

機関番号：82645

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010 年度

課題番号：20740145

研究課題名 (和文) 太陽中性子・ガンマ線観測による粒子加速機構の研究

研究課題名 (英文) Investigation of particle acceleration mechanism by an observation of solar neutrons and gamma rays

研究代表者

晴山 慎 (HAREYAMA MAKOTO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ 研究員

研究者番号：60327286

研究成果の概要 (和文)：

本研究では太陽 γ 線・中性子検出器の基礎開発およびその基礎特性の調査を行った。軽量化のため、プラスチック・LiI 一体型シンチレータを作成し、その発光を1本の光電子増倍管から読み出した。出力波形の蛍光の減衰定数の違いと反応の違いを利用し、 γ 線、中性子、宇宙線粒子の弁別が可能であることが確認出来た。 γ 線のエネルギー分解能として約11%@661keVにであった。線源からの中性子スペクトルを測定し、シミュレーションと比較したところ、1～8MeVの領域に関しては良く一致する結果を得た。

研究成果の概要 (英文)：

A prototype detector for solar gamma rays and neutrons are developed and investigate its characteristics. The detector is construct of a unity with plastic and LiI scintillators and a Photomultiplier tube. Gamma-ray, neutron and charged particle (cosmic ray) can be distinguished by differences of light emission due to decay time of each scintillator and particle reaction in the scintillators. The energy resolution of gamma-ray is about 11% at 661keV. An energy spectrum of neutrons from a radioactive source from 1 to 8 MeV is consistent with a simulation result taking the detector construction into account.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線 地球放射線帯 太陽エネルギー粒子 磁気圏 太陽高エネルギー粒子 粒子計測技術

1. 研究開始当初の背景

太陽面爆発現象 (フレア、CME 等)に伴う粒子加速と高エネルギー粒子の放出は、主に地球近傍で観測の行われ、その加速機構が研究されてきた。しかしながら、太陽での粒子加速機構の詳細は、依然明らかにされていない。太陽から放出された加速イオンから加速現場の情報を得るには、複雑に変化する惑星間磁場を考慮しなければならない。一方、太陽

からの中性子・ガンマ線は、惑星間磁場の影響を受けない。太陽面爆発によって放出される中性子と核ガンマ線は、加速イオンと太陽大気の衝突で生成される。Ramatyら[1]やMurphy[2]が示したように、生成される中性子・ガンマ線スペクトルは、加速モデルと加速イオンや太陽大気組成によって異なる。つまり、これら中性2次粒子のエネルギースペクトルや持続時間の同時観測は、加速現場の

情報、特に 100MeV 以下の粒子加速情報を、より直接的に得る。

だが、太陽から放出された中性子は、その寿命のため、典型的には 100MeV 以上の中性子でなければ地球近傍で観測は難しい。100MeV 以下の中性子と核ガンマ線の同時観測は、太陽近傍でのみ可能である。太陽高エネルギー粒子を観測する衛星は、米国の SOHO や ACE、STEREO 衛星が代表的であるが、その観測は地球の公転軌道近くであり、また中性子やガンマ線の観測は行っていない。太陽近傍での観測は、1970 年代に ESA による HELIOS 太陽観測衛星[3]が 50 太陽半径まで接近して観測を行ったが、やはり中性子およびガンマ線モニタは搭載していなかった。

太陽中性子は、1980 年に SMM 衛星[4]によって始めて検出されて以来、衛星や地上で観測は続けられているが、観測された中性子イベントはわずかに数 10 イベント程度であり、そのエネルギーも数 10MeV 以上に限られる。一方、太陽核ガンマ線の観測は、SMM 衛星に始まり、現在も CORONAS-F 衛星[5]等によって続けられ、特に Ge 検出器を搭載した RHESSI 衛星や INTEGRAL 衛星により、高精度な観測が続けられている。だが、これらも地球近傍での観測のため、核ガンマ線の生成に関係する数 10MeV 以下の中性子の観測は困難である。このように、核ガンマ線と数 10MeV 以下の太陽中性子観測はこれまでに例がない。

現在、ロシアで InterHelios 太陽探査衛星による太陽近傍 (30 太陽半径)での観測計画があり[6]、そこに太陽中性子・ガンマ線検出器の搭載が決定している。この観測により、初めて太陽中性子と太陽核ガンマ線の同時観測が可能となる。このような観測は、これまでの地球近傍での太陽中性子・ガンマ線観測と競合するだけでなく、それぞれの観測では得られないデータを得る相補的な観測である。

2. 研究の目的

太陽表面の爆発現象によって放出される中性子およびガンマ線の観測は、太陽での荷電粒子加速だけでなく、銀河宇宙線の加速機構を解明する上でも重要な意味を持つ。超新星爆発による銀河宇宙線の加速は、その加速現場を直接観測することは困難である。一方、太陽高エネルギー粒子の加速現場は、人類が直接観測可能な粒子加速実験室である。太陽での粒子加速機構の解明は、銀河宇宙線加速に密接に関係し、宇宙線の初期加速から超新星爆発での加速限界までの統一描像の解明につながる。特に、太陽中性子と核ガンマ線は、惑星間磁場による変調を受けることなく、加速現場の情報を直に伝える粒子である。本研究は、粒子加速の統一描像の解明を目指し、太陽近傍での太陽中性子・ガンマ線観測を目

的とした太陽中性子・ガンマ線検出器の基礎開発研究を行う。

3. 研究の方法

プラスチックシンチレータ (P-Sci) および LiI シンチレータ (LiI-Sci) を用いた一体型ガンマ線・中性子検出器のプロトタイプ(図 1)を製作し、線源を用いた基礎実験により、

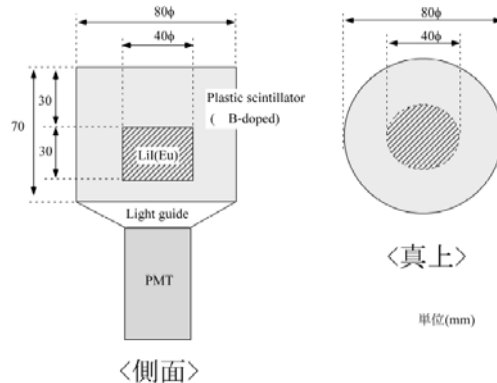


図 1 : ガンマ線・中性子検出器の模式図

ガンマ線および中性子の同時検出を行い、開発した一体型検出器の性能を実証する。検出器内に入射した荷電粒子・中性子およびガンマ線は、その粒子ごとの反応およびシンチレータ特性の違いのため、観測するシンチレーション光の発光パターンに違いがある。粒子弁別を以下の方法で行うことが可能である。

ガンマ線：ガンマ線は LiI-Sci のみで反応するため、LiI-Sci のみで発光したイベントをガンマ線と同定できる。

中性子：中性子は P-Sci 内で弾性散乱を繰り返した後、熱化され ${}^6\text{Li}$ に捕獲されたのち、崩壊する (Q 値=4.8MeV) を放出する。従って、P-Sci 内での連続的な発光とその後の LiI 内での 4.8MeV の発光を遅延同時観測したものが中性子と同定できる。また、P-Sci の発光量が中性子の入射エネルギーに対応する。

荷電粒子 (宇宙線)：宇宙線は非常に高速で検出器を通過するため、非常に短時間 (\sim ns) のうちに P-Sci のみ、または P-Sci および LiI-Sci を大きく発光させる。そのため、宇宙線については、ns オーダーのうちに P-Sci または LiI-Sci を大きく発光させるイベントを荷電粒子と同定できる。本研究の場合、荷電粒子はバックグラウンド粒子であるため、電荷弁別は目的としない。

本研究では、検出器の軽量化も考慮し、2つのシンチレータから発するシンチレーション光を 1本の光電子増倍管 (PMT) で読み出し、粒子弁別を行う。P-Sci と LiI-Sci は発光の減衰時間に大きな違いがあり、その減衰時間を利用してどちらのシンチレータで発光したか弁別が可能である。

本研究では、上記の弁別方法の実証とシミュレーションと実験データとの比較により

にその基礎特性を調べた。

4. 研究成果

①プロトタイプ検出器の製作と諸元



図 2 : 製作したプロトタイプ検出器。

諸元 :

シンチレータ部 :

プラスチック : 340 g (1.02g/cm³)

H/C=1.11

LiI : 150 g (4.08g/cm³)

⁶Li > 96%

PMT 部 :

PHOTONIS XP3330B : 200g

ケース : アルミ 250g

総重量 940g

図 2 に製作したプロトタイプ検出器とその諸元を示す。大きさについては図 1 のスケールを参照してほしい。

本検出器をもちいて、モジュール上に構築した粒子弁別ロジックをもちいて粒子弁別をおこなった。

ガンマ線の同定は LiI シンチレータのみが発光という条件で弁別した。137Cs 線源を用いたガンマ線の観測結果を図 3 に示す。661keV の光電ピークがきれいに見えていることがわかる。本実験において、エネルギー分解能は 11%@661keV であった。

中性子の同定は、以下条件で行った。

- P-Sci の発光と LiI-Sci の発光の時間差が 0.4~7μs である
- LiI-Sci の発光が ⁶Li(n, α)T 反応の Q 値である 4.8MeV に対応する。

第 1 の条件の時間差については、実験的に求め、さらにシミュレーションによりその妥当性を確認している。

結果を図 4 にしめす。図 4 は 252Cf 線源を用いて測定を行った結果である。条件を付すことにより、Q 値 (4.8MeV) に対応するピークのみが取り出されていることがわかる。また、このピークは高エネルギー側にテールを

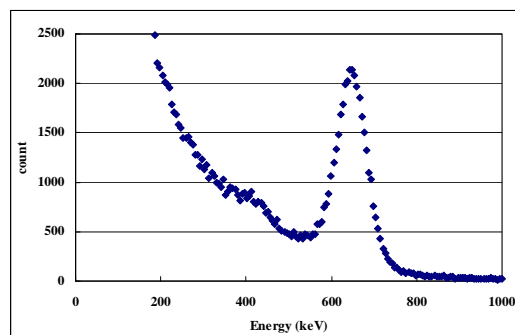


図 3 : 137Cs 線源によるプロトタイプ検出器で観測されたガンマ線エネルギースペクトル。

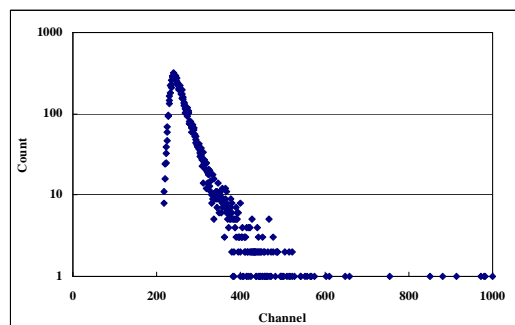
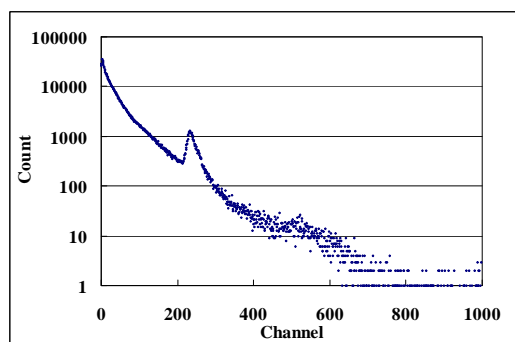


図 4 : 中性子照射した際の出カスペクトル。上 : 弁別条件無し。下 : 弁別条件あり。

持っているが、これは、P-Sci 中での弾性散乱によつての発光信号によるものであり、入射中性子による発光信号のみを正しく抽出出来ていることがわかる。

以上の実験結果から、プロトタイプ検出器によりガンマ線および中性子の弁別が可能であることが示された。

②入射中性子エネルギーの決定

観測された中性子については、その入射エネルギーも知る必要がある。中性子の運動エ

エネルギーがP-Sci 内でそのほとんどを失われていけば、P-Sci の発光量よりエネルギーを推定することができる。そこで、プロトタイプ検出器を再現したシミュレーション (Geant4) により、検出器内での粒子伝搬シミュレーションを行った。図5は、前節で示した検出条件を満たしたイベントに対して、Li に捕獲時の熱中性子のエネルギースペクトルを計算したものである。

捕獲される時の中性子のエネルギーは100eV 以下であり、中性子の運動エネルギーのほとんどがP-Sci 中で損失されていることがわかる。つまり、図4下で抽出されたピークのから、LiI での発光量を差し引いた発光量が入射中性子の全運動エネルギーに対応したP-Sci の発光量と見なすことが出来る。

そこで、熱中性子を照射し、あらかじめ中性子捕獲によるLiI 発光量を測定し差し引くことで、中性子の入射エネルギーを求めた。

図6には、実感結果 (青) とともに観測条件を考慮したシミュレーション (赤) でえられたエネルギースペクトルを示す。観測領域において、エネルギースペクトルがよく一致しており、プロトタイプ検出器により中性子エネルギースペクトルが測定可能なことが示された。

③複合線源による粒子弁別。

ガンマ線源として ^{137}Cs および ^{207}Bi 、中性子線源として ^{252}Cf の3線源を同時照射したスペクトルを図7に示す。それぞれの強度が検出面で1:1:1になるように調整してある。

^{252}Cf の自発核分裂によるガンマ線のなだらかなスロープの上に、 ^{137}Cs および ^{207}Bi のガンマ線ピークが観測され、また 2.7MeV 付近に Li の中性子捕獲反応による Q 値 4.8MeV に対応する大きなピークが見えていることがわかる。この結果からプロトタイプ検出器により、ガンマ線および中性子の同時観測が可能になったことが明らかになった。ガンマ線観測に対して、中性子捕獲ピークは妨害ピークとなるが、注目する太陽からの核ガンマ線は、C, N, O 核については4~6MeV、Mg, Si, Fe 核については600keV~2MeV に存在するため、これらのガンマ線観測については大きな障害にならない。また、太陽からガンマ線と中性子はその到達時間が異なるため、フレア時の観測において中性子捕獲ピークは妨害ピークとなり得ない。

以上のように、プラスチックシンチレータおよびLiI シンチレータからの発光を1本の光電子増倍管でとらえることで、ガンマ線および中性子の同時観測が可能であることが本研究により示された。

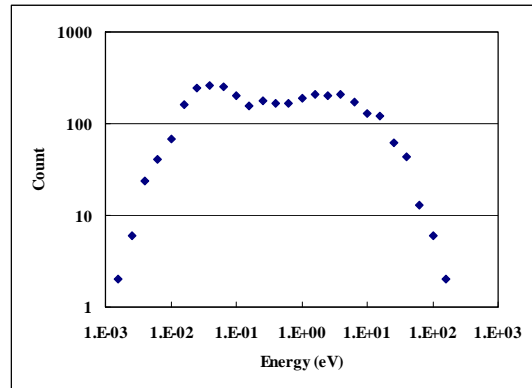


図5: ^{252}Cf 線源から放出された中性子のうち、検出器中でLiに捕獲された熱中性子のエネルギースペクトル。Geant4 コードにより計算

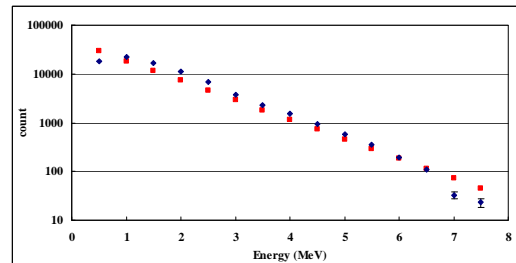


図6: ^{252}Cf からの放出された中性子の観測エネルギースペクトル (青)。赤印は、観測条件を考慮したシミュレーション計算による結果

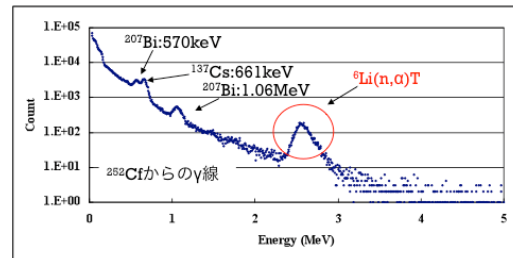


図7: 複合線源による、プロトタイプ検出器で得られたエネルギースペクトル。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 長谷部信行, 晴山慎, 他: "太陽探査宇宙船「Interhelios」搭載の太陽中性子・ γ 線検出器の開発" 第 56 回応用物理学関係連合講演会. (20090401). 筑波大学
- 2) 晴山慎, 長谷部信行, 他: "Interhelios 太陽観測宇宙船による太陽中性子・ガンマ線の観測計画 3" 日本物理学会第 64 回年次大会. (20090330). 立教大学
- 3) 益山直樹, 晴山慎, 他: "太陽探査機「Inter HELIOS」に搭載する γ 線・中性子検出器の開発" 研究会「放射線検出器とその応用」(第 23 回). (20090129). 高エネルギー加速器研究機構

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

晴山 慎 (HAREYAMA MAKOTO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ 研究員
研究者番号: 60327286