

複合核における時間反転対称性破れの探索

奥平琢也　名古屋大学 素粒子物性研究室(中研)

NOPTREXコラボレーション

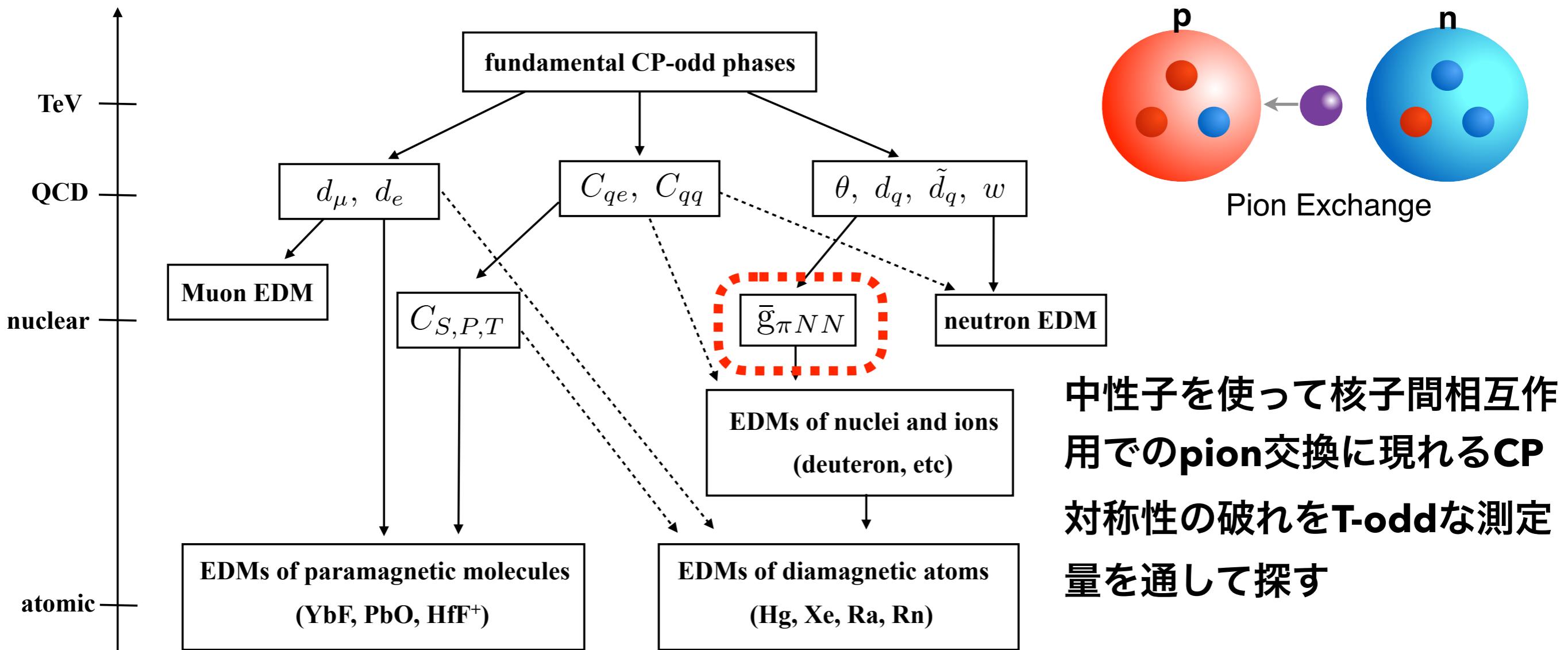
名古屋大学, 日本原子力研究開発機構, 東京工業大学, 大阪大学, 九州大学,
高エネルギー加速器研究機構, 理化学研究所



原子核相互作用における時間反転対称性の破れ

標準理論では現在の物質優勢宇宙を説明することができない。

CP対称性の破れの効果がどこかに現れているはず



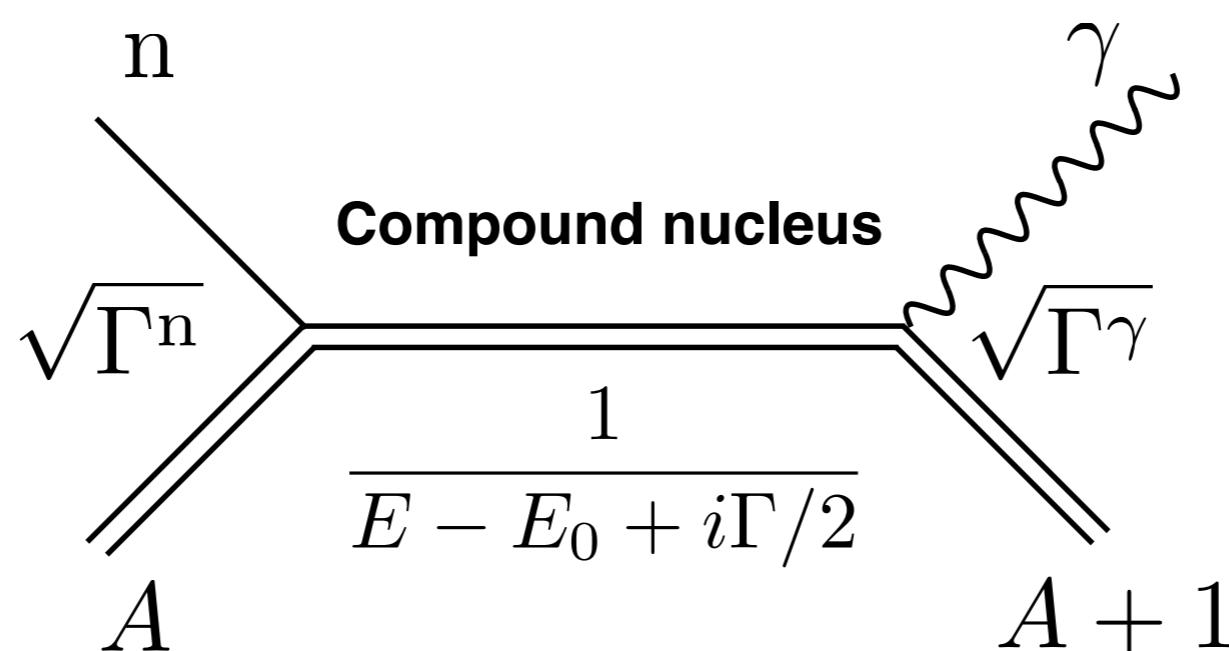
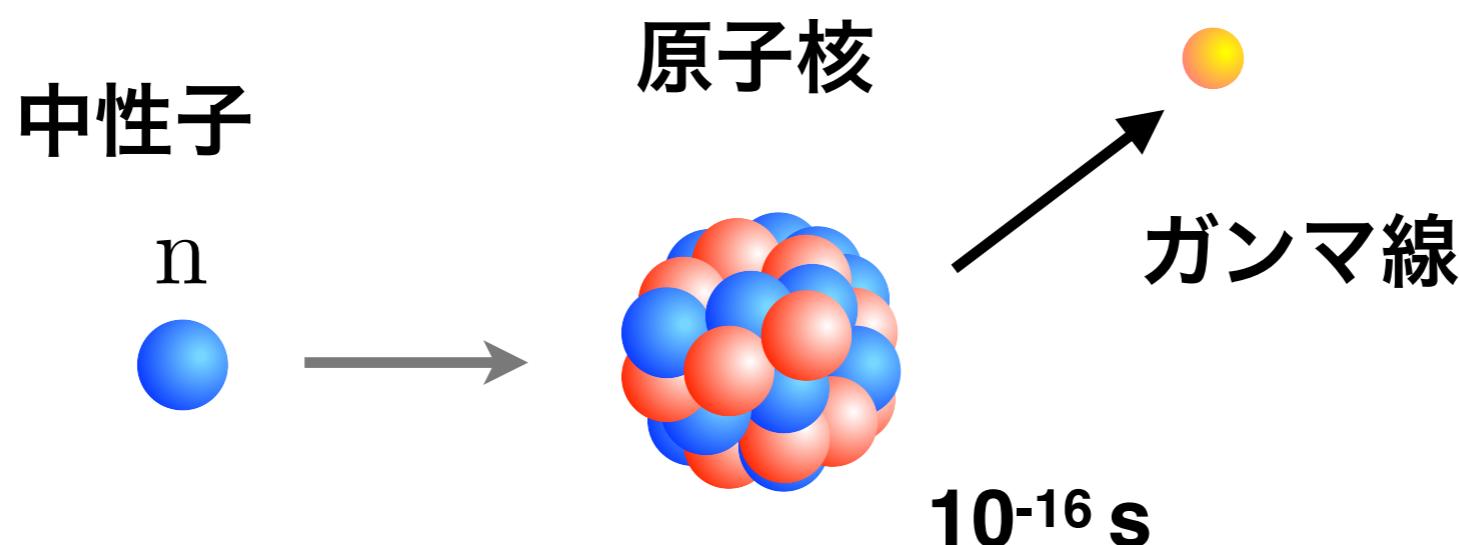
NOPTREX
Neutron Optical Parity and Time-Reversal EXperiment

名古屋大, 九州大, 原研, 大阪大, 東工大, 広島大, 山形大, 東北大, KEK, 京都大, 理研, 日本女子大, 足利大
+ アメリカ(インディアナ, サウスカラolina,,), 中国

中性子吸収反応に伴う複合核

複合核共鳴反応を通した時間反転対称性の破れ探索実験を計画する

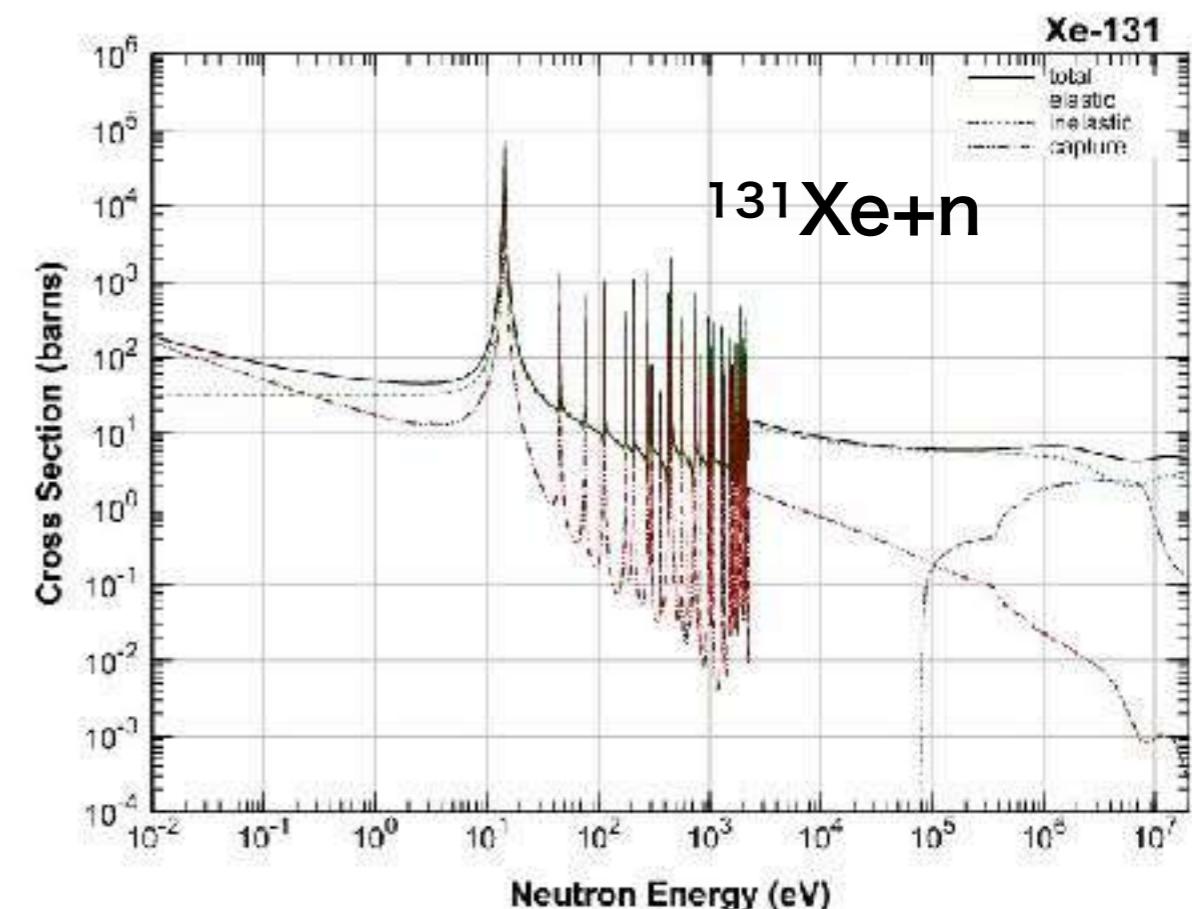
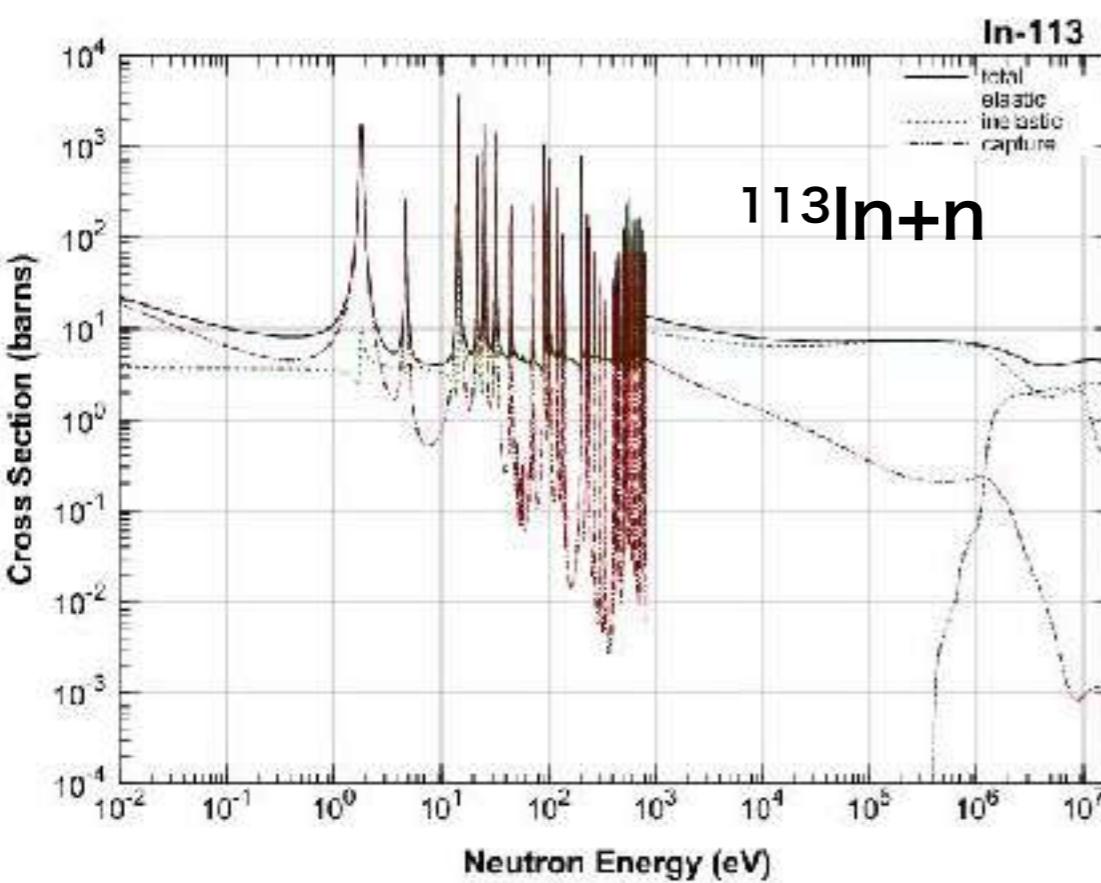
→ 原子核に中性子を入射すると中性子は吸収され共鳴状態となる



中性子吸収反応に伴う複合核

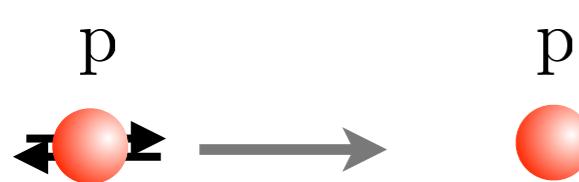
複合核共鳴反応を通した時間反転対称性の破れ探索実験を計画する

→ 原子核に中性子を入射すると中性子は吸収され共鳴状態となる



~1eV以上の”熱外中性子”を使用する

空間反転対称性の破れの増幅

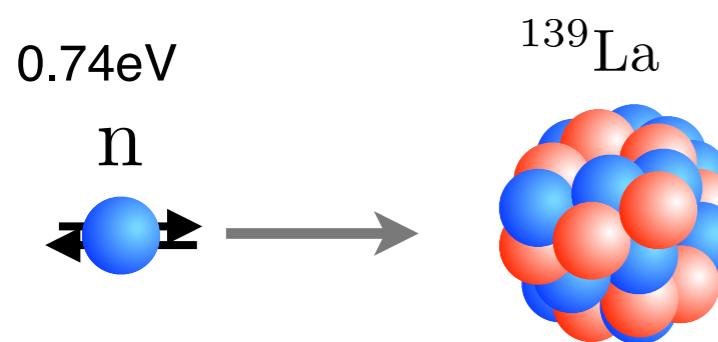


pp散乱の断面積のヘリシティ依存性

$$-(1.7 \pm 0.8) \times 10^{-7} \text{ @ } E = 15 \text{ MeV}$$

$$A_L = \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-}$$

核子核子相互作用では 10^{-7} のP-violation



^{139}La と中性子の断面積のヘリシティ依存性

$$(0.97 \pm 0.03) \times 10^{-1} \text{ @ } E_n = 0.74 \text{ eV}$$

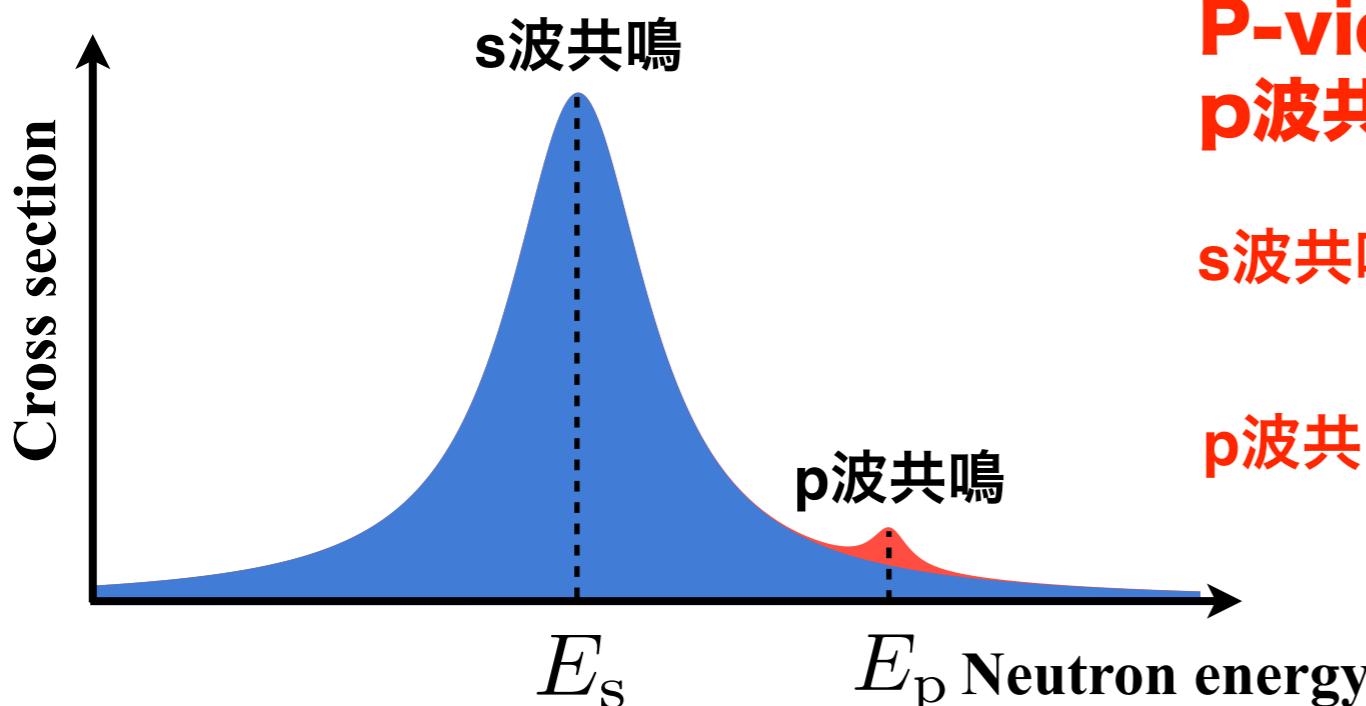
$^{131}\text{Xe}, ^{81}\text{Br}, ^{117}\text{Sn}, ^{113}\text{In}....$

→複合核共鳴状態では 10^{-1} のP-violation

同じ強い相互作用が支配的な系であるが、 Parity violationが 10^6 大きい

**特定の複合核共鳴では弱い相互作用由来のではP対称性の破れが
10⁶倍まで増幅**

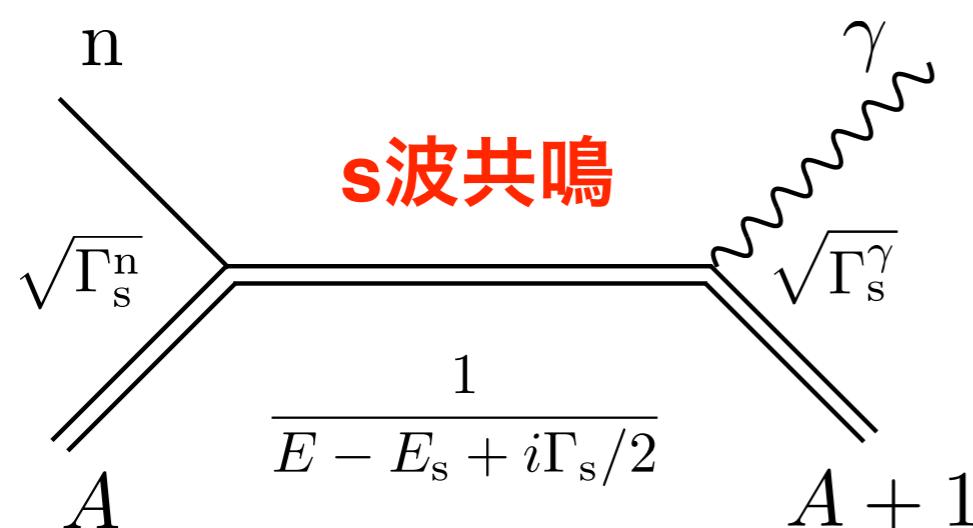
空間反転対称性の破れの増幅



P-violationの増幅はs波共鳴のすそのに
p波共鳴が存在している時に観測されている

s波共鳴：中性子の軌道角運動量0で吸収される共鳴
パリティ+

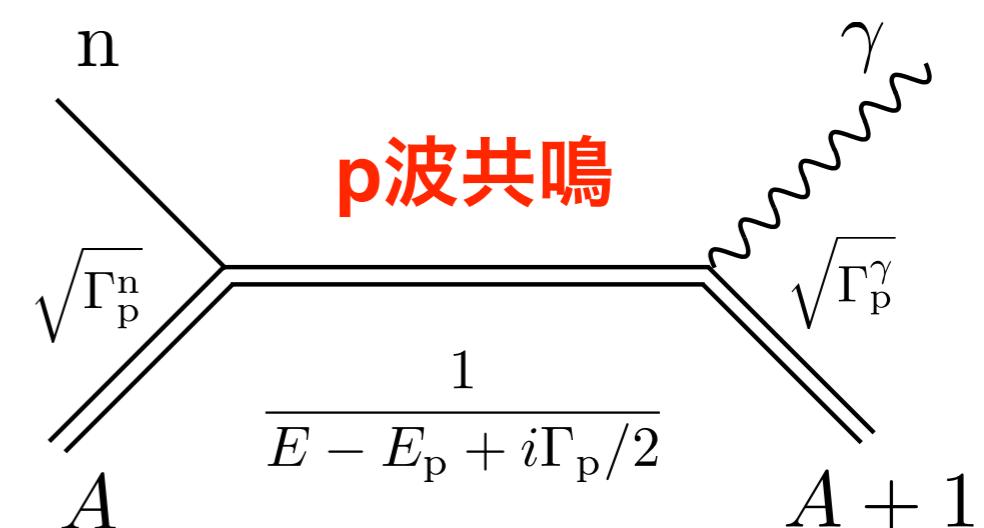
p波共鳴：中性子の軌道角運動量1で吸収される共鳴
パリティ-



$$j = l + s$$

入射中性子の全角運動量

$$j = 1/2$$

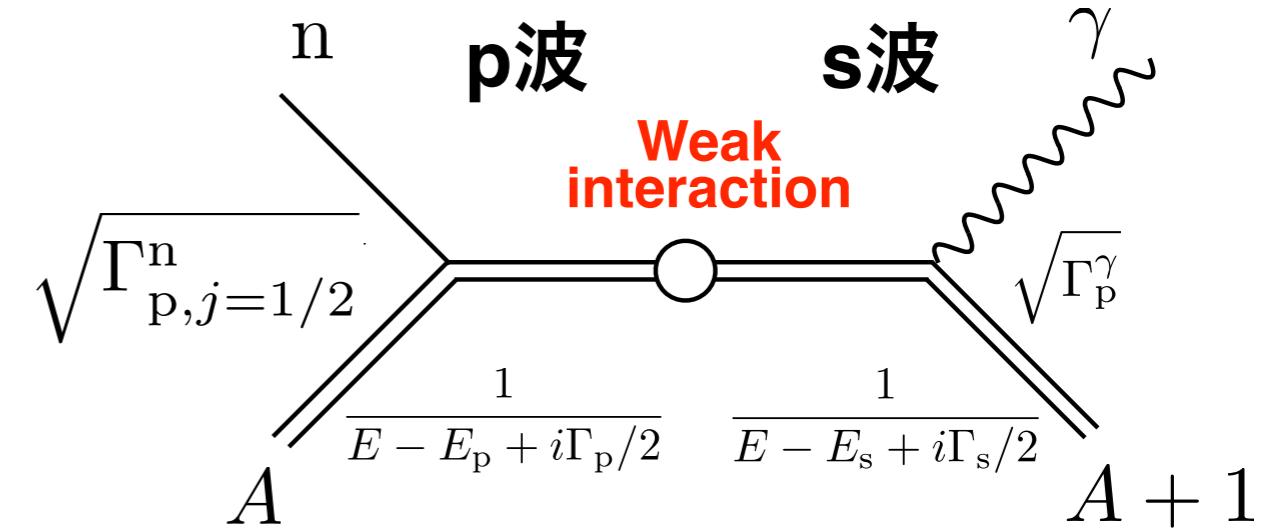
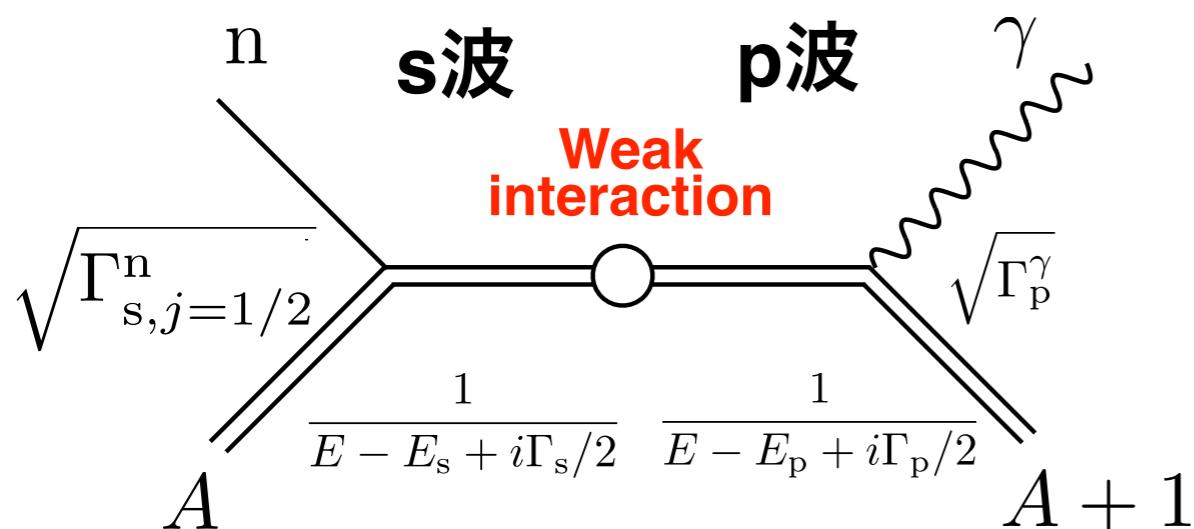


入射中性子の全角運動量

$$j = 1/2, 3/2$$

空間反転対称性の破れの増幅

s波共鳴の $j=1/2$ 成分と p 波共鳴の $j=1/2$ 成分が弱い相互作用により混合することにより P-violation が増幅すると解釈されている → s-p mixing



s-p混合を仮定すると複合核におけるP-violationの大きさは以下のようになる

$$\frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-} = \frac{\Delta\sigma_P}{2\sigma} = -\frac{2W}{E_p - E_s} \sqrt{\frac{\Gamma_{s,j=1/2}^n}{\Gamma_{p,j=1/2}^n}} \sqrt{\frac{\Gamma_{p,j=\frac{1}{2}}^n}{\Gamma_p^n}}$$

Dynamic Enhancement Structural Enhancement
 $10^2 - 10^3$ $\sim 10^3$

時間反転対称性の破れの増幅

s-p mixing modelが正しければ、異なるチャネルスピンの部分幅間でも混合し複合核過程では時間反転対称性の破れも増幅されうる

基本相互作用でのT対称性の破れ

$$\Delta\sigma_T = \kappa(J) \frac{W_T}{W} \Delta\sigma_P$$

複合核での
T-violatingな断面積

P-violationをT-violationに変換する
変換係数(未知パラメータ)

基本相互作用でのP対称性の破れ

複合核での
P-violatingな断面積

V. P. Gudkov. *Phys. Rep.*, 212:77, 1992.

核子間に存在する小さなT-violationを大きく増幅して観測することが可能

時間反転対称性の破れの増幅

複合核過程では時間反転対称性の破れも増幅されうる

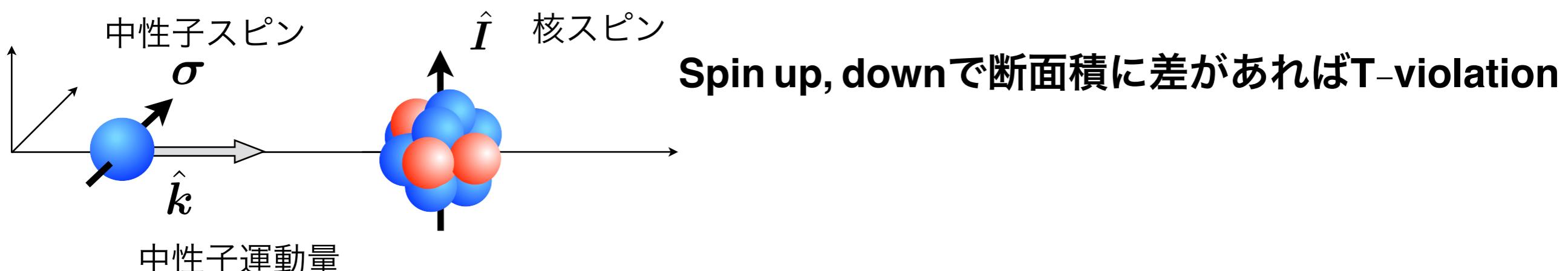
→偏極中性子に対する偏極原子核の断面積を測定

$$f = A' + B' \sigma \cdot \hat{I} + C' \sigma \cdot \hat{k} + D' \sigma \cdot (\hat{I} \times \hat{k})$$

通常の断面積 スピン依存項 P-violation T-violatingな断面積 t→-tで符号が反転

↓ 時間反転 t→-t

$$f = A' + B' \sigma \cdot \hat{I} + C' \sigma \cdot \hat{k} - D' \sigma \cdot (\hat{I} \times \hat{k})$$



熱外中性子源、中性子偏極デバイス、核偏極ターゲットが必要

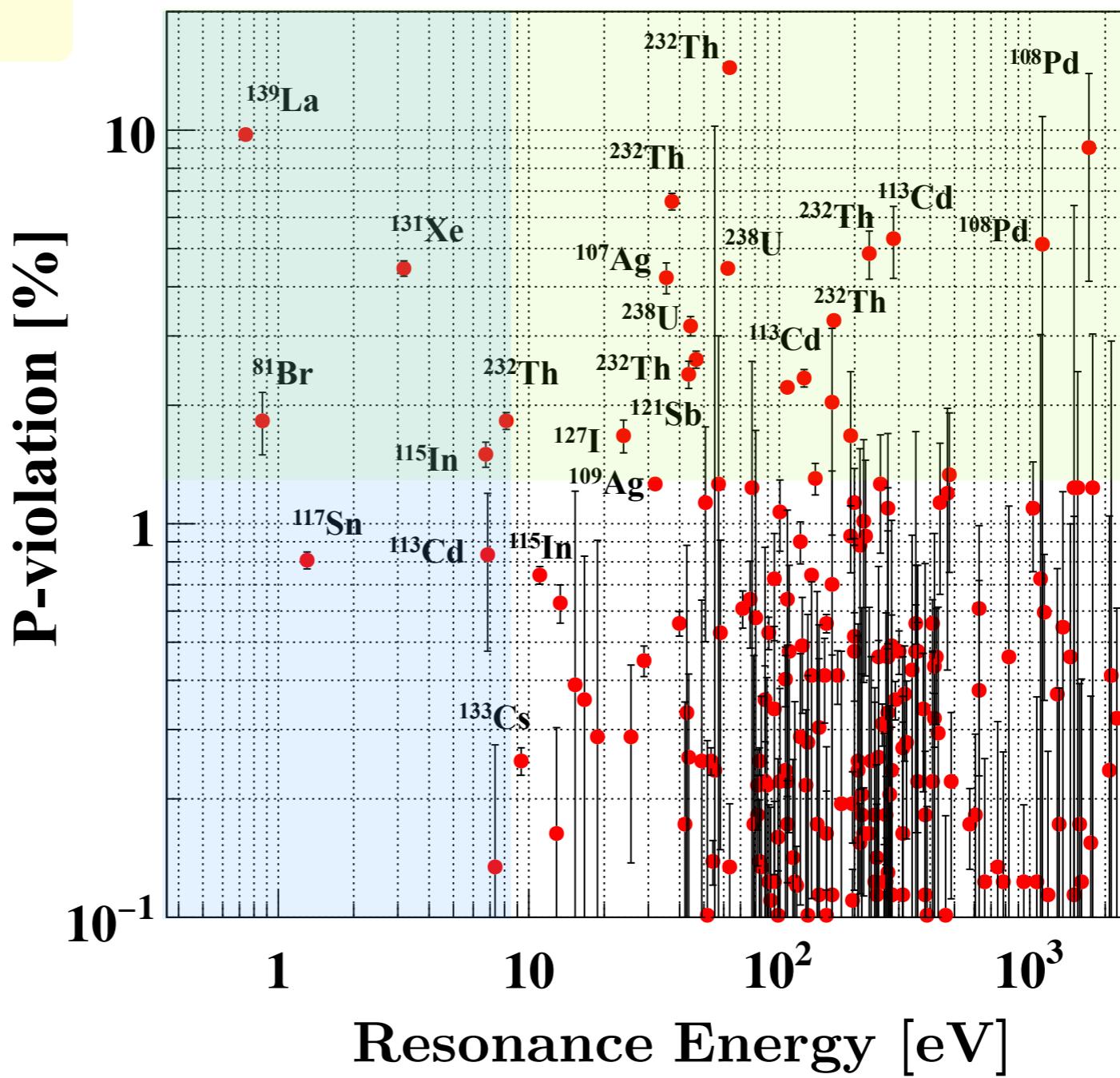
時間反転対称性の破れの候補核

本実験では使用する核種によって実験感度が変わる

実験に適した核種を選び出す必要がある。

$$\Delta\sigma_T = \kappa(J) \frac{W_T}{W} \Delta\sigma_P$$

$\Delta\sigma_P$ が大きい方が良い



J-PARCのような冷中性子モーレータだと
中性子エネルギーが小さい方が
中性子強度が大きい

時間反転対称性の破れの候補核

本実験では使用する核種によって実験感度が変わる
実験に適した核種を選び出す必要がある。

$$\Delta\sigma_T = \kappa(J) \frac{W_T}{W} \Delta\sigma_P$$

	139La	81Br	117Sn	131Xe
P-violationが大きい	○	○	○	○
共鳴エネルギーが小さい	○ 0.74eV	○ 0.88eV	○ 1.3eV	○ 3.2eV
原子核スピンが小さい	7/2 △	3/2 ○	1/2 ○	3/2 ○
自然同位体比が大きい	○	○	✗	△
$\kappa(J)$ が大きい				
核偏極技術	動的核偏極 (~50%)	—	—	光ポンピング (~7%)

P.Hautle and M. Iinuma.
NIM A., 440:638, (2000).

Molway et al.,
arXiv:2105.03076 (2021)
US NOPTREX

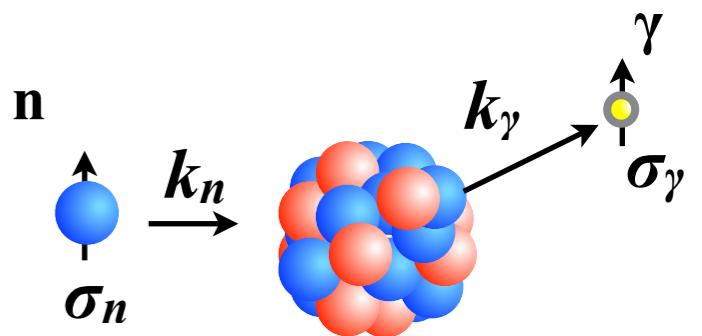
γ 線角度分布測定

$\kappa(J)$ はp波共鳴の中性子部分幅の関数

中性子吸収後に放出される γ 線の角度分布を測定することで中性子部分幅が求められる

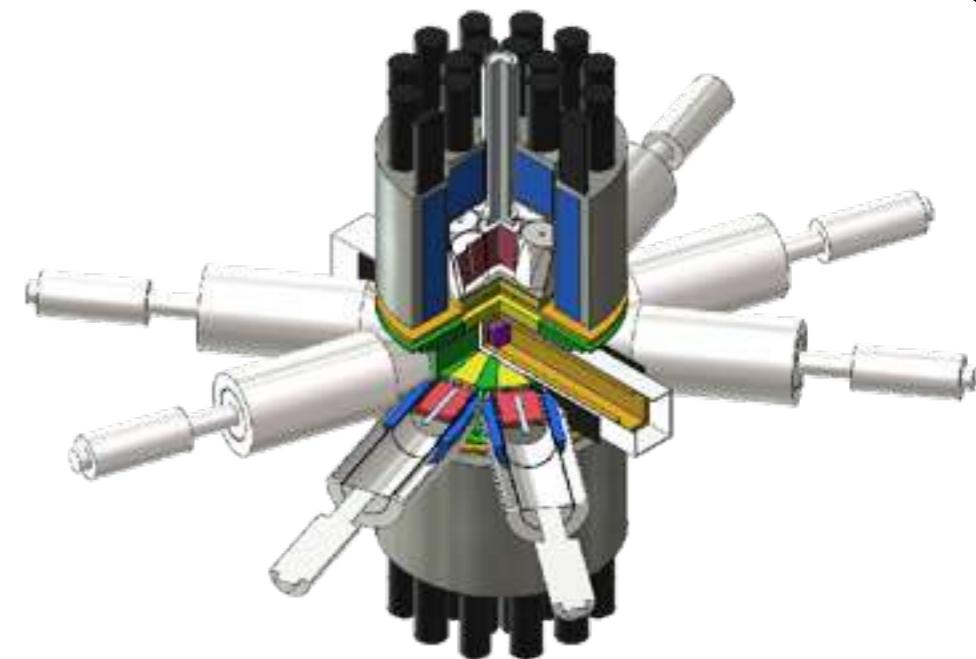
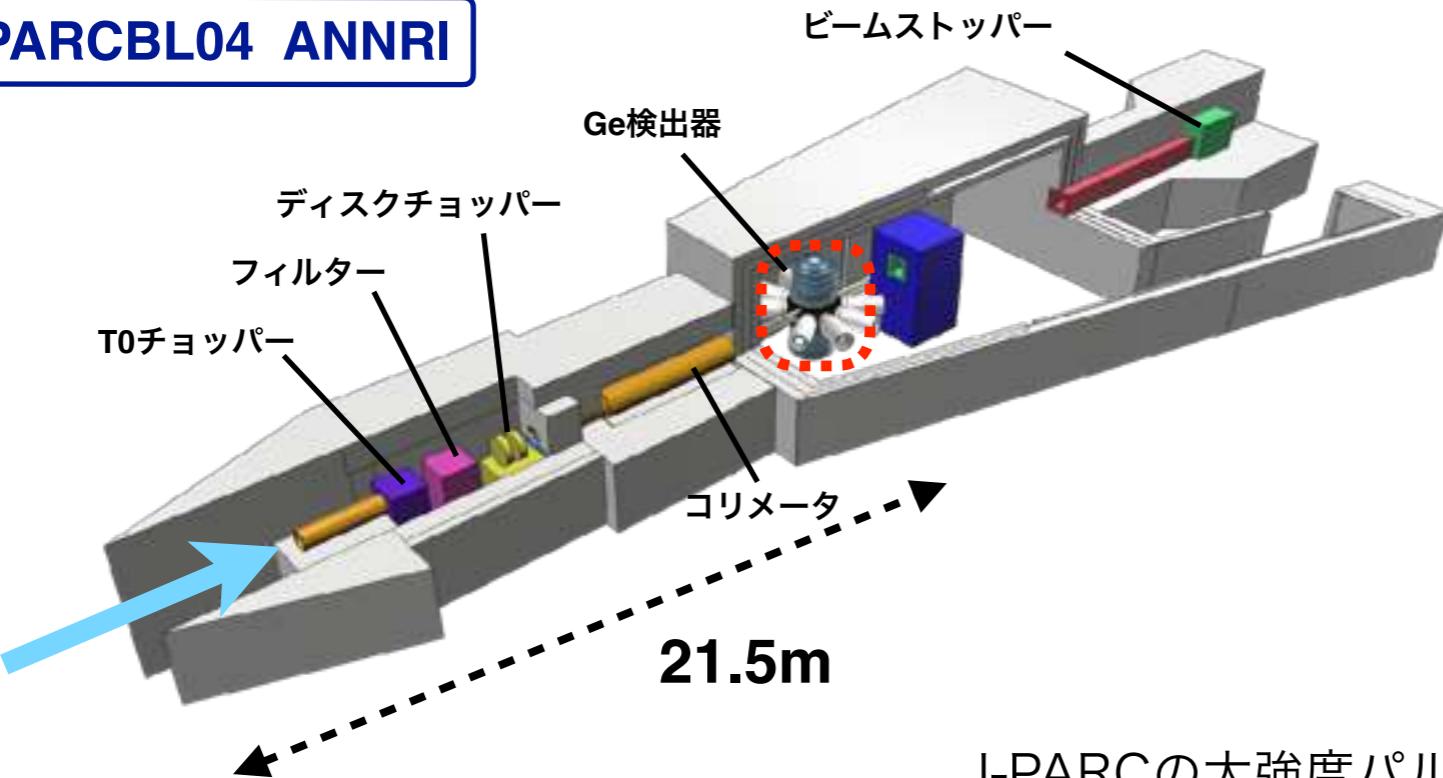
$$\frac{d\sigma_{n\gamma_f}}{d\Omega_\gamma} = \frac{1}{2} \left(a_0 + a_1 \hat{k}_n \cdot \hat{k}_\gamma + a_2 \sigma_n \cdot (\hat{k}_n \times \hat{k}_\gamma) + a_3 \left((\hat{k}_n \cdot \hat{k}_\gamma)^2 - \frac{1}{3} \right) \right. \\ \left. + a_4 (\hat{k}_n \cdot \hat{k}_\gamma) (\sigma_n \cdot (\hat{k}_n \times \hat{k}_\gamma)) + a_5 (\sigma_\gamma \cdot \hat{k}_\gamma) (\sigma_n \cdot \hat{k}_\gamma) \right.$$

$$+ a_6 (\sigma_\gamma \cdot \hat{k}_\gamma) (\sigma_n \cdot \hat{k}_n) + a_7 (\sigma_\gamma \cdot \hat{k}_\gamma) \left((\sigma_n \cdot \hat{k}_\gamma) (\hat{k}_\gamma \cdot \hat{k}_n) - \frac{1}{3} \sigma_n \cdot \hat{k}_n \right)$$



V. V. Flambaum et al, Nuclear Physics A, vol. 435, no. 2, pp. 352 – 380, 1985.

J-PARCBL04 ANNRI

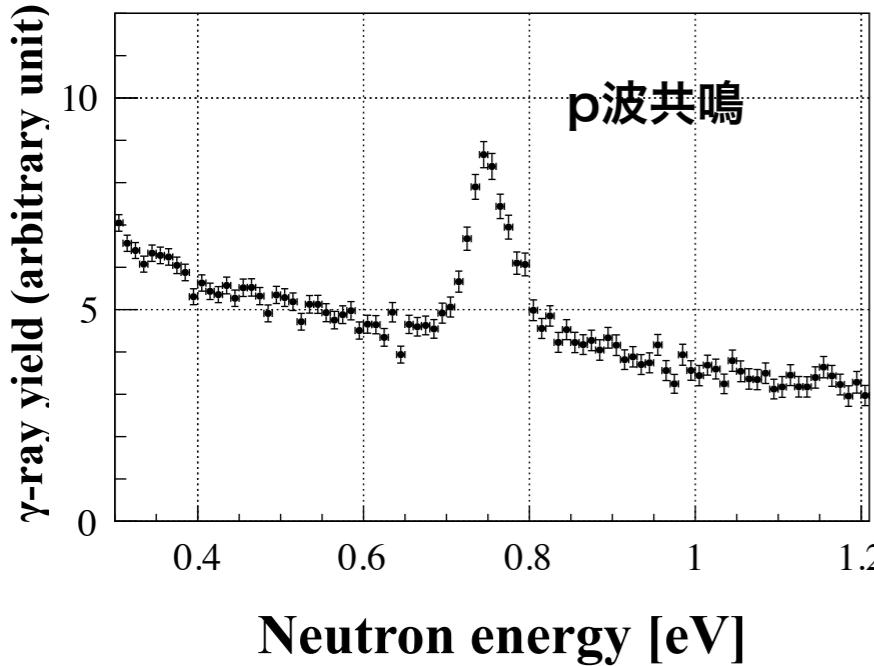


J-PARCの大強度パルス中性子ビーム+ 大立体角Ge検出器

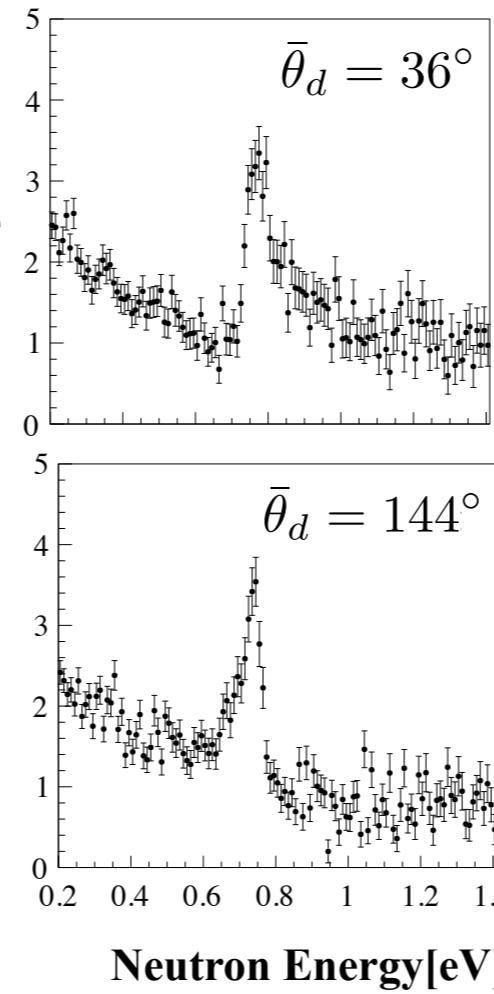
γ 線角度分布測定 ^{139}La 結果

$^{139}\text{La} + n \rightarrow ^{140}\text{La}_{\text{gnd}} + \gamma$ で放出される 5161keV

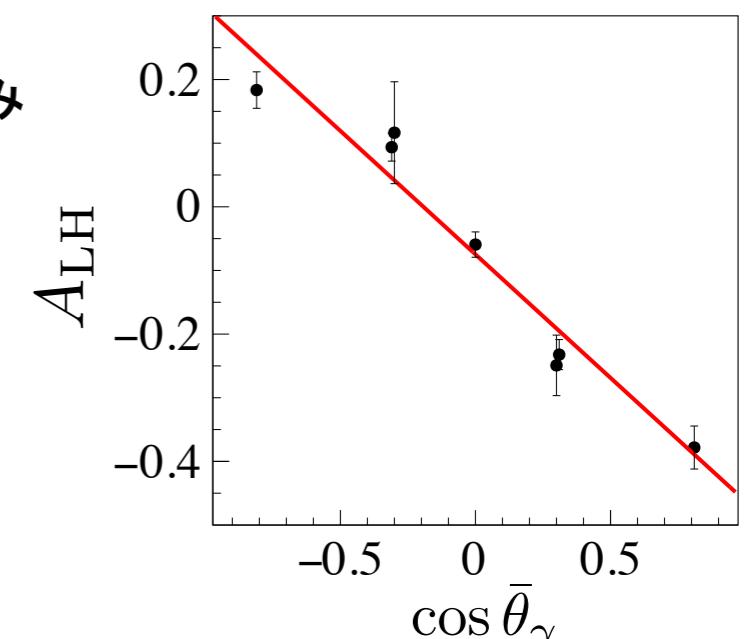
γ 線でゲートをかけた中性子スペクトル



角度ごと
に測定



形状の歪み
を評価



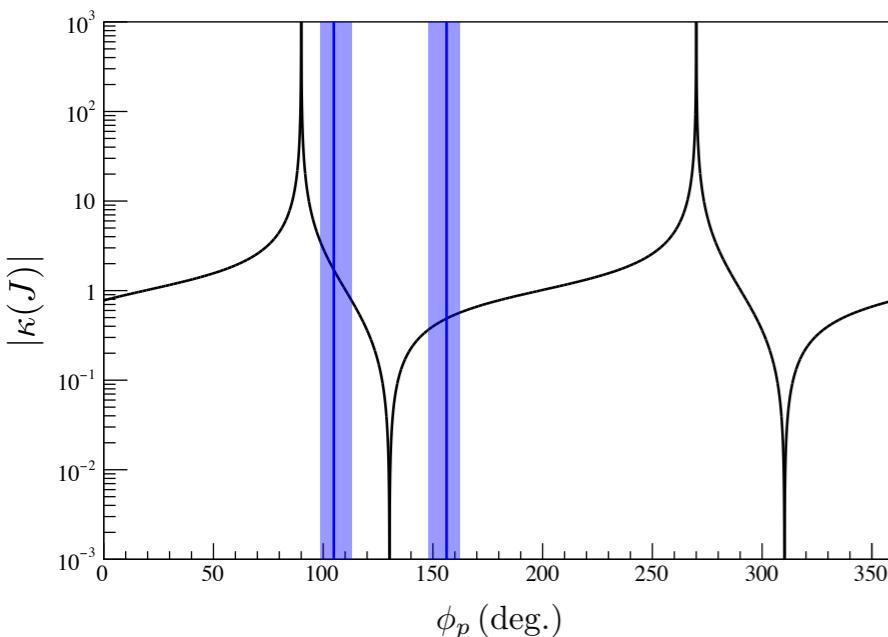
p波共鳴から放出される γ 線に角度分布があることが発見

T. Okudaira et al. Physical Review C 97, 034622 (2018)

この角度分布を s-p mixing に基づく理論計算と比較する

$\kappa(J)$ の値は 1 程度であることがわかった

^{140}La p波共鳴では T-violation が $\sim 10^6$ 倍程度
増幅されていることが明らかになった



T-violationの探索感度

^{139}La におけるT-violatingなCross sectionの大きさを計算

$$\Delta\sigma_T = \kappa(J) \frac{W_T}{W} \Delta\sigma_P$$

pion exchangeの際のT-violatingなCoupling Constant

$$\frac{W_T}{W} = \frac{\Delta\sigma^{\text{TP}}}{\Delta\sigma^P} \simeq (-0.47) \left(\frac{\bar{g}_\pi^{(0)}}{h_\pi^1} + (0.26) \frac{\bar{g}_\pi^{(1)}}{h_\pi^1} \right)$$

Y. H. Song et al, Phys. Rev. C., 83, 065503 (2011).

pion exchangeの際のP-violatingなCoupling Constant

n+p → d+γ 実験によって $h_\pi^1 = (2.6 \pm 1.2_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}}) \times 10^{-7}$

$$d_n = \frac{e}{m_N} \frac{g_\pi(\bar{g}_\pi^{(0)} - \bar{g}_\pi^{(2)})}{4\pi^2} \ln \frac{m_N}{m_\pi} \simeq 0.14(\bar{g}_\pi^{(0)} - \bar{g}_\pi^{(2)})$$

nEDM searchによって $\bar{g}_\pi^{(0)} < 1.6 \times 10^{-10}$

^{199}Hg EDM searchによって $\bar{g}_\pi^{(1)} < 0.5 \times 10^{-11}$

$$\rightarrow \left| \frac{W_T}{W} \right| < 2.9 \times 10^{-4}$$

$\kappa(J) \sim 1$

$$\rightarrow |\Delta\sigma_T| < 1 \times 10^{-4} \text{ barn}$$

^{139}La の全断面積~10barnに対して~ 1×10^{-4} barn程度の精度で中性子吸収断面積を測ればnEDM searchに相当

時間反転対称性の破れの探索実験：計画の流れ

基本相互作用における時間反転対称性の破れ W_T を探索したい

1. T-violationの増幅率が大きい標的核の選定

→ ^{139}La 0.74eV共鳴が第一候補

T. Okudaira *et. al.*, Phys. Rev. C97 (2018) 034622.

J. Koga *et. al.*, arXiv:2202.06222 (2022)

^{117}Sn , ^{131}Xe , $^{81}\text{Br}...$

s-p mixingモデルの検証

(n,γ)反応の角相関項の測定

T. Yamamoto *et al.* Phys. Rev. C101, 064624 (2020)

T. Okudaira *et. al.*, Phys. Rev. C104, 014601(2021)

2. 中性子の偏極技術開発

→ ^3He スピンフィルタ

^3He 偏極率85%を達成

T. Okudaira *et. al.*, NIM A 977, 164301 (2020)

3. 核偏極技術の開発

→動的核偏極

K. Ishizaki *et al.*, NIM A1020, 165845 (2021)

4. 中性子検出器

D. Schaper *et. al.*, NIM A 969, 163961 (2020)

**U.S. NOPTREX
RCNP**

4. 開発装置をビームラインに導入し複合核での時間反転対称性の破れ $\Delta\sigma_T$ を測定

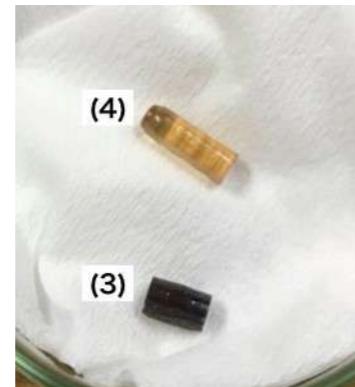
偏極標的の開発

動的核偏極法を用いた偏極La標的の開発が進行中

結晶育成



at Tohoku Univ.



Tohoku Univ.,
Hiroshima Univ.
Nagoya Univ.

核偏極



at RCNP, Osaka Univ.



RCNP, Osaka Univ.
Hiroshima Univ., Nagoya
Univ. ,Yamagata Univ.

偏極 La 標的



LaAlO₃ (Nd⁺)
single crystal

冷凍機



Nagoya Univ.,
RIKEN,
Japan Women's
Univ.
Ashikaga Univ.
Hiroshima Univ.

緩和時間制御

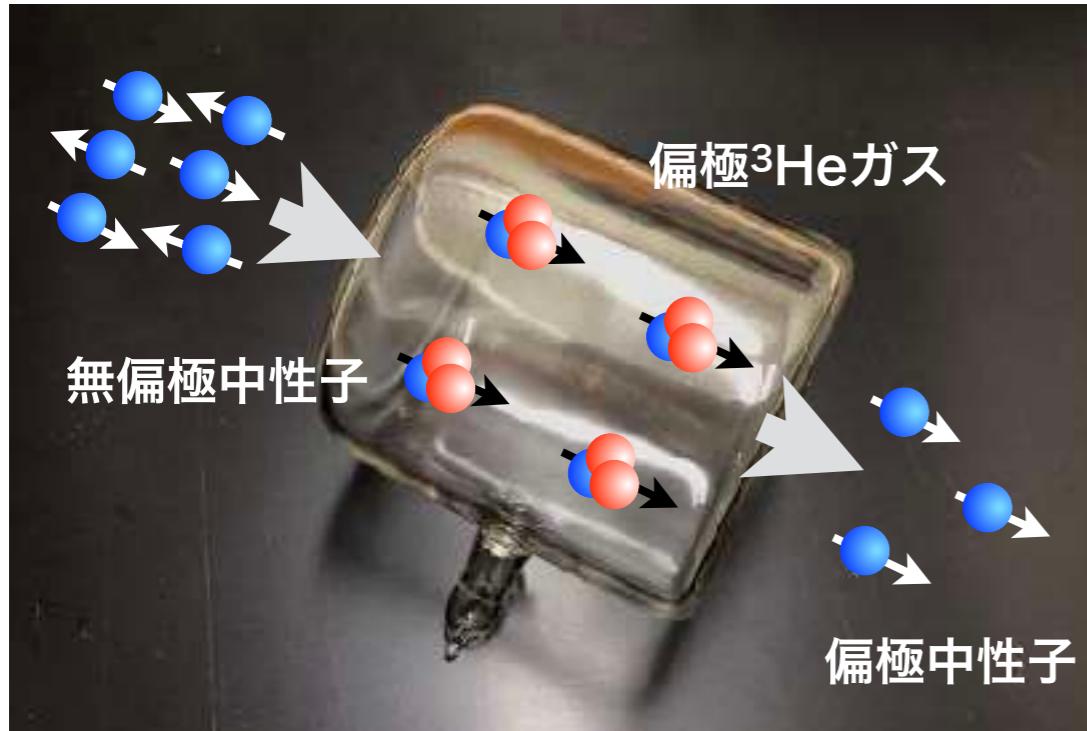
Hiroshima Univ.
Nagoya Univ.

Relaxation time control
with aromatic molecule



中性子偏極デバイスの開発

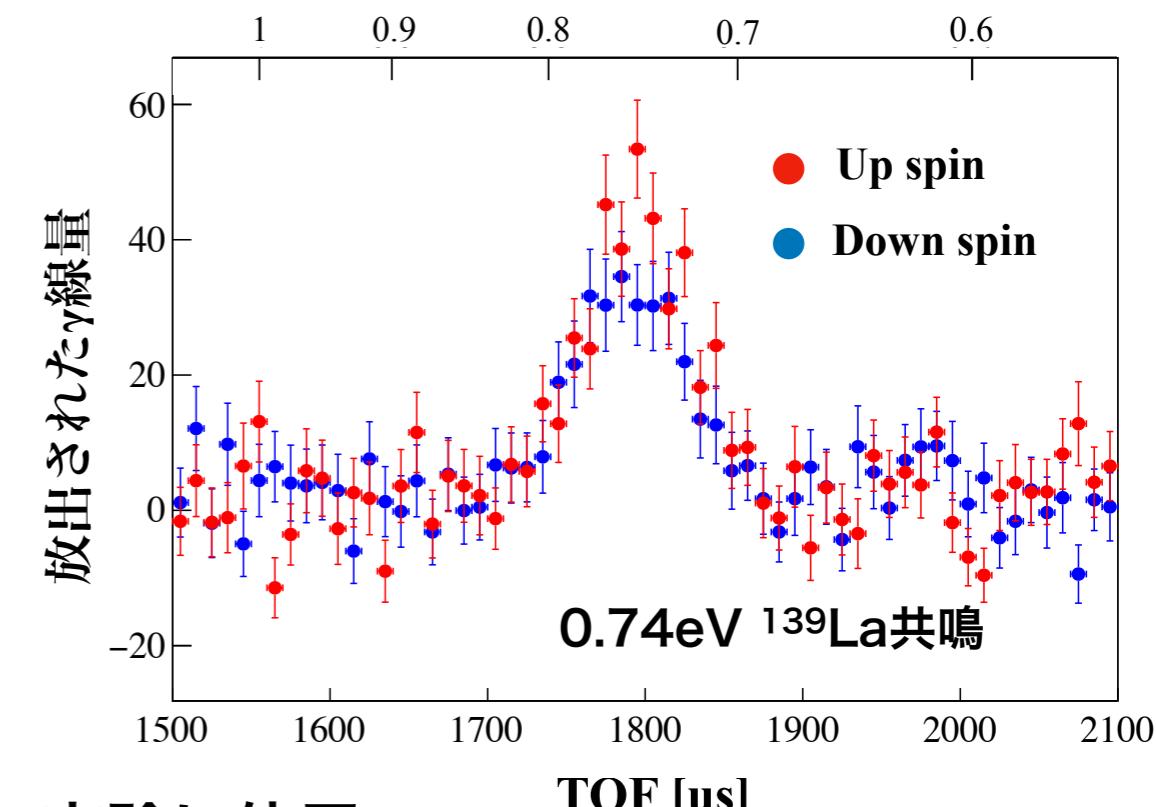
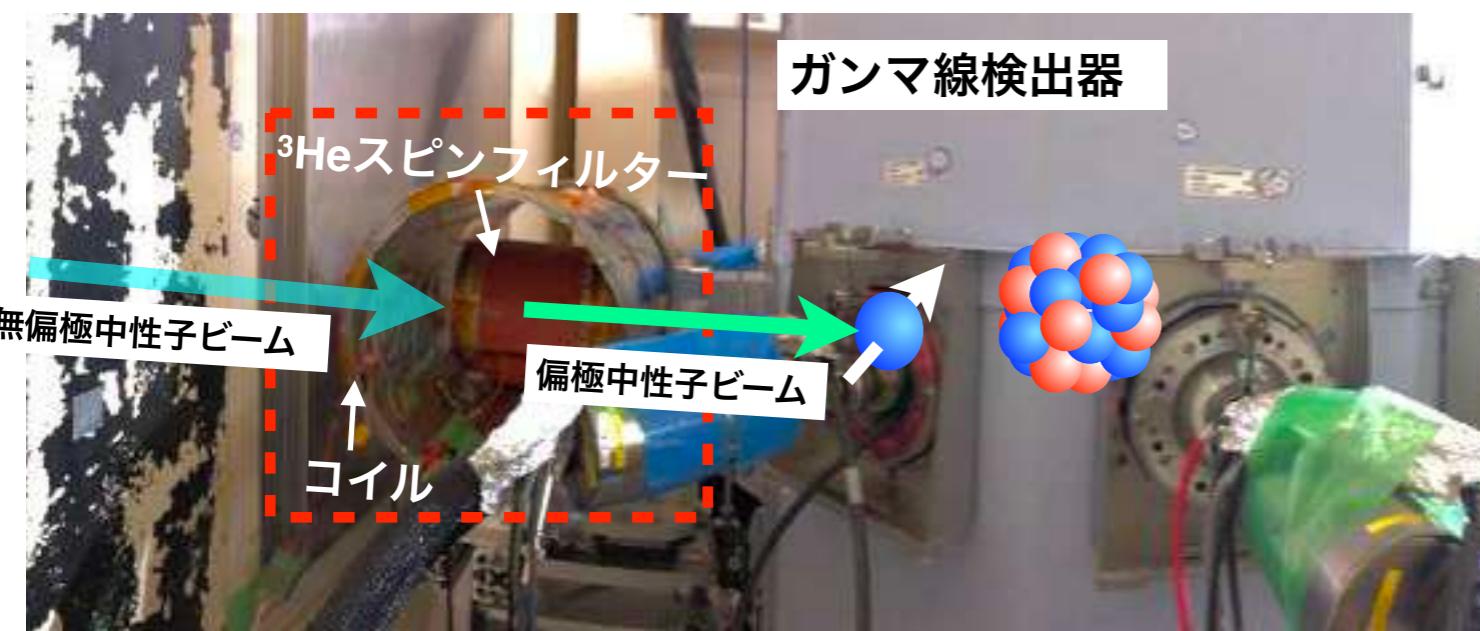
偏極 ^3He ガスを用いた中性子偏極デバイス: ^3He スピニルタ



レーザー偏極により ^3He ガスを偏極
J-PARCにて開発が進行中

^3He 偏極率~80%を達成

T. Okudaira *et. al.*, NIM A 977, 164301 (2020)



J-PARCで0.74eV中性子を40%程度の偏極率で偏極、実験に使用

T. Yamamoto *et al.* Phys. Rev. C101, 064624 (2020)

J-PARCにおける時間反転対称性の破れ探索実験

J-PARC, 物質生命科学実験施設(MLF)にて実験を行うことを計画中

J-PARC P76

KEK 2018S12

RCNP, Hiroshima Univ.,
Nagoya Univ., KEK

動的核偏極ターゲット

NOPTREX Collaboration

Neutron Optical Parity and Time Reversal EXperiment

中性子検出器

polarized target

disk chopper

beam shutter

neutron collimator

中性子偏極デバイス
 ^3He スピニンフィルター

neutron polarizer
(^3He spin filter)

γ -ray detectors

neutron spin analyzer
(^3He spin filter)

Indiana Univ., Kentucky Univ.,
RCNP, Nagoya Univ.

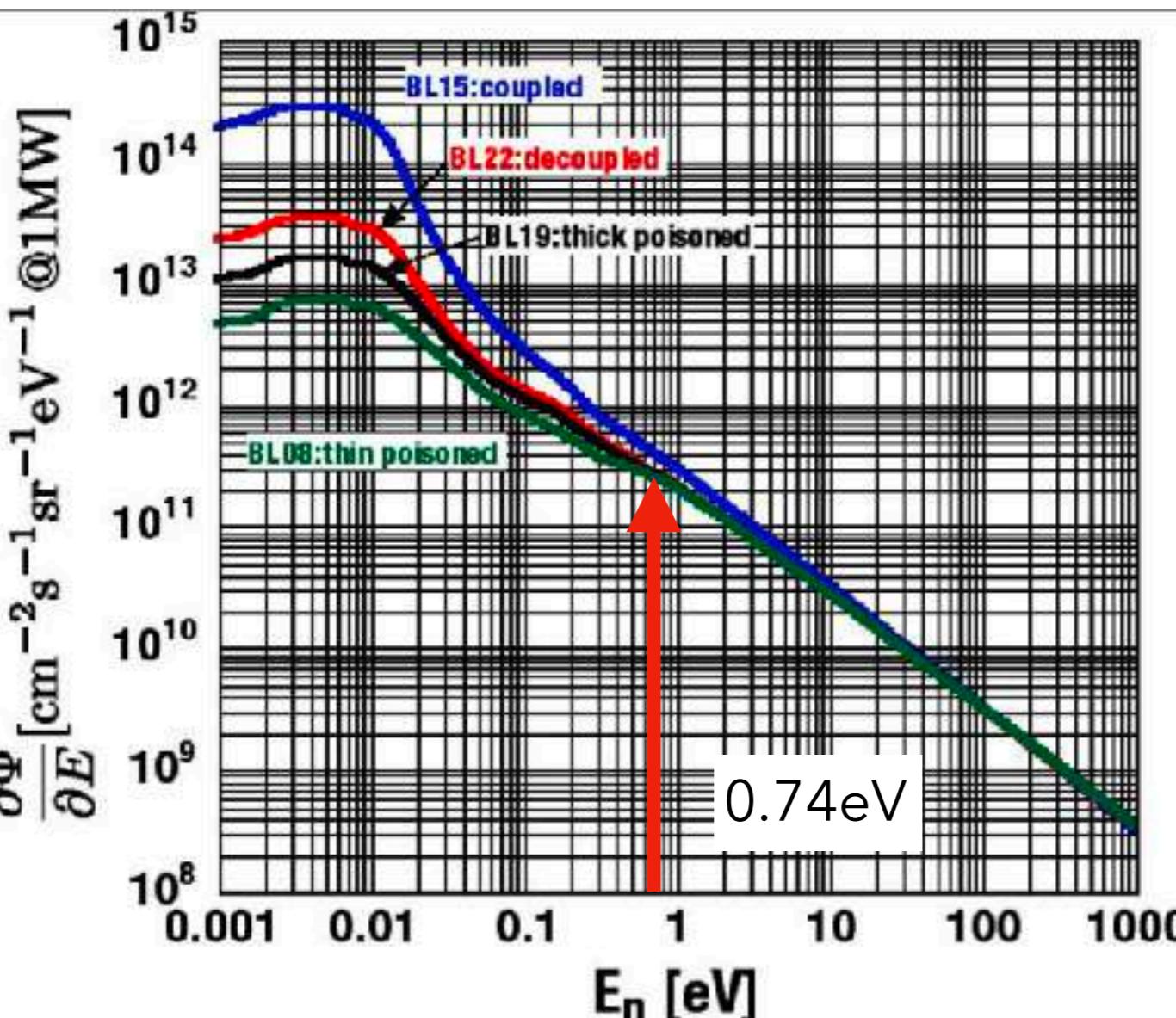
^3He 偏極率 70%, ^{139}La 偏極率 40%の場合、統計的には1週間程度の測定でnEDMに相当する感度

この実験に適した中性子源

0.74eVの中性子を選び出す必要がある

→パルス中性子源はTOF法でエネルギー分解できる

J-PARCの中性子強度



冷中性子用のモデレータのせいで熱外における中性子強度は大きく落ちる

+大きな遮蔽体、短いビームタイム、
γ線BG

熱外中性子が使える施設は多くない

熱外中性子利用はまだあまり開拓されていない領域

高温超伝導発現メカニズム

非弾性散乱

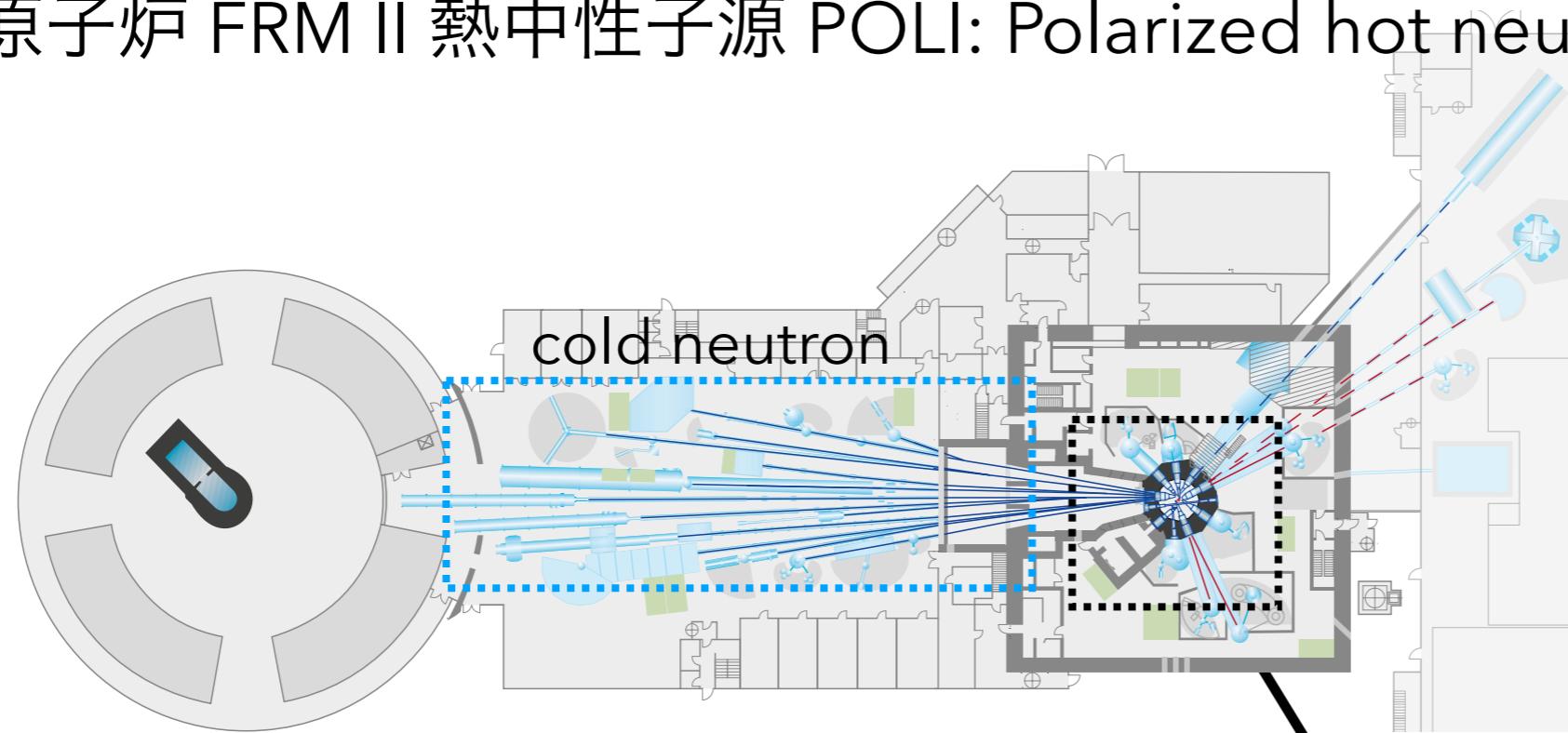
共鳴イメージング

核データ...

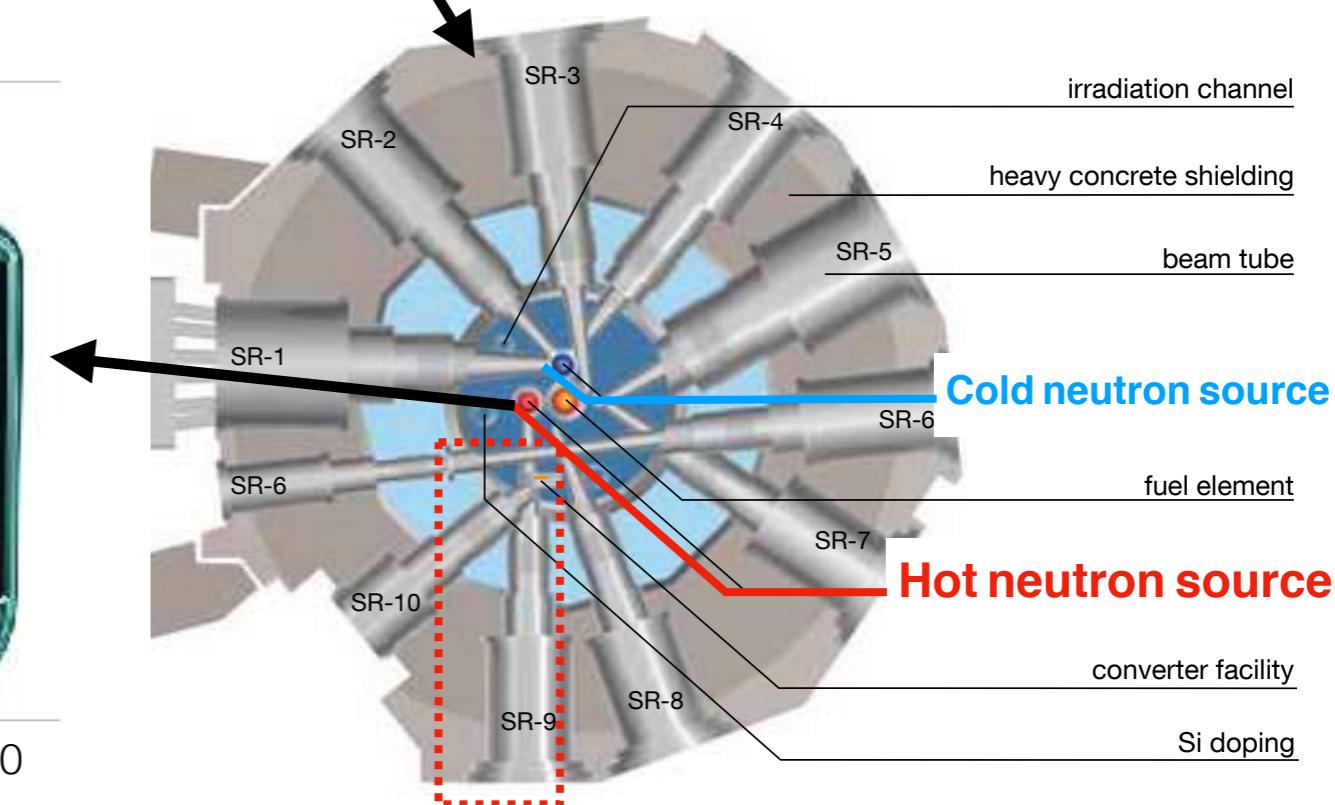
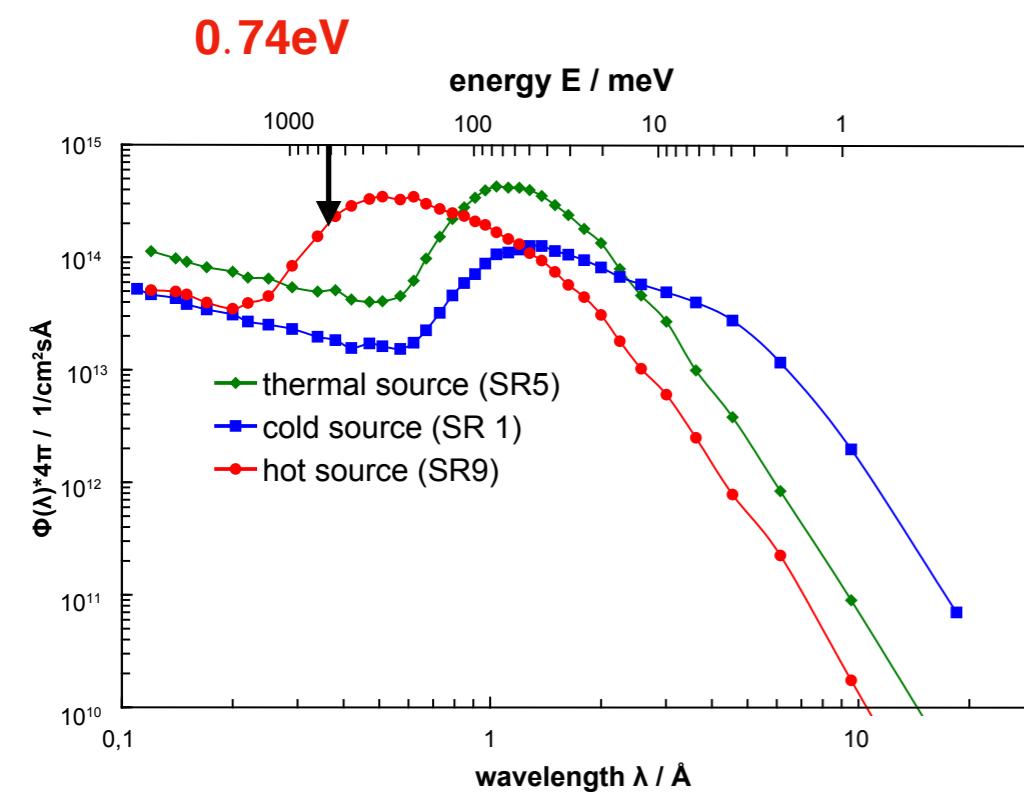
→Hot moderator!

新研究炉での実験の可能性 FRM II

ドイツ 原子炉 FRM II 熱中性子源 POLI: Polarized hot neutron diffractometer
20MW, 2004~



~2000K 14kgのグラファイトの”モデレータ”



新研究炉での実験の可能性 FRM II POLI

高次のブラング回折を利用して特定のエネルギーのみ中性子を取り出す
超電導体や磁気構造研究のための非弾性散乱装置

モノクロメータ : Si(311)

ビームサイズ : 65mm x 25mm

ターゲット位置での中性子量

: $\sim 3 \times 10^7 \text{ n/s}$ at 0.74eV

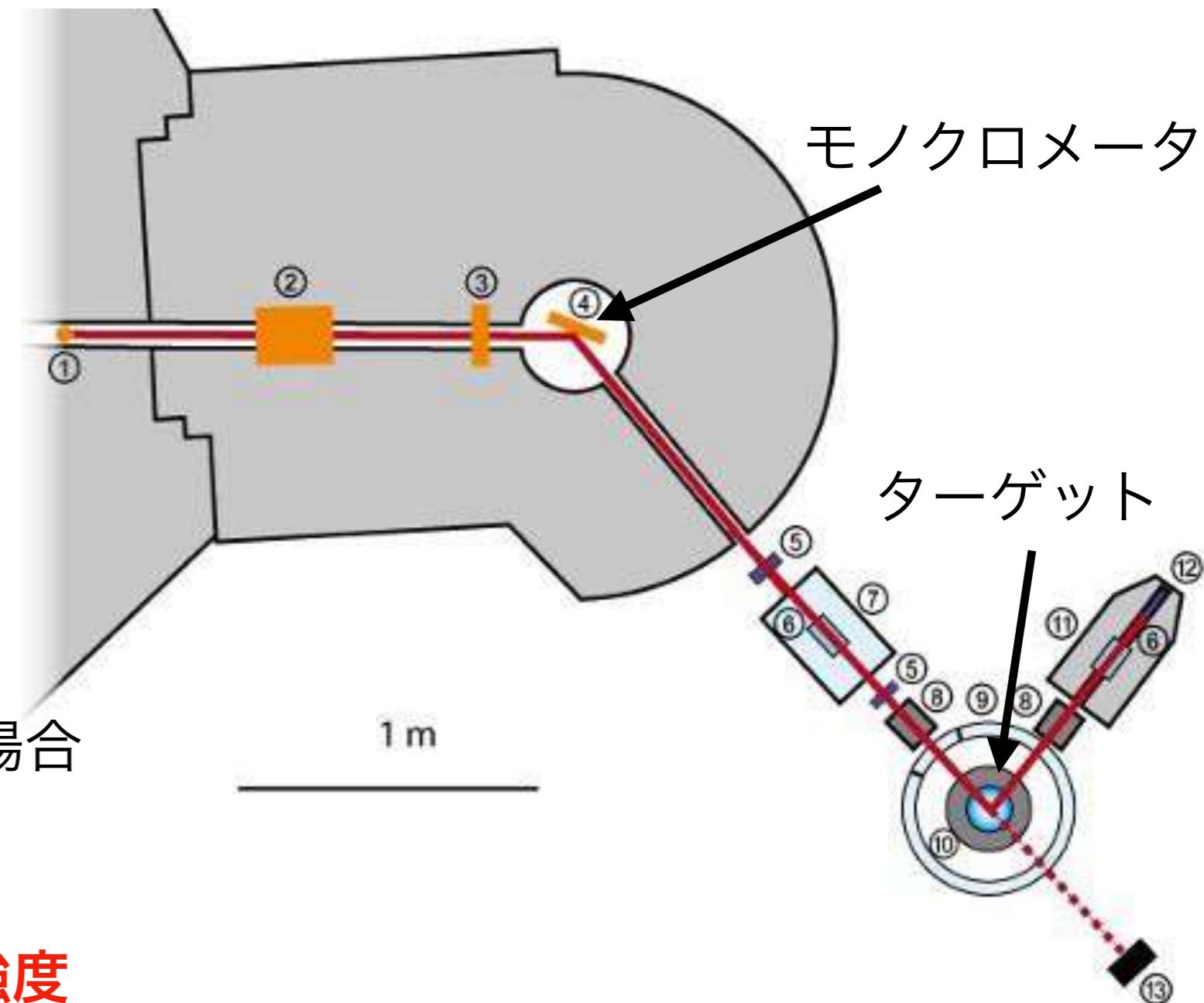
1MW J-PARC の場合

$\sim 1.8 \times 10^7 \text{ n/s}$ at 0.74eV

新研究炉で同様の装置を作った場合

$\sim 1.5 \times 10^5 \text{ n/s}$ at 0.74 eV

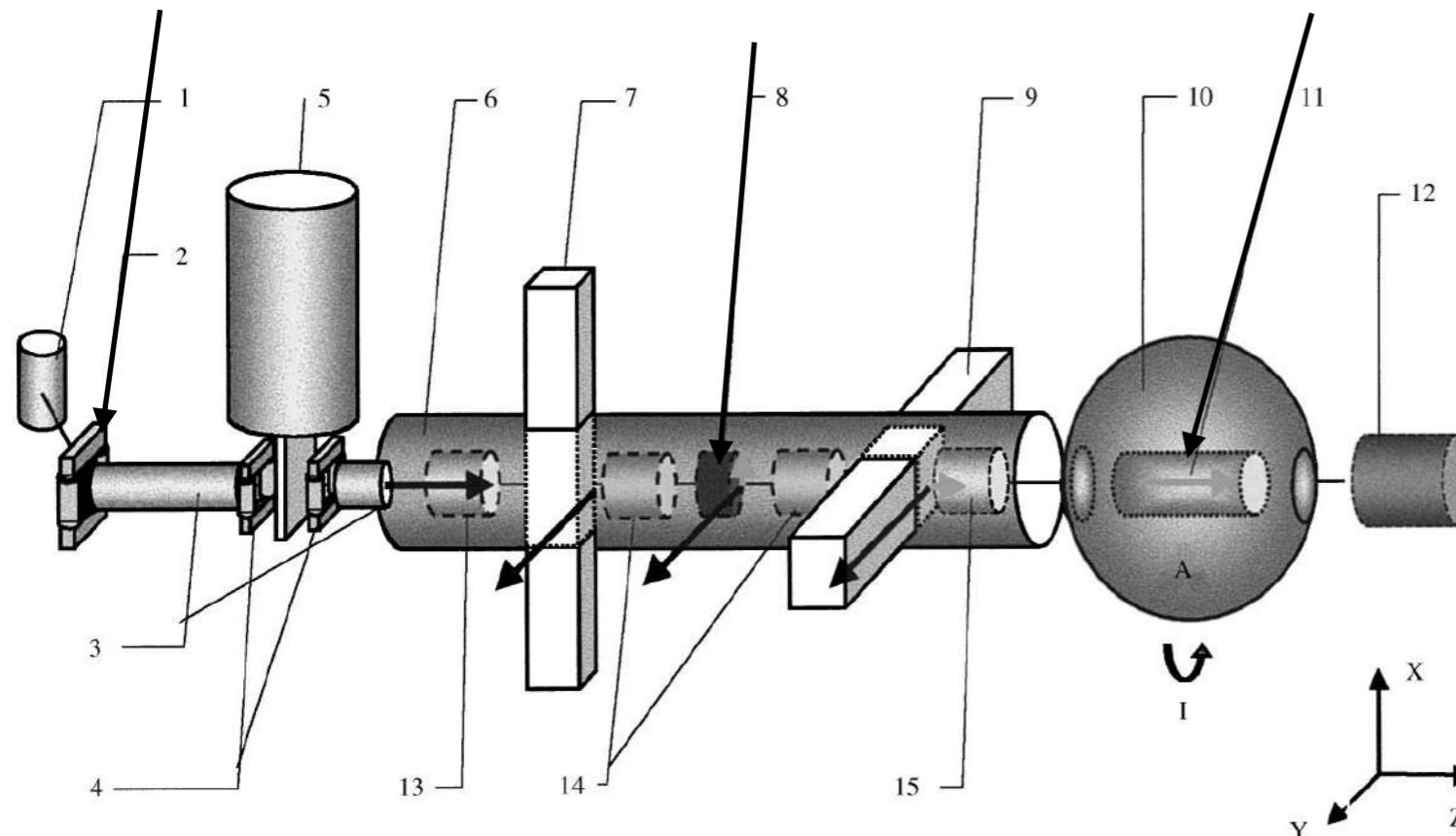
J-PARCと同等レベルの中性子強度



Hot Moderatorを使った実験

過去、対称性の破れに関する研究はHot sourceを用いて多く行われている

Neutron polarizer (CoFe) La target (3 x 3 x 5cm) Spin Analyzer (^3He)



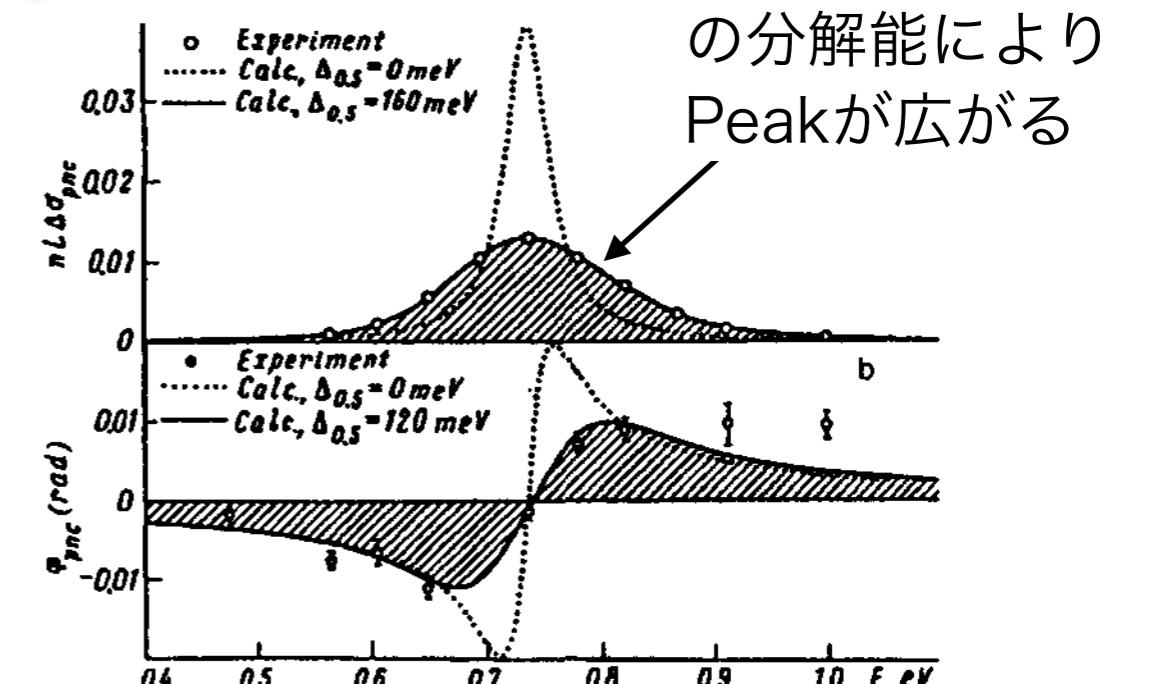
偏極中性子を ^{139}La に入射し
ターゲット内のスピン回転
を測定

Neutron optics P-violation effects near p-wave resonance

Physica B 267-268 (1999) 289-293

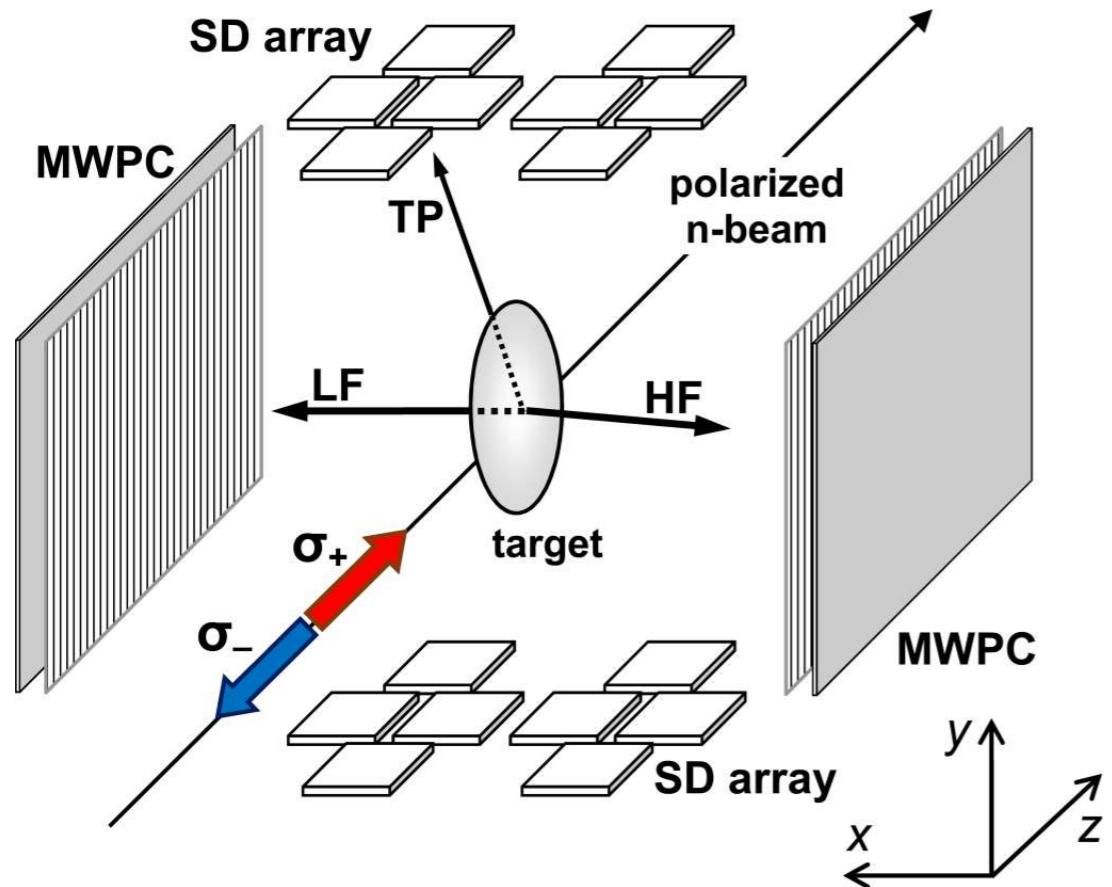
@ ILL hot neutron source

^{139}La 0.74eVにおけるParity violatingな
中性子スピン回転の発見



Hot Moderatorを使った実験

過去、対称性の破れに関する研究はHot sourceを用いて多く行われている



233, 235U, 239, 241Puの sub eV領域の 共鳴における時間反転対称性の破れの探索

中性子偏極方向とFission後の粒子の運動方向のT_oddな3重積を測定

$$B = \sigma_n \cdot (\mathbf{p}_{\text{LF}} \times \mathbf{p}_{\text{TP}}) = \mathbf{p}_{\text{TP}} \cdot (\sigma_n \times \mathbf{p}_{\text{LF}}),$$

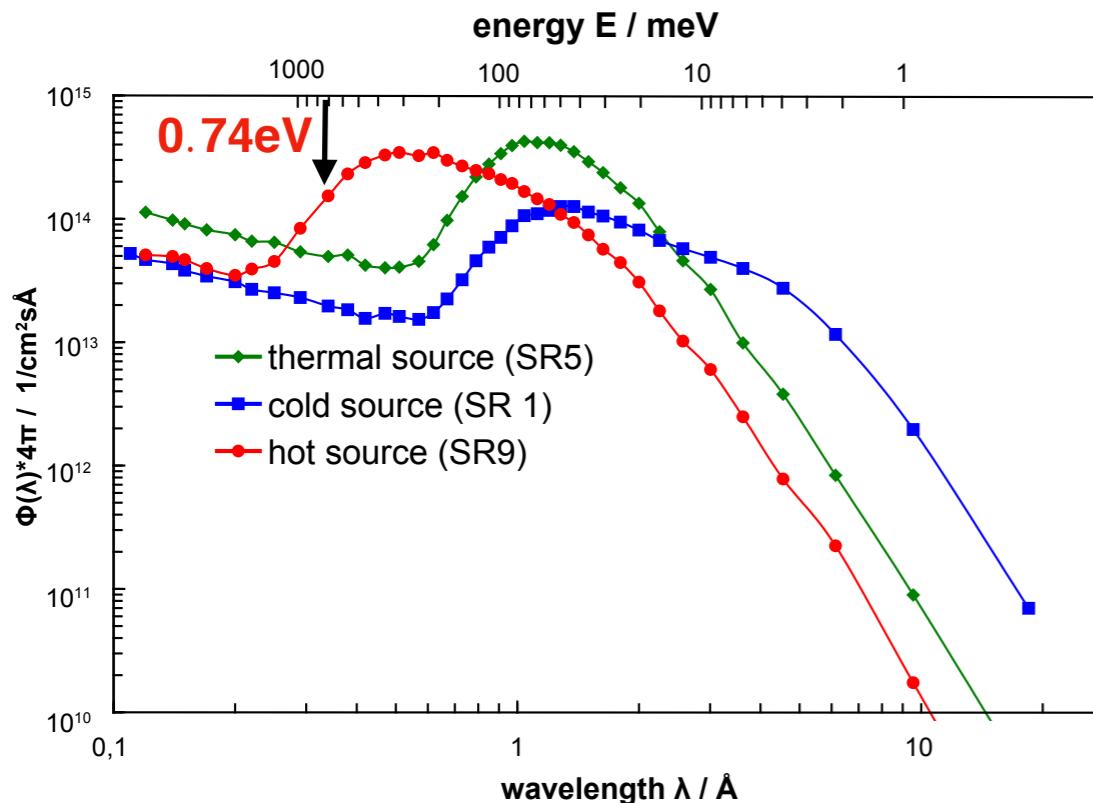
Particular features of ternary fission induced by polarized neutrons in the major actinides 233,235U and 239,241Pu

Physical review C 93, 054619 (2016)

@ ILL hot neutron source, FRM II POLI

新研究炉での実験の可能性

モデレータを出た時点での中性子強度を比較



- 新研究炉 (FRM IIと同じ装置を使用)

0.74eV周りの100meVの中性子量

$$-4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

福井炉では- $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

- J-PARC

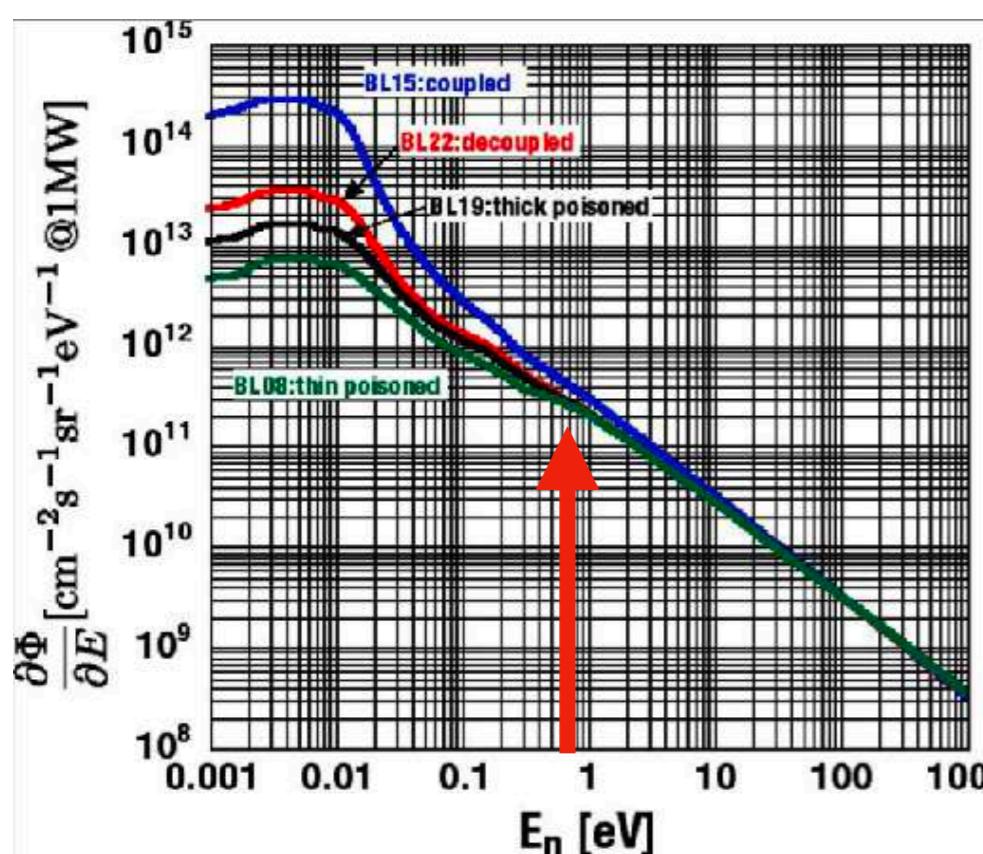
0.74eVでは~ $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ eV}^{-1} \text{ MW}^{-1}$

1MW, 100meVあたりの中性子量は

$$3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

60倍程度、福井炉の方中性子Fluxが大きくなる

熱外中性子をうまく取り出す技術、モノクロメータの性能向上により大きくJ-PARCを上回る可能性あり



まとめ

- 原子核の中性子吸収反応において、時間反転対称性の破れが大きく増幅される
→核子間相互作用における未知相互作用の探索を計画
 - T-violation探索実験のための開発が進行中→J-PARCで実験予定
核偏極ターゲット、中性子偏極デバイス、高係数率中性子検出器
 - 新研究炉での実験の可能性
→現状技術を用いたとしてもFluxはJ-PARCと遜色ない
さらに強度が上がるポテンシャルもある
 ^{139}La に限らず他の原子核で研究が進む可能性
- 分解能はパルス中性子源に劣るが、メリットも大きい
- ・1ヶ月オーダーの長期間のビームタイム
 - ・遮蔽体が少ないとによる自由度の高い実験
 - ・高速中性子、 γ 線BGが少ないとによるクリーンな実験