GAGG(Ce)を用いた 中性子吸収断面積測定方法の模索

落合 秀太, 児玉 悠峰, 鈴木 翔太, 鳥居 尚也, 長房 俊之介, 矢野 隆之, 吉冨 成哉

Table of Contents

- 1. Introduction
- 2. GAGG(Ce)を用いた中性子計数手法
- 3. Experiment
 - a. 最終Setupの概要
 - b. 最終Setupまでの道筋
- 4. Analysis & Results
- 5. まとめ & 展望

GAGGで中性子を見る

夏:GAGG(Ce)検出器の性能評価

クラスタ形成を見るためのカロリメータ

秋: Gdについての理解 熱中性子捕獲断面積大 密度大

中性子検出器としての可能性



GAGG(Ce)検出器

冬:G/

冬:GAGG(Ce)の応用

中性子捕獲を見るための中性子検出器

・中性子捕獲の物理
 宇宙元素合成(>1keV)
 中性子イメージング(<1eV)

基礎と応用の双方にGAGGの活躍が期待される



· ·



RPMTによる カブト虫イメージング (田崎)

中性子捕獲の物理:宇宙元素合成

- s-process: ゆっくりとした中性子捕獲とβ崩壊による元素合成
 - AGB星: s-processの場、内部温度~30keV
- 例:**n_TOF**(CERN)のプログラム
 - 飛程200mの中性子(~keV)のTOF
 - γ線の検出⇒中性子捕獲断面積の測定

AGB星の**中性子密度**や**温度**環境 天体物理モデルの精度向上



滞留点となる中性子magic核を対象

高精度かつ多くの核のデータが必要



同位体	30keV での 断面積(mb)	年度
¹⁵¹ Sm	3100±160	2004
⁶³ Ni	67±14	2013
⁷⁶ Ge	13.0±0.7	2021
¹⁷¹ Tm	570±220	2020

近年のn_TOFの測定

本実験と展望

本実験:**天然**Niの中性子反応断面積の測 定



この先: keV領域の中性子に対しての応答の確認 熱中性子以上のエネルギーでのGAGGの検出効率の検証

GAGGでの熱中性子検出と³He検出器の比較

熱中性子領域の新たな測定データ

既存の中性子検出器との比較

	3He比例係数管	プラスチックシンチレータ 液体シンチレータ	GAGG(Ce)	期待されること
対象エネルギー領域	eV~keV	~MeV	未知数	エネルギー領域の補完
密度	小		大	高い検出効率
二次元読み出し	不可	不可	可	二次元イメージング



なぜGAGG(Ce)か?

- GAGG(Ce) (組成式Gd₃Al₂Ga₃O₁₂)
- 高い熱中性子捕獲断面積
 - $\sigma(GdNat) \sim 49,000 \text{ barn}$
- 高密度: 1.3×10²² 個/cm³
 - ³He: 1.4×10²⁰ 個/cm³

GAGG(Ce)を中性子カウンター として利用



GdNat, ¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gdの(n,γ)反応断面積と ³He(n, p)反応断面積の比較

Gdと中性子との反応

• $n + {}^{157}Gd \rightarrow {}^{158}Gd^*$

 \rightarrow ¹⁵⁸Gd + γ + **I.C.electron** + 7.9MeV

• $n + {}^{155}Gd \rightarrow {}^{156}Gd^*$

 \rightarrow ¹⁵⁶Gd + γ + **I.C.electron** + 8.5MeV

 1st→Gnd.の転換係数 α_k>1
 ⇒ 内部転換電子も相当数でて くる



¹⁵⁶Gd,¹⁵⁸Gdの低準位構造

(括弧内はK殻から飛び出す内部転換電子のエネルギー) (Nucl. Instrum. Methods 931(2019) 121-126から引用)

2. GAGG(Ce)を用いた中性子計数手法

GAGG(Ce)中での中性子の飛程



GAGG中での中性子の平均自由行程

GAGG中での中性子の減衰

● 熱中性子は**ほぼ表面(~100μm)**で反応(今回用いる結晶:18×18×18 mm³)

どのように中性子数を数えるか

		エネルギー(keV)		
脫励起	<u> </u>	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁸ Gd	
1st→Gnd.	K殻 I.C.電子	38.66	29.27	
	γ線	88.97	79.51	
2nd→1st→Gnd.	γ線	288.19	261.46	
$3rd \rightarrow 2nd \rightarrow 1st \rightarrow Gnd.$	γ線	584.72	539.02	

- 熱中性子との反応は結晶表面でおこる
 - ⇒ 半分の割合で特性 X 線は

逃げる

- ⇒ 低エネルギーピーク
- 1st→Gnd.の際の

K殼内部転換電子

脱励起γ線

に由来するピークを利用



2. GAGG(Ce)を用いた中性子計数手法

先行研究

- M.P. Taggart, M. Nakohostin, P.J. Sellin, Nucl. Instrum. Methods 931(2019) 121-126
- 1辺10mmの立方体結晶

 読み出しはSiPMを使用

 AmBeからの速中性子を減速
 - ソースは水タンク中に設置
- 鉛から出るX線(~74keV)の
 遮蔽に銅(~1 mm)を使用



2. GAGG(Ce)を用いた中性子計数手法

先行研究



本実験でやりたいこと

<u> 先行研究</u>

- AmBe 線源を利用
- GAGG(Ce)に中性子を当てた時に、どのようなピークが見えるのかを確認
- 中性子イメージング技術などの応用を見据えている?



GAGG(Ce) 検出器

- 18×18×18 mm³の結晶
- Avalanche Photodiode (APD)を使用
 - HAMAMATSU S8664-1010
- ClearPulse製 5570 PreAmp
- Sn,Culこよる遮蔽
 - Pb からくる数+keV の特性X線の遮蔽
 - Sn : 1.0 mm
 - Cu : 1.5 mm
- 結晶まわりにホウ素入り樹脂
 - BPE で遮蔽できなかった中性子を遮蔽
 - およそ質量比 30% の H₃BO₃



³He 比例計数管

$^{3}\text{He} + n \rightarrow p + t + 765 \,\text{keV}$ を利用



³He 比例計数管の寸法



遮蔽とコリメータの寸法

KUANS概要 (Kyoto University proton Accelerator Neutron Source)

- Be標的に加速した陽子ビームを照射 ⇒ 中性子取り出し
- 常温ポリエチレン減速材(10×10×10 cm) で減速 ⇒ 熱中性子を生成
- ビーム幅: 10~200 µs (本実験では 60 µs で使用)





Duct 出口から見た写真

3. Experiment Duct • Ni 標的

- コリメータ: BPE
 - 上流から Ф30, Ф20, Ф13 mm
- γ線の遮蔽: Pb
- Duct 内部の反射材を強化
- 天然の Ni
- 厚さは 10 mm まで 1mm 単位で変更可能
 - 1 枚の寸法は 20 × 20 × 1 mm³
- Duct 直後に設置



検出器まわりの遮蔽

● 外側:BPE

○ 側方、後方からも回り込んでくる中性子を遮蔽

- 内側: Pb
 - バックグラウンドのγ線の遮蔽





回路



本実験のセットアップに至るまでの過程(苦労話含む)

- 1. 架台作成
- 2. GAGG読み出し
- 3. 遮蔽
- 4. Duct
- 5. Ni 標的の位置決め





最終Setupまでの道筋 ~予備実験~

GAGG読み出

もともと使っていたGAGGはPD読み出しの大きい結晶

ノイズを落としきれず ~200 keV以下のエネルギーを読み取れない

→阪大から送ってもらったAPD付のGAGGを使用

→¹³³Baの32 keV X線も見れるように





²²Naの511 keV APD読 み出し

最終Setupまでの道筋

~予備実験~



133Ba w/ Cu+Sn(Red) vs w/o Cu+Sn(Blue)



¹³³Ba線源によるヒストグラム







BPE10 cm以上の遮蔽でも中性子をカウントしてしまう

→中性子のノイズが多いので防ぐためH₃BO₃入 り樹脂シールドを作成

→ 計算では厚い部分で~1 eVのneutronを止め られるが期待するほどの優位な効果見られず

→ 前方以外から来る熱中性子によるノイズは 無さそう







ホウ酸購入までの道筋

ホウ素入り樹脂の作成風景

最終Setupまでの道筋

cpsを増やすためDuctの中 性子反射材(Carbon Block) 増強

→ cps増加 !!





Duct



変更前。反射材は下面のみ。 LiMのcpsは~200 変更後。反射材が上、 左右についた。 LiMのcps ~250



ダクトに黒鉛ブロック

を追加するP4メンバ



最終Setupまでの道筋 ~予備実験~ Ni標的の位置 決め 標的の位置を検出器から離せば測定される弾性散乱の寄与が減り

吸収断面積に近い値となる事を期待

しかし優位な位置依存性なし

→設置しやすいDuct直後にNi標的を置くことに決定





4. Analysis & Results

トランスミッション法により断面積を算出

標的の数密度:n
入射ビームが当たる面積:S
入射粒子数:N
標的を dx 通過する間に反応し
てビームから出ていく粒子数: - dN



N₀(標的無し)とN(x)(標的有り) を測定すれば断面積σが得られる

CPSの比較











3He NiNat d=10mm Cross Section

10 meV以下(断面積の変化が大きい領域)でd=10 mmの断面積がd=5mmより下 がる.

この領域では計数を溜めるために断面積の計算に入るToFの範囲を広くとったが それでも計数は少なく、その範囲でのエネルギー分布の誤差も処理しきれていない.

これにより計数のわずかな差によってd=5mmと10mmで断面積に差が見られたと 考えられる.

後述のGAGGでは10 meV 以上の議論に限られるため以降は10 meV以上に注目することとする.

³He検出器 検出効率の導出

³He中をx進む間に反応を起こす確率は

 $P = 1 - \exp(-N\sigma x)$

N:標的の数密度、σ:全断面積

遮蔽されていない部分について積分!



³He比例計数管 検出効率



CHIKUWナシとアリの場合の³He検出器(6気圧)のエネルギーごとの検出効率

GAGG(Ce)を使った中性子計数

GAGG(Ce)を使った中性子計数 中性子カウント



GAGG(Ce)を使った中性子計数 中性子カウント



ピークをFit → 中性子をカウント

49.9 ± 0.7 keV	1st → Gnd. 由来
92.6 ± 0.3 keV	1st → Gnd. 由来
284.8 ± 3.3 keV	2nd→1st→Gnd.

Energy (keV)

GAGG(Ce)を使った中性子計数 Noiseの評価

Time of Flight

速度分布



~マクスウェル分布

GAGG(Ce)を使った中性子計数 中性子カウント







GAGG(Ce)を使った中性子計数

断面積算出

Count/keV

おおよそコンシステントな断 面積を得た.

#566 400.0 < tof 600.0

150

100

50

h566_0 Entries

Mean Std Dev

 $p0 = 6.34917 \pm 0.471012$ $p1 = 90.4619 \pm 0$

p2 = 11.6906 ± 0 χ²/NDF = 18.2939 / 7 = 2.61341

250

200

Energy (keV)

300

350

400



GAGG(Ce) vs ³He P.C. vs EXFOR



まとめ

を求めることが出来た!

中性子に対するGAGGの検出効率を調べるため、天然Niの中性子反応断面積を GAGGで測定した。 中性子カウンターとして ³He比例計数管との比較 GAGG(Ce) vs ³He P.C. vs EXFOR GAGG Efficiency 0.20 ratio 0.18 R.J.Brown+(1958) R.G.Allen+(1953) GAGG(Ce) d=4mm GAGG(Ce) d=7mm 0.16 30 GAGG(Ce) d=10mm He PC d=10mm 0.14 σ (barn) 0.12 20 0.10 0.08 10 0.06 0.04 0.02 10^{1} 10^{2} 0 10⁻² e^{10°} 10-1 Energy(meV) GAGGを用いて中性子反応断面積 Efficiencyは0.12と想定よりも小さくなった

5.まとめ

今後の課題・展望

- Cslを用いたノイズの測定
- 引き続き解析を進める
 - 系統的な誤差の評価
- 中速中性子に対する応答を調べていく
 ・KUANSで減速材PEを除去





5.まとめ

謝辞

終始熱心にご指導頂きました銭廣先生

実験の基礎となる理論をご指導下さった萩野先生、金田先生、吉田先生

KUANSの設備について詳しく教えて下さった田崎先生

様々なアドバイスを下さったTAの藤川さん、八尋さん

何度も深夜まで実験にお付き合い下さった広瀬さん

ありがとうございました。



KUANS モデレーター



最終Setupまでの道筋 ~予備実験~ HeM

・「AD変換が甘い」らしい(田崎さん談)ので見えてほしい階段状の構造見えず、データとして怪しい

・予備実験最初の数回分はHeMを使っていたがHVケーブルが断線寸前で使ってた(もともとGNDが限界、触ってたら芯線もちぎれた)ので予備実験段階のデータが怪しい

→³He用PreAmpにつないでNIMで測定することに決定





NIMNIMでの測定データ

#511 252 Cf PEx0 w/o CHIKUWA 1600 V

HeMでの測定データ

³He比例計数管 壁効果



Beam調べ

KUANSで飛ばせる中性子のエネルギー、量を知りたい

- 3He比例計数管を用いて位置を変えながら計測
 - 色んなとこから来てる
 - KUANSの公開スペックから思っていたよりBeamの強度が弱い
- GAGGを置いてTry & Error
 - BPEで囲うとピークらしきものが見えるように、Beam Line以外から飛んでくる中性子多い