

フェルミ衛星が明らかにしたガンマ線バーストの姿

大野 雅 功

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉
e-mail: ohno@astro.isas.jaxa.jp

浅野 勝 晃

〈東京工業大学大学院理工学研究科理学研究流動機構 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉
e-mail: asano@phys.titech.ac.jp

田 島 宏 康

〈SLAC 国立加速器研究所 Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.〉
e-mail: htajima@slac.stanford.edu

当 真 賢 二

〈Department of Astronomy and Astrophysics, Pennsylvania State University, 525 Davey Lab, University Park, PA 16802, U.S.A.〉
e-mail: toma@astro.psu.edu

山 崎 了

〈青山学院大学理工学部 〒252-5258 神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1〉
e-mail: ryo@phys.aoyama.ac.jp

on Behalf of the Fermi LAT/GBM Collaborations

宇宙で最も明るい爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) についてはガンマ線放射機構など、まだ多くの謎が残っており、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 (フェルミ衛星) による高エネルギーガンマ線観測に大きな期待が寄せられています。フェルミ衛星 LAT 検出器は、観測を開始してから1年余りの間に、14個のGRBから高エネルギーガンマ線を検出し、その特徴のある時間的変動や新しいスペクトル成分の観測を通じて、ガンマ線放射機構の解明に貢献しています。また、GRBで形成されると思われる超相対論的ジェットの運動速度がローレンツ因子にして1,000以上であることがわかるなど、GRBの新しい姿が明らかになりつつあります。これらの成果に加えて、フェルミ衛星によるGRB観測は、可視赤外背景放射のモデルや、さらには量子重力理論へ厳しい制限を与えるなど、GRB以外の分野に対しても大きなインパクトをもたらしています。

1. ガンマ線バースト —宇宙最大級の爆発現象—

空に広がる星々は、超新星や変光星など一部を除けば、大多数はわれわれの目で見る限り非常に穏やかで変わらぬ姿を見せています。ところが、可視光よりももっと高エネルギーの光子を観測すると、さまざまな天体がダイナミックに活動している様子を見ることができます。その中でも特に注目されているのが、「ガンマ線バースト (GRB)」と呼ばれる天体現象です。GRBは、数ミリ秒から数百秒程度だけ主に keV–MeV 領域 ($\text{keV}=10^3$ 電子ボルト, $\text{MeV}=10^6$ 電子ボルト) のガンマ線で突然明るく輝く現象で、宇宙全体で一日に 1 回程度の頻度で発生しています。アメリカの核実験査察衛星による予期せぬ発見以来、その正体は 30 年以上にもわたって謎に包まれていました。しかし近年、ガンマ線放射の後に X 線、可視、電波で長く続く「残光」が発見され、その解析により典型的に数十億光年以上という遠方の宇宙で発生することが明らかになりました。等方的放射を仮定するとその放射エネルギーは 10^{52} erg を超えるものもあり、超新星爆発の 10 倍以上の大きさのエネルギーがわずか数秒程度で放出されることとなります。現在、GRB は大質量星の崩壊もしくは中性子星やブラックホールの連星が融合したときに生じる超相対論的ジェットの放射を真正面から見たものではないかと考えられていますがまだまだ観測的証拠は十分ではありません¹⁾。ガンマ線はジェット内で作られ、残光はジェットと外部の星間媒質との相互作用で作られると広く考えられていますが、それらの詳しい放射機構は依然謎で、そもそもジェットがどのように駆動されるかも不明です。

このような謎に満ちた GRB の正体に迫る有効な手段の一つと期待されているのが MeV から GeV 領域 ($\text{GeV}=10^9$ 電子ボルト) にかけての高エネルギーガンマ線観測です。フェルミ衛星の先

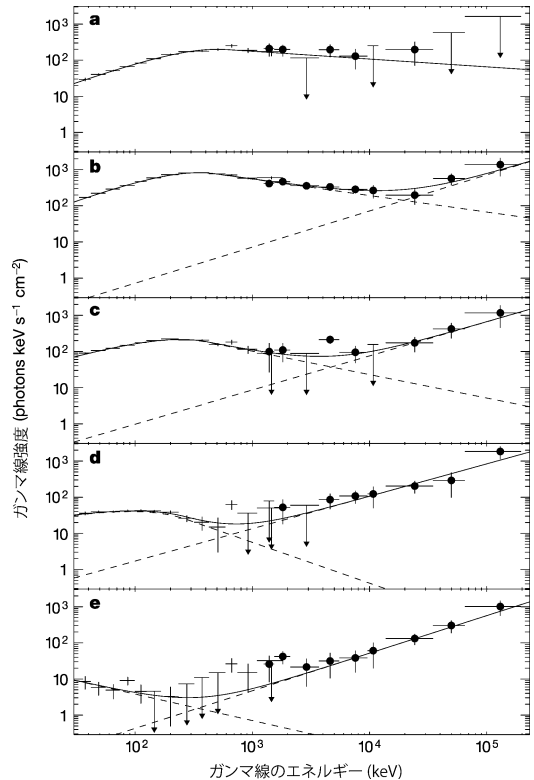


図1 CGRO 衛星で測定した GRB 941017 のガンマ線スペクトル。各パネルは上からバースト発生からの時刻の経過とともにスペクトルがどのように変化するかを示しており、それぞれが、(a) -18 から 14 秒, (b) 14 から 47 秒, (c) 47 から 80 秒, (d) 80 から 113 秒, (e) 113 から 211 秒に対応する。時間とともに減衰する keV–MeV 領域の折れ曲がったベキ関数で表される成分に対して、MeV–GeV 領域では減衰時間の異なる単一ベキ関数成分が卓越している。

代にあたるコンプトンガンマ線衛星 (CGRO 衛星) に搭載された EGRET 検出器により、いくつかの GRB から高エネルギーガンマ線が検出されています。図1は CGRO 衛星でとらえた GRB 941017 (1994 年 10 月 17 日に発生したガンマ線バースト) のガンマ線スペクトルの時間変化を示したものです。keV–MeV 領域にかけては、高エネルギー側で下に折れ曲る非熱的なベキ関数 (Band 関数と呼ばれる²⁾) でよく表され、時間とともに

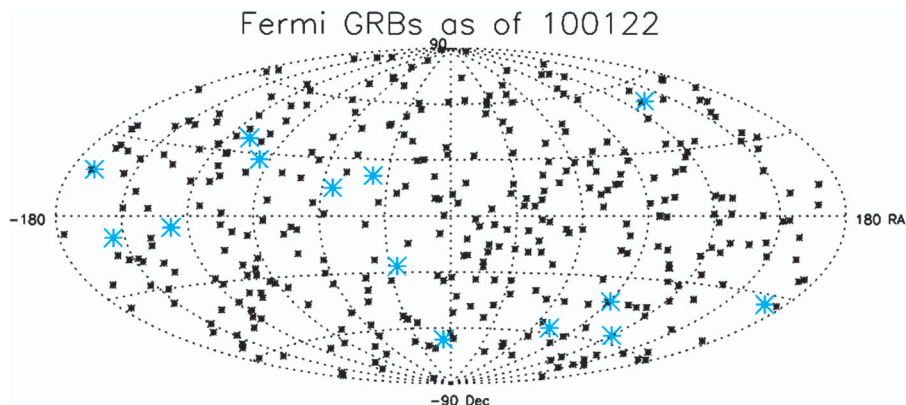


図2 2010年1月22日までにフェルミ衛星が検出したGRBの全天マップ。各点はそれぞれGRBの全天での位置を表しており、GBMが検出したものを黒、その中でもLATで100 MeV以上の高エネルギーガンマ線を検出したものを青で示してある。

減衰しています。一方、MeV以上のスペクトルは異なったべき関数で表され、減衰時間もkeV–MeV領域とは異なることが示されました³⁾。keV–MeV領域の放射成分は、ジェットで加速された電子によるシンクロトン放射が起源である仮説が有力です。一方、MeV以上の放射過程としては、電子の逆コンプトン散乱によるものとするレプトン起源説や加速された陽子によるカスケード放射およびシンクロトン放射によるものとするハドロン起源説⁴⁾があります*1。

また、その発生源が同時刻のMeV以下の成分とは異なりすでに残光が一部寄与しているなどの理論解釈⁵⁾が提案されています。

GRB 941017以外にも、高エネルギーガンマ線の時間的振舞いが低エネルギーガンマ線とは異なることを示す事例を、EGRET検出器は観測しています。GRB 940217では、18 GeVという観測史上最高エネルギーのガンマ線が、keV–MeV領域の低エネルギーガンマ線の放射が見えなくなった後90分以上を経て観測されました⁶⁾。この事例は、高エネルギーガンマ線の減衰時間が長いだけでなく、最高エネルギーガンマ線がGRBの通常

の時間スケールより数十倍遅れて発生していることを示唆しており、GRBからの高エネルギーガンマ線の放射機構に関する謎を深めています。

このように、GRBからの高エネルギーガンマ線観測は、その放射起源などに迫る重要な情報をもつことが過去の観測により示唆されていましたが、観測例は僅かに数例で、検出された光子数も不十分でした。そのため、その起源や共通する性質などについて十分な議論ができず、フェルミ衛星が切り開くGRB観測への期待が高まるばかりでした。

2. フェルミ衛星の登場

フェルミ衛星は2008年6月11日無事打ち上げられました。主検出器であるLarge Area Telescope (LAT) 検出器⁷⁾は先代のEGRET検出器に比べて約6倍の有効面積と視野(全天の1/5)、約1/3,000の不感時間など、大きく性能を向上させており多くのGRBから高エネルギーガンマ線を統計良く検出できると期待されていました。さらに、keV–MeV領域の低エネルギーガンマ線に感度もつGamma-ray Burst Monitor (GBM) 検出

*1 「シンクロトン放射」は電子が磁場中を旋回運動することで放射されます。「逆コンプトン散乱」は高エネルギー電子が低エネルギー光子をたたきあげる現象です。「陽子によるカスケード放射」は高エネルギー陽子が光子と相互作用し、中間子などとともにガンマ線光子を生成することです。

器⁸⁾を搭載することにより、7桁に及ぶ広いエネルギー領域での観測を可能とします。このような広帯域観測を活用し、低エネルギーガンマ線と高エネルギーガンマ線の振舞いを比較することで、GRBにおけるガンマ線放射の起源に迫ります。図2は2009年10月26日までにフェルミ衛星で検出したGRBの全天地図を表しています。GBMによるGRB検出数は1年間で300例を超えており、その中で14例のGRBから100 MeVを超えるエネルギーをもったガンマ線がLATにより検出されています。過去の検出例が数例でしたので、フェルミ衛星はわずか1年の観測で過去の観測を上回る数のGRBから高エネルギーガンマ線を検出したこととなります。

EGRET時代は距離の決定が困難であったため、バーストの全エネルギーすら計算できず、十分な議論ができませんでした。1997年以降、BeppoSAX, HETE-2, Swift衛星が次々と打ち上がり、状況が一変しました。残光を観測することでGRBまでの距離を測定する手法が確立し、多くのGRBの距離を決定できるようになりました。LATはGRBの位置決定精度もEGRETに比べて向上しており、LATで決定したGRBの位置をSwift衛星や地上望遠鏡で追観測することでGRBの距離決定が可能となります。残光の検出可能な時間帯での追観測を実現するため、データが地上に送信された後即座に解析し、その情報をGRB共同観測ネットワーク (GRB Coordinate Network; GCN) を通じて迅速に全世界のGRB研究者に情報公開する体制を整えています。日米欧の3局で常時監視しており、日本からは宇宙研、東工大、広島大が参加しています。実際、LATによる14のGRB検出例のうち4例は日本人により迅速に初期解析が行われ、筆頭著者としてGCNに解析結果を公開しました⁹⁾⁻¹²⁾。その後も論文作成において主導的な役割を果たすことで大きく貢献をしています。

3. フェルミ衛星により見えてきた新しいガンマ線バーストの姿

およそ1年間の観測を経て、フェルミ衛星はわれわれの期待に応え、多くのGRBから高エネルギーガンマ線を検出しています。ここではフェルミ衛星によるGRB観測の代表的な成果を(1)高エネルギーガンマ線の起源、(2)GRBを引き起こす超相対論的ジェット、(3)GRB以外の分野へのインパクトという三つの視点から紹介していきたいと思います。

3.1 GRBからの高エネルギーガンマ線

3.1.1 高エネルギーガンマ線は“遅れて”発生していた

「われわれはこれを待っていたんだ。」観測開始から2カ月後の2008年9月16日、フェルミ衛星LAT検出器の責任者であるスタンフォード大学のPeter Michelson教授をしてこのように言わしめたGRBが発生しました。このGRBはLATで100 MeVを超えるガンマ線が100個以上も検出された非常に明るいものでした。われわれフェルミチームはこのとき、ちょうど打ち上げ後初めてのCollaboration meetingを行っており、フェルミチーム全員がこのGRBの発見に興奮しました。図3に示した光度曲線が見せた高エネルギーガンマ線の振舞いはわれわれが予想もしていなかったものでした。この図ではガンマ線のエネルギー帯を分割し、各エネルギー帯での光度曲線を低いエネルギーから順に表示しています。下二つの高エネルギー帯域の光度曲線では、上二つの低エネルギー帯域の光度曲線で見られる最初のピークに対応するガンマ線が全く観測されていません。このような、高エネルギーガンマ線は放射の発生時刻が低エネルギーガンマ線に比べて遅れる、という傾向はフェルミ衛星によって初めて明らかになりました¹³⁾。

この高エネルギーガンマ線の立ち上がりの遅れの起源については多くの議論を巻き起こしていま

す。第1節で紹介したように、ガンマ線の放射はジェット内で加速された電子によるシンクロトロン放射ならびに逆コンプトン放射であるとする説が有力です。その説に基づく「遅れ」のモデルは次の二つです。

(1) ジェットの物理状態が時間変化しており、その中で加速される電子のエネルギー分布が変化する。それによって放射されるガンマ線の数が増えるという説¹³⁾。

(2) 大質量星あるいは連星合体のGRBモデルではジェットの周りに遅い別の爆風が伴う可能性があり、そこからX線がジェットのガンマ線より遅れて放射される。そのX線がジェットの電子によって逆コンプトン散乱されて高エネルギーガンマ線が作られるという説¹⁴⁾。

また、高エネルギーガンマ線の放射源は加速された陽子であるとする説があります⁴⁾。陽子は電

子より重いので加速までに時間がかかると考えられます。さらに、高エネルギーガンマ線は残光源であるため自然に遅れるという説も提唱されています⁵⁾。

以上のように、高エネルギーガンマ線の立ち上りの遅れは、いまだよくわかっていないジェットの組成や周囲の物理状態などに迫る新たなヒントとなると考えられています。

3.1.2 フェルミ衛星が見たGeV“残光”

GRB 090510では、幸運にもフェルミ衛星とSwift衛星の同時観測を実現することができ、高エネルギーガンマ線と残光の振舞いを詳細に調べました。図4では、フェルミ衛星とSwift衛星の各検出器の光度曲線を同時に示しています。この光度曲線から、高エネルギーガンマ線の放射が、X線や可視光で見られる残光のように100秒以上もの間続いていることがわかりました¹⁵⁾。過去

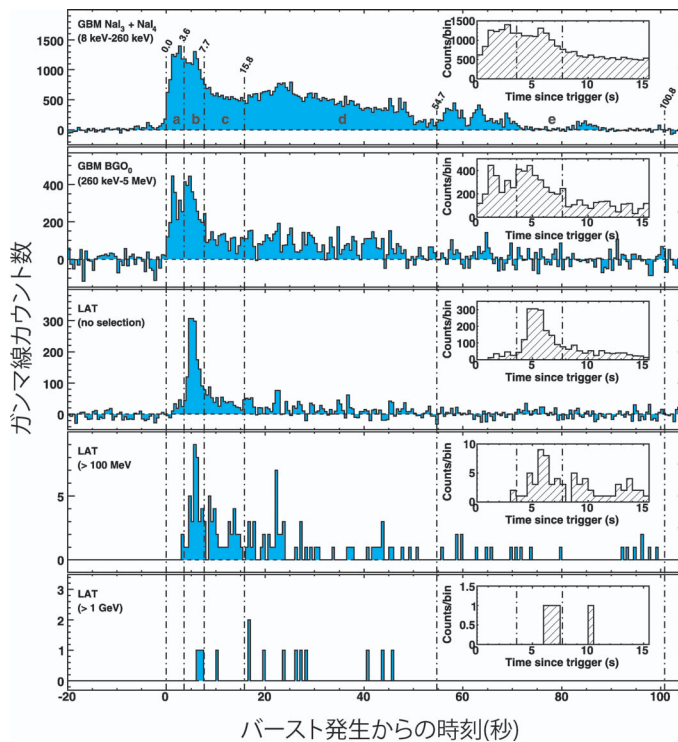


図3 GRB 080916Cの光度曲線。上からGBM (8-260 keV), GBM (260-5 MeV), LAT (全ガンマ線), LAT (100 MeV以上), LAT (1 GeV以上)でのガンマ線カウント数。GBMで見られるはじめのピークが100 MeV以上では見えておらず、高エネルギーガンマ線の発生時刻が遅れていることが明らかになった。

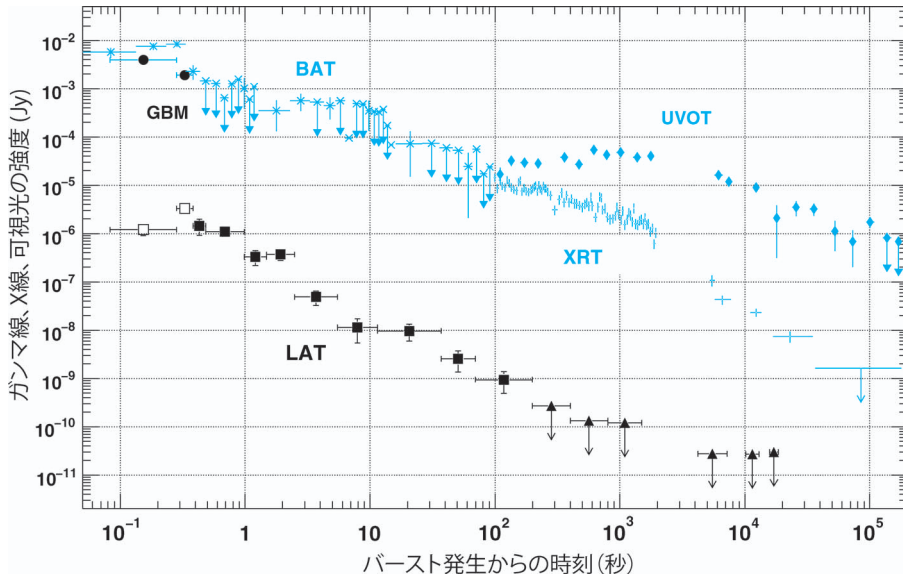


図4 フェルミ衛星とSwift衛星によるGRB 090510の光度曲線。Swift衛星では15–350 keVの低エネルギーガンマ線を観測するBAT検出器、0.3–10 keVのX線を観測するXRT、および可視赤外領域を観測するUVOTが搭載されている。Swift/BATでは1秒以降では有意な放射は検出されていない。LATがとらえた高エネルギーガンマ線は200秒付近まで観測され続けた。その減衰の様子は、Swift/XRTで観測されたX線残光のそれと類似しており、高エネルギーガンマ線と残光現象との関連を示唆している可能性もある。

にEGRETで観測されたGRB 940217や941017においても高エネルギーガンマ線が低エネルギーガンマ線よりも継続時間が長いという性質が見られていました。LATで検出したほとんどのGRBで、このことを確かめることができました。GeVの光度曲線の中での残光成分の割合を明らかにするため、今後のより統計のよい観測が期待されています。

3.1.3 やはり別成分のスペクトルが存在した

GRBのkeV–MeV領域のスペクトルは高エネルギー側で下に折れ曲がるBand関数でおおむね表せることがわかっていましたが、フェルミ衛星で検出したGRB 090510やGRB 090902Bなどでは、100 MeV以上で明らかにBand関数とは異なる別成分が存在することが明らかになりました^{16), 17)}。図5で示すように、この別成分のスペクトルは単一のべき関数でよく表され、過去の検出例GRB 941017とよく似た性質を示しています。第1節で紹介したように、この別成分の起源につ

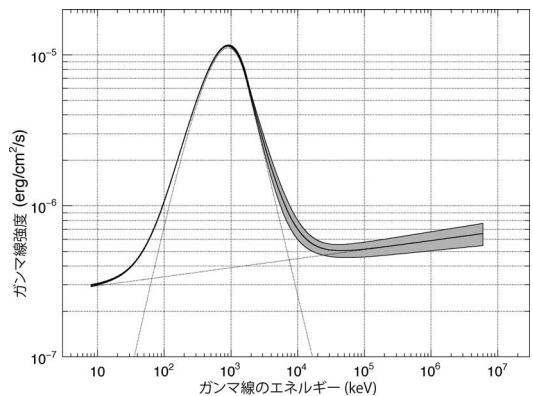


図5 GRB 090902Bのデータをフィットした結果得られたモデルのスペクトル。折れ曲がりをもつべき関数と単一べき関数からなる。各成分を点線で、2成分の和を実線で表している。網掛けされた領域はフィットから得られたモデルの許容範囲を表している。単一べき関数が数十MeV以上の高エネルギー側だけでなく、数十keV付近でも卓越していることを明確に示している。

いては EGRET 時代から大きな話題となっています。特にフェルミ衛星では 100 MeV 以上で超過している単一べき関数の成分が 10 keV 付近の低エネルギー側でも現れているという重要な発見もしました。このような低エネルギー側の超過を逆コンプトン散乱で生成することは難しいと考えられています。もし陽子起源だとすれば、解放エネルギーが電子起源の場合と比較して 100 倍となる計算もあり⁴⁾、そのような大きなエネルギーの起源を説明するのは容易ではありません。今後、このような別成分スペクトルの時間変動をより詳細に調べることで、その放射起源にさらに制限を加えることができると期待されます。

3.2 GRB がもつ超相対論的ジェットへの制限

GRB ジェットは超相対論的な速度 ($v \sim c$ で、ローレンツ因子 $\Gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ が 100 以上、光速の 99.99% 以上に相当します。) でわれわれの方向に噴き出していると考えられています¹⁾。ガンマ線放射領域が静止していると仮定してみましょう。こうすると、観測から見積もられる光源での光子密度が高くなりすぎ、ガンマ線は電子・陽電子対生成により光源から脱出できなくなります。しかし、放射領域がわれわれの視線方向に向かって相対論的な運動をしていると、光源で見積もられる光子密度と光子エネルギーが下がるため、ガンマ線は他の光子と衝突することなく、光源から脱出できます。フェルミ衛星は実際に脱出してきたガンマ線をとらえることで、超相対論的ジェットの速度に下限を与えました。

フェルミ衛星がとらえた GRB のうち、距離を決定できた GRB 090510 や GRB 090902B からそれぞれ 31 GeV, 33 GeV という GRB としては過去最高レベルのエネルギーのガンマ線を検出しました。この結果、超相対論的ジェットのローレンツ因子が 1,000 を超えることがわかりました^{17), 18)}。GRB は keV-MeV 放射の継続時間の短いものと継続時間の長いものがあり、起源が異なると考えられています。GRB 090510 は前者です。

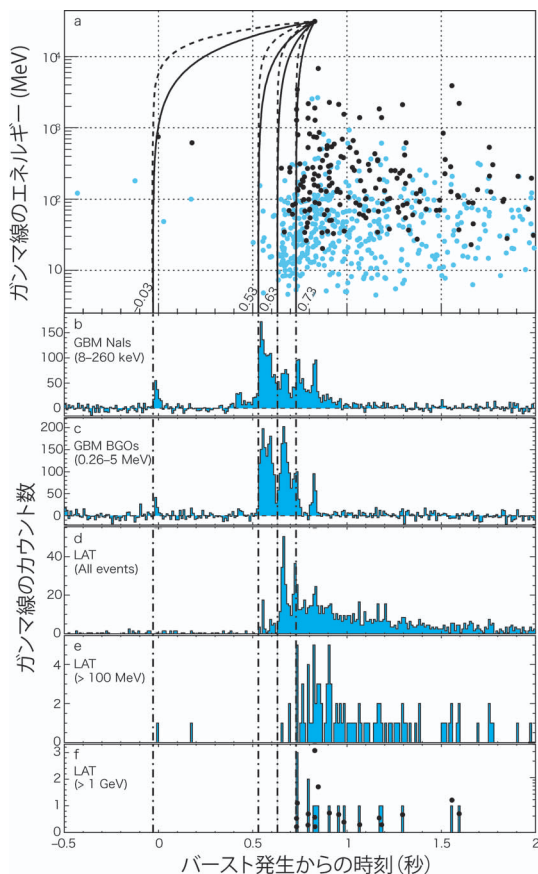


図6 一番上のパネルは GRB090510 からのガンマ線について GBM のトリガー時刻からの時間とガンマ線のエネルギーをプロットしたものの、LAT がとらえた全ガンマ線を水色、その中でも正確にエネルギーが測られ、詳細解析に使用したものを黒色で示した。その下二つのパネルは GBM で得られた光度曲線 (8-260 keV, 0.26-5 MeV)、さらに下三つのパネルには LAT で得られた光度曲線 (全ガンマ線候補, 100 MeV 以上, 1 GeV 以上) を示してある。

異なる起源の GRB 間においても同程度の速度の超相対論的ジェットが発生しているということはフェルミ衛星によって初めて明らかになりました。この結果から GRB におけるジェットの駆動機構などの解明が進むと期待されています。

3.3 フェルミ衛星の GRB 観測がもたらす他分野へのインパクト

3.3.1 可視赤外背景放射モデルへの制限

フェルミ衛星で検出した GRB からの高エネルギーガンマ線の情報は可視赤外背景放射モデルの制限にも用いることができます。背景放射は宇宙の全方位からほぼ均等に観測されるさまざまな波長の光です。可視光や赤外背景放射などは初期宇宙における星や銀河の進化の痕跡を表していると考えられており、さまざまな計算に基づいた可視赤外背景放射のモデルが提案されています^{19)–21)}。このようなモデルを観測的に検証することで、宇宙初期の星生成の様子に迫ることができると考えられます。宇宙がこのような可視赤外背景放射で満たされている場合、遠方から到来する高エネルギーガンマ線は、可視赤外背景放射と反応してしまうため地球に到達できなくなります。特に GRB は、活動銀河核など他の天体に比べて遠方宇宙まで探査することが可能です。このため可視赤外背景放射モデルの距離依存性までも検証することができます。われわれは、赤方偏移にして $z = 1.822$ という遠方宇宙で発生した GRB 090902B から、GRB としては過去最高エネルギーである 33 GeV のガンマ線を検出しました。いくつかの可視赤外背景放射モデルは 33 GeV のガンマ線がこのような遠方から地球に到達できないことを予言するので、そのようなモデルでは星形成の歴史などの仮定を見直さなくてはなりません。

3.3.2 量子重力理論の検証

フェルミ衛星による GRB の観測は GRB そのものの理解だけでなく、基礎物理学の分野に対してもインパクトを与えました。その最も大きな成果が量子重力理論への制限です。量子重力理論は重力理論と量子力学を統合する理論で、その中にはプランクスケール (10^{-33} cm) という非常に微小なスケールで時空を量子化することで、光の速度がその波長に依存することを予言するものもあります。特殊相対性理論によれば、光速は真空中

では観測者や波長によらず一定であるとされていますが、この「光速不変の原理」がプランクスケールでは破れているというのです。しかし、量子重力理論は実験的な検証が極めて難しく、いまだ完成には至っていません。この量子重力理論を検証するための有効な手段と考えられているのが、一部の理論が予言する光速の波長依存性を測定することです。ただし、予言される依存性はわずかなため、「できるだけ遠くの放射源」からの「できるだけ高いエネルギーの光子」を観測し、「できるだけ同時に」発生した低いエネルギーの光子との到達時間差を測定する必要があります²²⁾。GRB 090510 は、これらの条件を兼ね備え、量子重力理論に強い制限を与えました。図 6 に示したように GRB 090510 では 31 GeV のガンマ線が、バースト発生後からわずか 0.83 秒という時間差で観測されました。この時間差がすべて量子重力効果によるものであると仮定すると、一部の理論は 0.83 秒以上の遅れを予言します。この観測と理論の矛盾は、光速の波長依存性が量子重力理論で考えられているほど大きくないことを示します。この結果は、量子重力理論の枠組みに対して初めて直接観測による厳しい制限を与えたこととなります。

4. 最後 に

GRB からの高エネルギー放射の新しい観測事実がどんどん見つかっています。なかには高エネルギーガンマ線の立ち上がりの遅れといった思いもよらなかった発見もありました。今後、さらに多くの GRB をフェルミ衛星で観測することで、高エネルギーガンマ線放射に見られる共通の性質などについて理解が進むものと期待できます。加えて、GRB 観測は何が起こるか全く予想できない面白さもあります。過去に残光現象が見つかったときのように飛躍的に GRB の理解が進むのか、それとも早期 X 線残光の振舞いのようにさらに謎が深まるのか²³⁾はわかりませんが、今後も

フェルミ衛星の GRB 観測は私たちに新しい驚きを与えてくれるでしょう。

参考文献

- 1) 小山勝二, 嶺重 慎, 2007, ブラックホールと高エネルギー現象(シリーズ現代の天文学), (日本評論社), 第5章
- 2) Band D., et al., 1993, ApJ 413, 281
- 3) González M. M., et al., 2003, Nature 424, 749
- 4) Asano K., Guiriec S., Mészáros P., 2009, ApJ 705, 191
- 5) Kumar P., Barniol Duran R., 2009, MNRAS 400, 75
- 6) Hurley K., et al., 1994, Nature 372, 652
- 7) Atwood W. B., et al., 2009, ApJ 697, 1071
- 8) Meegan C., et al., 2009, ApJ 702, 791
- 9) Ohno M., McEnery J., Pelassa V., 2009, GCN Circ. 8903
- 10) Ohno M., et al., 2009, GCN Circ. 9021
- 11) Ohno M, Pelassa V., 2009, GCN Circ. 9334
- 12) Uehara T., Takahashi H., McEnery J., 2009, GCN Circ. 9934
- 13) Abdo A. A., et al., 2009a, Science 323,1688
- 14) Toma K., Wu X. F., Mészáros P., 2009, ApJ 707, 1404
- 15) De Pasquale M., et al., 2010, ApJ 709L, 146
- 16) Abdo A. A., et al., 2009b, Nature 462, 331
- 17) Abdo A. A., et al., ApJ, submitted
- 18) Abdo A. A., et al., 2009c, ApJ 706L, 138
- 19) Kneiske T. M., Bretz T., Mannheim K., Hartmann D. H., 2004, A&A 413, 807
- 20) Metcalfe L., et al., 2003, A&A 407, 791
- 21) Stecker F. W., Malkan M. A., Scully S. T., 2006, ApJ 648, 774
- 22) Amelino-Camelia G., Ellis J., Mavromatos N. E., Nanopoulos D. V., Sarkar S., 1998, Nature 393, 763
- 23) Nousek J. A., et al., 2006, ApJ 642, 389

GRB Properties Revealed by Fermi

Masanori OHNO

Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Katsuaki ASANO

Interactive Research Center of Science, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

Hiroyasu TAJIMA

Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.

Kenji TOMA

Department of Astronomy and Astrophysics, Pennsylvania State University, 525 Davey Lab, University Park, PA 16802, U.S.A.

Ryo YAMAZAKI

Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa 252-5258, Japan

on Behalf of the Fermi LAT/GBM Collaborations

Abstract: Gamma-ray bursts are the most energetic explosions in the Universe and yet its gamma-ray emission mechanism is not well known. High-energy gamma-ray emissions observed in 14 GRBs by Fermi Gamma-ray Space Telescope revealed distinct temporal behaviors of those emissions, established the existence of an extra spectral component, and placed constraints on Lorentz factor of the relativistic jet. These new observations inspired new models to describe gamma-ray emission and jet formation in GRBs. GRB observations by Fermi also brought broader impacts on science topics outside of the GRB physics, such as quantum gravity and extra-galactic background light.