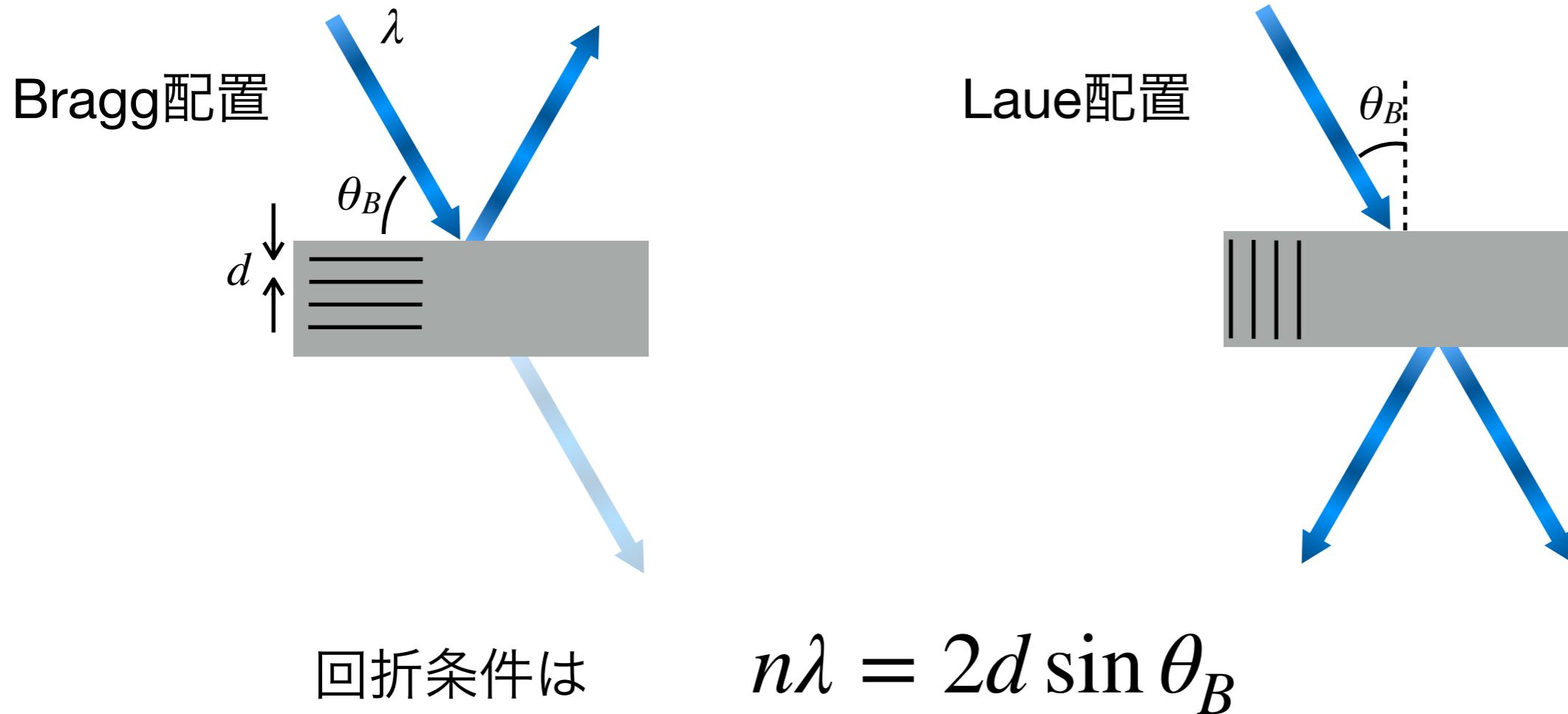


動力学的回折を用いた精密測定

名古屋大学 理学研究科 素粒子物性研究室
D3 藤家 拓大

結晶回折

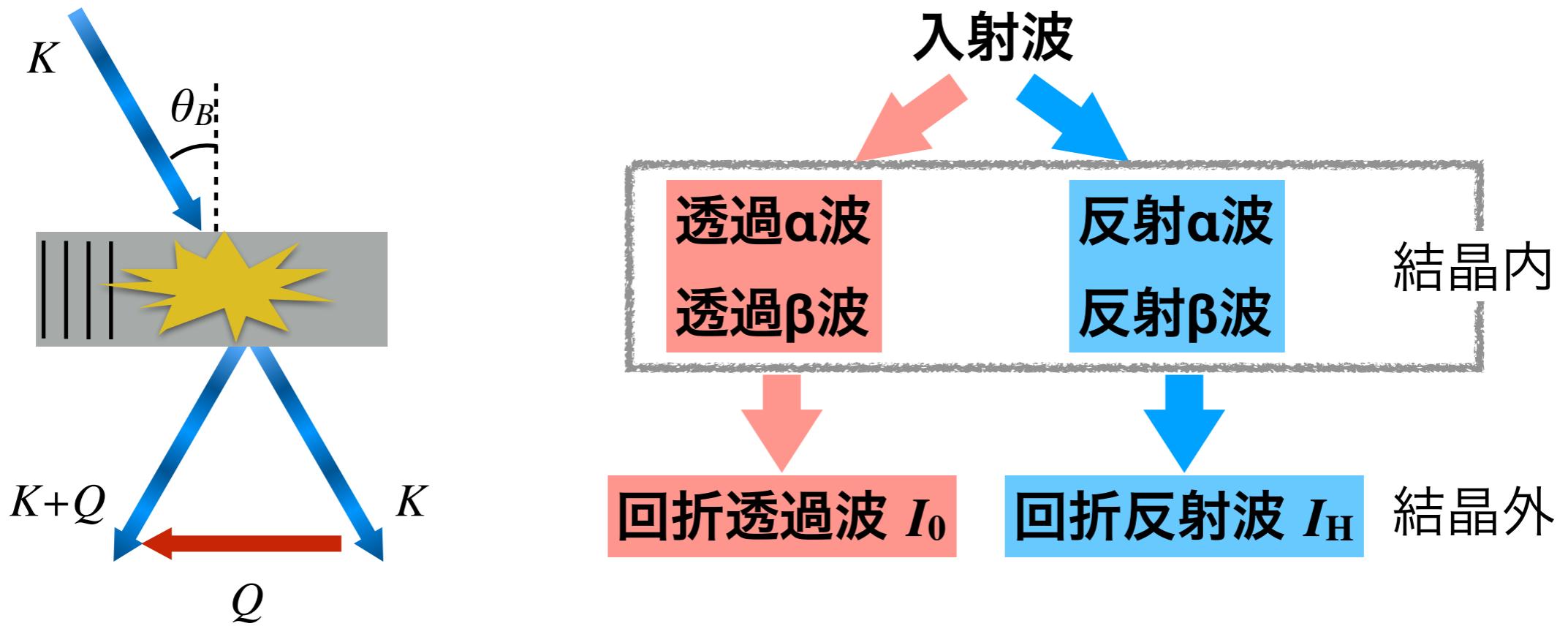
中性子は質量を持ち電荷を持たないド・ブロイ波
単結晶に中性子などの波動を入射すると、特定の条件で回折する



回折波は上記条件を満たすときのみ測定可能
→結晶回折を用いる実験は統計量の多い原子炉実験が有利

動力学的回折

結晶入射面と結晶面が垂直となるよう配置する
中性子波動は結晶内部で4つの波動関数で書き表せる



回折波は α 波、 β 波が干渉する
 v は結晶内のポテンシャル

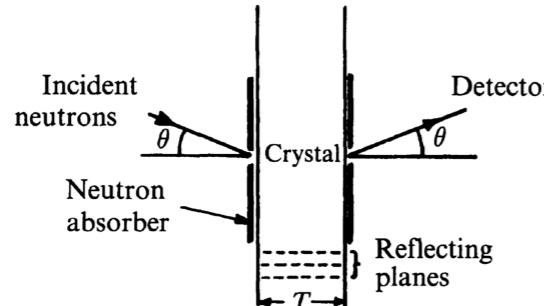
$$\mathcal{H} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{K^2 + v_0}{v_{-Q}} - \frac{v_{+Q}}{(K + Q)^2 + v_0} \right)$$

動力学的回折

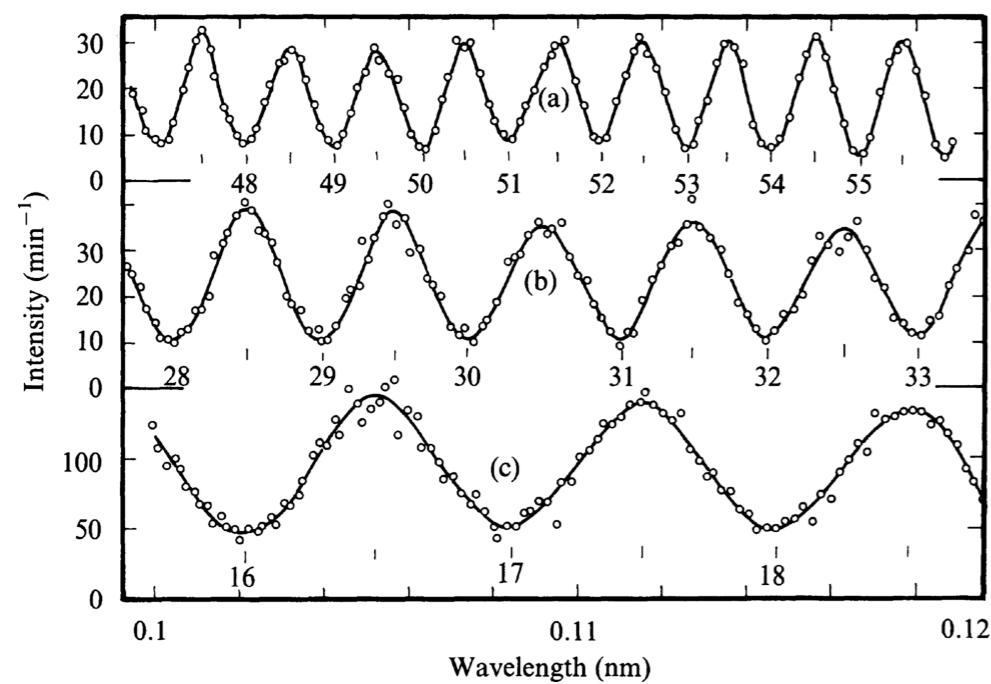
中性子波動は結晶内部で4つの波動関数で書き表せる

回折波は α 波、 β 波の干渉によって干渉縞を作る

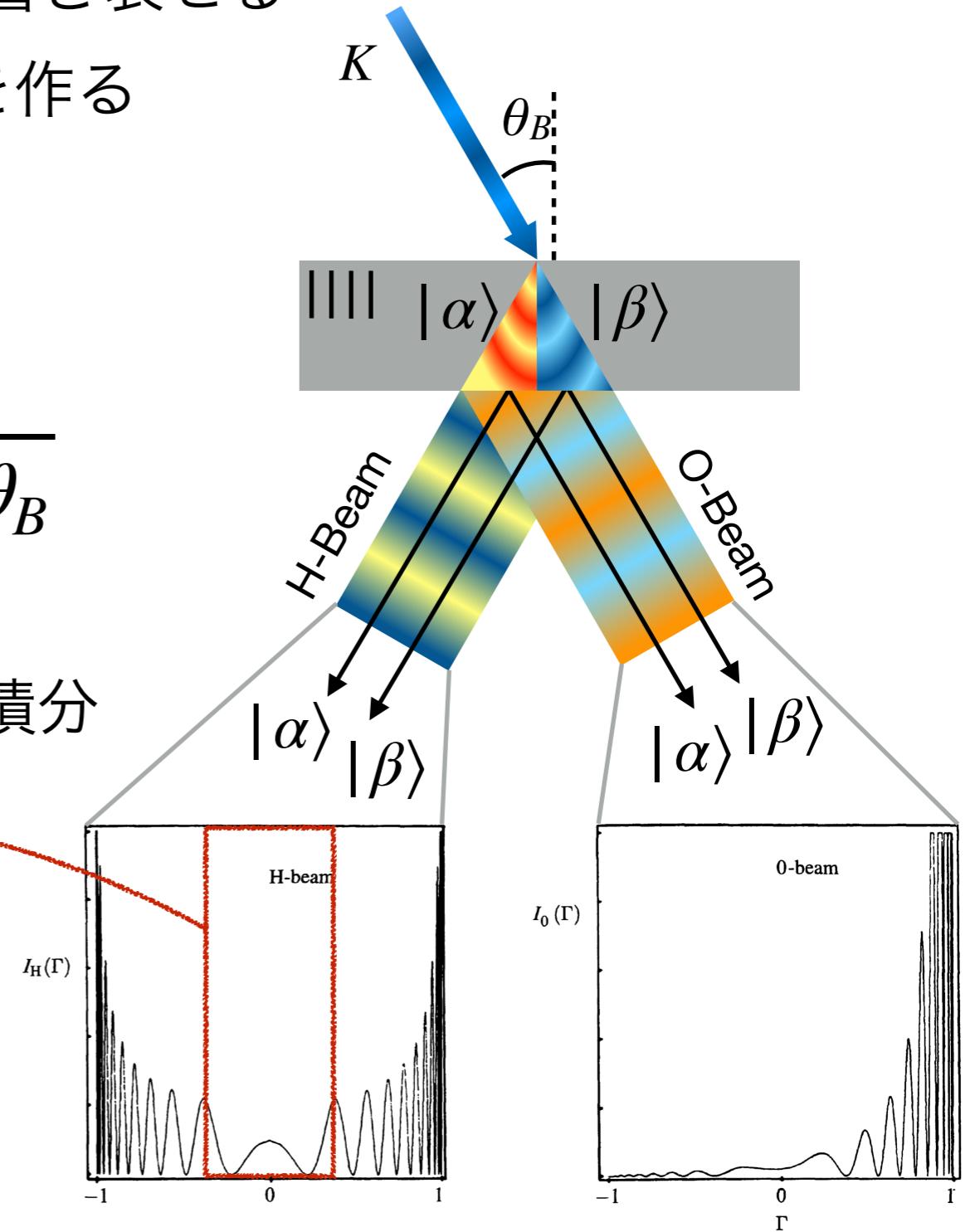
→ ペンデル干渉



$$\phi = \frac{v_H D \lambda}{2\pi \cos \theta_B}$$



中央部を積分



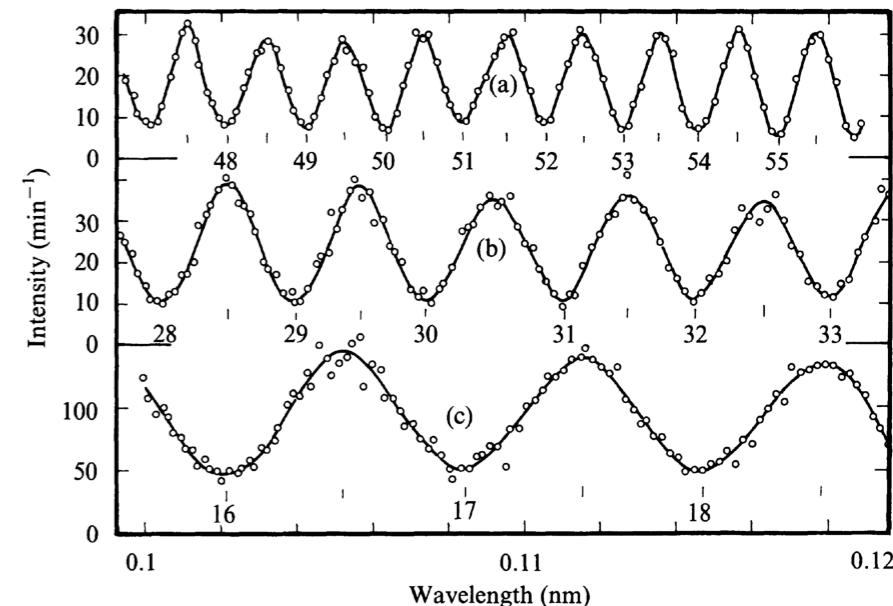
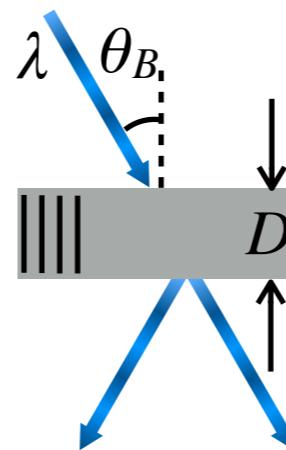
積分ペンデル干渉縞

ペンデル干渉縞は結晶内のポテンシャルを反映する
波長 or 結晶厚さを微小量変えることで、
積分ペンデル干渉縞が測定可能

$$\phi = \frac{v_H D \lambda}{2\pi \cos \theta_B}$$

$$v_H = \frac{2m}{a^3} \tilde{V}(Q) \left\langle \sum_{\nu} e^{iQ \cdot x_{\nu}} \right\rangle$$
$$= \left(\frac{4\pi}{a^3} \sum_{\nu} e^{iQ \cdot x_{\nu}} \right) e^{-W} \left(b_N + [Z - f_e(Q)] b_{ne} + b_5(Q) \right)$$

結晶構造項 Debye-Waller factor Nuclear Scattering length Charge radius Fifth Force

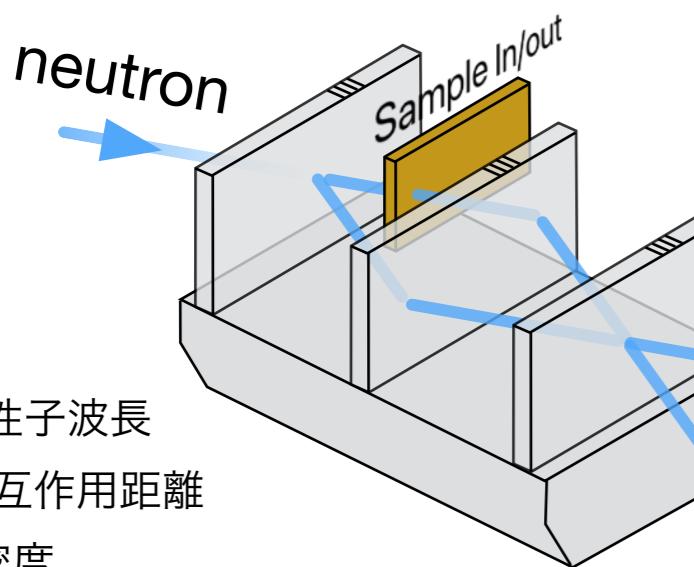
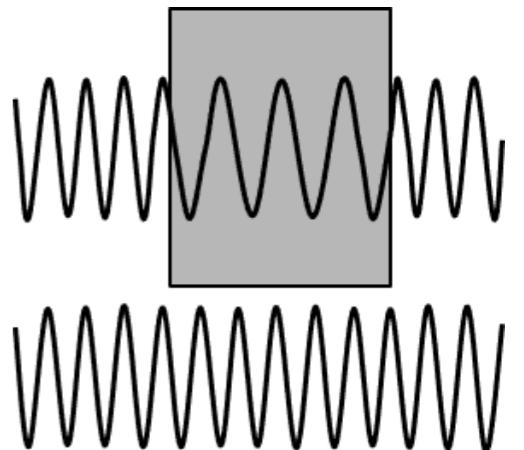


ペンデル干渉から各物理量を決定できる

Nuclear Scattering Length

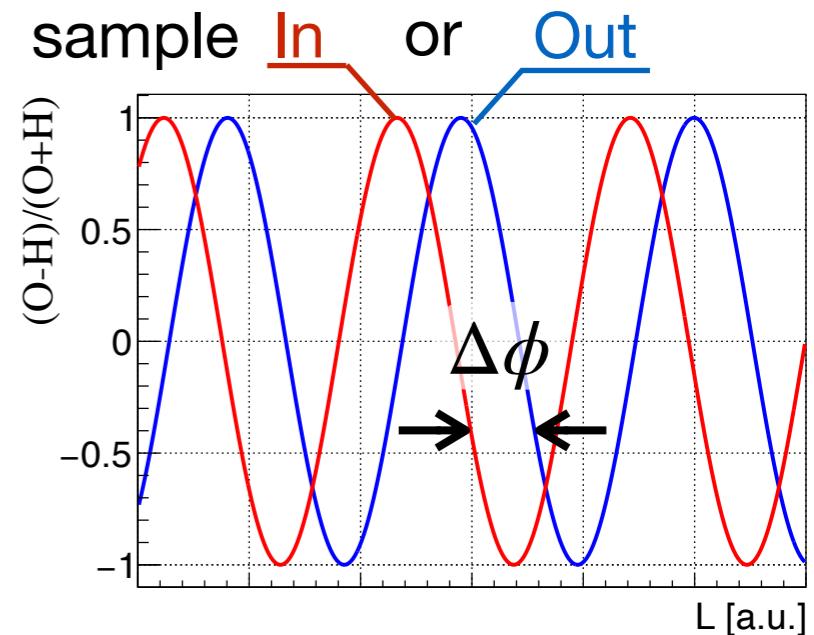
$$b(Q) = e^{-W(Q)} \left[b_N + (Z - f_e(Q)) b_{\text{ne}} + b_5(Q) \right]$$

中性子の散乱で最も支配的な項
中性子実験の基礎パラメータ
運動量依存しない → 中性子干渉計で測定



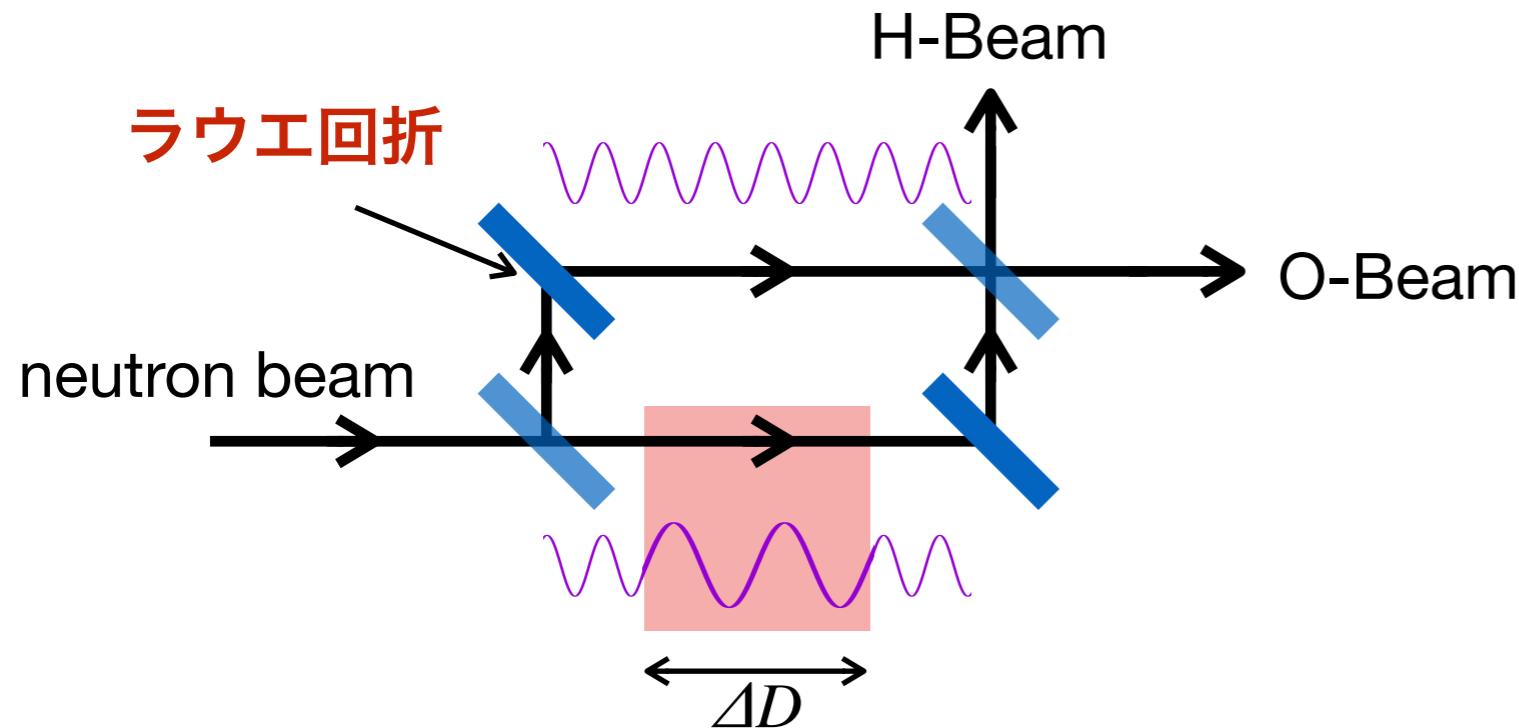
$$\Delta\phi = nb_N D \lambda$$

$$\frac{(O-H)}{(O+H)}$$



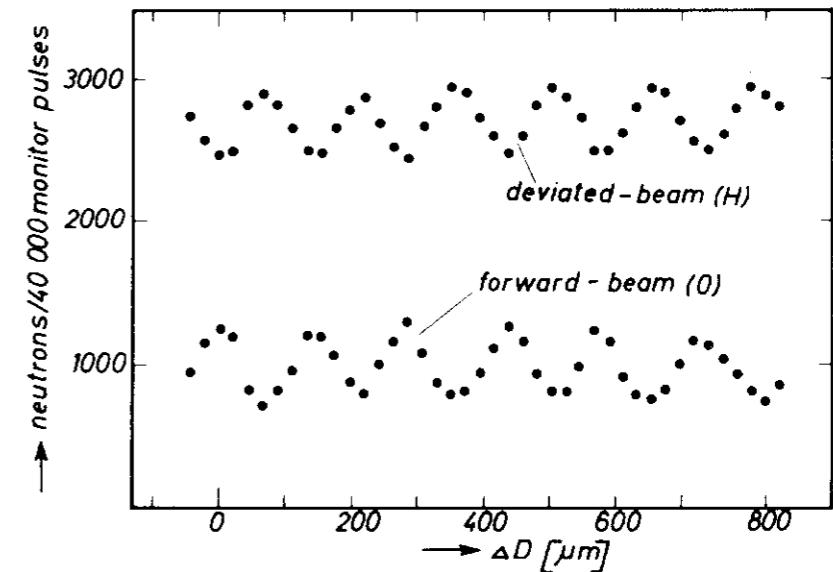
中性子干渉計

区別できない2つの経路を進んだ波動の位相差を
なんらかのパラメータに対する強度比で取り出す

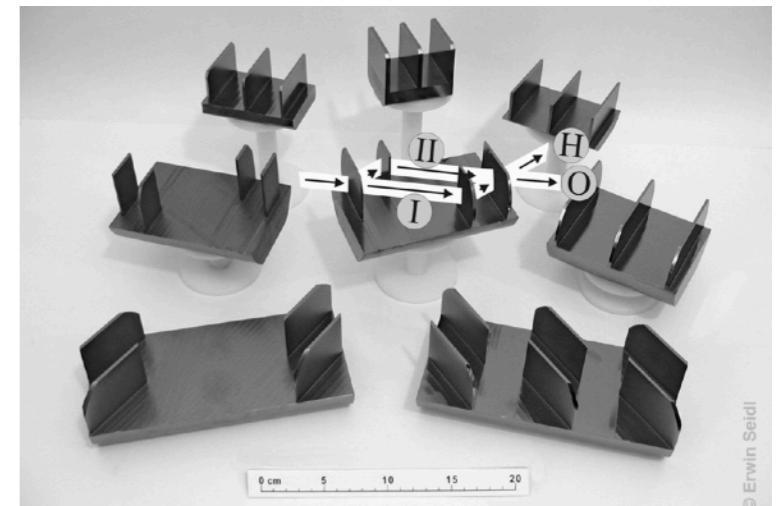


位相差は
$$\Delta\phi = 2\pi \frac{m_n \lambda_n L}{h^2} \Delta E$$

で書ける



by Rauch, Phys. Lett. A 1974



© Erwin Seidl

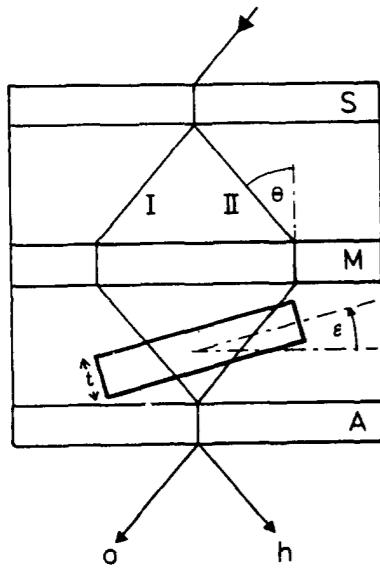
by Neutron Interferometry Rauch

中性子干渉計

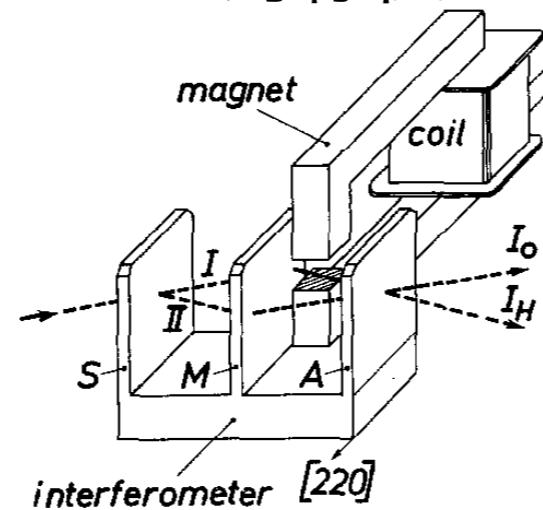
中性子を用いた干渉計は1974年に実証, 実用化

Si単結晶の回折を用いて中性子波動を分離, 重ね合わせをする

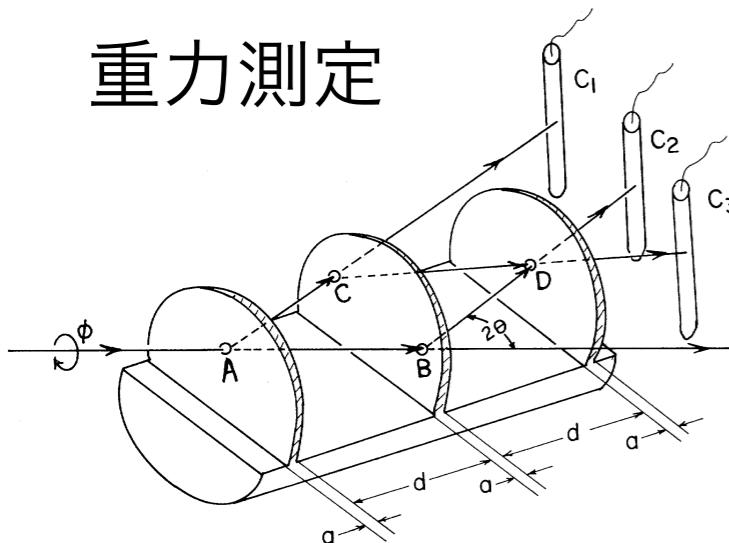
核散乱長測定



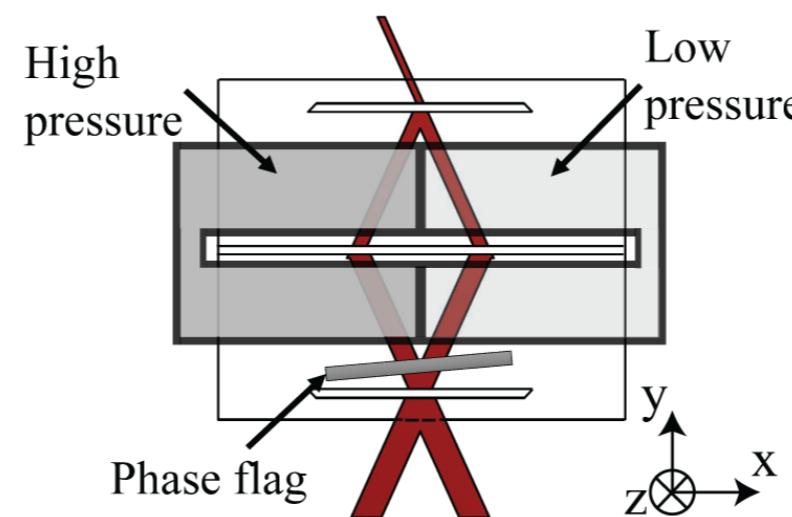
スピノル4π対称性



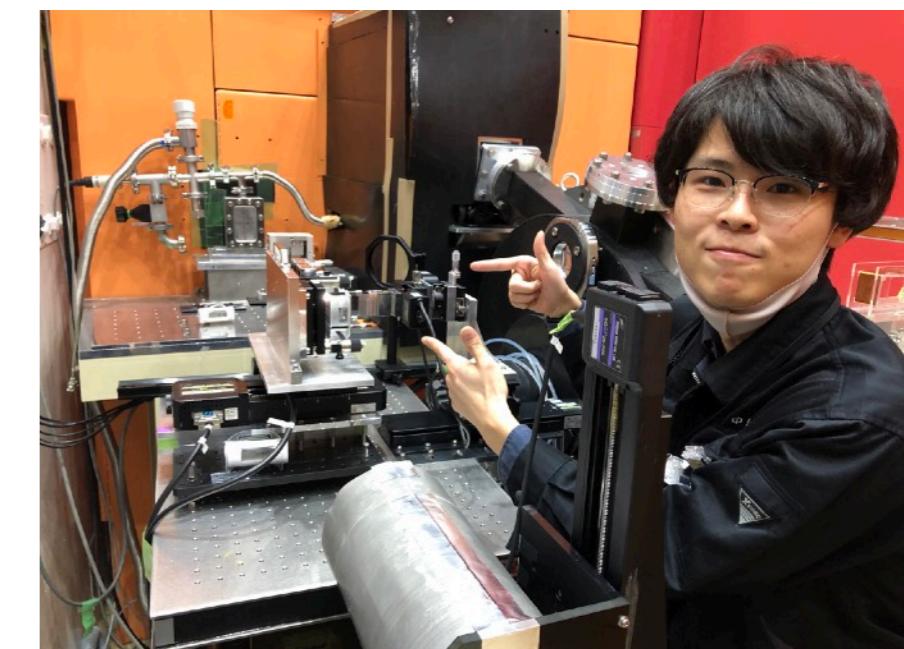
重力測定



カメレオン場探索



J-PARCにて中性子ミラーを用いた高感度干渉計を開発中



Debye-Waller Factor

$$b(Q) = e^{-W(Q)} \left[b_N + (Z - f_e(Q)) b_{\text{ne}} + b_5(Q) \right]$$

散乱中心の熱振動、Siなどの場合は運動量移行の2乗に比例

$$W(Q) = \frac{B}{16\pi^2} Q^2,$$

近年、高次の補正項なども議論

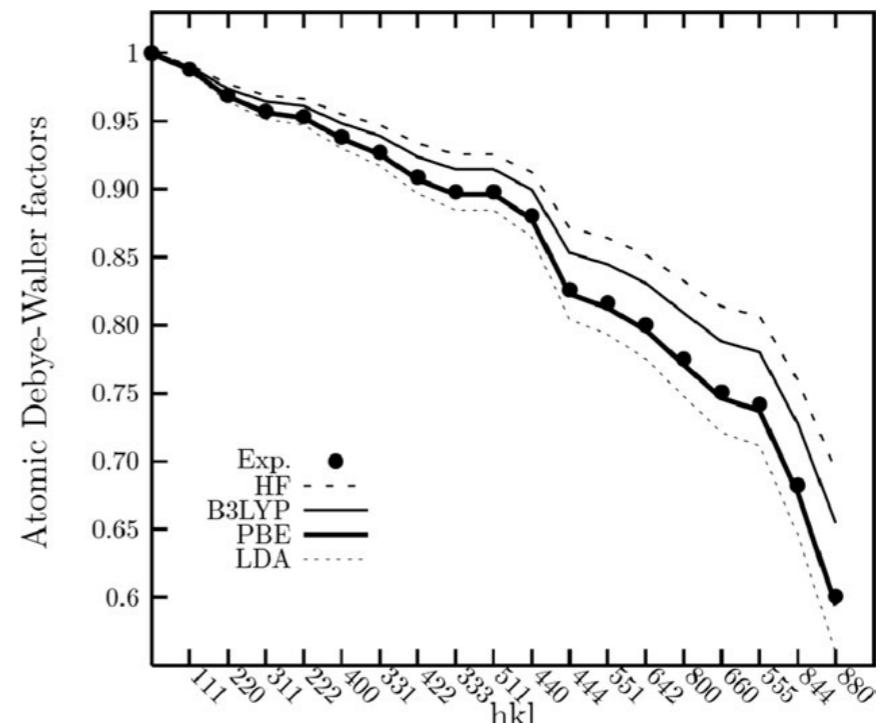
Raising questions for BvK model
and x-ray measurements

for Si; $B_{\text{BvK}} = 0.4725(17) \text{ \AA}^2$

$B_{\text{xray}} = 0.4664(7) \text{ \AA}^2$

for Ge; $B_{\text{BvK}} = 0.5568 \text{ \AA}^2$

$B_{\text{neutron}} = 0.5661(26) \text{ \AA}^2$



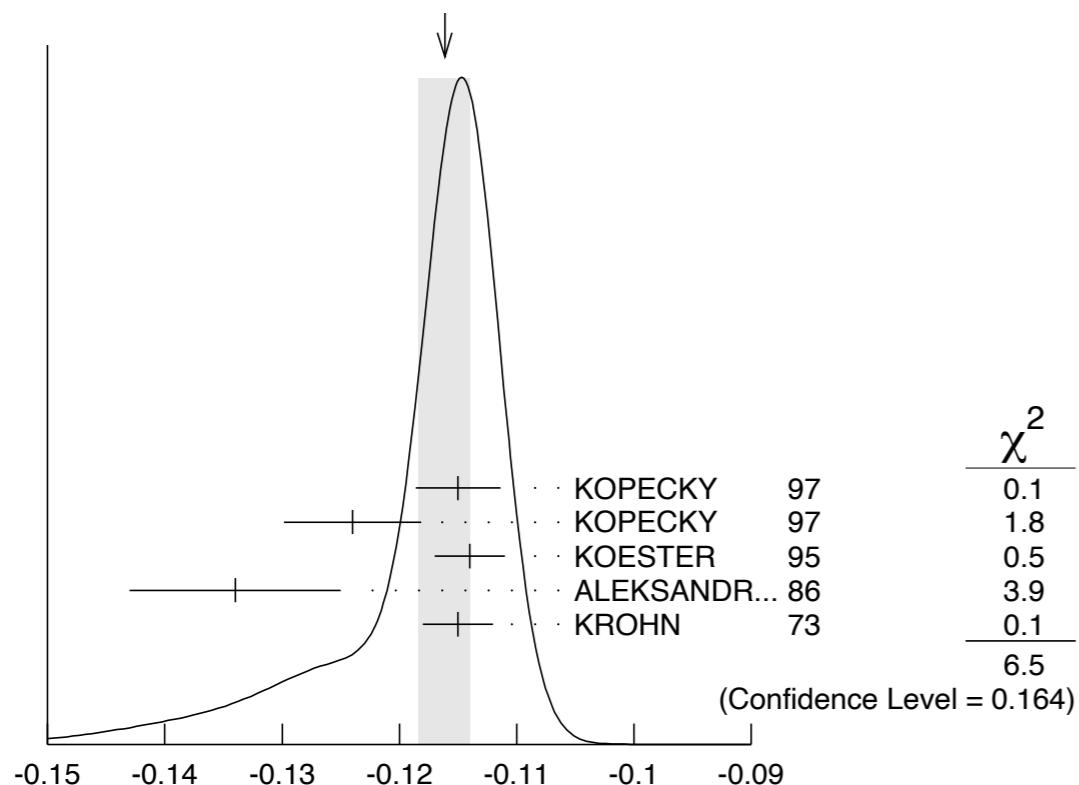
by 2013 Erda et. al.

Neutron-Electron Scattering Length

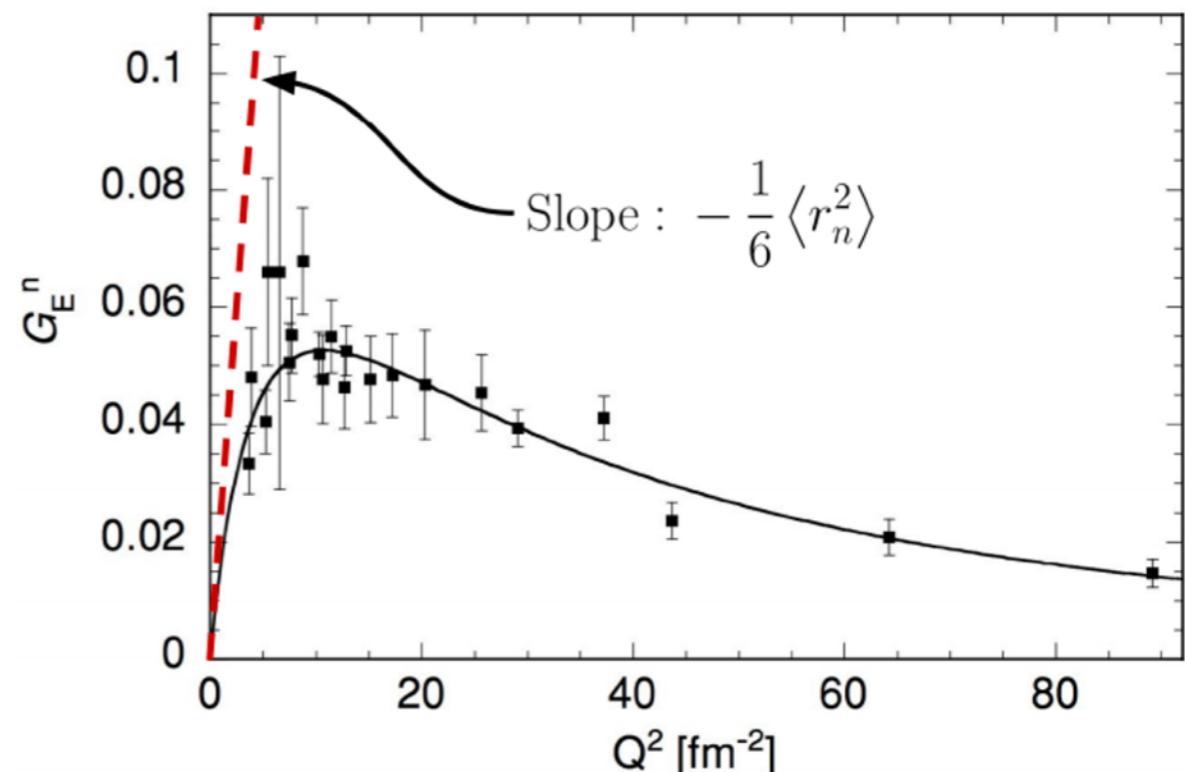
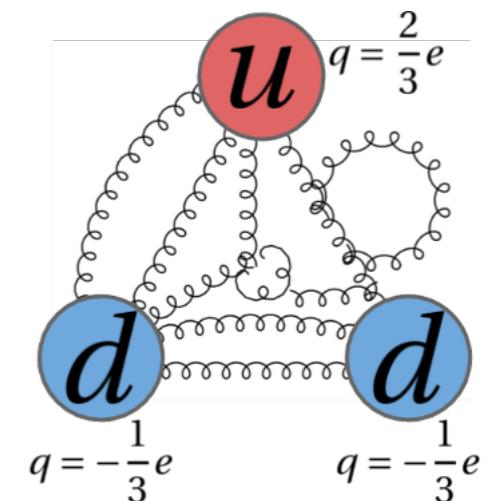
$$b(Q) = e^{-W(Q)} \left[b_N + (Z - f_e(Q)) b_{\text{ne}} + b_5(Q) \right]$$

中性子を構成するクオークは非対称に分布
その構造は計算できる？

$$b_{\text{ne}}^{\text{PDG}} = -1.345(25) \times 10^{-3} \text{ [fm]}$$



$$\langle r_n^2 \rangle = -6 \frac{dG_E^n}{dQ^2} \Big|_{Q^2=0} = \frac{-3A}{2m_p^2 c^2}$$



by T. R. Gentile and C. B. Crawford 2011

Fifth Force

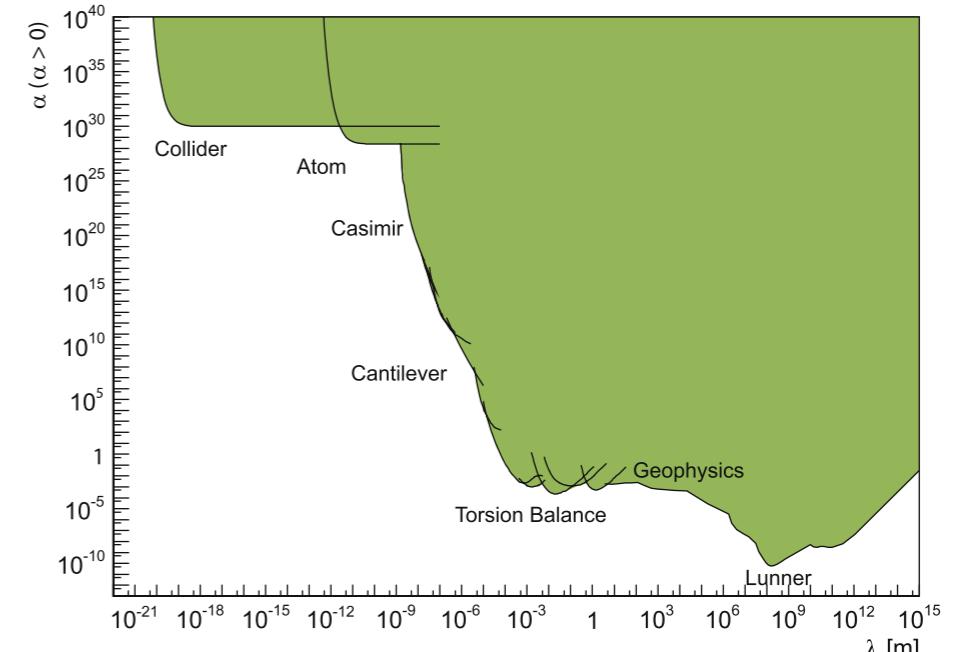
$$b(Q) = e^{-W(Q)} \left[b_N + (Z - f_e(Q)) b_{\text{ne}} + b_5(Q) \right]$$

標準模型を超える新物理は未知の相互作用の存在を要請
特に 10 μm 以下の短距離に働く重力を理解したい

Yukawa型の相互作用を仮定する

$$V = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 + \alpha_G \exp\left(\frac{-r}{\lambda_5}\right) \right]$$

$$b_5(H) = -\alpha_G \left(\frac{2m_n^2 MG}{\hbar^2} \right) \frac{\lambda_5^2}{1 + (H\lambda_5)^2}$$

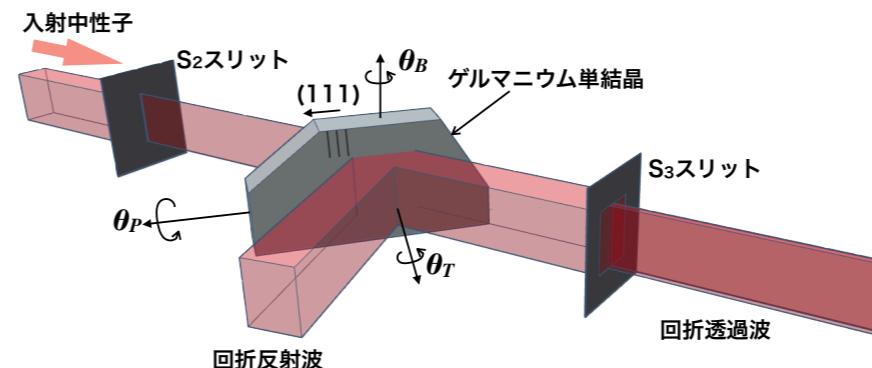


by Murata 2015

物理量の決定

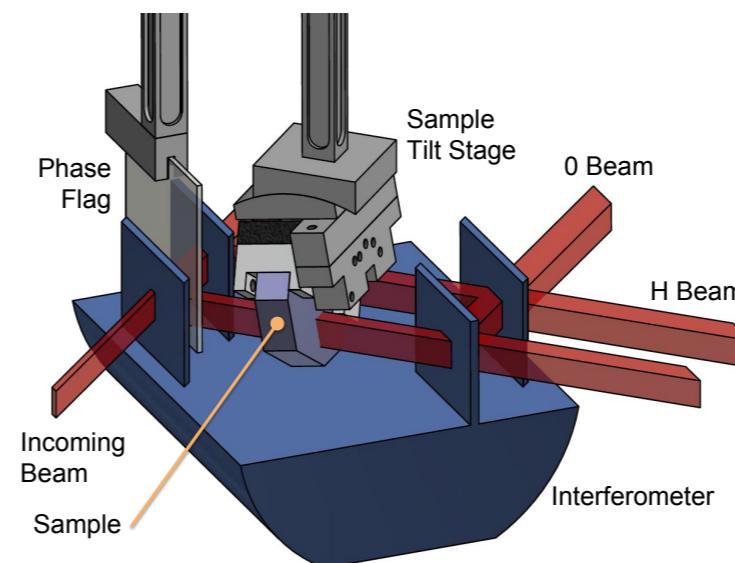
ペンデル干渉

$$\phi_P = \frac{v_H D \lambda}{2\pi \cos \theta_{BP}}$$



中性子干渉計

$$\phi_I = C\delta + \frac{v_0 D}{H} \lambda N \sin \theta_{BI}$$



$$\frac{\phi_P}{\phi_I} = \frac{v_H D}{v_0 D} = A e^{-W(H)} \left(1 - \left(Z - f_e(H) \right) \frac{b_{ne}}{b(0)} + \frac{b_5(H) - b_5(0)}{b(0)} \right)$$

温度因子 n-e散乱長 未知散乱

物理量の決定

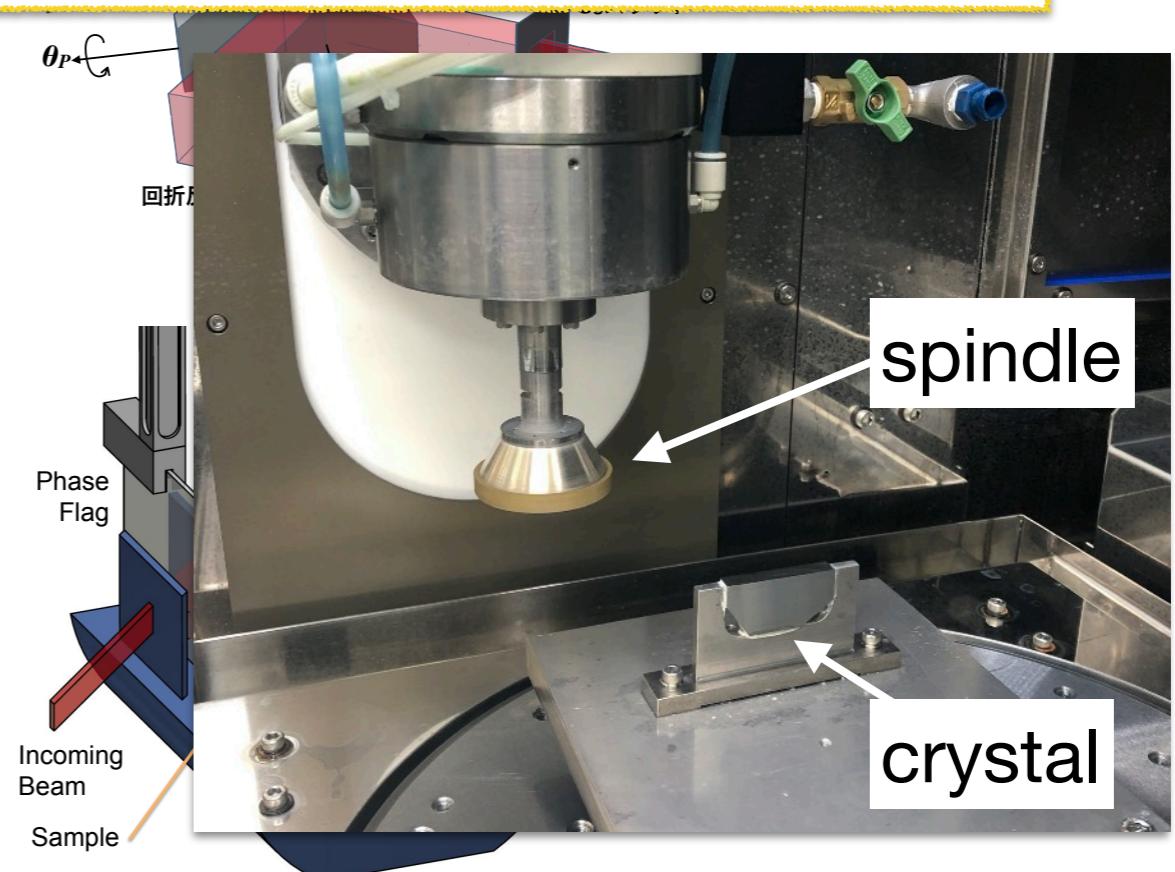
ペンデル干渉

$$\phi_P = \frac{v_H D \lambda}{2\pi \cos \theta_{BP}}$$

最も大きな系統誤差は結晶厚さ
→ 単結晶試料を均一な厚さに超精密加工

中性子干渉計

$$\phi_I = C\delta + \frac{v_0 D}{H} \lambda N \sin \theta_{BI}$$



$$\frac{\phi_P}{\phi_I} = \frac{v_H D}{v_0 D} = A e^{-W(H)} \left(1 - \left(Z - f_e(H) \right) \frac{b_{ne}}{b(0)} + \frac{b_5(H) - b_5(0)}{b(0)} \right)$$

温度因子 n-e散乱長 未知散乱

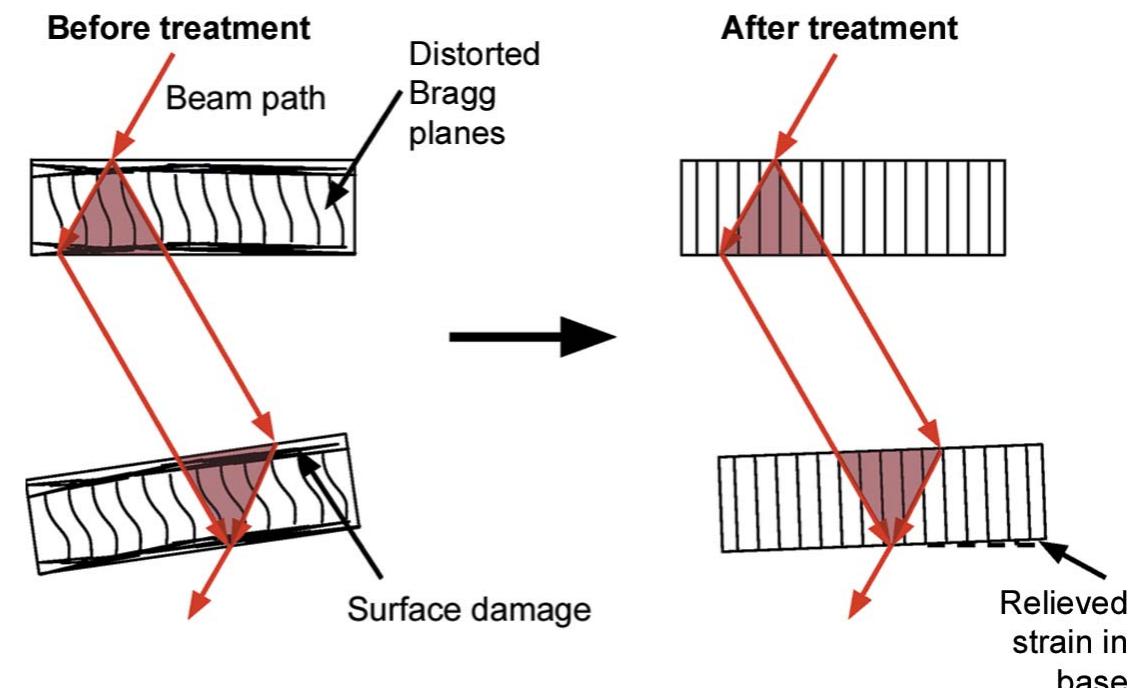
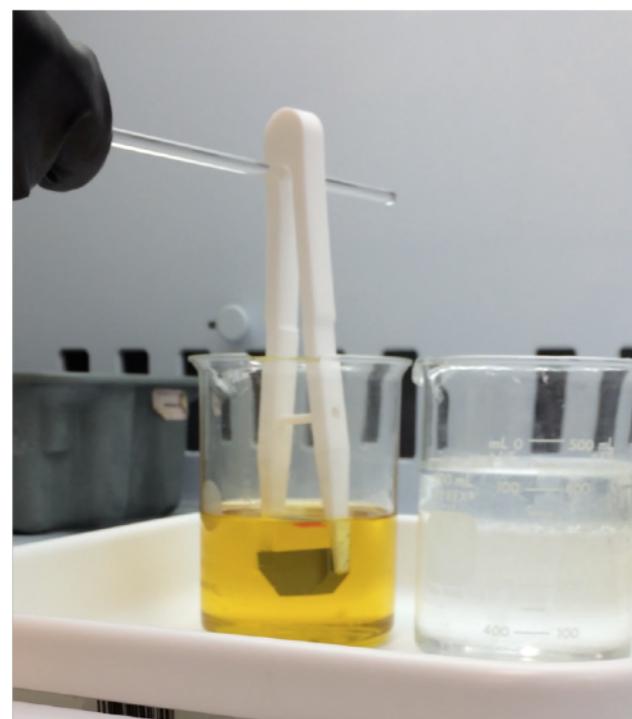
結晶加工

単結晶試料には均一な結晶構造と厚さが要請される

→ 表面のアモルファス層をchemicalに取り除く

→ アニーリングで結晶構造を整える

| Interferometer | Condition | $\nabla h (10^{-9} \text{ mm}^{-1})$ |
|----------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Skew | Etched ($>30 \mu\text{m}$) | 4 |
| "Thin Blade" | Etched ($>30 \mu\text{m}$) | 5 |
| | Annealed | 1 |
| Two-Blade | Precision Machined | $>10^4$ |
| | Annealed | 8 |
| | Etched (4 μm) | 0.2 |
| Shull | "Polished" | 100 |



$$\frac{\phi_P}{\phi_I} = \frac{\nu_H D}{\nu_0 D} = A e^{-W(H)} \left(1 - (Z - f_e(H)) \frac{b_{ne}}{b(0)} + \frac{b_5(H) - b_5(0)}{b(0)} \right)$$

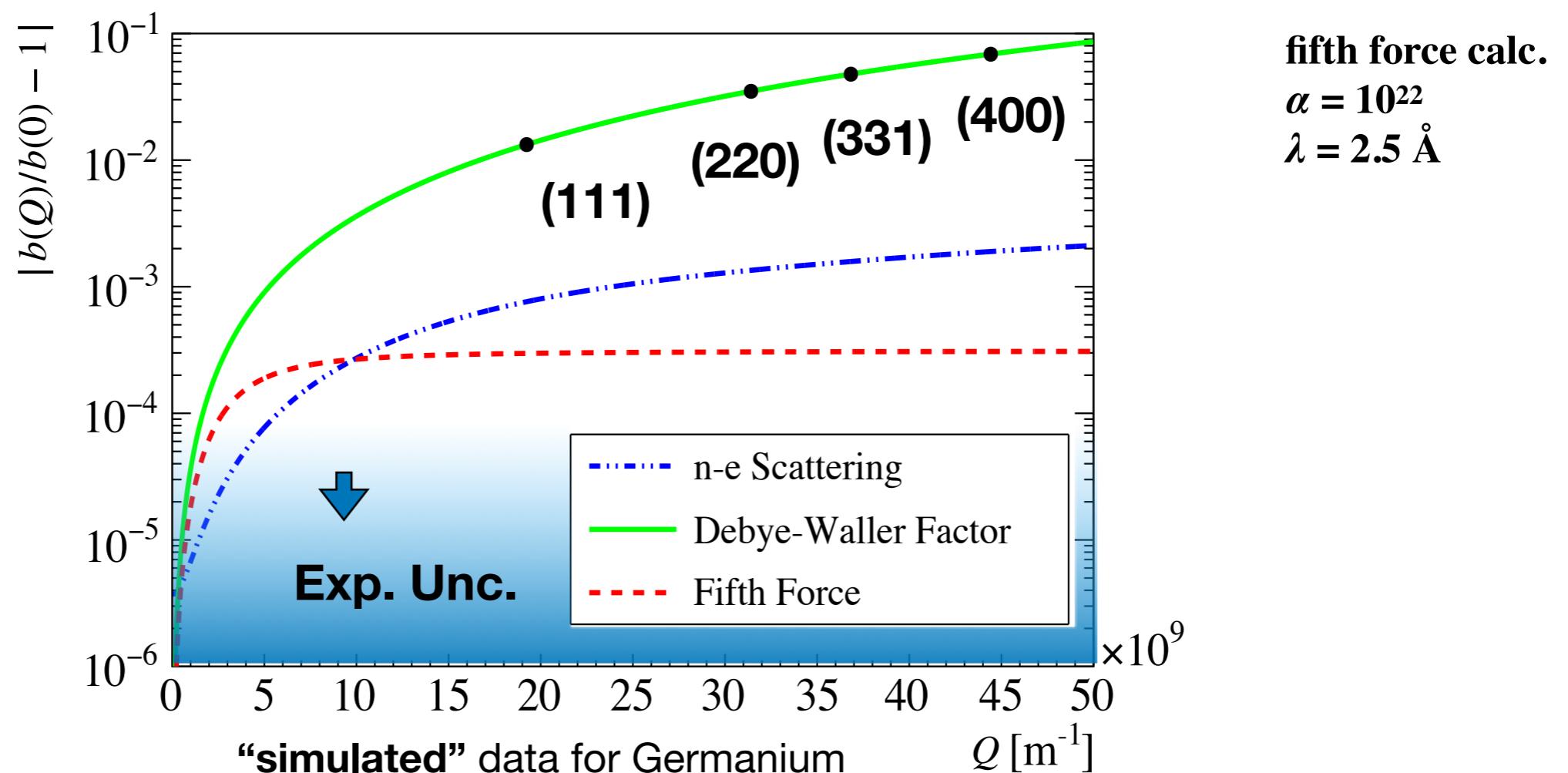
温度因子 n-e散乱長 未知散乱

位相差の運動量移行依存性

位相差の運動量移行依存性から各物理量を精密に決定する

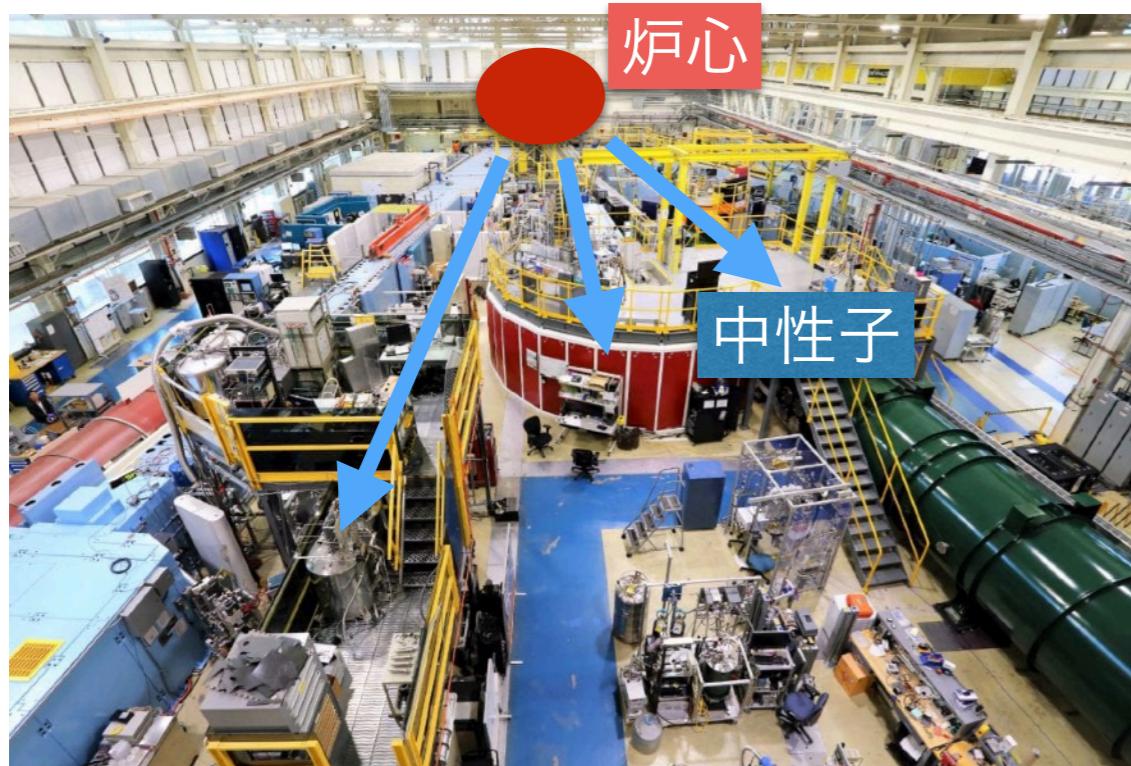
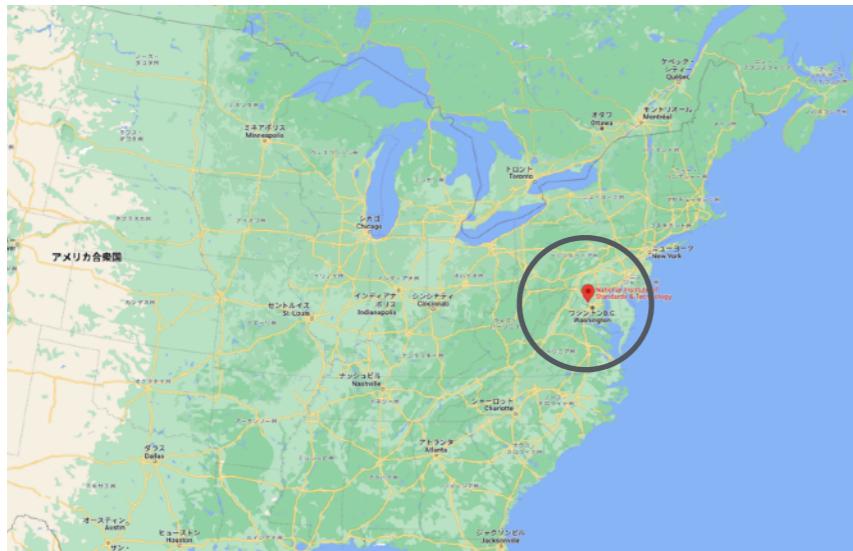
$$\frac{\phi_P}{\phi_I} = \frac{v_H D}{v_0 D} = A e^{-W(H)} \left(1 - (Z - f_e(H)) \frac{b_{ne}}{b(0)} + \frac{b_5(H) - b_5(0)}{b(0)} \right)$$

温度因子 n-e散乱長 未知散乱

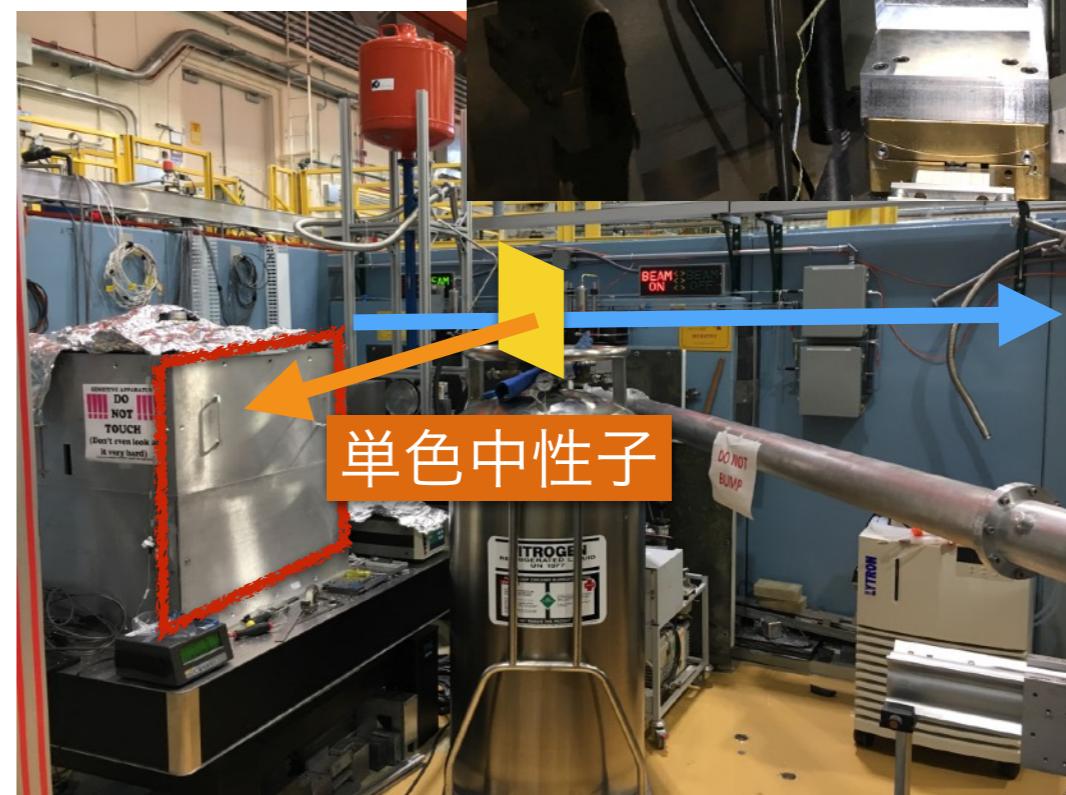
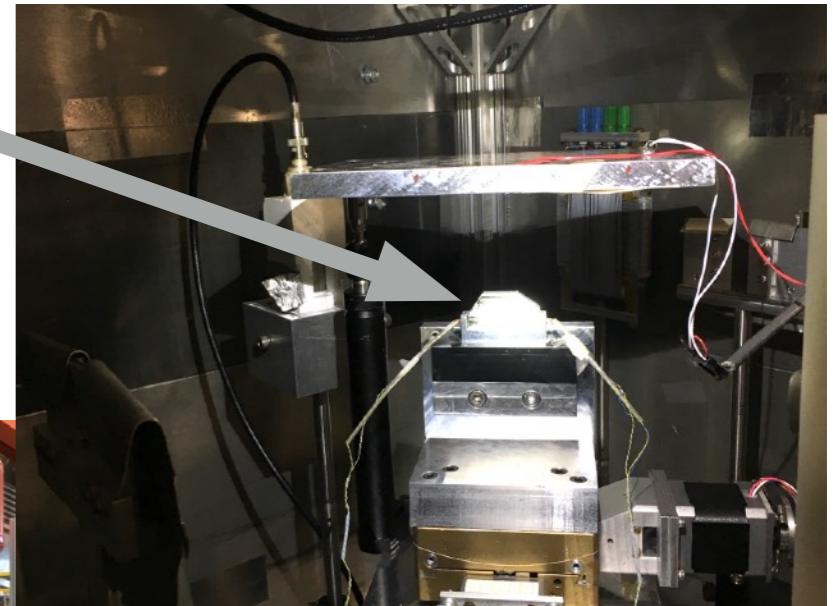


実験

実験はアメリカのNISTで行っている、研究用原子炉中性子源



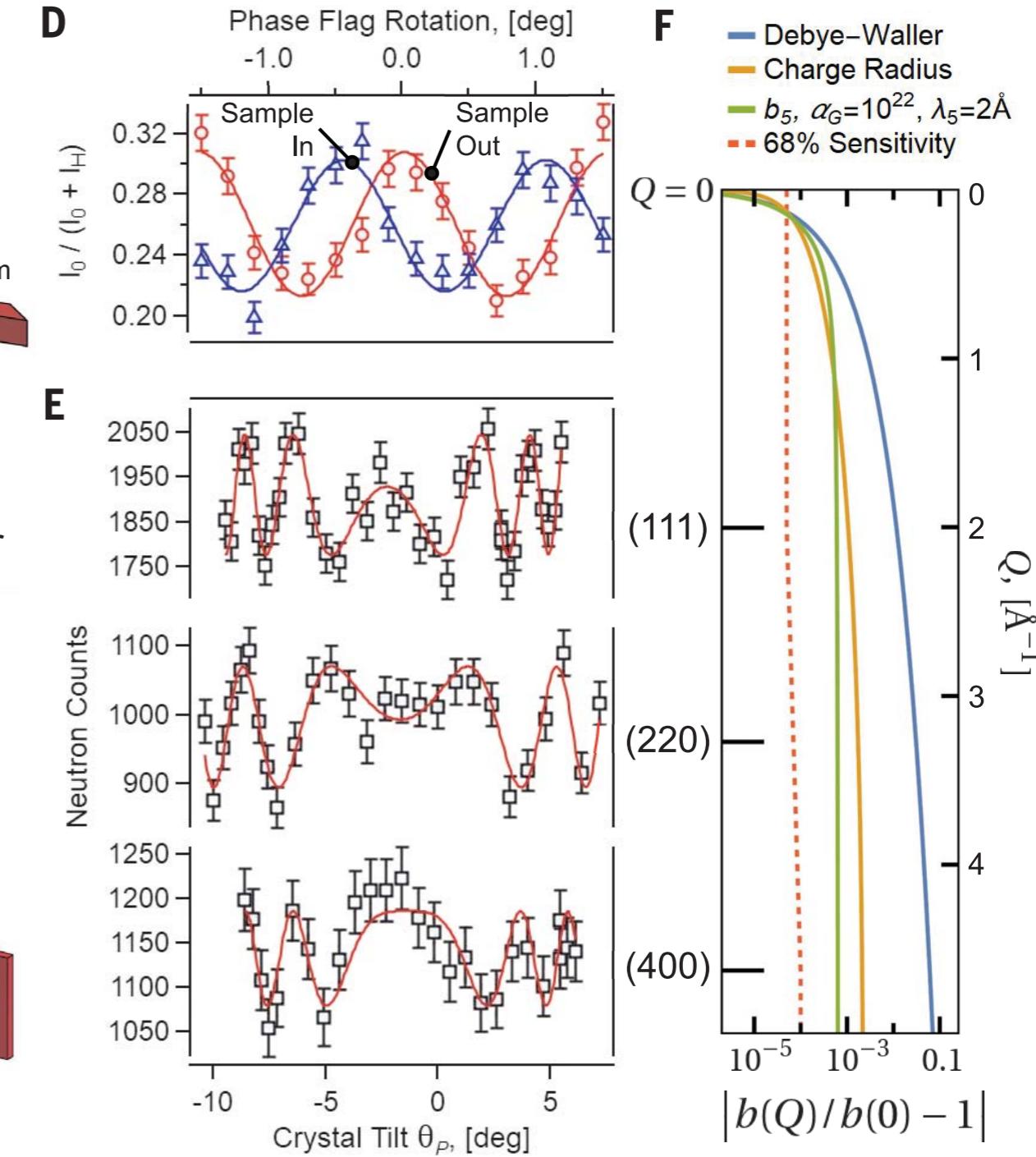
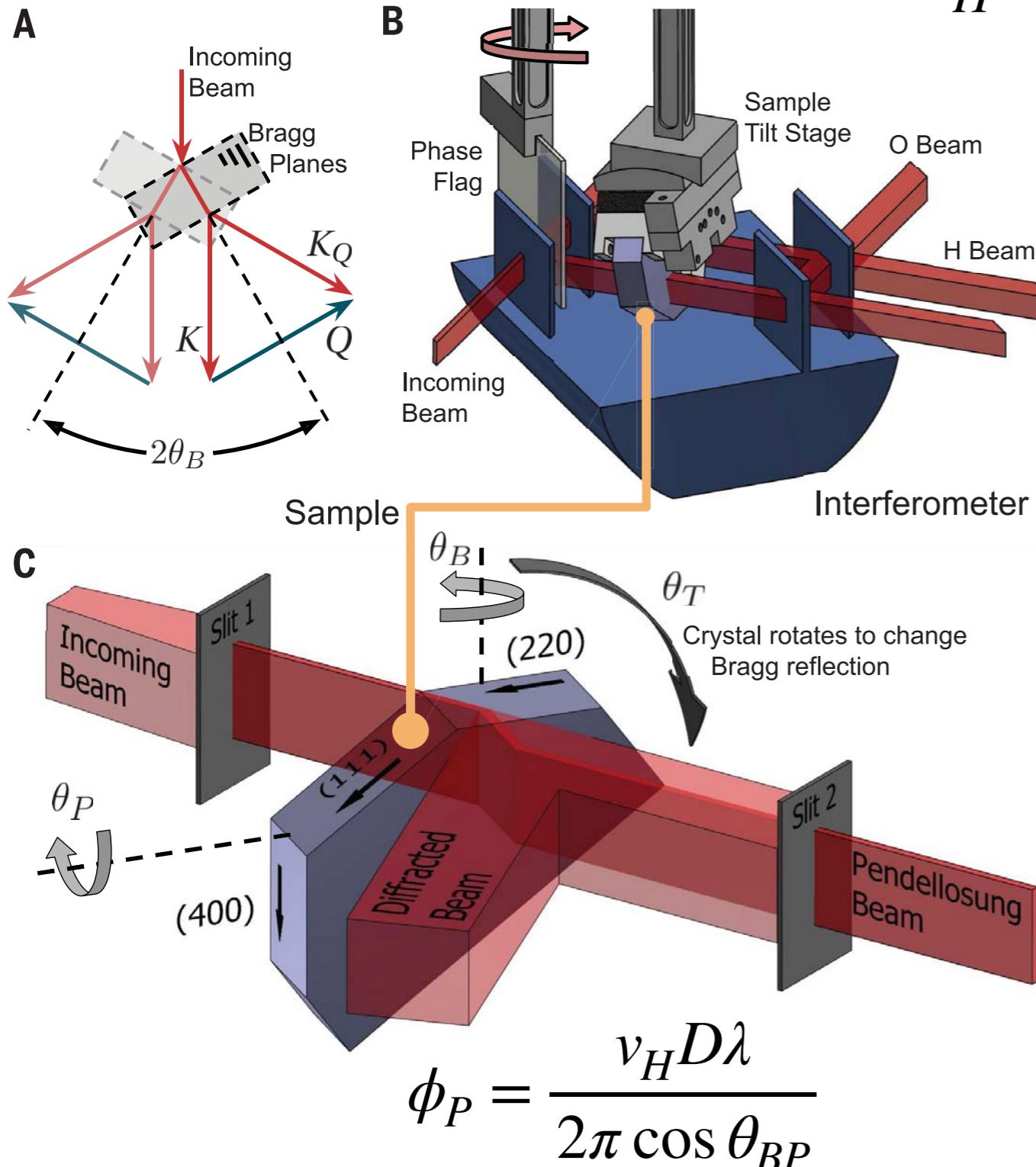
Ge or Si
crystal



中性子

実験体系

$$\phi_I = C\delta + \frac{v_0 D}{H} \lambda N \sin \theta_{BI}$$



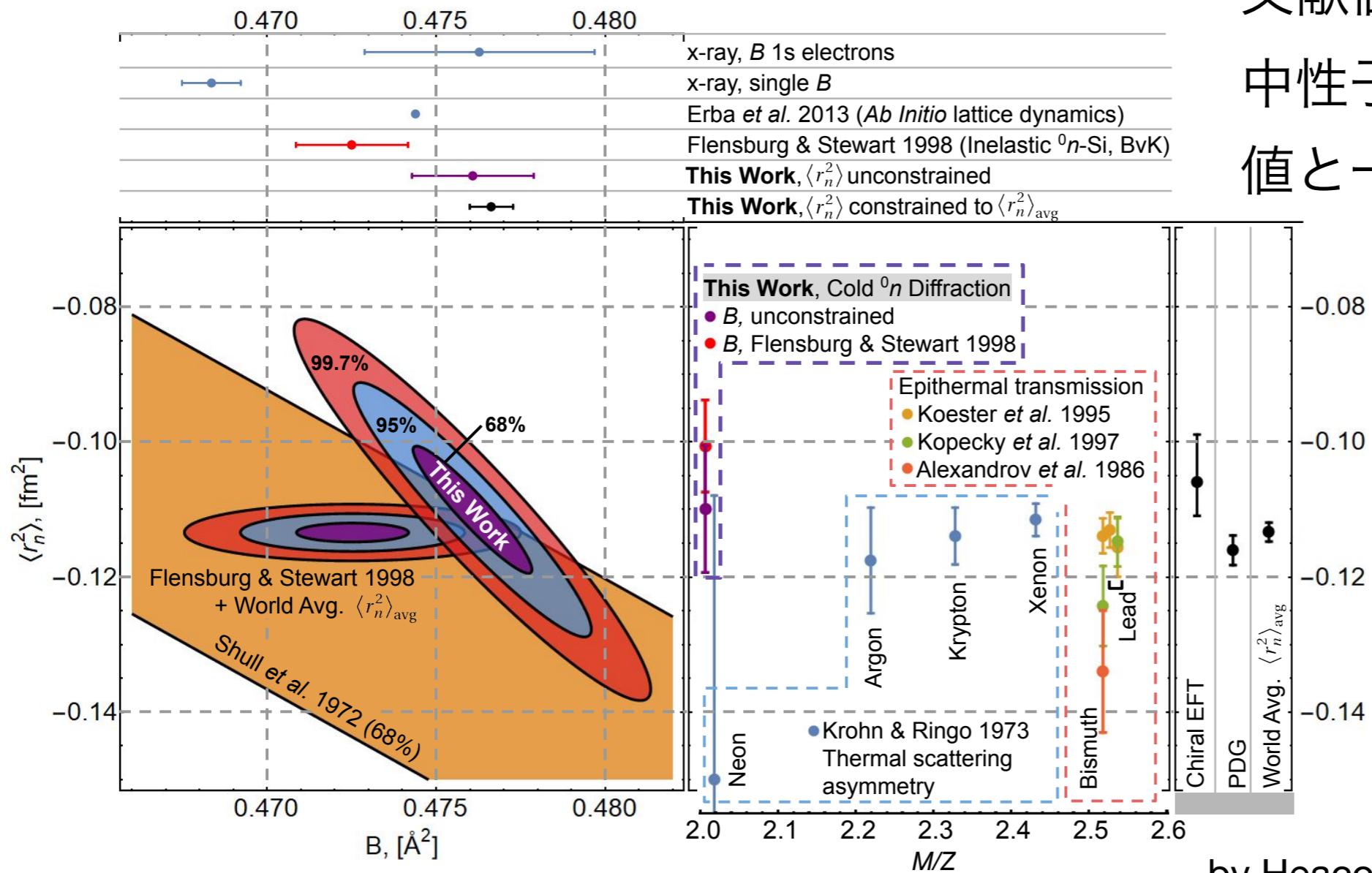
by Heacock et. al., Science 373 6560 (2021)

実験結果

Si単結晶を用いた実験結果；

中性子電子散乱長と温度因子を決定 & 未知相互作用の存在制限範囲を更新

文献値のDWFを使うと
中性子電子散乱長がPDGの
値と一致しない？

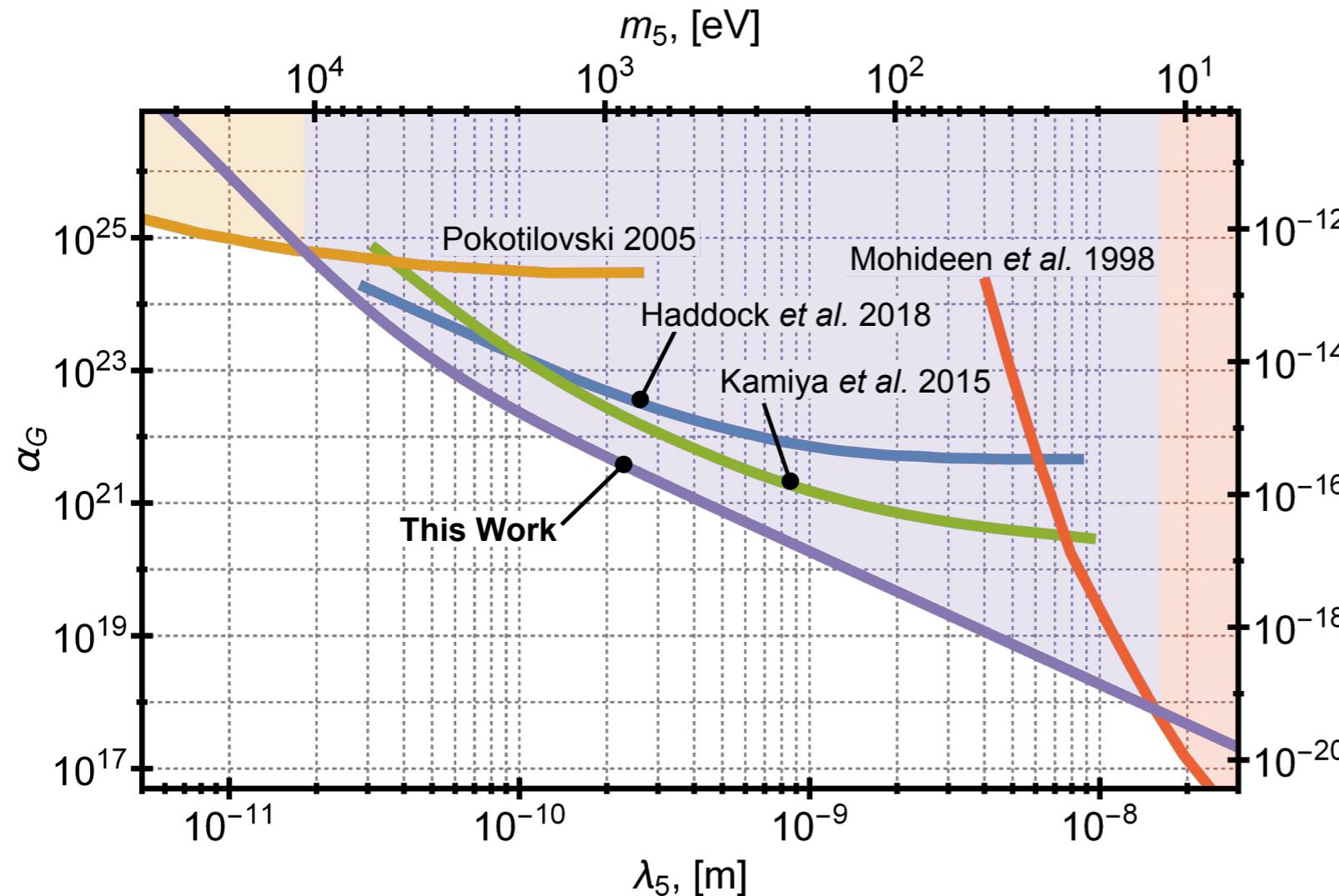


by Heacock et. al., Science 373 6560 (2021)

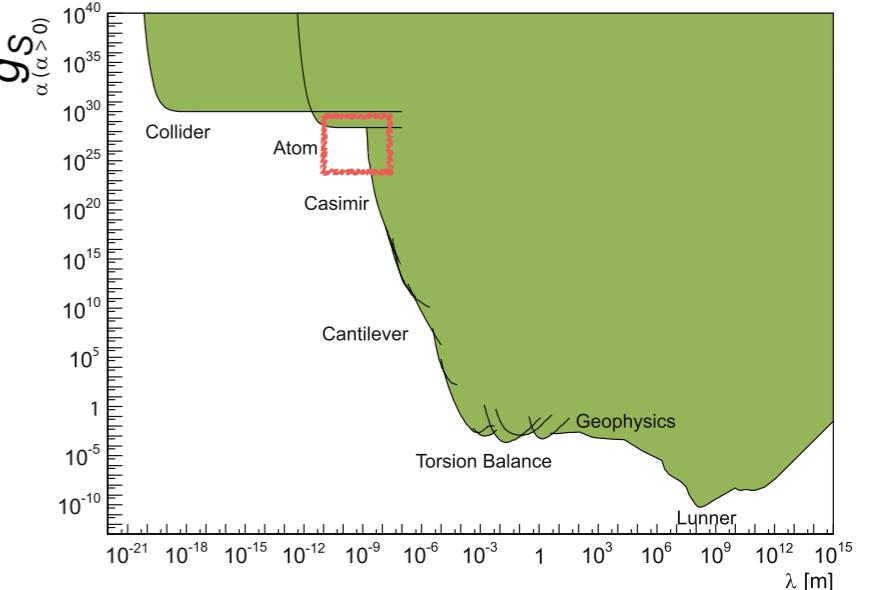
実験結果

Si単結晶を用いた実験結果；

中性子電子散乱長と温度因子を決定 & 未知相互作用の存在制限範囲を更新



$\lambda_5 \sim 10 \text{ nm}$ 付近で
最大2桁程度更新



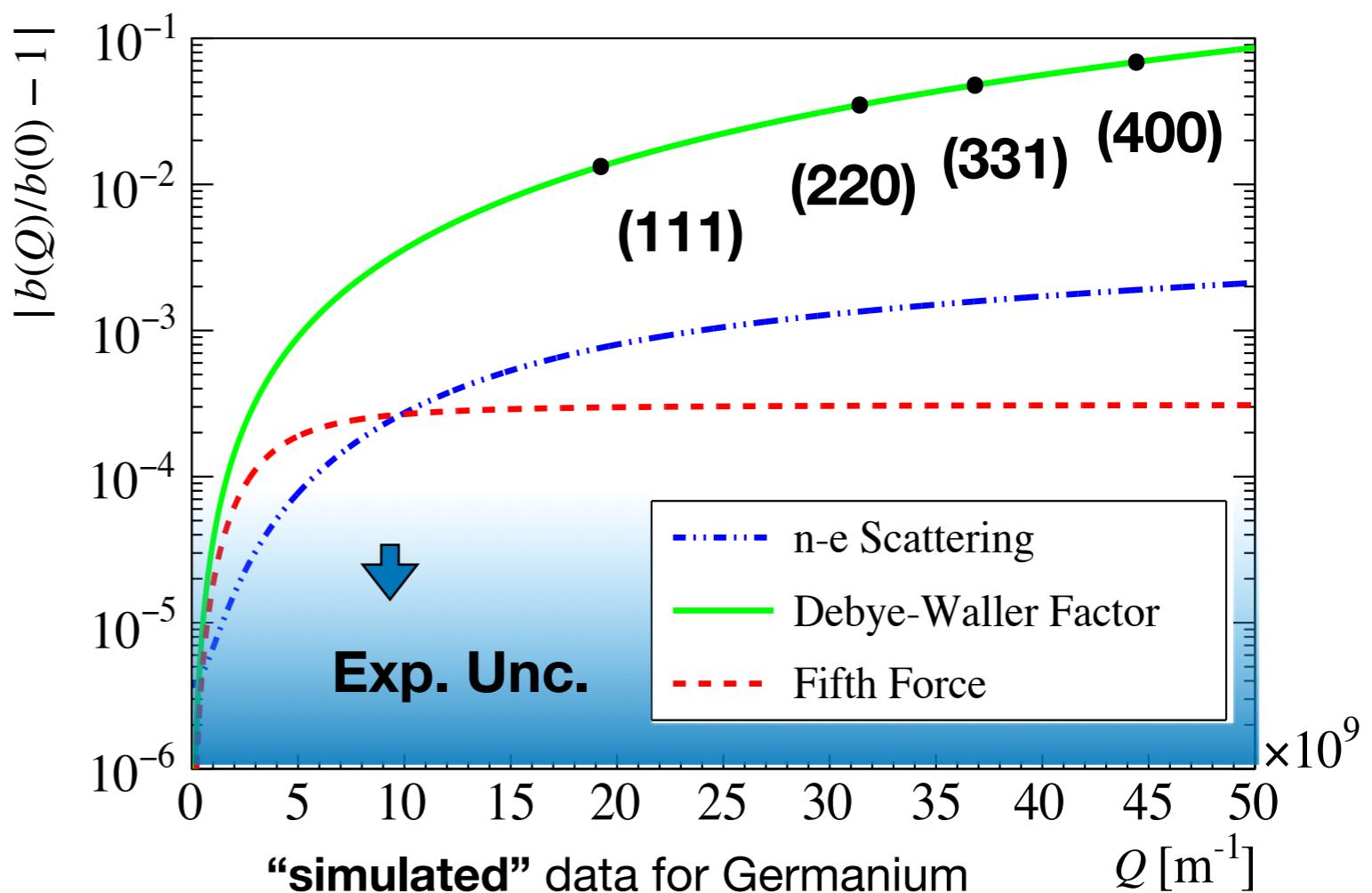
by Heacock et. al., Science 373 6560 (2021)

Experiment Outline

未知相互作用は干渉性散乱長の運動量移行依存性から探索される
→ 複数の結晶面で測定

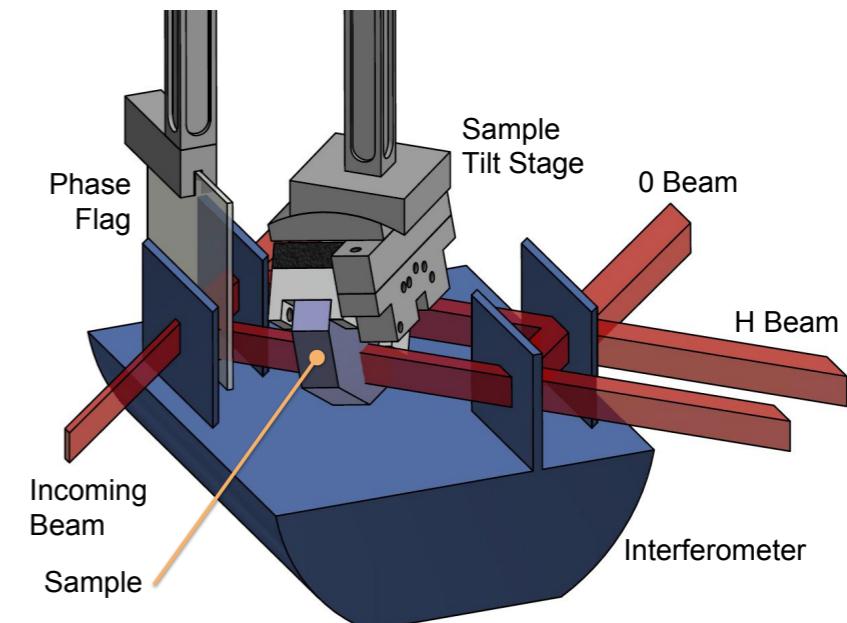
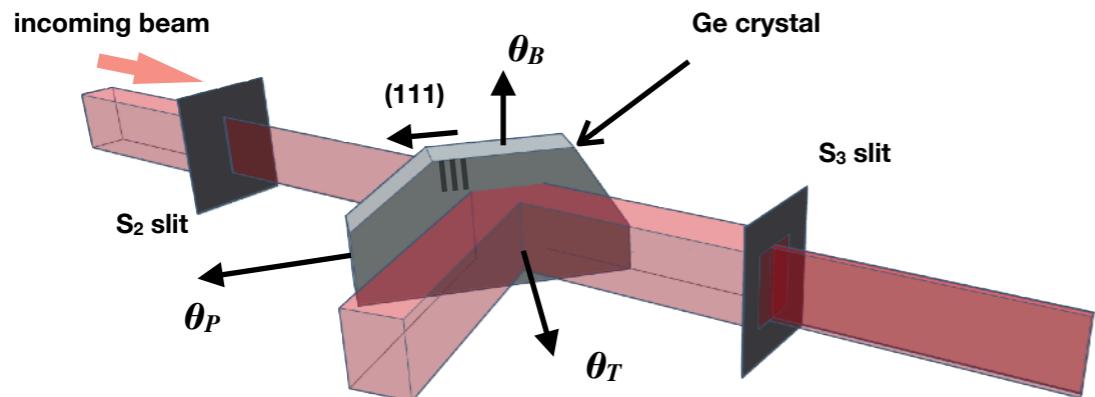
未知相互作用は物質密度に依存
→ より重いGe単結晶の使用

$$b_5(H) = -\alpha_G \left(\frac{2m_n^2 MG}{\hbar^2} \right) \frac{\lambda_5^2}{1 + (H\lambda_5)^2}$$



Experiment status using Ge crystal

| | Pendellösung for $b(Q)D$ | Si crystal interferometer for $b(0)D$ |
|-------|-----------------------------|--|
| (111) | measured ! | |
| (220) | no yet | Pending (neutron beam is not available) |
| (400) | no yet | |



Experiment Outline

With Si sample

error = 8 %

ペンデル干渉縞を用いた $v_H D$ 測定
中性子干渉計を用いた $v_0 D$ 測定

new running → With Ge sample

error < 4%

exclude air scattering

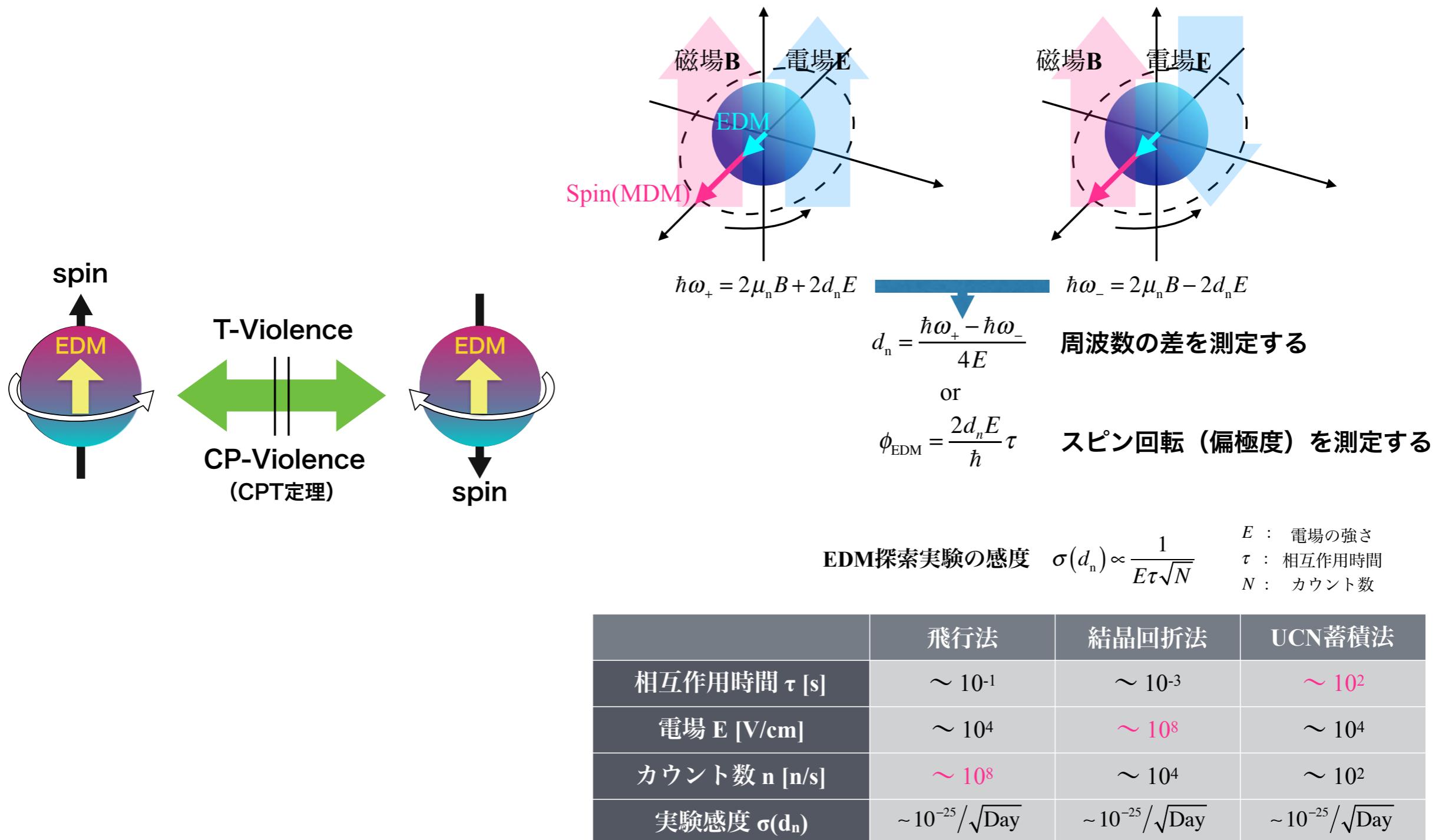
measurement some crystal plane error < 4%

exclude temperature factor

With Vacuum chamber

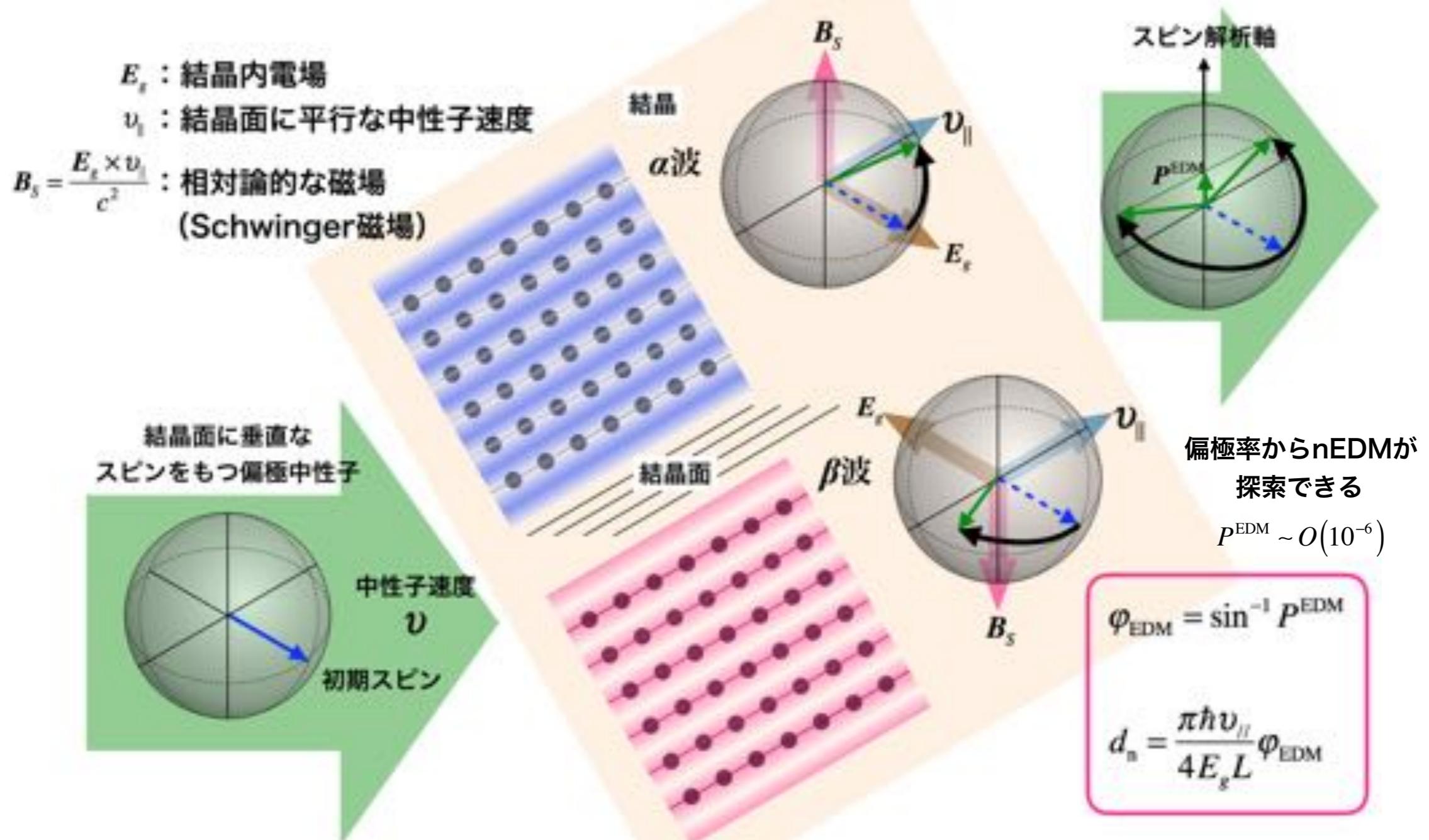
Very low temperature (<77 K)

中性子EDMの存在はCP対称性を破る



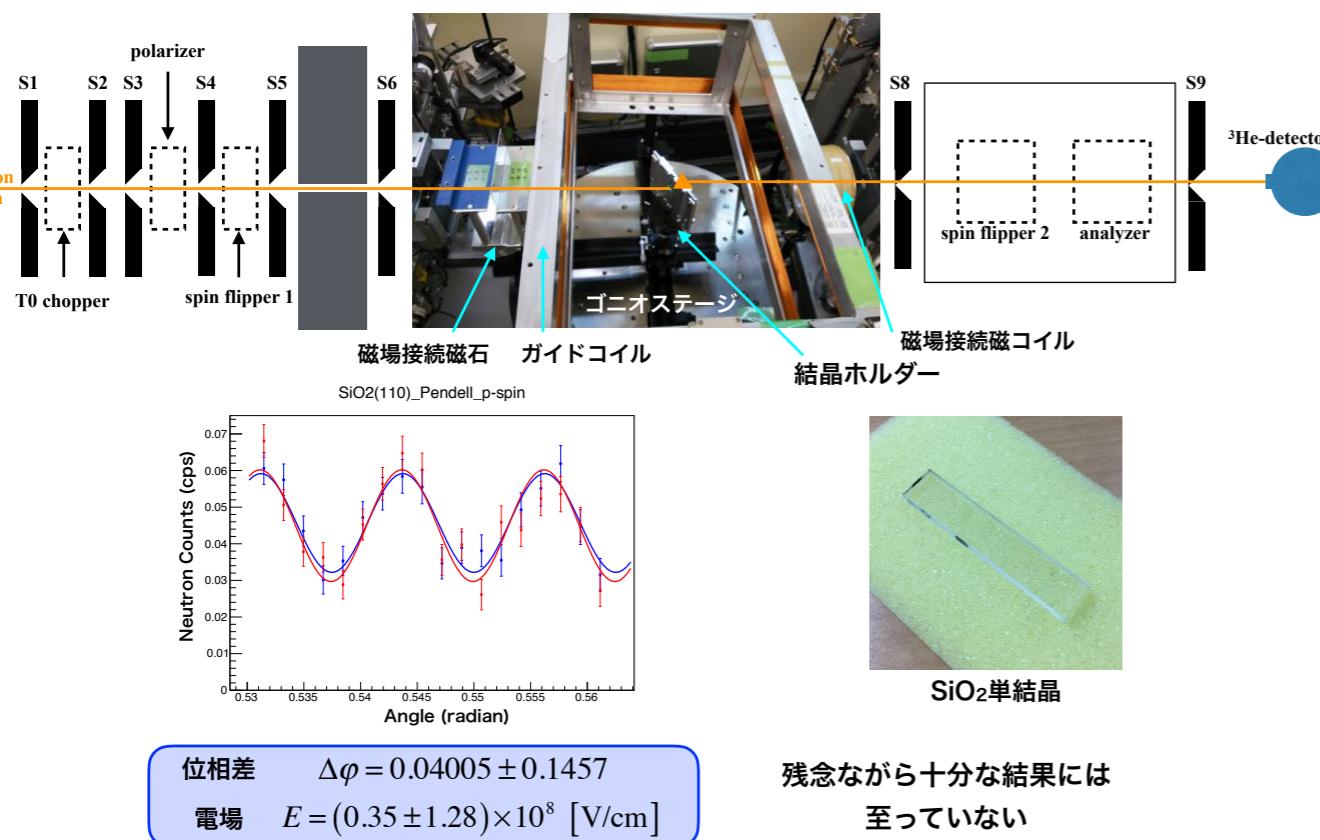
非中心対称性結晶の場合、 α 波と β 波は逆向き電場を感じる

電場に平行な спинを持つ中性子には、それと直角方向にEDMによるスピニ偏極が生じる

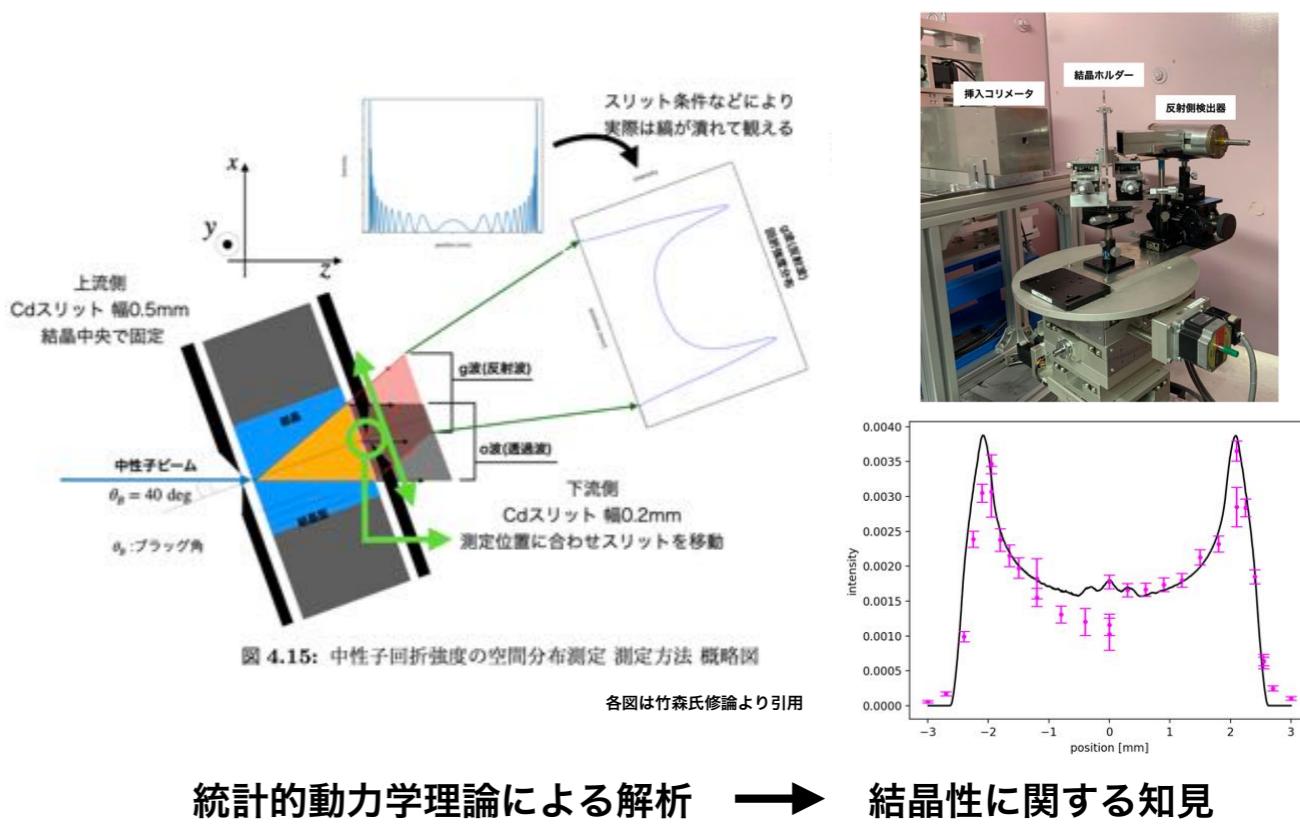


EDM探索に向けて結晶回折のstudyを進めている

ペンドル干渉縞位相差による結晶内電場の測定



ペンドル干渉縞強度分布の測定

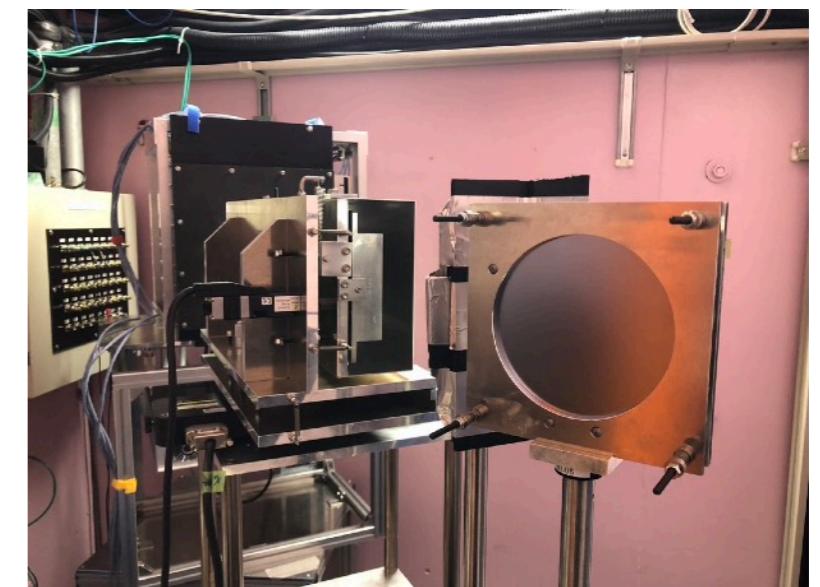
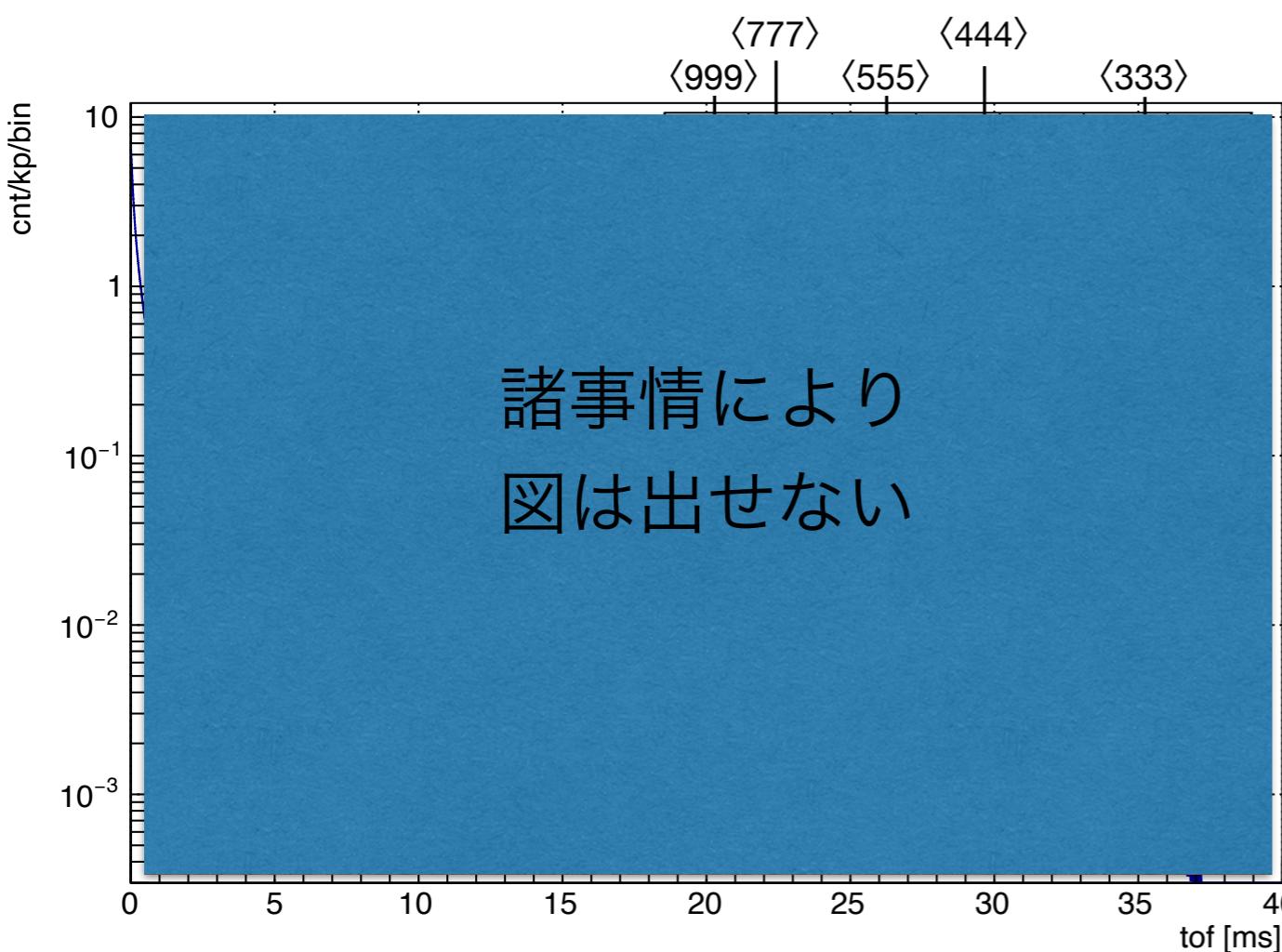
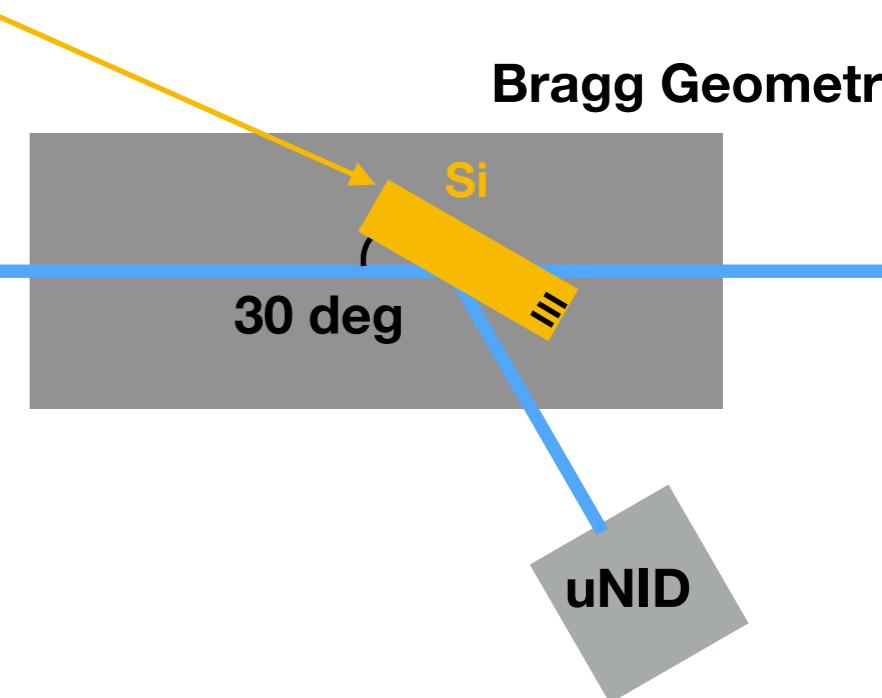


結晶の高次回折

結晶の高次回折で~0.7 eVくらい
までは検証済み

Si wafer 0.625 mm x 17枚
Bragg Geometry

neutron →



新原子炉に向けて

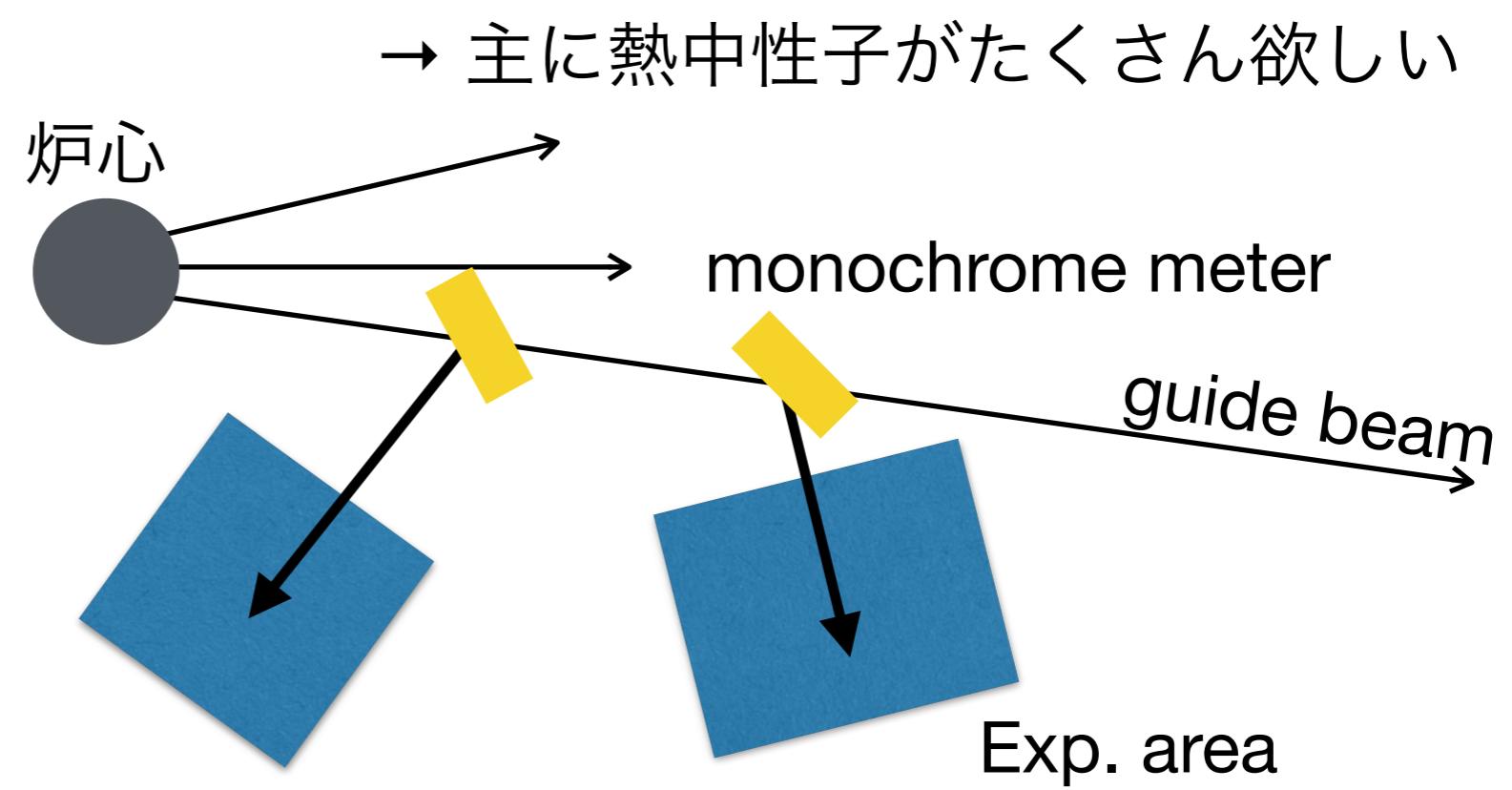
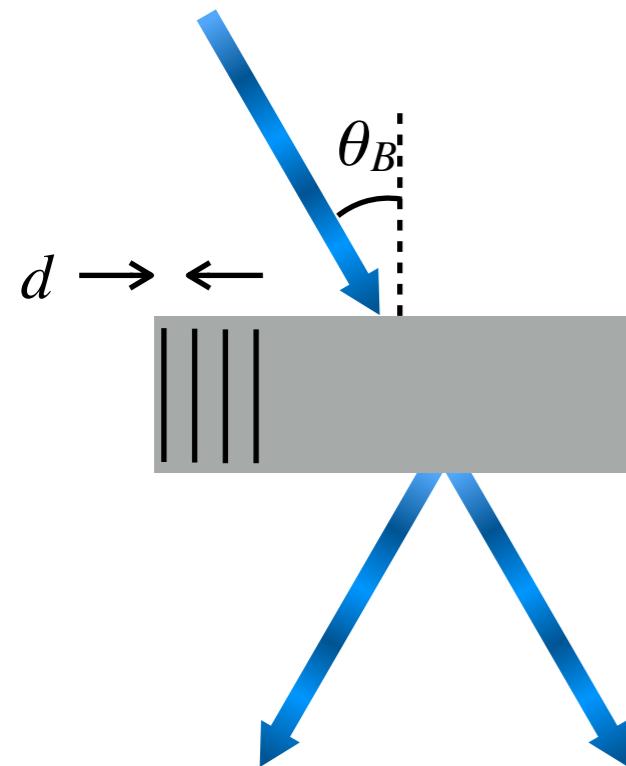
結晶回折は格子定数によって決まる（プラッグ条件）

$$n\lambda = 2d \sin \theta_B$$

シリコンの場合、 $d = 5.431 \text{ \AA}$

$\langle 111 \rangle$ の場合、 3.125 \AA

高次回折はこれの定数倍($n=1,2,3\dots$)



ガイドビームに垂直な範囲にスペースが欲しい？

まとめ

結晶回折実験は特定の波長のみ利用するため、
原子炉実験の方が統計的に有利

動力学的回折により、回折波はペンデル干渉縞をつくる

近年の機械加工、化学的処理の発展により精密測定が可能になってきた

ペンデル干渉からは、

中性子電子散乱長、結晶温度因子、未知相互作用、中性子EDM

の測定、探索が可能