

シンチレーション光の波長情報による放射線粒子の識別に成功 ～高精度な放射線検出の可能性～

シンチレータとは、電子などの荷電粒子がその内部を通ったときに光を放出する物質のことで、放出された光をシンチレーション光と呼びます。古くから放射線検出器として利用されており、最近では、中性子検出器として ${}^6\text{Li}$ を含むシンチレータが注目されています。 ${}^6\text{Li}$ は熱中性子を吸収してアルファ線とトリチウムを放出しますが、これをノイズとなるガンマ線から分離できれば、中性子検出器として有望です。本研究グループは、Eu:LiCaI という結晶を用いた中性子検出器について、中性子とガンマ線などの粒子をより高精度に識別できる、シンチレータの発光波長の情報を用いた新しい粒子識別法を提案し、研究しています。

本研究では、Eu:LiCaI シンチレータを用いて、放射線の種類を変えた際にシンチレーション光の波長の違いを調べました。その結果、中性子を照射したときとガンマ線と照射したときで、「フィルタ越しの光センサーの出力」と「フィルタ無しの光センサーの出力」との比が異なることを確認しました。これは中性子を照射したときは短い波長の光の割合が多いことを意味します。すなわち、波長情報による粒子識別技術の実証に初めて成功しました。この技術は、次世代の中性子検出器、さらにはさまざまな種類の放射線検出への応用が期待できます。今後、波長に違いが生じる理由について仮説の検証や、本技術を用いた放射線検出器の実用化を進めていくことを目指しており、これを応用した放射線の撮像技術を確立できれば、広く社会のイノベーション創出の基盤となることが期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

飯田 崇史 助教

研究の背景

シンチレータ^{注1)}とは、電子などの荷電粒子がその内部を通ったときに光を放出する物質のことで、放出された光をシンチレーション光と呼びます。シンチレータと光検出器を用いた放射線検出器は、素核宇宙分野の基礎研究から、医療、エネルギー、農業、資源探査、非破壊検査などの実用分野に至るまで、広範に利用されています。放射線の中でも中性子は、中性子回折による結晶構造分析、BNCT（ホウ素中性子補足療法）や重粒子線によるがん治療、コンクリート内部の非破壊検査、さらに原子炉内部や核融合で生じる中性子線のモニターなど、そのニーズは高まっています。

これまで中性子検出には、³He ガスを用いた比例計数管^{注2)}が広く用いられてきましたが、その価格は高騰しており、代替材料の開発が望まれています。最近では、⁶Li を含むシンチレータ（Eu:LiCAF 等）が中性子検出器として注目を集めています。⁶Li の熱中性子捕獲断面積^{注3)}は水素の約 50 倍と非常に大きく、 ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \alpha + {}^3\text{H}$ の反応を起こします。放出されたアルファ線（ α ）やトリチウム（³H）を検出し、ノイズとなる環境ガンマ線^{注4)}から識別することができれば、波形情報を用いる従来の識別方法よりも高精度な、次世代の中性子検出器として応用が期待できます。これまでに、ナトリウムでドープしたヨウ化セシウムのシンチレータ結晶を用いた研究において、その発光比率が放射線の種類によって異なる可能性が示唆されていました（X. Sun et al., 2011）。しかし、その証明はまだ行われていませんでした。そこで本研究では、波長の情報を利用して粒子を識別する手法の開発を行いました。

研究内容と成果

本研究チームは、⁶Li を含む無機シンチレータとして、Eu（ユウロピウム）を添加した LiI（ヨウ化リチウム）-CaI₂（ヨウ化カルシウム）ベースの無機シンチレータ（Eu:LiCaI）の開発を進めてきました。今回はそれを用いて、違いの少ない波形ではなく、発光波長の情報を利用して中性子事象とガンマ線事象を区別する研究を行いました。

Eu:LiCaI を 1mm の厚みに切り出して、MPPC^{注5)}と呼ばれる光センサーでサンドイッチし、片方に長い光をカットするフィルタを挿入した図1のような実験装置を組みました。そして、中性子線源（²⁵²Cf）とガンマ線源（⁶⁰Co）を照射し、その信号を計測しました。無機シンチレータの発光機構は大きく分けて2種類存在します。発光中心と呼ばれる少量の不純物を介して発光する場合と、発光中心を介さずホストの結晶で発光する場合があります、それぞれ異なる波長のシンチレーション光を放出します。シンチレータ内で中性子が反応した場合は飛跡が短いアルファ線が、ガンマ線が反応した場合は飛跡が長い電子が、それぞれ放出されます。電子に比べて飛跡の短いアルファ線の場合、狭い範囲にエネルギーが放出され発光中心の原子が飽和することで、ホスト結晶による発光が多くなることが予想されます。従って、放射線の種類によって発光波長が異なれば、フィルタ有り無しの2つの MPPC での検出光量比（ADC Ratio）に違いが生じるはずですが、測定の結果、中性子線とガンマ線を照射したときとで、検出光量比およびその分布に違いが見られました（図2）。以上より、放射線の種類によって無機シンチレータの発光波長が異なることが実証されました。

今後の展開

本研究では、学術・産業利用ともに需要が拡大している中性子検出において、波長情報を用いた粒子識別という新たな可能性を示しました。粒子の種類によって波長に違いが生じる理由については、仮説はあるものの詳細は判明しておらず、今後、詳しいメカニズムの解明を目指します。また、結晶の大型化、結晶組成の最適化、MPPC のアレイ化などを進め、より実用的な検出器の開発を行います。

本技術のさらなる進展により、中性子とガンマ線のみならず、アルファ線、陽子、電子などの粒子を識別できる可能性もあります。可視光において白黒写真機から8Kやスロー動画カメラなど撮像技術への発展と同様に、新たな放射線の撮像技術の確立は、広く社会のイノベーション創出基盤となることが期待されます。

参考図

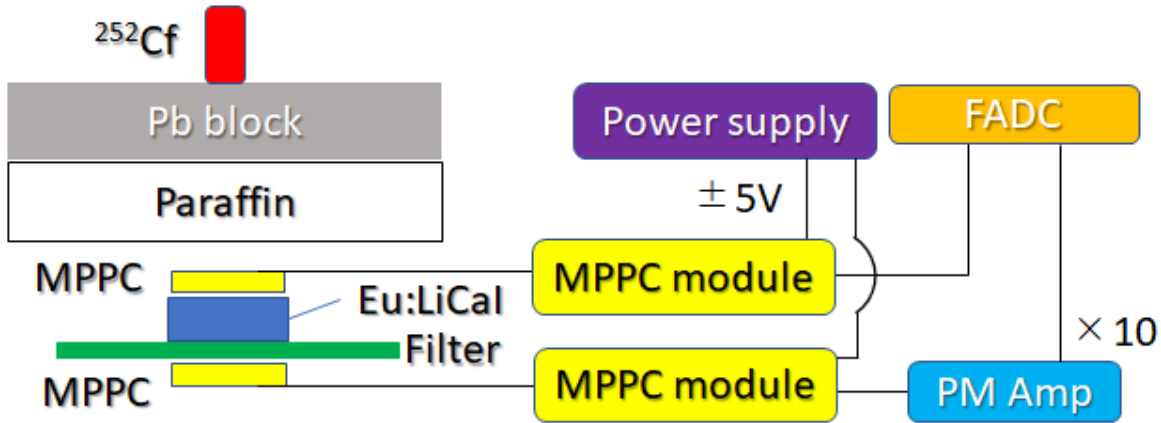


図1 本研究の概要

Eu:LiCaI 結晶は 1mm 厚に加工され、450nm 以上の波長の光をカットするフィルタの上に設置し、結晶とフィルタを 3mm×3mm 角の MPPC で挟み込んでいる。中性子線源での測定では、高速中性子を熱化するため結晶の付近にパラフィン、²⁵²Cf 起源のガンマ線を低減し中性子のみを効率的に検出するため鉛ブロックを、それぞれ設置した。

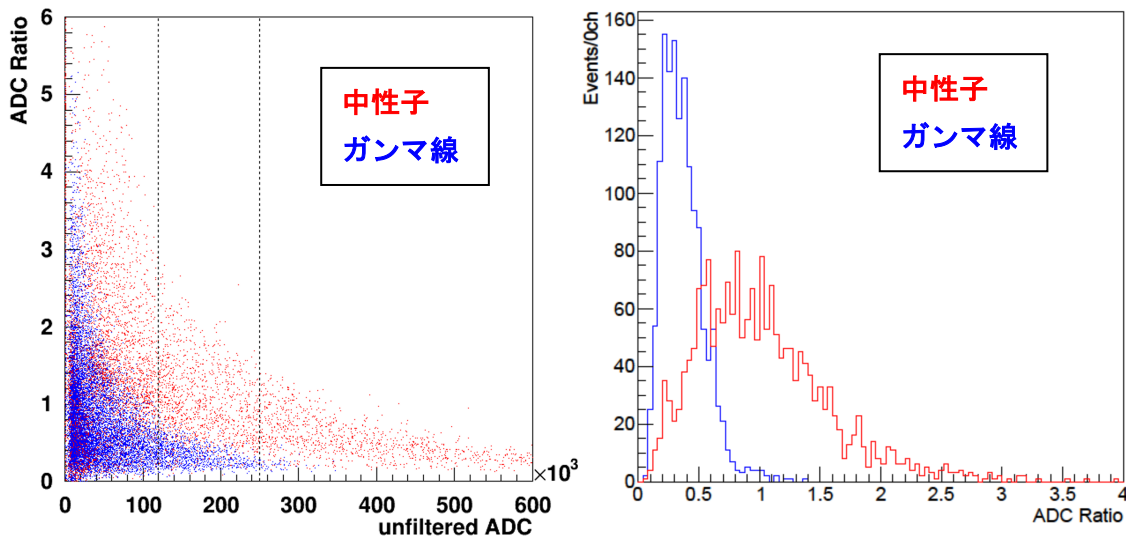


図2 本研究の実験結果

(左図) 縦軸が ADC Ratio、横軸がフィルタ無しの MPPC の信号強度。赤が ²⁵²Cf、青が ⁶⁰Co を線源として用いた場合を表す。エネルギー依存性が大きく、中性子線でもガンマ線でも、高エネルギー側では ADC Ratio が小さくなる傾向が見られる。ただし、同じエネルギー領域で比較すると、常に赤の ²⁵²Cf の事象が青の ⁶⁰Co よりも ADC Ratio の値が大きくなっている。

(右図) 同じエネルギー領域で中性子とガンマ線がどの程度分離するのかを可視化するため、左図中の点線で示された領域の事象に対して ADC Ratio の一次元分布を描いたもの。中性子とガンマ線では分布に明らかな違いが見られる。

用語解説

注1) シンチレータ

荷電粒子が通過するときに発光する物質の総称で、無機や有機、固体や液体などさまざまな種類が存在する。シンチレータで放出される光をシンチレーション光と言う。

注2) 比例計数管

気体中の電子なだれ増幅(磁場中で加速された電子が気体分子と衝突して新たな電子が放出される現象が連鎖的に生じる)を利用した放射線検出器。中性子検出用には気体として ^3He が使われる。

注3) 熱中性子捕獲断面積

低エネルギーの中性子は、周囲の原子核に吸収されてアルファ線やガンマ線を放出する。その反応の起こりやすさは原子核の種類によって異なり、捕獲断面積として表される。

注4) 環境ガンマ線

環境中の物質にはウランやトリウム等の放射性不純物が含まれ、これらから放出されるガンマ線は、中性子を検出する際に大きなノイズとなりうる。

注5) MPPC

Multi Pixel Photon Counter の略で、近年開発された半導体を用いた光検出器。

研究資金

本研究は、島津科学技術振興財団および旭硝子財団による研究助成を受けて実施されました。また、JSPS 科研費(18H01222, 22H04570) から一部支援を受けました。

掲載論文

【題名】 Gamma and neutron separation using emission wavelengths in Eu:LiCaI scintillators
(Eu:LiCaI シンチレータの発光波長を用いたガンマ線/中性子線の分離)

【著者名】 Takashi Iida, Masao Yoshino, Kei Kamada, Rei Sasaki, Ryuga Yajima

【掲載誌】 Progress of Theoretical and Experimental Physics

【掲載日】 2023年1月10日

【DOI】 10.1093/ptep/ptad003

問い合わせ先

【研究に関すること】

飯田 崇史 (いいた たかし)

筑波大学数理物質系 助教

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003982>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp