

氏 名	恩田 香織
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記号番号	博理工甲第 771 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Observational Study on Hard X-Ray Variability in Gamma-Ray Bursts (ガンマ線バーストにおける硬 X 線変動の観測的研究)
論文審査委員	委員長 教授 田代 信 委員 教授 鈴木 健 委員 准教授 寺田 幸功 委員 連携准教授 望月 優子

論文の内容の要旨

本研究は天体現象「ガンマ線バースト」の硬 X 線初期放射を過去最高の光子統計で観測し、そこからこれまで謎であったガンマ線バーストの放射機構モデルに新たな制限を加えた研究である。

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) は、ビックバンを除けば宇宙で最大の爆発現象である。数秒～数百秒という短時間で太陽の一生分に相当するエネルギーを X 線・ガンマ線で放出し、1 日に 1 回程度の頻度で宇宙のいたる方向で起こる。これは一般に「初期放射」と呼ばれ、そのあとに X 線～電波で数時間～数十日にわたって輝く、いわば残り火のような「残光現象」が観測される。1967 年に発見されてから 40 年余り経過したが、精力的な観測にも関わらず、未だに起源天体や放射機構などの重要課題が未解明である謎の多い天体現象である。

観測的研究による発見は、ガンマ線観測衛星 CGRO によって観測された 54 個の GRB の初期放射のスペクトル解析により、現象論的に 2 つのべき関数を指数関数でなめらかに繋いだモデル (Band 関数) でよく再現できるという報告がある (Band et al. 1993)。これを基に理論的研究による様々な放射機構モデルが提案されている。その中でも、爆発天体から放出された相対論的速度の物質同士の衝突によって衝撃波が生じ、シンクロトロン放射を起こすという「シンクロトロン衝撃波モデル」が支持されている。一方で、近年の観測装置の発達により Band 関数では表現できない複数の例が報告されている。それらの大半に共通する特徴は、数 100keV ～ MeV のエネルギー帯域でのスペクトルで Band 関数では再現できない「超過成分」が見られることである。このような現象は GRB の放射機構の特徴を反映していると考えられる。しかしこの帯域は、観測された例数が少ない上、高い統計のデータは得られていないため、放射の解明には至っていない。

GRB の放射機構に迫るには広いエネルギー帯域での系統的な研究が重要であると考え、本研究では、15-150keV で従来の観測装置の約 2.5 倍の検出効率を持つ *Swift* 衛星搭載の BAT 検出器と、50-5000keV で従来の観測装置の約 6 倍の検出効率を持つ「すざく」衛星搭載の WAM 検出器を用いて、初期放射を調べた。これら 2 つの検出器は、前述の超過成分が見られる数 100keV ～ MeV 帯域において圧倒的に有利である。本論文はこれらの装置のもつ優れた光子統計を生かし、WAM で得られた 600 もの GRB の中から、特に光子統計に優れた事象を選び、以下の方法で研究を行った。

明るく高い光子統計が得られた GRB の時間分割スペクトル解析を行い GRB の初期放射の放射機構を調べた。特にこれまでに観測例が少なく、先に述べた超過成分のような特徴的なスペクトル成分が期待される 1MeV 以上に有意な放射がある 22 個の GRB に着目した。この 22 個の GRB を 1 秒単位で十分な統計が得られる程度に時間分割して、それぞれの時間分割したスペクトルが Band 関数でよく再現されるのか、それとも過去に報告のある超過成分のような「第 3 のスペクトル成分」を必要とするのか調べた。その結果、1 個の GRB のある時間帯において、スペクトルの 2.2MeV 付近に Band 関数では再現できない超過成分の兆候を見出した。興味深いことに、この超過成分のスペクトルの形状は、過去の観測のようなべき関数ではなく、ガウス関数でよく再現される。また、Band 関数で再現される GRB であっても、低エネルギー側のスペクトルは、シンクロトロン衝撃波モデルでは形成できないと提案されている非常に硬いべきを持つ時間帯があることを見出した。この結果は、GRB の初期放射はシンクロトロン衝撃波モデルを含む複数の複雑な放射機構により形成されていることを示唆している。また、これらが 1 つの GRB で確認できることから、単一の GRB 内に複数の放射領域、あるいは放射過程が存在するものと考えられる。

以上の研究より、これまで唱えられてきたシンクロトロン衝撃波モデルのみでは説明できない観測結果が得られた。さらに GRB 内でシンクロトロン衝撃波モデルで説明できる成分、できない成分とが混在していることがわかり、複数の放射領域、放射過程の重なりあわせで GRB が形成されていると考えられる。

論文の審査結果の要旨

本研究は、申請者が開発と運用に携わった2つの観測衛星を用いて行った、ガンマ線バーストの硬 X 線初期放射の観測的研究である。両衛星をもちいることで、15-500keV の帯域で過去最高の光子統計が実現され、詳細なスペクトル変動の観測が可能になった。

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) は、ビックバンを除けば宇宙で最大の爆発現象である。数秒～数百秒という短時間で太陽の一生分に相当するエネルギーを X 線・ガンマ線で放出し、1日に1回程度の頻度で宇宙のいたる方向で起こる。これは一般に「初期放射」と呼ばれ、そのあとに X 線～電波で数時間～数十日にわたって輝く、いわば残り火のような「残光現象」が観測される。1990年代のガンマ線観測衛星 CGRO によって観測された54個のGRBの初期放射のスペクトル解析により、現象論的に2つのべき関数を指数関数でなめらかに繋いだモデル (Band 関数) でよく再現できることが報告され (Band et al. 1993)、これを基に理論的研究による様々な放射機構モデルが提案されている。その中でも、爆発天体から放出された相対論的速度の物質同士の衝突によって衝撃波が生じ、シンクロトロン放射を起こすという「シンクロトロン衝撃波モデル」が支持されている。

一方で、近年の観測装置の発達により Band 関数では表現できない複数の例が報告されている。それらの大半に共通する特徴は、数100keV～MeVのエネルギー帯域でのスペクトルで Band 関数では再現できない「超過成分」が見られることである。このような現象はGRBの放射機構の特徴を反映していると考えられる。しかしこの帯域は、観測された例数が少ない上、高統計のデータは得られていないため、放射の解明には至っていない。

申請者は、GRBの放射機構に迫るには広いエネルギー帯域での系統的な研究が重要であると考え、15-150keVで従来の観測装置の約2.5倍の光子の検出効率(過去最高)を持つSwift衛星に搭載のBAT検出器と、50-5000keVで従来の観測装置の約6倍の検出効率(過去最高)を持つ「すざく」衛星に搭載のWAM検出器を用いた初期放射の研究を行った。これら2つの検出器は、前述の超過成分が見られる数100keV～MeV帯域において圧倒的に有利である。本研究は、これらの装置のもつ優れた光子統計を生かし、スペクトル変動から放射過程の物理的特徴を明らかにした。

本論文研究はWAMで得られた600ものGRBの中から、MeV帯域にまで有意な放射が観測されている光子統計に優れた22の事象を選び、時間分割スペクトル解析を行った。それぞれの時間分割したスペクトルをBand関数で評価し、シンクロトロン放射モデルからの逸脱を検証した。検証は以下の3点に着目して行われた。(1) 光子指数 $-2/3$ 以上の「硬い」べきを示す低エネルギー放射成分、(2) 光子指数 -1 以上、あるいは -4 以下の異常なべきを示す高エネルギー成分、そして(3) べき型以外の成分、である。

最初に、MeV帯域でもっともあかるいGRB070125について、10の時間領域について検証したところ、(1)と(3)についての逸脱をそれぞれ2つの時間帯について発見した。特に、(3)については、スペクトルの2.2MeV付近にBand関数では再現できない超過成分があり、この超過成分のスペクトルは、ガウス関数でよく再現される。

申請者はさらに、残りの21の事象についても同様の検定を行い、さらに4つの事象から(1)の逸脱の兆候を見出した。

本研究では、この2種類の逸脱について考察をおこない、(1)の逸脱がいずれも増光時にみられることと考え合わせ、GRBジェット内での衝撃波が広がるにつれて光学的に厚い領域が光学的に薄くなり、その過程で黒体輻射的な熱的スペクトルか自己吸収を受けたシンクロトン放射スペクトルが混入している可能性を指摘した。また(3)については、他の研究などから予想されるジェットのローレンツ因子を考慮し、鉄などの輝線スペクトルが見えている可能性に言及している。

本論文で示された、ガンマ線バーストのMeV帯域に至る時分割スペクトルの検討は、これまでにない優れた統計精度と広い帯域でおこなわれており、データの質および解析の手法として適切かつ優れたものであり、系統的な時分割広帯域スペクトル解析によって、従来のモデルを超えて放射領域の物理に迫る可能性を示すことに成功したものとして評価できる。

また本論文は、査読制度のある国際的学術誌 Publications of Astronomical Society of Japan に受理され、また論文提出者によって国際会議で1編の口頭発表がなされている。その他、ガンマ線バーストの観測と検出器開発に関わる1編の査読つき主著論文、および15編の共著論文が公表されている。以上の実績をふまえ、本論文は十分学位論文に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。