) \psi(y) = E \psi(y)$$

$$\psi_n(y) = \text{AiryAi} \left( \frac{y}{y_0} - \frac{E_n}{E_0} \right)$$

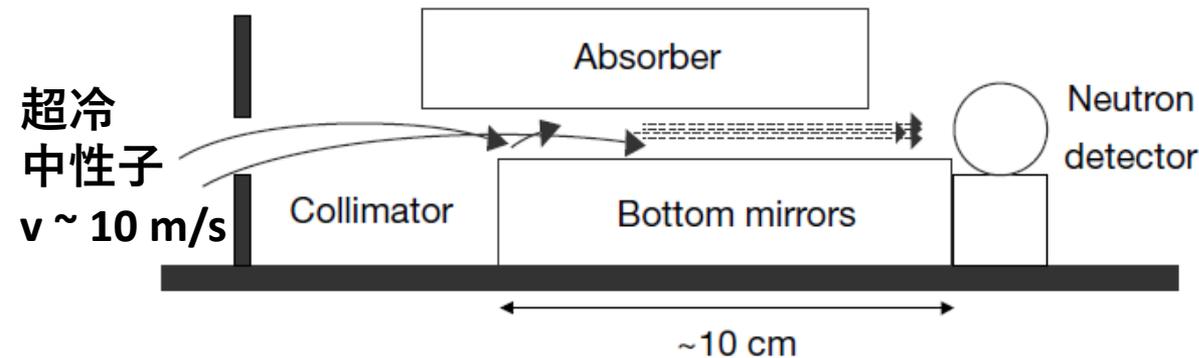
$$y_0 = \left( \frac{\hbar^2}{2 m^2 g} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$E_0 = \left( \frac{m g^2 \hbar^2}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

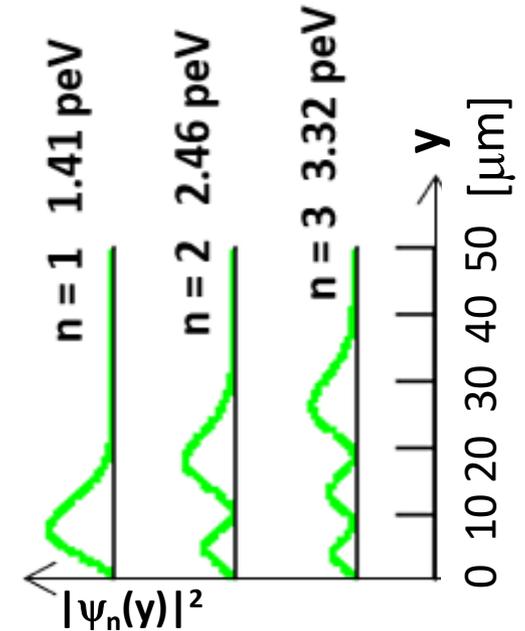
この量子状態は2002年にV. V. Nesvizhevsky 等が初検出 (V.V.Nesvizhevsky et al., Nature **415**, 297 (2002).)

# 重力場中の量子状態の初検出

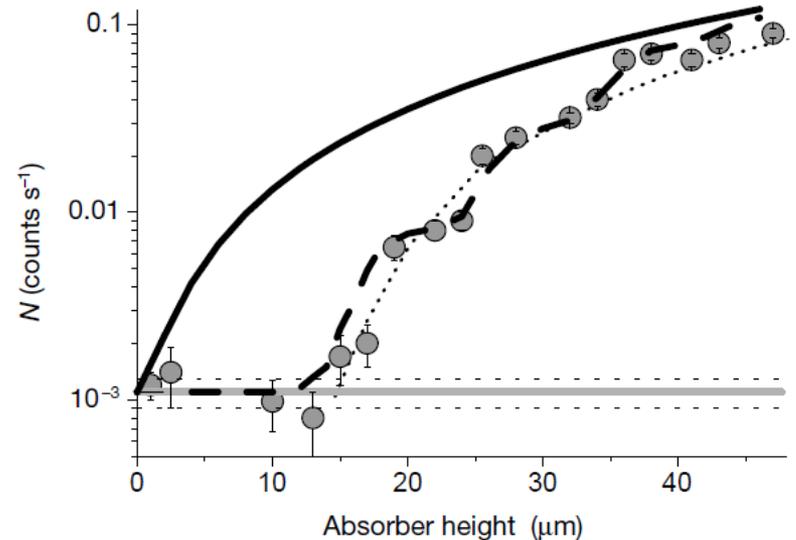
2002 V. V. Nesvizhevsky 等



V. V. Nesvizhevsky et al., Nature **415**, 297 (2002).



- 中性子FluxのAbsorber高さ依存性
- 実測：Flux  $\sim 0$  @ Absorber高さ  $< \sim 10 \mu\text{m}$   
( $\neq$ 古典：Flux  $\propto$  (Absorber高さ)<sup>1.5</sup>)



V. V. Nesvizhevsky et al., Nature **415**, 297 (2002).

(Absorber高さ制御精度 $\sim 1 \mu\text{m}$ )<sup>4</sup>

# 未知短距離力探索

超冷中性子  
 $v \sim 7 \text{ m/s}$



- 湯川型相互作用（質量を持つ媒介粒子（超ひも理論粒子、質量を持つグラビトン等））

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

$$\longrightarrow V(y) = mgy - 2\pi G m \rho \alpha \lambda^2 e^{-y/\lambda} \quad \rightarrow \text{分布がゆがむ}$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + V(y) \right) \psi(y) = E \psi(y)$$

- ダークエネルギー候補（第五元素（カメレオン等））
- ダークマター候補（アクシオン（Axion-like particles））
- 余剰次元

# 等価原理

超冷中性子  
 $v \sim 7 \text{ m/s}$



$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

→  $V(y) = m_g g y$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{m_i} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + m_g g y \right) \psi(y) = E \psi(y)$$

$$\psi_n(y) = \text{AiryAi} \left( \frac{y}{y_0} - \frac{E_n}{E_0} \right)$$

$$y_0 = \left( \frac{\hbar^2}{2 m_i m_g g} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$E_0 = \left( \frac{m_g^2 / m_i g^2 \hbar^2}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

→ 等価原理

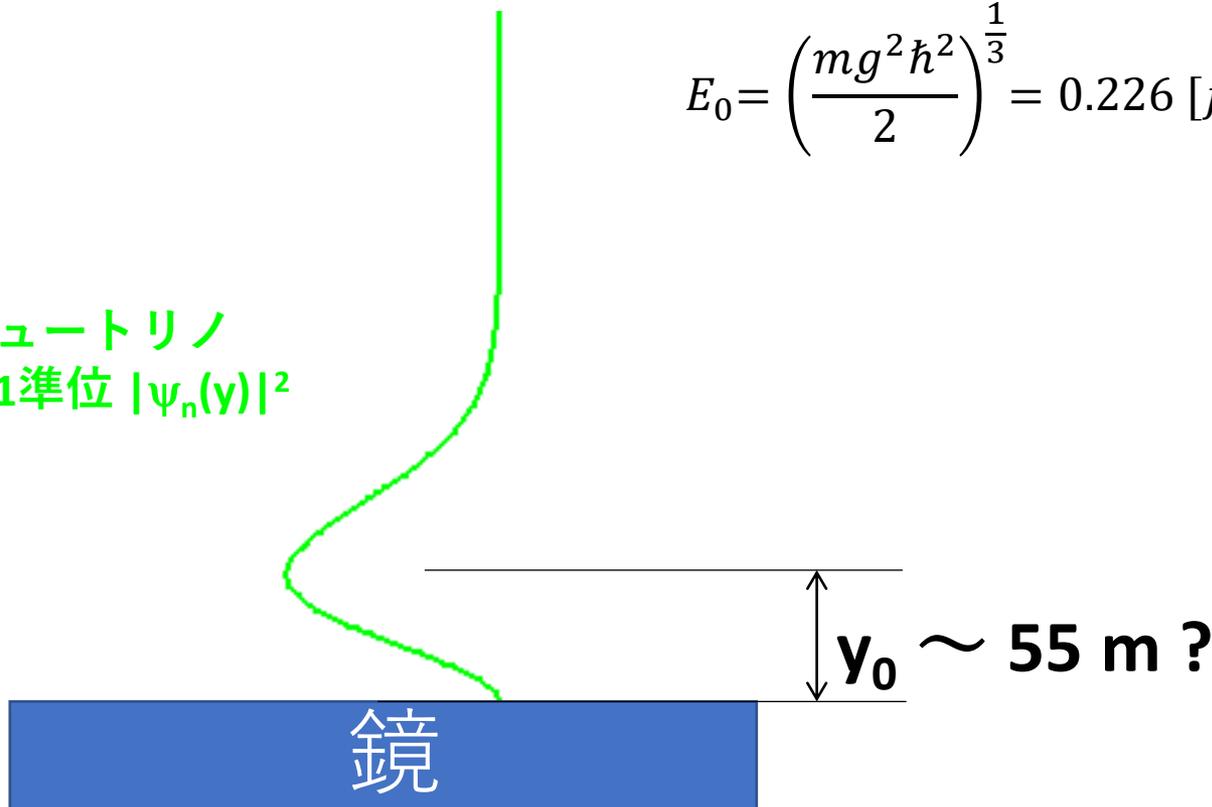
ちなみにニュートリノの場合・・・  
重力場中の鏡の上のニュートリノの量子状態

・ニュートリノ振動実験 →  $\text{Max}\{m_1, m_2, m_3\} > \sim 0.05 \text{ eV}/c^2$

→  $m_\nu = 0.05 \text{ eV}/c^2$  の場合: →  $y_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m^2g}\right)^{\frac{1}{3}} = 54.7 \text{ [m]},$

$$E_0 = \left(\frac{mg^2\hbar^2}{2}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.226 \text{ [feV]}$$

ニュートリノ  
第1準位  $|\psi_n(y)|^2$



ちなみにニュートリノの場合・・・

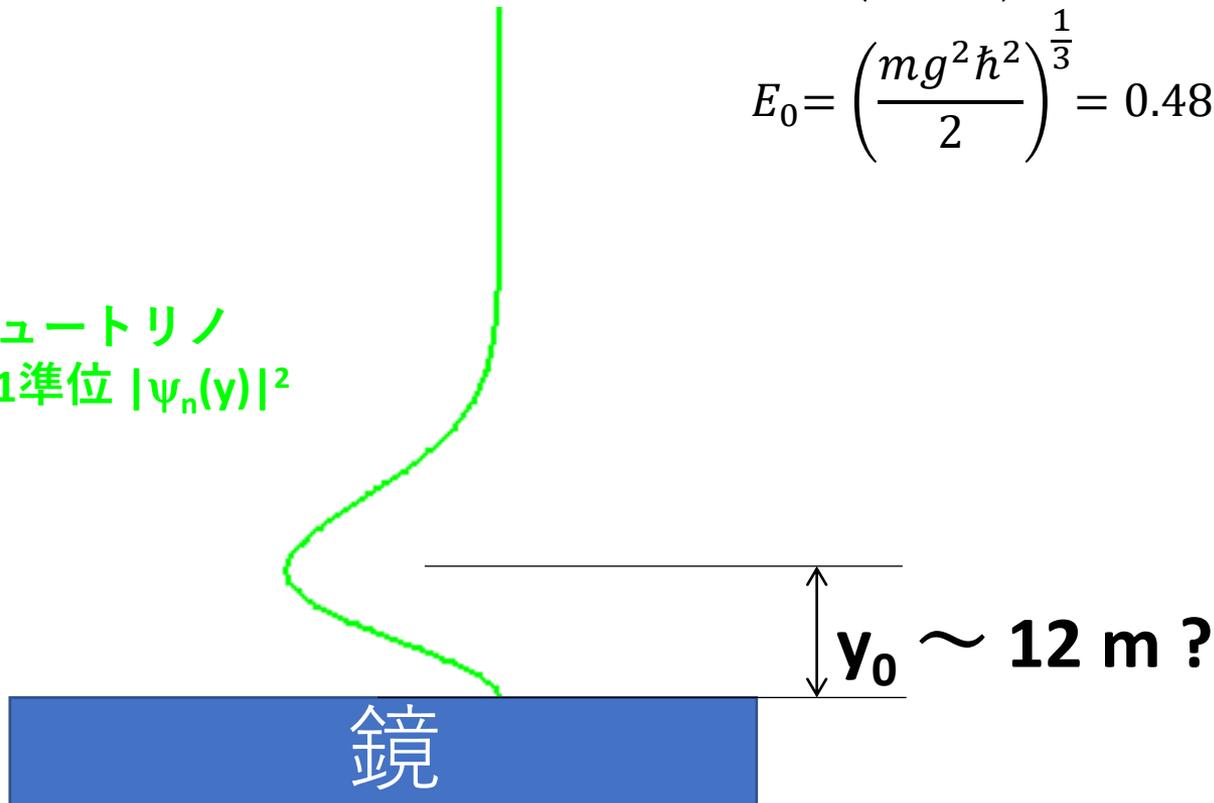
# 重力場中の鏡の上のニュートリノの量子状態

- ニュートリノ振動実験 →  $\text{Max}(\{m_1, m_2, m_3\}) > \sim 0.05 \text{ eV}/c^2$
- KATRIN (2019) →  $m_{\nu_e}^{\text{eff}} < 1.1 \text{ eV}/c^2$

→  $m_\nu = 0.5 \text{ eV}/c^2$  の場合：      →  $y_0 = \left( \frac{\hbar^2}{2 m^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} = 11.8 \text{ [m]},$

$$E_0 = \left( \frac{m g^2 \hbar^2}{2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.488 \text{ [feV]}$$

ニュートリノ  
第1準位  $|\psi_n(y)|^2$



# 未知短距離力探索

超冷中性子  
 $v \sim 7 \text{ m/s}$



- 湯川型相互作用（質量を持つ媒介粒子（超ひも理論粒子、質量を持つグラビトン等））

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

$$\longrightarrow V(y) = mgy - 2\pi G m \rho \alpha \lambda^2 e^{-y/\lambda} \quad \rightarrow \text{分布のゆがみ}$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + V(y) \right) \psi(y) = E \psi(y)$$

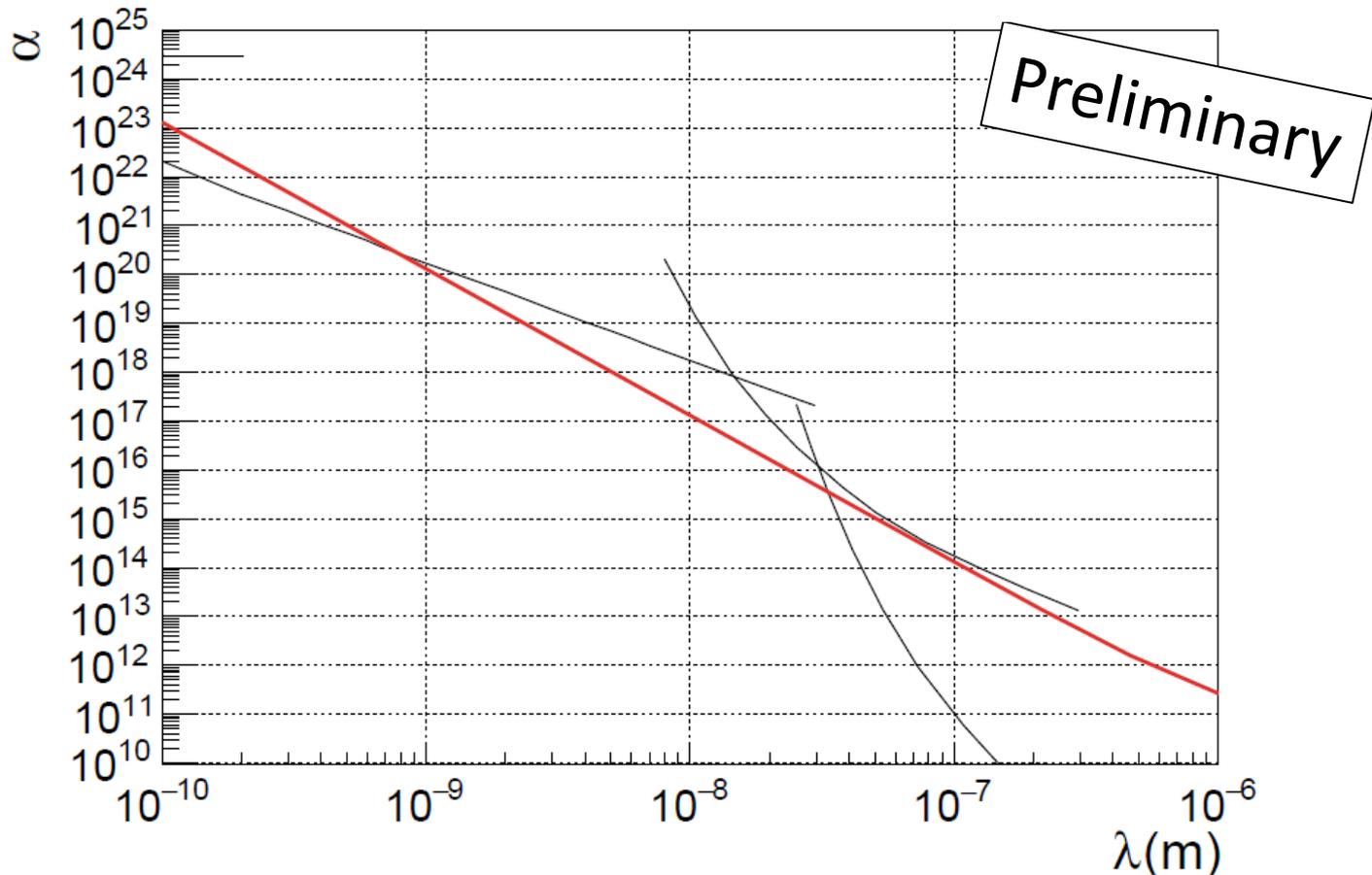
分布とその歪みを高い空間分解で捉えたい。

→ 超冷中性子用原子核乾板(分解能 < 100 nm)を開発した。従来より1~2桁高い。

# 湯川型相互作用の探索感度

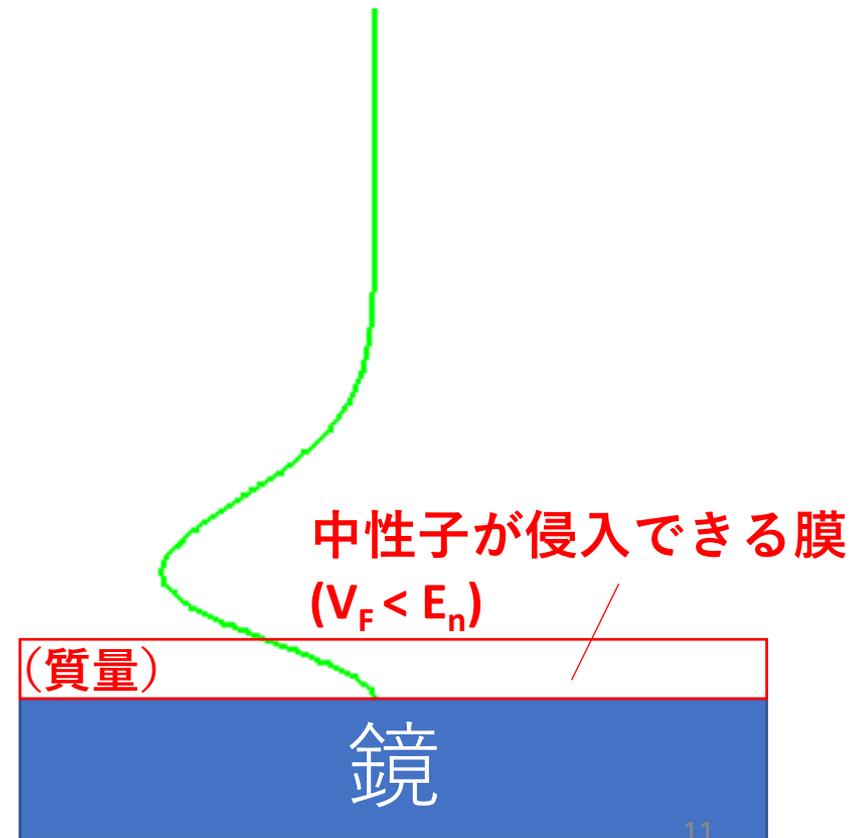
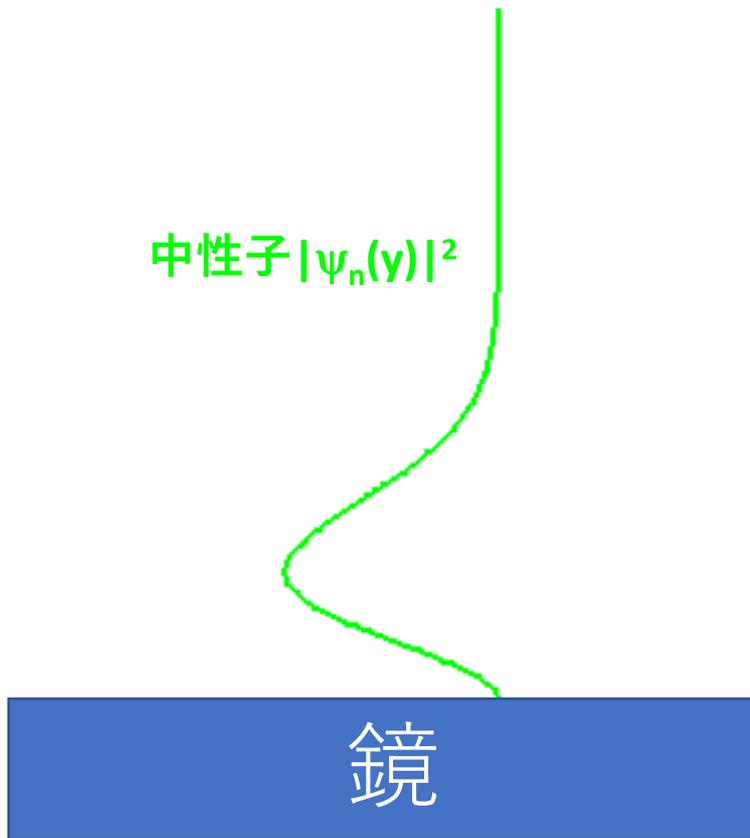
- 高分解能->位置分布のズレ=100 nm を検出可能 (計算@ 第二準位の谷間)
- 鏡の改良

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$



# 鏡の改良

- 中性子が侵入できる薄膜を表面に付加する。  
( $V_F < E_n$ なる薄膜)



今後膜の開発を行っていく。

# 超冷中性子用原子核乾板開発

原子核乾板と低速中性子の先端の技術と知見が出合い、結晶化。



名古屋大学



Institute for  
Integrated Radiation and Nuclear Science,  
Kyoto University



九州大学

KYUSHU UNIVERSITY

つなぐ知 かなえる技

大阪電気通信大学

Osaka Electro-Communication University



筑波大学 *University of Tsukuba*



NEUTRONS  
FOR SOCIETY

# Nuclear emulsion R&D & Production @Lab-F, Nagoya Univ. since 2010

200 nm crystal

500nm

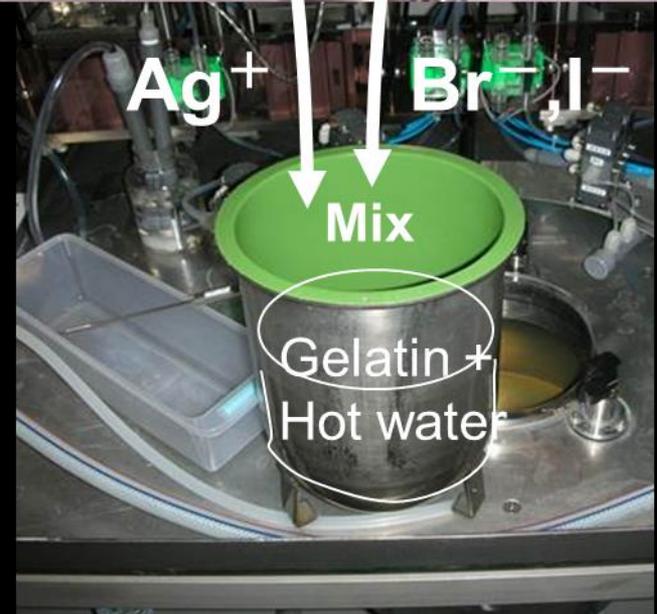
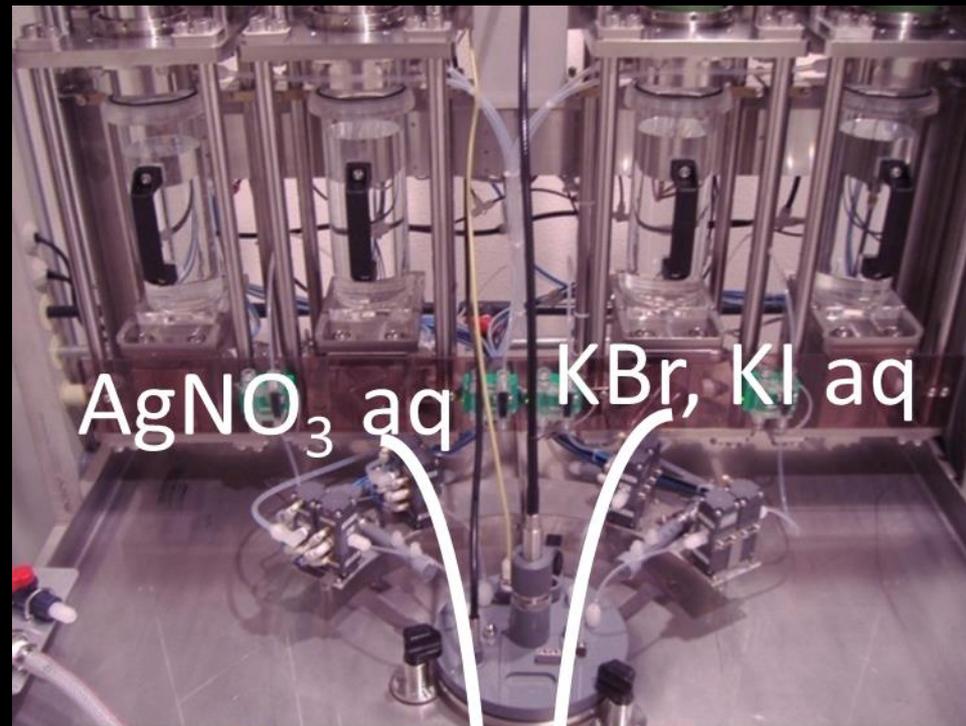
← For  
minimum  
ionizing  
particles.

40 nm crystal

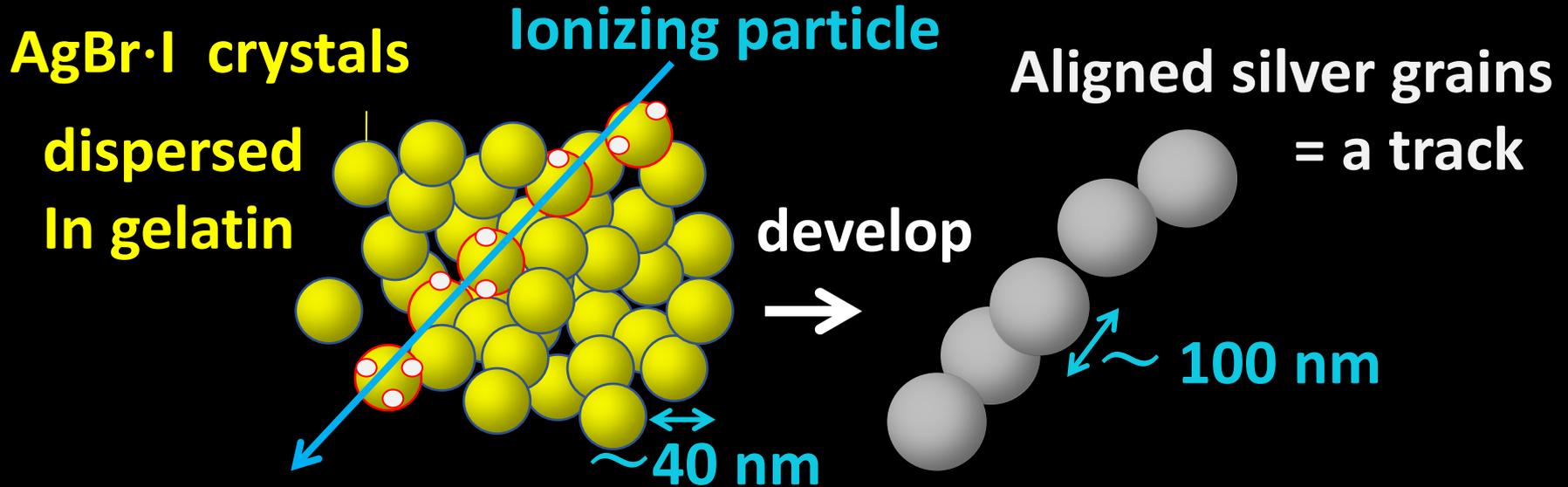
500 nm

← **Fine-grained.**

- High resolution
- M.I.P.s and low E electrons are not detected. (neither  $\gamma$ )

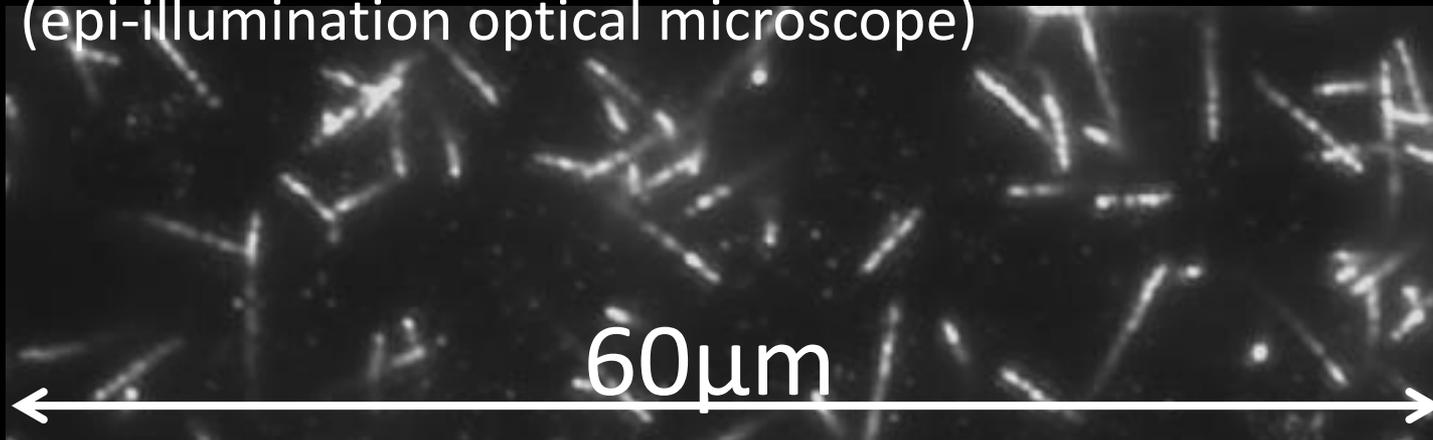


# Fine-grained nuclear emulsion (NIT)

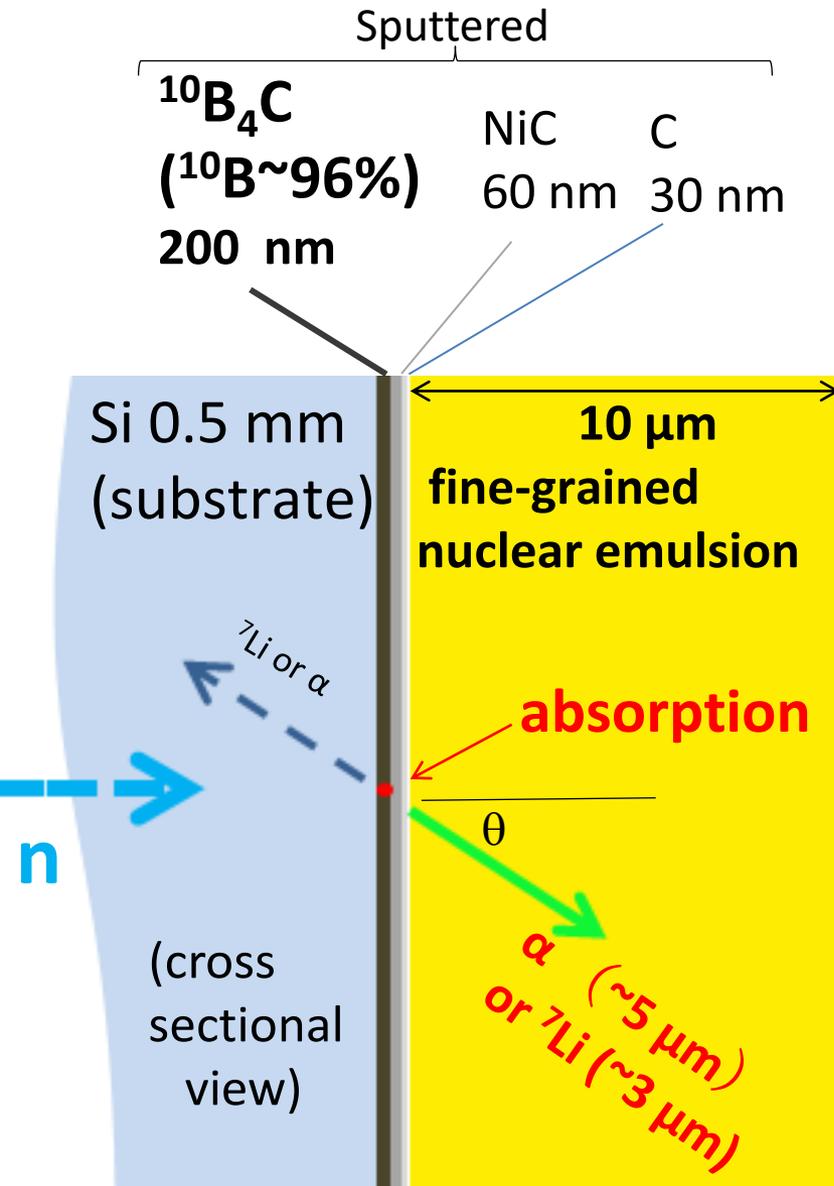


Tracks of alpha particles

(epi-illumination optical microscope)

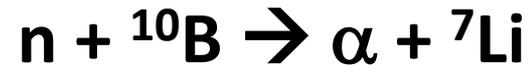


# Developed high spatial resolution detector



- **Detection principle:**

1. neutron absorption by  $^{10}\text{B}$



2. thin converter including  $^{10}\text{B}$

- **Spatial Resolution:**

< 100 nm (for tracks with  $\theta < 0.9$  rad)  
(11 nm for  $\theta = 0$ )

estimated from linear fitting of tracks

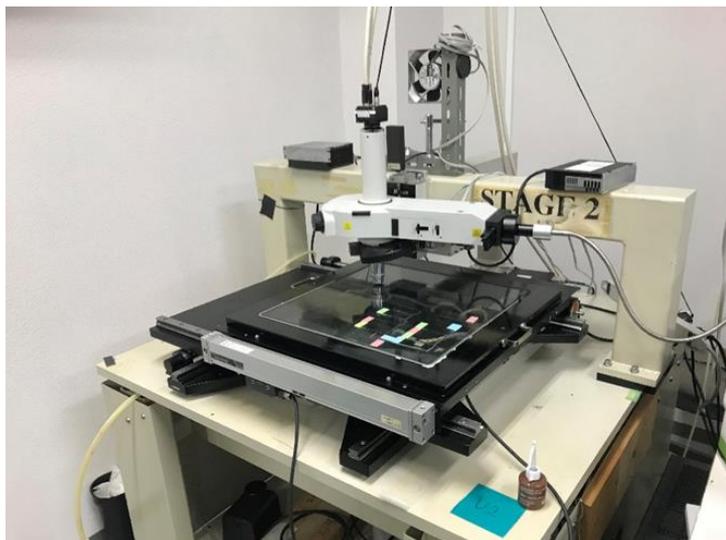
Cf: Naganawa et al., Eur. Phys. J. C (2018) 78:959

( < 0.56  $\mu\text{m}$  demonstrated with a cold neutron transmission image of a Gd slit's edge. cf. N. Muto et al., arXiv:2201.04346 (2022))

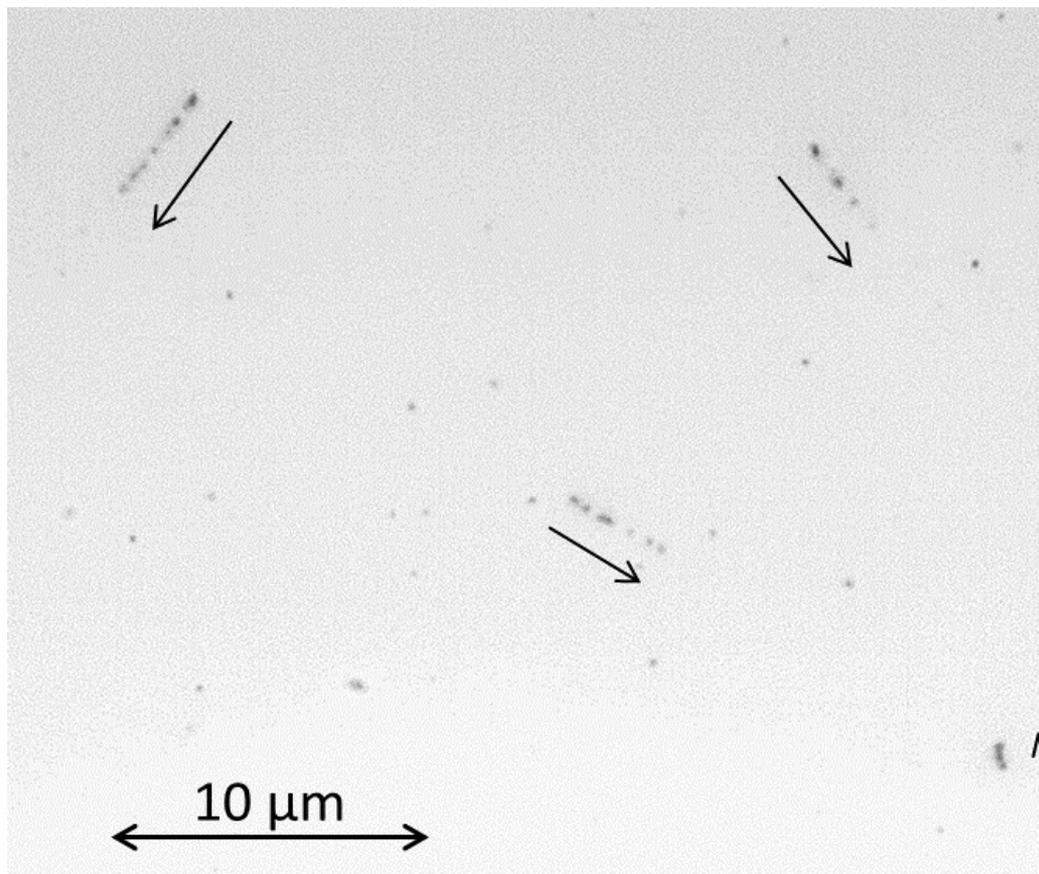
- Detection efficiency for  $\sim 10$  m/s neutrons: 41%

Sputtered by M. Hino at KURRI

# Image taking by epi-illumination microscope (PTS2)



Tracks from absorptions



Objective lens



2048 (pixel)  
~110 (μm)

2048 (pixel)  
~110 (μm)

Real image  
side

Surface of C layer

Mirror image  
side

23 (μm)

axis Z ↓ ~0.37 (μm)

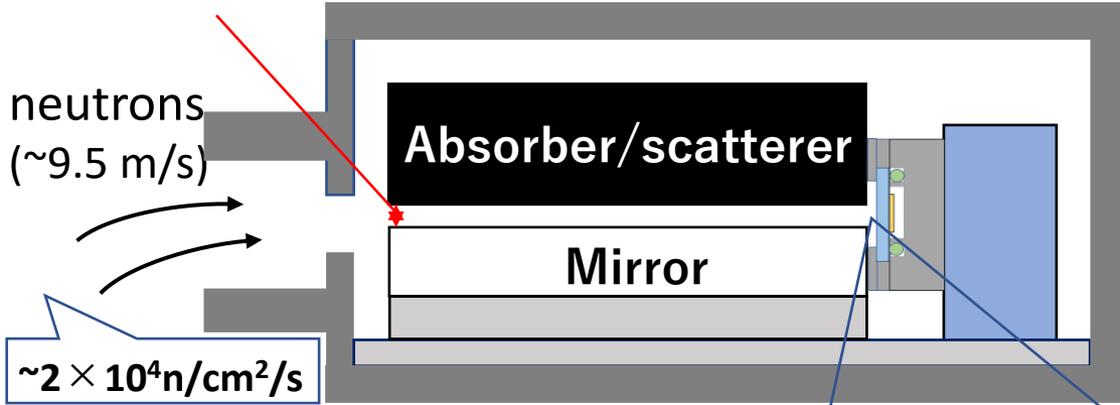
1~2 s/view(=(110μm)<sup>2</sup>)

Exposure @BL05, MLF, J-PARC  
(Converter thickness = 50 nm)

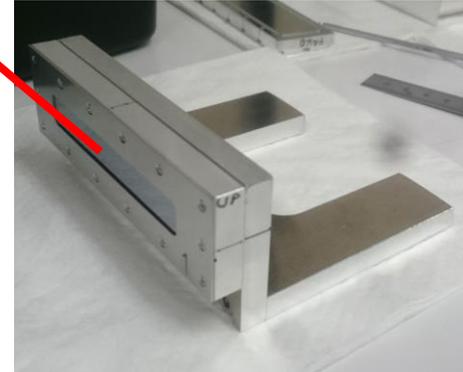
# テスト照射（実際に重力場中の超冷中性子の位置分布を取得）

Effective gap  $\sim 34\mu\text{m}$  Vacuum chamber

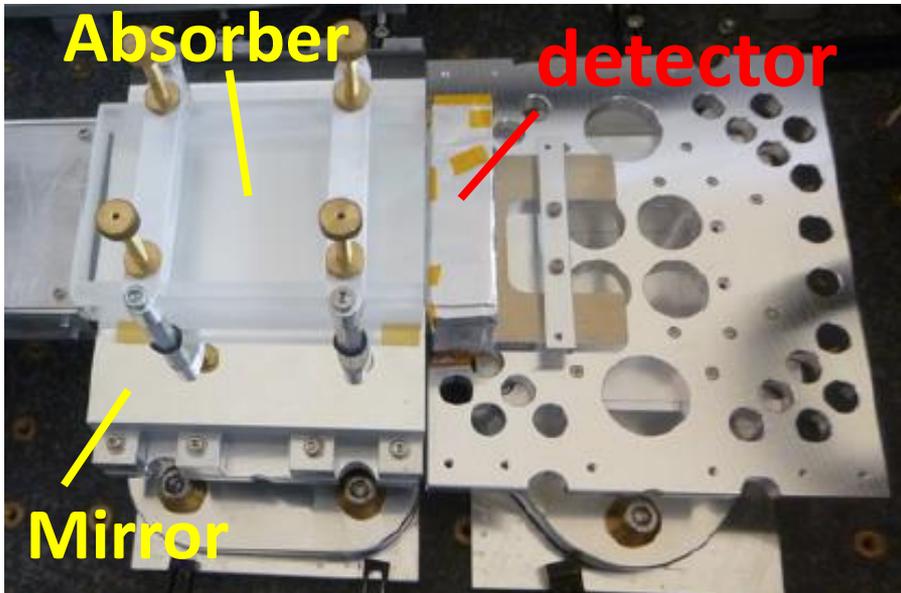
@PF2-EDM, Institut Laue-Langevin (2021)



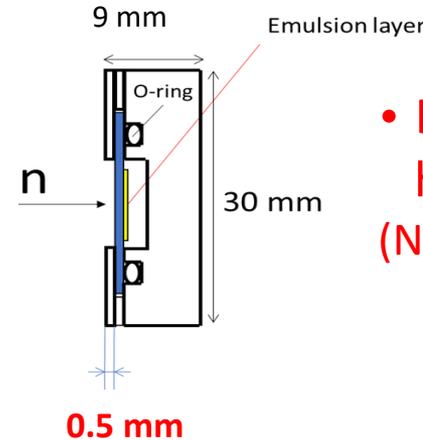
- Upstream surface of detector polished to  $\sim 0.5 \text{ nm}$



$0.10 \text{ n/s} \times 31 \text{ hours}, 1.1 \times 10^4 \text{ n}$  on detector  
 $\rightarrow \sim 4600 \text{ int} \rightarrow \sim 1800 \text{ events for analysis } (\theta \leq 0.9)$



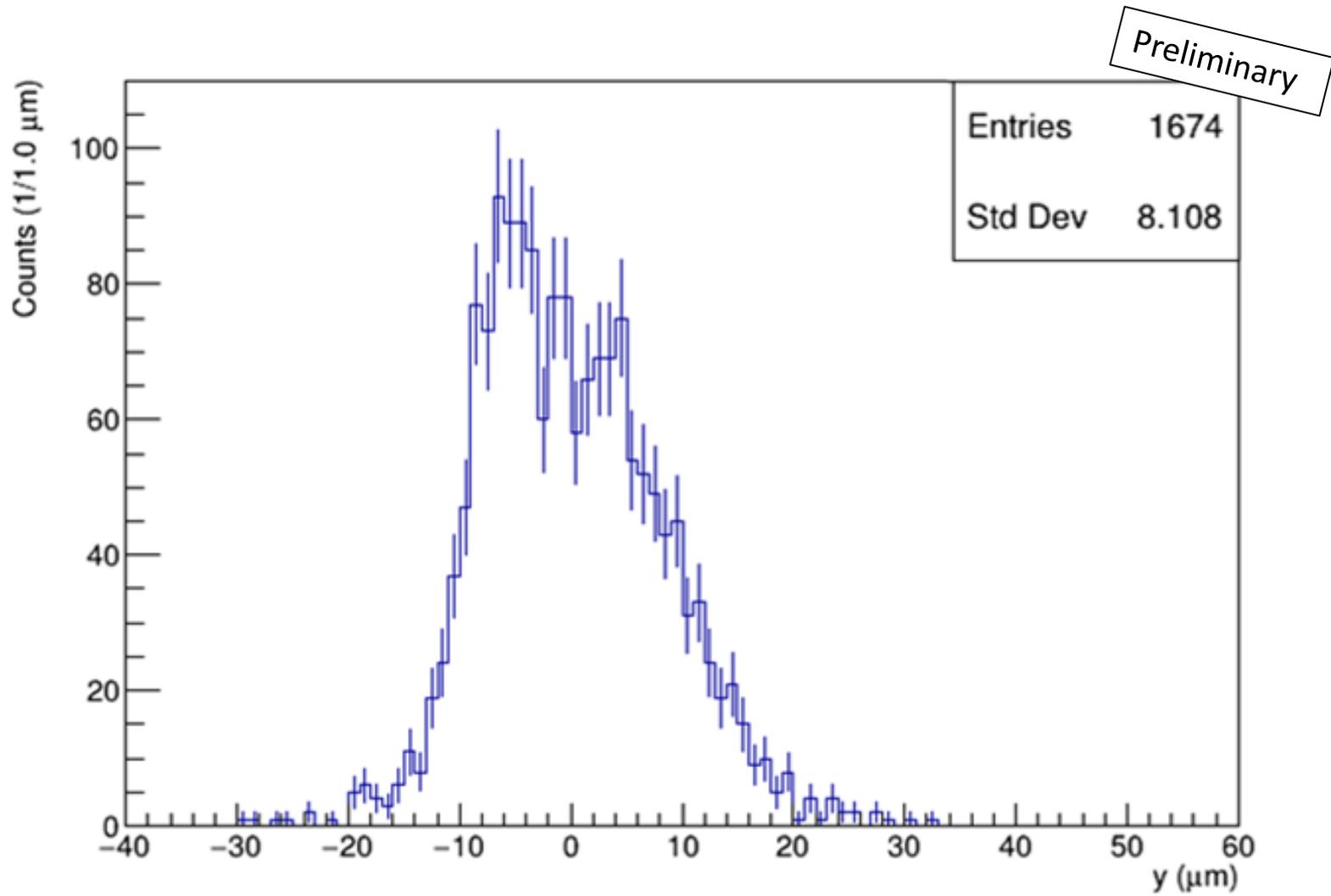
Mirror, absorber, supports, and vacuum chamber of the qBOUNCE collaboration



- Lid of the holder 0.5 mm (Neutron flight length 1.0 mm)

- Due to covid-19's situation, the detector was sent to the ILL  $\rightarrow$  exposed  $\rightarrow$  sent back to Nagoya  $\rightarrow$  developed  $\rightarrow$  Analyzed.

# 得られた位置分布



# 理論曲線との比較

Schrödinger equation

$$E\psi(y) = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} + mgy \right) \psi(y)$$

$$\psi_n(Y_n(y), t = 0) = C_n \text{AiryAi}(Y_n(y)) + D_n \text{AiryBi}(Y_n(y))$$

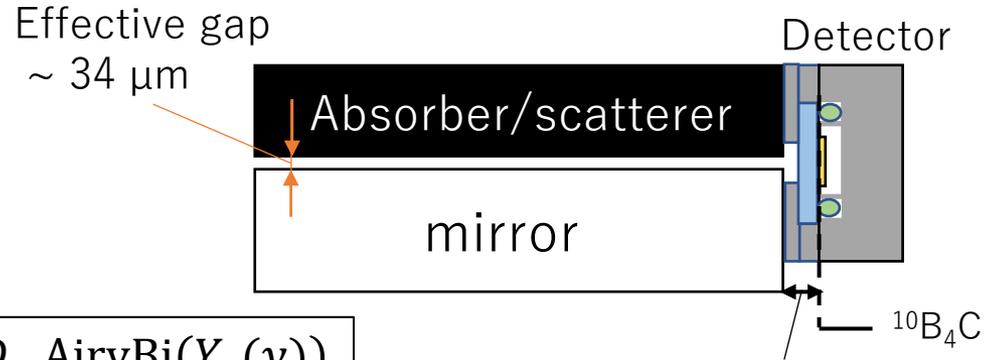
$$Y_n(y) = \frac{y}{y_0} - \frac{E_n}{E_0}, \quad y_0 = \left( \frac{\hbar^2}{2m^2g} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad E_0 = \left( \frac{mg^2\hbar^2}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Fitting function

$$f(y) = A \times \sum_{n=1}^N (P_n \times |\psi_n(Y_n(y - y_s), t_2)|^2) + B$$

Conditions of fitting

The maximal number of state  $N = 3$



~1.5 mm  
→ time development  
Using  $\psi_n(Y_n(y), t)$  as  
fitting function

Fitting parameters:

$A$  Magnification of the distribution,

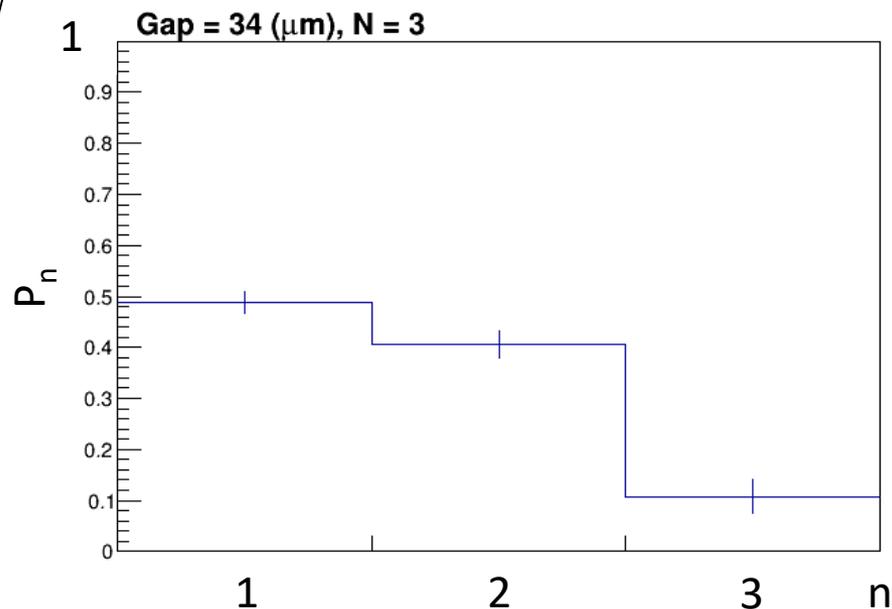
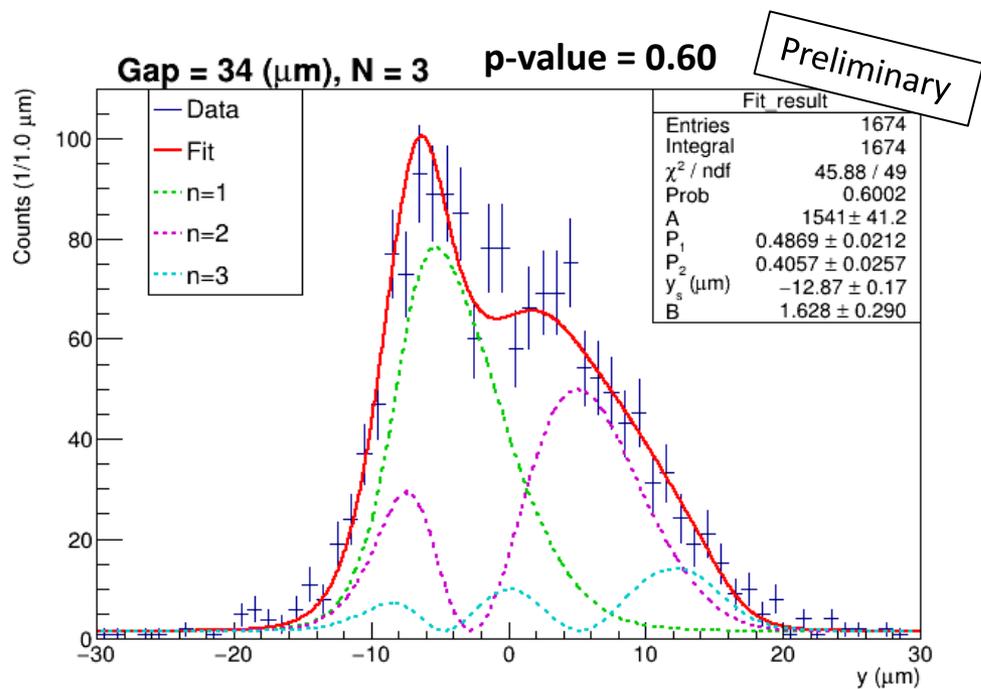
$B$  Background,

$P_n (n = 1, 2, \dots, N - 1)$  population of each state,  
( $P_N = 1 - \sum_{n=1}^{N-1} P_n$ )

$\sigma$  the blur of the distribution (Fit 2.)

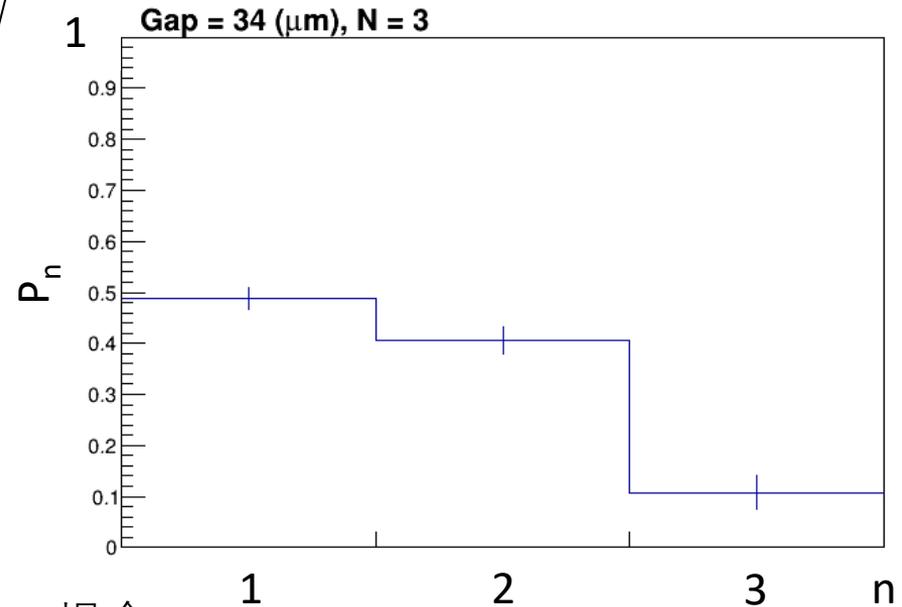
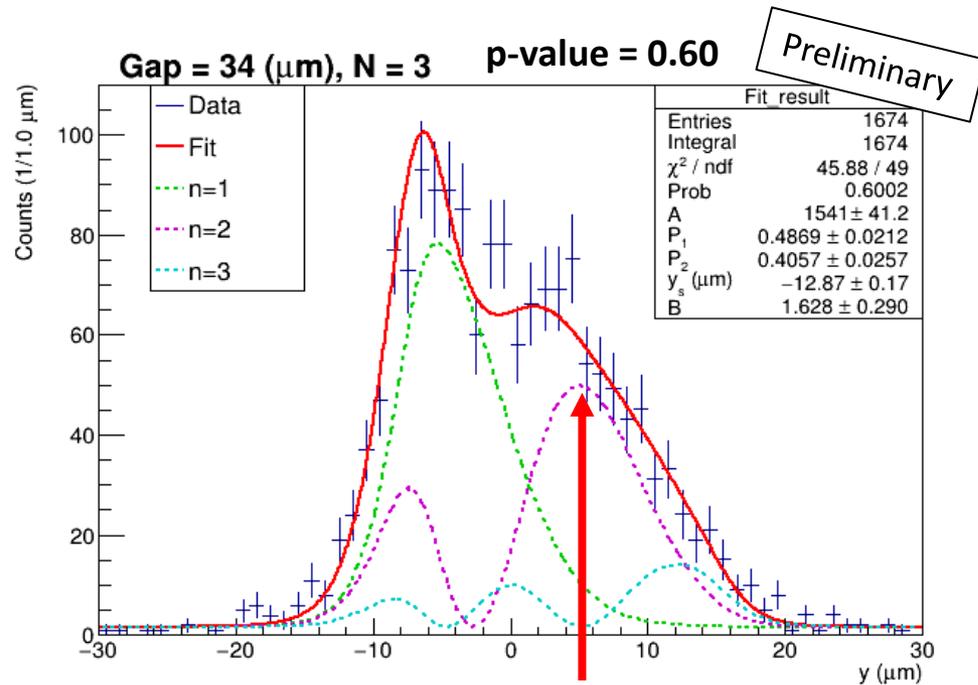
$y_s$  the height of the mirror surface.

# 理論曲線との比較



理論曲線によってよくフィットされた。  
各準位の比率も求まった。

# 未知短距離力探索に必要なFlux (極めてroughな見積もり)



第2準位のピークのずれを検出したい場合、  
この山を $\sigma \sim 4 \mu\text{m}$ のガウス分布と見做すと、  
100 nmの分解能でピークのずれを検出するには現在の $\sim 4$ 倍の統計が必要。

現在、ILL, PF2-EDM のFlux:  $\sim 2 \times 10^4 / \text{cm}^2 / \text{s} \times 1.5$ 日間照射。

その約4倍  $\rightarrow$  同じFlux  $\times 6$ 日間の照射が必要。

Mirror-Absorber間隔を狭める場合、その数倍の照射日数が必要。

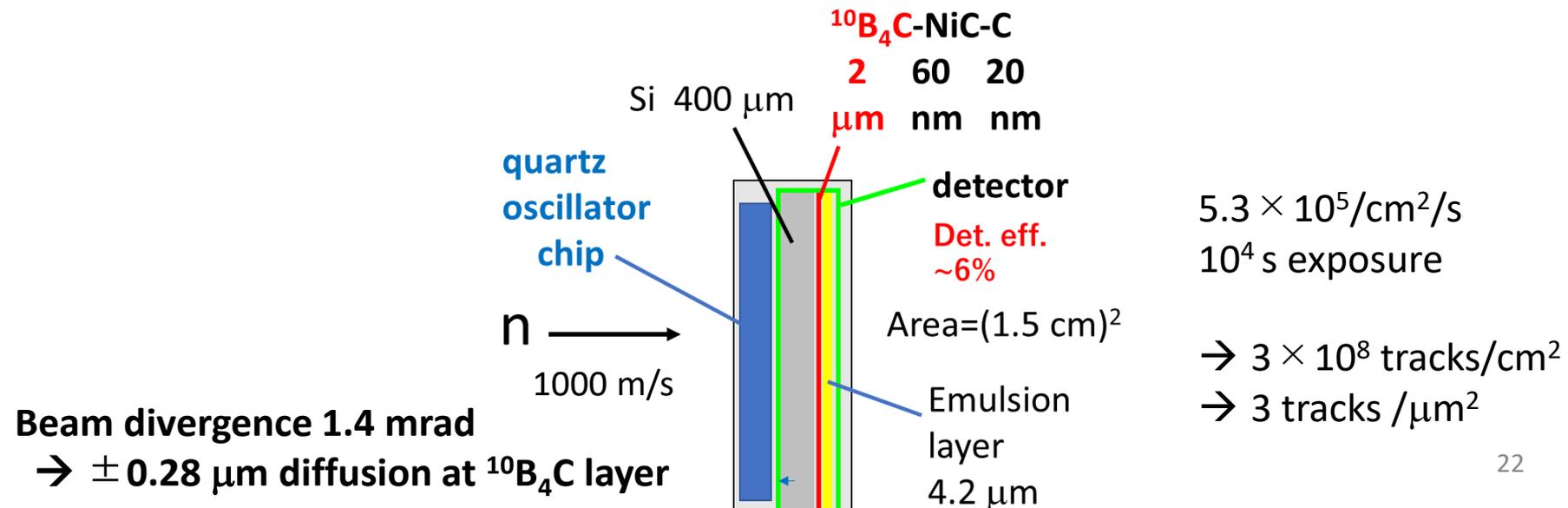
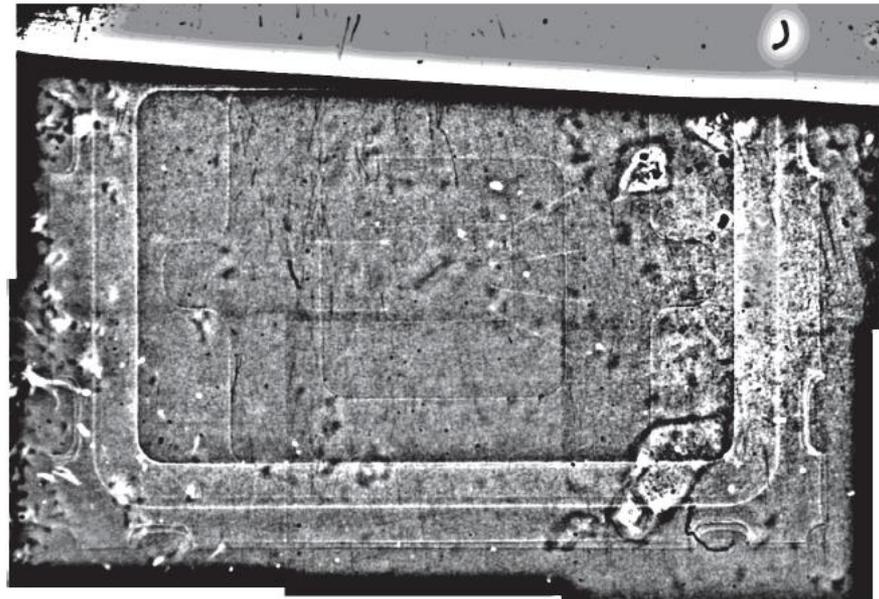
照射期間を1か月程度に抑えたい $\rightarrow$  少なくともILL, PF2-EDM程度のFluxが欲しい。

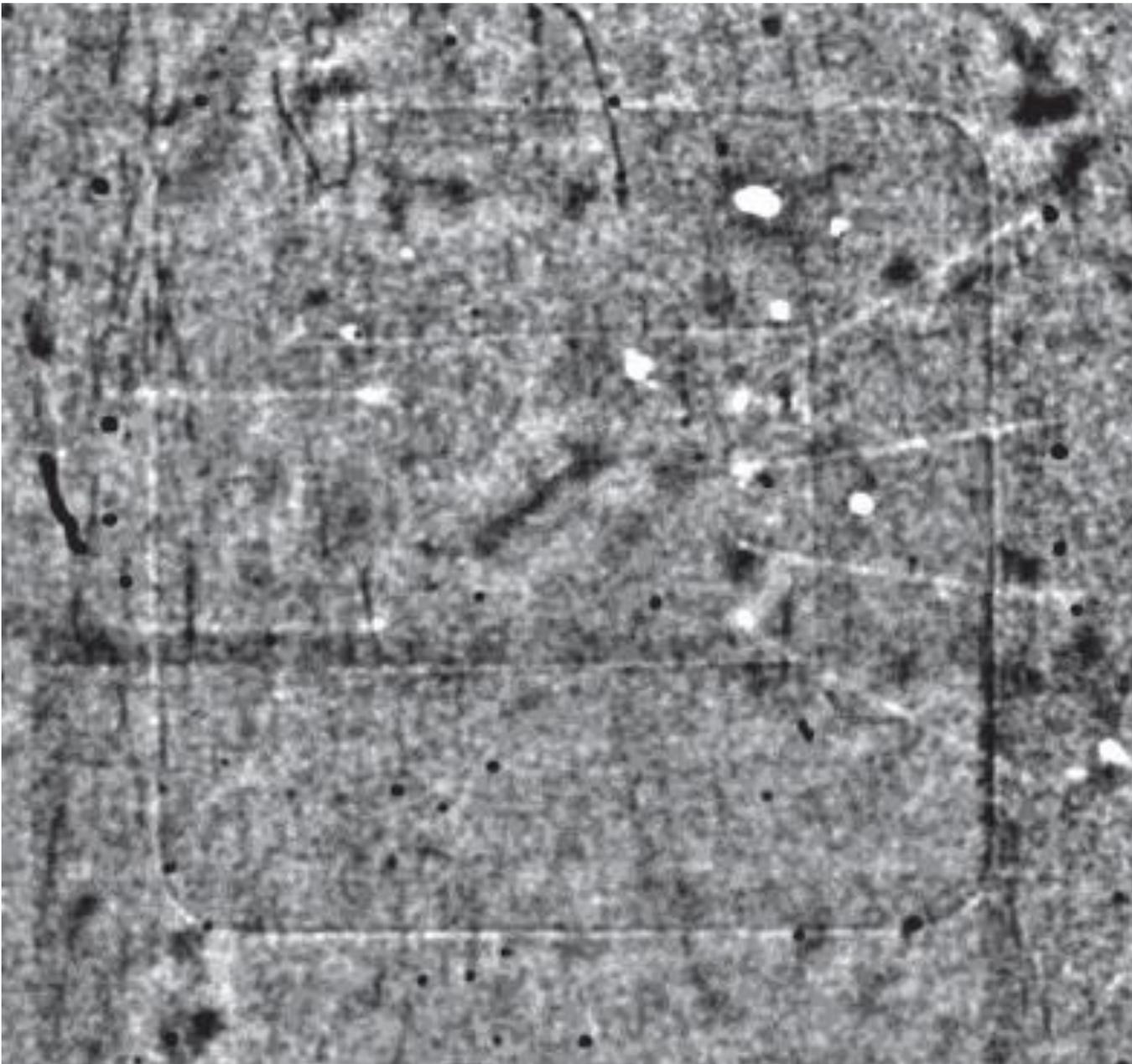
# 1<sup>st</sup> trial of neutron imaging

(Exp. @J-PARC MLF BL05)

(a quartz oscillator chip)

Hirota et al., J. Imaging 2021, 7(1)





**Wires ( $\sim 30 \mu\text{m}$  diameter) were clearly seen.**

# Further study for neutron imaging (exp @ BL05)

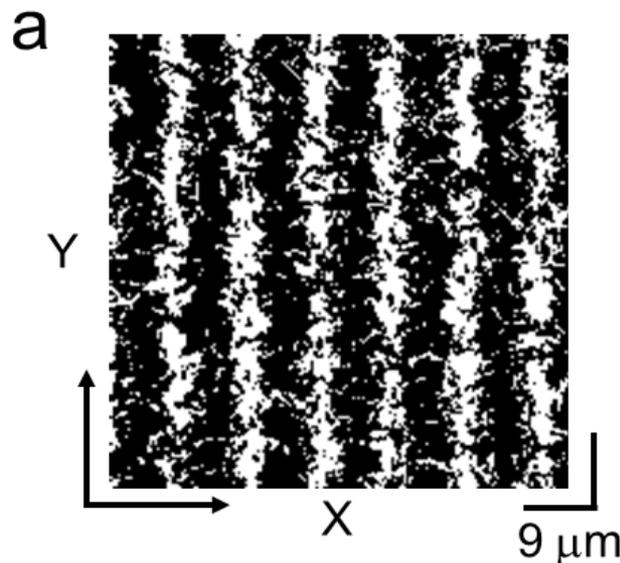
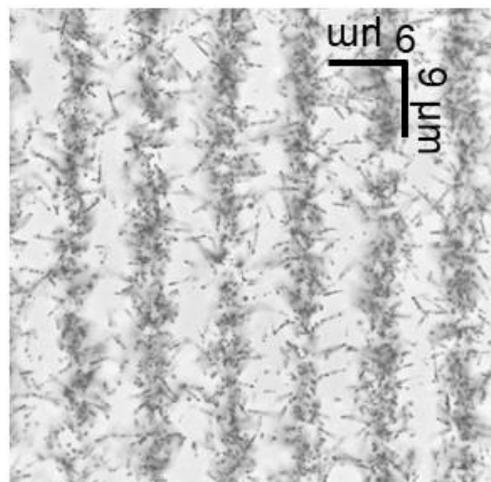
(RIKEN, KEK, KURRI, Nagoya U., Wah U.)

Muneem et al.(2021 preprint, Research Square)

DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-966133/v1>

## Analysis of transmission image of the Gd grating (9 $\mu\text{m}$ pitch, 3 $\mu\text{m}$ aperture)

High density exposure  $\rightarrow$  Analysis of hit pixels around edge parts, **without track analysis.**



Beam divergence 0.3 mrad.  
Converter 1.5mm from  
the grating.

$2 \times 10^6/\text{cm}^2/\text{s}$   
 $10^5$  s exposure  
 $\rightarrow 2$  tracks / $\mu\text{m}^2$ ,

**$\rightarrow$  Imaging resolution  $\sim 0.9 \mu\text{m}$ .  
(Highest among studies with same evaluation method)**

# まとめ

- 重力場中の超冷中性子の量子状態の位置分布の観測は重力、未知短距離力、余剰次元等に関する情報を与える。
- 分布を高い分解能で測定するために超冷中性子用原子核乾板（分解能 11～100 nm）を開発した。既存のものよりも1~2桁高い分解能である。
- この乾板は原子核乾板技術と低速中性子技術が結晶化したものである。
- ILL,PF2 2021年照射により、実際に分布が高い分解能で取得できることを確認した。理論曲線でよくフィットでき、量子状態の位置分布としてよく解釈できた。
- 今後、鏡の改良を行い、未知短距離力探索を行う。
- その際に、少なくとも現在と同程度のFlux（ILL PF2:  $\sim 2 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>/s）が必要である。（ここに数式を入力します。）
- 中性子イメージングの基礎研究も始まっている。