

2017/2/19 23rd ICEPP Symposium

重力場による超冷中性子の 量子状態を利用した弱い 等価原理の検証に向けた研究

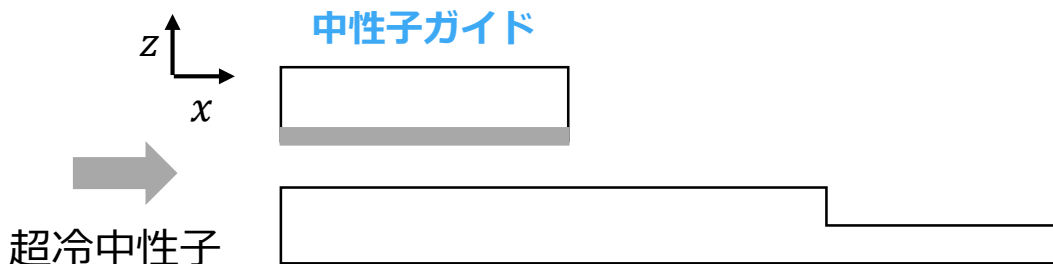
内田 健太

東京大学 駒宮研 M2

- 中性子は電荷を持っておらず、**重力**を調べる優れたプローブ
- 特に速度が10m/sほどの**超冷中性子**(Ultra Cold Neutron, **UCN**)は**物質表面**で**反射**する性質を持つ
- UCNの重力と床の束縛状態を利用した**弱い等価原理の検証**実験を考案した
- この実験では量子力学的現象を利用して $\frac{m_g(\text{重力質量})}{m_i(\text{慣性質量})}$ の測定を行うことが可能

ガイド内では**重力**に**束縛**された状態

エネルギーが高い超冷中性子を**吸収・散乱**



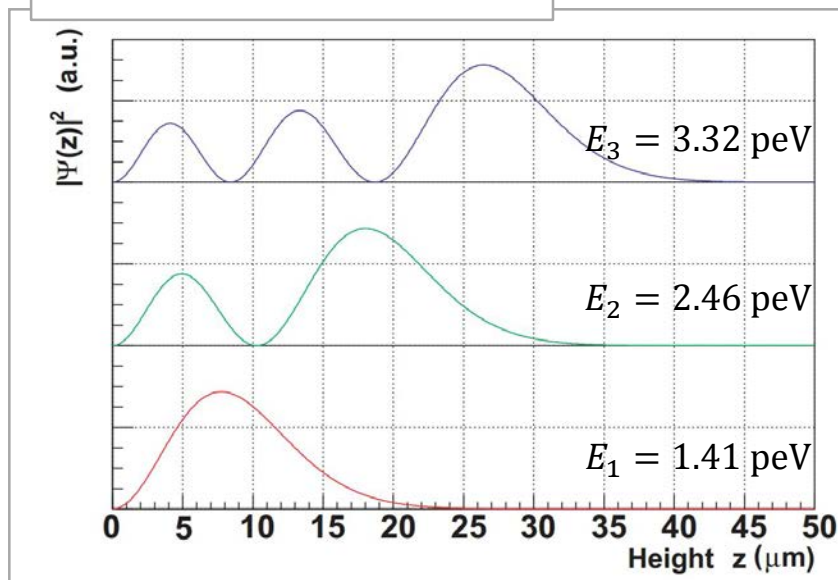
検出器表面に蒸着した ^{10}B 層で

荷電粒子に変換し**検出**

ピクセル検出器

段差 ポテンシャル変化によって準位が
混ざり波動関数が**時間発展**する

重力と床の束縛状態



Schrödinger 方程式

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

$$V(z) = \begin{cases} \infty & (z \leq 0) \\ m_g g z & (z > 0) \end{cases}$$

前スライドのような実験セットアップによって**位置分布の時間発展**を測定する

実験結果から 分布の**長さスケール** l_0 、**時間スケール** t_0 を
フィッティングで求め、以下の量を計算する

$$\frac{2l_0}{t_0^2} = \left(\frac{m_g}{m_i}\right)_{\text{QM}} g$$

$l_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m_i m_g g}\right)^{\frac{1}{3}}, t_0 = \left(\frac{2m_i \hbar}{m_g^2 g^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

別途、古典的に重力加速度を測定して

$$a = \left(\frac{m_g}{m_i}\right)_{\text{classical}} g$$

両者を比較することで量子力学における**等価原理**を検証できる

● 時間発展情報を得る 2 つの方法

チョッパー方式

中性子ガイドの前方にチョッパーを設置する。検出器に到達するまでの時間は中性子の速度によって異なるので、時間情報を得られる



中性子ごとに速度がわかり
時間発展を見やすい



チョッパーの duty比 の分
(5 msec – 200 msec)
統計数が減少する

検出器移動方式

段差から検出器までの距離を変えて位置測定を行う

距離に応じて、検出器に入射するまでの時間が変化する

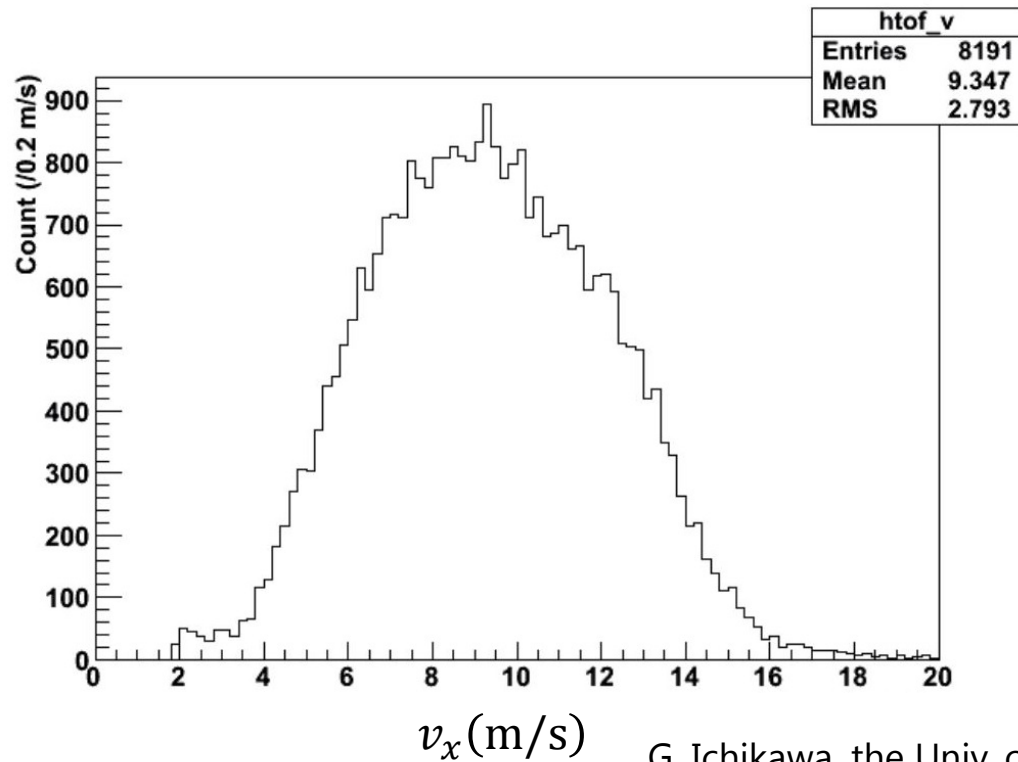


統計数を無駄にしない



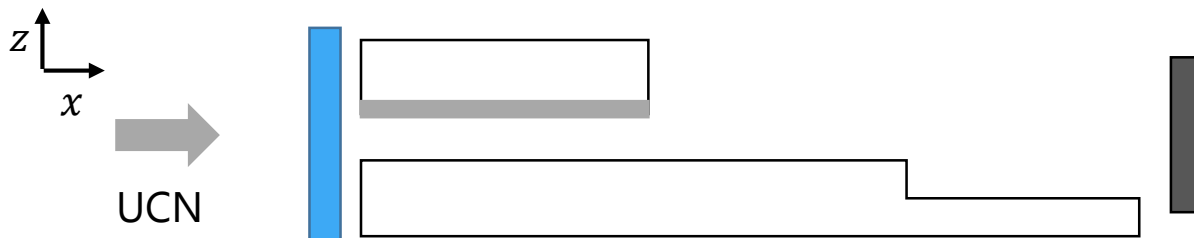
得られる分布は速度分布で
平均した値

Time of flight (TOF) 測定からUCNの速度分布が得られる



G. Ichikawa, the Univ. of Tokyo, 2011, Ph.D. thesis.

中性子チョッパー

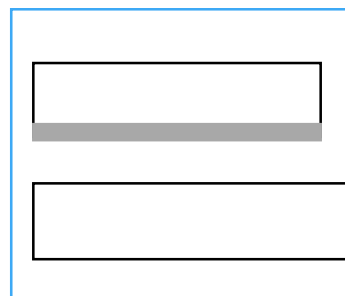
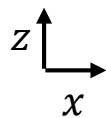


- チョッパー方式と検出器移動方式についてそれぞれシミュレーションを行った

シミュレーション概要

各エネルギー準位が
一様な状態で入射

超冷中性子

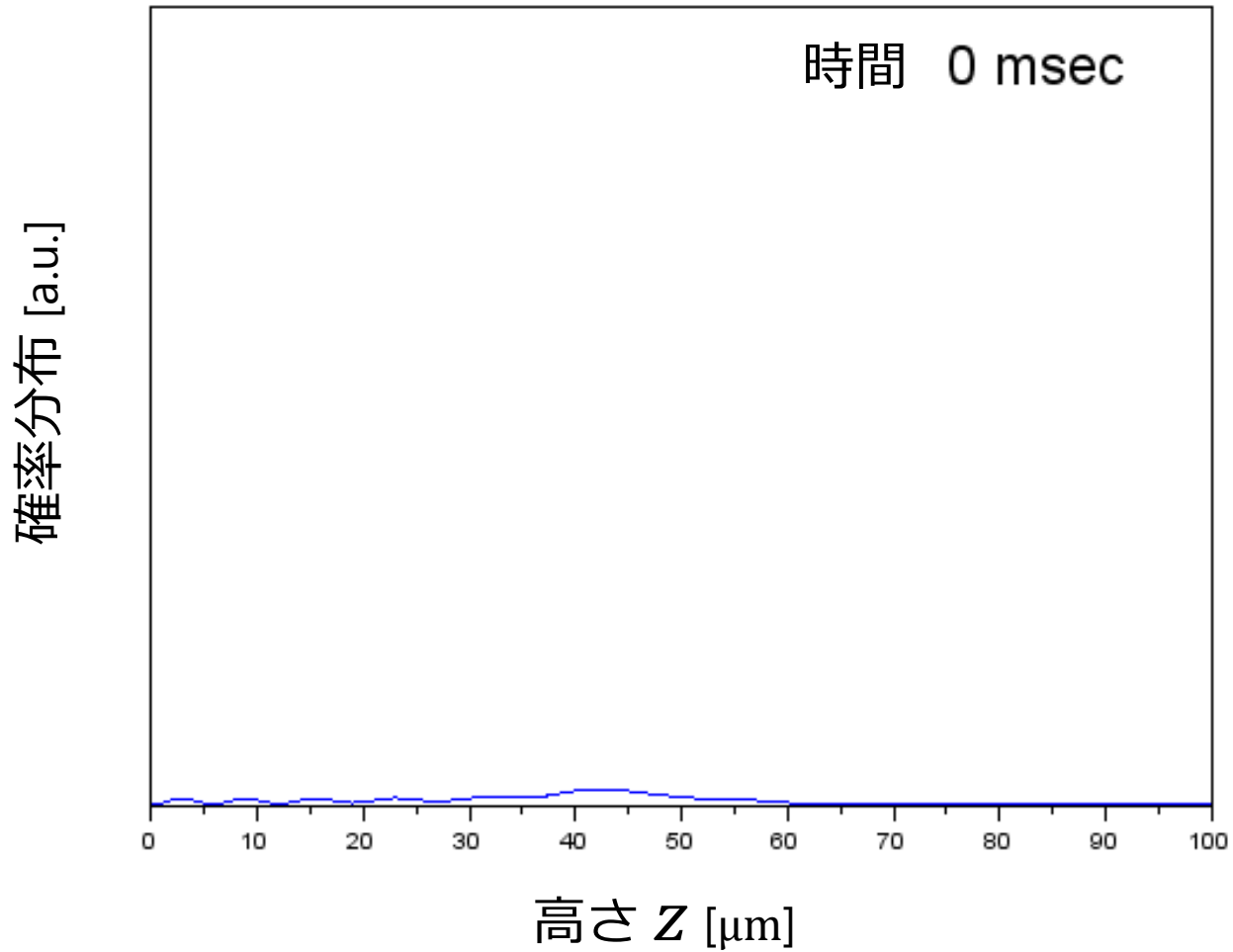


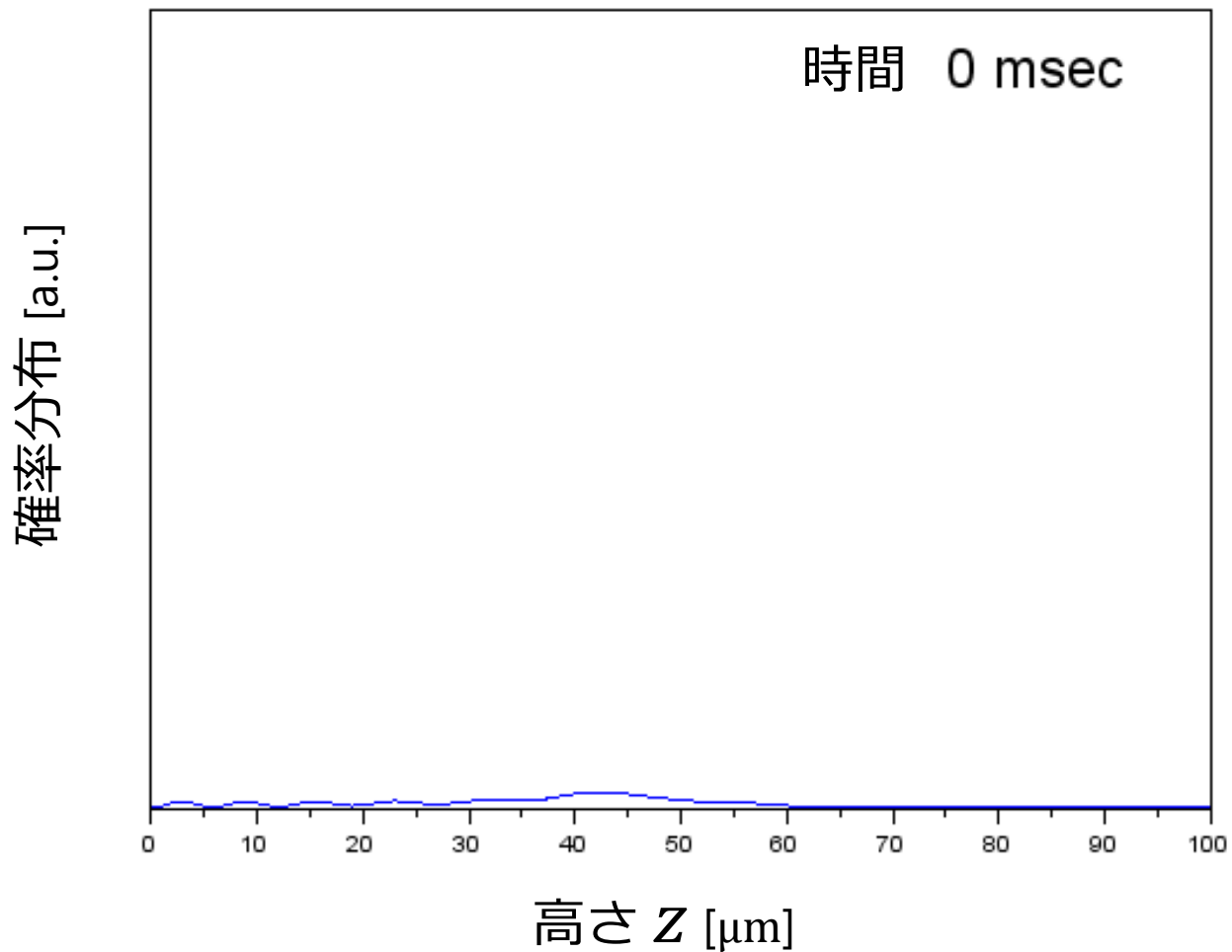
Schrödinger 方程式に
したがって**時間発展**

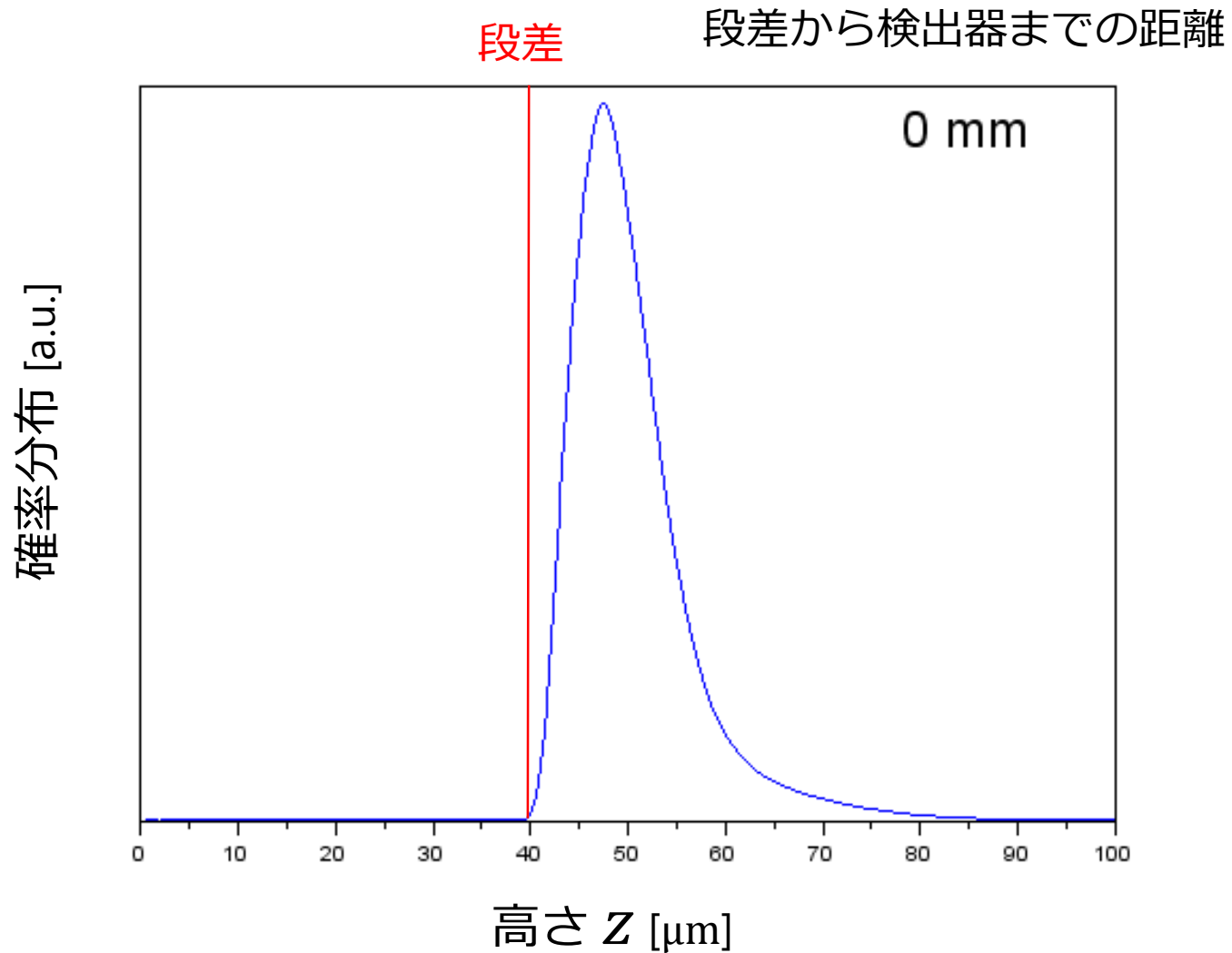


各エネルギー準位の**減少**レート
が以下の量に比例

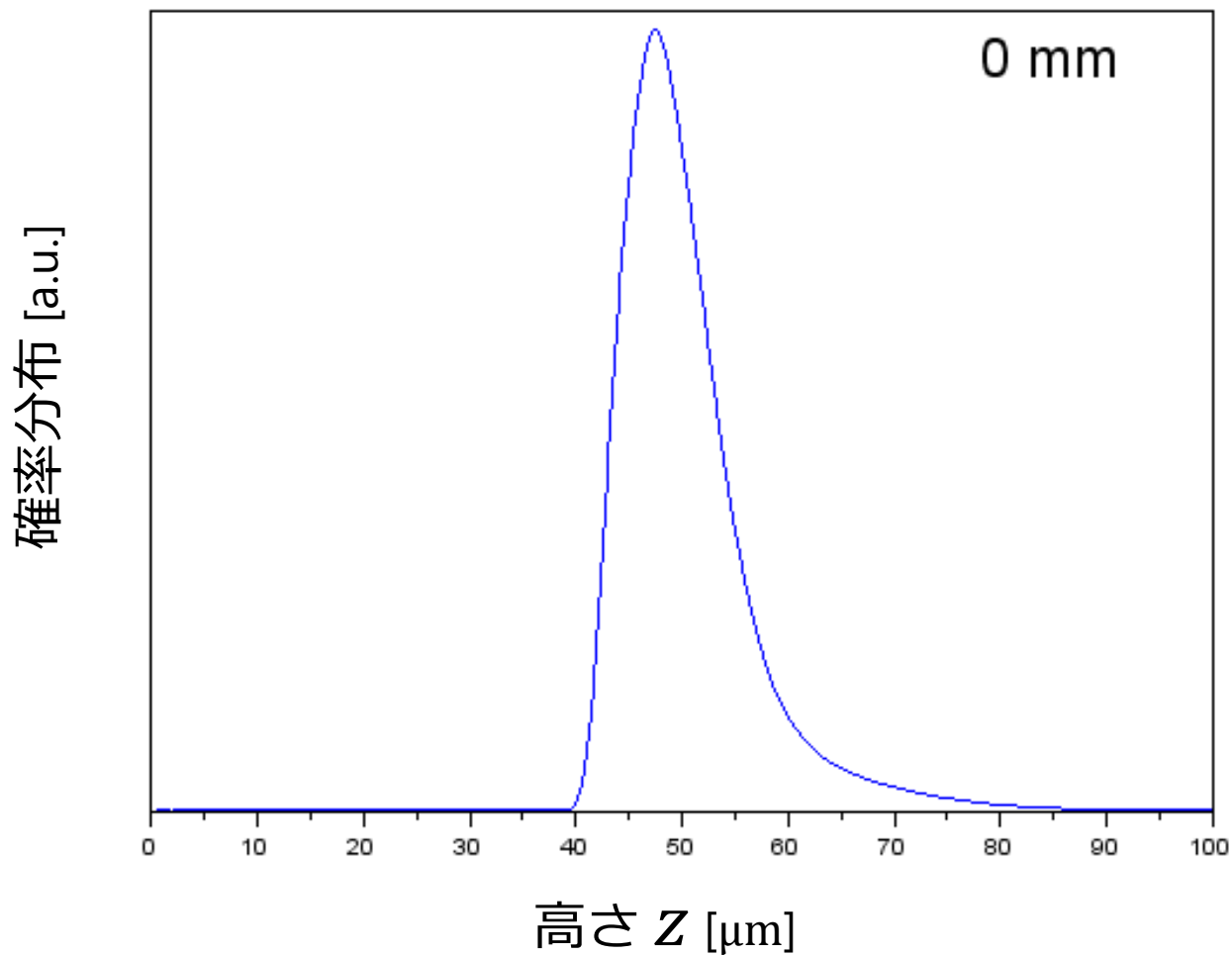
$$\int_{h-2\delta}^h |\tilde{\psi}_n(z)|^2 dz \quad \left\{ \begin{array}{l} h: \text{ガイドの高さ} \\ 2\delta: \text{吸収部の長さ} \end{array} \right.$$







段差から検出器までの距離



- チョッパー方式と検出器移動方式のどちらを採用するかを決定し、また等価原理の検証に最も感度を持つ実験セットアップを決定するためにシミュレーション結果を用いて最適化を行った
- $\kappa \equiv \frac{m_g}{m_i} = 1$ の場合の分布と κ を変化させたときの分布から β という無次元量を定義して β を最大化した

- 同じセットアップで比較したとき

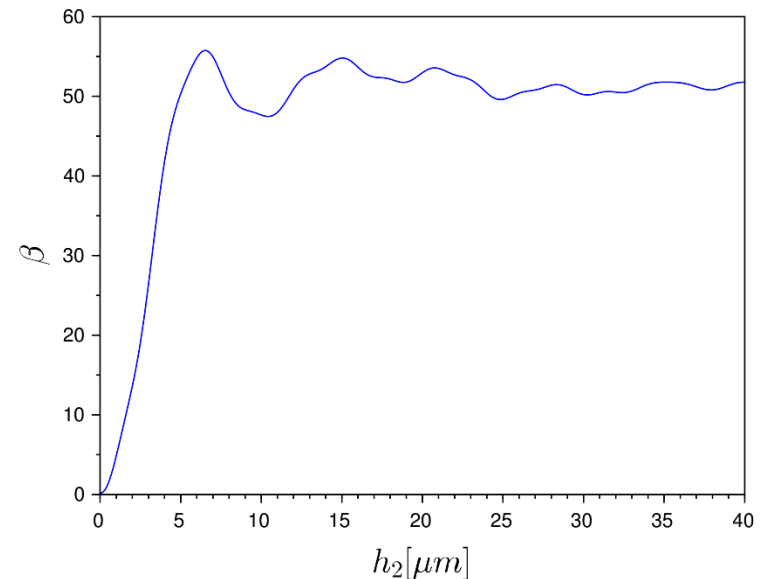
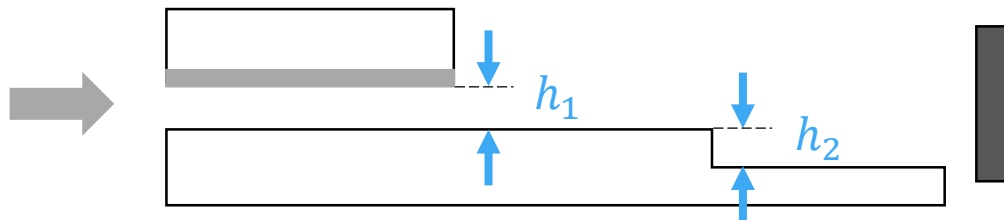
$$\beta_{\text{チョッパー式}} / \sqrt{40} = 8.8 \quad , \quad \beta_{\text{検出器移動式}} = 1.6$$

↑ チョッパーの duty比

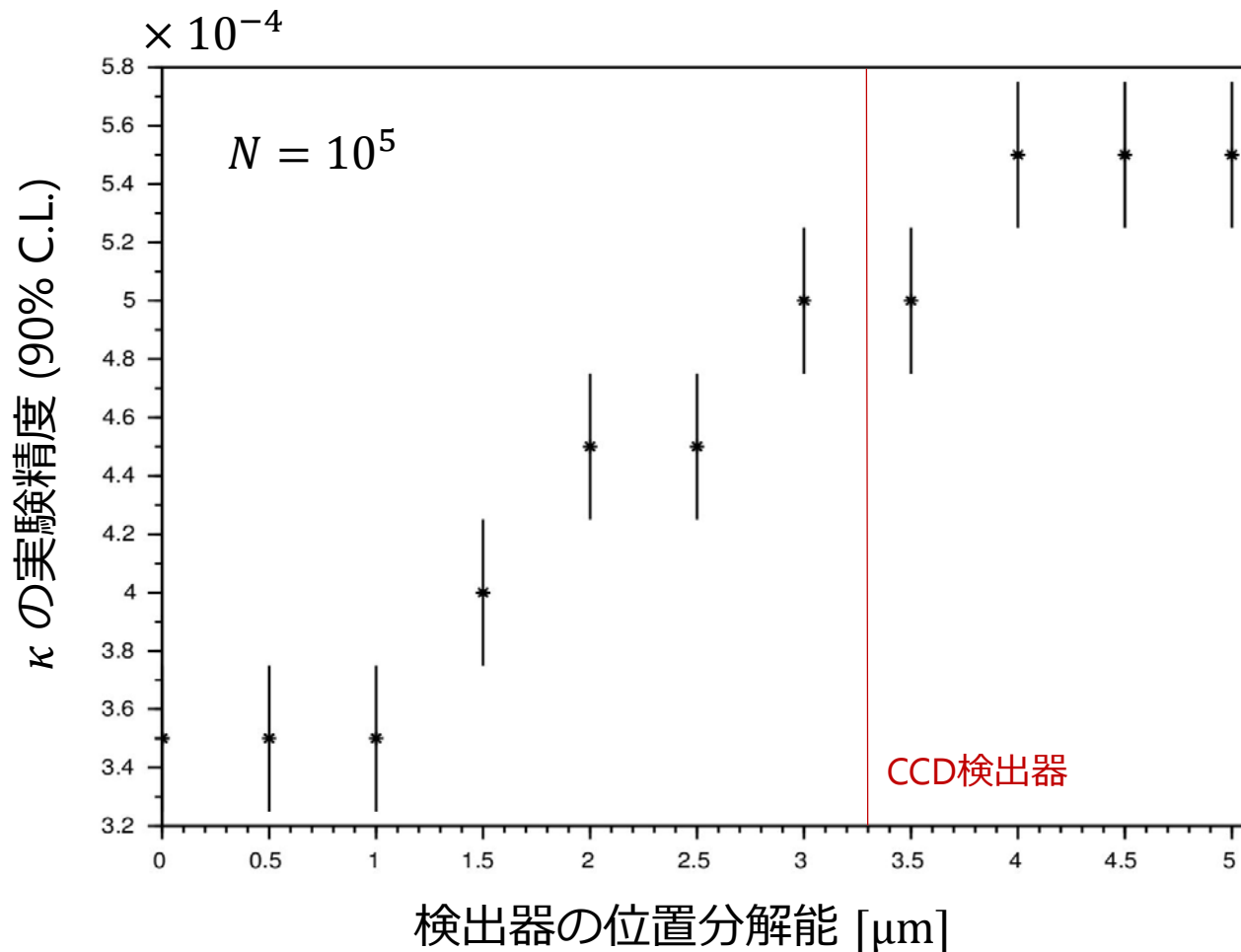
であり、チョッパー式のほうが検出器移動式より優れている

- h_1 と h_2 について最適化を行った

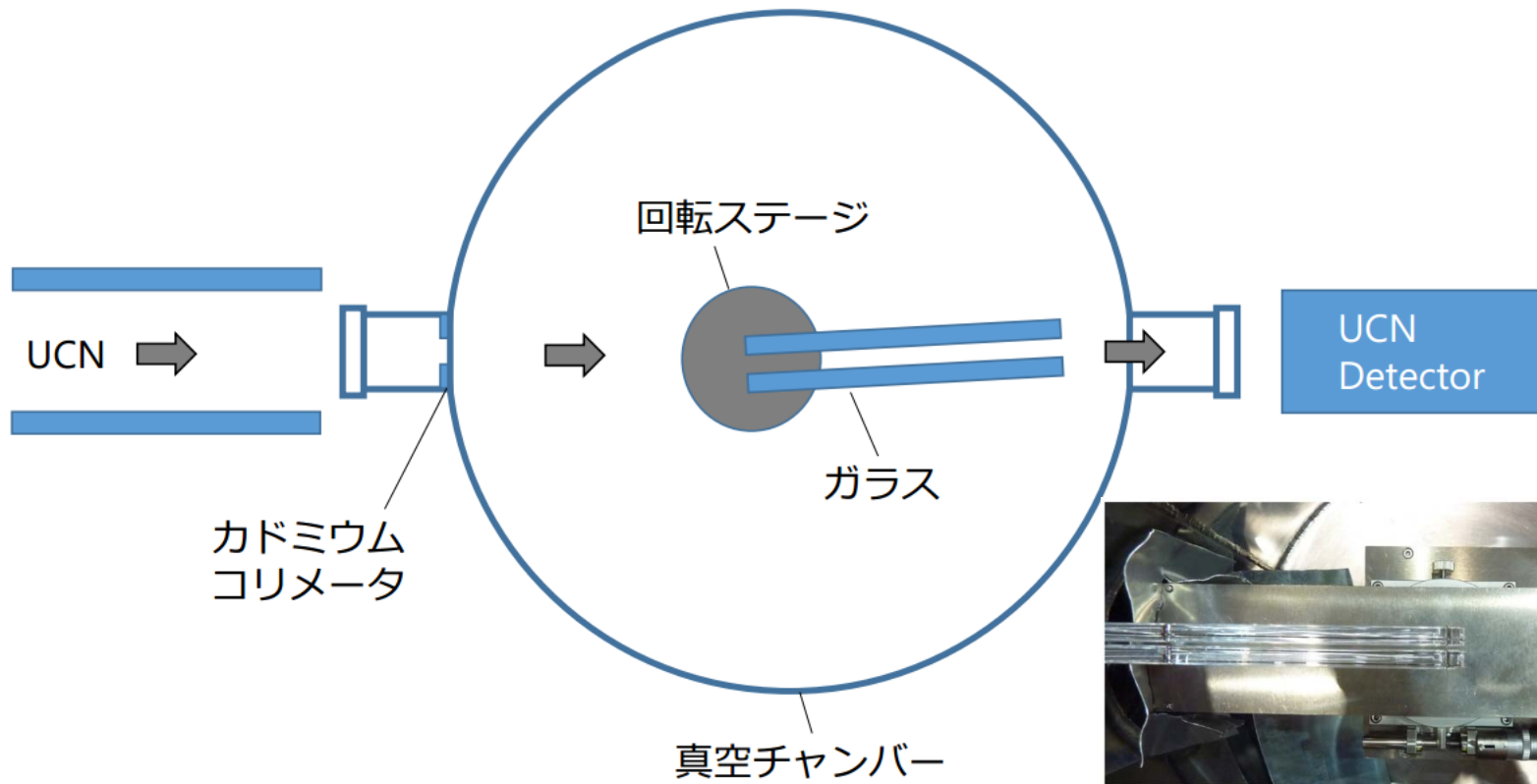
$$h_1 = 22 \mu\text{m} \quad , \quad h_2 = 40 \mu\text{m}$$



- 最適化したパラメータを用いて M.C. simulation を行い $\kappa \left(= \frac{m_g}{m_i} \right)$ を maximum likelihood で求めた場合の実験精度を計算

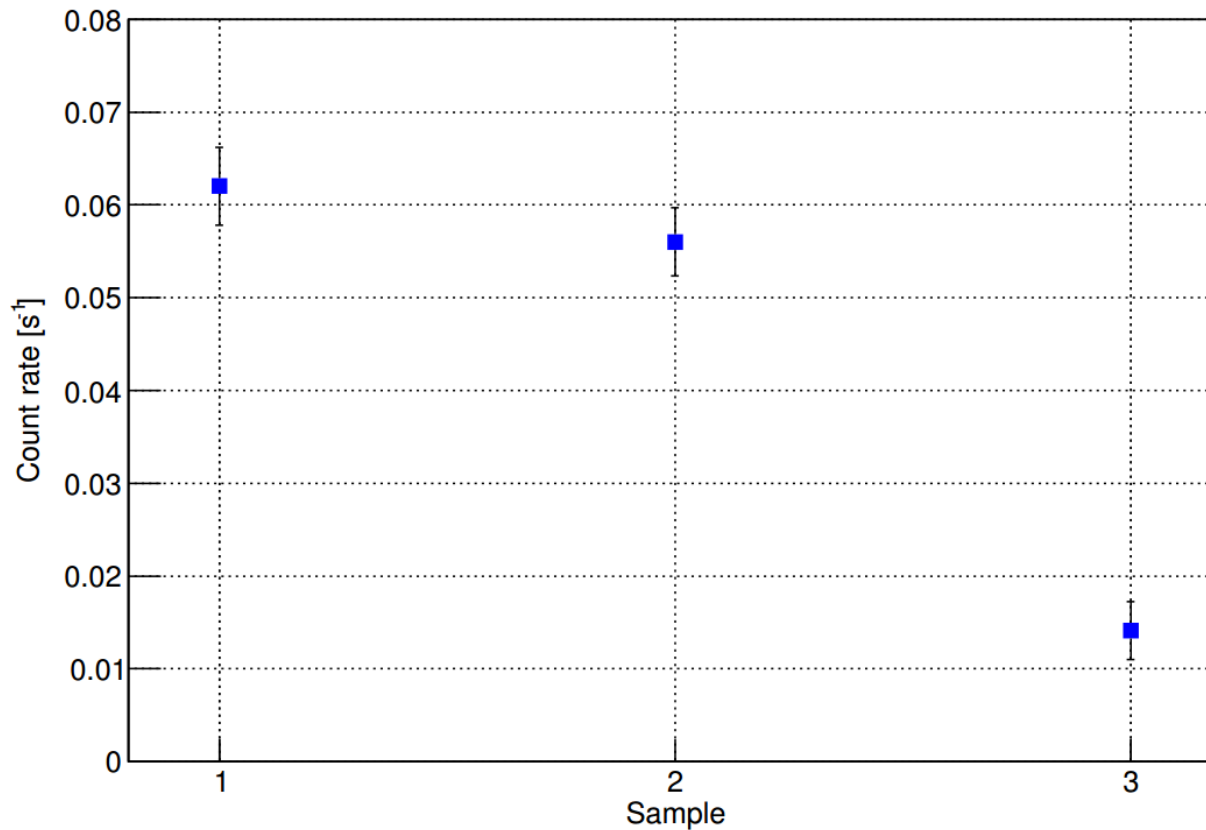


- J-PARC MLF(物質・生命科学実験施設)にて超冷中性子のガラス反射率測定を行った
- 超冷中性子の重力束縛状態が持つ速度である数十mm/sスケールの速度依存性を見ることを目指した



- 2枚のガラスを 5mm 離して回転ステージの上に鉛直に設置
- UCN を入射させ、反射を繰り返して出てくる数を検出器でカウント
- ガラスの種類を変えることで表面粗さ依存性を、回転ステージの角度を変えることで垂直速度依存性を見る

サンプル	ガラス種類	表面粗さ R_q
1	石英ガラス	1 nm 2 枚
2	BK7	24 nm, 34 nm
3	BK7	471 nm, 465 nm



表面粗さが良いほど通過率(反射率)が高い

- 超冷中性子の重力束縛状態の時間発展を測定することで弱い等価原理の検証となる
- シミュレーションの結果、チョッパー方式を採用した場合に m_g/m_i を 0.1% を切る精度で測定できることを示した

Back up

量子力学内での弱い等価原理の意味

- $m_i = m_g$ (弱い等価原理) が成り立つならば一様重力場を座標変換によって消すことができる

ニュートン力学

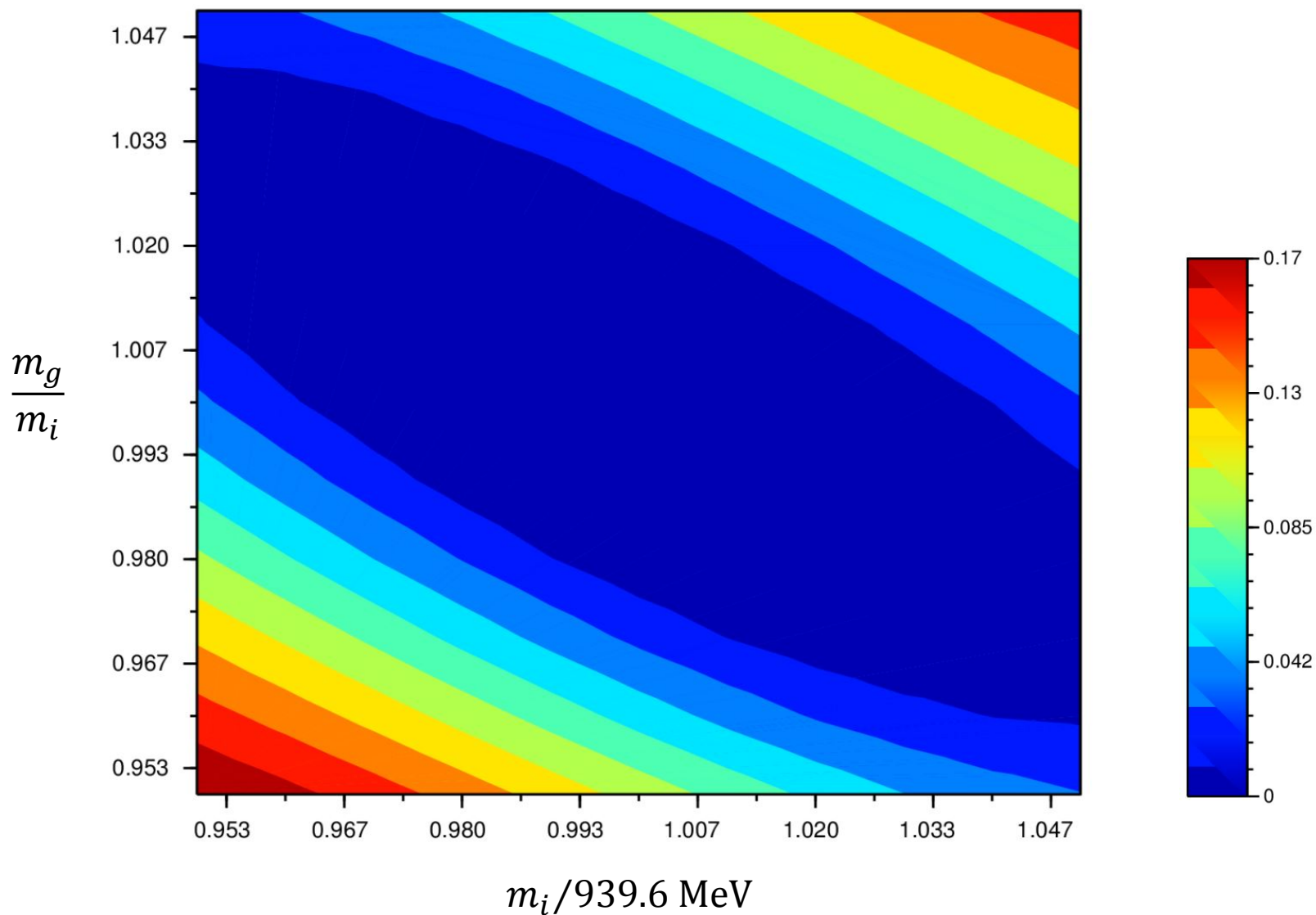
$$m_i \frac{d^2 z}{dt^2} = -m_g g \quad \longrightarrow \quad \boxed{m_i = m_g, z' = z + \frac{1}{2} g t^2} \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2 z'}{dt^2} = 0$$

量子力学

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + m_g g z \right] \psi$$

$$\boxed{\begin{aligned} m &= m_i = m_g, z' = z + \frac{1}{2} g t^2 \\ \psi'(z', t) &= \psi(z, t) e^{\frac{i}{\hbar} \left(m g t z + \frac{1}{6} m g^2 t^3 \right)} \end{aligned}} \quad \longrightarrow \quad i\hbar \frac{\partial \psi'}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi'}{\partial z'^2}$$

2次元 confidence interval 概形



最適化のパラメータ β (一般論)

- $g(x) \equiv f(x; \alpha = 1)$ と $f(x; \alpha)$ の差異を評価したい



$$-\int g(x) \log f(x; \alpha) dx$$

Log likelihood

$$-\log L = -\sum_i N_i \log p_i$$

- $\alpha = 1$ のときの値を原点にとり、統計的なふるつきを単位にして評価したいので

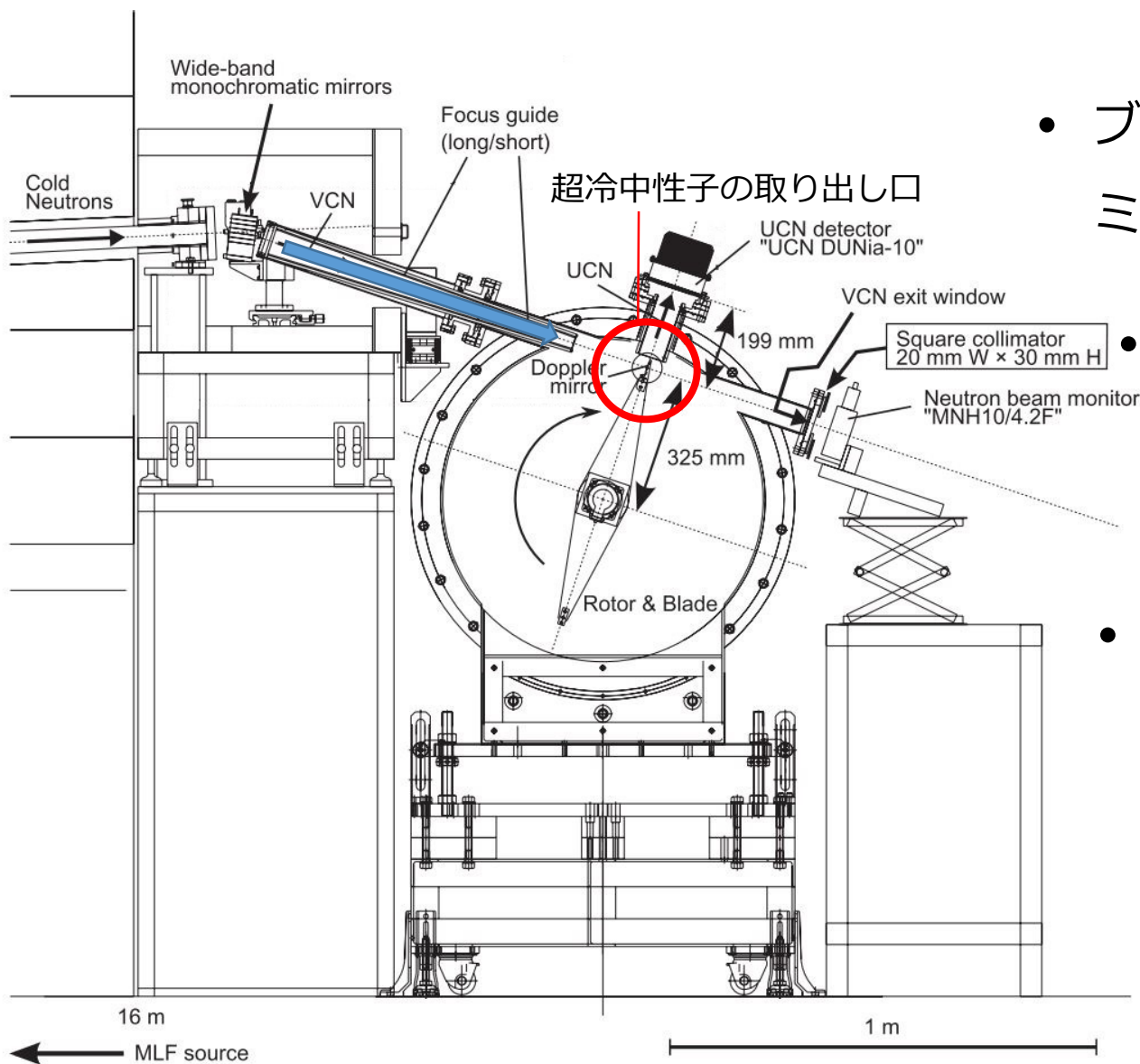
$$F(\alpha) = \frac{-\int g(x) \log f(x; \alpha) dx - \mu}{\sigma}$$

$$\left[\begin{array}{l} \mu = -\int g(x) \log g(x) dx \\ \sigma = \sqrt{\int g(x) \log^2 g(x) dx - \mu^2} \end{array} \right.$$

- $F(\alpha)$ を $\alpha = 1$ の近傍でTaylor展開すると0次、1次の項が消え $F(\alpha) = \beta \cdot \alpha^2$

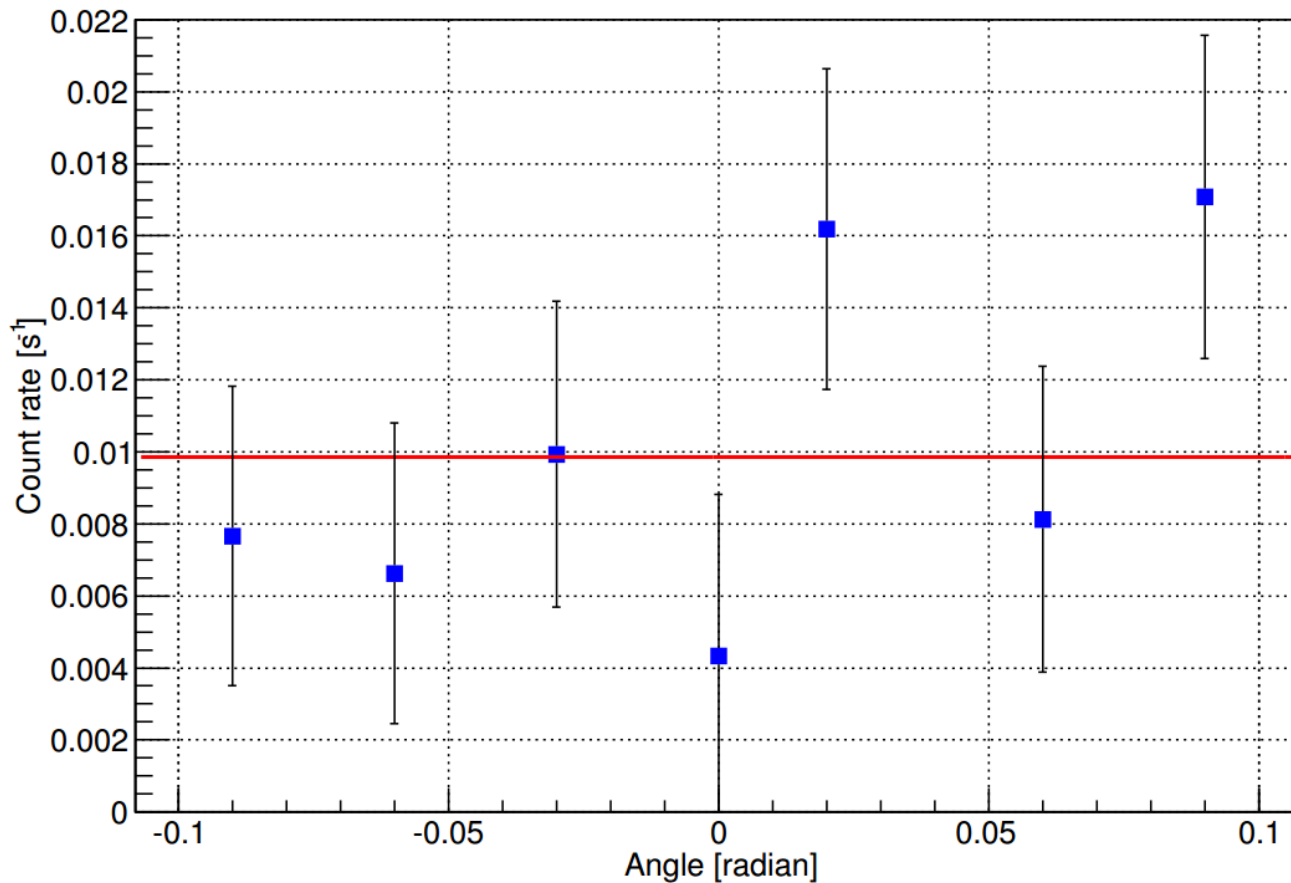
$$\beta = \frac{-\int g(x) \log f(x; \alpha) dx - \mu}{\sigma \alpha^2}$$

ドップラーシフター



- ブレードの先の中性子ミラーが68 m/s で回転
- 入射してきた中性子がミラーで反射すると速度を奪われる
- 136 m/s の中性子のタイミングと合わせることで超冷中性子が生成される

角度依存性測定



表面粗さがよく測定した角度範囲では直線になる

誤差を考慮するとフィッティングした直線とよく合っている