

Gd熱中性子捕獲ガンマ線の 精密測定と計算モデルの構築

Takatomi Yano, Kobe University

Collaborators:

M.Sakuda, K.Hagiwara, Y.Yamada, P.Das, I.Ou, T.Mori, Y.Koshio (Okayama),
A.Kimura, H.Harada, N.Iwamoto, S.Nakamura (JAEA)

2016/1/7 第二回超新星ニュートリノ研究会

Outline

1. Introduction

- $Gd(n, \gamma)$ reaction
- Application in neutrino experiments
- $Gd(n, \gamma)$ models

2. Experiment

- Measuring gamma-ray from $Gd(n, \gamma)$

3. Analysis

- Geant4 detector modeling
- A new code for $Gd(n, \gamma)$ modeling
- Comparison with Experiment and Model

4. Summary

Introduction

Gd(n, γ) reaction

- 安定原子核の中で**Gd-157**は最大の熱中性子捕獲断面積を持つ。Gd-155も同様に大きな断面積をもっている。
 - 天然同位体比はどちらも~15%程。
- どちらの熱中性子捕獲反応も、計8MeVのガンマ線カスケードを放出する。

Reaction	Cross-section (barn)
$n+p \rightarrow d+\gamma$ (2.2MeV)	0.3326
$n+{}^6\text{Li} \rightarrow \alpha+{}^3\text{He}$	940
$n+{}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha+{}^7\text{Li}$	3837
$n+{}^{155}\text{Gd} \rightarrow {}^{156}\text{Gd}+\gamma$	60,900
$n+{}^{157}\text{Gd} \rightarrow {}^{158}\text{Gd}+\gamma$	254,000

良く使われる中性子遮蔽材料

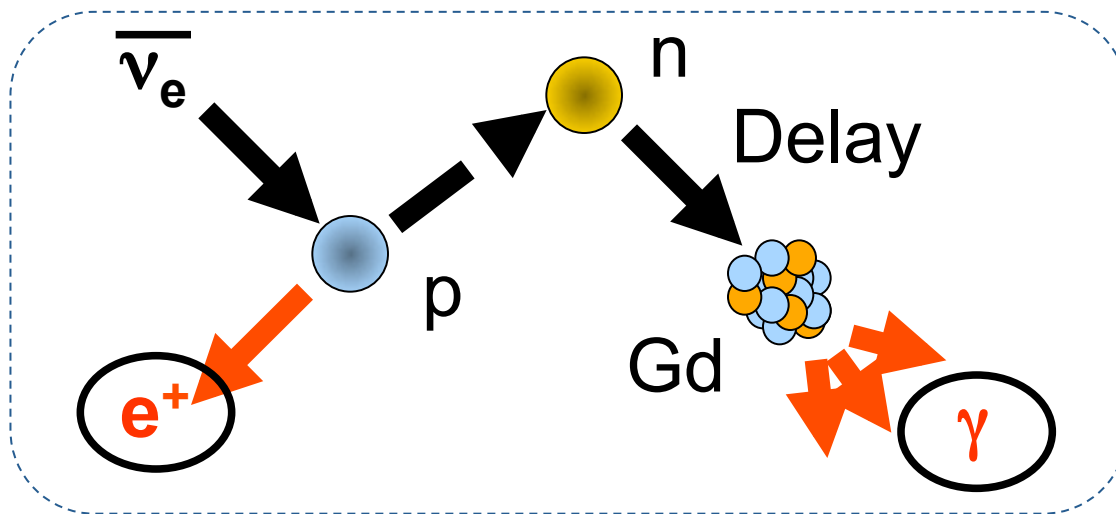
×15 ~ ×250
Cross-section!



Introduction (2)

ニュートリノ実験におけるGd(n, γ)の応用

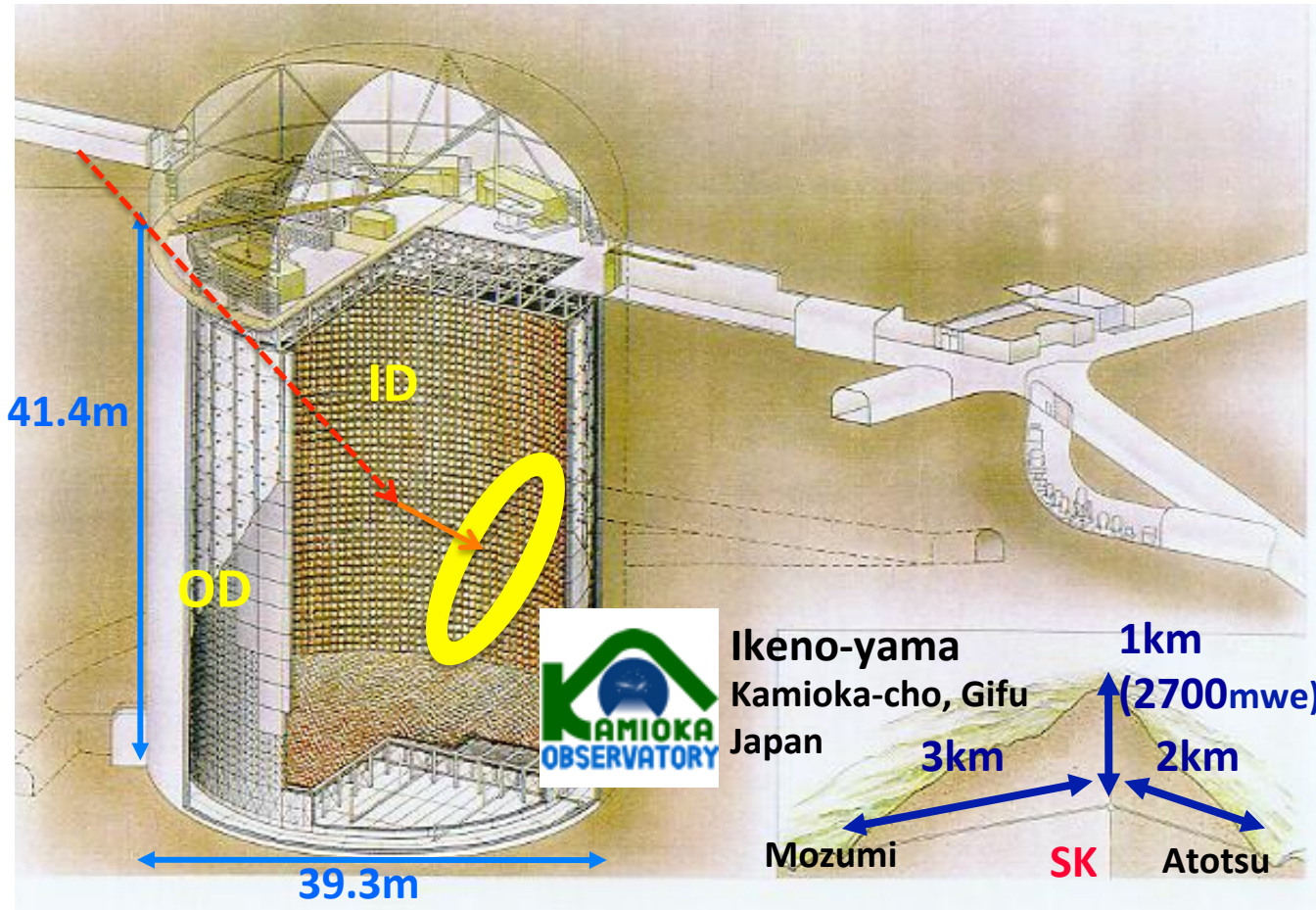
- Gd(n, γ)反応を用い、陽電子とガンマを遅延同時計測することで、反ニュートリノ反応と他の反応を区別できる。
→BGの低減・信号の純度向上による精度の良い解析



実際に使っている/使う実験

- ニュートリノ振動の測定実験 (θ_{13})
 - D-CHOOZ, Daya-Bay, RENO...
- 超新星背景ニュートリノ探索
 - Super-Kamiokande + Gd (池田さん発表)

Super Kamiokande detector



- 50kton water
- ~2m OD viewed by 8-inch PMTs
- 32kt ID viewed by 20-inch PMTs
- 22.5kt fid. vol. (2m from wall)
- SK-I: April 1996~
- SK-IV is running
- Trigger efficiency >99% @ 4.0MeVkin ~86% @ 3.5MeVkin

Inner Detector (ID) PMT: ~11100 (SK-I,III,IV), ~5200 (SK-II)

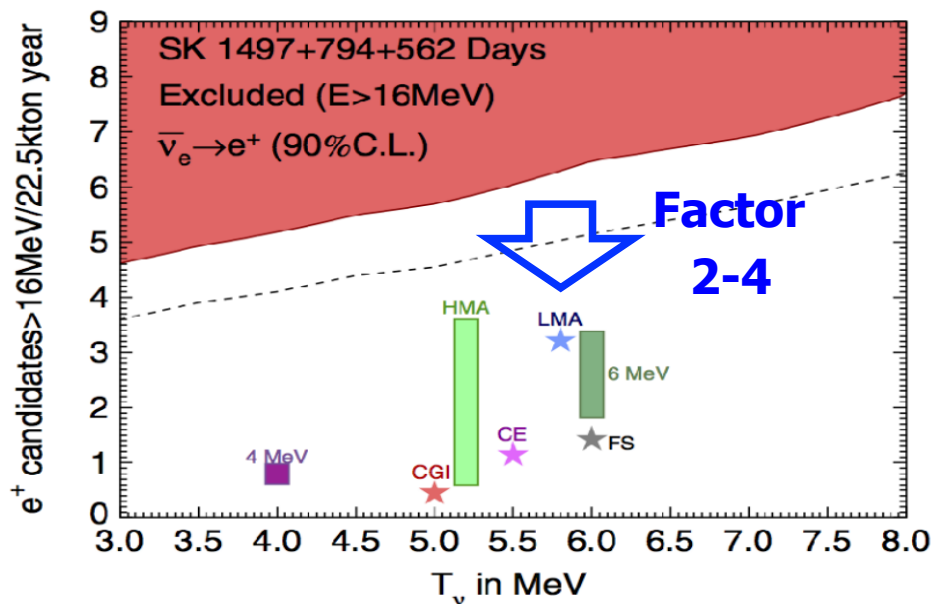
Outer Detector (OD) PMT: 1885

超新星背景ニュートリノの探索

SRN (supernova relic neutrino)探索

- SRN = 過去の全ての超新星からのニュートリノが積算されたもの。感度を上げれば常に検出出来る。
- 現在の上限はモデル計算~ $\times 2$ 程度。宇宙線 μ によるスパレーションバックグラウンドにリミットされている。
- バックグラウンドを低減すればSKで見つかるはず！
(10~60 events in 10 years.)

K.Bays et al., Phys.Rev.D85, 052007 (2012)



どんな物理があるか？

- 超新星の E_ν 情報=超新星元素合成の解明
- 星の生成レート = 宇宙の進化史の解明
- ブラックホール生成・灰暗い超新星等の、変な超新星

Introduction (3)

Feature of Low Energy Neutron Reaction with Nuclei ($A > 25$)

- $E_n < 1\text{MeV}$: $(n,p), (n,\alpha)$ suppressed due to Coulomb Barrier.

- $E_n < 200\text{keV}$ ($\sim 1^{\text{st}}$ excited state):

Only (n,n) and (n,γ) possible.

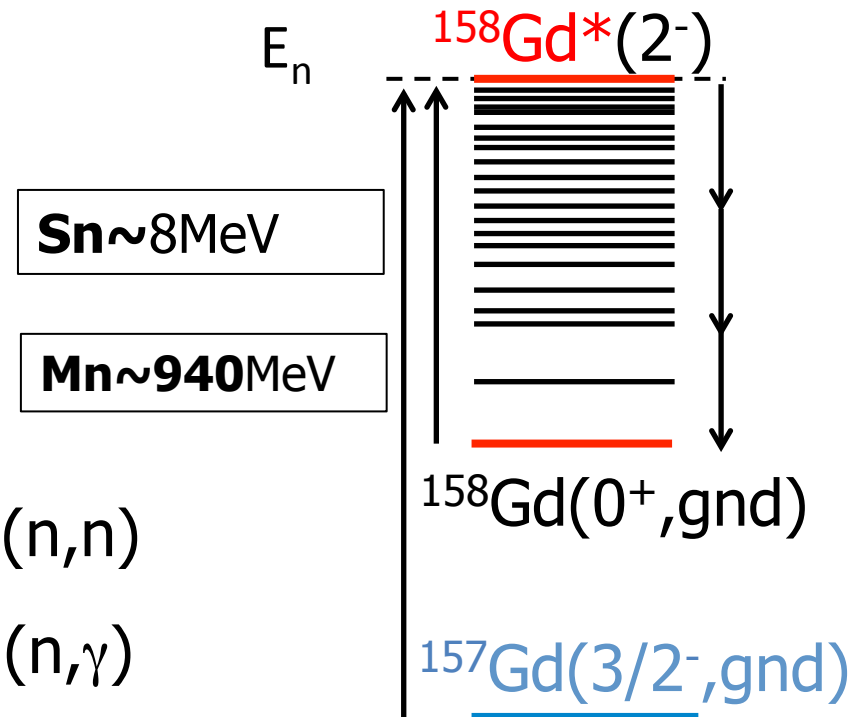
- $E_n < 1\text{keV}$: (n,γ) dominates.

- Feature: Resonance appears.

➤ $n+A \rightarrow C^* \rightarrow n+A$ (elastic) (n,n)

➤ $n+A \rightarrow C^* \rightarrow B+\gamma$ (capture) (n,γ)

($n+A \rightarrow D+E$ (fission) for U or very heavy nuclei)



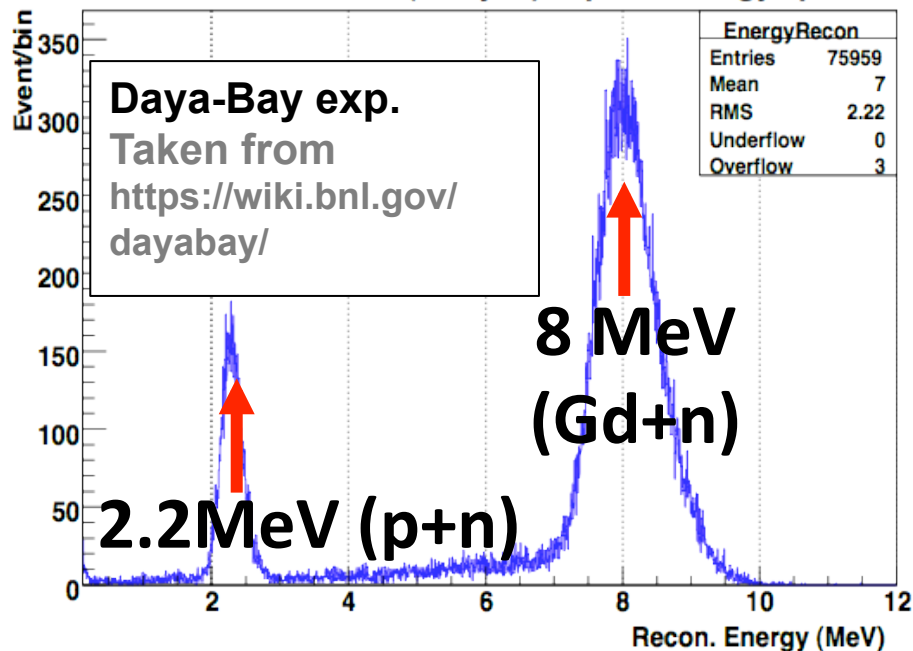
Gd(n, γ) 反応の検出

Detection of Gd(n, γ) events

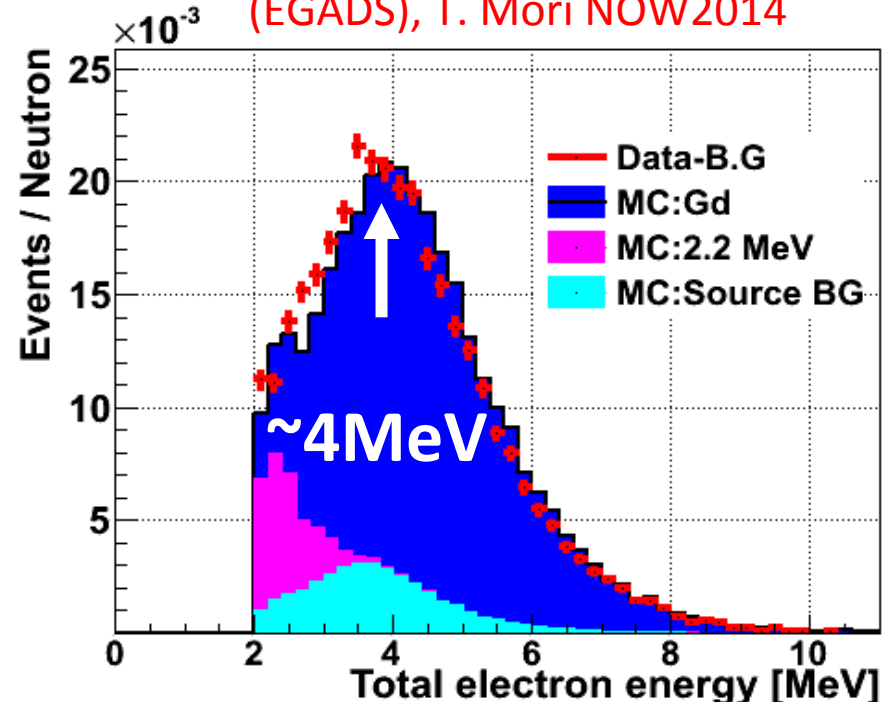
- 液体シンチレーター検出器では、全エネルギー $\sim 8\text{MeV}$ を精度良く測ることが出来る。
- 水チェレンコフ検出器では、チェレンコフ閾値 $\sim 1\text{MeV}$ ×ガンマ線の本数分、見えないエネルギーが出来る。
→ 正確なGd(n, γ)反応のモデルが必要。

Gd(n, γ) in Liquid sci. det.

reconstructed neutron (delayed) capture energy spectrum



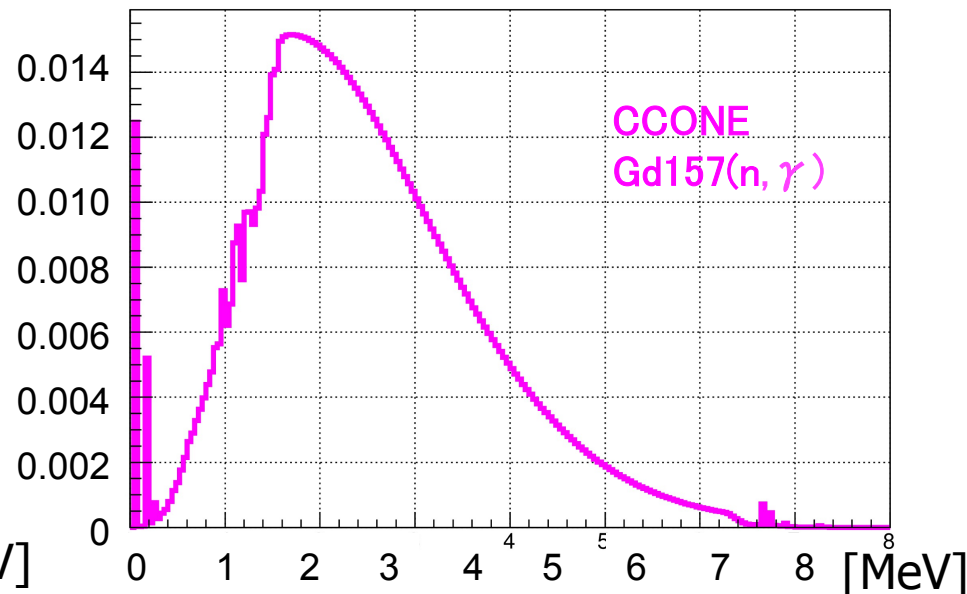
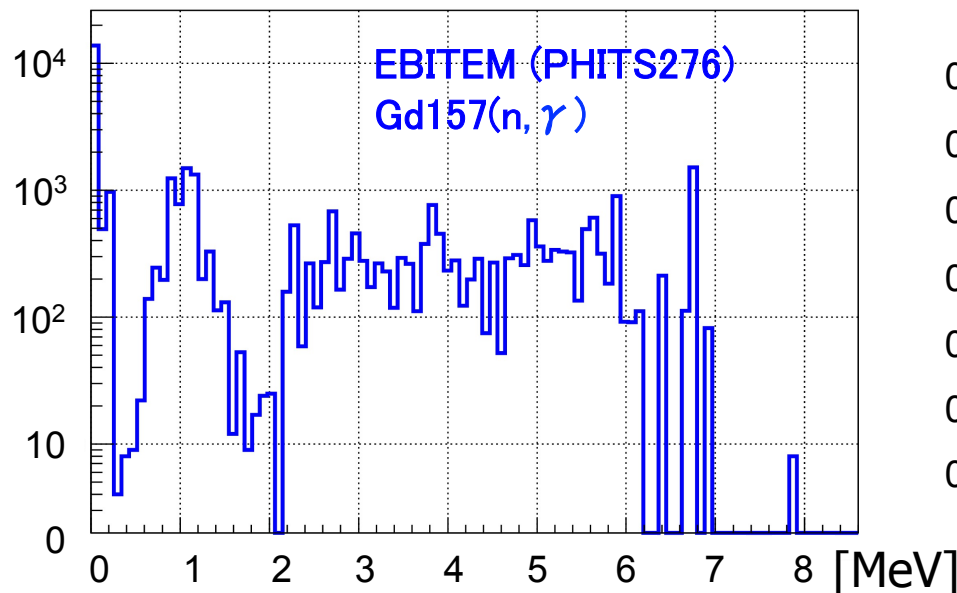
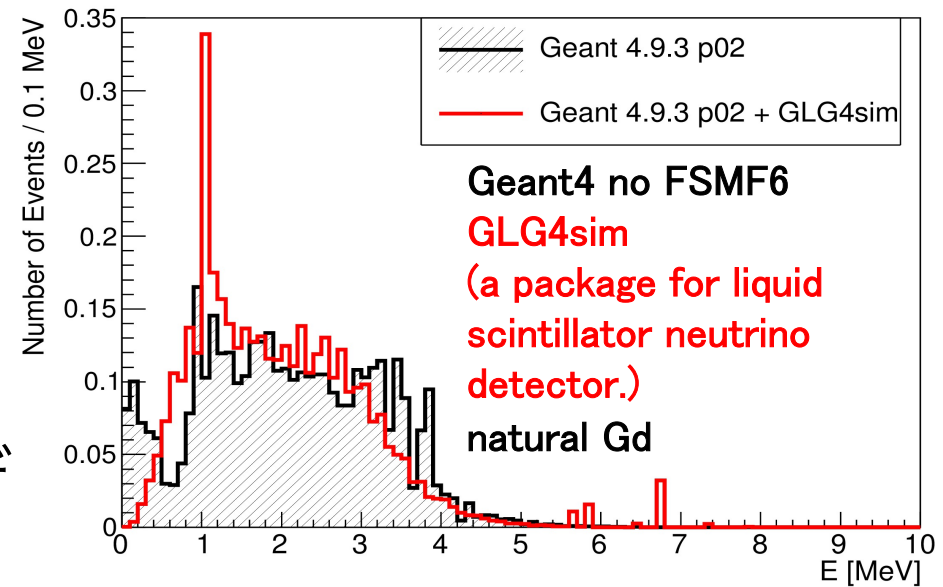
Gd(n, γ) in Water Cherenkov det. (EGADS), T. Mori NOW2014



現行のGd(n, γ)の計算モデル

- 広くモデルが存在する。しかし、再現性は良くない
 - Geant4, EBITEM(PHITS), CCONE(KEK), etc.
- 他にオープンなモデルとしてTALYS等がある。ロスアラモスはDICEBOXという独自モデルを使用している。

Energy distribution of single gamma from Gd(n,g)



“GARNET” 実験

Gadolinium Gamma-Ray induced by Neutron capture,
Experiment and Transition model.

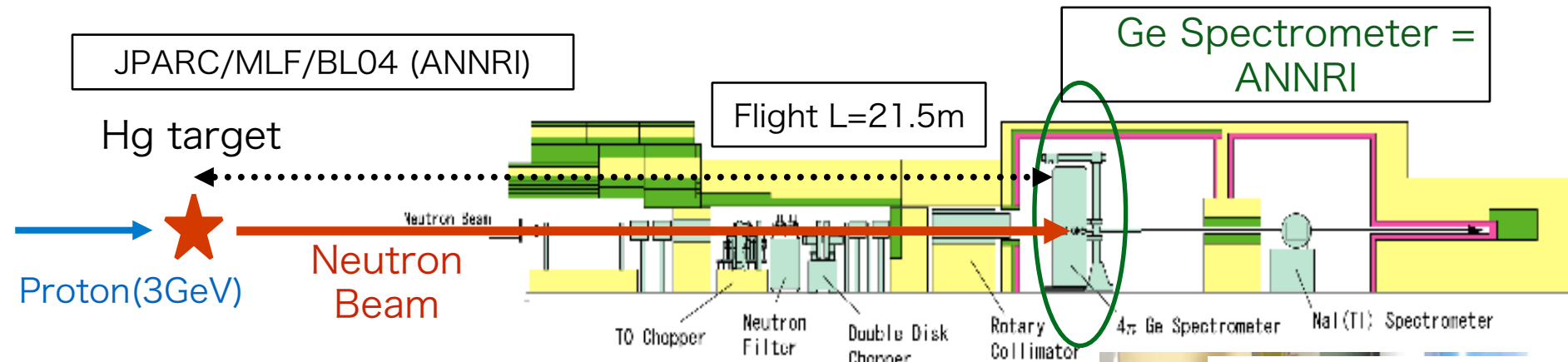
Purpose

- $Gd(n, \gamma)$ 反応の基礎的な測定情報を高精度で得る。(本数・エネルギー分布)
- $Ge(n, \gamma)$ の再現の良いモデルを作成・検証する。
- SK-Gdなど、 $Gd(n, \gamma)$ を使っているニュートリノ実験・他の(医学・原子炉)用途に情報を提供。

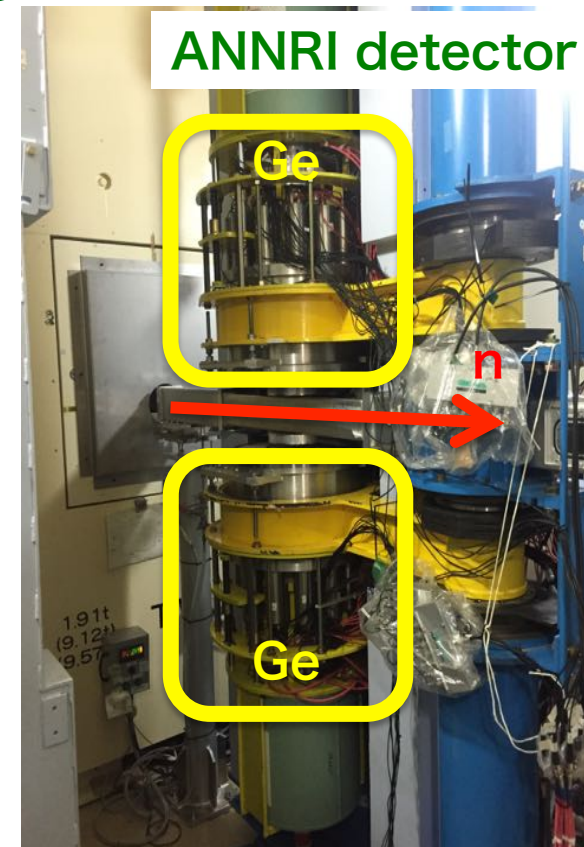
Experimental method

- Ge検出器アレイANNRIによる高精度 $Gd(n, \gamma)$ データの取得。
- Geant4によるANNRI検出器のモデリング。
- Geant4フレームワーク内で動作可能な $Gd(n, \gamma)$ モデルの作成・実験データとの比較。

ANNRI Beam line

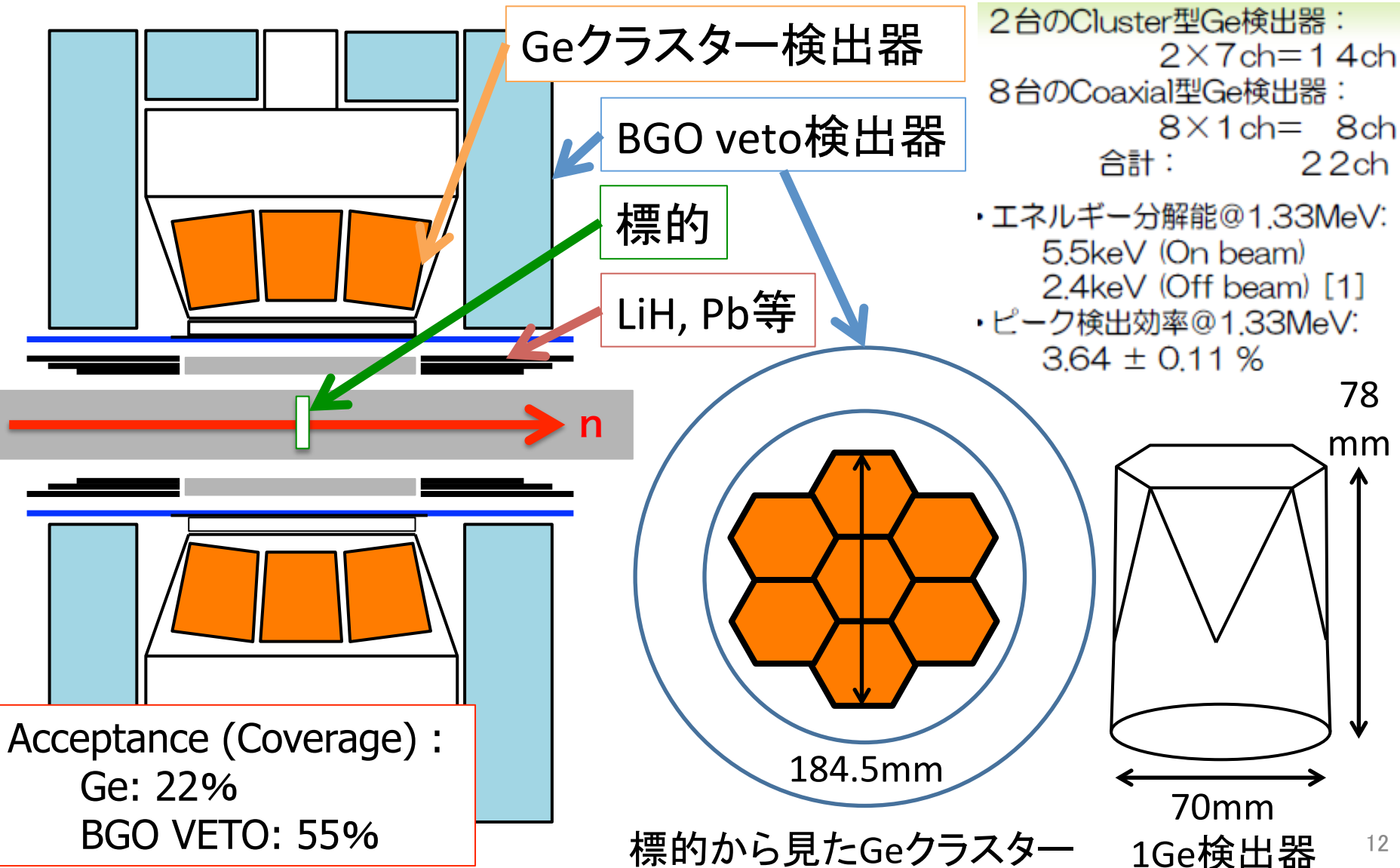


- J-PARC MLF (物質生命科学施設) 内のパルス中性子ビームラインの一つ。
- 中性子強度 $1.3 \times 10^{11} \text{ n}/(\text{s}/\text{m}^2)$ at $E_n = 1.5\text{-}25 \text{ meV}$
 - 陽子 beam 300kW時
 - $\Delta E_n/E_n \sim 1\%$
- ANNRI検出器 = Ge検出器アレイによる $X + n \rightarrow X + \gamma$ 反応測定を行う。



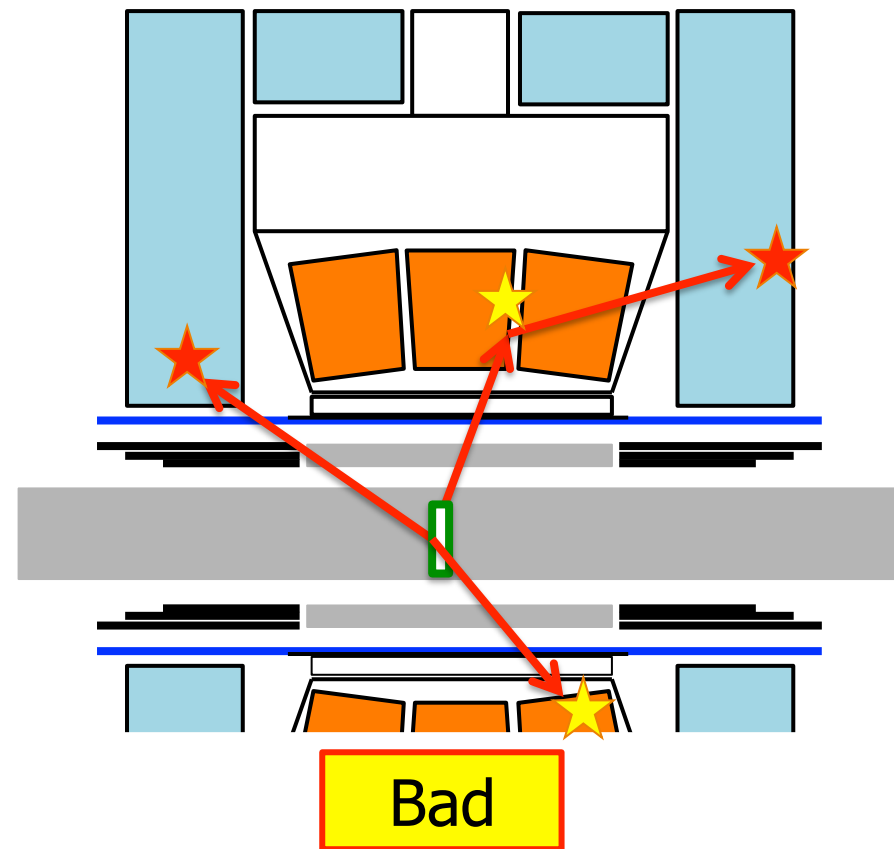
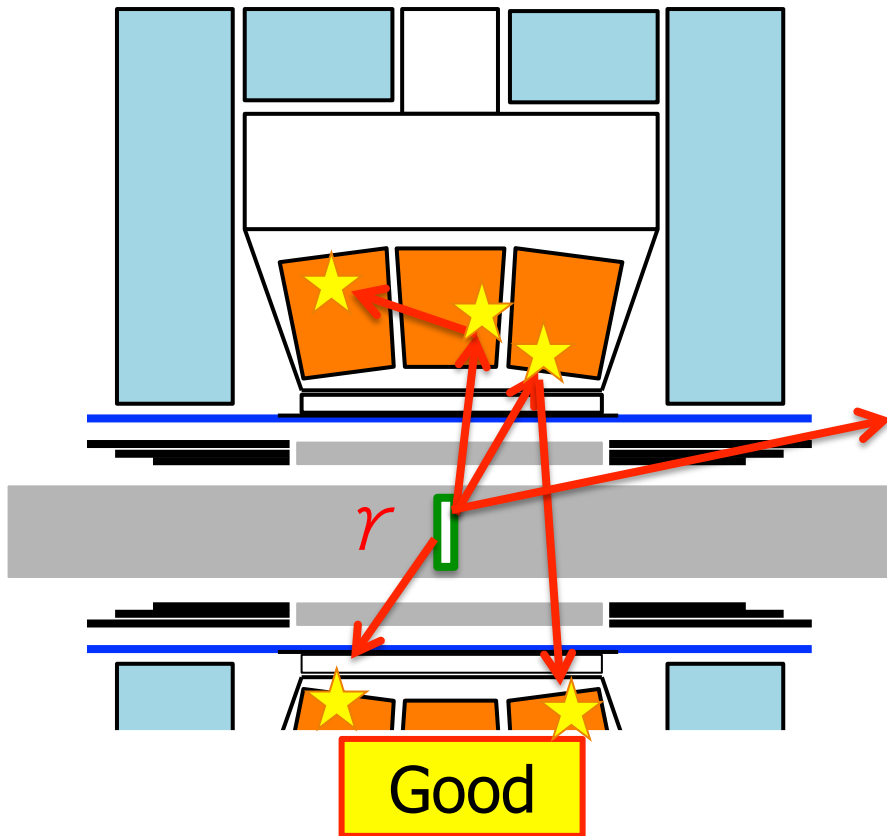
ANNRI 検出器

Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument



Gd(n, r) 事象トリガー条件

1. 少なくとも1つのGe検出器に $E > 0.1$ MeVのヒットがある。
2. BGOs に $E > 0.1$ MeV のヒットがない。



実験データセット

2012 B0025 -天然Gd標的

Experimental period : 2013/Mar/14-17

Target : Natural Gd
(99.99% 5mm×5mm×10,20μm)

Total event : 3×10^9 events

Calibration source : ^{60}Co , ^{137}Cs

2014 B0124 -濃縮Gd標的 (^{155}Gd , ^{157}Gd)

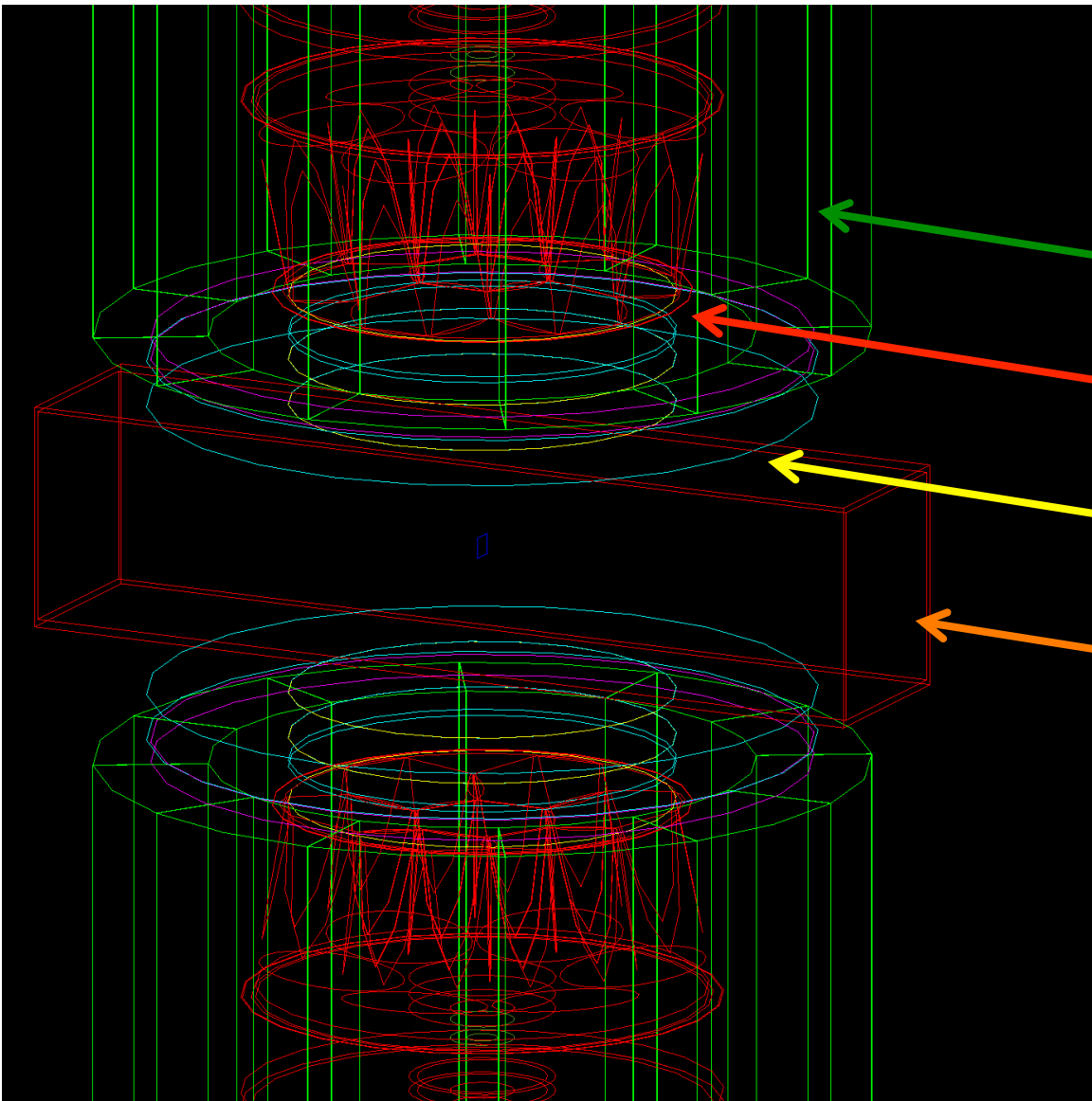
Experimental period : 2014/Dec/11-16

Target : 濃縮Gd粉末(酸化物)
155Gd (91.65%), 157Gd (88.4%)

Total event : 8×10^9 events

Calibration source : ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , NaCl

検出器シミュレーション



Geant4 Monte Carlo :
made by Yamada, Hagiwara
(Okayama), Yano (Kobe)

BGO veto detector

Ge detector

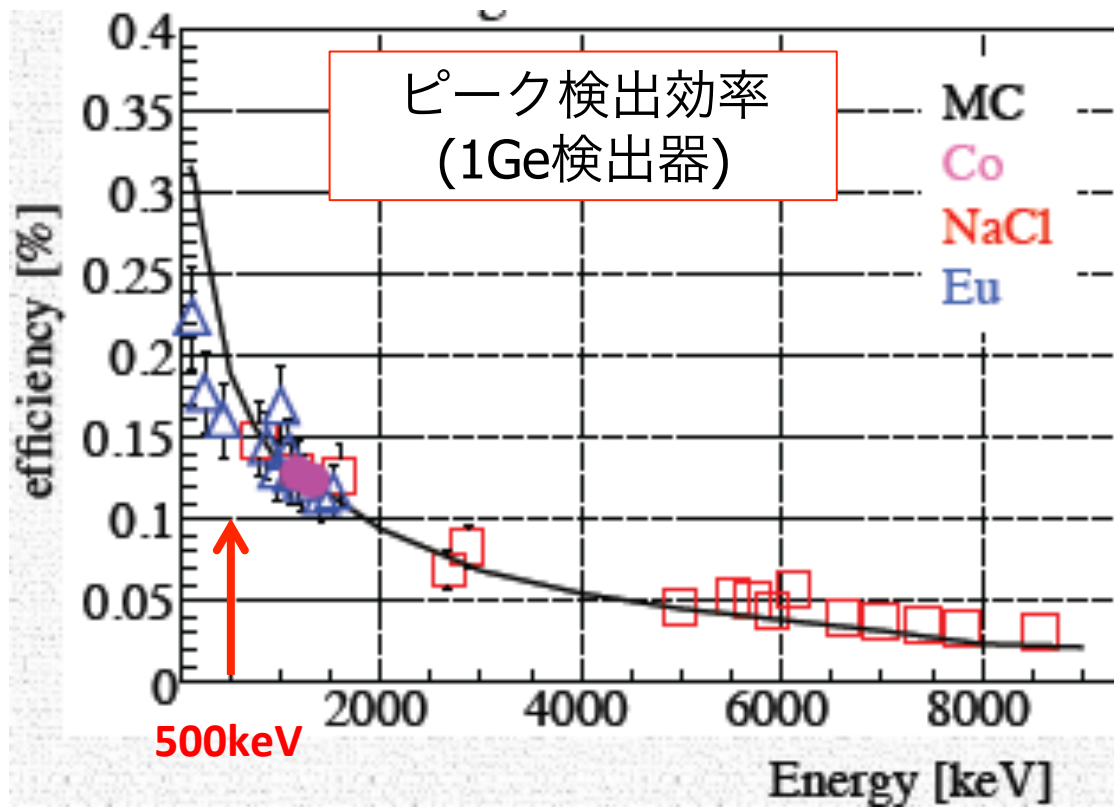
LiH, Pb, B discs

Beam pipe (Al)

検出器シミュレーション (2)

線源によるエネルギー/エフィシエンシの較正

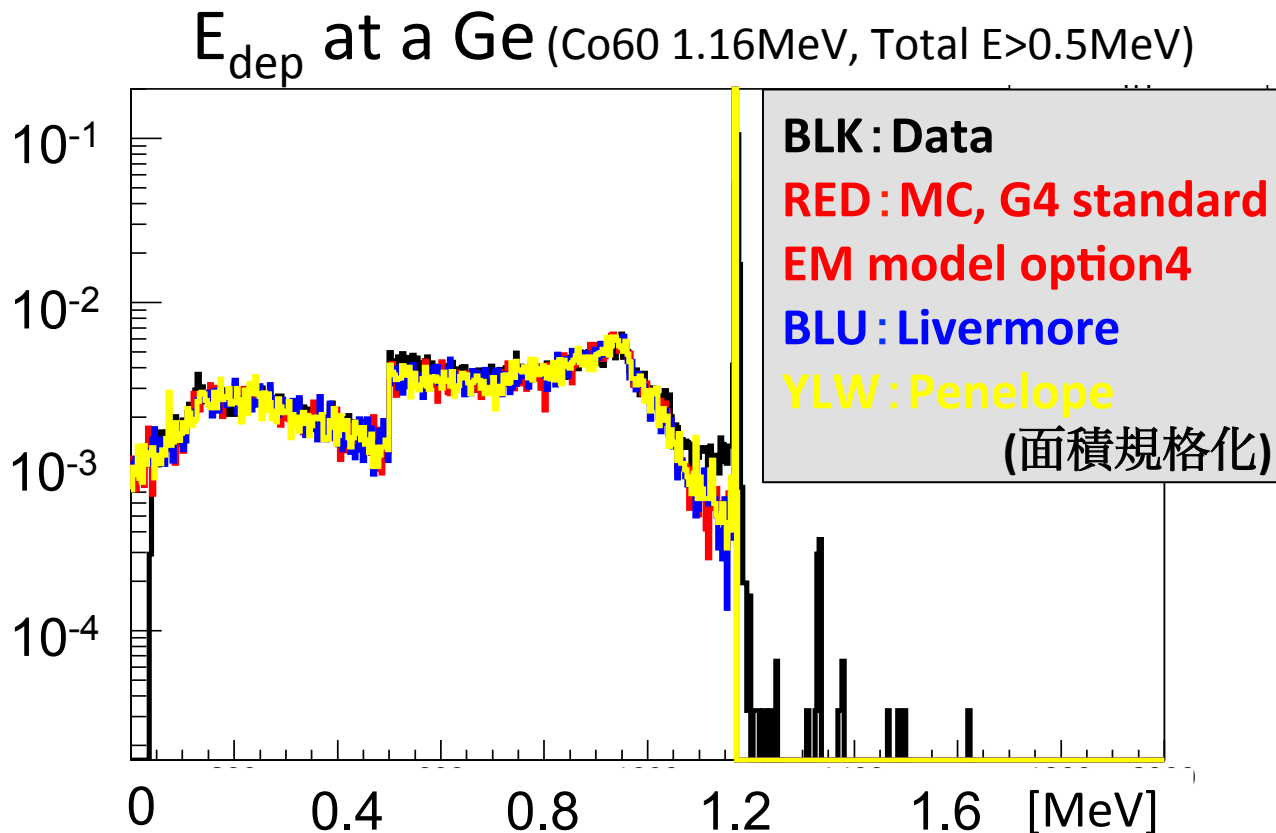
- ピーク検出効率 ([0.11%@1.17MeV](#) for 1Ge検出器, 絶対値)を ^{60}Co を用いて測定。(全Geでは2.4%)
- 相対値は $\text{NaCl}(n, \gamma)$ 反応 及び ^{152}Eu を用いて測定。
- MCとデータで0.5MeV-9MeVについて良い一致($\pm 20\%$)



0.1 MeV-0.5 MeVでの乖離はMCでビームパイプ内のLiFタイルを導入していない為と予想。
(2014年データに影響)

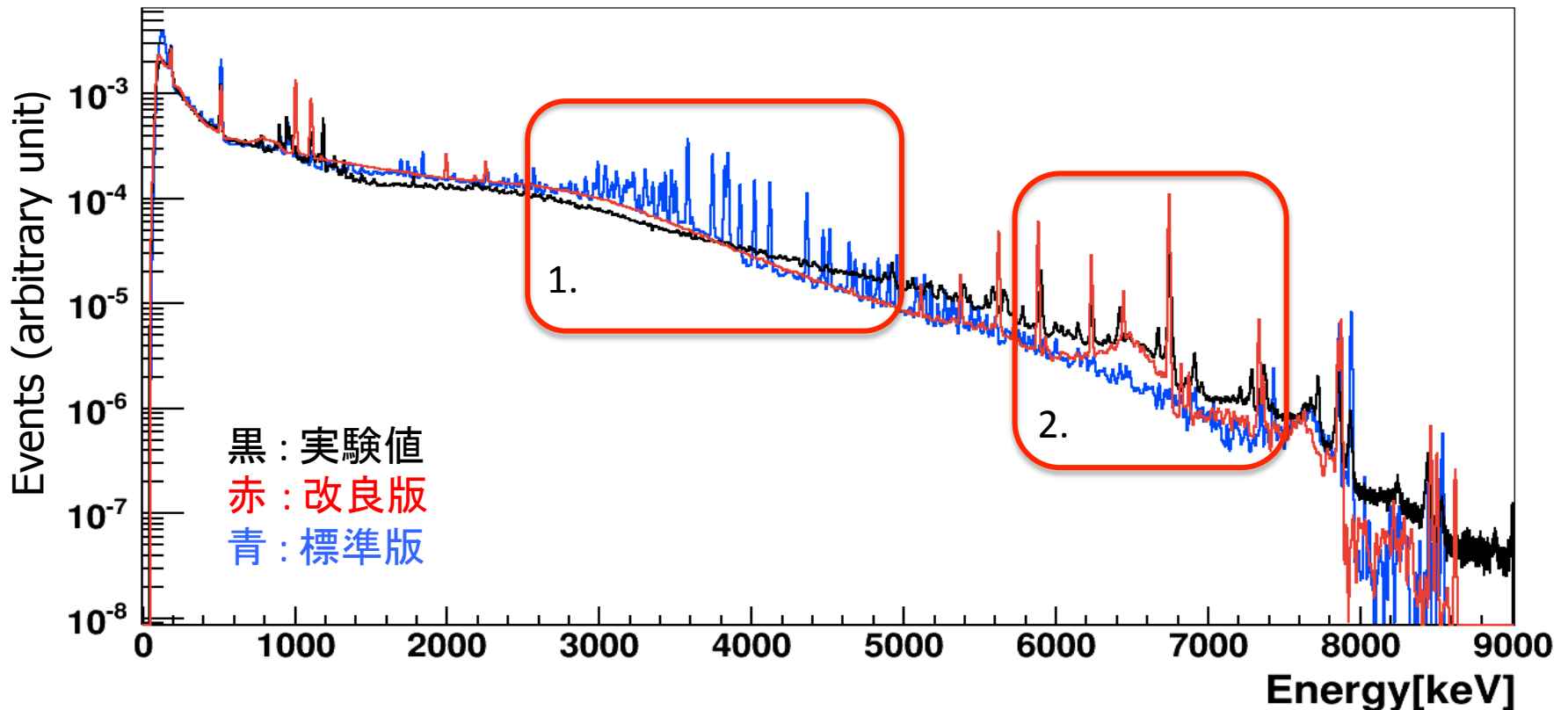
検出器シミュレーション(3)

- Geant4の低エネルギーEMモデルを試験。
- いずれのモデルでもコンプトンテール部を含め実データの再現性は良好。
- MCではPenelopeモデルを使用。



E_γ spectrum ($n + \text{Gd} \rightarrow E_\gamma + X$)

- Black : 2012 Data ($4\text{meV} < E_n < 100 \text{ meV}$, TOF method)
- Blue : Geant4.9.6 + G4NDL4.2 [standard] (1. odd peaks in $3000\text{keV} \sim 5000\text{keV}$)
- Red : Geant4.9.6 + GLG4SIM (2. good peaks $>5\text{MeV}$)
→ GLG4Sim improved the discrete peaks, while having the same continuum as Geant4 standard version.



Gd(n, γ)モデル計算

■ 中性子捕獲反応からの γ 線放出は2つのモードに大別される。

1. 連続スペクトラム (93.8%)

2. 離散スペクトラム (6.2%)

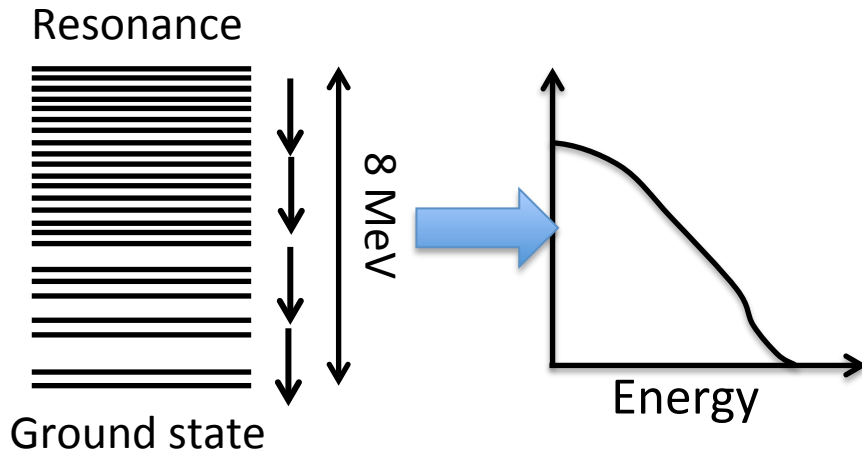
- 5.62MeV+2.25MeV [1.3%]

- 5.88MeV+1.99MeV [1.6%]

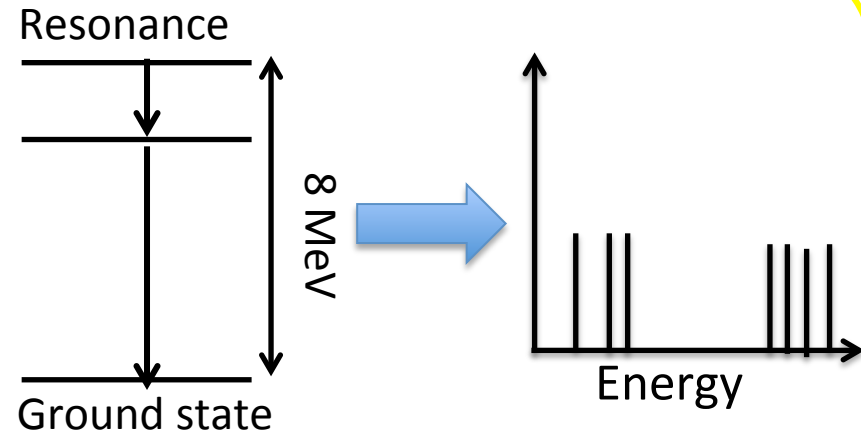
- 6.74MeV+1.11MeV [3.2%]

- 7.87MeV [0.02%], 代表的な分岐をGLG4simから流用。

■ 90%以上の放出は連続スペクトラムによる。



1. Continuum



2. Discrete levels

連続スペクトラム モデル計算

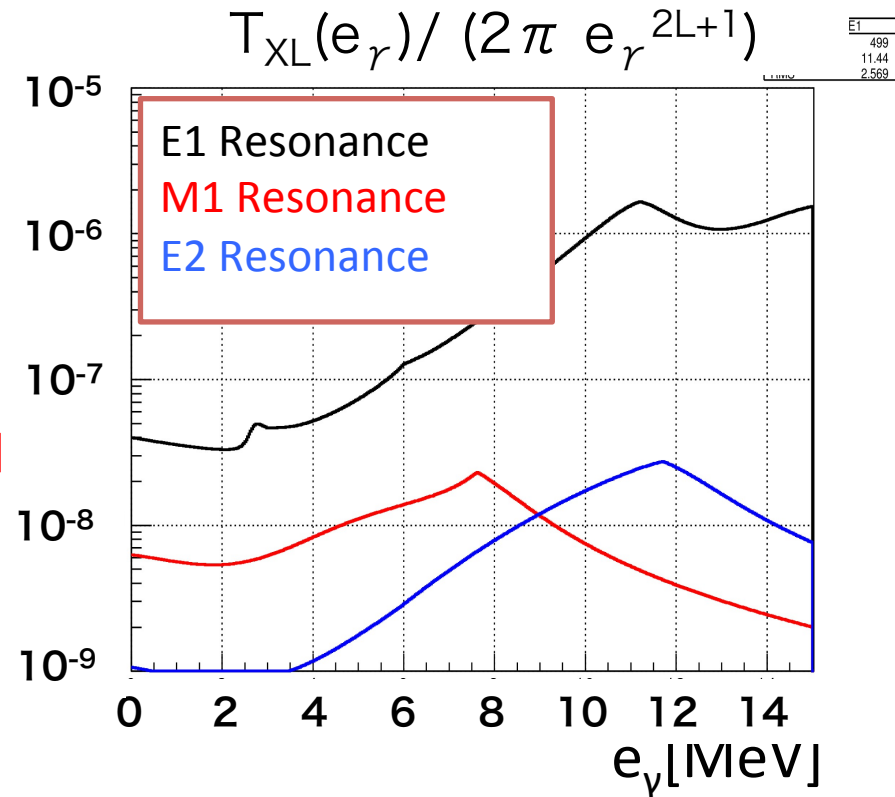
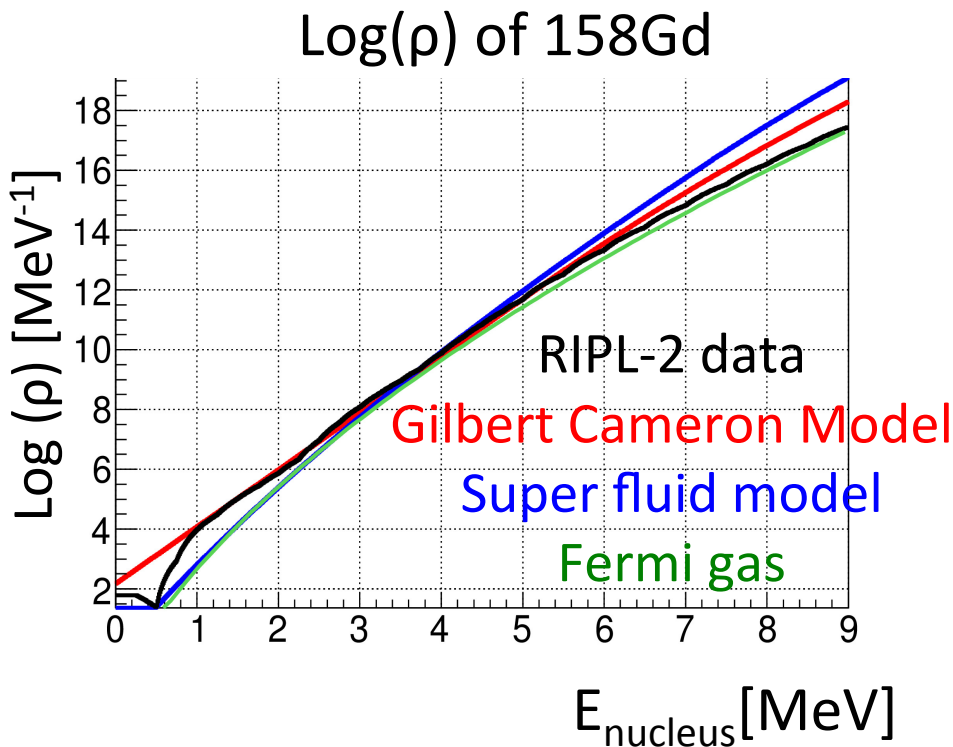
- E_{ex} の励起エネルギーを持つ原子核が、 e_γ のエネルギーを持つガンマ線を放出する確率 $P(e_\gamma, E_{ex})$ は以下の式で表される。
 - Hauser-Feshbach Method の変形

$$P(e_\gamma, E_{ex}) = \frac{\sum_{XL} T_{XL}(e_\gamma) \rho(E_{ex} - e_\gamma)}{\int_0^{E_{ex}} \sum_{XL} T_{XL}(e_\gamma) \rho(E_{ex} - e_\gamma) de_\gamma}$$

- 鍵となるパラメータは2つ
 - T_{XL} : Gamma transition coefficient
 - XLはE1, M1, E2等の各巨大共鳴状態を示す。
 - ρ : Level density

簡単な ρ と T_{XL} の説明と図

- 鍵となるパラメータは2つ
 - T_{XL} : 励起原子核とエネルギー e_γ をもつガンマ線との結合の強さ
 - ρ : γ 放出後に原子核が落ちる先のエネルギーレベルの密度



Gamma Transition Coefficient T_{XL}

- Gamma Transition Coefficient $T_{XL}(e_\gamma)$ は Photon Strength Function f_{XL} を用いて以下のように表される。

$$T_{XL}(e_\gamma) = 2\pi e_\gamma^{2L+1} f_{XL}(e_\gamma)$$

- $X=E$ (electric) or M (magnetic), $L=1$ (dipole), 2 (quadrupole).

- GdのPSFは逆反応である $\gamma + {}^{A+1}\text{Gd} \rightarrow n + {}^A\text{Gd}$ を用いて Kopeckyらによって部分的に測定されている。今回はその結果を使用してPSFの計算を行った。

$$f(E_\gamma) = \frac{1}{3(\pi\hbar c)^2} \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i E_\gamma \Gamma_i^2}{(E_\gamma^2 - E_i^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma_i^2}$$

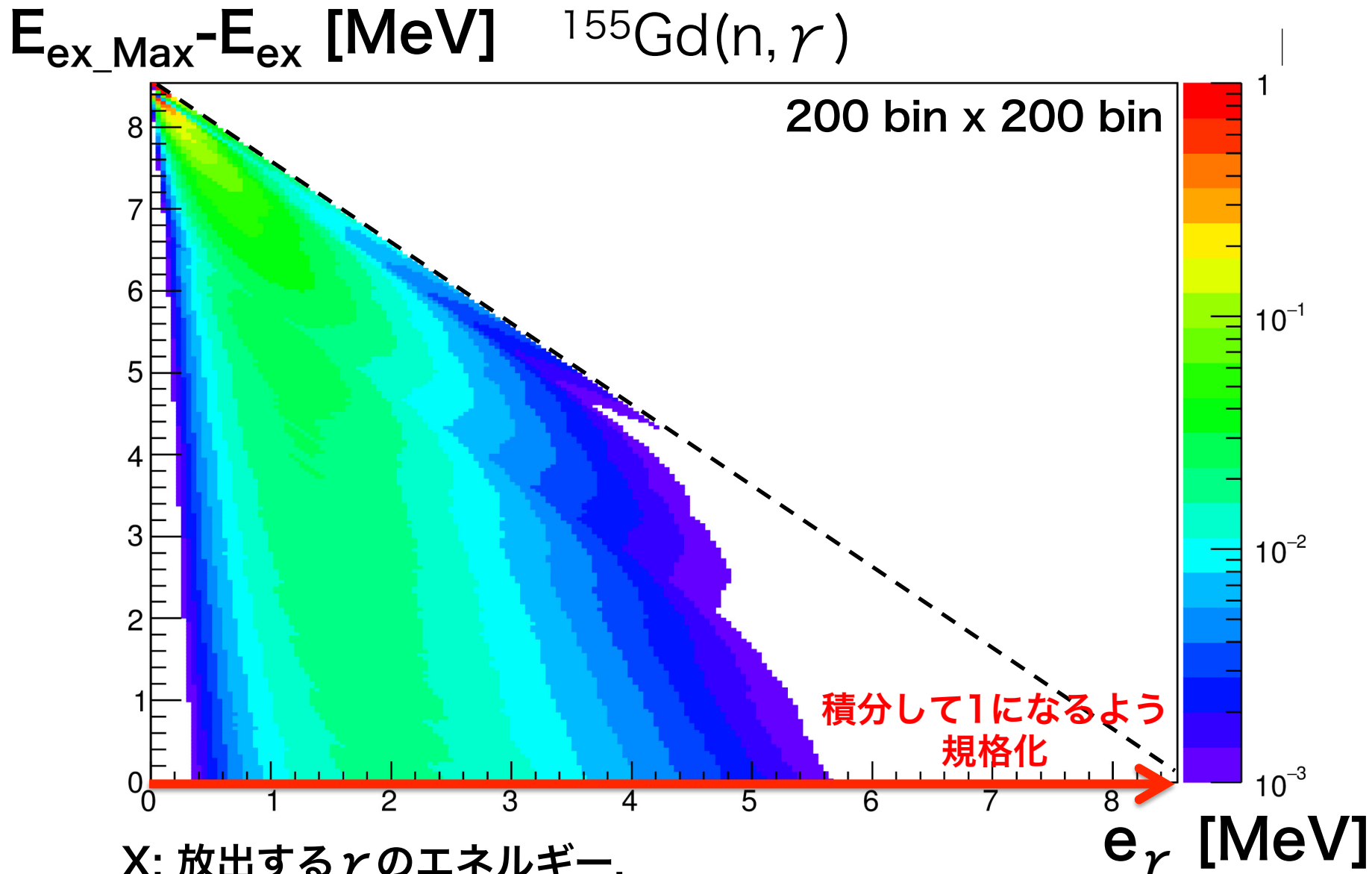
$$\Gamma(\varepsilon_\gamma, T) = \frac{\Gamma}{E^2} (\varepsilon_\gamma^2 + 4\pi^2 T^2)$$

$i = 2\text{GDRs}(E_1, \text{electric dipole})$

Kopecky. PRC 47.312

	Energy (E_i)[MeV]	Cross Section(σ_i)[mb]	エネルギー幅 (Γ_i)[MeV]
${}^{156}\text{Gd}$	11.2	180.0	2.6
	15.2	242.0	3.6
${}^{158}\text{Gd}$	11.7	165.0	2.6
	14.9	249.0	3.8

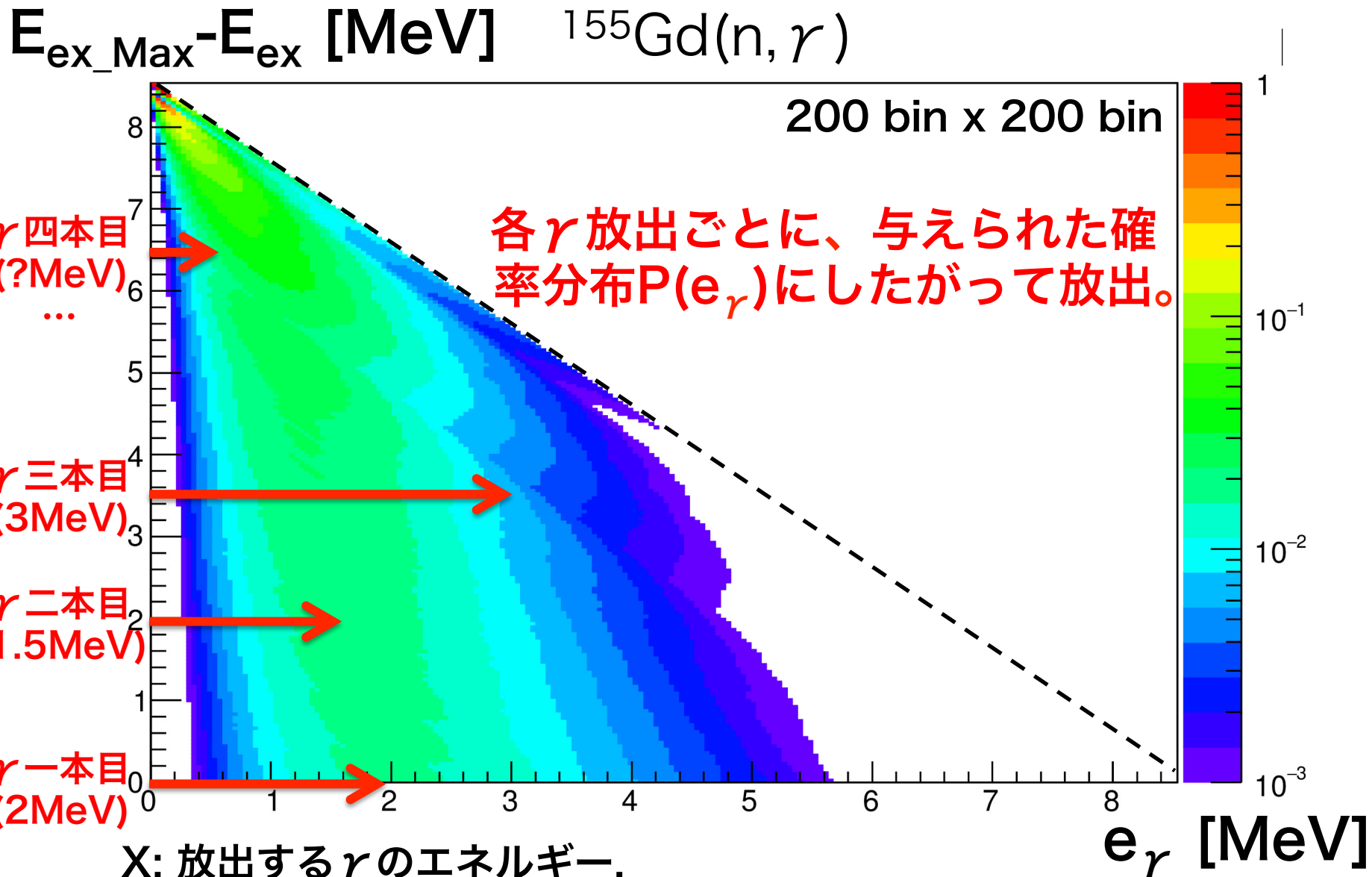
モデル内の γ 放出確率分布



X: 放出する γ のエネルギー,

Y: Gd原子核がこれまでに放出したエネルギー, Z: 放出の確率

モデル内の γ 放出確率分布

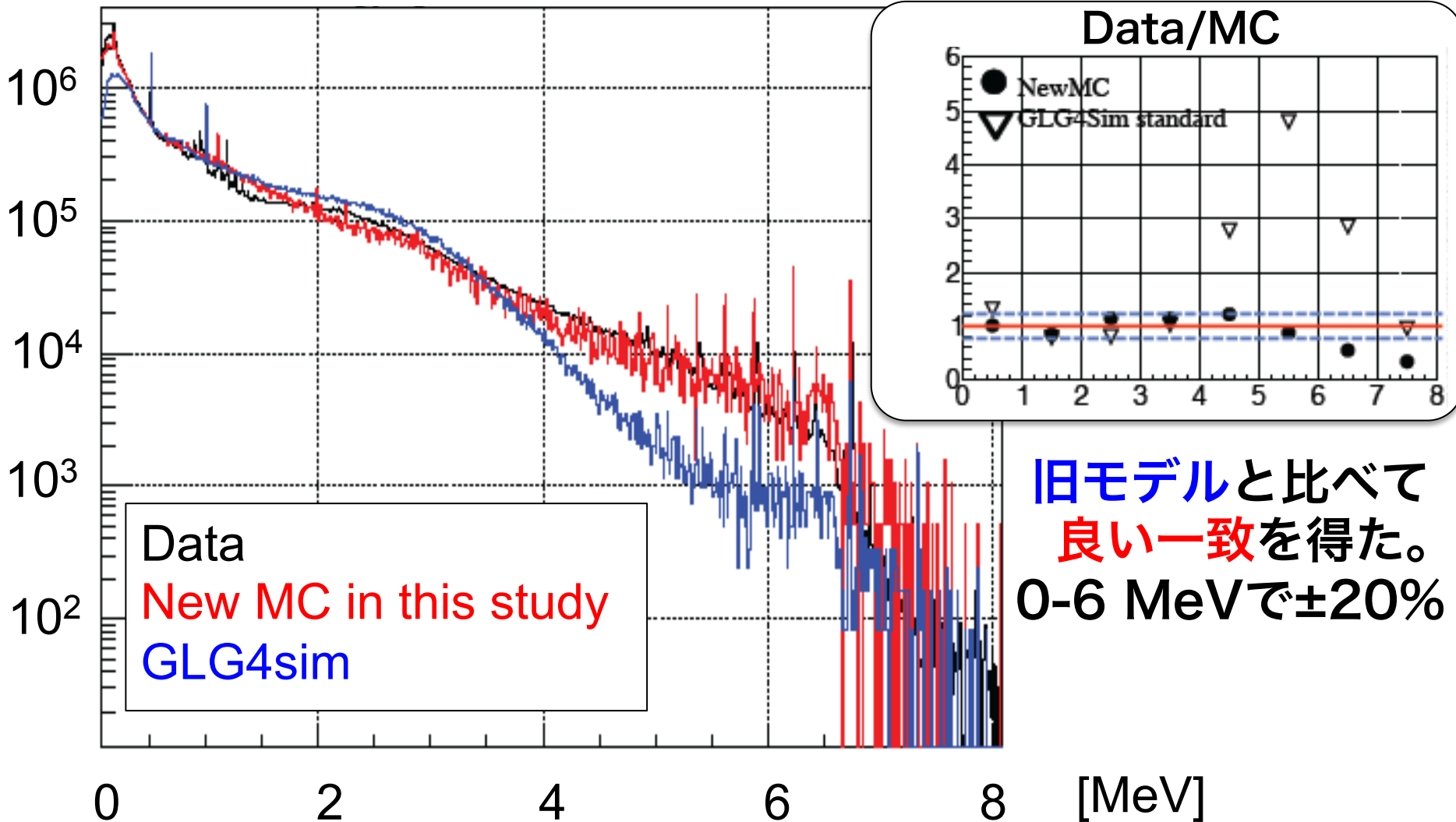


X: 放出する γ のエネルギー,

Y: Gd原子核がこれまでに放出したエネルギー, Z: 放出の確率

MCとDataの比較

Energy deposit in single Ge detector



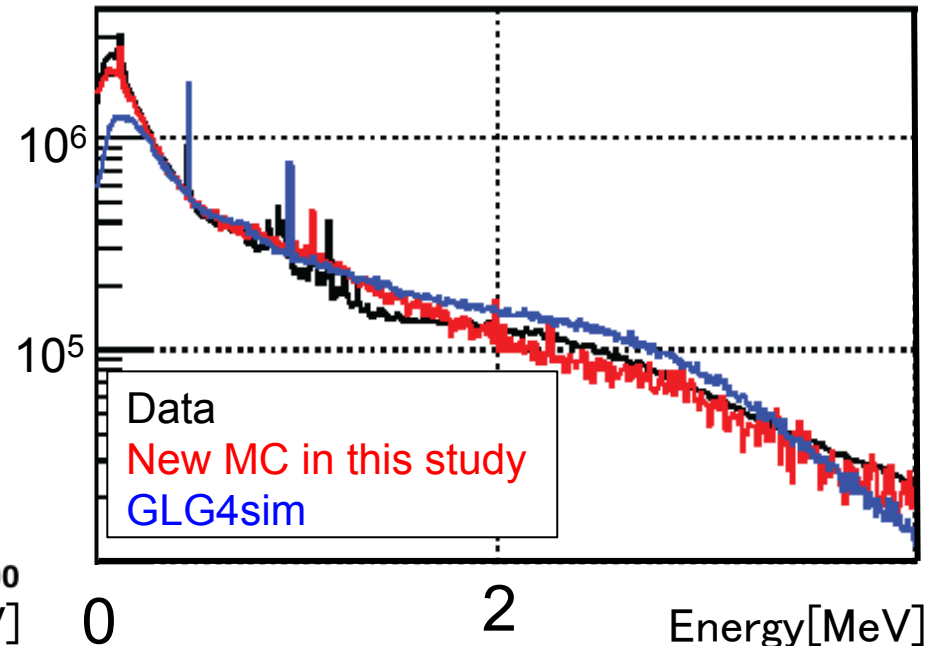
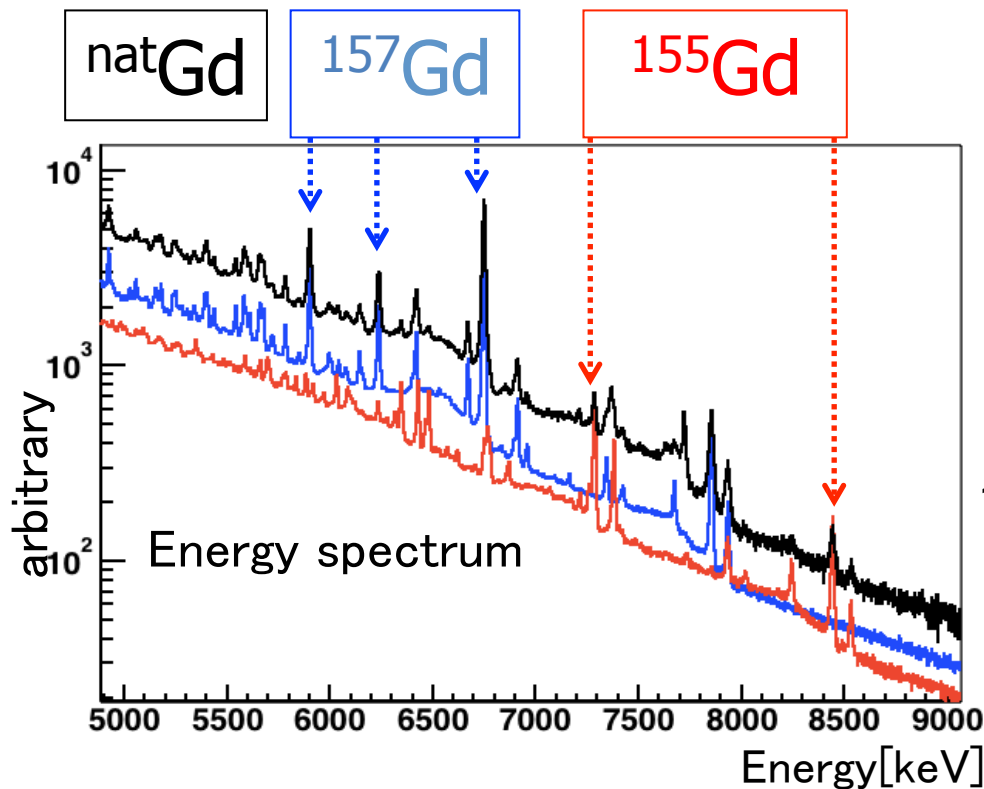
今後の課題

1. 離散スペクトル

実測した各 γ の強度からモデルに導入を予定。

2. 連続スペクトル

低エネルギー側・高エネルギー側のチューニング
2 γ 事象のスペクトルの検証



Summary

- 近年 ν 実験分野で $Gd(n, \gamma)$ 反応の応用が盛んである。
 - $Gd(n, \gamma)$ 反応が放出するガンマ線の詳細なデータが必要。
- MLF・ANNRI検出器を使って $Gd(n, g)$ [天然Gd, ^{155}Gd , ^{157}Gd] の精密データを高統計 (数G事象) で取得。
 - 検出器MCを構築。0.5~8MeVのピーク検出効率について $\pm 20\%$ で実データと一致。今後、 $E > 0.1\text{MeV}$ で $\pm 10\sim 20\%$ まで理解したい。
- より良い再現性が期待される、新しい γ 放出計算コードを作成。
 - Geant4 MCに組み込んで使用可能。
 - 今後さらにチューニングを予定。
- 計算コードを用いた連続スペクトルの再現と、ANNRIの特徴である正確な離散スペクトルの測定によって精密な $Gd(n, \gamma)$ 反応モデルを作成する。

Appendix

DANCE/DICEBOX (Los alamos)

Chyzh et al. Phys.Rev.C Vol84, 014306
(2011)

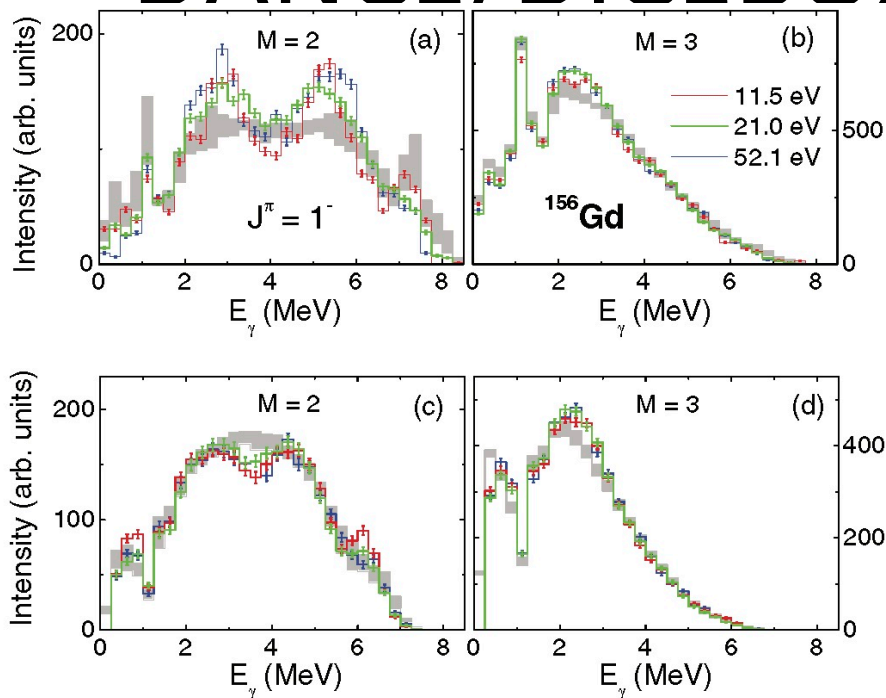


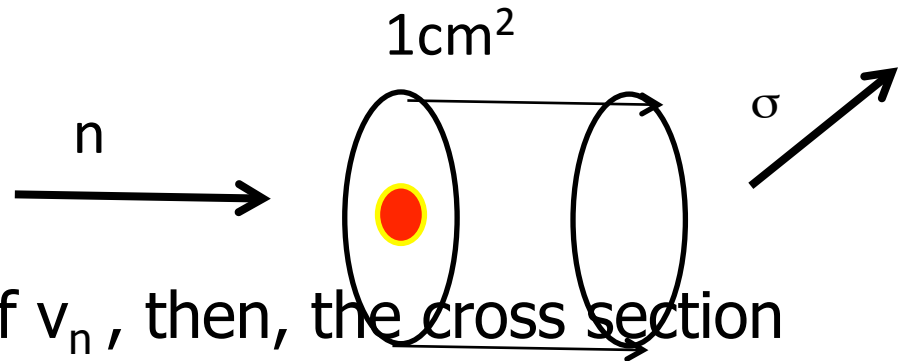
FIG. 6. (Color online) Comparison of experimental MSC spectra [(a) and (b)] and gated MSC spectra [(c) and (d)] with simulations in which the scissors mode was completely absent for resonances with $J^\pi = 1^-$. Predictions of simulations are represented as a gray band. The KMF model was used for the $E1$ PSF while the BSFG model was used for the level density.

DANCE実験のグループは同様の計算コードDICEBOXをもっている。
これはGd(n,g)の結果を良く再現している。

Cross section (σ [cm²]) and reaction rate w (1/s)

$$w = (S \cdot f) \left(\frac{\rho v_n}{A} N_0 \right) \sigma = F \cdot n_T \cdot \sigma \cdot v_n$$

$$\sigma = \frac{w}{F \cdot n_T \cdot v_n} \sim \frac{1}{v_n} = \frac{1}{\sqrt{E_n}}$$

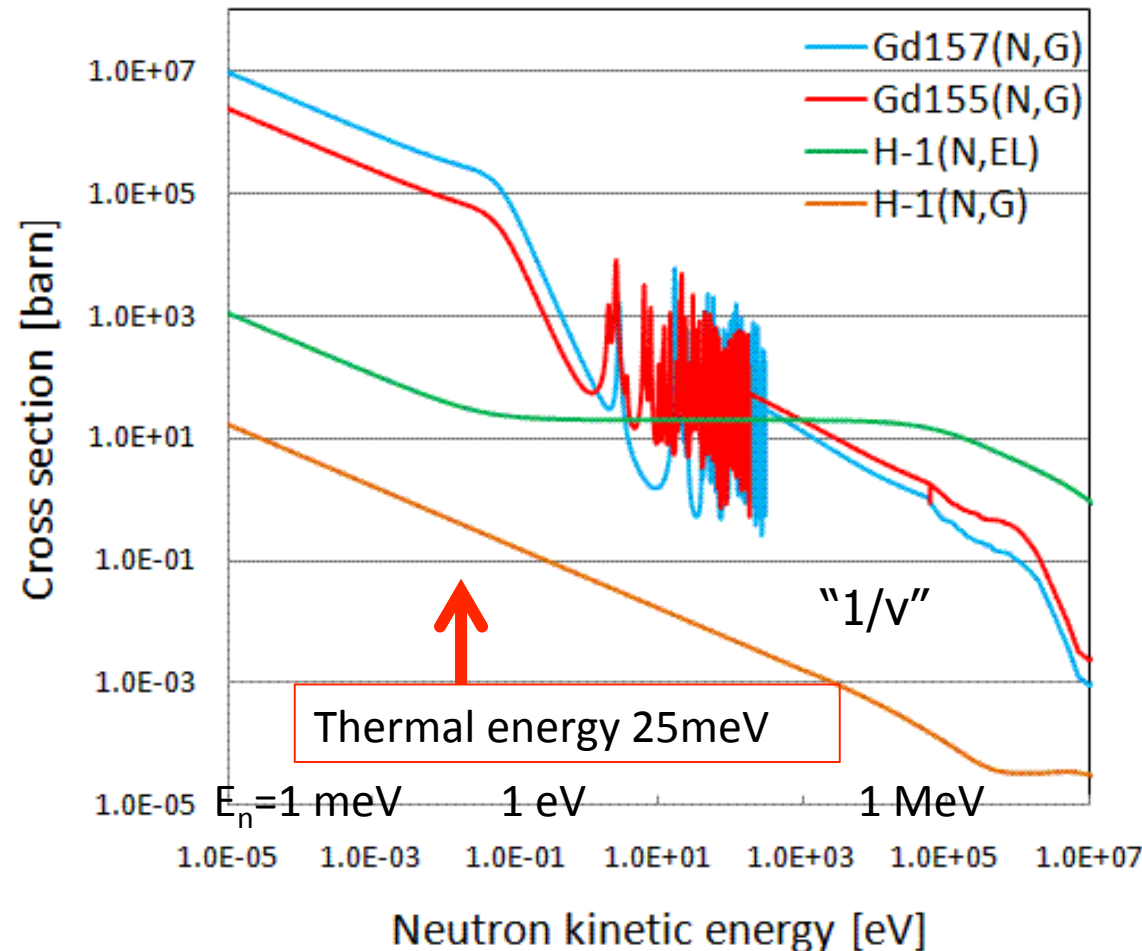


• **"1/v" law** : If w is independent of v_n , then, the cross section (σ) is proportional to $1/v_n$. For example, it is typical of inelastic reaction like capture (n, γ). But, for (n, n), a phase space factor ($4\pi p^2 dp/dE$) gives v , and $1/v$ law does not hold.

• Low energy neutron capture cross section increases as $1/v$, even if no resonances exist.

Neutron capture reaction $Gd(n,\gamma)$

- When a neutron is produced via neutrino reaction or nuclear reaction, the energy is in the MeV range. At MeV range, n-p elastic scattering is dominant.



Element	Cross section [barn]
Gd 155	60700.
Gd 157	254000.
Proton	0.3326

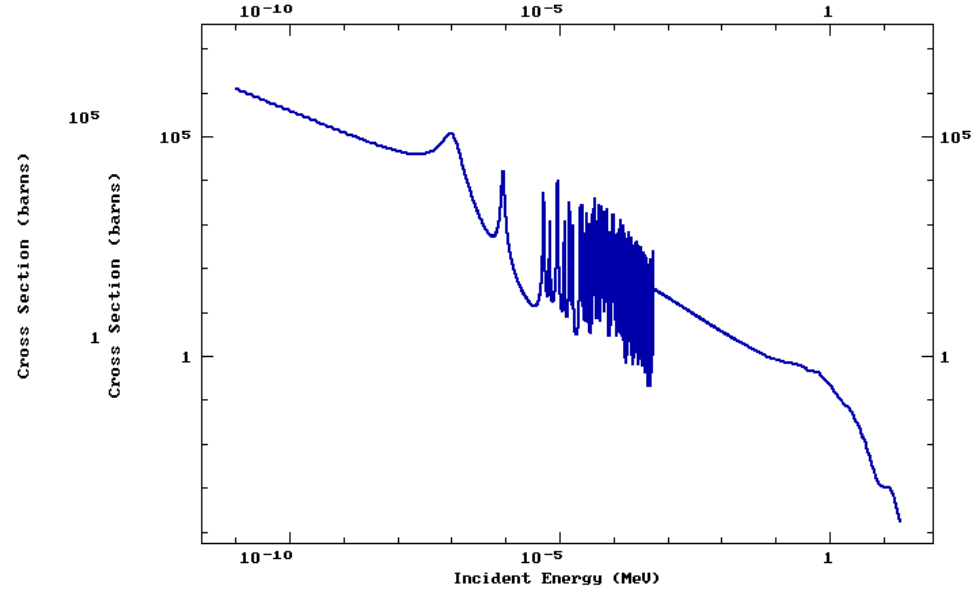
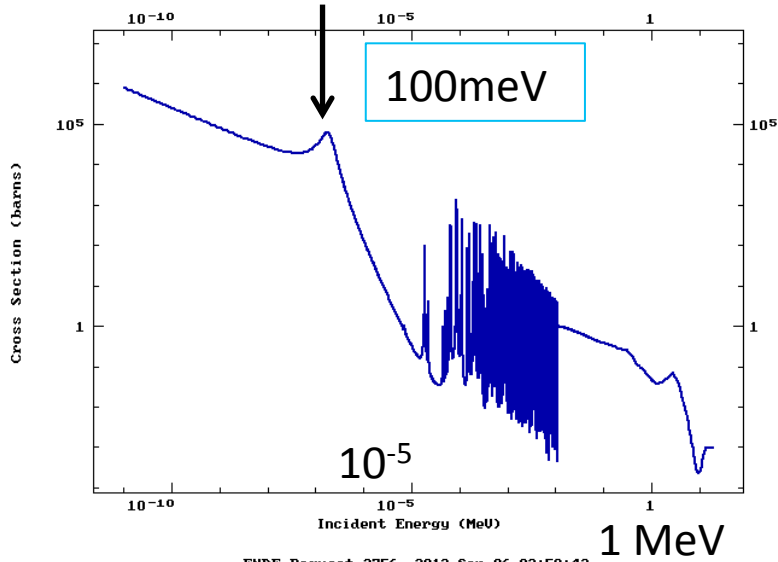
^{113}Cd , ^{149}Sm

^{151}Eu , ^{157}Gd

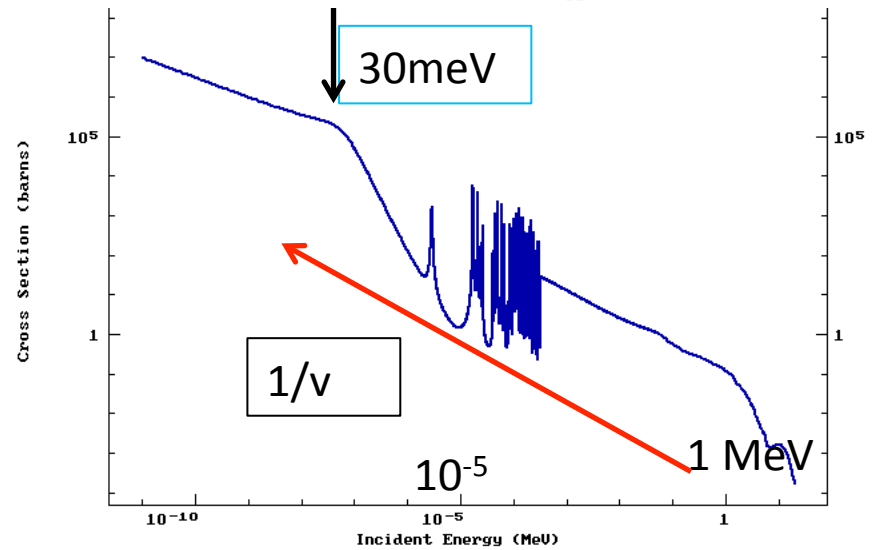
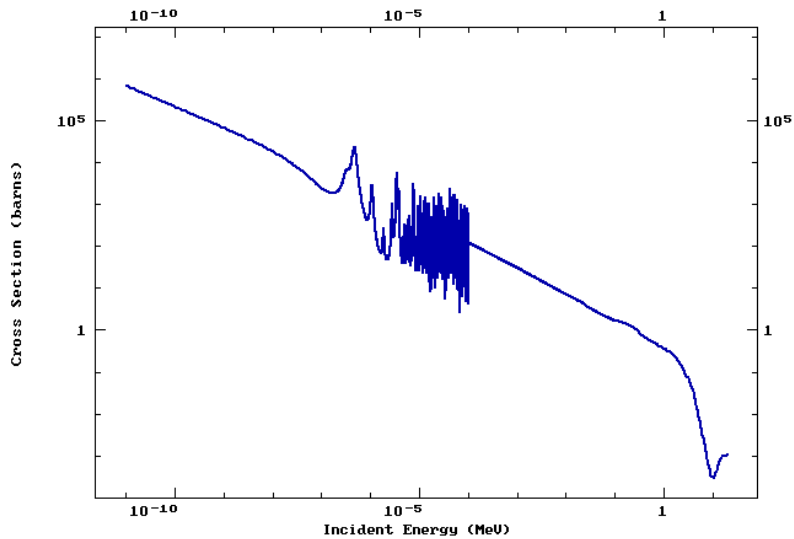
ENDF Request 3392, 2013-Sep-04,01:42:21

ENDF Request 3392, 2013-Sep-04,01:42:21

ENDF Request 3396, 2013-Sep-04,01:45:29

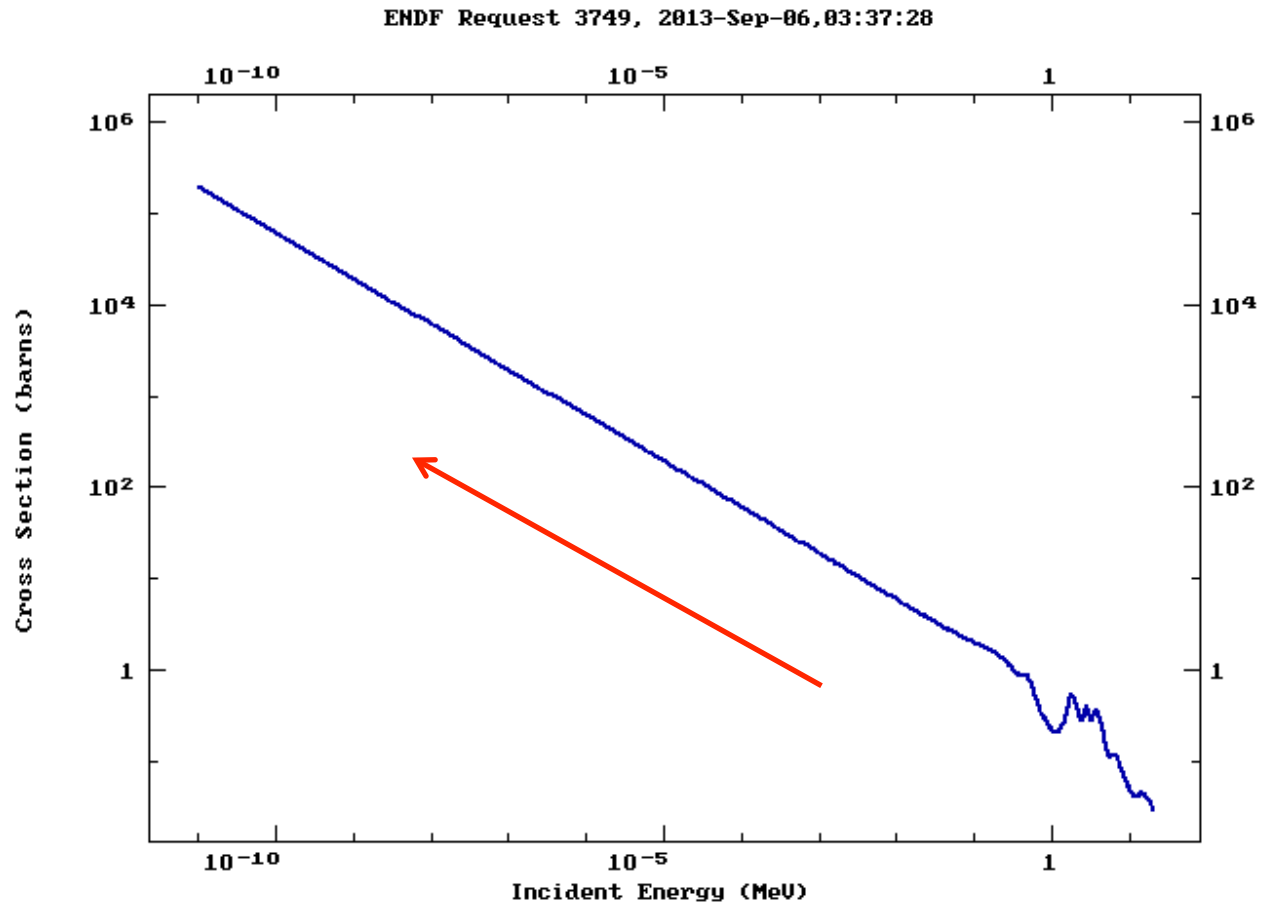


ENDF Request 3756, 2013-Sep-06,03:50:42



$^{10}\text{B}(n,\alpha)$

- Resonances at $E_0=370, 530, 1830\text{keV}$

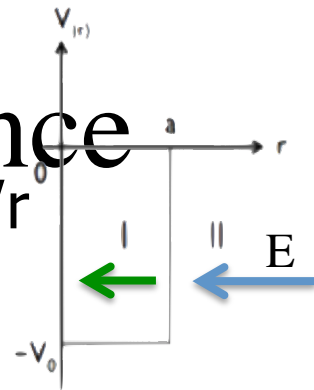


Weisskopf Model on Resonance

- Schrodinger Equation in a potential (V_0). $\psi(r)=u(r)/r$

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{\sqrt{2m(E + V_0)}}{\hbar^2} \right] u(r) = 0$$

$$\frac{d^2}{dr^2} u(r) = \begin{cases} -K^2 u(r) & (r \leq a) \\ -k^2 u(r) & (r > a) \end{cases}$$



$$K = \frac{\sqrt{2m(E + V_0)}}{\hbar}$$

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

- Solution: $u_I(r) = A \sin(Kr)$

$$u_{II}(r) = A' \sin(kr + \delta)$$

- Boundary condition at $r=a$: $u(a), u'(a)$

$$A \sin(Ka) = A' \sin(ka + \delta)$$

$$A(Ka) \cos(Ka) = A'(ka) \cos(ka + \delta)$$



$$\boxed{\frac{\tan(Ka)}{Ka} = \frac{\tan(ka + \delta)}{ka}}$$

Wave equation and cross section

$$\psi(r) = \frac{u_{II}(r)}{r} = \frac{A' \sin(kr + \delta)}{r} = e^{ikz} + f \frac{e^{ikr}}{r}$$

- f : scattering amplitude

$$f = e^{i\delta} \frac{\sin \delta}{k} = \frac{1}{k} \frac{1}{\cot \delta - i}$$

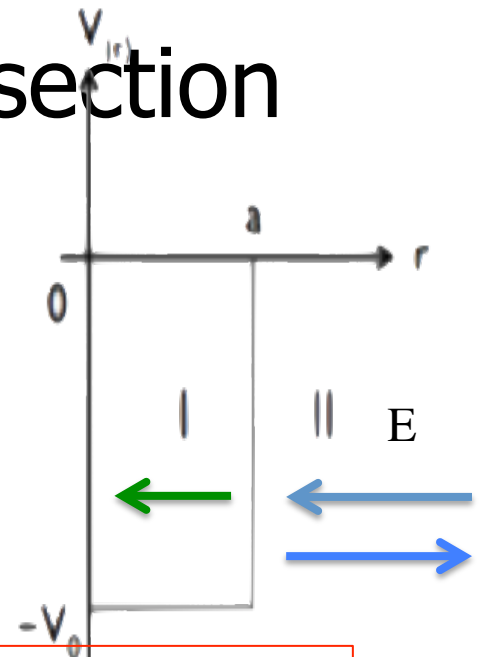
- Cross section $\sigma = 4\pi |f|^2 = \frac{4\pi}{k^2} \sin^2 \delta$

- Near the resonance :

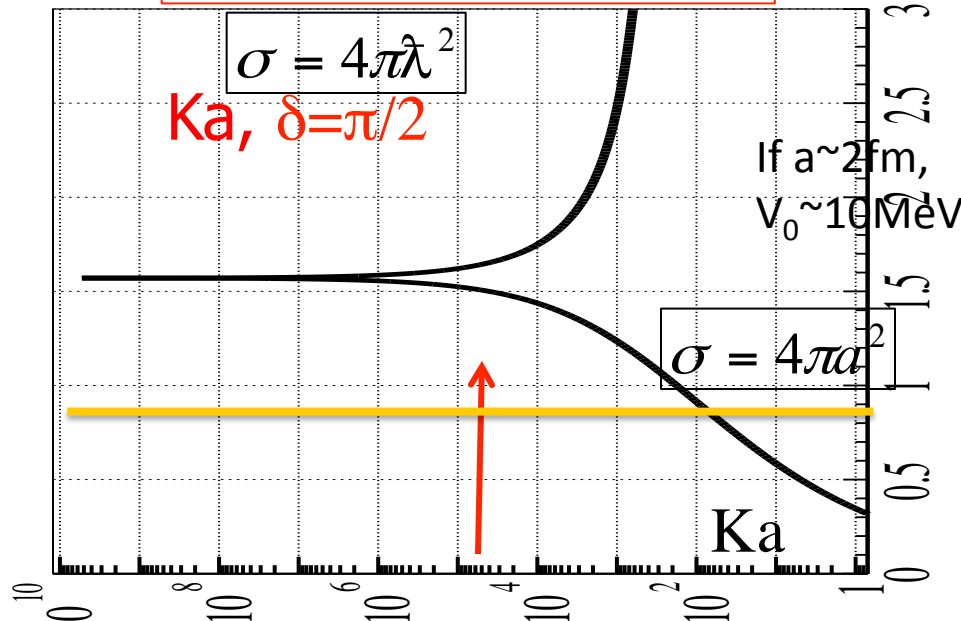
$$f = \frac{1}{k} \frac{1}{-C(E - E_0) - i}$$

$$= \frac{1}{k} \frac{\Gamma/2}{(E - E_0) - i\Gamma/2}$$

$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$



Cross section (fm)² vs . Ka



$$\frac{\tan(Ka)}{Ka} = \frac{\tan(ka + \delta)}{ka}$$

Illustration of two cases

I) General case ($Ka \neq \pi/2$)

$$A \sin(Ka) = A' \sin(ka + \delta) \quad ka \ll 1$$

$$A \sim A' \times ka \ll A'$$

II) Resonance (Very special case)

&

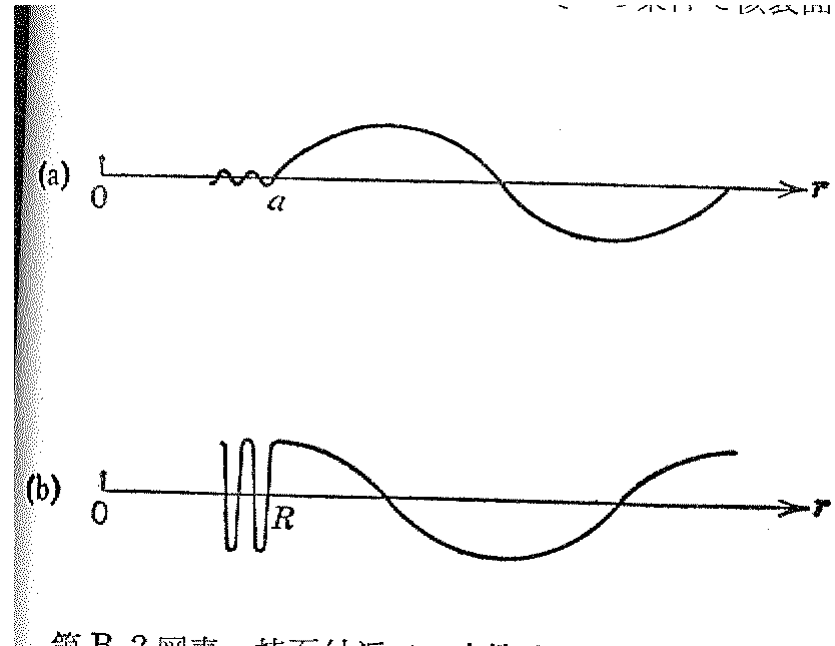
$$Ka = \pi/2 \quad \delta = \pi/2$$

 $A' \sim A$

$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} \sin^2 \delta$$

$$= (I) 4\pi a^2 \quad \text{or} \quad (II) 4\pi \lambda^2$$

E. Fermi, Nuclear Physics



1. History of Thermal Neutron-Nucleus Reaction

*Key numbers: Thermal energy $E_{\text{thermal}} = kT$ ($T=293\text{K}$)= $25.3\text{meV} = 1/2mv_n^2$, Neutron velocity $v_n=2200\text{m/sec}$

- 1934: I.Curie,F.Joliot: $\alpha + A \rightarrow B^*$ (*synthesis of new radioactive elements*) ;
- 1933-1938:Fermi,Amaldi et al.: $n+H/n+A$, Thermalization of neutrons from MeV to meV, $E_n=(1/2)^N \cdot E_0$ ($N=20-30$ n-p scattering)
- 1935 -1936 Bohr, Bethe, Breit-Wigner:Development of low energy neutron reaction (Compound nucleus, Resonance) ;
- 1938 Fermi: Nobel Prize in Physics (*Discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons*)
Harn,Strassman: $n+U \rightarrow A+B$ (*Discovery of the fission of heavy nuclei, 1944 Nobel*)
- 1942.Dec.2, Fermi observed the first artificial self-sustaining nuclear chain reaction (Chicago Pile-1)
- 1956: Reines et al. detected neutrinos : They established the delayed coincidence method with CdCl_2 solution (target) + Liq.Scintillator .
→1995 Nobel Prize (Existence of the neutrino)
- 2015 :RENO, Dchooz, Daya Bay (Liq.Scint.+Gd) , EGADS(Water+Gd)
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

Typical thermal neutron reactions

Gd(Z=64,A=157) has the largest cross section among all stable nuclei. Cd,Gd,Sm,Eu have resonance in the thermal energy. $|\varepsilon_{\text{th}} - \varepsilon_0| < D/2$, Level Distance $D=2-3\text{eV}$

Reaction	Cross section (barn)	Resonance Energy E_0 (eV)
$n+p \rightarrow d+\gamma$ (2.2MeV)	0.3326	
$n+^3\text{He} \rightarrow p+^3\text{H}$	5333	
$n+^6\text{Li} \rightarrow \alpha+^3\text{He}$	940	
$n+^{10}\text{B} \rightarrow \alpha+^7\text{Li}$	3837	
$n+^{113}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Cd}^* \rightarrow \gamma$	20615	178meV
$n+^{149}\text{Sm} \rightarrow ^{150}\text{Sm}^* \rightarrow \gamma$	40140	97.3meV
$n+^{155}\text{Gd} \rightarrow ^{156}\text{Gd}^* \rightarrow \gamma$	60900	26.8meV
$n+^{157}\text{Gd} \rightarrow ^{158}\text{Gd}^* \rightarrow \gamma$	254000	31.4meV
$n+^{161}\text{Eu} \rightarrow ^{162}\text{Eu}^* \rightarrow \gamma$	9200	321meV
$n+^{235}\text{U} \rightarrow A+B$ (Fission)	583	

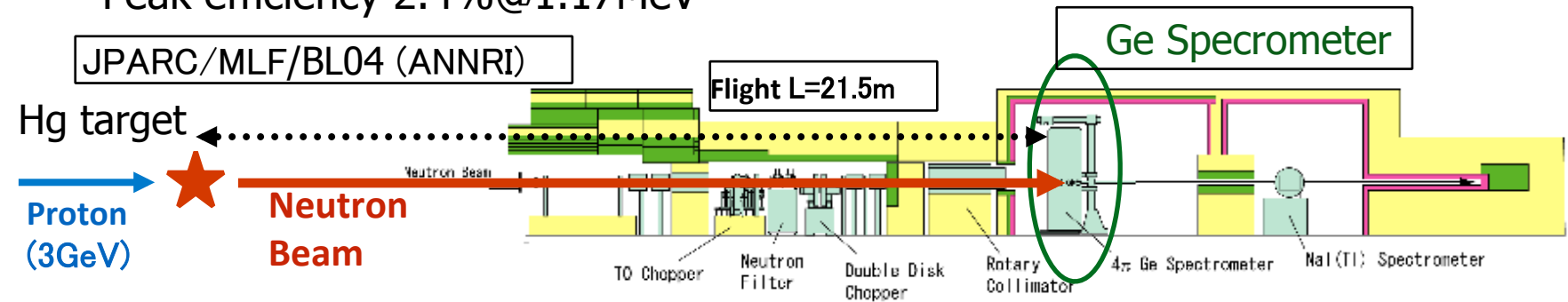
Cf. $n+^{135}\text{Xe}$ (unstable) $\rightarrow ^{136}\text{Xe}^* \rightarrow \gamma$

2.65Mb

84meV

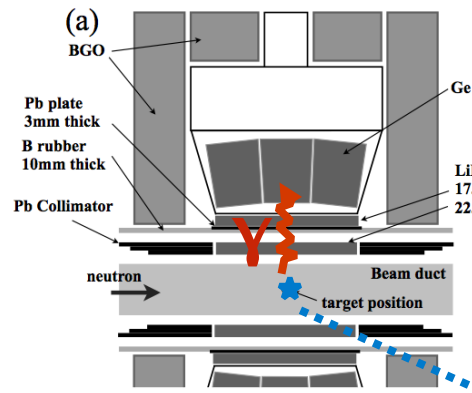
JPARC Beamline (BL04) and Ge Spectrometer (ANNRI)

- JPARC/MLF/BL04 : Started Operation in 2012
- Neutron beam: $1.3 \times 10^{11} \text{ n/(s/m}^2\text{)}$ at $E_n = 1.5\text{-}25 \text{ meV}$ at Power 300kW, ($\Delta E_n/E_n \sim 1\%$),
- Spectrometer (ANNRI): two Ge clusters with BGO veto shields.
- Each cluster : an array of 7 Ge crystals, arranged in hexagon ($\Delta E_\gamma = 9 \text{ keV}@1.3 \text{ MeV}$)
Peak efficiency 2.4% @ 1.17 MeV

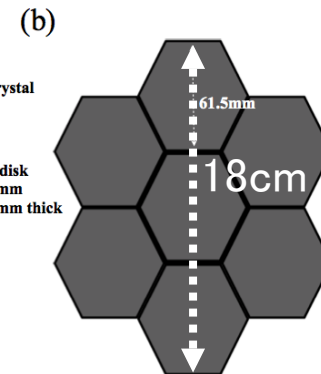


Acceptance (Coverage) :
Ge: 22%
BGO VETO 55%

Ge Spectrometer



7 Ge crystals



1 Ge crystal

