



核共鳴蛍光散乱を用いた 核物理と応用

静間 俊行

量子科学技術研究開発機構

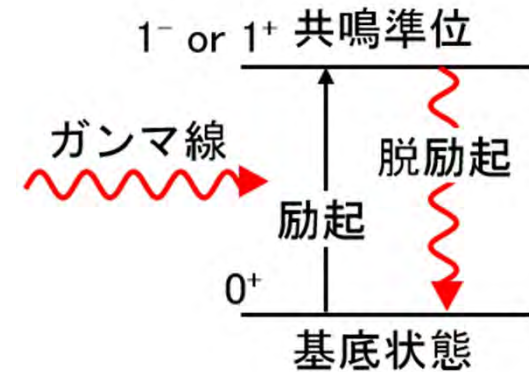
内容

- 核共鳴蛍光散乱について
- 直線偏光ガンマ線による多重極度 (E1/M1) 測定の原理
 Cr-52の測定例
- 共鳴吸収法を用いた分岐比の測定
 シザースモードM1遷移、Ta-181の測定例
- 非破壊核種分析
 共鳴吸収法を用いたAl-27の測定例
- まとめ

核共鳴蛍光散乱

(γ, γ') 反応、Nuclear Resonance Fluorescence

電磁気的な相互作用による核の励起及び脱励起過程



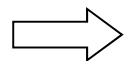
- 1- や 1+ 準位の選択的な励起

電気双極子(E1)遷移と磁気双極子(M1)遷移の観測

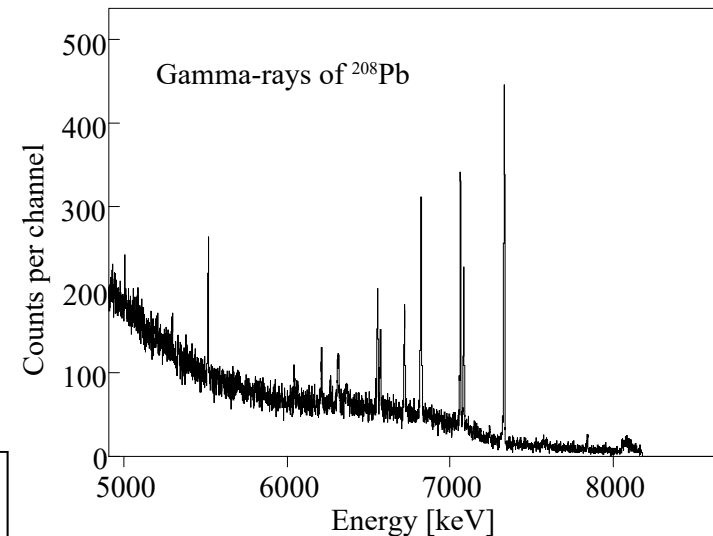
- 散乱強度から核模型に依らずに遷移確率を決定

$$\Gamma_0 = 8\pi \sum_{\Pi L=1}^{\infty} \frac{(L+1)(E_\gamma/hc)^{2L+1}}{L[(2L+1)!]^2} \frac{2J_0+1}{2J+1} B(\Pi L, E_\gamma) \uparrow$$

- 高純度Ge検出器を用いた高エネルギー分解能測定
 $\Delta E/E \sim 0.1\%$



レーザーコンプトンガンマ線を用いた中性子放出のしきい値以下の精密なE1/M1遷移データ

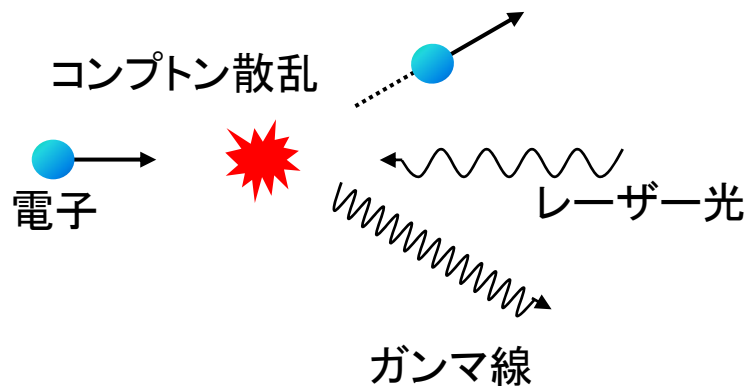


*T. Shizuma et al.,
Phys. Rev. C 78, 061303(R) (2008)*

レーザーコンプトンガンマ線

高エネルギー電子とレーザー光との相対論的コンプトン散乱によって
得られる高品質のガンマ線ビーム

特徴: 準単色、エネルギー可変、高い直線偏光度



ガンマ線エネルギー(正面衝突の場合)

$$E_{\gamma} \approx 4\gamma^2 E_l$$

ex. $E_e=670\text{MeV}$, $E_l=4.6\text{eV}(\lambda=1064\text{nm})$

→ $E_{\gamma} \sim 8\text{MeV}$

直線偏光ガンマ線の角度分布

$$W(\theta, \phi) = W(\theta) + (\pm)L_1' \sum_{\nu} A_{\nu}'(\gamma_1) A_{\nu}(\gamma_2) P_{\nu}^{(2)}(\cos \theta) \cos(2\phi)$$

$W(\theta)$: Angular correlation for unpolarized photons

θ : Angle between the incident and scattered photons

ϕ : Angle between the electric field vector of the incident photon beam and the plane of the scattered photons

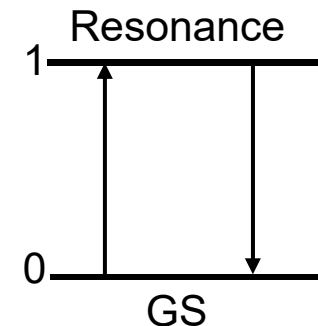
$(\pm)L_1'$: +1 for electric and -1 for magnetic transitions L_1'

$P_{\nu}^{(2)}$: Unnormalized associated Legendre polynomials

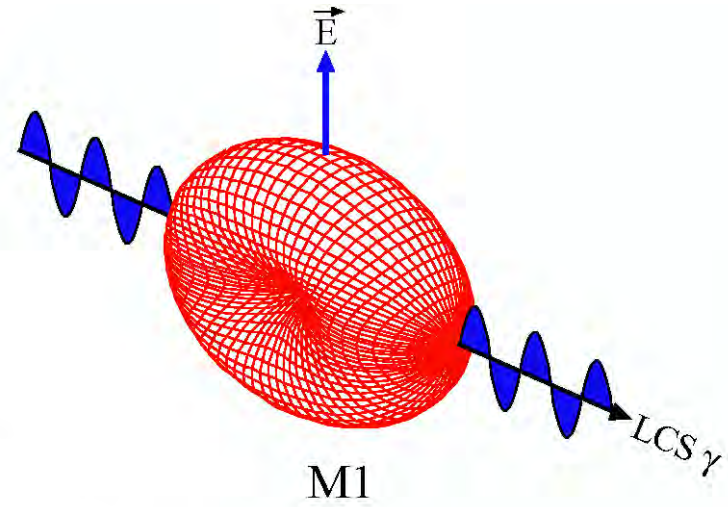
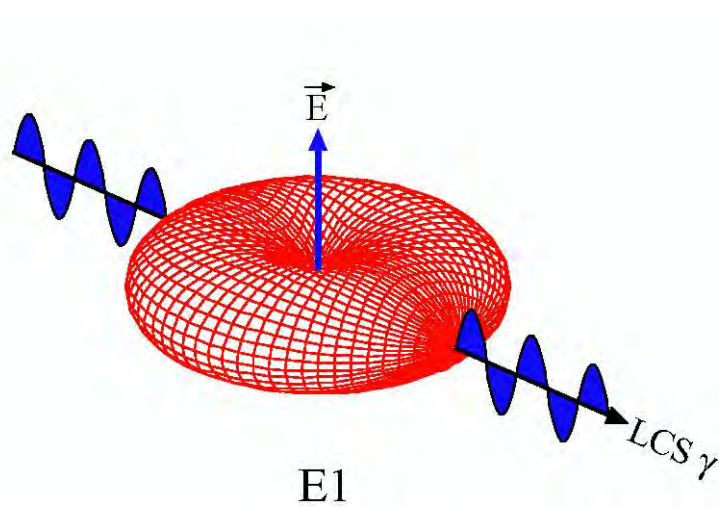
For $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ spin sequence in even-even nuclei

$$W(\theta, \phi)_{dipole} = W(\theta)_{dipole} \pm \frac{3}{4} (1 - \cos^2 \theta) \cos 2\phi$$

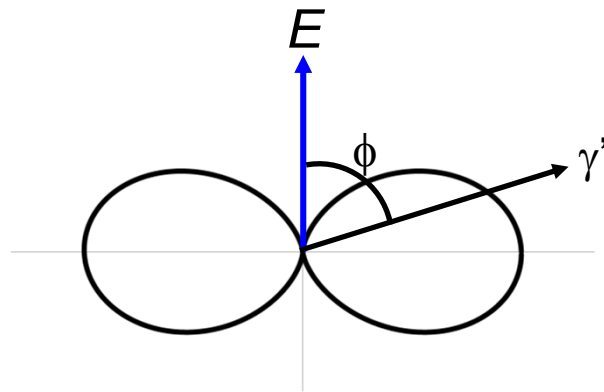
plus sign for M1, minus sign for E1



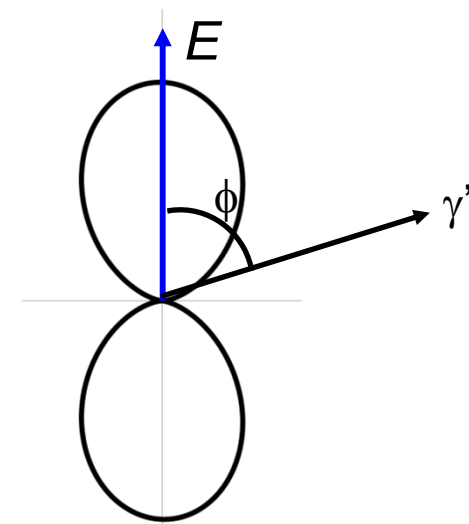
E1/M1遷移ガンマ線の角度分布



At $\theta=90^\circ$



maximum at $\phi=90^\circ$ or 270°
 minimum at $\phi=0^\circ$ or 180°



maximum at $\phi=0^\circ$ or 180°
 minimum at $\phi=90^\circ$ or 270°

多重極度の測定原理

Sensitivity of the polarization effects to the angular correlation is maximum at the scattering angle θ of 90 degrees.

For $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ spin sequence in even-even nuclei

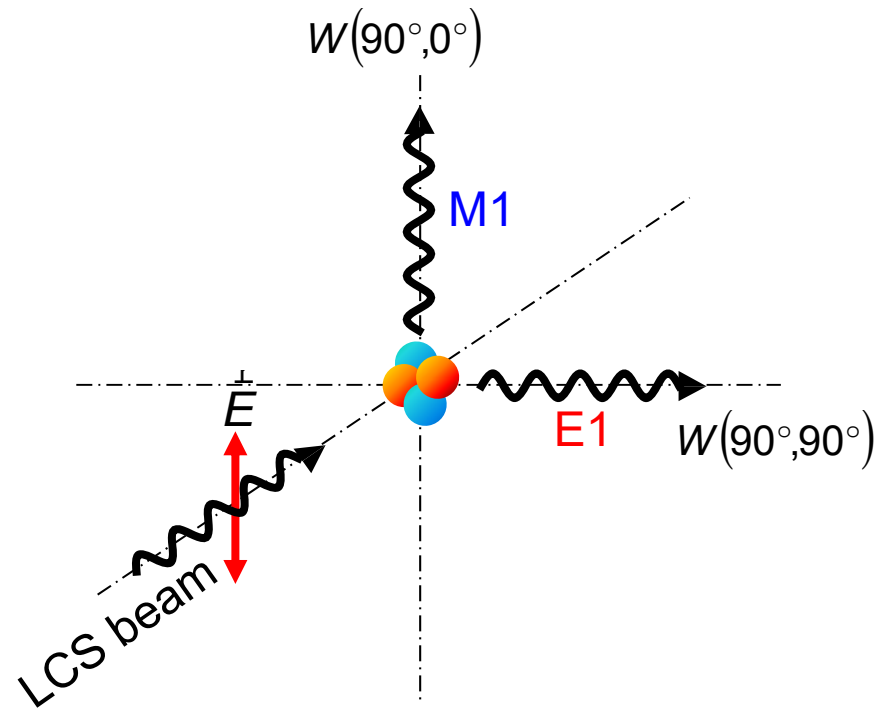
$$W(90^\circ, \phi)_{dipole} = \frac{3}{4} \pm \frac{3}{4} \cos 2\phi \quad \text{plus sign for M1, minus sign for E1}$$

$W(\theta, \phi)$	E1	M1
$W(90^\circ, 0^\circ)$	0	1.5
$W(90^\circ, 90^\circ)$	1.5	0

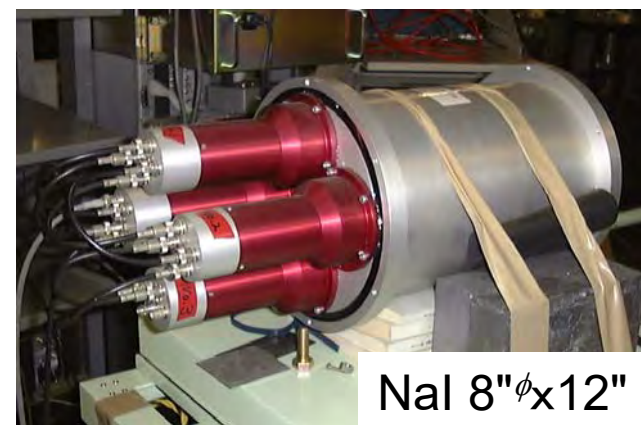
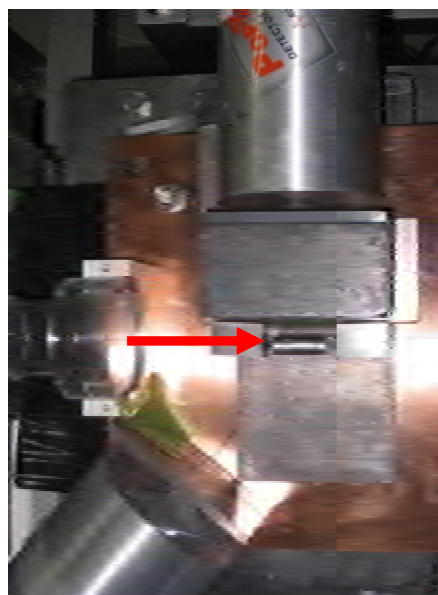
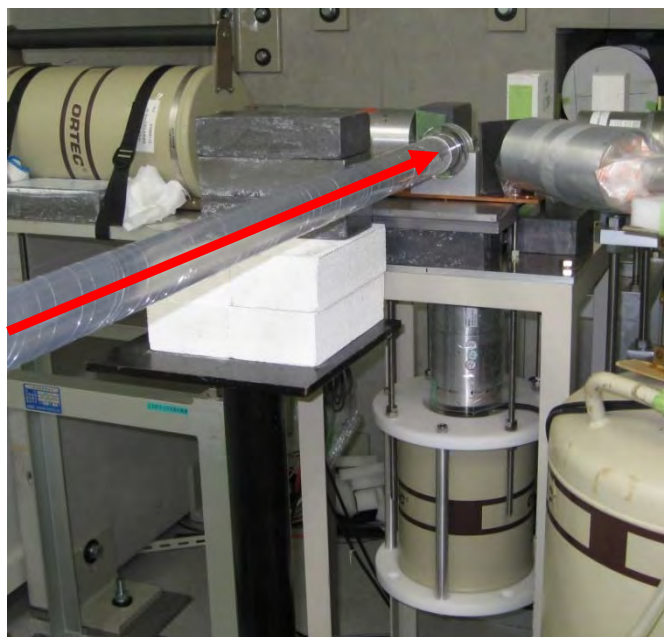
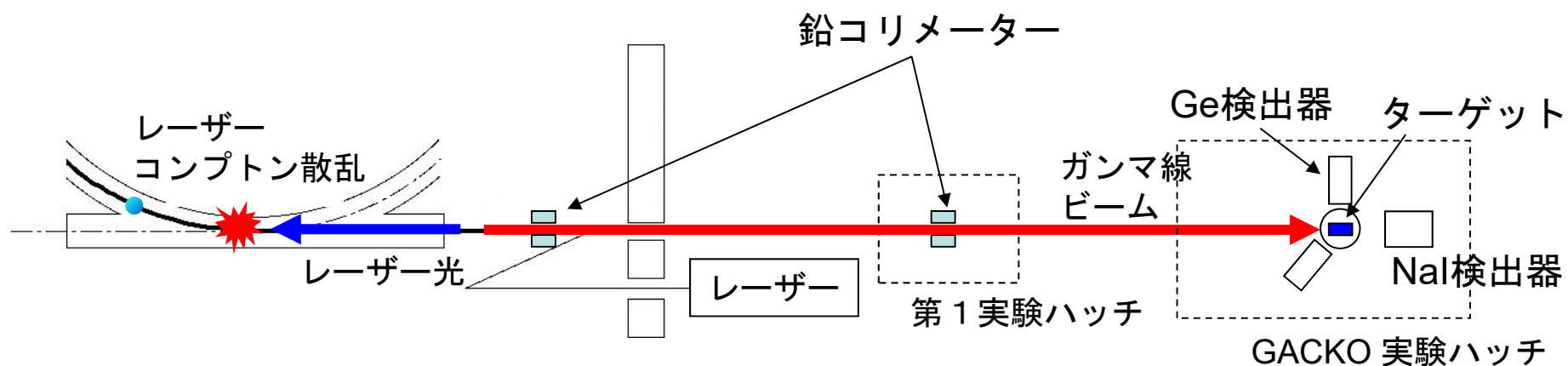
Intensity asymmetry

$$A = \frac{W(90^\circ, 0^\circ) - W(90^\circ, 90^\circ)}{W(90^\circ, 0^\circ) + W(90^\circ, 90^\circ)}$$

$$= \begin{cases} +1 & \text{for M1 transition} \\ -1 & \text{for E1 transition} \end{cases}$$



ニュースバル放射光施設での測定 (^{52}Cr)



散乱ガンマ線スペクトル

電子ビーム :

$E_e = 672 \sim 817 \text{ MeV}$ 、 $I = 100 \sim 200 \text{ mA}$

レーザー :

Nd:YVO₄、波長1064nm、出力 $\sim 20 \text{ W}$ 、繰り返し20 kHz

● New γ
● Known γ
○ ○ ○ Escape peak

$E_\gamma^{\text{max}} = 9.4 \text{ MeV}$

LCSガンマ線:

$E_\gamma(\text{max}) = 8.2, 8.8, 9.4, 10, 11, 12 \text{ MeV}$

$\Delta E/E \sim 5\%$ (FWHM)

$N_\gamma \sim 6 \times 10^5 / \text{s}$

ターゲット :

natCr(⁵²Cr:84%)、サイズ10mm ϕ x 30mm

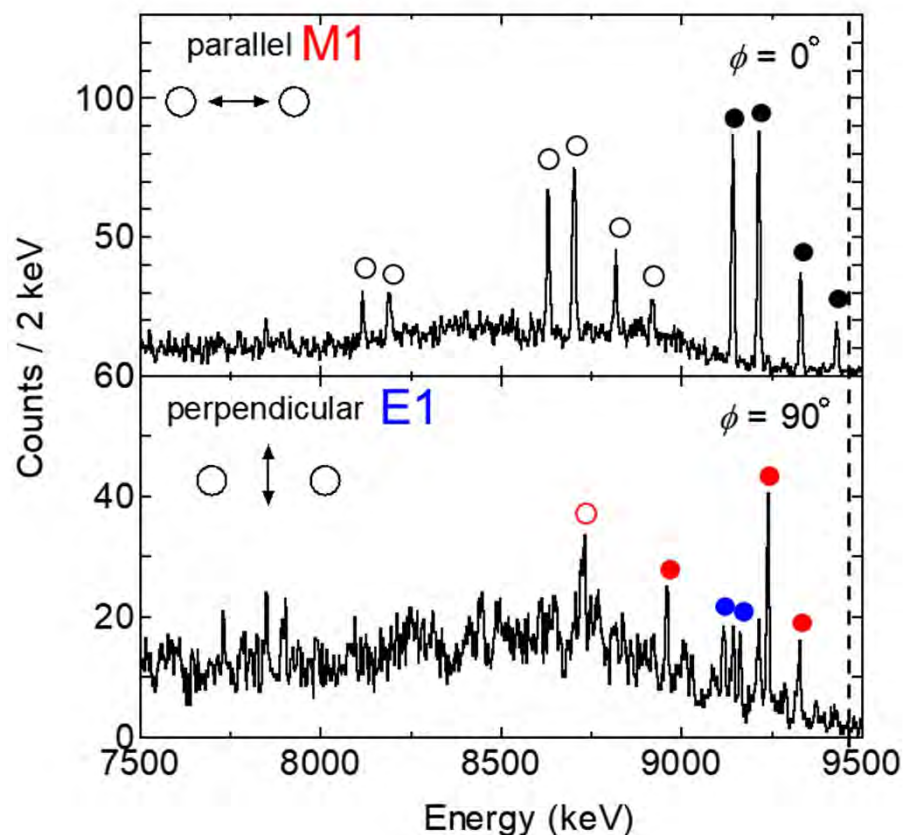
ガンマ線検出器 :

高純度Ge検出器3台(100%, 120%, 140%)

散乱角90, 130度に設置

ガンマ線強度モニター :

NaIシンチレーター (8" ϕ x 12")



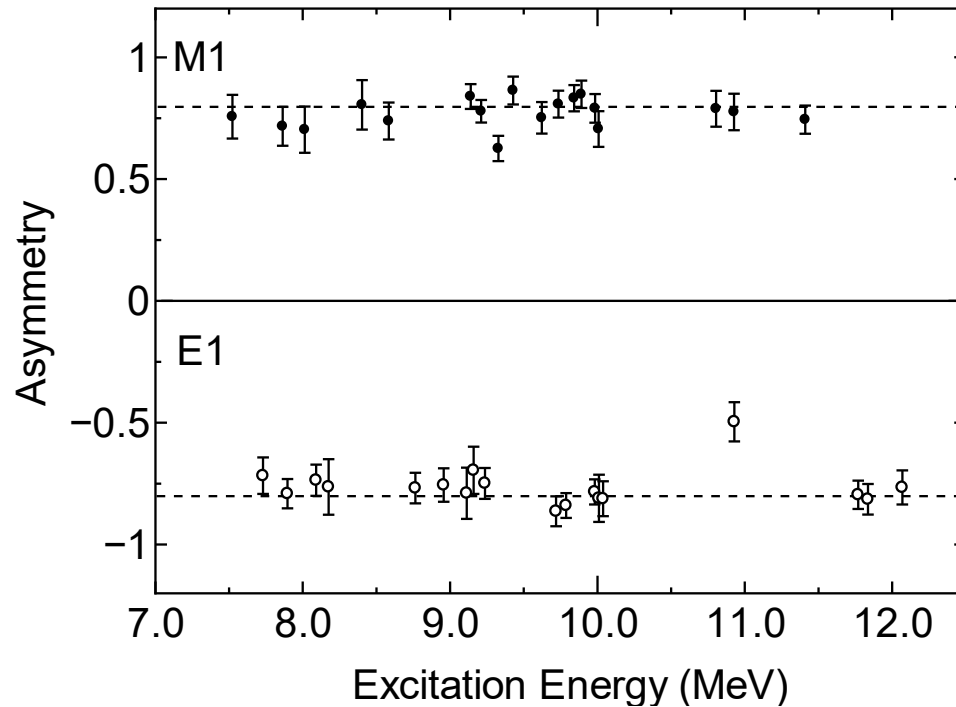
多重極度(E1/M1)の決定

偏光面に対する散乱ガンマ線強度の非対称度

$$A = \frac{\sigma(90^\circ, 0^\circ) - \sigma(90^\circ, 90^\circ)}{\sigma(90^\circ, 0^\circ) + \sigma(90^\circ, 90^\circ)} = q \frac{W(90^\circ, 0^\circ) - W(90^\circ, 90^\circ)}{W(90^\circ, 0^\circ) + W(90^\circ, 90^\circ)} = \pm q$$

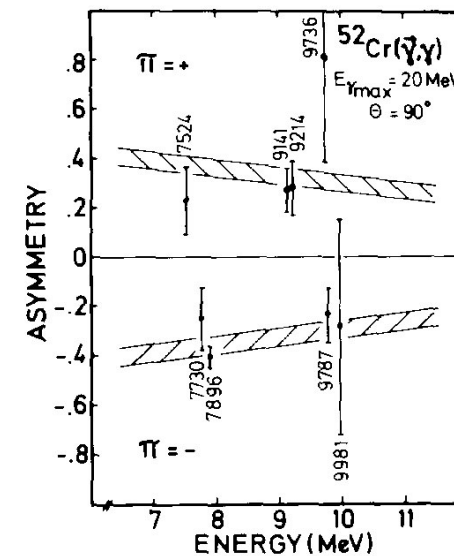
EGS5 simulation $q=0.8$

$$A = \begin{cases} +0.8 & \text{for } M1 \text{ transition} \\ -0.8 & \text{for } E1 \text{ transition} \end{cases}$$



Off-axis bremsstrahlung

Berg et al., Phys. Lett. 103B, 301, 1981.



E1、M1遷移強度(崩壊幅)

積分散乱断面積 I_s

$$\frac{I_s}{I_s^{ref}} = \frac{I_\gamma}{I_\gamma^{ref}} \frac{[WN_\gamma N_t \varepsilon \lambda]^{ref}}{WN_\gamma N_t \varepsilon \lambda}$$

I_γ : 散乱ガンマ線の強度
 W : 角度分布関数
 N_γ : 入射ガンマ線強度
 N_t : ターゲット数
 ε : 検出効率

$$I_s = \frac{2J+1}{2J_0+1} \left(\frac{\pi \hbar c}{E} \right)^2 \frac{\Gamma_0^2}{\Gamma}$$

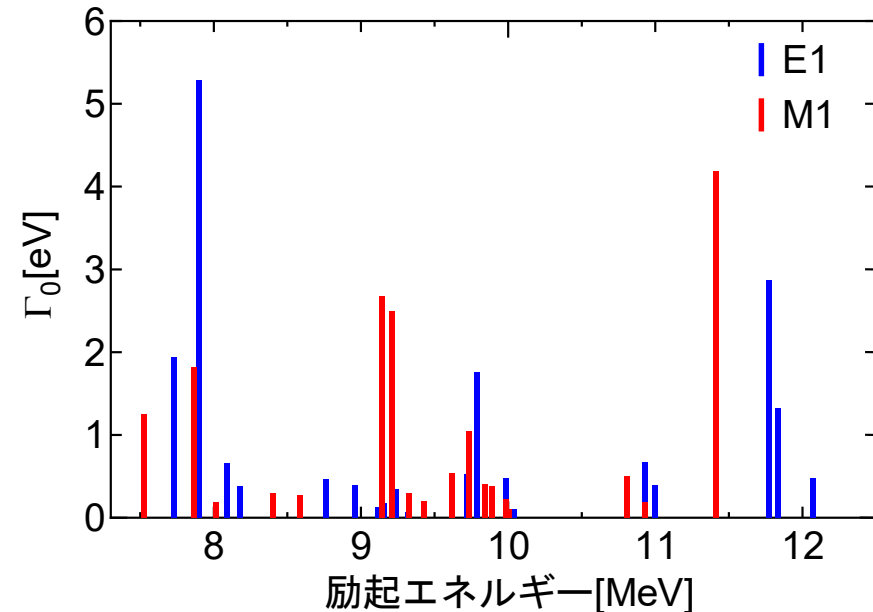
吸収の度合い λ

atomic & self-absorptionを考慮

$$\lambda = \frac{1}{\int \sigma_0 \psi N_t dE} \times \int \frac{\sigma_0 \psi}{\sigma_0 \psi + \sigma_e} \{1 - \exp[-N_t(\sigma_0 \psi + \sigma_e)]\} dE$$

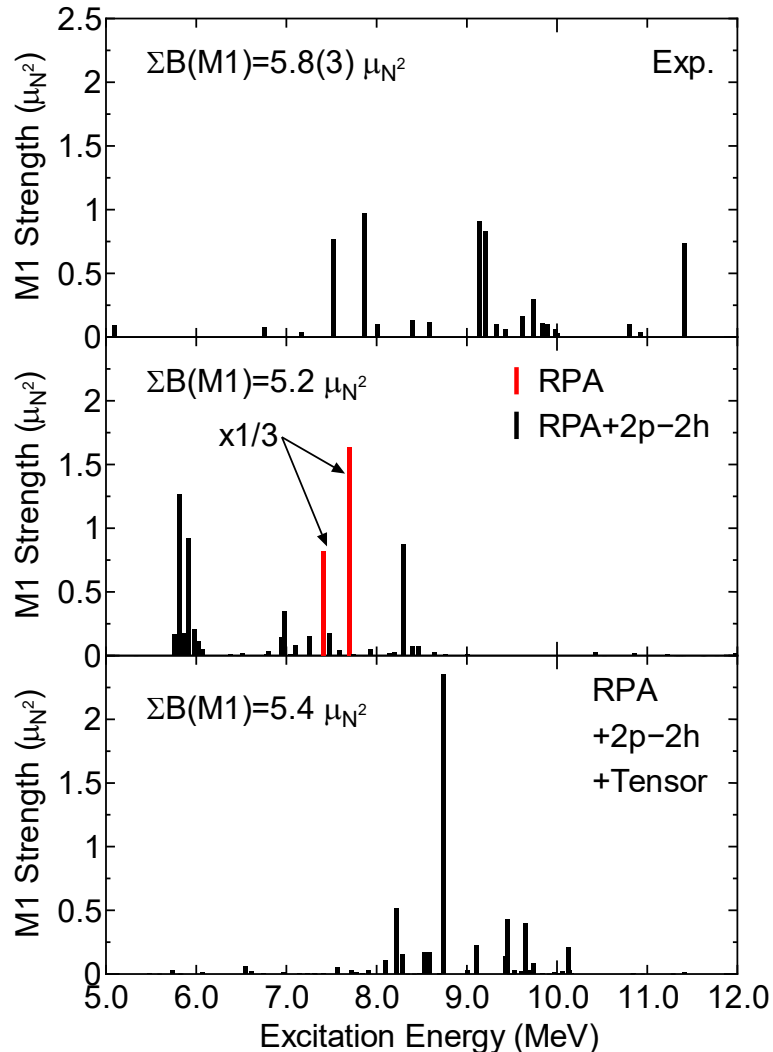
$\sigma_0 \psi$: ドップラー拡がりを含むNRF断面積

σ_e : ターゲットの散乱断面積(atomic)



- 観測された38本(7-12MeV)の双極子遷移の内、16遷移が既知で、本測定において、新たに22遷移を観測し、多重極度及び遷移強度を決定した。
- E1遷移：22本、M1遷移：16本
- $\Sigma \Gamma_0(E1) = 18.5(8) \text{ eV}$ 、 $\Sigma \Gamma_0(M1) = 17.1(7) \text{ eV}$

M1遷移強度の計算値(RPA)との比較



Calculated by F.Minato(JAEA)

RPA(SGII)

7.4MeV: $\pi 1f_{7/2} \rightarrow 1f_{5/2}$

7.7MeV: $\nu 1f_{7/2} \rightarrow 1f_{5/2}$

RPA(SGII)+2p2h

8.3MeV: 52.1% $\pi(1f_{5/2})\pi(1f_{7/2})^{-1}$ +47% 2p2h conf.

RPA(SGII)+2p2h+tensor

8.7MeV: 34.8% $\pi(1f_{5/2})\pi(1f_{7/2})^{-1}$ +62% 2p2h conf.

- 2p2h配位混合により、M1強度が分散する。
- テンソル力加わることにより、励起エネルギーが高い方へシフトする。

$$\Sigma B(M1)^{\text{exp.}}=5.8(3)\mu_N^2$$

$$\Sigma B(M1)^{\text{cal.}}=5.4\mu_N^2$$

T. Shizuma et al., Phys. Rev. C 96 044316 (2017)

変形核のM1遷移

磁気双極子(M1)遷移オペレーター

$$T(M1)_{IV} = \frac{1}{2} \left(\overset{\uparrow}{L}_p - \overset{\uparrow}{L}_n \right) + 4.71 T(M1)_{\Delta T_z=0}$$

軌道成分 スピン成分 (スピントリップ)

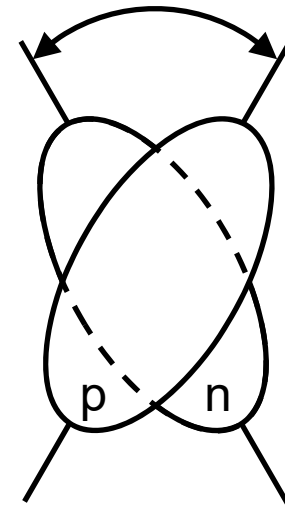
電子散乱(e,e') や核共鳴蛍光散乱(γ, γ') において、変形核(希土類、アクチナイド)の励起エネルギー2~4 MeVで観測

D.Bohle *et al.*, Phys. Lett. 137B, 27 (1984).

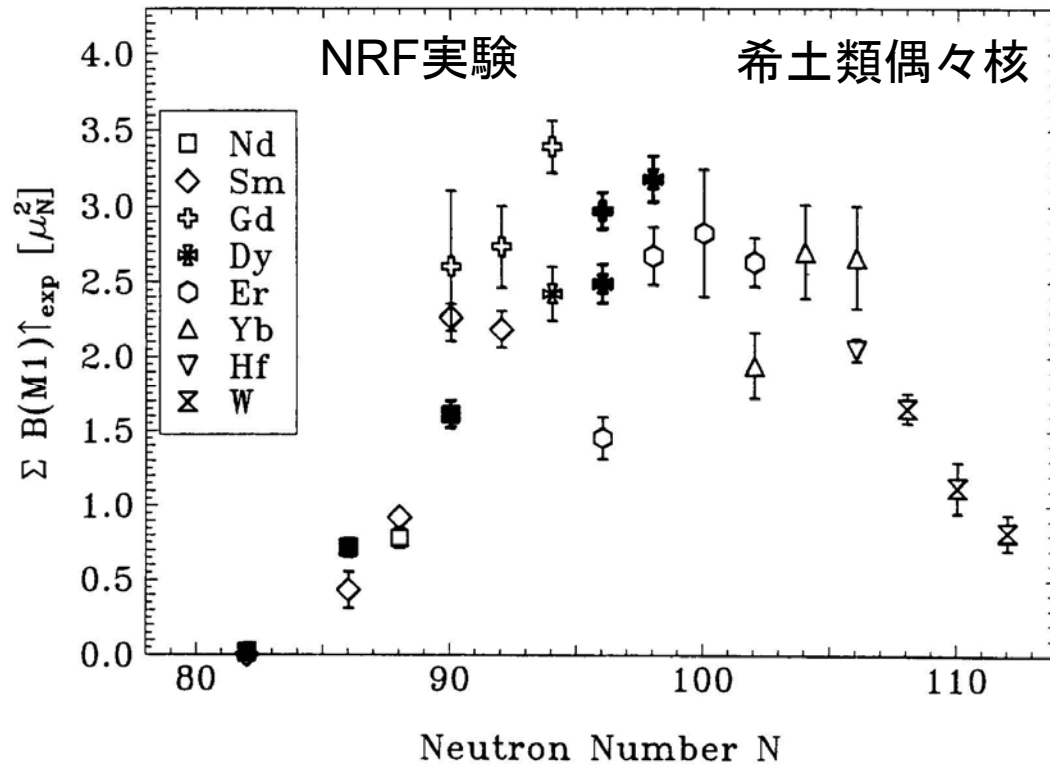
U.Berg *et al.*, Phys. Lett. 140B, 191 (1984).

四重極変形した陽子と中性子のハサミ状振動に起因

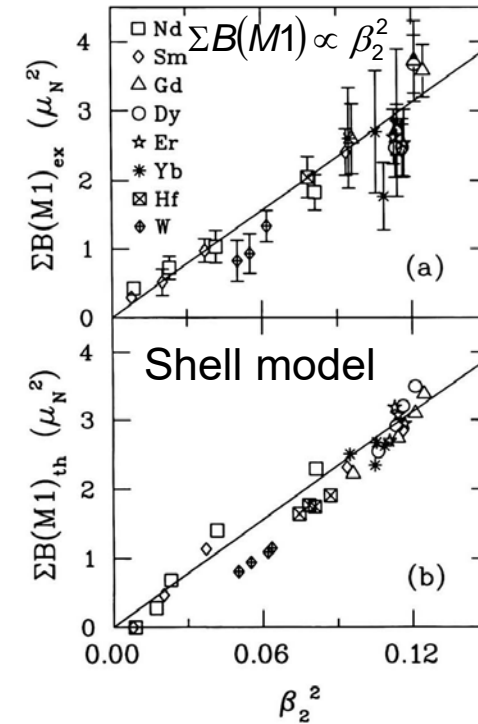
⇒ シザースモード



希土類偶々核のシザーズM1遷移強度



U.Kneissl *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. 37, 349 (1996).



P. von Neumann-Cosel *et al.*,
Phys. Rev. Lett. 75, 4178
(1996).

- 変形した希土類核の全M1遷移強度 $\Sigma B(M1) \approx 3\mu_N^2$
- 変形度との相関関係: $\Sigma B(M1) \propto \beta_2^2$

強いM1遷移強度の観測

^{163}Dy : $^{162}\text{Dy}(n,\gamma)$, $\Sigma B(M1) = 6.2\mu_N^2$

M.Krticka *et al.*, Phys. Rev. Lett. 92, 172501 (2004).

^{172}Yb : $^{173}\text{Yb}(^3\text{He},\alpha\gamma)$, $\Sigma B(M1) = 6.5(15)\mu_N^2$

A.Schiller *et al.*, Phys. Lett. B 633, 225 (2006).

$^{151,153}\text{Sm}$: $^{152,154}\text{Sm}(p,d\gamma)$, $\Sigma B(M1) = 7.3\mu_N^2$

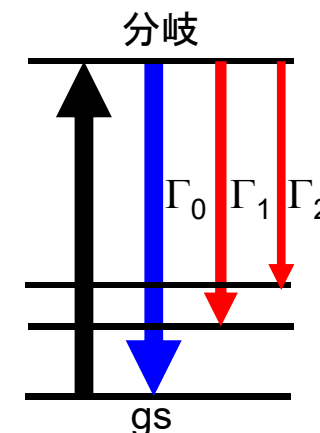
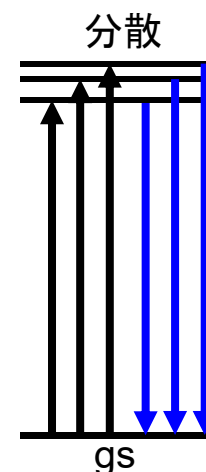
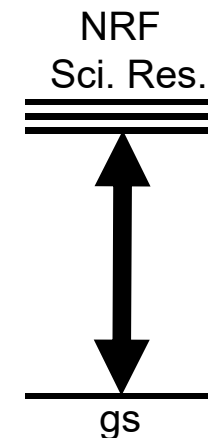
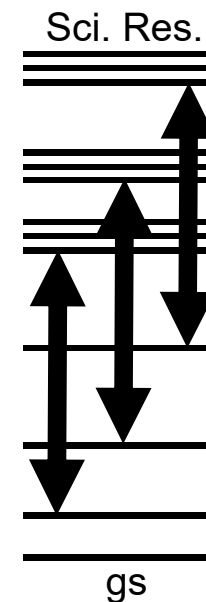
A.Simon *et al.*, Phys. Rev. C 93, 034303 (2016).

- 核共鳴蛍光散乱で得られた全M1遷移強度の約2倍
- 励起状態に基づくシザースモード励起

核共鳴散乱実験では、共鳴準位の分散 (fragmentation) や遷移の分岐 (branching) により、個々の遷移強度が小さくなり、観測が困難になる。

$$\text{基底状態への分岐比: } b_0 = \frac{\Gamma_0}{\Gamma}$$

$$b_0\Gamma_0$$

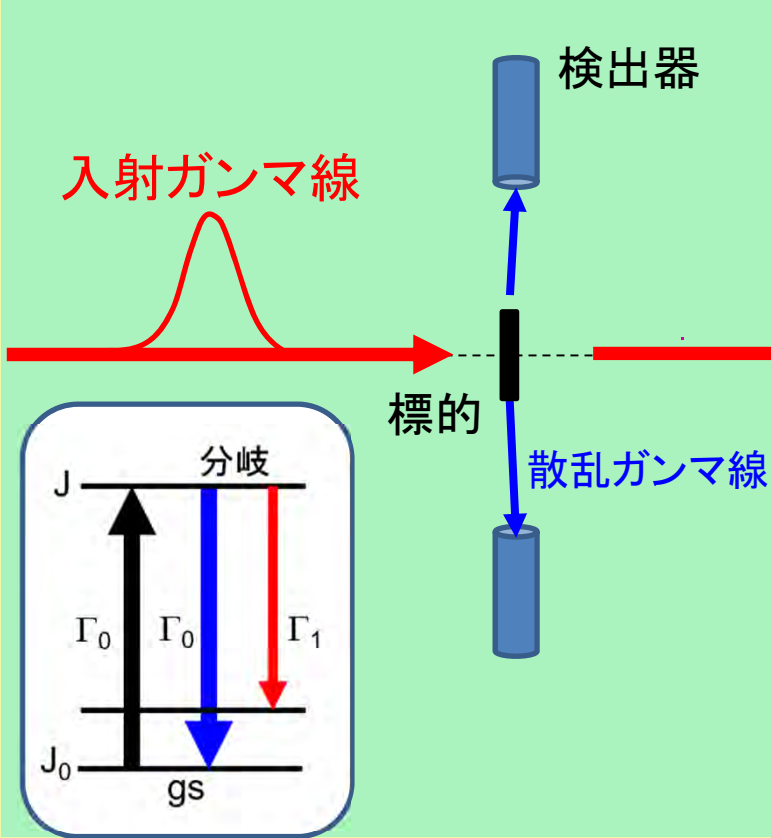


共鳴吸収を用いた分岐比の測定

散乱法

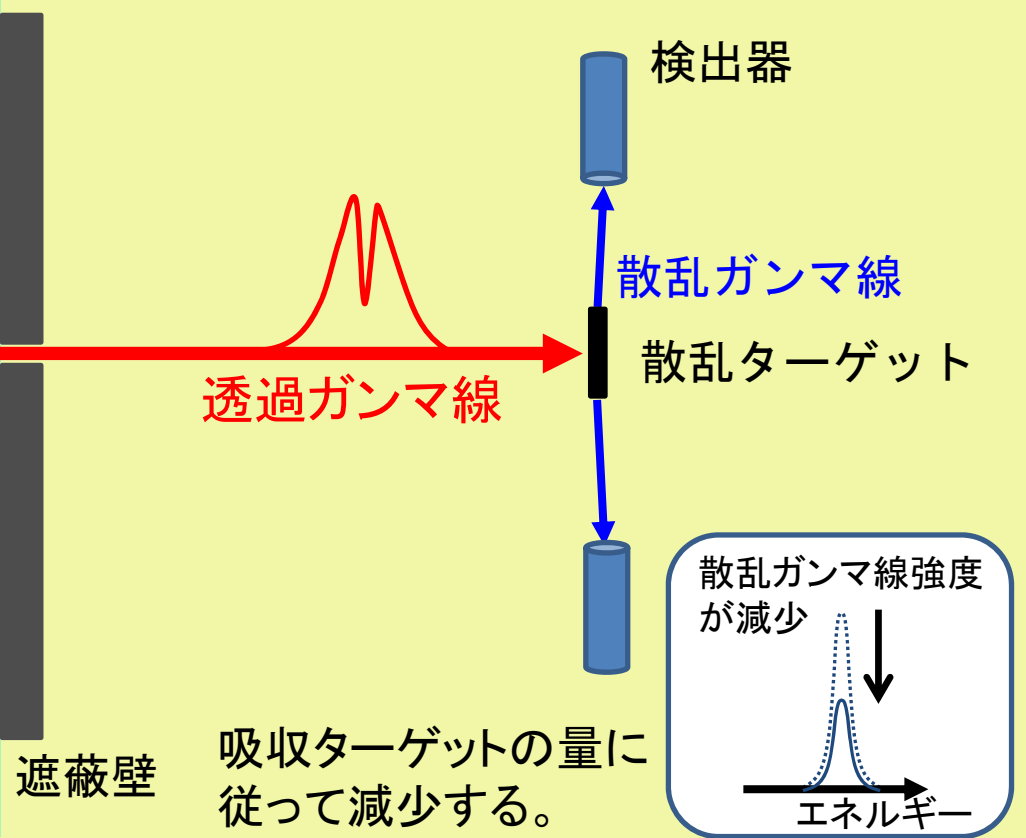
標的から放出される散乱ガンマ線を直接測定

$$\rightarrow b_0 \Gamma_0$$



共鳴吸収法

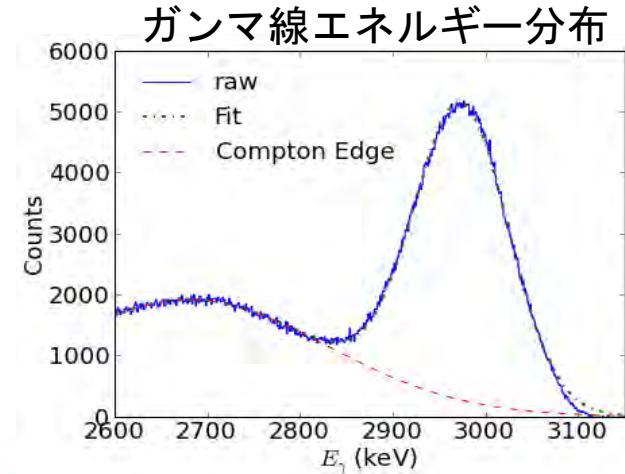
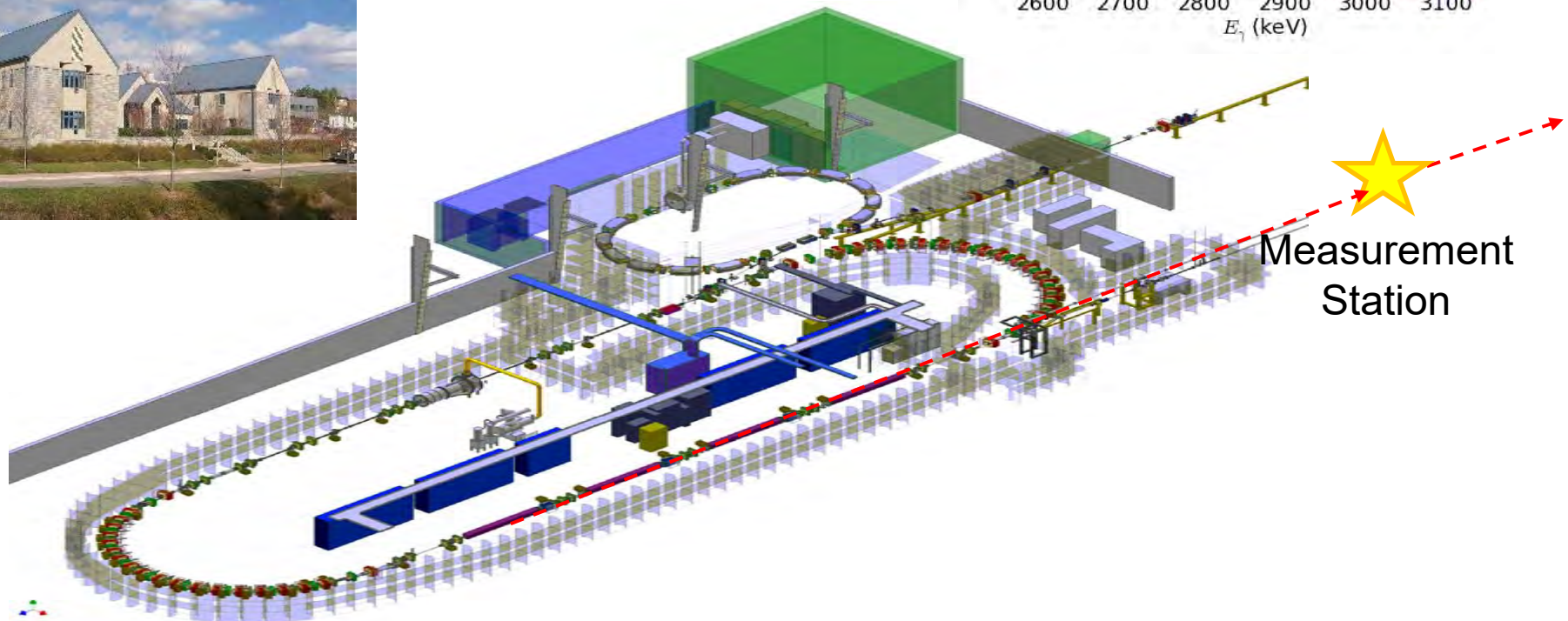
標的(吸収ターゲット)を透過したガンマ線を標的と同じ物質から成る試料(散乱ターゲット)に照射し、散乱ターゲットから放出される散乱ガンマ線を測定 $\rightarrow \Gamma_0$



デューク大HI γ S施設での測定例 (^{181}Ta)

High Intensity γ -ray Source (HI γ S) :

- ガンマ線エネルギー : 1.8–60 MeV
- ガンマ線強度 : 10^{6-7} /s
- エネルギー半値幅 (約4%)
- 偏光度 : 100% (直線、円偏光)



^{181}Ta の共鳴吸収実験

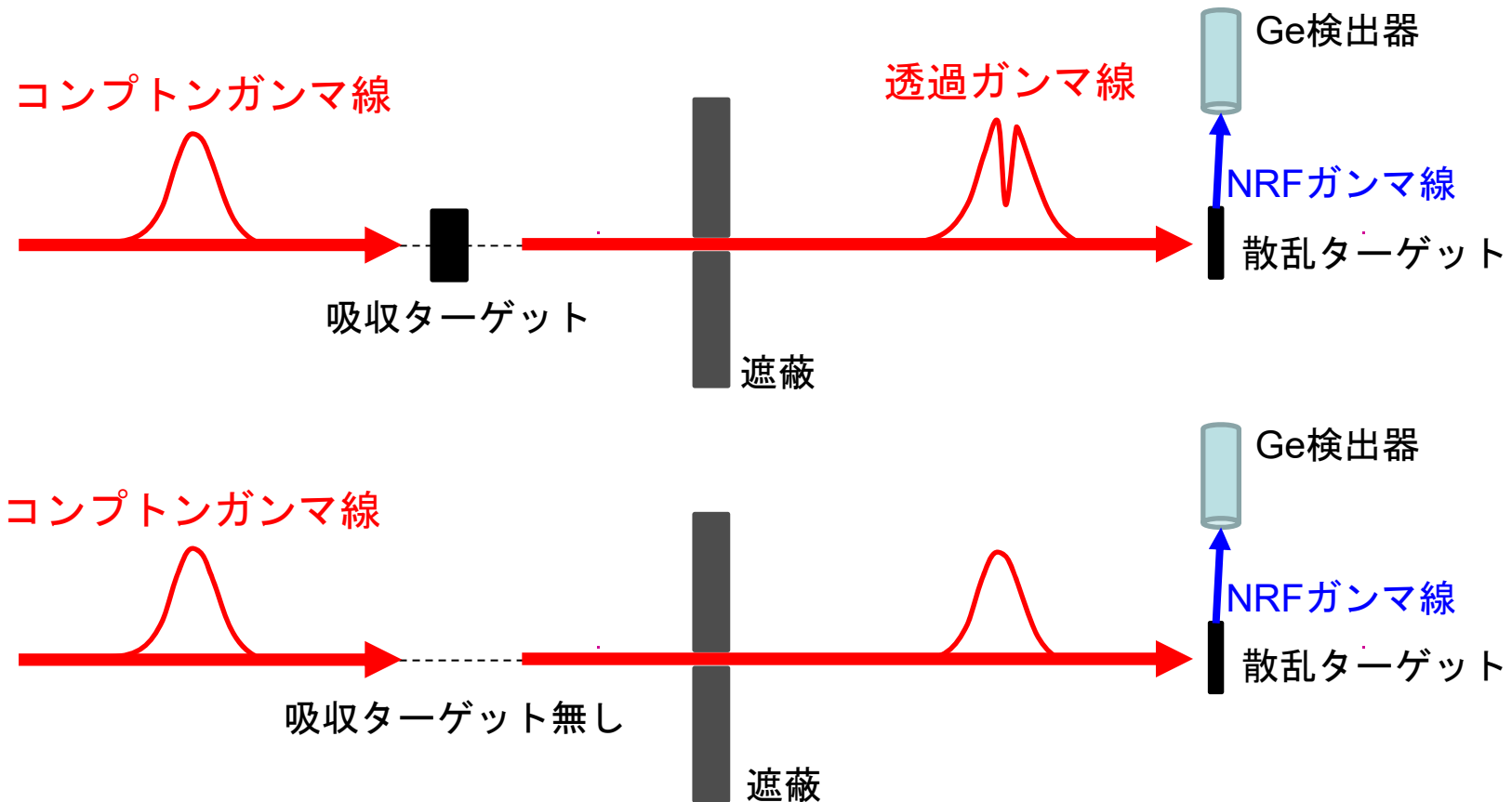
コンプトンガンマ線ビーム

エネルギー: $E \sim 2.28$ and 2.75 MeV

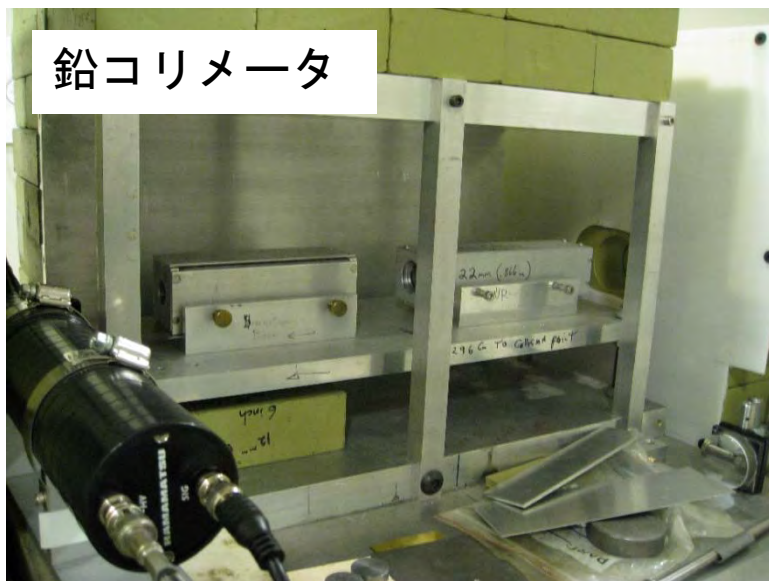
エネルギー幅: $\Delta E/E \sim 3.5\%$

吸収ターゲット: Ta-181 (20mmのTa板)

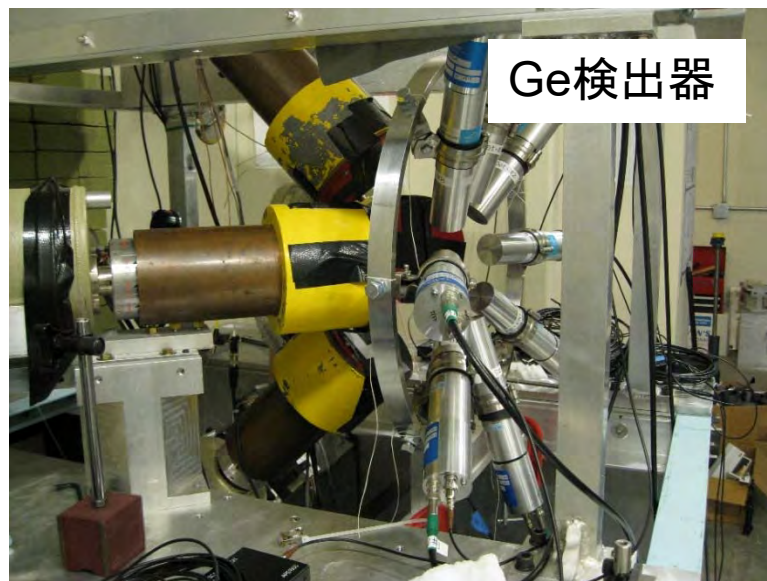
散乱ターゲット: Ta-181 (7.4mmのTa板)



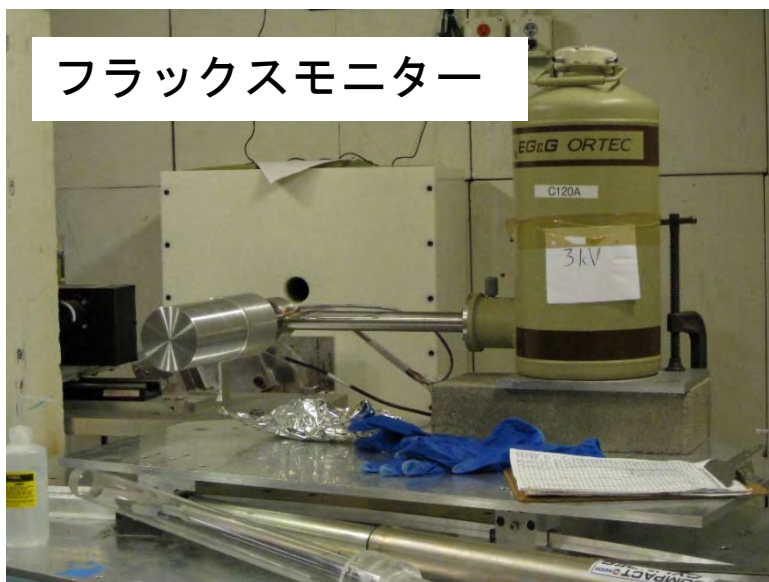
鉛コリメータ



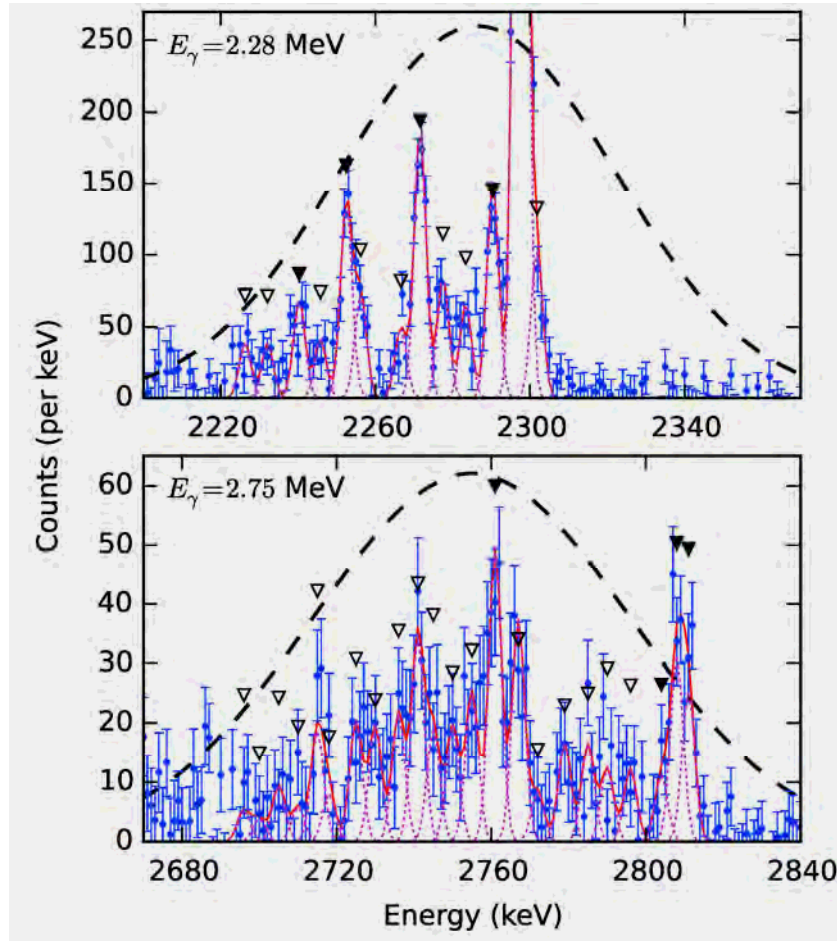
Ge検出器



フラックスモニター



共鳴散乱ガンマ線スペクトル



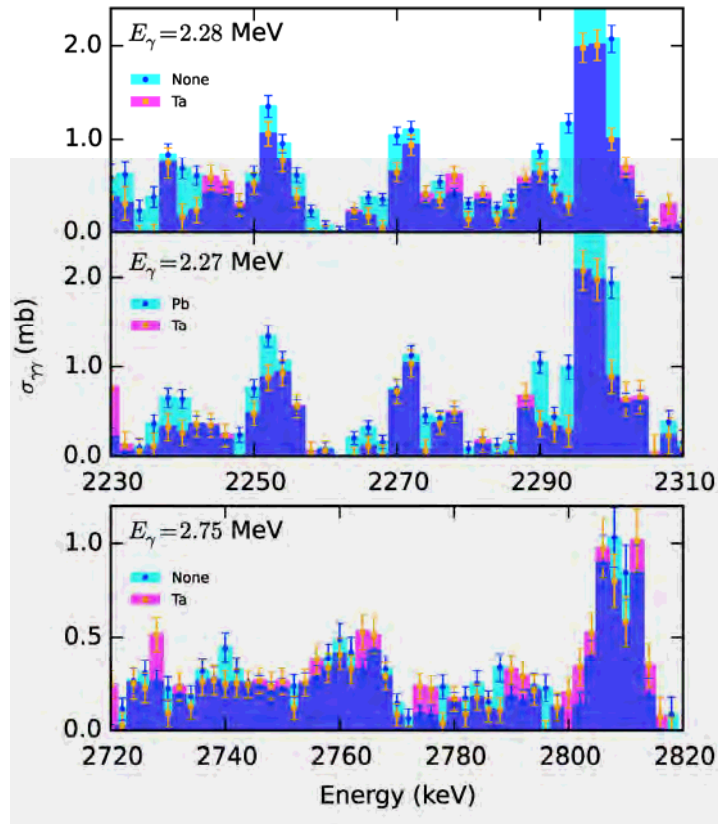
吸収ターゲット無し
(散乱ターゲットのみ)

2.22~2.35 MeVと2.68~2.84 MeV
領域において、10本の既知の散
乱ガンマ線を確認し、新たに30本
の散乱ガンマ線を観測

2.22~2.35 MeV領域では、これまで
より、2.8倍($33 \pm 4 \text{ eV b}$)、2.68~2.84
MeV領域では、3.0倍($28 \pm 1 \text{ eV b}$)
のM1強度が得られ、共鳴準位に強い
分散があることがわかった。

分岐比の測定結果

散乱強度



シアン: 吸収ターゲット無し
 マゼンタ: 吸収ターゲット有り
 青: シアンとマゼンタの重なり部
 シアン-青: 共鳴吸収

分岐比

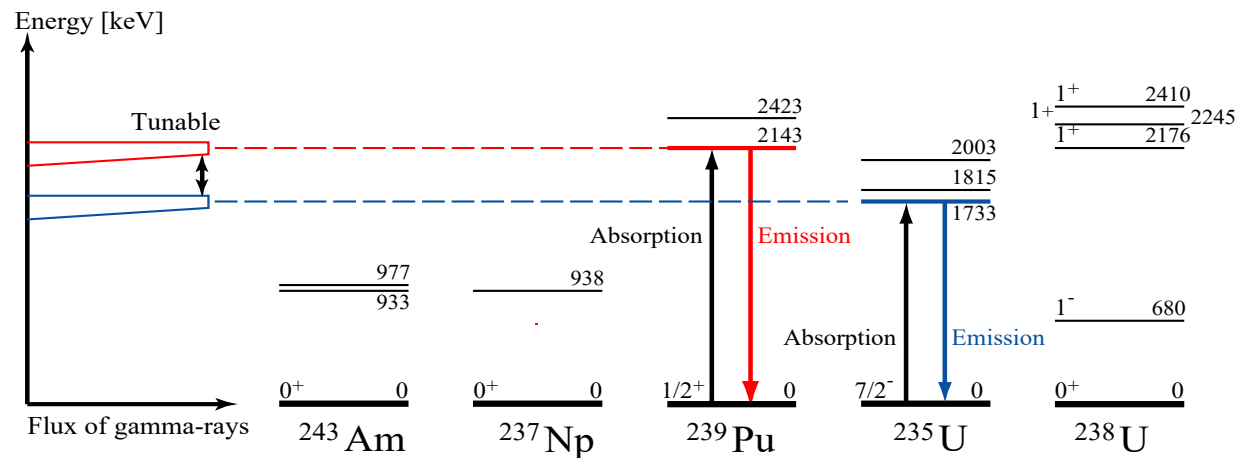
E_γ (MeV)	$R(n_a)$	$\langle I_{cs} \rangle^*$ (eV b)	$\langle b_0 I_{cs} \rangle^*$ (eV b)	$\langle b_0 \rangle$
2.28	0.32 ± 0.07	12 ± 3	2.9 ± 0.3	$0.25^{+0.10}_{-0.06}$
2.75	0.14 ± 0.07	4 ± 2	1.8 ± 0.1	$0.5^{+0.7}_{-0.2}$

- 全崩壊幅の75%や50%の大きな強度で、励起準位へ遷移
- 2~4MeVの領域で同様な分岐パターンを仮定すると、 $\Sigma B(M) \approx 2 \times \Sigma B(M)^{sys}$

核共鳴蛍光散乱を用いた非破壊核種分析

Nuclear resonance fluorescence (NRF)

核種の識別が可能



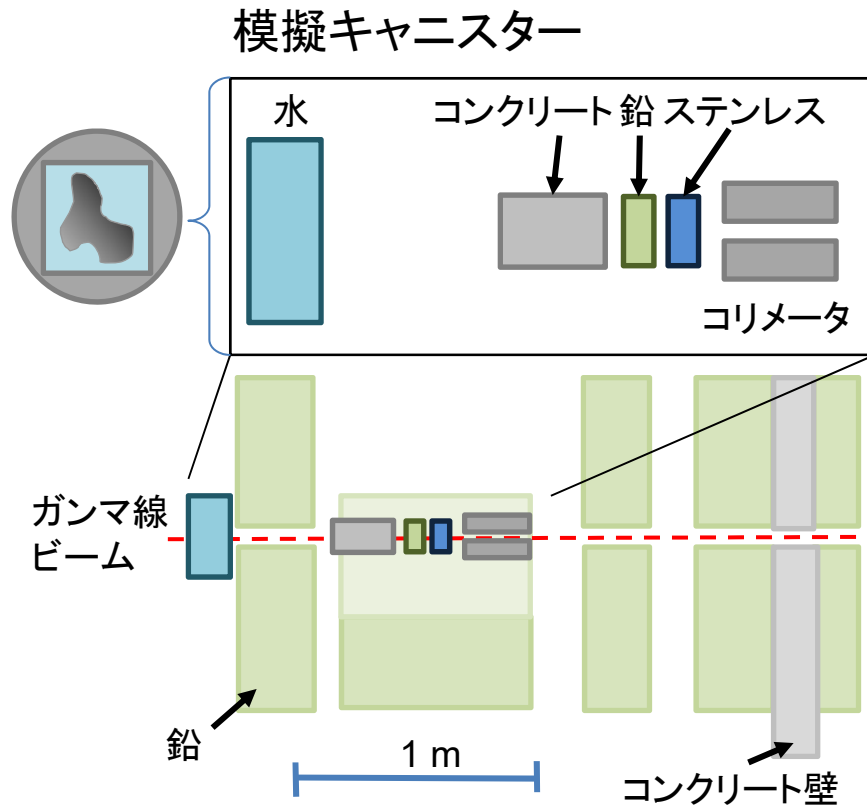
高エネルギー(MeV領域)ガンマ線 = 高い透過力

⇒ 重金属などで遮蔽された核物質や爆発物等の検知に適用可能

R.Hajima, et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008).

- レーザーコンプトンガンマ線発生技術
エネルギー回収型リニアック+レーザー蓄積装置
- 共鳴散乱ガンマ計測技術
測定手法、原理実証実験

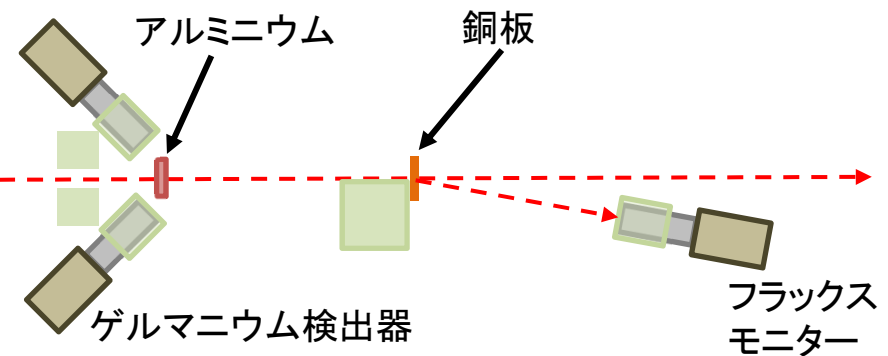
共鳴吸収法の実証試験 (^{27}Al)



吸収ターゲット: アルミニウム、コンクリート、
模擬キャニスター

- ウランの模擬物質として鉛を使用
- キャニスターが水中にある場合を想定して吸収体に水を追加

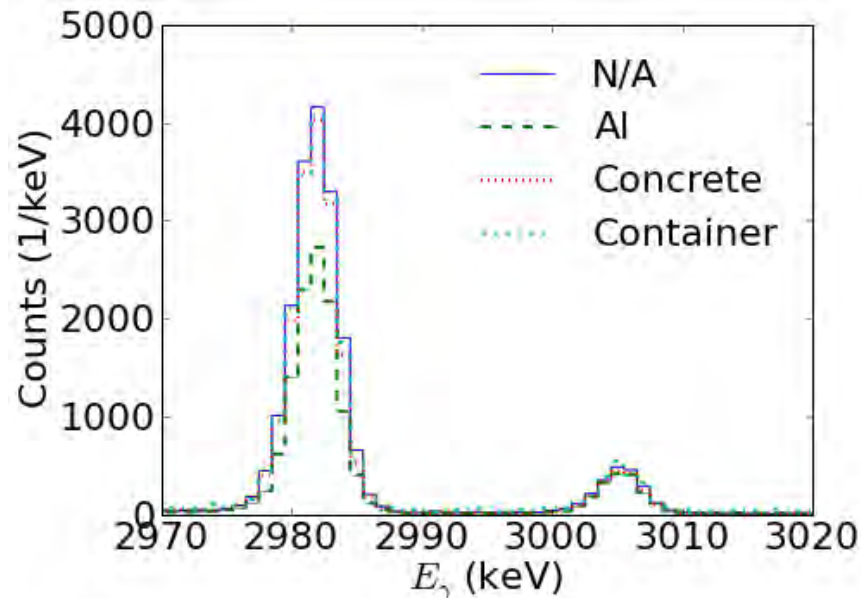
- アルミニウム散乱ターゲットからの共鳴散乱ガンマ線を4台のゲルマニウム検出器を用いて測定
- 銅板でコンプトン散乱した透過ガンマ線ビームをモニター検出器で測定し、入射ガンマ線ビームのフラックスを測定



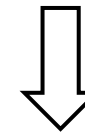
吸収体	厚さ(cm)
アルミニウム	2.5
コンクリート	10.9
ステンレス	2.5
鉛	3.2
水	15.2

測定結果

共鳴散乱ガンマ線スペクトル



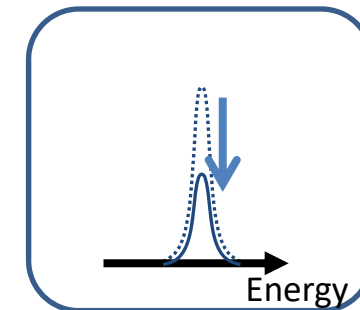
- アルミニウム吸収ターゲットの場合のみ、共鳴散乱ガンマ線のピーク強度が減少
- 模擬キャニスターと吸収体無しの場合の結果がほぼ一致



測定は模擬キャニスターを構成する遮蔽物質に影響されない

アルミニウムの2982keV準位に対する吸収比

吸収体	計算値	実験値
模擬キャニスター	0	0.01±0.01±0.03
コンクリート	0.04±0.01	0.05±0.01±0.02
アルミニウム	0.345±0.006	0.358±0.005±0.02



非破壊での定量的な分析に対しても、共鳴吸収法が有効

まとめ

- レーザーコンプトンガンマ線を用いた核共鳴蛍光散乱実験
- 直線偏光を利用したE1/M1分離計測
高精度での多重極度の決定、弱いM1遷移の観測
- 共鳴吸収法による分岐比の測定
全崩壊幅の決定
- 散乱法、共鳴吸収法を用いた非破壊核種分析への応用

これまでの核共鳴蛍光散乱実験(偶々核、奇核)では、多重極度や分岐比の測定例が少なく、正確なM1遷移強度がわかっていない。

- 共鳴吸収法を用いた分岐比の測定
- 直線偏光ガンマ線を用いた多重極度(M1、E1)測定