

基本的対称性の実験

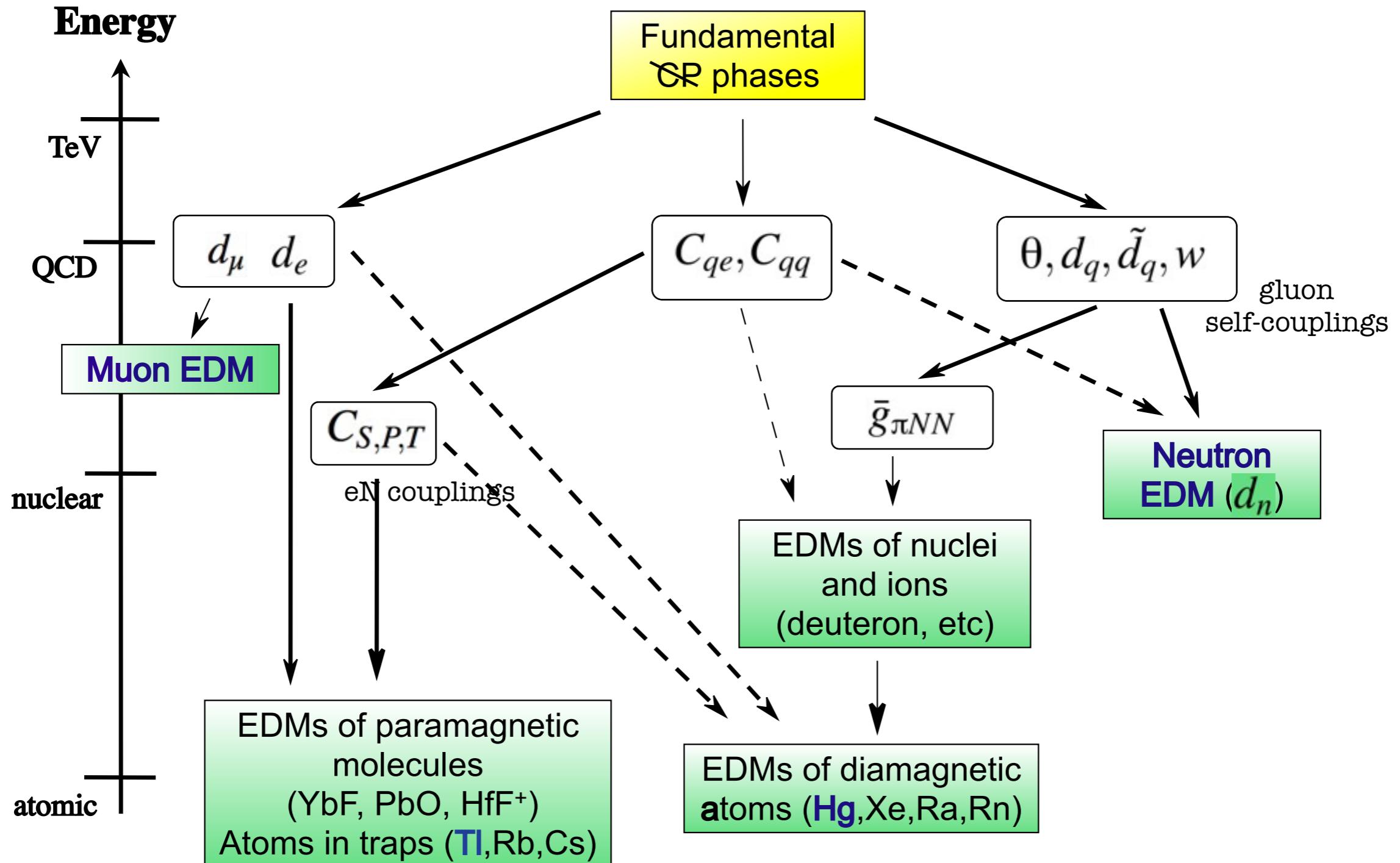
北口雅曉

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所
素粒子物性研究室（ Φ 研）

EDM

複合核反応を用いた時間反転対称性の破れ探索

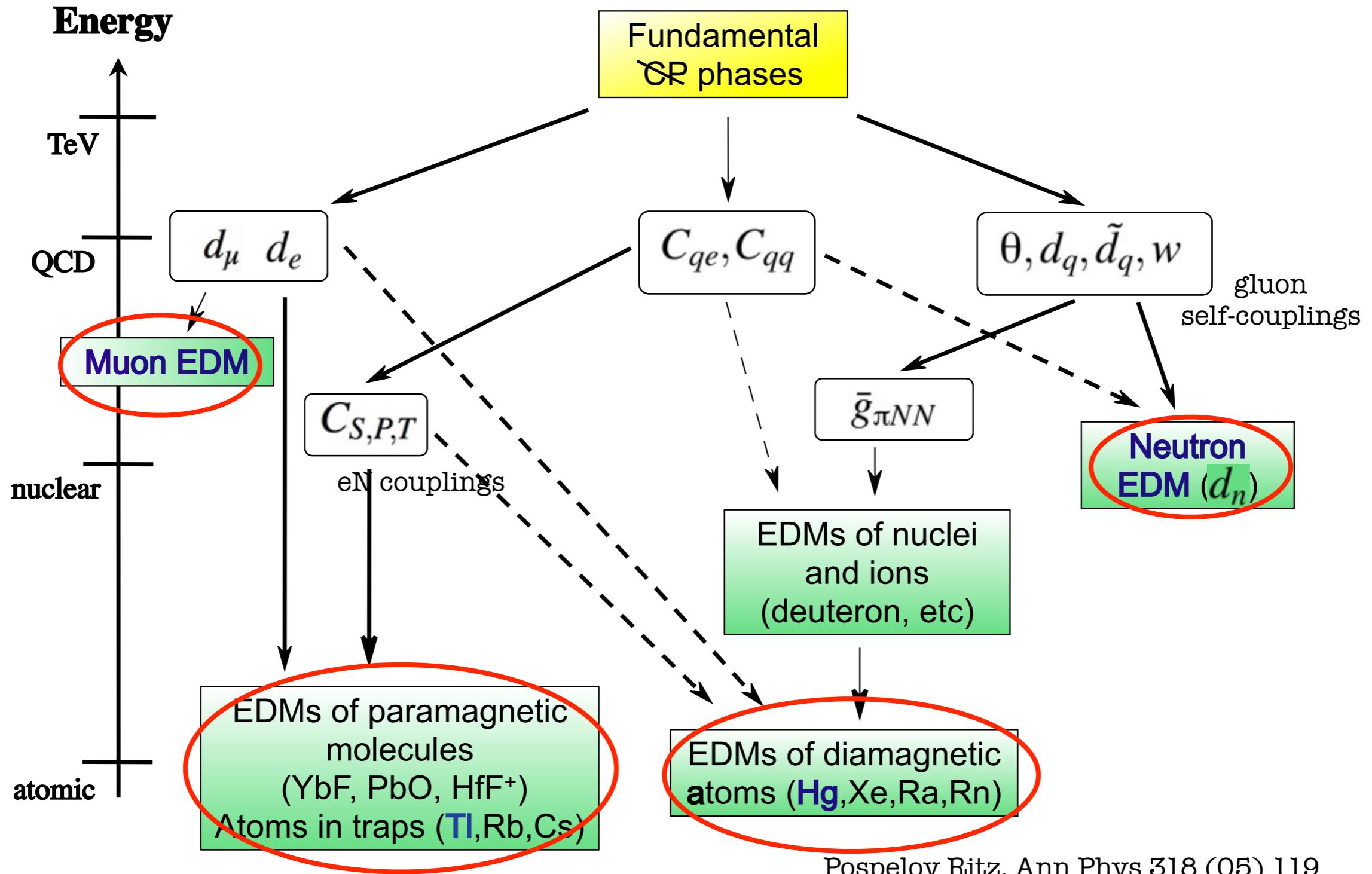
CP対称性の破れ



Pospelov Ritz, Ann Phys 318 (05) 119

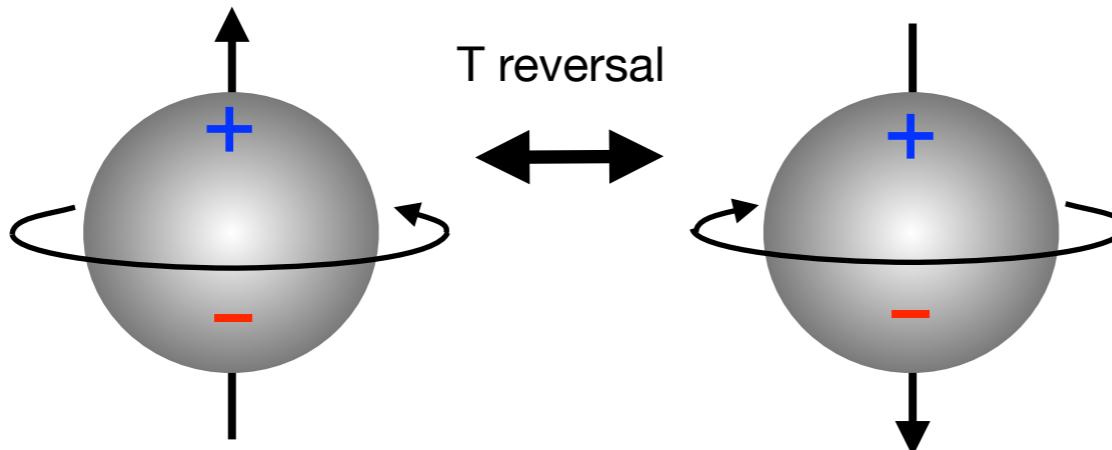
電気双極子能率 (EDM)

電気双極子能率 (EDM)

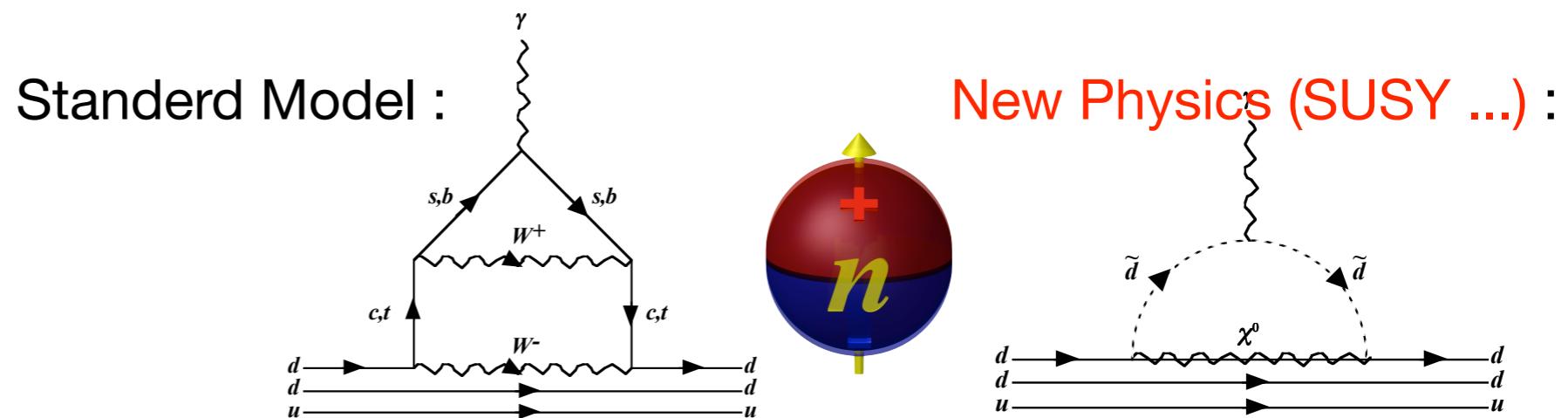


電気双極子能率 (EDM)

EDMの存在は時間反転対称性を破る

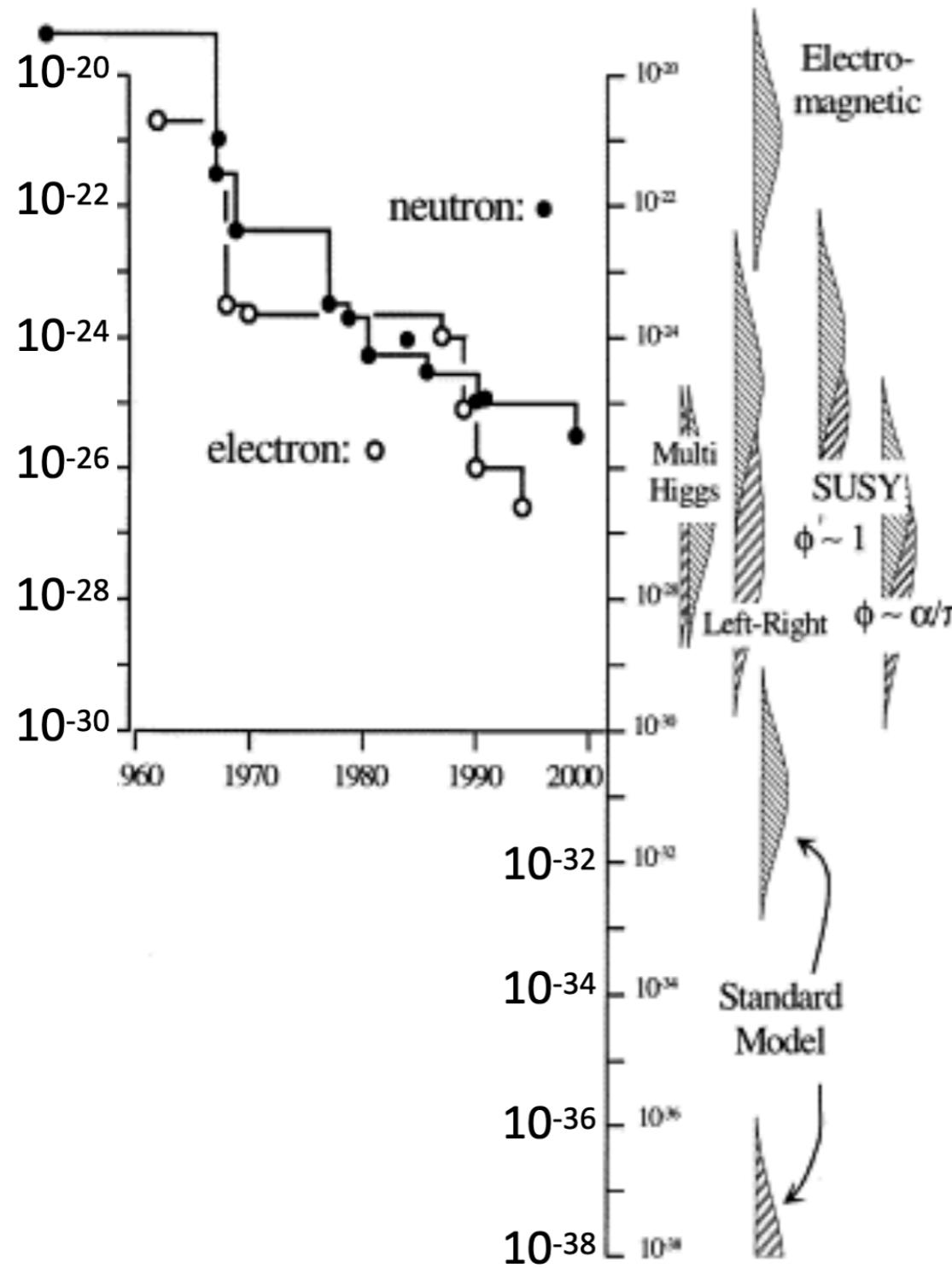


標準模型からの寄与が小さく抑えられている



EDMは新物理の良いプローブ

電気双極子能率 (EDM)



Pendlebury and Hinds, NIM A 440 (00) 471

上限値

neutron EDM

$$|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ ecm}$$

UCN
C. Abel et al.
Phys. Rev. Lett. 124, 081803 (2020)

electron EDM

$$|d_e| < 1.6 \times 10^{-27} \text{ ecm}$$

Cs
B.C. Regan et al.,
PRL 88, 071805 (2002)

$$|d_e| < 1.6 \times 10^{-27} \text{ ecm}$$

Tl
J. J. Hudson et al.,
Nature 473, 493 (2011)

$$|d_e| < 10.5 \times 10^{-28} \text{ ecm}$$

YbF
The ACME Collaboration et al.,
Science, 343, 269 (2014)

atomic EDM

$$|d_{Hg}| < 7.4 \times 10^{-30} \text{ ecm}$$

^{199}Hg
B. Garner et al.,
PRL 116 161601 (2016)

$$|d_{Xe}| < 1.5 \times 10^{-27} \text{ ecm}$$

^{129}Xe
F. Allmendinger et al.,
Phys. Rev. A 100, 022505 (2019)

muon EDM

$$|d_\mu| < 1.8 \times 10^{-19} \text{ ecm}$$

G. W. Bennett et al.,
Phys. Rev. D 80, 052008 (2009)

Standard model prediction

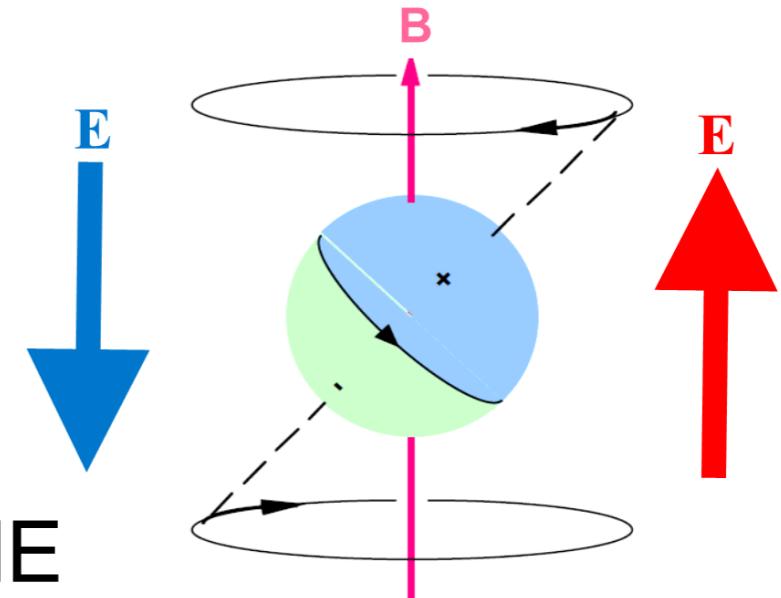
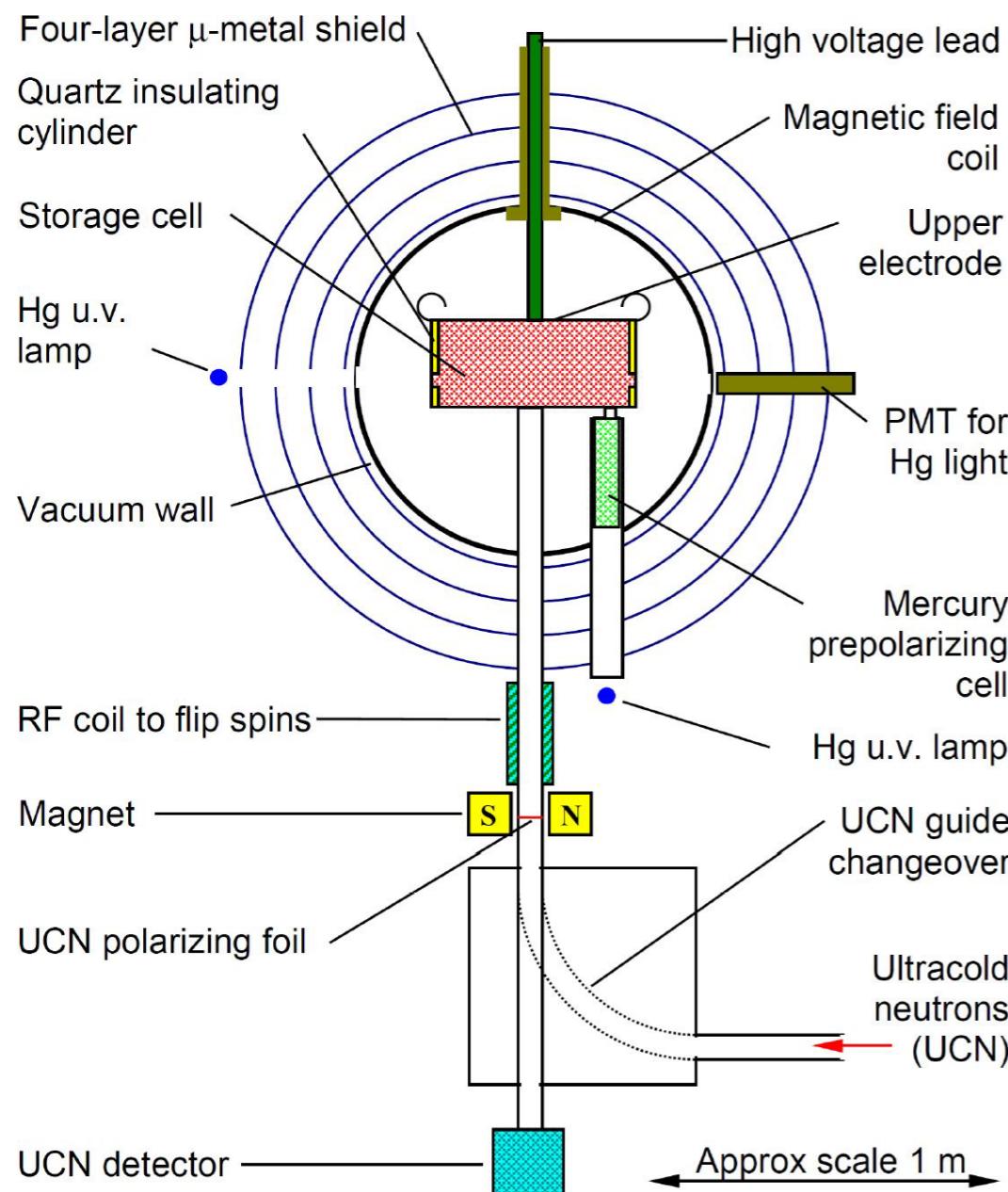
neutron : $10^{-30} - 10^{-32}$ ecm

electron : $10^{-37} - 10^{-40}$ ecm

EDM測定（中性子の例）

偏極超冷中性子
を蓄積

電磁場中での
スピン歳差回転
を測定



$$\hbar\omega_{\pm} = 2\mu B \pm 2dE$$

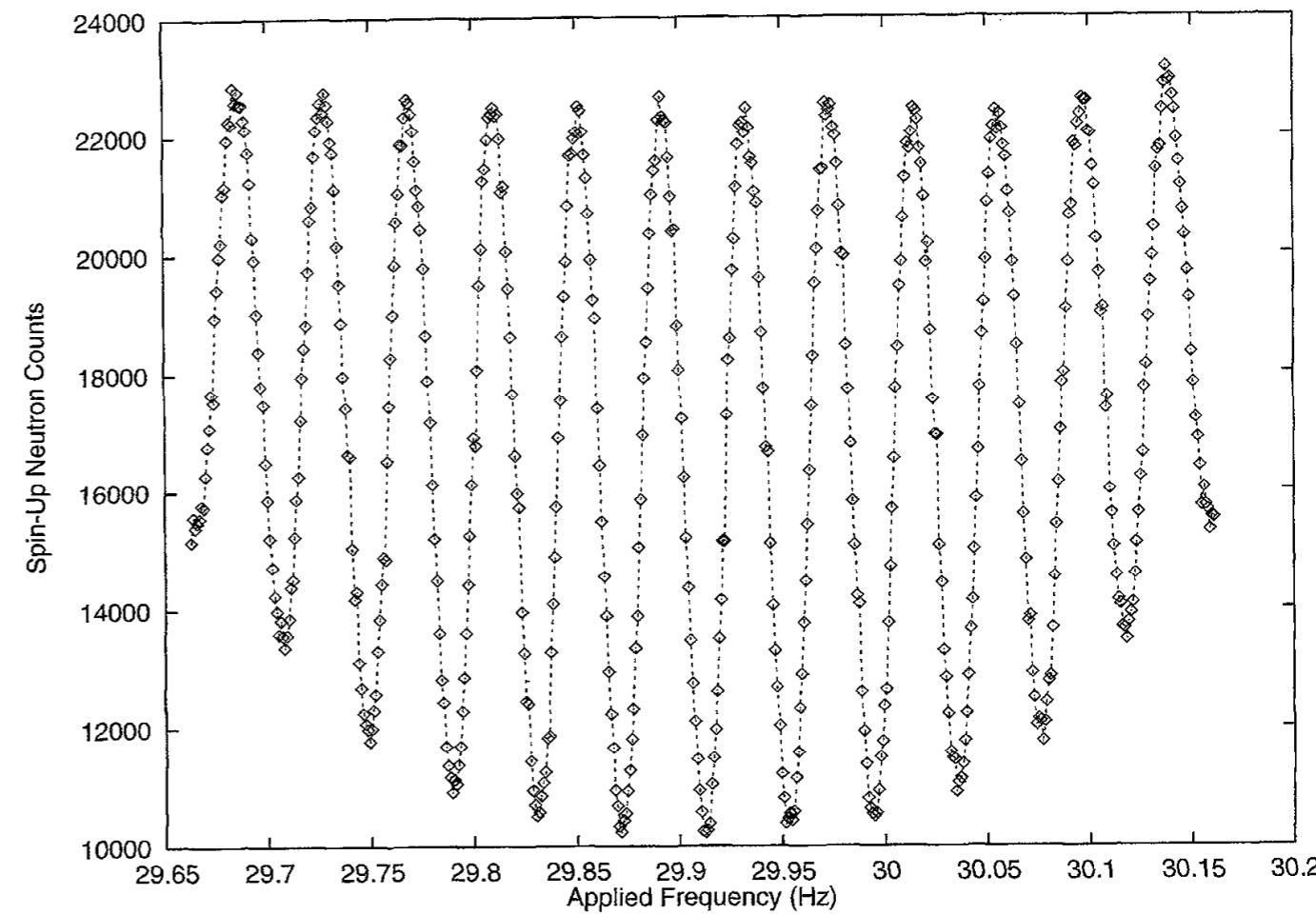
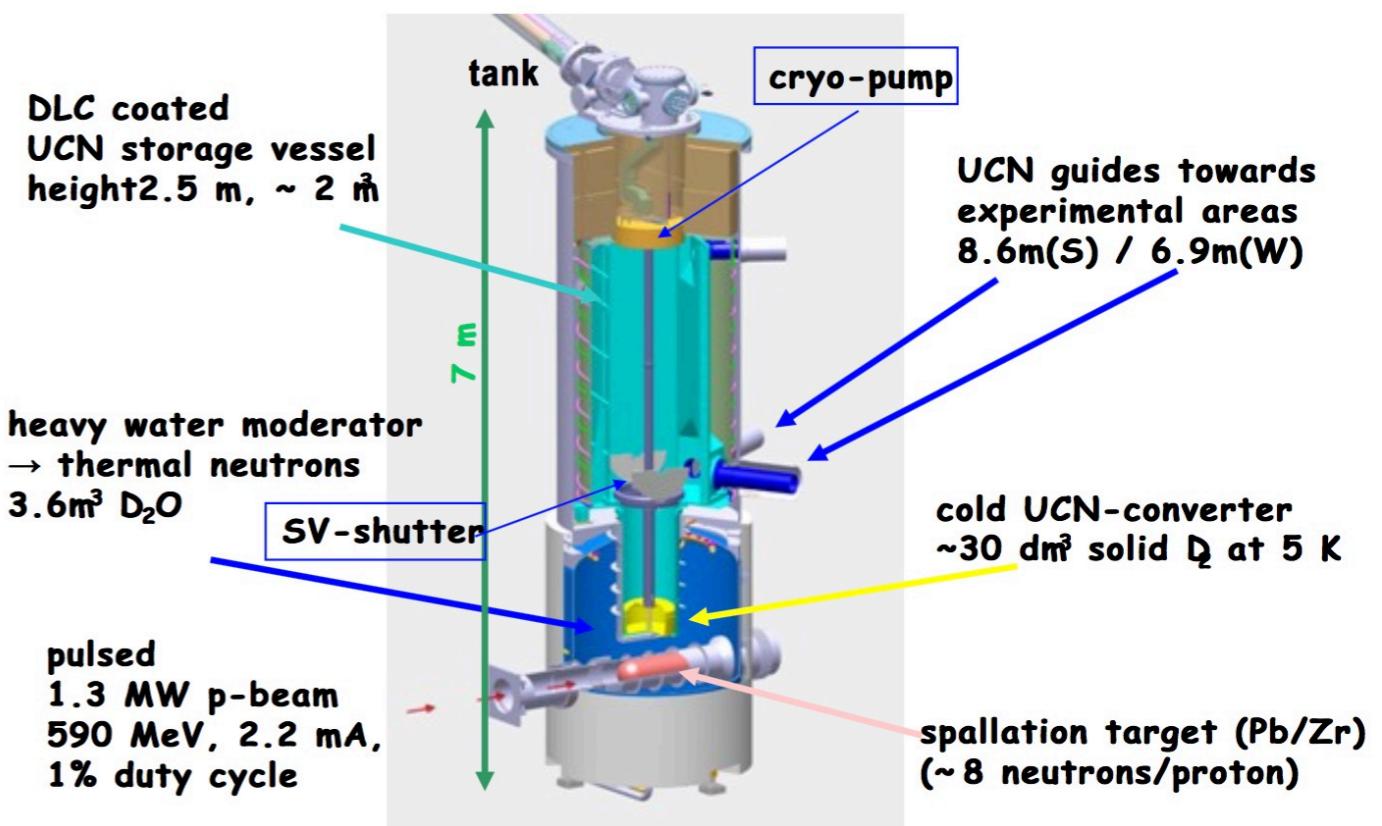
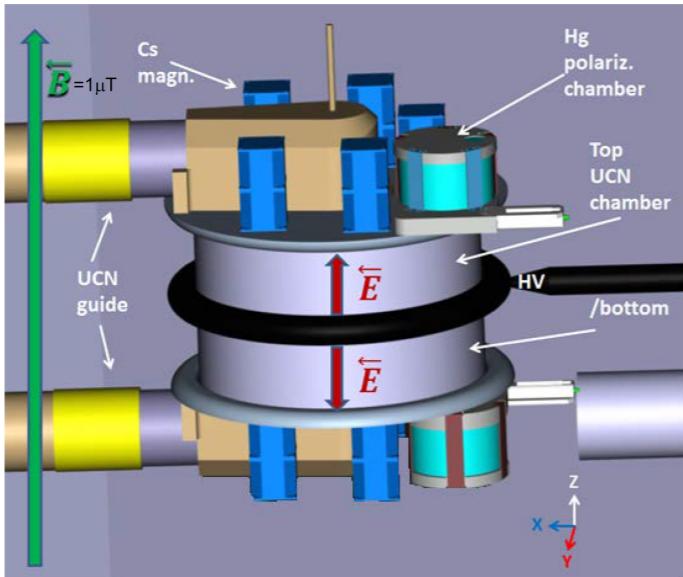


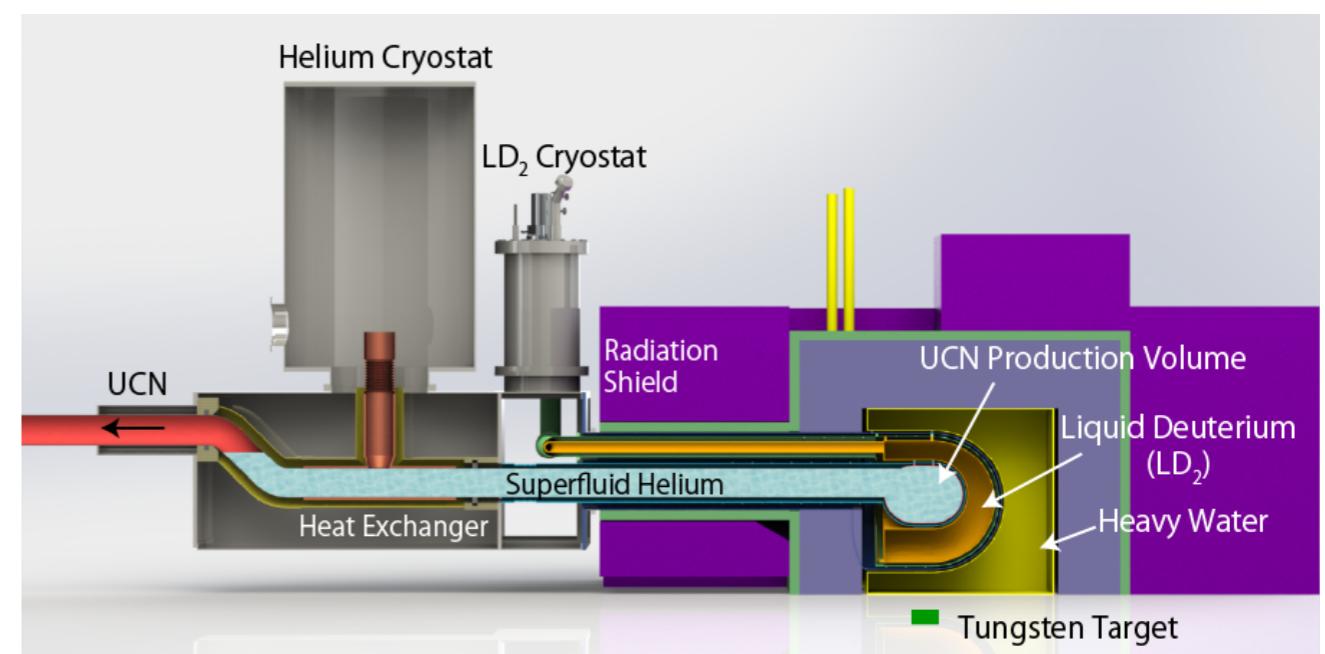
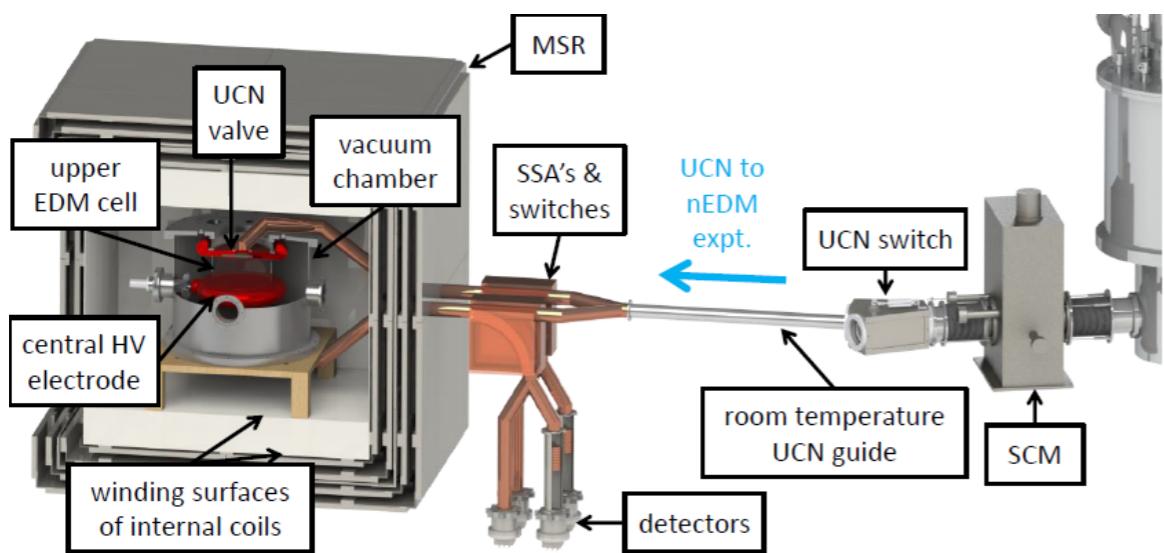
Fig. 1. Ramsey resonance curve. Error bars are omitted for clarity.

中性子EDM

n2EDM at PSI



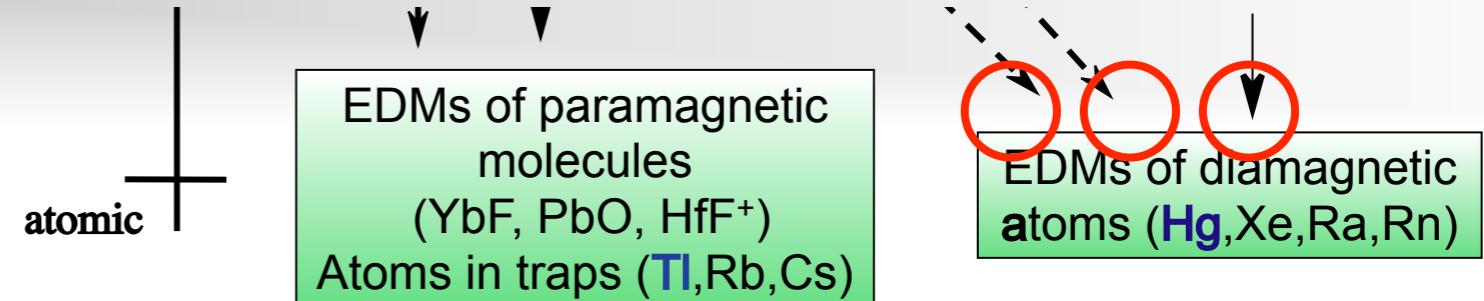
TUCAN at TRIUMF



原子EDM

反磁性原子のEDMは原子核のEDMに感度がある

有効相互作用の各結合に相補的に情報を与える



$$d_{\text{dia}} = \boxed{\alpha_{S\text{ch}} S_{S\text{ch}}} + \alpha_{d_p} d_p + \alpha_{d_n} d_n + \alpha_{C_T^{(0)}} C_T^{(0)} + \boxed{\alpha_{C_T^{(1)}} C_T^{(1)}}$$

$$d_{\text{Hg}} : \text{Vanishingly small contribution from } \bar{g}_{\pi NN}^{(1)}$$

Coefficient values, from the compilation of:
[J. Engel *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **71** (2013) 21]

$$d_{\text{Hg}} = -\left(0.38_{-0.19}^{+2.3} \times 10^{-17}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(0)} + \left(0_{-4.9}^{+1.6} \times 10^{-17}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(1)} - \left(2.0_{-0.0}^{+3.9} \times 10^{-20}\right) \cdot C_T$$

$$d_{\text{Xe}} = -\left(0.29_{-0.11}^{+2.3} \times 10^{-18}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(0)} - \left(0.22_{-0.11}^{+1.7} \times 10^{-18}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(1)} + \left(4_{-0}^{+2} \times 10^{-21}\right) \cdot C_T$$

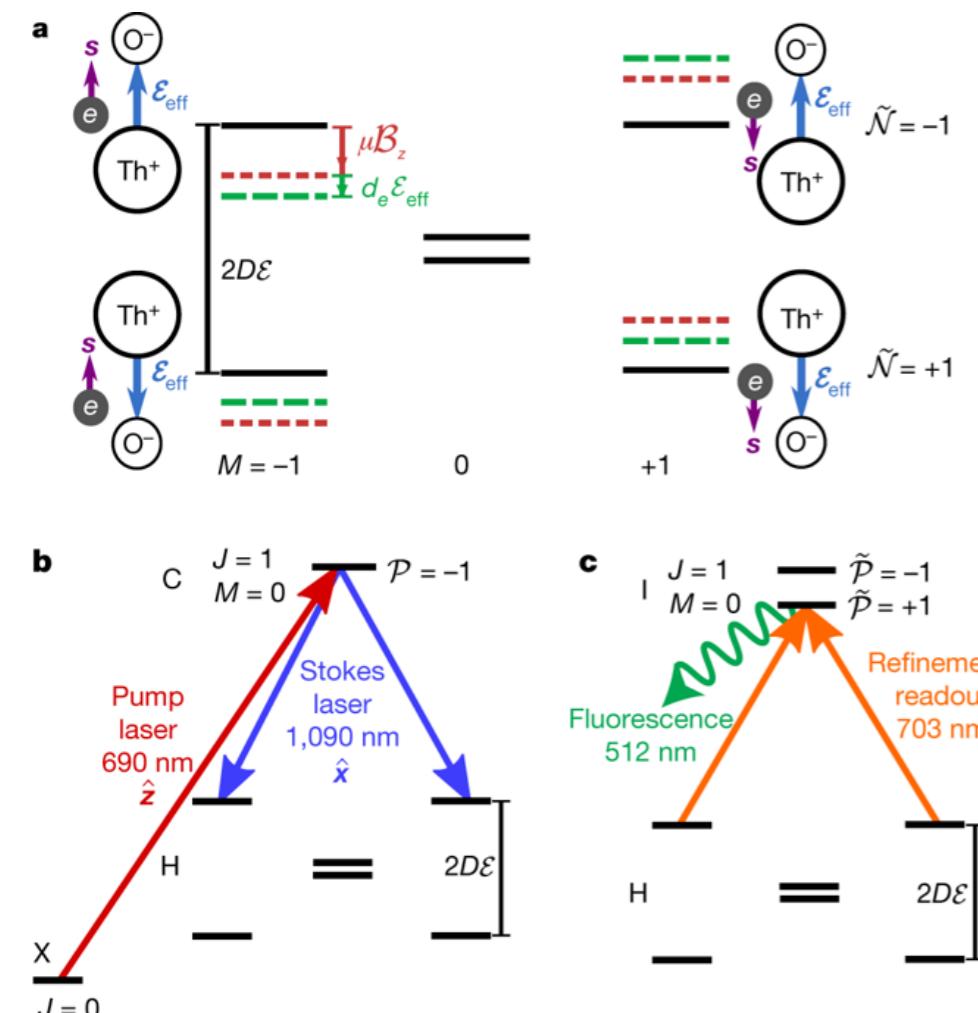
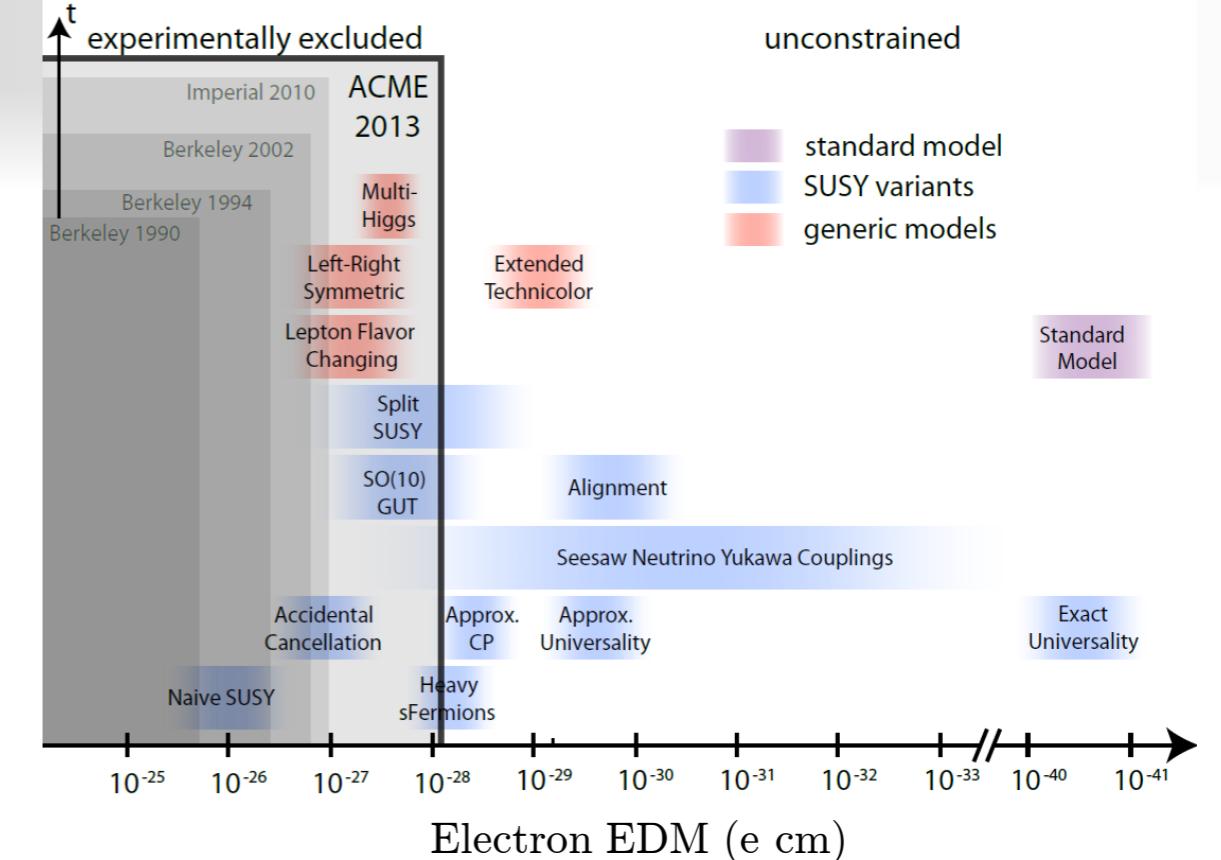
$$d_n = -\left(1.5 \times 10^{-14}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(0)} + \left(1.4 \times 10^{-16}\right) \cdot \bar{g}_{\pi NN}^{(1)}$$

d_n : No contribution from C_T

電子EDM

極性分子の内部の大きな有効電場を用いることで、感度が大幅に向上

ThO : $E \sim 78 \text{ GV/cm}$

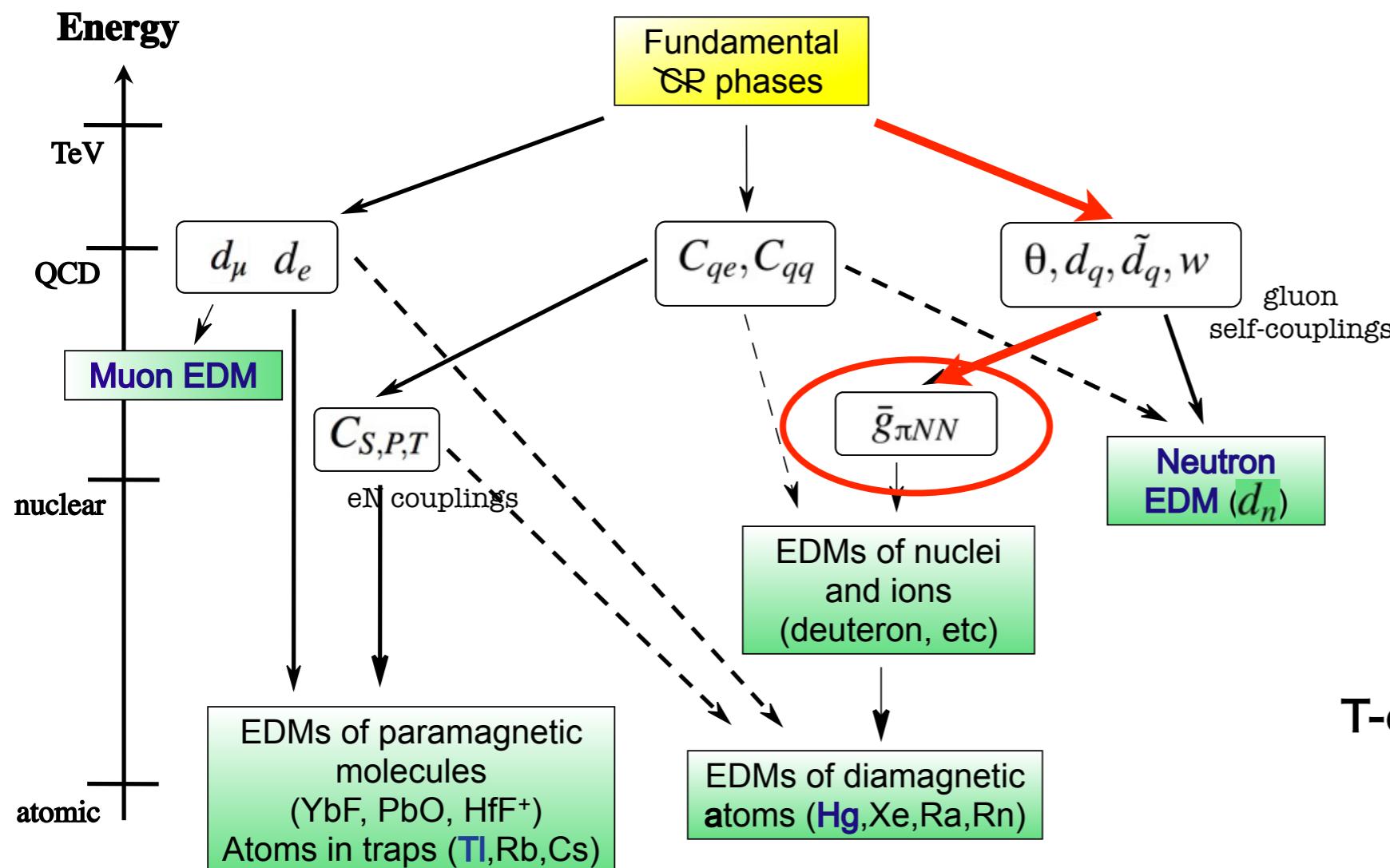


ACME Collaboration, Nature volume 562, pages355–360(2018)

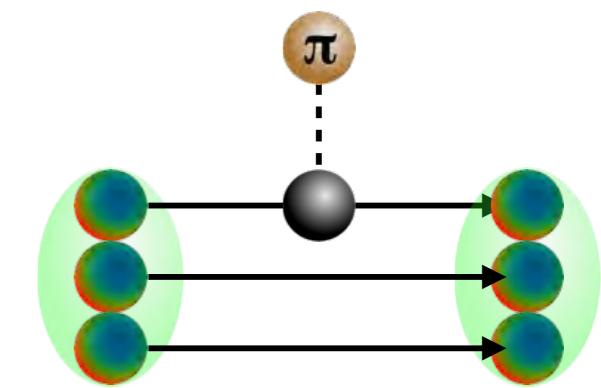


複合核反応を用いた時間反転対称性の破れの探索

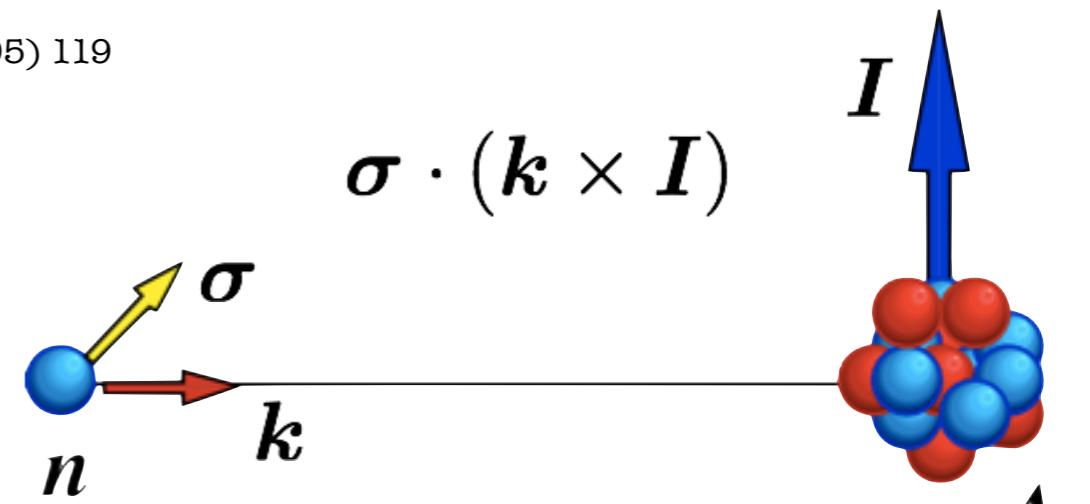
複合核反応を用いた時間反転対称性の破れの探索



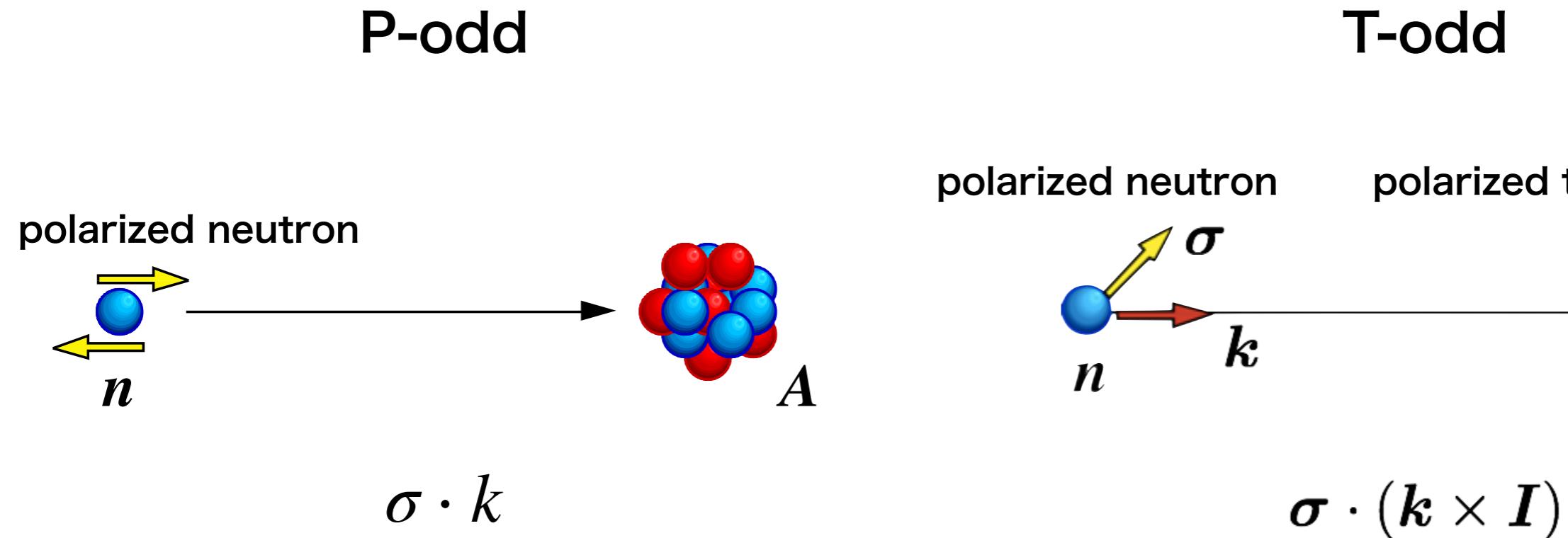
Pospelov Ritz, Ann Phys 318 (05) 119



T-odd P-odd pion-nucleon coupling



P-odd と T-odd



複合核反応における空間反転対称性の破れ

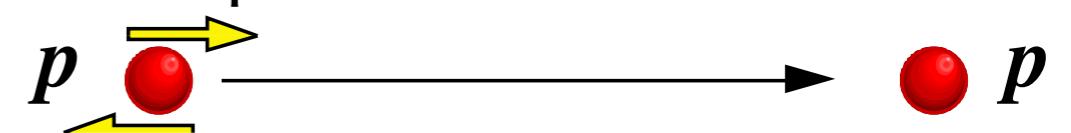
neutron capture

polarized neutron



p-p scattering

polarized proton



^{139}La $E_n = 0.734 \text{ eV}$ 0.097 ± 0.003

^{81}Br $E_n = 0.734 \text{ eV}$ 0.021 ± 0.001

^{111}Cd $E_n = 4.53 \text{ eV}$ $-(0.013^{+0.007}_{-0.004})$

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

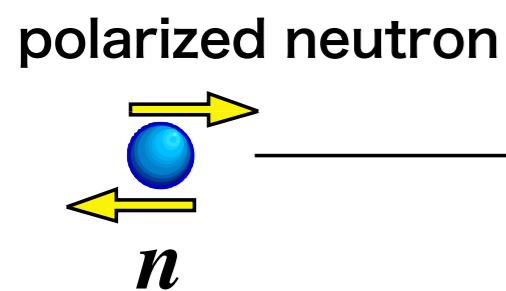
45MeV $-(2.3 \pm 0.8) \times 10^{-7}$

800MeV $-(2.4 \pm 1.1 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

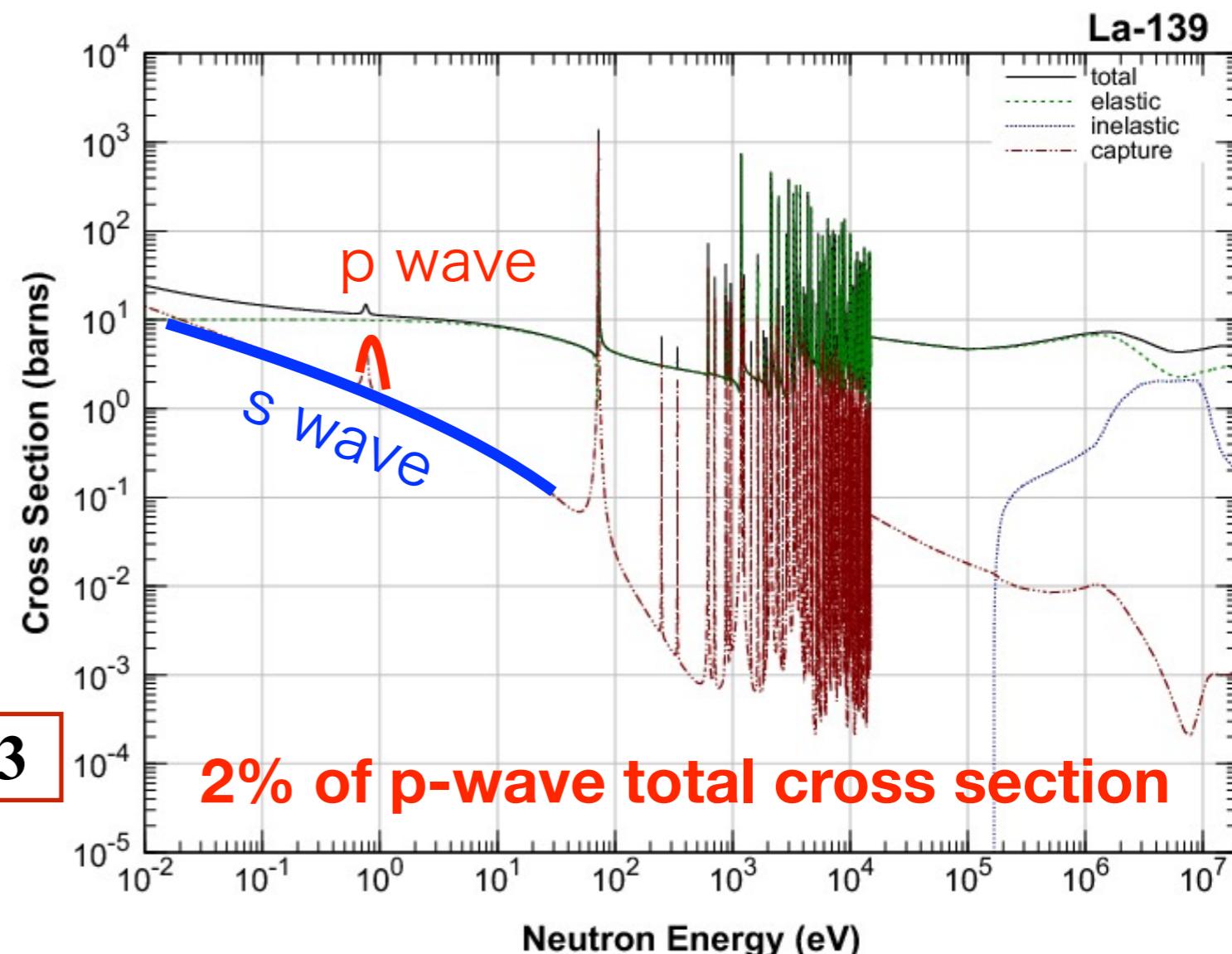
p波共鳴ピークの付近で

複合核反応における空間反転対称性の破れ

p波共鳴ピークの付近での
中性子共鳴吸収

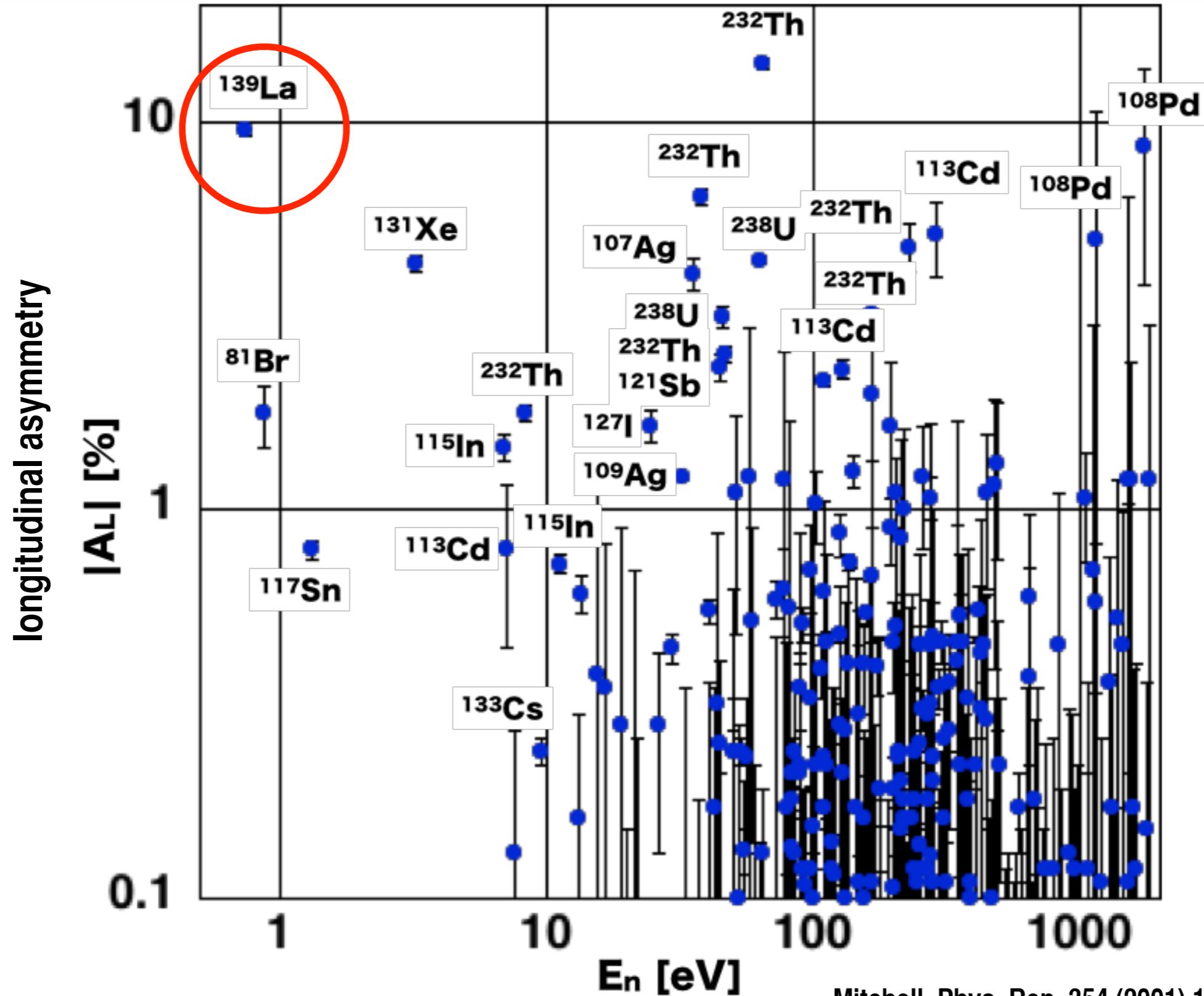


^{139}La $E_n = 0.734 \text{ eV}$ 0.097 ± 0.003



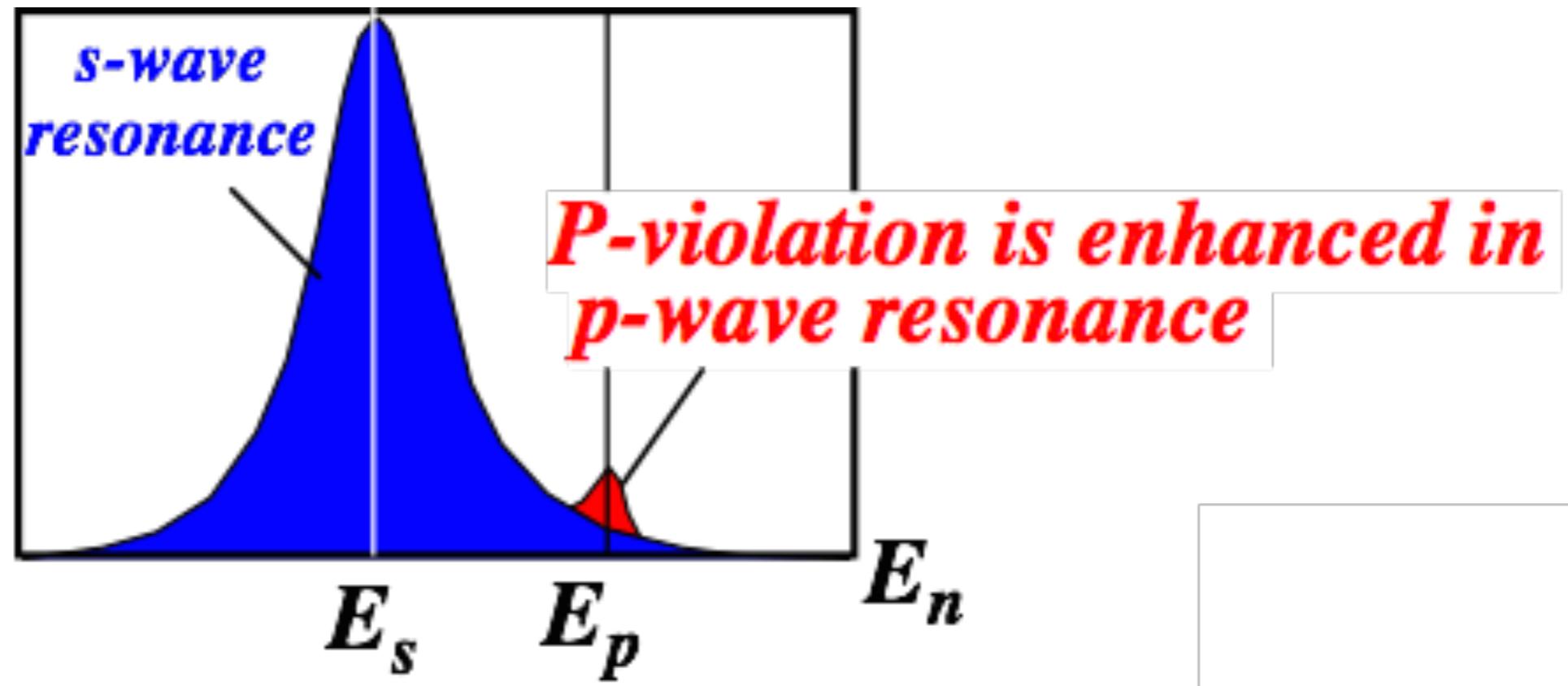
複合核状態のs波とp波の間の干渉によって
空間反転対称性の破れが増幅する

複合核反応における空間反転対称性の破れ



Mitchell, Phys. Rep. 354 (2001) 157

複合核反応における空間反転対称性の破れ

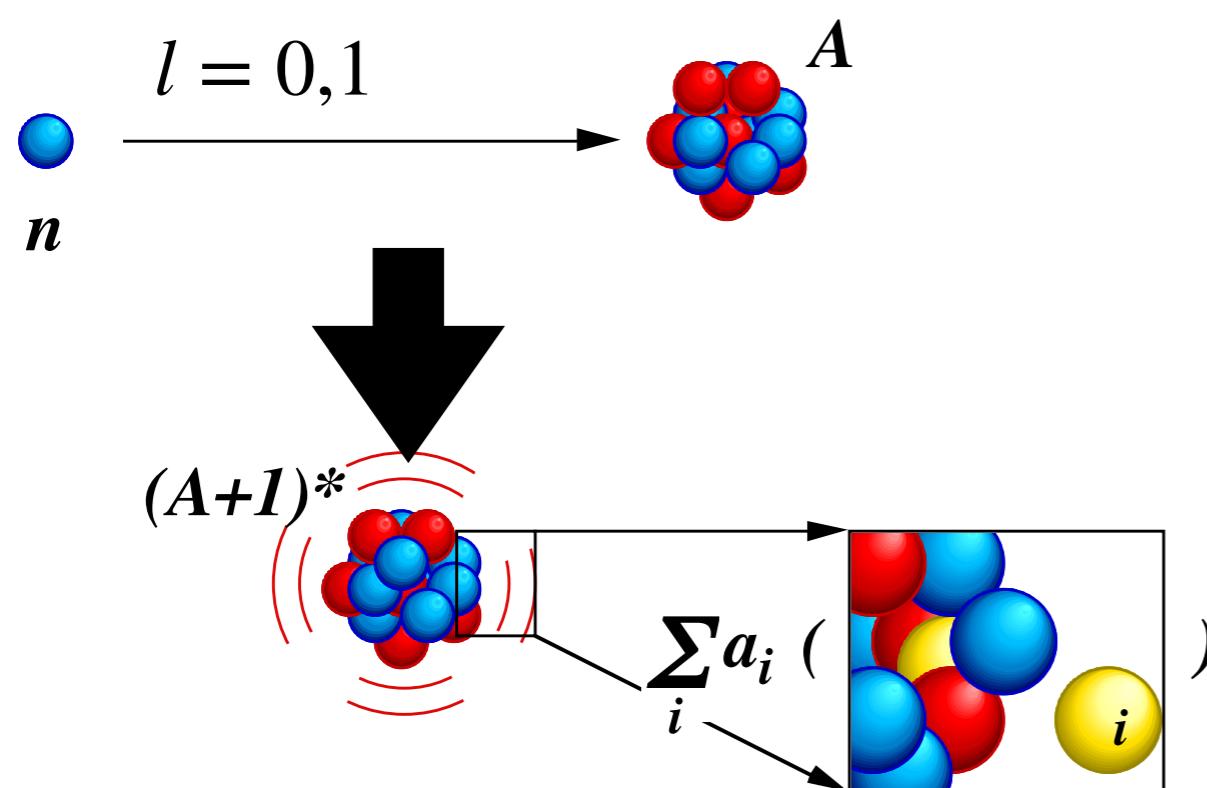


$$f = f_{\text{PC}} + f_{\text{PNC}}$$

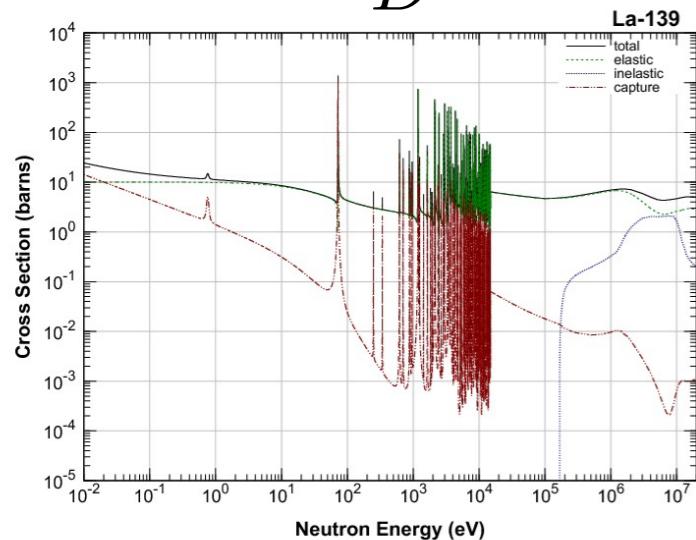
$$\Rightarrow |f|^2 = |f_{\text{PC}}|^2 + 2\text{Re } f_{\text{PC}} f_{\text{PNC}} + |f_{\text{PNC}}|^2$$

$$\alpha = \frac{2\text{Re } f_{\text{PC}} f_{\text{PNC}}}{|f_{\text{PC}}|^2} \sim 2 \frac{|f_{\text{PNC}}|}{|f_{\text{PC}}|}$$

複合核反応における空間反転対称性の破れ



$$N \sim \frac{\Delta E}{D} \sim 10^5$$

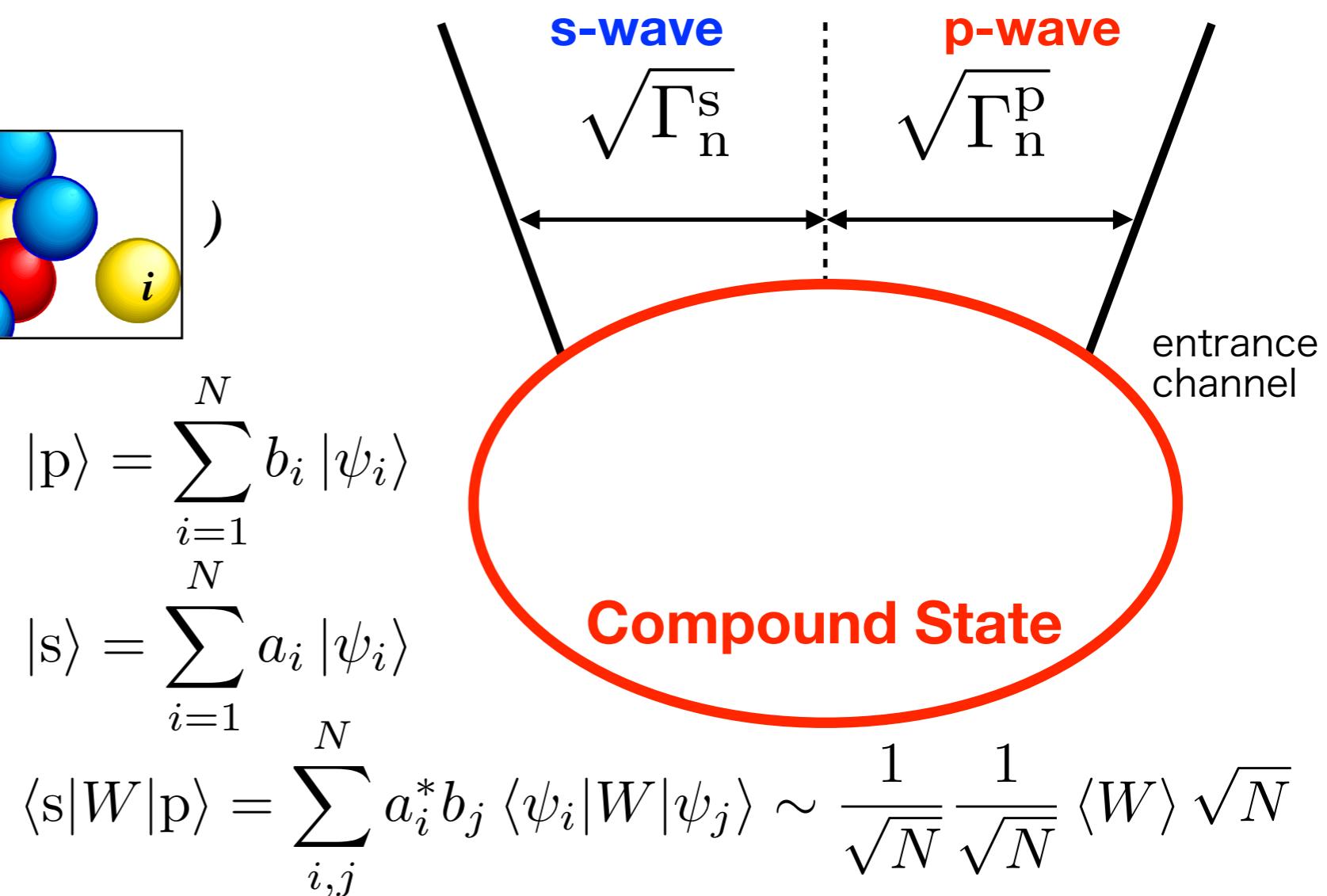


$$J = I + j$$

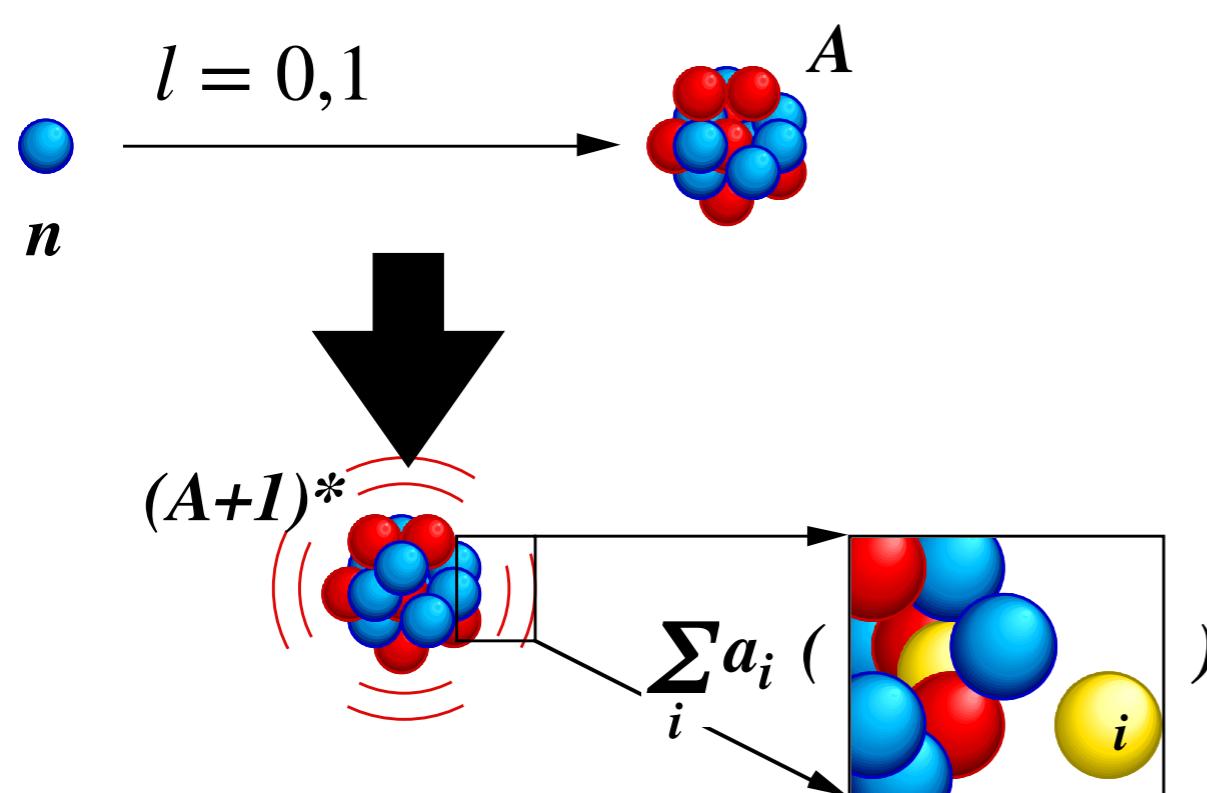
target spin

$j = l + s$

neutron total angular momentum



複合核反応における空間反転対称性の破れ



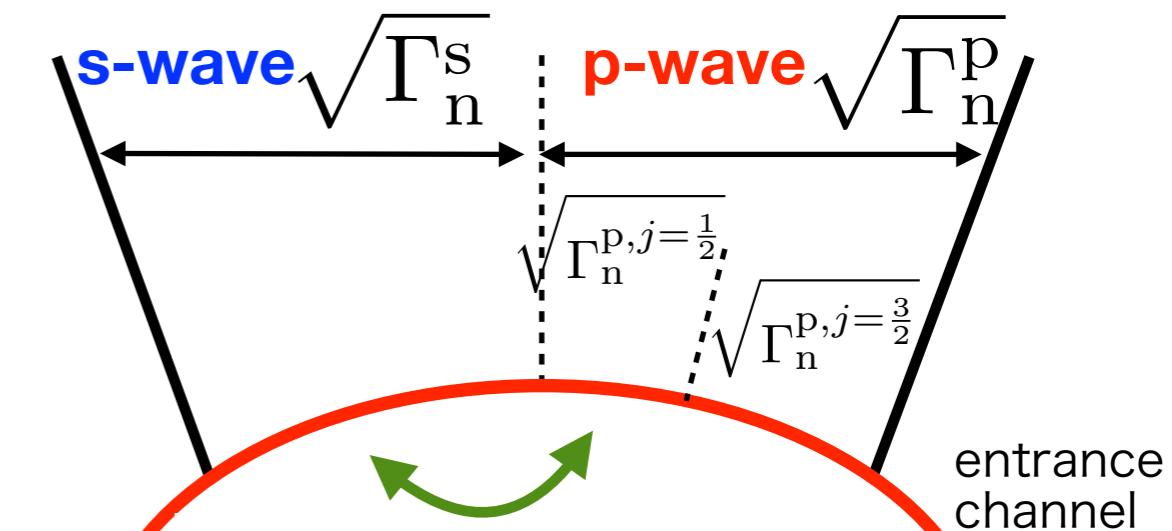
$$A_L = -\frac{2W}{E_p - E_s} \sqrt{\frac{\Gamma_n^s}{\Gamma_n^p}} \sqrt{\frac{\Gamma_n^{p,j=\frac{1}{2}}}{\Gamma_n^p}} = x$$

$$\left(x = \sqrt{\frac{\Gamma_n^{p,j=\frac{1}{2}}}{\Gamma_n^p}} \quad y = \sqrt{\frac{\Gamma_n^{p,j=\frac{3}{2}}}{\Gamma_n^p}} \quad x^2 + y^2 = 1 \quad \begin{array}{l} x = \cos \phi \\ y = \sin \phi \end{array} \quad \text{未知パラメータは 1 つ} \right)$$

$J = I + j$ $j = l + s$

target spin

neutron total angular momentum



**interference
P-violation
Compound State**

時間反転対称性の破れへの適用

入り口チャンネルのチャンネルスピンで書き下せて、その干渉として捉えることができる

Gudkov, Phys. Rep. 212 (1992) 77.

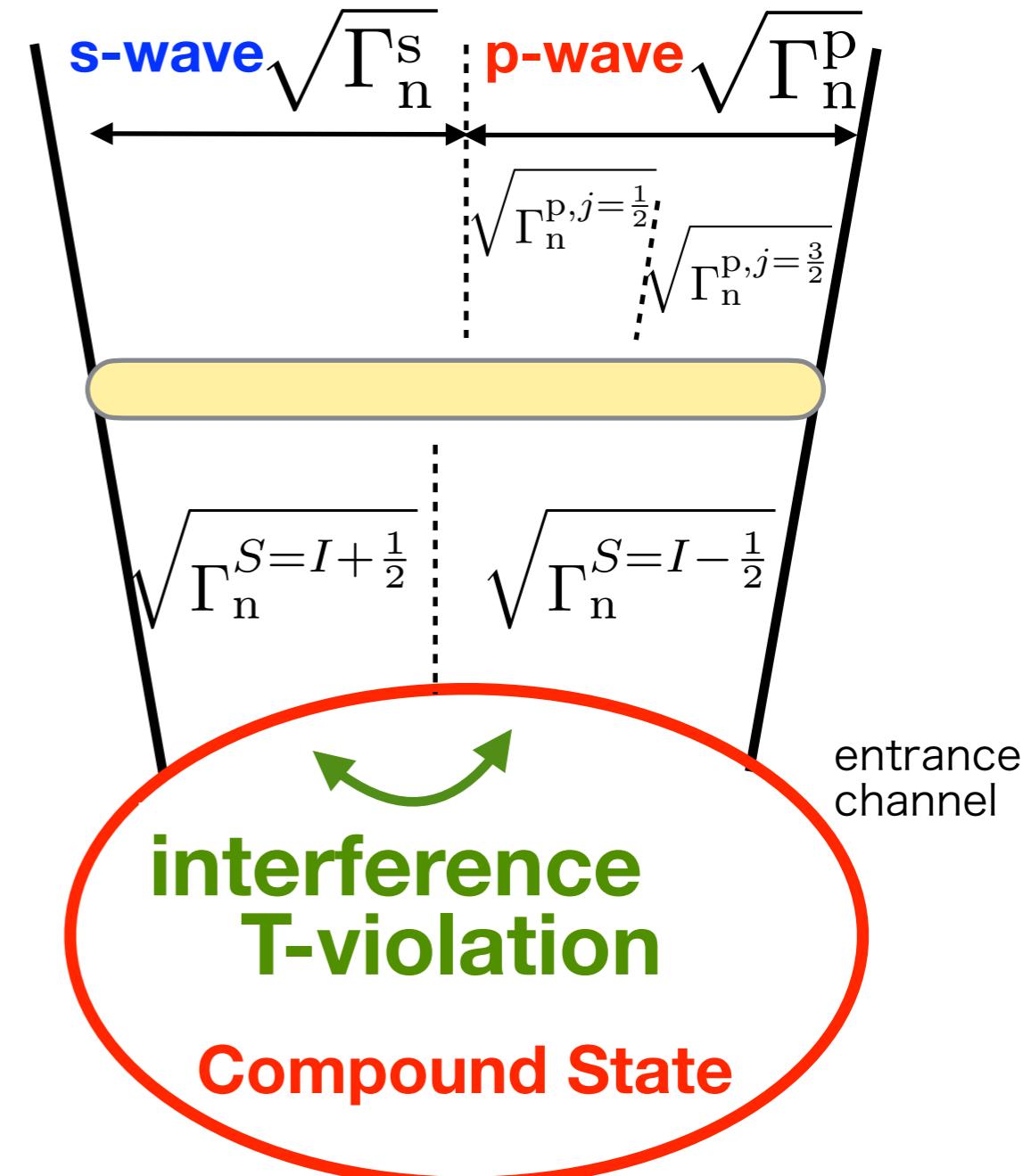
$$J = l + s + I$$

$$j = l + s$$

$$S = s + I$$

$$P : |lsI\rangle \rightarrow (-1)^l |lsI\rangle$$

$$T : |lsI\rangle \rightarrow (-1)^{i\pi S_y} K |lsI\rangle$$



時間反転対称性の破れへの適用

入り口チャンネルのチャンネルスピンで書き下せて、その干渉として捉えることができる

Gudkov, Phys. Rep. 212 (1992) 77.

$$P : |lsI\rangle \rightarrow (-1)^l |lsI\rangle$$

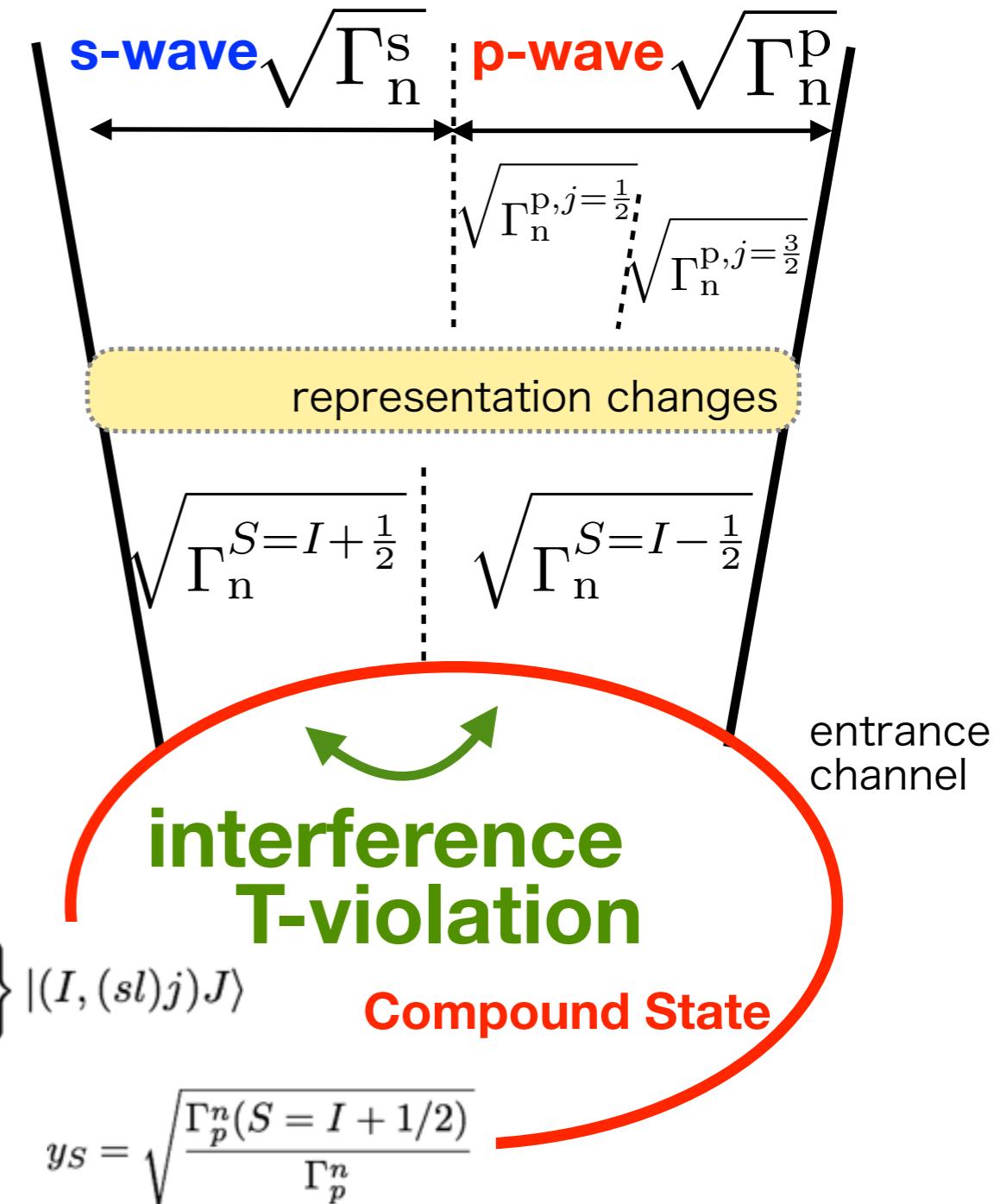
$$T : |lsI\rangle \rightarrow (-1)^{i\pi S_y} K |lsI\rangle$$

$$|(Is)S, l)J\rangle = \sum_j \langle (I, (sl)j)J | ((Is)S, l)J \rangle |(I, (sl)j)J\rangle$$

$$= \sum_j (-1)^{l+s+I+J} \sqrt{(2j+1)(2S+1)} \left\{ \begin{array}{ccc} I & s & l \\ J & S & j \end{array} \right\} |(I, (sl)j)J\rangle$$

$$x = \sqrt{\frac{\Gamma_p^n(j=1/2)}{\Gamma_p^n}} \quad y = \sqrt{\frac{\Gamma_p^n(j=3/2)}{\Gamma_p^n}} \quad x_S = \sqrt{\frac{\Gamma_p^n(S=I-1/2)}{\Gamma_p^n}} \quad y_S = \sqrt{\frac{\Gamma_p^n(S=I+1/2)}{\Gamma_p^n}}$$

$$z_j = \begin{cases} x & (j=1/2) \\ y & (j=3/2) \end{cases}, \quad \tilde{z}_S = \begin{cases} x_S & (S=I-1/2) \\ y_S & (S=I+1/2) \end{cases} \quad \tilde{z}_S = \sum_j (-1)^{l+I+j+S} \sqrt{(2j+1)(2S+1)} \left\{ \begin{array}{ccc} l & s & j \\ I & J & S \end{array} \right\} z_j$$



入り口チャンネルのチャンネルスピンで書き下せて、その干渉として捉えると、時間反転対称性の破れも増幅する。

Gudkov, Phys. Rep. 212 (1992) 77.

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

T-violating matrix element
P-violation
P-violating matrix element

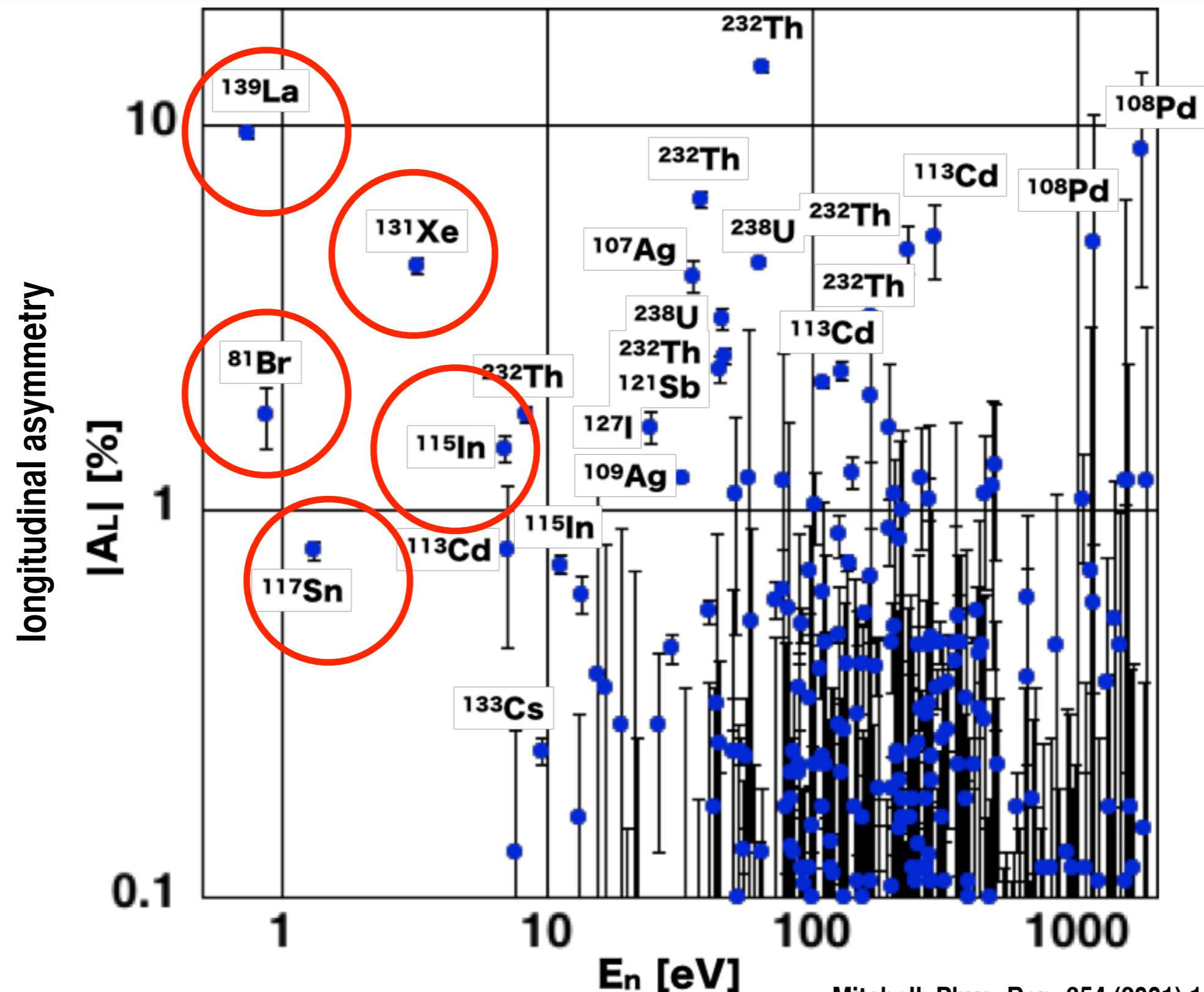
角運動量の変換係数

$$\kappa(J) = \begin{cases} (-1)^{2I} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2I-1}{I+1}} \frac{y}{x}\right) & (J = I - \frac{1}{2}) \\ (-1)^{2I+1} \frac{I}{I+1} \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2I+3}{I}} \frac{y}{x}\right) & (J = I + \frac{1}{2}) \end{cases}$$

$$x = \sqrt{\frac{\Gamma_n^{p,j=\frac{1}{2}}}{\Gamma_n^p}} \quad y = \sqrt{\frac{\Gamma_n^{p,j=\frac{3}{2}}}{\Gamma_n^p}} \quad x^2 + y^2 = 1 \quad x = \cos \phi \quad y = \sin \phi$$

未知パラメータは1つ

偏極標的原子核の候補

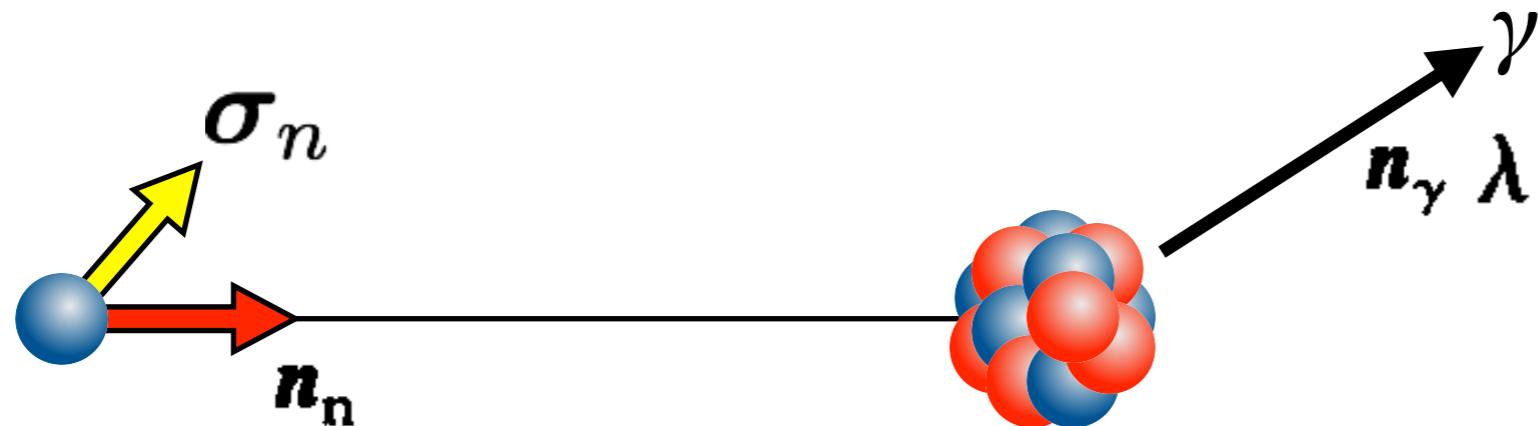


Mitchell, Phys. Rep. 354 (2001) 157

偏極標的原子核の候補

	^{139}La	^{81}Br	^{117}Sn	^{131}Xe	^{115}In
large $\Delta\sigma_P$					
low E_p [eV]					
small nonzero I	$7/2$	$3/2$	$1/2$	$3/2$	$9/2$
isotopic abn					
large $ \kappa(J) $?	?	?	?
method of pol.	DNP	—	—	OP	—

(n, γ) 反応断面積



$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma(n_\gamma, \lambda)}{d\Omega} = & \frac{1}{2} \{ a_0 + a_1 (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) + \tilde{a}_2 \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] + a_3 [(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma)^2 - \frac{1}{3}] \\
 & + \tilde{a}_4 (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] + a_5 \lambda (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma) + a_6 \lambda (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n) + a_7 \lambda \\
 & \times [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)(\mathbf{n}_\gamma \cdot \mathbf{n}_n) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)] + a_8 \lambda [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)] \\
 & + a_9 (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma) + a_{10} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n) + a_{11} [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)(\mathbf{n}_\gamma \cdot \mathbf{n}_n) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)] \\
 & + a_{12} [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)] + a_{13} \lambda + a_{14} \lambda (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \\
 & + \tilde{a}_{15} \lambda \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] + a_{16} \lambda [(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma)^2 - \frac{1}{3}] \\
 & + \tilde{a}_{17} \lambda (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] \} . \quad \text{Flambaum, Nucl. Phys. A435 (1985) 352}
 \end{aligned}$$

非偏極中性子 + 非偏極原子核の場合

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(a_0 + \boxed{a_1} \mathbf{k}_n \cdot \mathbf{k}_\gamma + \boxed{a_3} \left((\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{k}_\gamma)^2 - \frac{1}{3} \right) \right)$$

$$a_0 = \sum_{J_s} |V_1(J_s)|^2 + \sum_{J_s, j} |V_2(J_p j)|^2$$

Flambaum, Nucl. Phys. A435 (1985) 352

$$\boxed{a_1} = 2\text{Re} \sum_{J_s, J_p, j} V_1(J_s) V_2^*(J_p j) P(J_s J_p \frac{1}{2} j 1 IF)$$

$$\boxed{a_3} = \text{Re} \sum_{J_s, j, J'_p, j'} V_2(J_p j) V_2^*(J'_p j') P(J_p J'_p j j' 2 IF) 3\sqrt{10} \begin{Bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 2 & j & j' \end{Bmatrix}$$

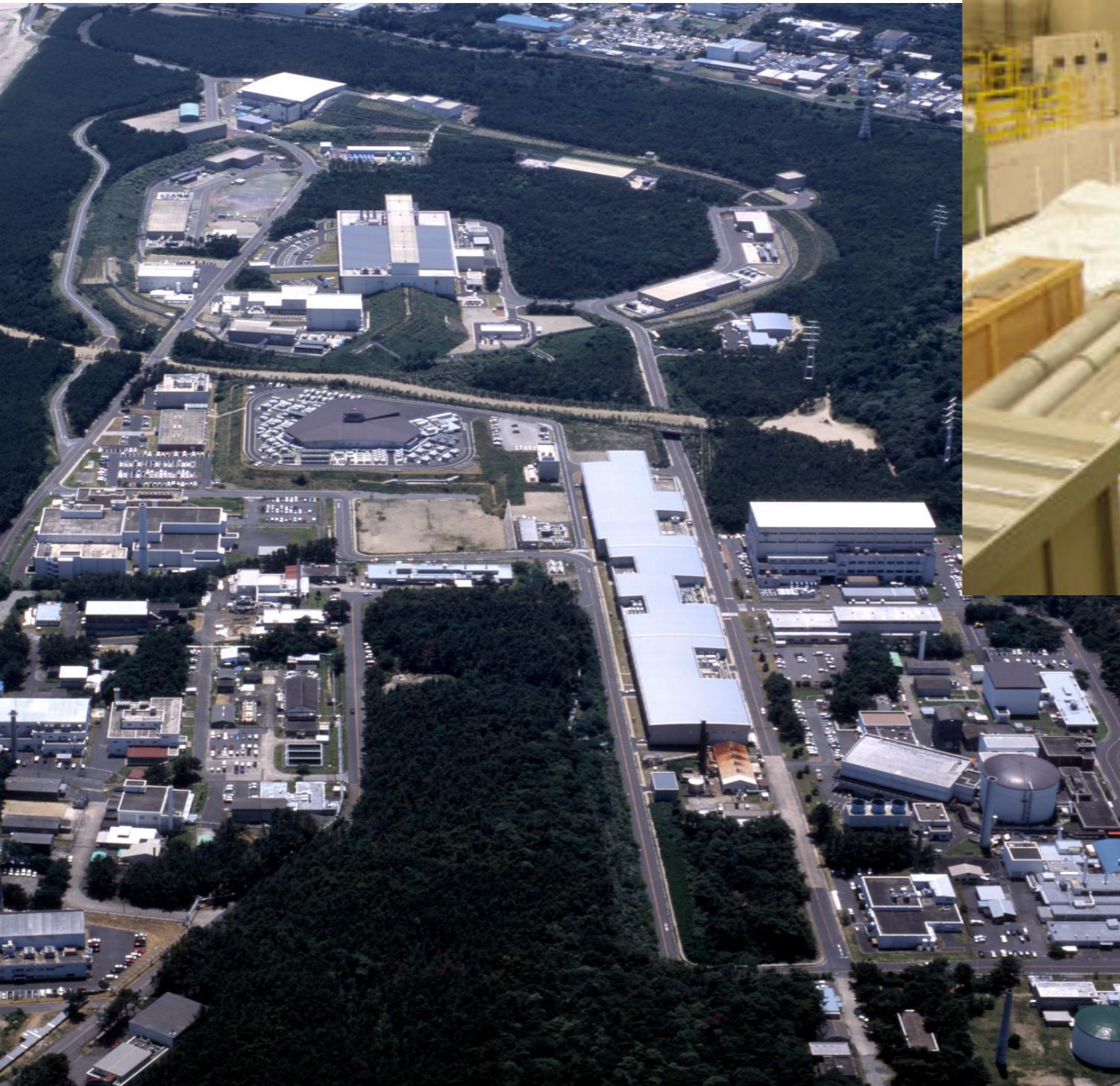
$$V_1 = \frac{1}{2k_s} \sqrt{\frac{E_s}{E}} \frac{\sqrt{g\Gamma_s^n \Gamma_\gamma}}{E - E_s + i\Gamma_s/2}$$

$$V_2(j=1/2) = x V_2 = V_2 \cos \boxed{\phi}$$

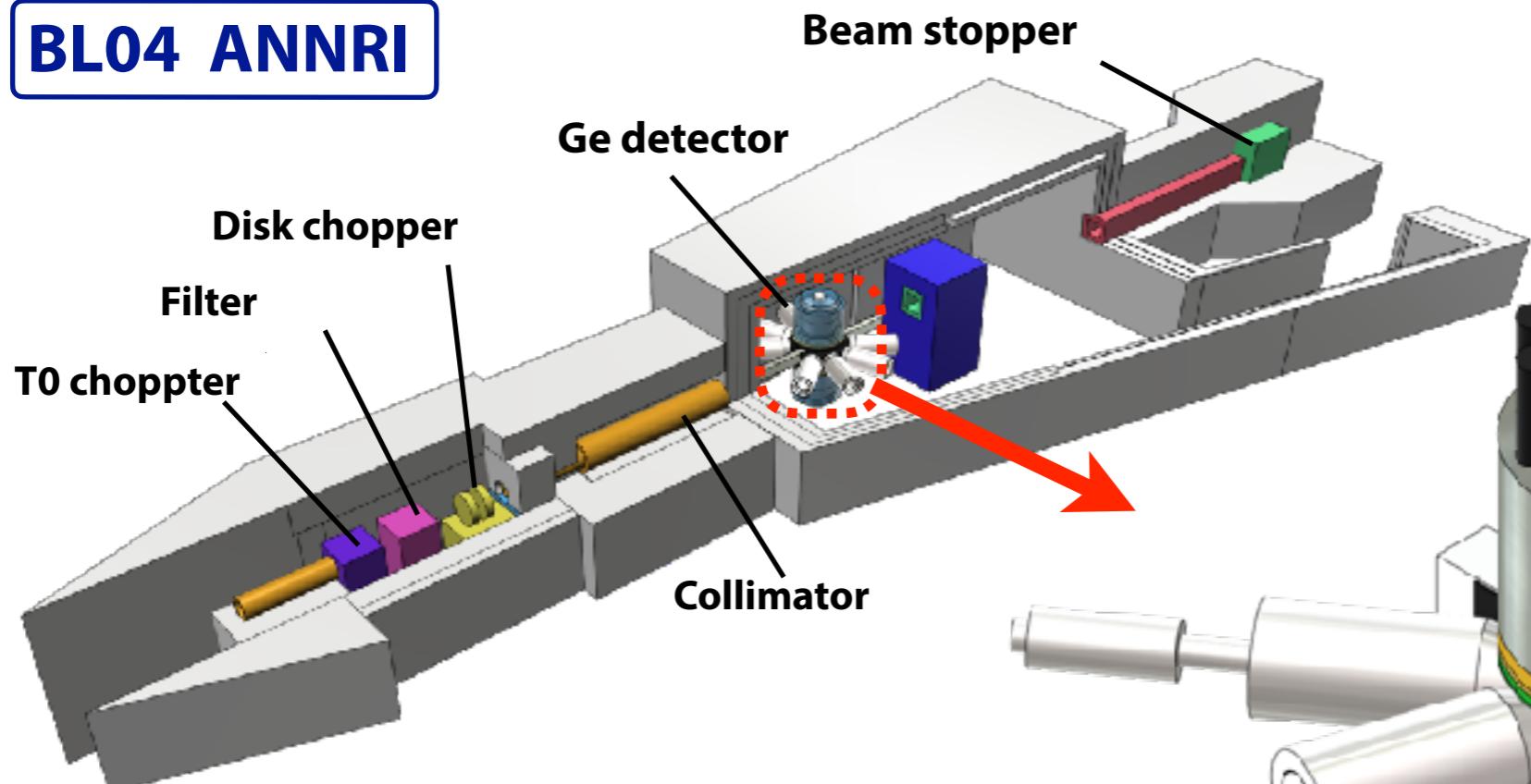
$$V_2(j) = \frac{1}{2k_p} \sqrt{\frac{E_p}{E}} \sqrt{\frac{\Gamma_{pj}^n}{\Gamma_p^n}} \frac{\sqrt{g\Gamma_p^n \Gamma_\gamma}}{E - E_p + i\Gamma_p/2}$$

$$V_2(j=3/2) = y V_2 = V_2 \sin \boxed{\phi}$$

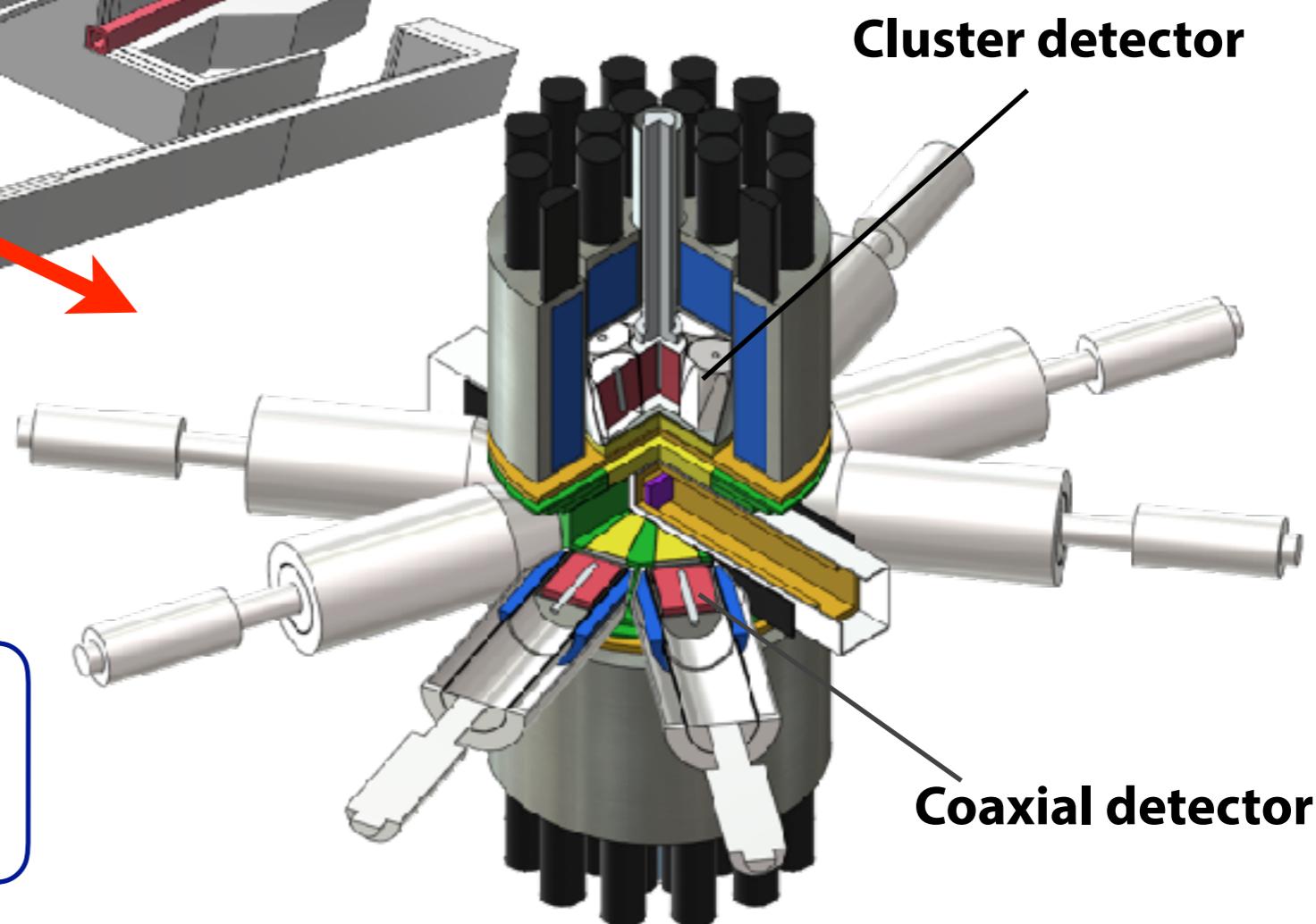
$$P(J J' j j' k IF) = (-1)^{J+J'+j'+I+F} \frac{3}{2} \sqrt{(2J+1)(2J'+1)(2j+1)(2j'+1)} \begin{Bmatrix} j & j & j' \\ I & J' & J \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} k & 1 & 1 \\ F & J & J' \end{Bmatrix}$$



BL04 ANNRI



BL04 Ge Detector



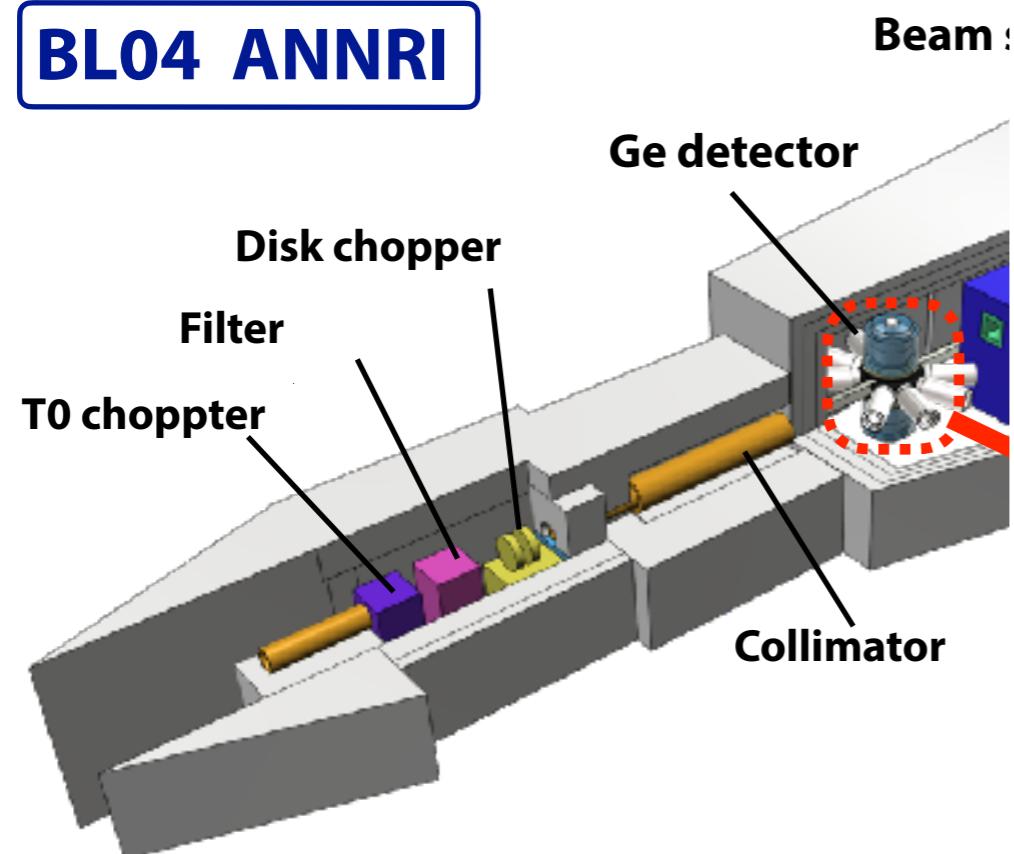
2 Cluster Ge Detector 7ch ×2 : 14ch
8 Coaxial Ge Detector 8ch
22ch → 7 angles

Targets : ^{nat}La 40mm x 40mm x 1mm

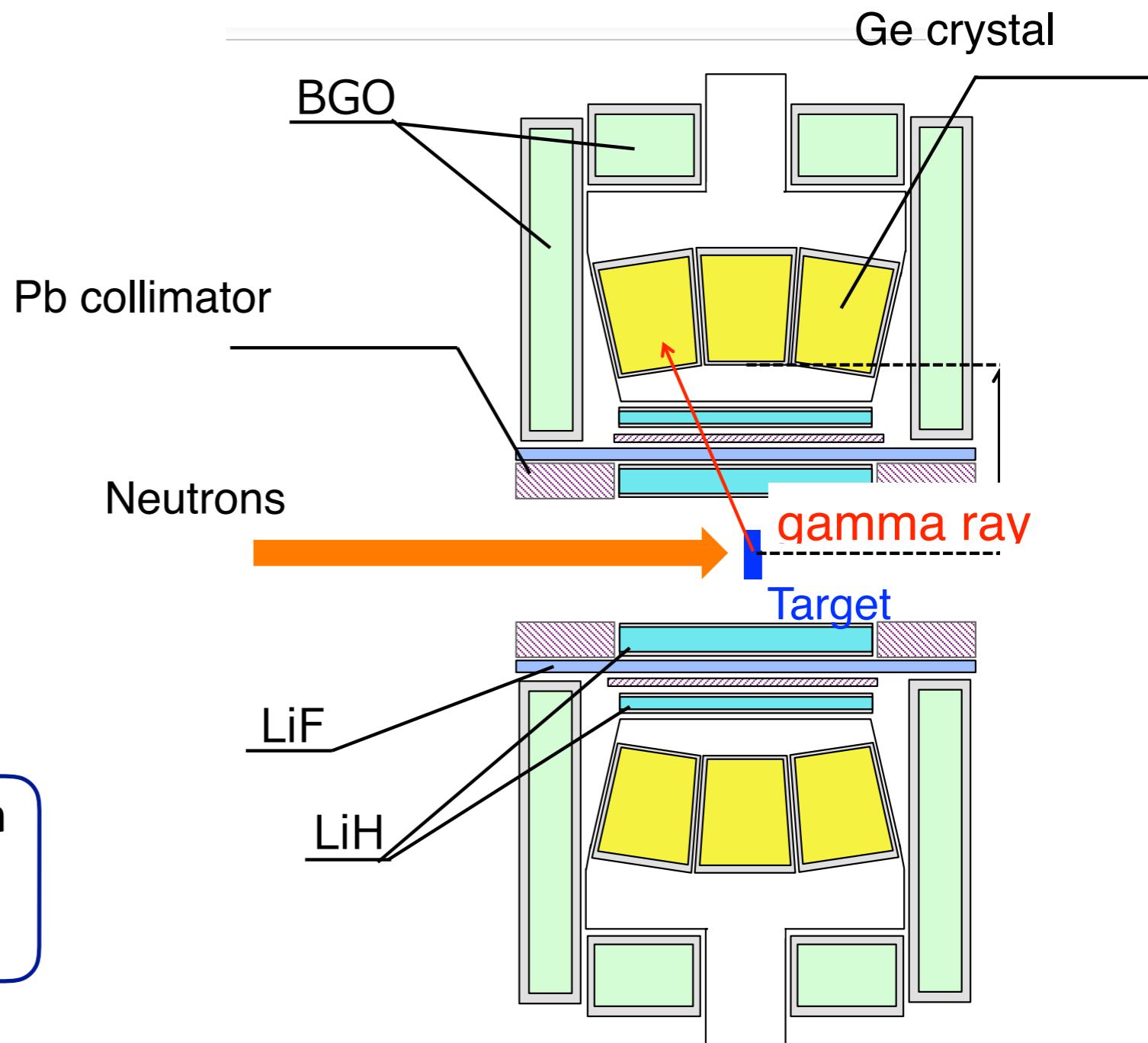
T. Okudaira et. al. , Phys. Rev. C97 (2018) 034622.

^{139}La (n, γ) 測定

BL04 ANNRI



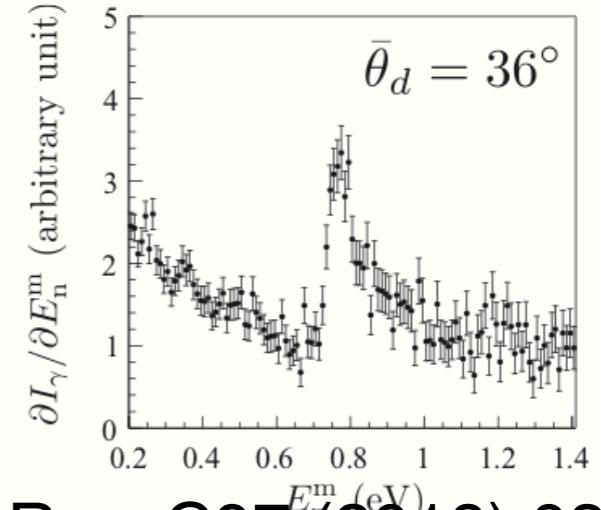
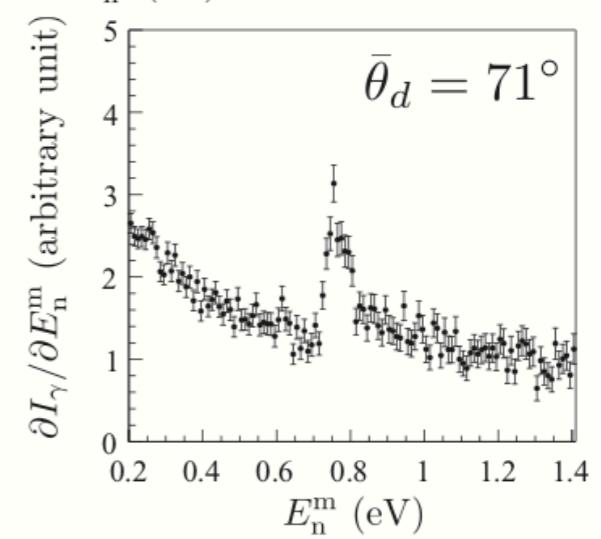
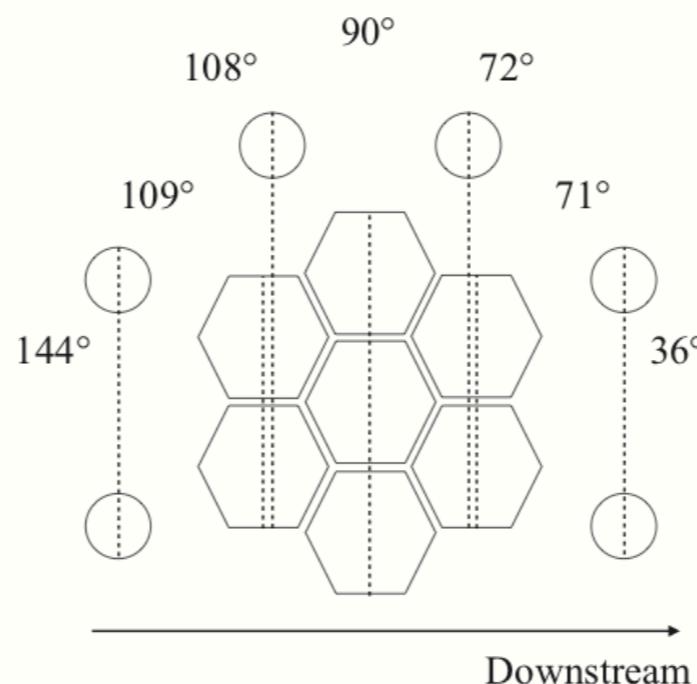
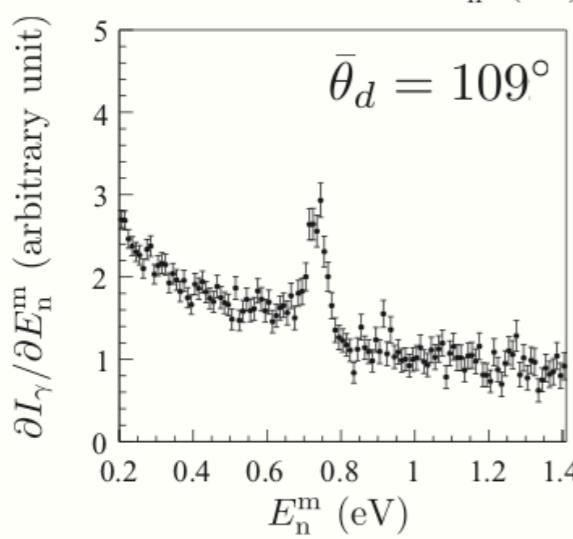
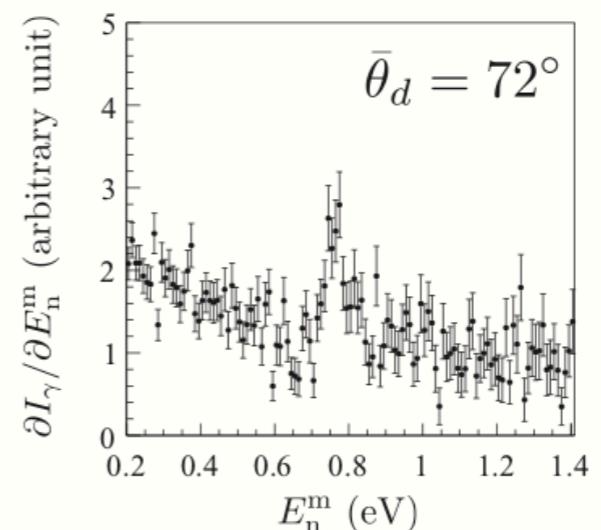
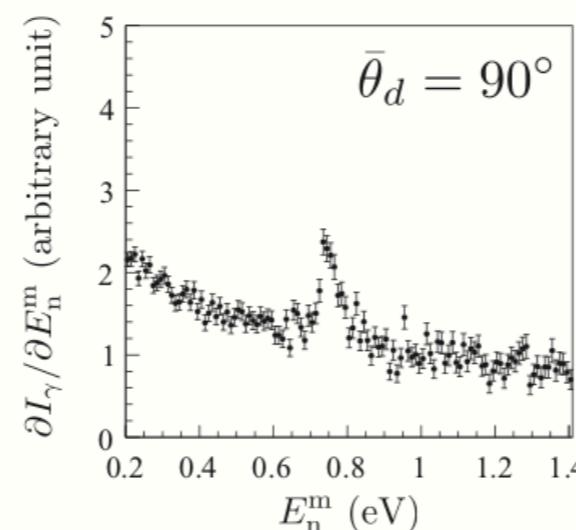
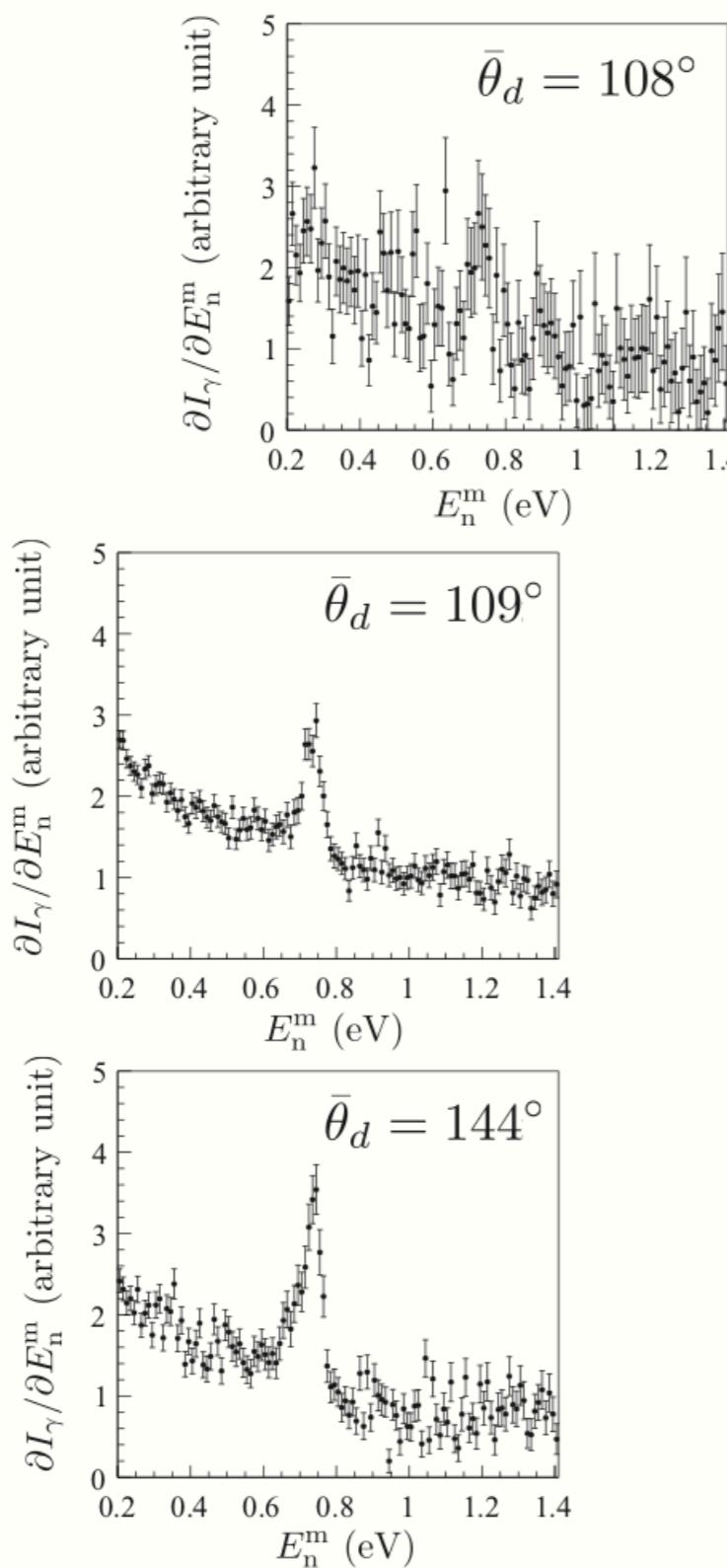
2 Cluster Ge Detector 7ch ×2 : 14ch
8 Coaxial Ge Detector 8ch
22ch → 7 angles



Targets : $^{\text{nat}}\text{La}$ 40mm x 40mm x 1mm

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

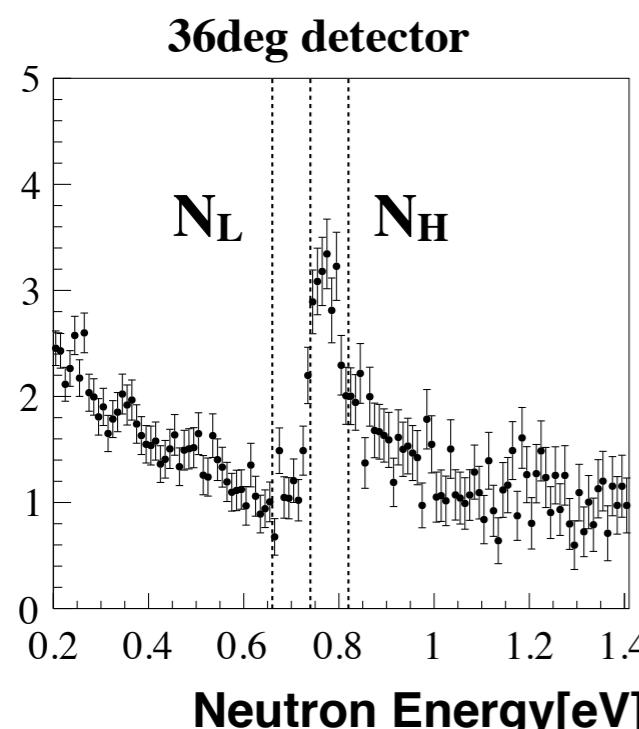
^{139}La (n, γ) 測定



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

^{139}La (n, γ) 測定

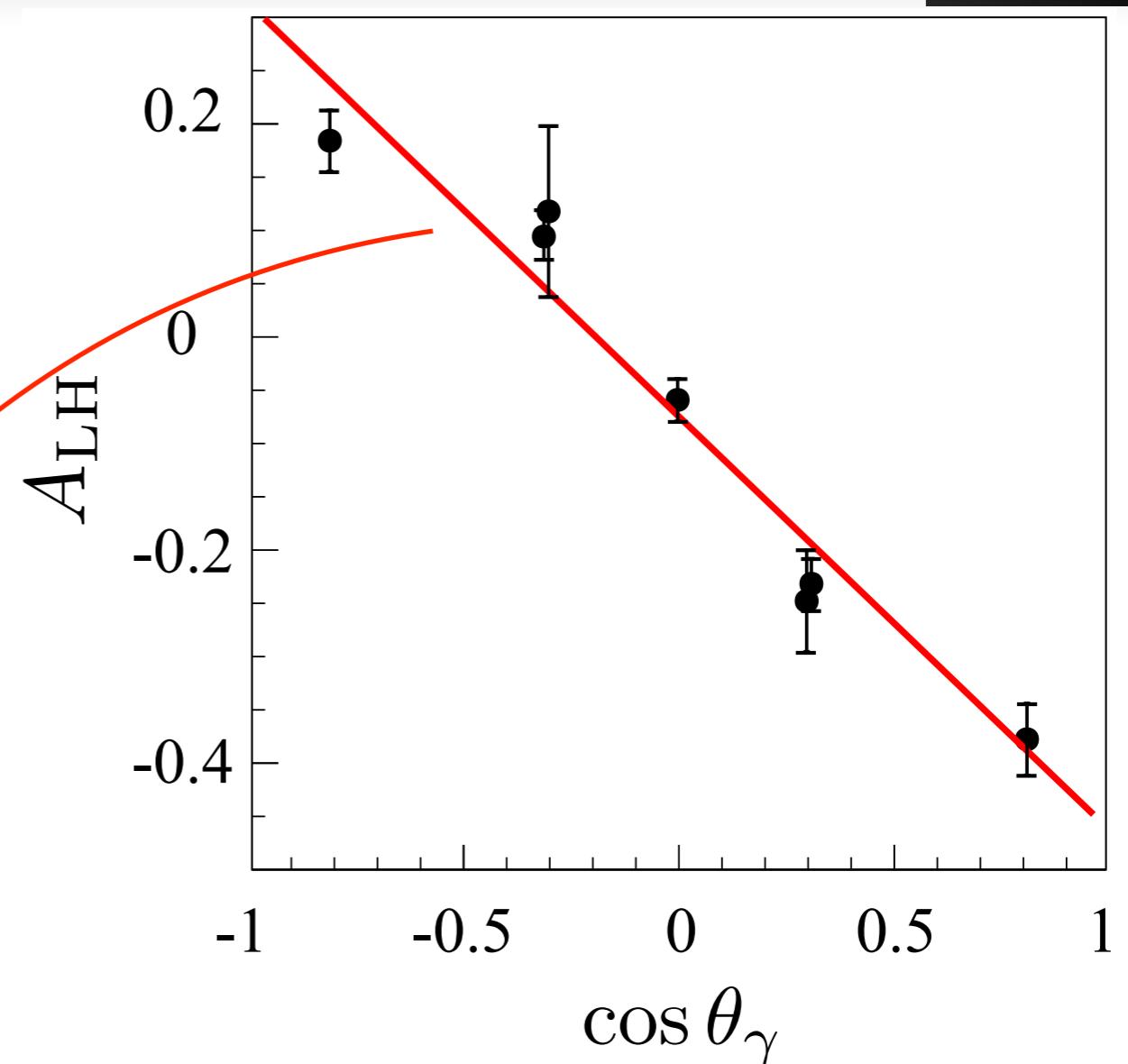
$$A_{\text{LH}} = \frac{N_{\text{L}} - N_{\text{H}}}{N_{\text{L}} + N_{\text{H}}}$$



measured
slope

$$-0.388 \pm 0.024 = 0.295 \cos \phi - 0.345 \sin \phi$$

$$\phi = (99.2^{+6.3})^\circ, (161.9^{+5.3})^\circ$$



calculated with Flambaum s-p mixing model

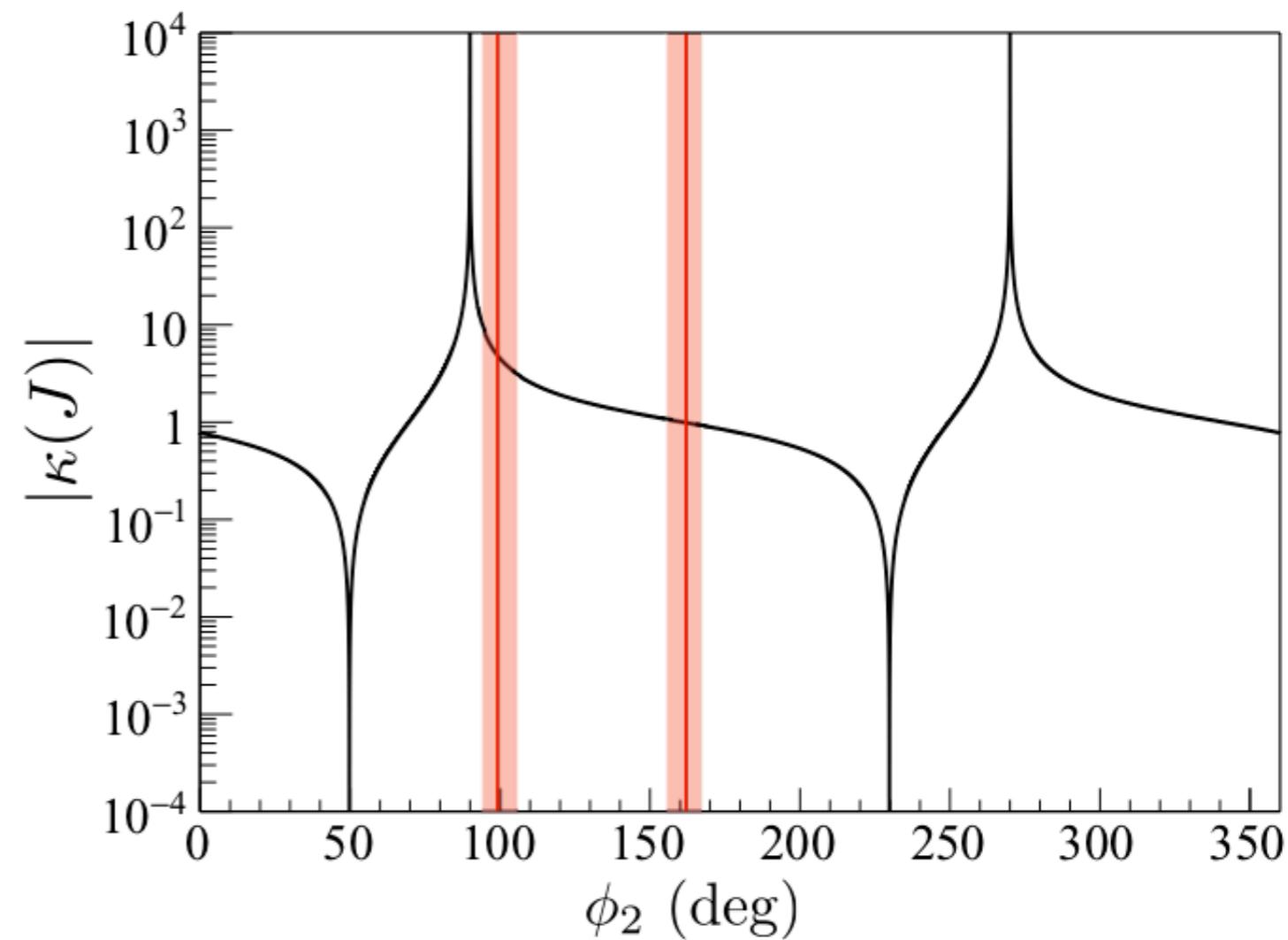
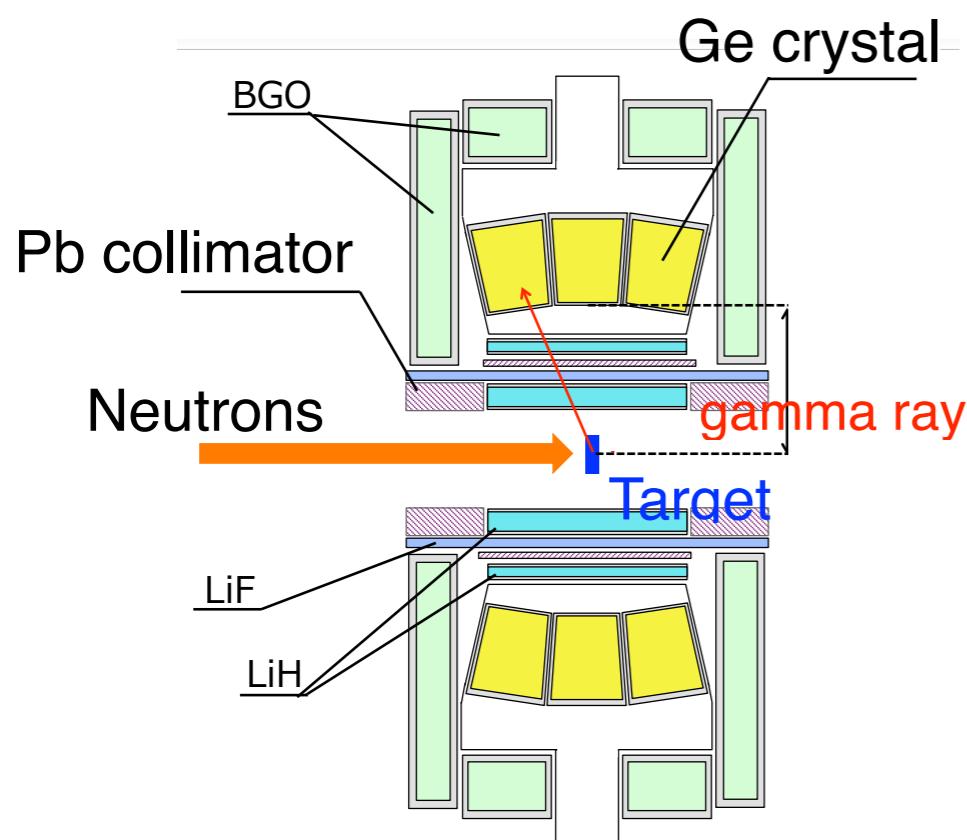
T. Okudaira et. al. , Phys. Rev. C97 (2018) 034622.

^{139}La (n, γ) 測定 から κ へ

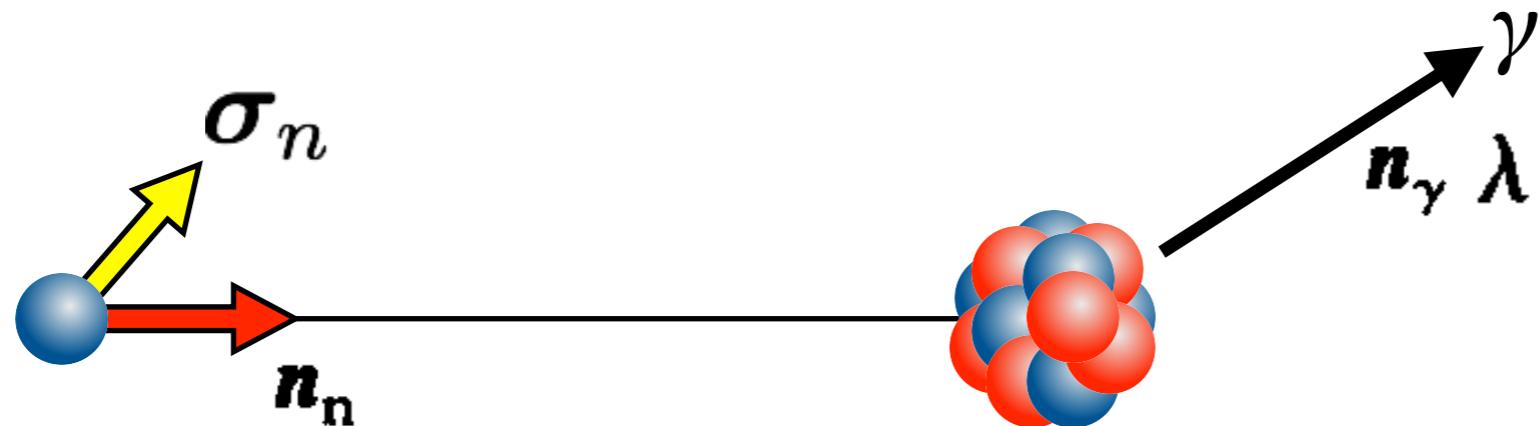
^{139}La (n, γ) 反応のガンマ線角度分布から、 κ を見積もる

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

$$\kappa(J) = 0.99_{-0.07}^{+0.88}, 4.84_{-1.69}^{+5.58}$$



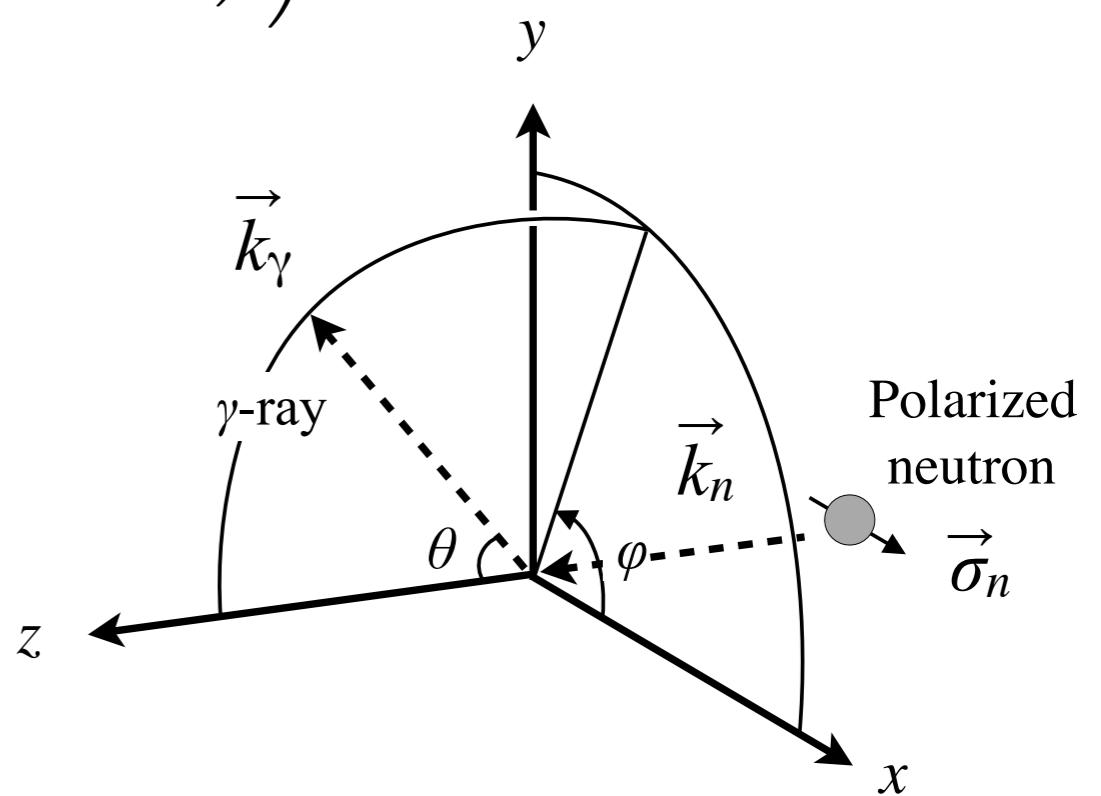
偏極中性子 (n, γ) 反応断面積



$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma(n_\gamma, \lambda)}{d\Omega} = & \frac{1}{2} \{ a_0 + a_1 (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) + \boxed{\tilde{a}_2 \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma]} + a_3 [(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma)^2 - \frac{1}{3}] \\
 & + \boxed{\tilde{a}_4 (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma]} + a_5 \lambda (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma) + a_6 \lambda (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n) + a_7 \lambda \\
 & \times [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)(\mathbf{n}_\gamma \cdot \mathbf{n}_n) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)] + a_8 \lambda [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)] \\
 & + \boxed{a_9 (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)} + \boxed{a_{10} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)} + \boxed{a_{11} [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)(\mathbf{n}_\gamma \cdot \mathbf{n}_n) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)]} \\
 & + \boxed{a_{12} [(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_n)(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) - \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_\gamma)]} + a_{13} \lambda + a_{14} \lambda (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \\
 & + \tilde{a}_{15} \lambda \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] + a_{16} \lambda [(\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma)^2 - \frac{1}{3}] \\
 & + \tilde{a}_{17} \lambda (\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_\gamma) \boldsymbol{\sigma} \cdot [\mathbf{n}_n \times \mathbf{n}_\gamma] \} . \quad \text{Flambaum, Nucl. Phys. A435 (1985) 352}
 \end{aligned}$$

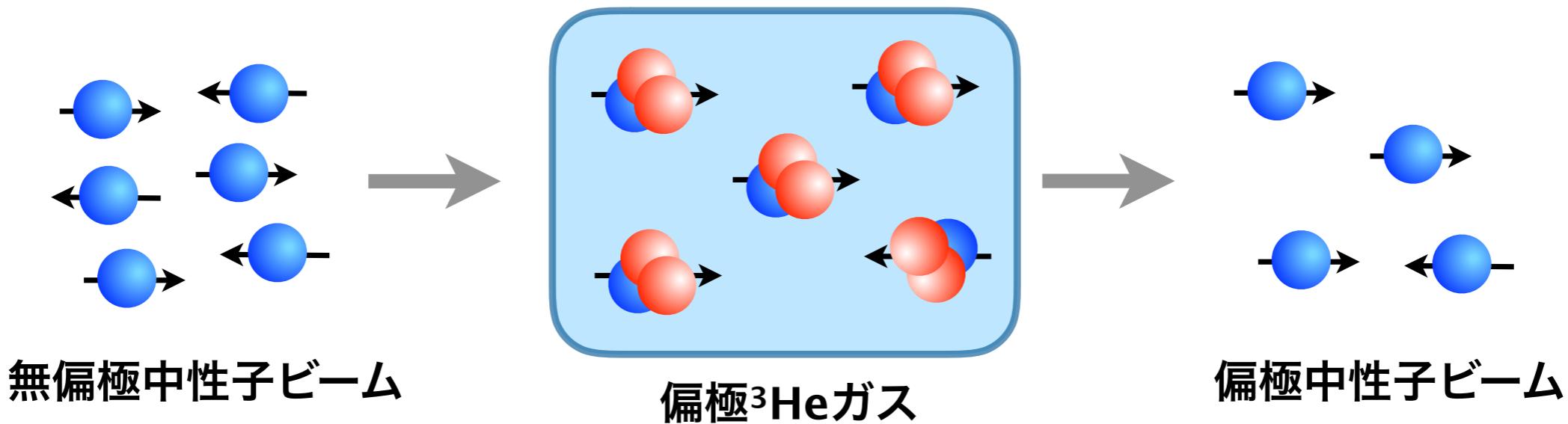
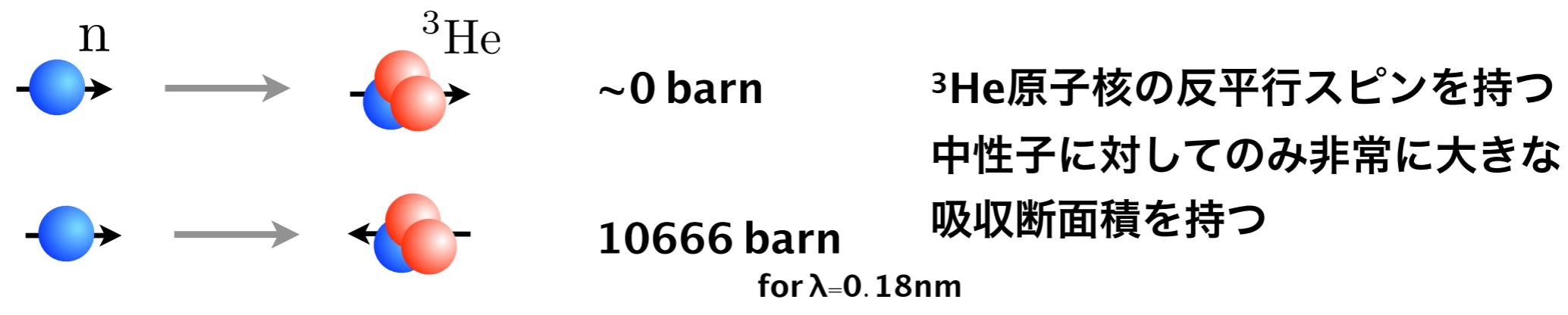
偏極中性子 (n, γ) 反応断面積

$$\frac{d\sigma_{n\gamma}^{\pm}(\theta, \varphi)}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(a_0 + a_1 \cos \theta + a_3 \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \right. \\ \left. \pm \left(-a_2 \sin \theta \sin \varphi - a_4 \sin \theta \cos \theta \sin \varphi \right. \right. \\ \left. \left. + a_9 \sin \theta \cos \varphi + a_{11} \sin \theta \cos \theta \cos \varphi \right) \right)$$



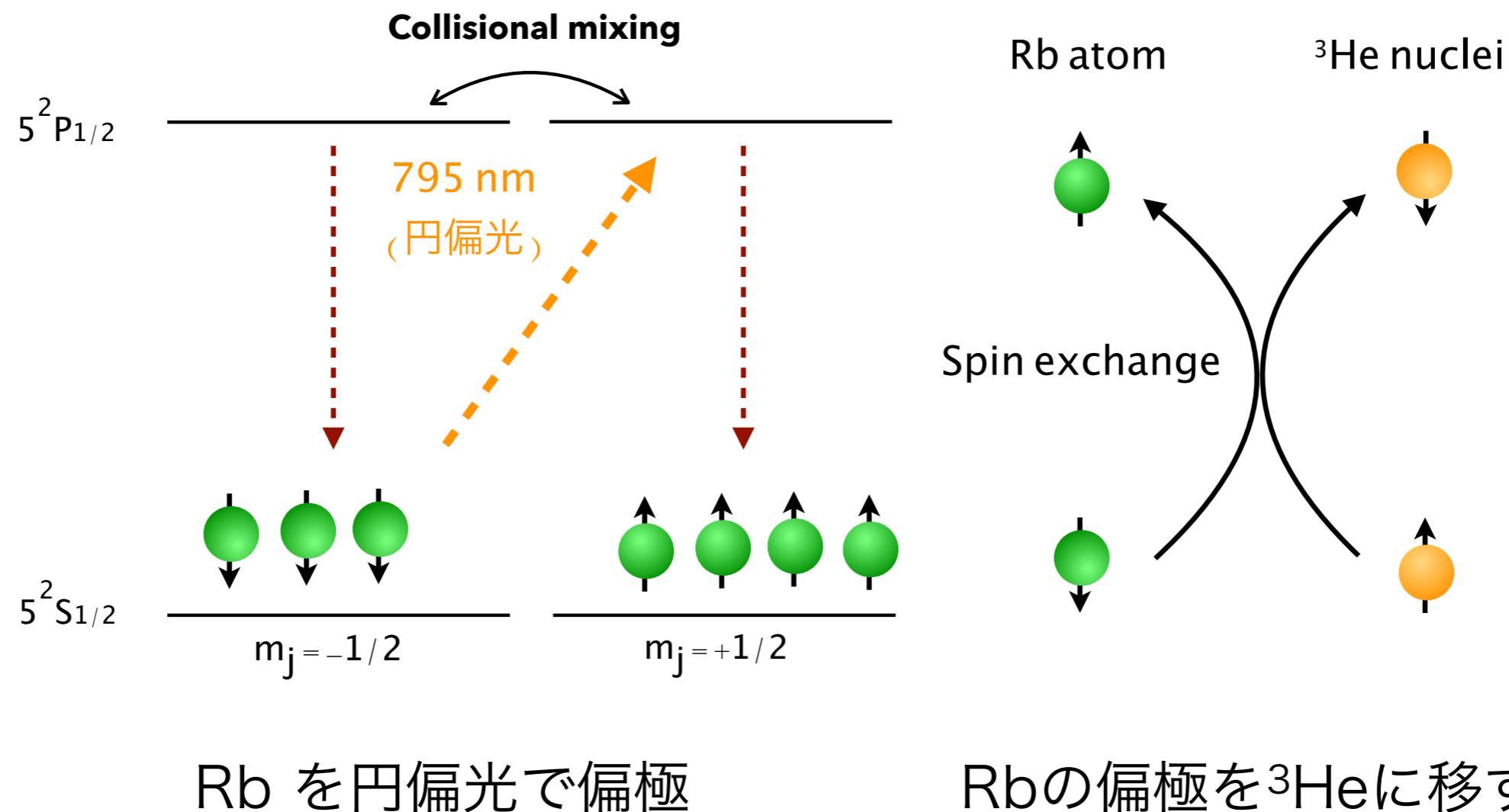
T. Yamamoto et. al. , Phys. Rev. C 101, 064624 (2020)

中性子偏極 ^3He 中性子スピニルタ

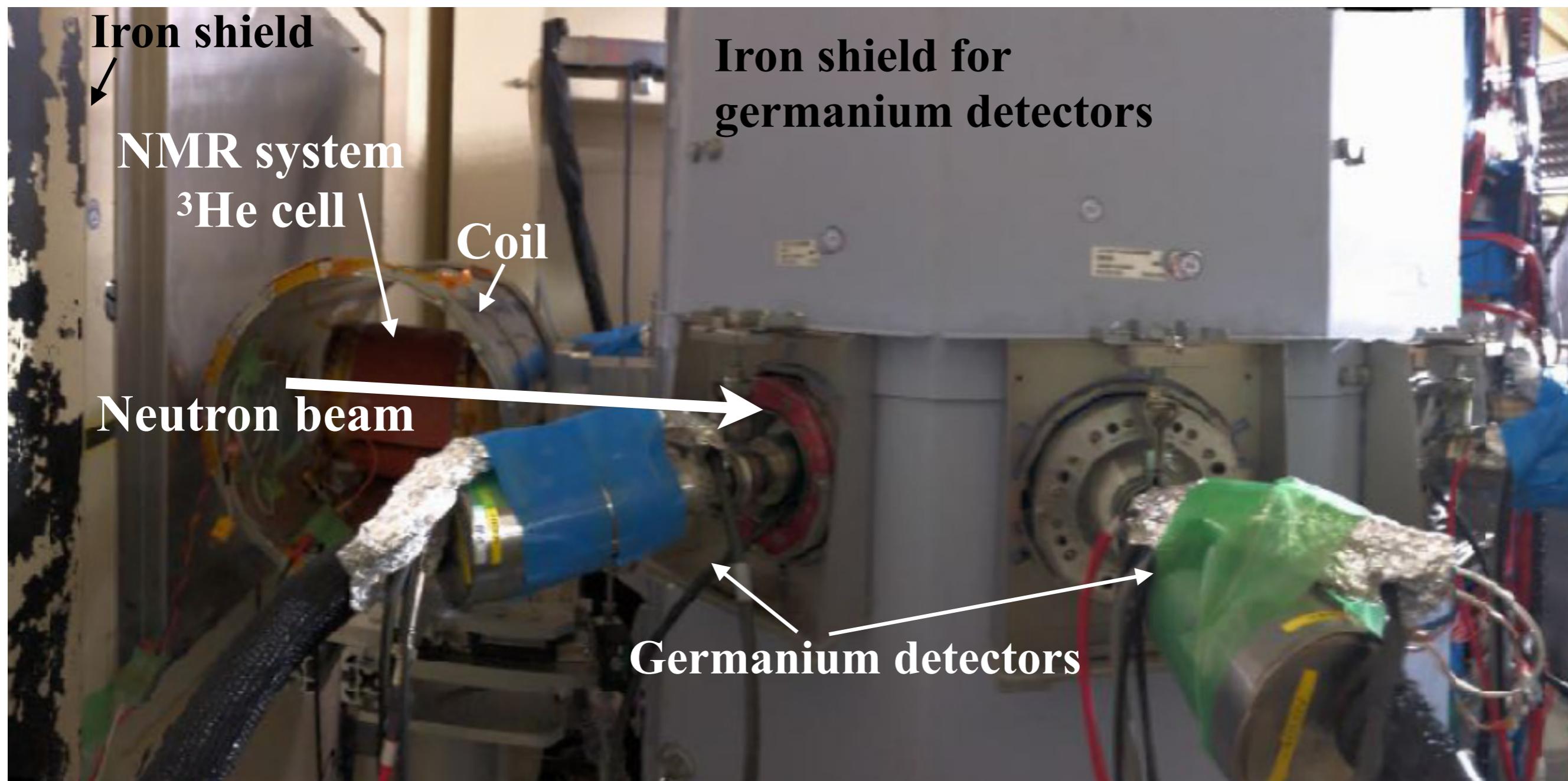


T. Okudaira, et. al., Nucl. Instrum. Methods A 977, 164301 (2020).

Spin Exchange Optical Pumping (SEOP) 法

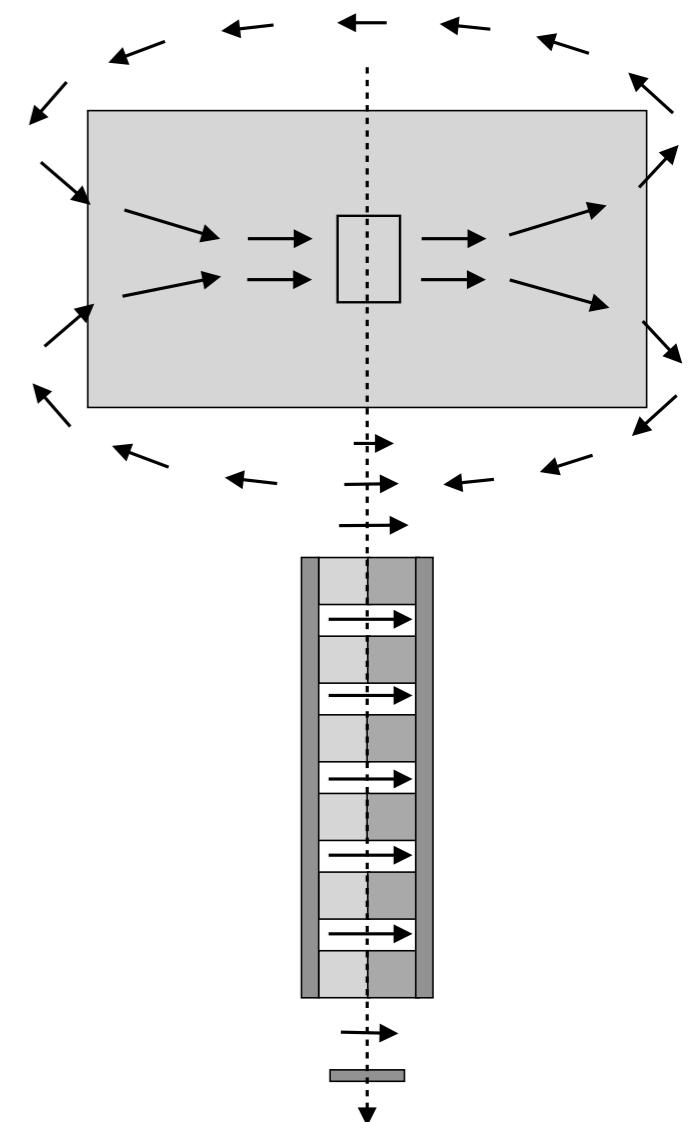
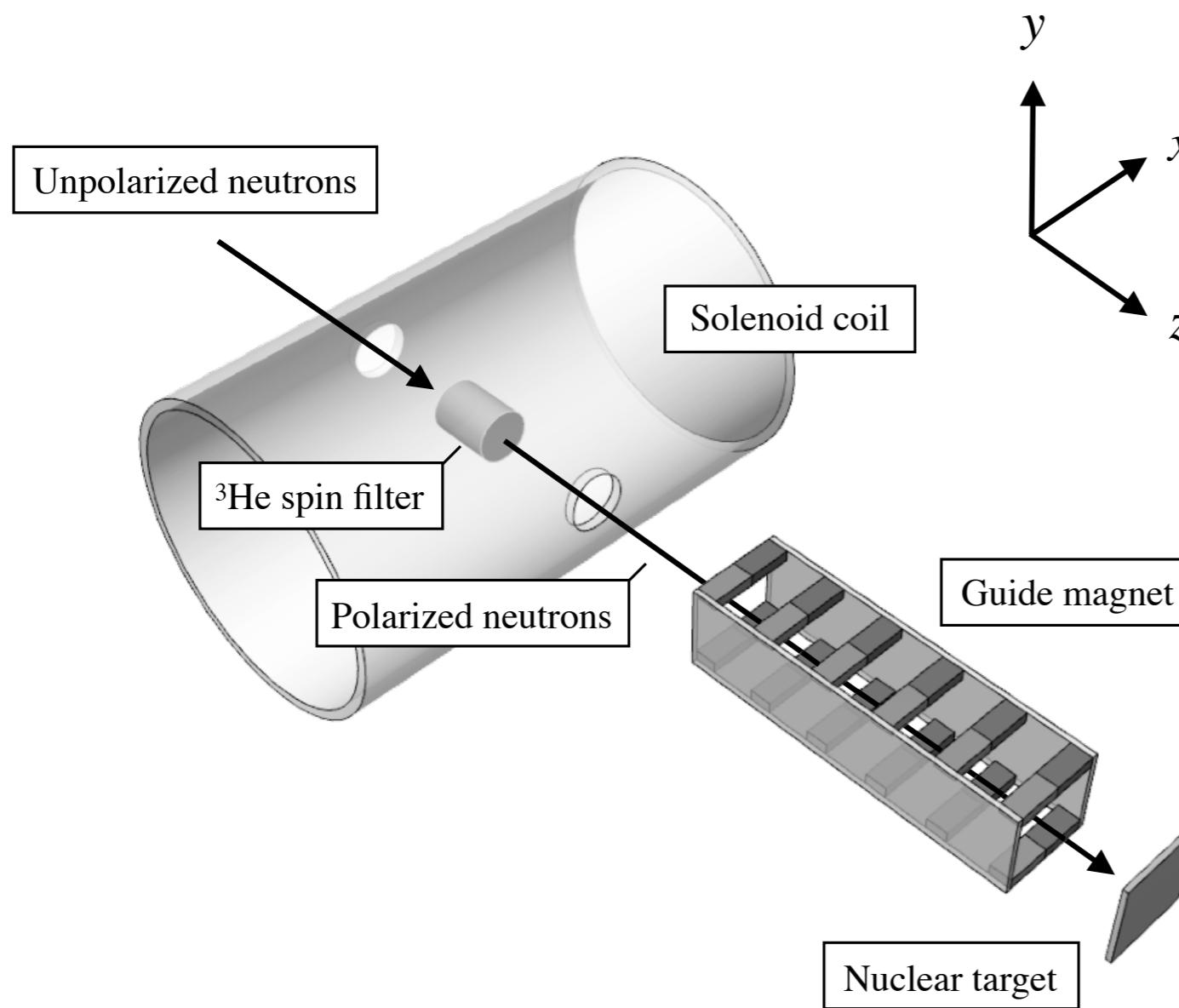


T. Okudaira, et. al., Nucl. Instrum. Methods A 977, 164301 (2020).



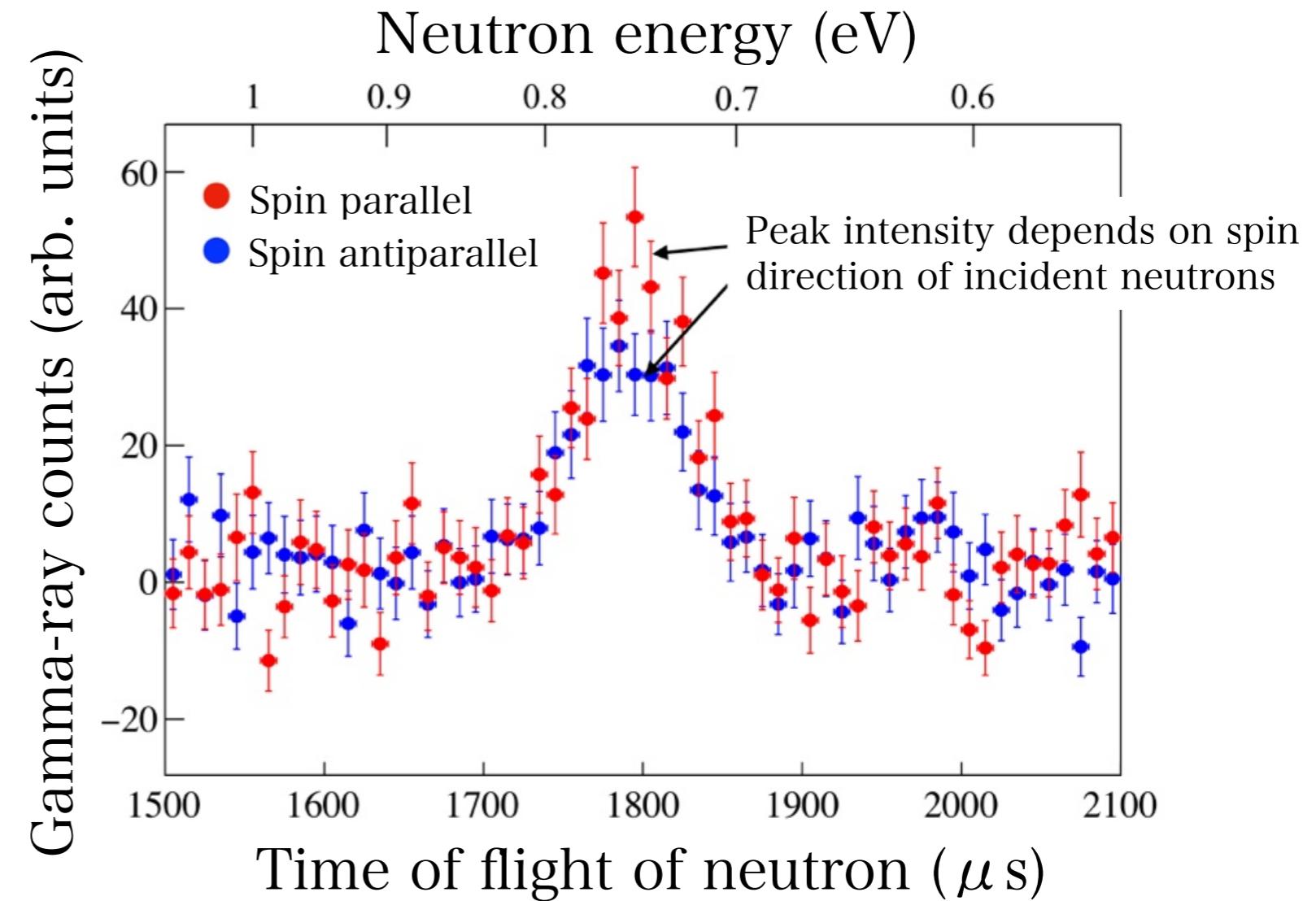
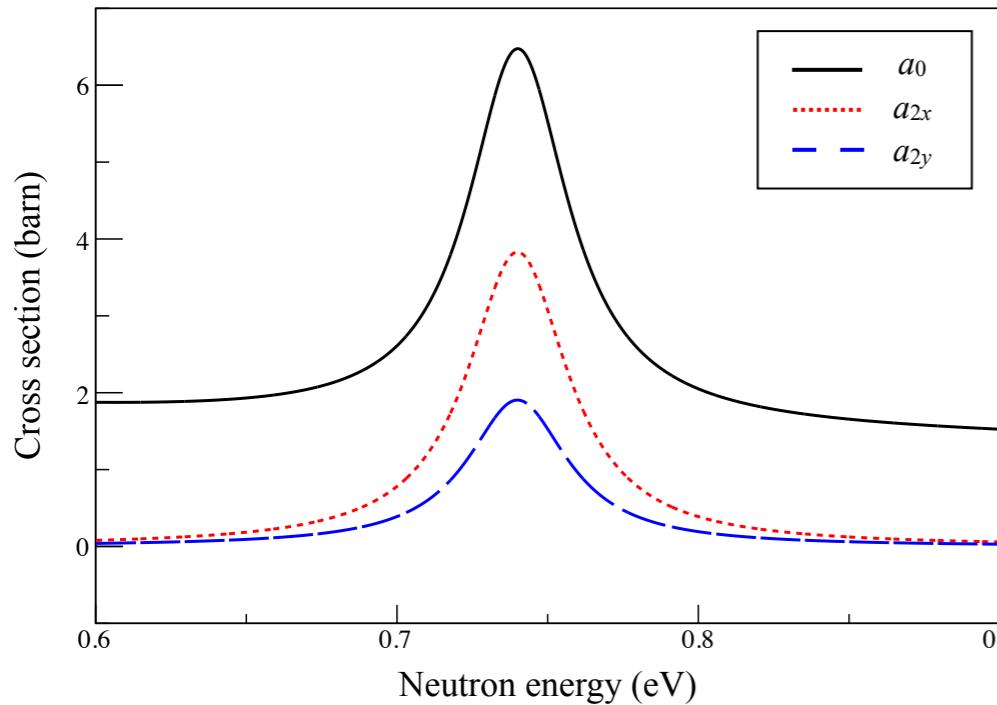
T. Yamamoto et. al. , Phys. Rev. C 101, 064624 (2020)

中性子偏極 ^3He 中性子スピンフィルタ at BL04



T. Yamamoto et. al. , Phys. Rev. C 101, 064624 (2020)

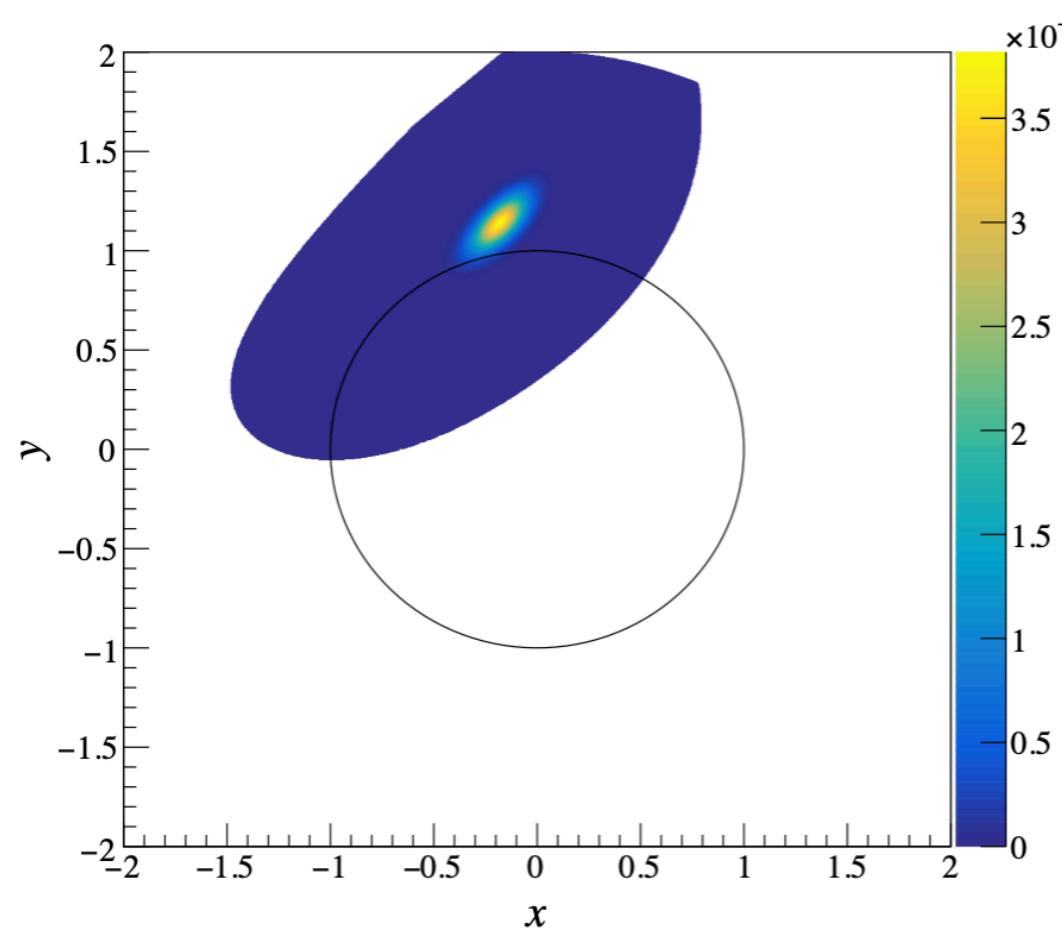
中性子偏極 ^3He 中性子スピニルタ at BL04



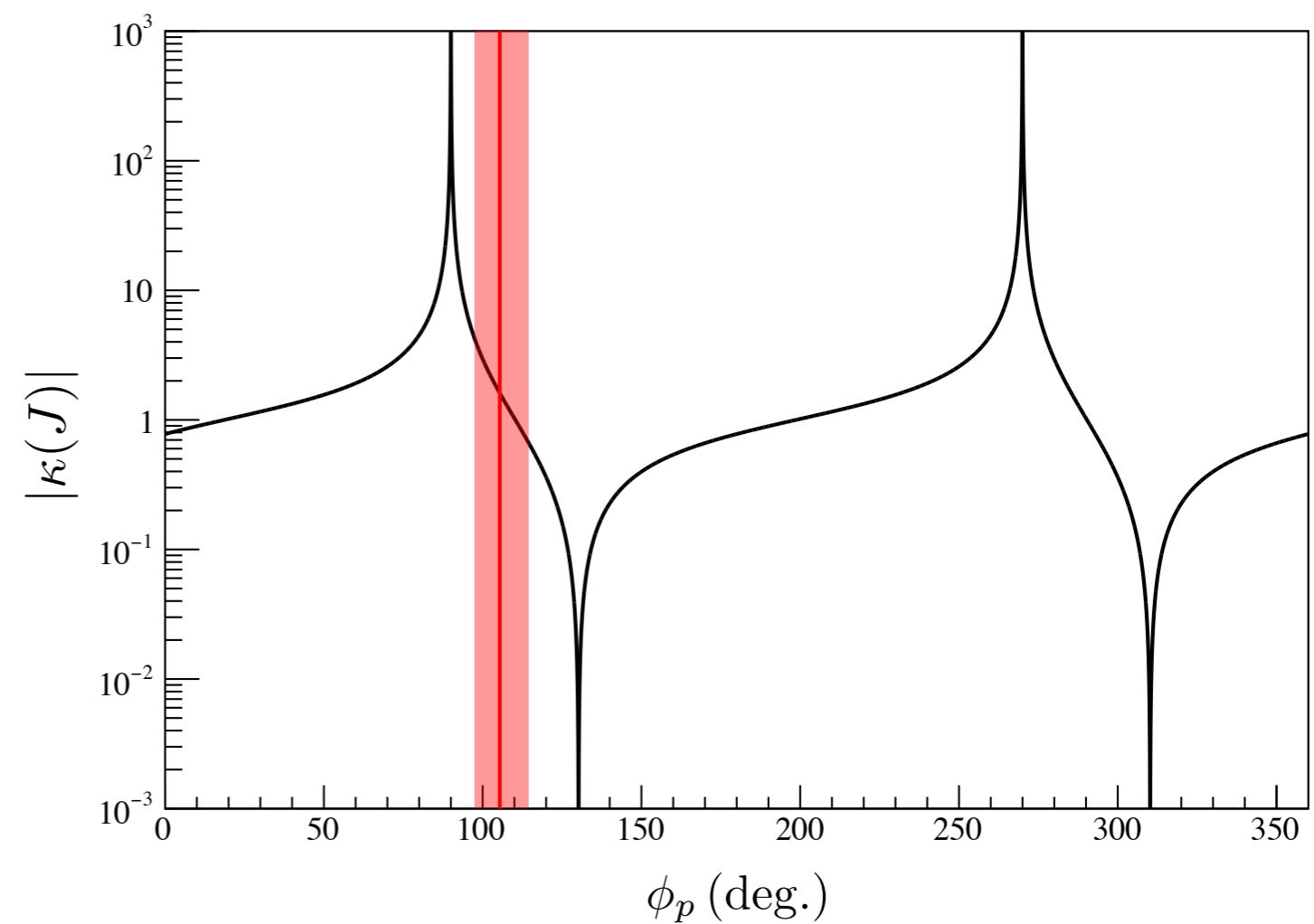
T. Yamamoto et. al. , Phys. Rev. C 101, 064624 (2020)

干偏極の結果と合わせて、もっともらしい範囲を見積もる。

T. Yamamoto et. al. , 博士論文



$$\kappa(J) = 1.62^{+2.60}_{-0.95}.$$



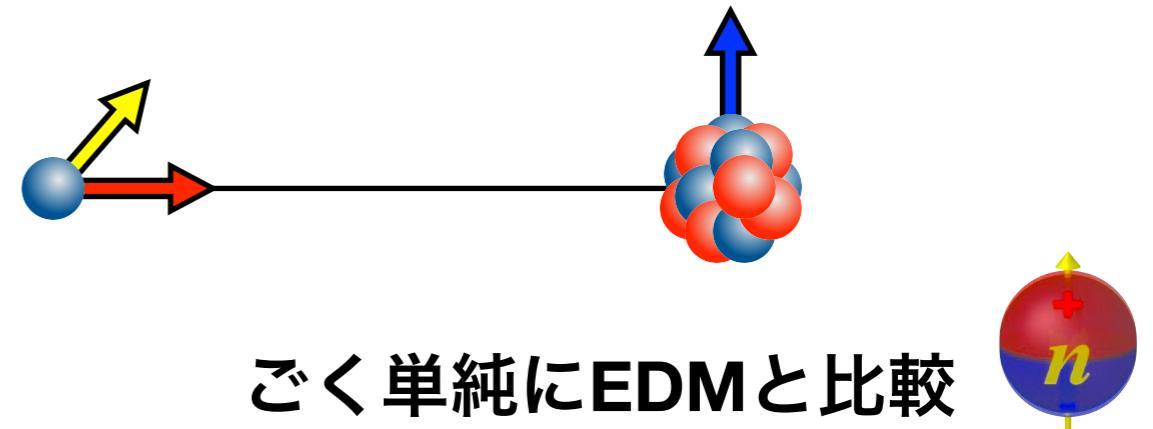
時間反転対称性の破れ探索の感度

Gudkov, Phys. Rep. 212 (1992) 77.

時間反転対称性の破れも増幅？

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

T-violation g_{CP}/g_P P-violation



有効相互作用表示で大きさを見積もると、、、

Y.-H.Song et al., Phys. Rev. C83 (2011) 065503

$$\frac{W_T}{W} = \frac{\Delta\sigma_T^P}{\Delta\sigma_P^P} \simeq (-0.47) \left(\frac{\bar{g}_\pi^{(0)}}{h_\pi^1} + (0.26) \frac{\bar{g}_\pi^{(1)}}{h_\pi^1} \right)$$
$$< 2.9 \times 10^{-4}$$

from upper limit of nEDM

$$\bar{g}_\pi^{(0)} < 1.6 \times 10^{-10}$$

from upper limit of Hg EDM

$$\bar{g}_\pi^{(1)} < 0.5 \times 10^{-11}$$

Discovery potential

$$|\Delta\sigma_T| < 1.4 \times 10^{-4} \text{ barn}$$

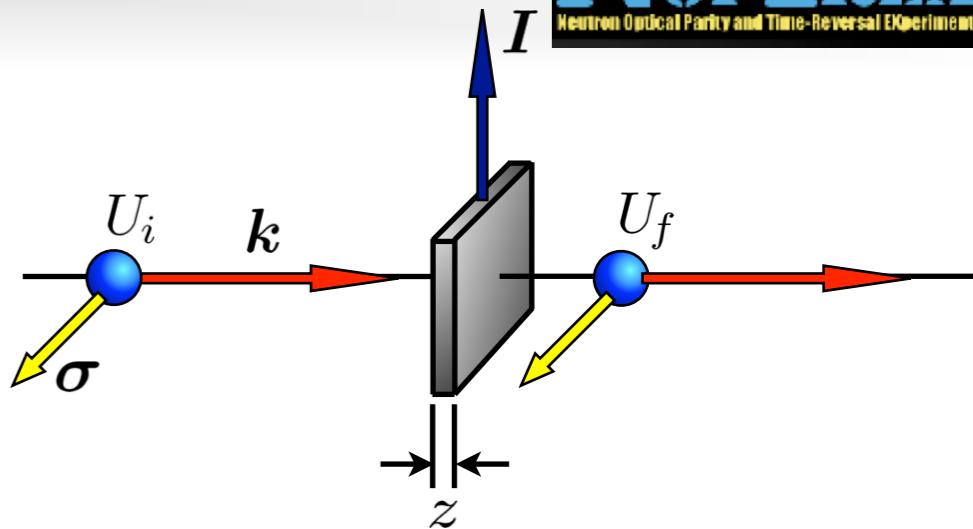
from NPDGamma

$$h_\pi^1 = (2.6 \pm 1.2_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}}) \times 10^{-7}.$$

時間反転対称性の破れ探索の感度

$$U_f = \delta U_i \quad \delta = e^{i(n-1)kz} \quad n = 1 + \frac{2\pi\rho}{k^2} f$$

$$\delta = \underbrace{A}_{\begin{array}{l} \text{Spin Independent} \\ \text{P-even T-even} \end{array}} + \underbrace{B\sigma \cdot \hat{I}}_{\begin{array}{l} \text{Spin Dependent} \\ \text{P-even T-even} \end{array}} + \underbrace{C\sigma \cdot \hat{k}}_{\begin{array}{l} \text{P-violation} \\ \text{P-odd T-even} \end{array}} + \underbrace{D\sigma \cdot (\hat{I} \times \hat{k})}_{\begin{array}{l} \text{T-violation} \\ \text{P-odd T-odd} \end{array}}$$

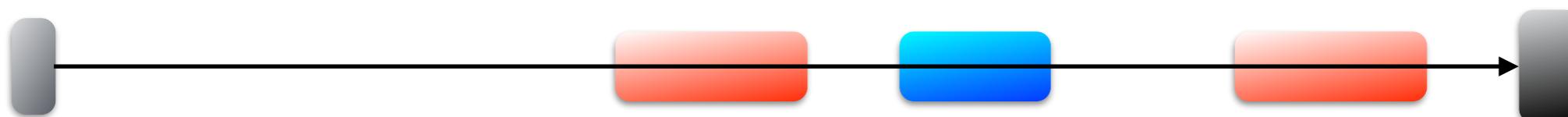


パルス中性子源

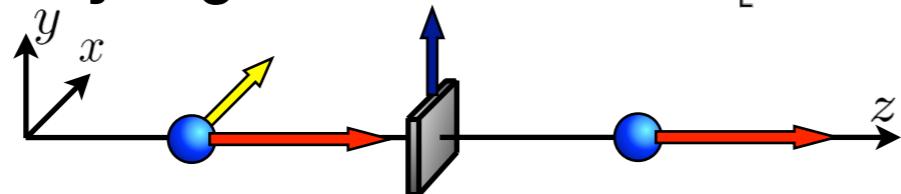
中性子偏極

偏極
原子核
標的

熱外中性子
検出器

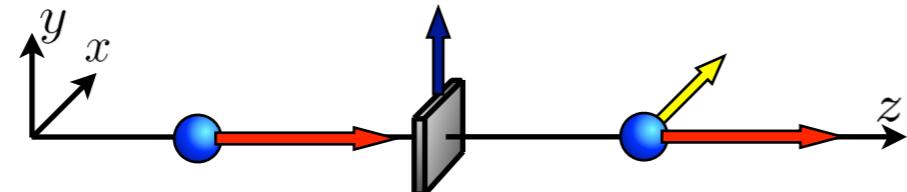


Analyzing Power $A_x \equiv \text{Tr} [\delta^\dagger \sigma_x \delta]$



Polarization

$$P_x \equiv \text{Tr} [\sigma_x \delta^\dagger \delta]$$

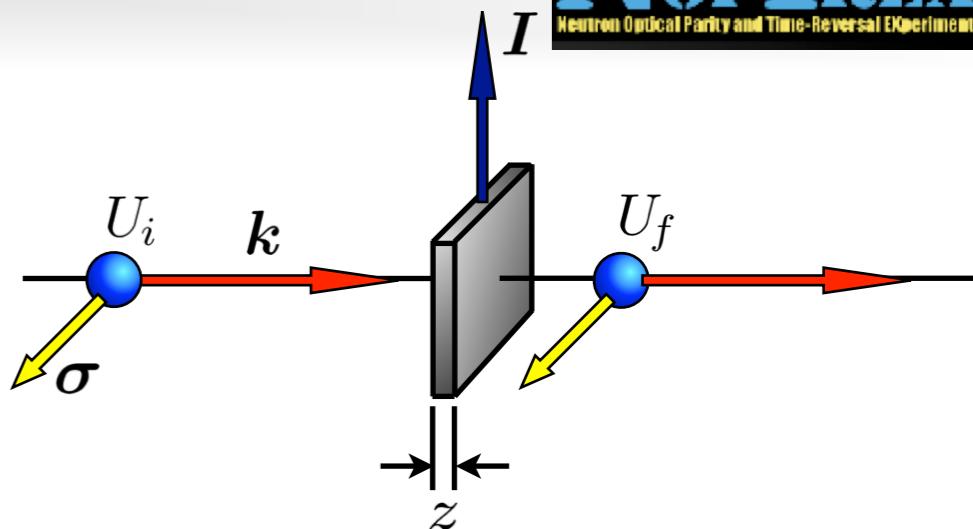


$$\boxed{A_x + P_x = 8 \text{Re } A^* D}$$

時間反転対称性の破れ探索の感度

$$U_f = \delta U_i \quad \delta = e^{i(n-1)kz} \quad n = 1 + \frac{2\pi\rho}{k^2} f$$

$$\delta = \underbrace{A}_{\text{Spin Independent}} + \underbrace{B\sigma \cdot \hat{I}}_{\text{Spin Dependent P-even T-even}} + \underbrace{C\sigma \cdot \hat{k}}_{\text{P-violation P-odd T-even}} + \underbrace{D\sigma \cdot (\hat{I} \times \hat{k})}_{\text{T-violation P-odd T-odd}}$$

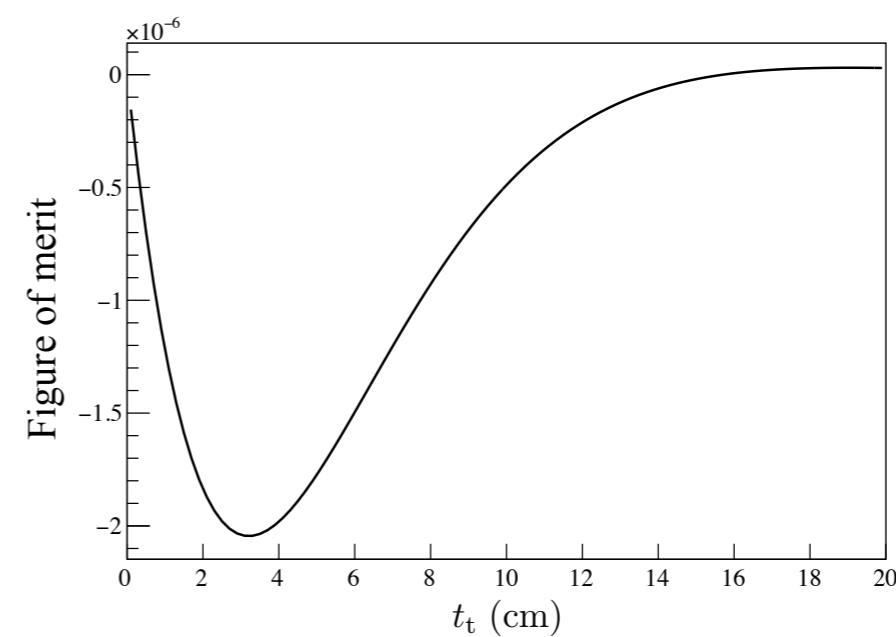
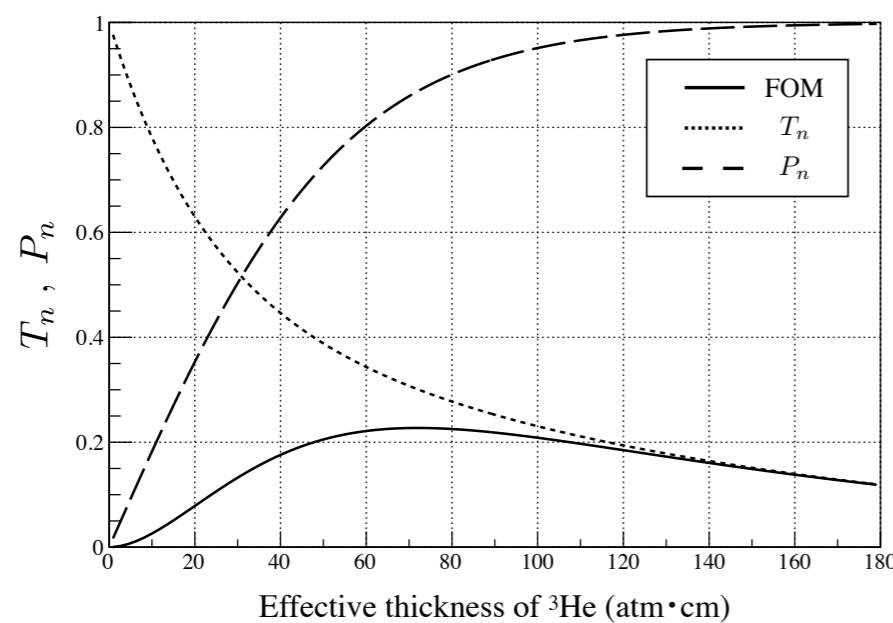
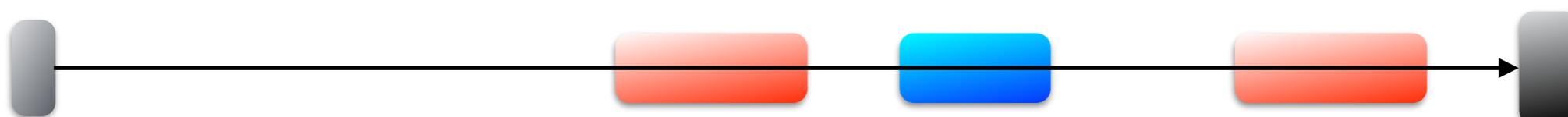


パルス中性子源

中性子偏極

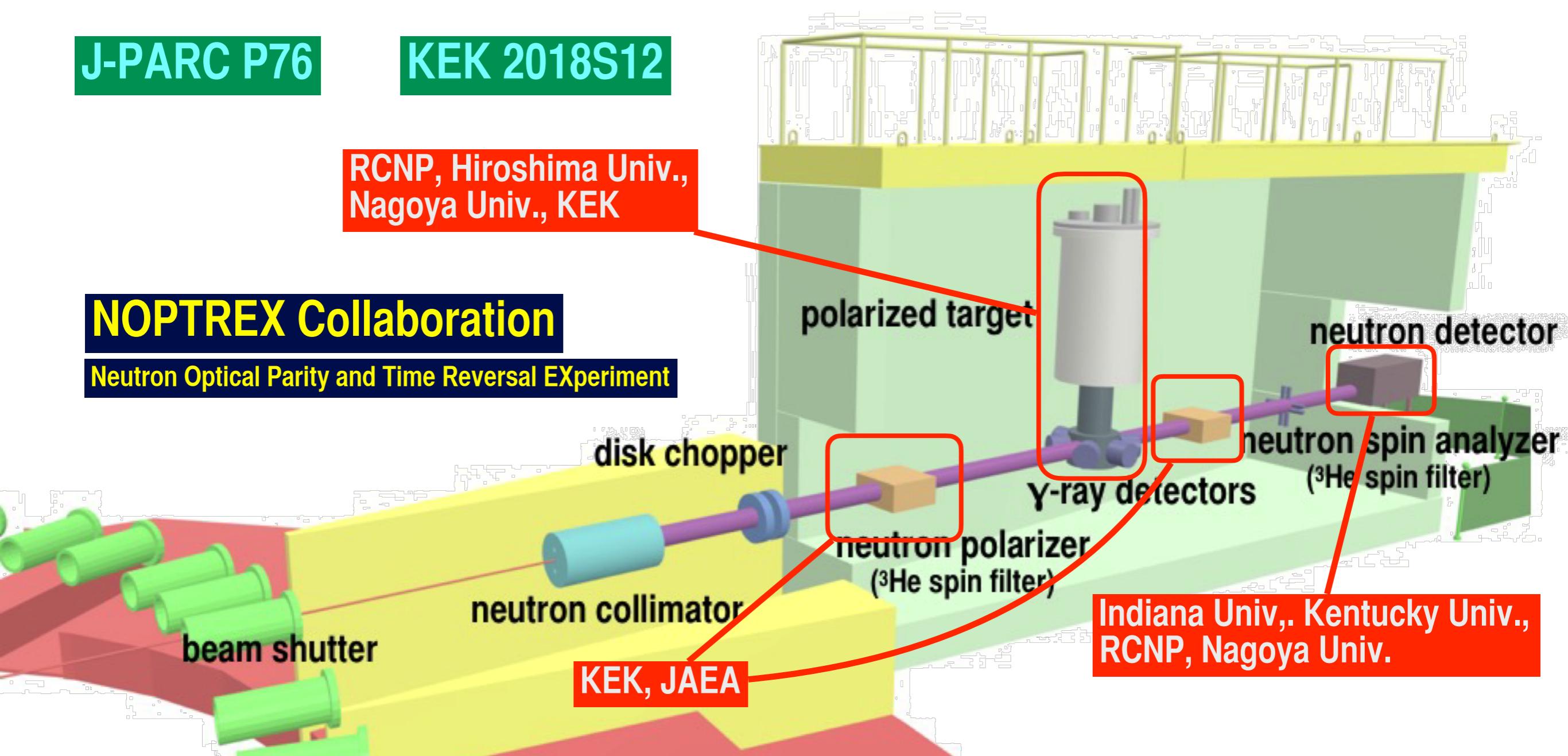
偏極
原子核
標的

熱外中性子
検出器



J-PARC P76

KEK 2018S12



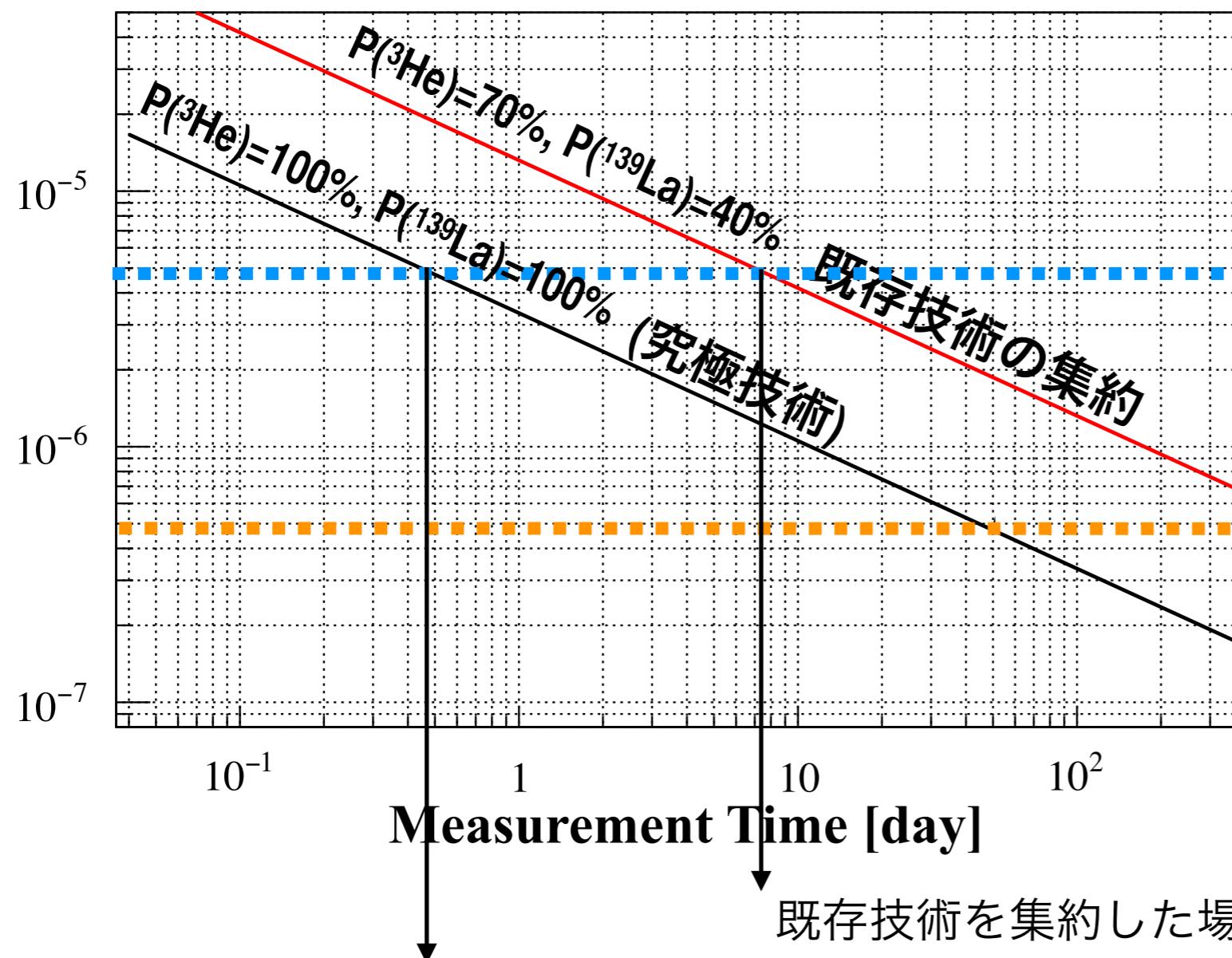
J-PARC P76 https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_2001/pdf/P76_2020-03.pdf

^{139}La

LaAlO_3

$P(^{139}\text{La}) \geq 0.4, V \geq 4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 2.8\text{cm}$
 $B_0 \leq 0.1\text{T}$

$$A_x + P_x = 8\text{Re}A^*D$$



discovery potential corresponding to $d_n = 3.0 \times 10^{-26} \text{ e cm}$

discovery potential corresponding to $d_n = 3.0 \times 10^{-27} \text{ e cm}$

既存技術を集約した場合、新発見の可能性のある
統計精度に到達するのに必要な時間

スピン偏極度100%を仮定した場合に、
新発見の可能性のある統計精度に到達するのに必要な時間

$$\left| \frac{\langle W_T \rangle}{\langle W \rangle} \right| < 3.9 \times 10^{-4}$$

↑
 $8\text{Re}A^*D = 5.3 \times 10^{-5}$

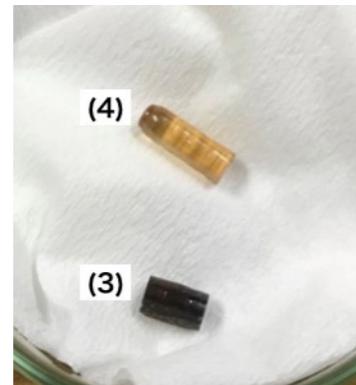
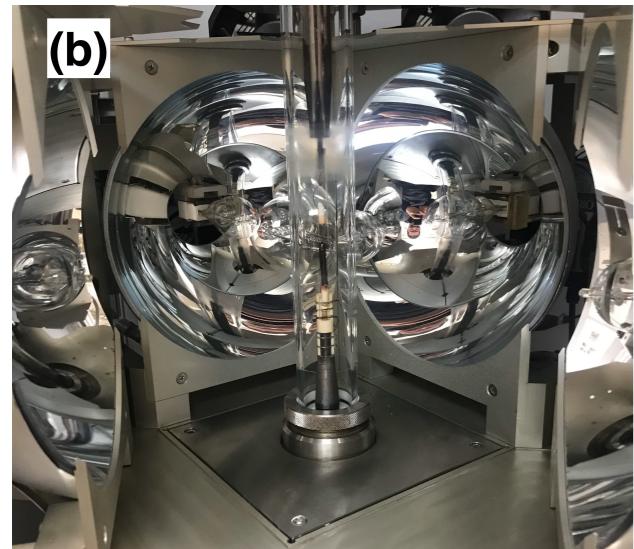
偏極核標的の開発体制

動的核偏極基礎研究
偏極標的用単結晶育成

大阪大学核物理研究センター プロジェクト
東北大金属材料研究所 共同利用プロジェクト

として進行中

結晶育成 東北大金属材料研



東北大金研
広島大
名古屋大

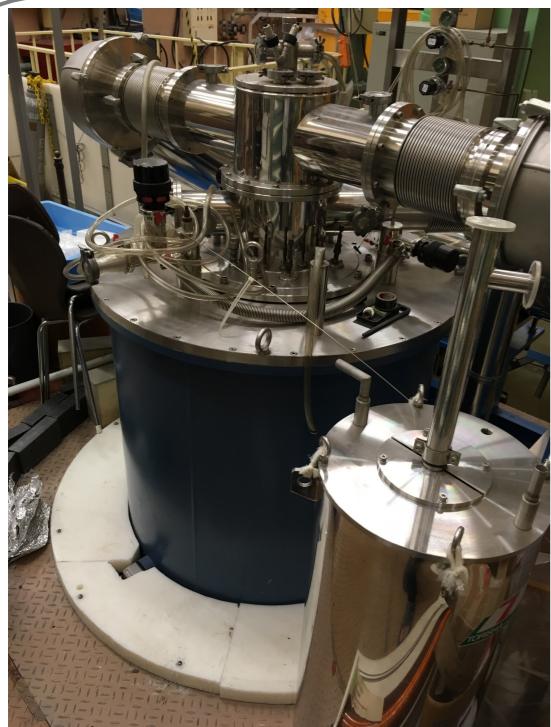
核偏極基礎研究 阪大核物理センター



阪大核物理センター
広島大、名古屋大
山形大



低温技術



名古屋大学
理化学研究所
日本女子大
足利大
広島大
極低温・高冷却能力
冷凍機開発

偏極La核標的



LaAlO₃ 単結晶
Nd ドープ結晶
純粹結晶

緩和時間制御 広大自然開発センター

広島大
名古屋大



芳香族有機分子による
緩和時間制御

NOPTREX Collaboration



NOP-T

KEK 2018S12

TREX

Nagoya University

H.M.Shimizu, M.Kitaguchi, T.Yamamoto, I.Itoh,
K.Ishizaki, S.Endoh, T.Satoh, T.Morishima,
G.Ichikawa, Y.Kiyanagi, T.Nakao, J.Hisano

Kyushu University

J.Koga, S.Makise, S.Takada, T.Yoshioka

JAEA

A.Kimura, T.Oku, T.Okudaira, K.Sakai

Osaka Univ.

K.Hirota, K.Ogata, H.Kohri, M.Yosoi, T.Shima

KEK

C.C.Haddock, T.Ino, S.Ishimoto,
K.Taketani, K.Mishima

Univ. British Columbia

T.Momose
M.Iinuma
M.Fujita
H.Fujioka, Y.Tani
T.Iwata, Y.Miyachi
K.Asahi, Y.Yamagata
Y.I.Takahashi, M.Hino

Hiroshima Univ.

Tohoku Univ.

Tokyo Inst.Tech.

Yamagata Univ.

RIKEN

Kyoto Univ.

Indiana University

W.M.Snow, J.Curole, J.Carini

Univ. South Carolina

V.Gudkov

Oak Ridge National Lab.

J.D.Bowman, S.Penttila, X.Tong

Kentucky Univ.

B.Plaster, D.Schaper, C.Crawford

Paul Scherrer Institut

P.Hautle

Southern Illinois University

B.M.Goodson

Univ. California Berkeley

A.S.Tremsin

Berea College

M.Veillette



まとめ

電気双極子能率（EDM）は時間反転対称性を破れる

中性子EDM、原子EDM、分子EDMを通じて新物理を探る

複合核反応では空間反転対称性の破れが増幅されることがある

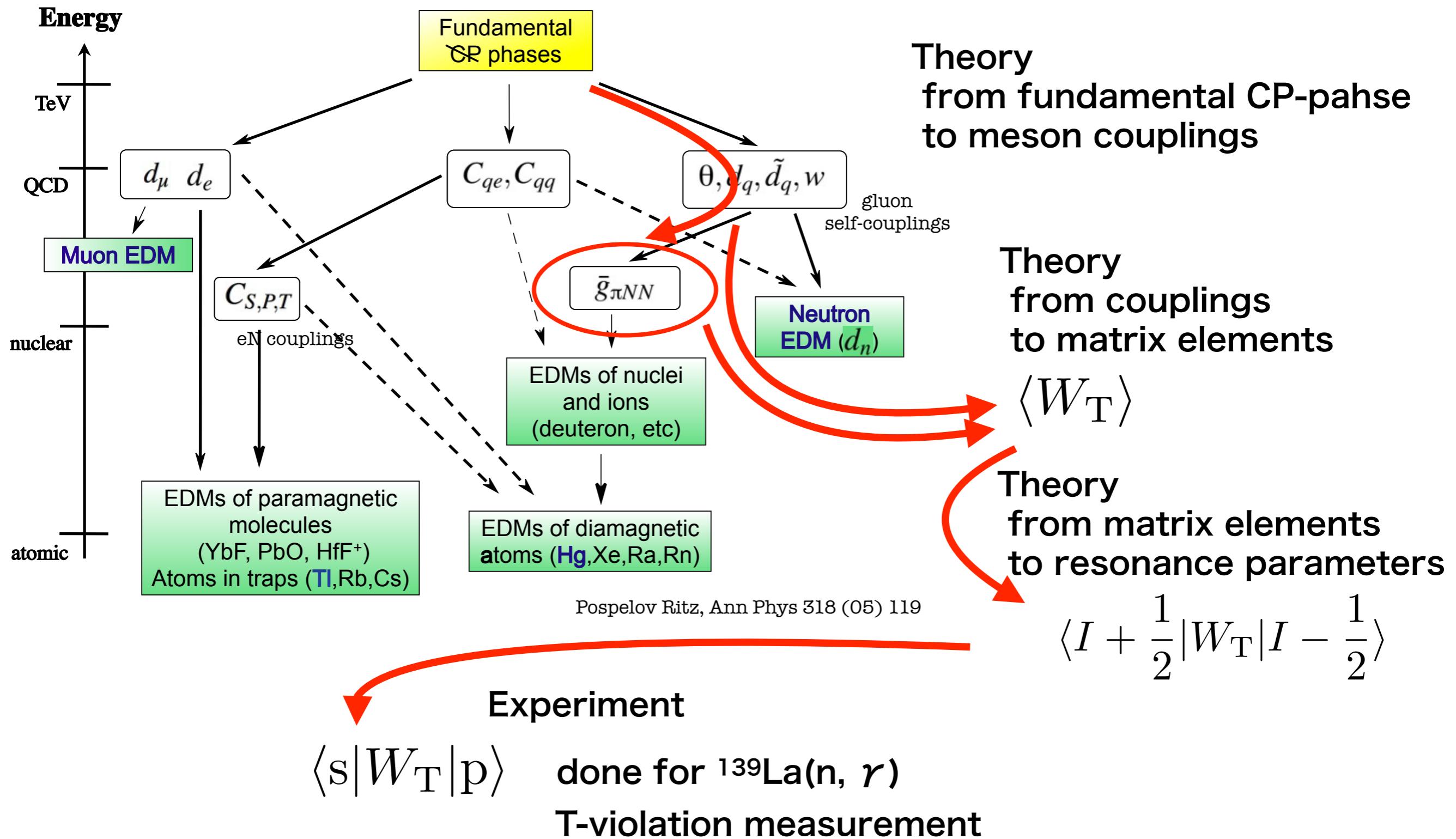
時間反転対称性の破れも増幅される可能性がある

^{139}La を用いた実験を計画、基礎研究が進行中

中性子偏極・偏極核標的が重要

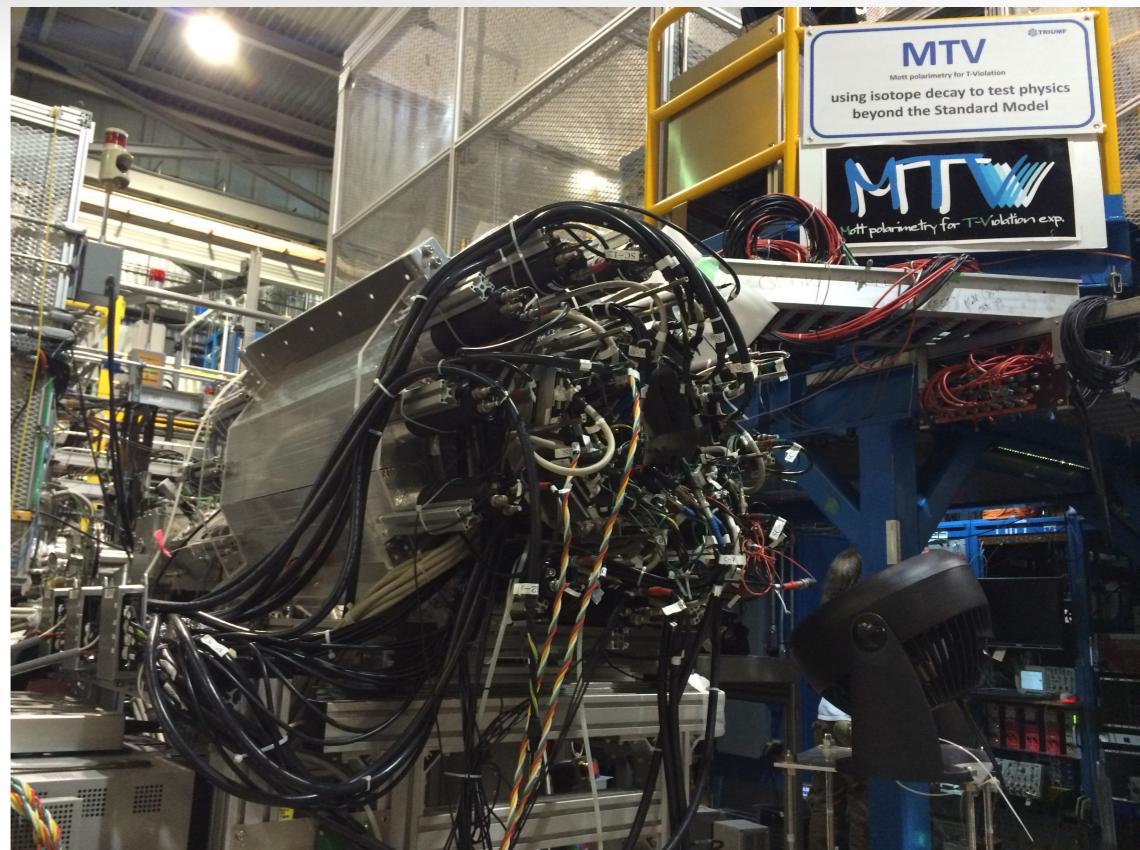
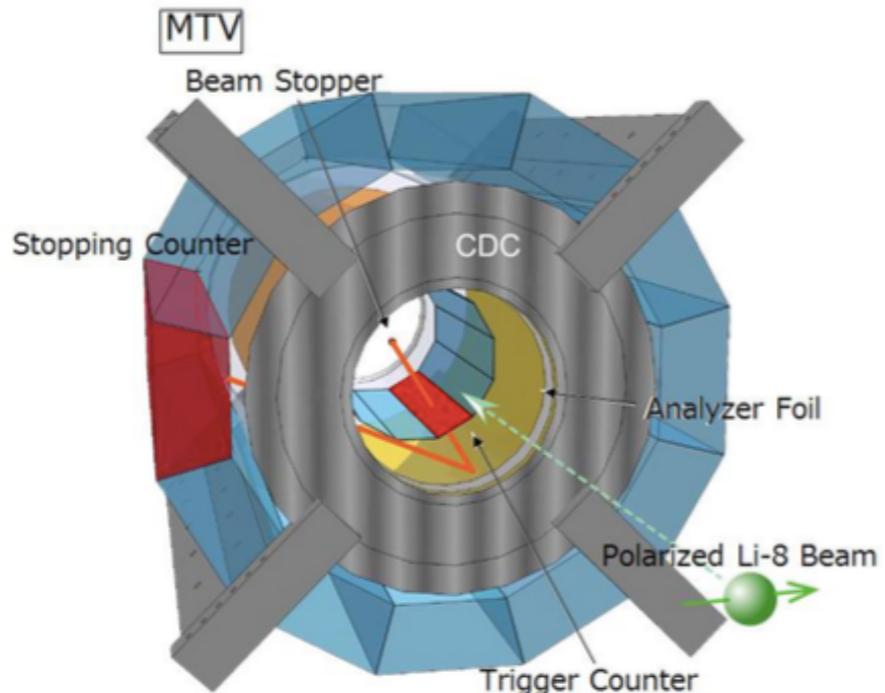
backup

T-odd Correlation in Compound Nuclei



ベータ崩壊角相関によるCPの破れの探索

偏極⁸Li
放出電子の
後方散乱の
偏りを測定



β 崩壊確率 : $\omega(\langle \vec{J} \rangle, \vec{\sigma} | dE_e, d\Omega_e) dE_e d\Omega_e$

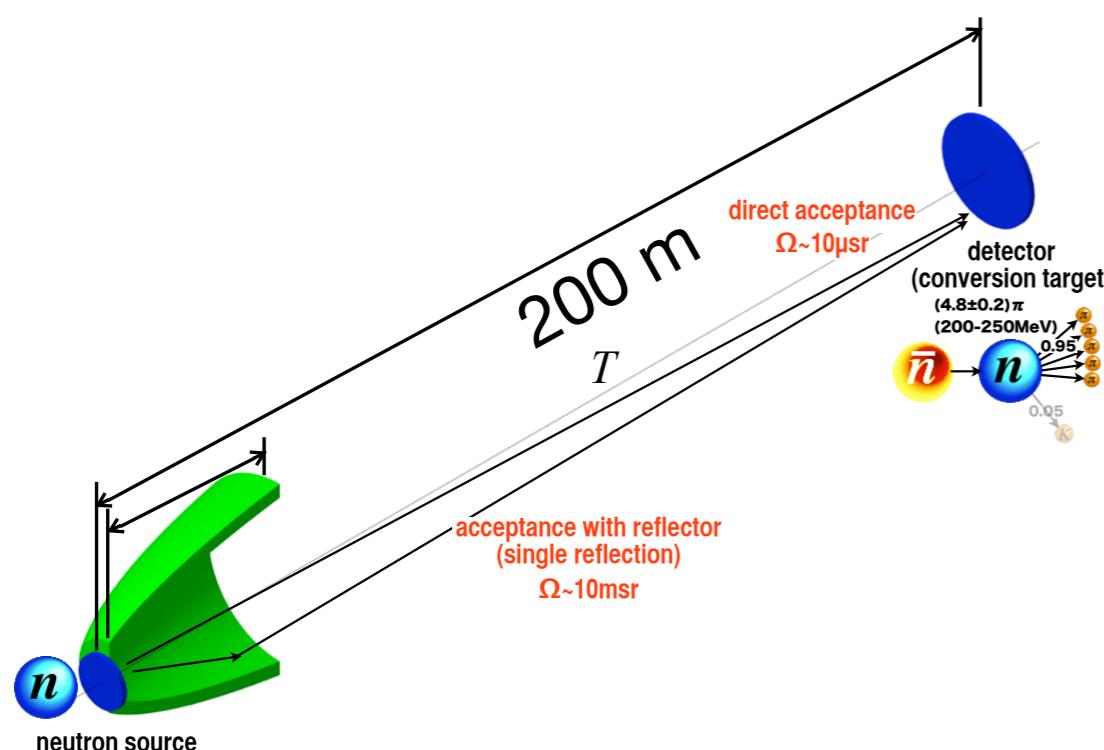
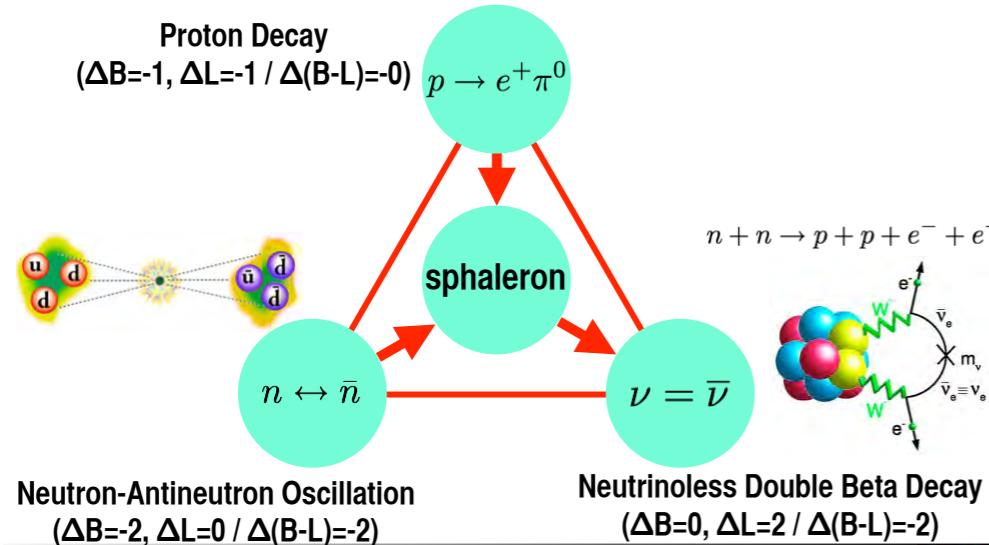
$$\begin{aligned}
 &= \frac{F(\pm Z, E_e)}{(2\pi)^4} p_e E_e (E^0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e \times \xi \left\{ 1 + b \frac{m}{E_e} + \left(A \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} + G \vec{\sigma} \right) \cdot \frac{\vec{p}_e}{E_e} \right. \\
 &\quad \left. + \vec{\sigma} \cdot \left[N \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} + Q \frac{\vec{p}_e}{E_e + m} \left(\frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \cdot \frac{\vec{p}_e}{E_e} \right) + \boxed{R \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \times \frac{\vec{p}_e}{E_e}} \right] \right\}
 \end{aligned}$$

E_e, p_e, m : 電子のエネルギー、運動量、質量
J : 原子核のスピン
 σ : 電子のスピン

R相関項は
T対象性を破る

中性子反中性子振動

Baryogenesis



$$\tau_{\text{bound}} = R \times \tau_{\text{free}}^2$$

Free Neutron vs Bound Neutrons NNbar Search Sensitivity Comparison

(see backup slides on complementarity of free and bound neutron search)

