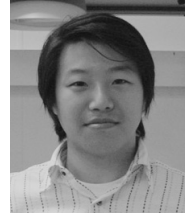


HETE-2 衛星による軟ガンマ線リピータ からの“短いバースト”の観測

中川友進

〈青山学院大学理工学研究科 〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1〉

e-mail: yujin@phys.aoyama.ac.jp



HETE-2 衛星は 2001 年から 2005 年の間に軟ガンマ線リピータから 55 個の短いバーストを検出した。HETE-2 衛星の 2-400 keV という幅広いエネルギー帯域のデータを用いて、短いバーストのタイミング解析およびエネルギースペクトル解析を行った。その結果、(1) 短いバーストの X 線とガンマ線の放射には 2.2 ± 0.4 ミリ秒の「時間の遅れ」が存在すること、(2) エネルギースペクトルは天体や短いバーストの規模によらず「二温度黒体放射」がもっともらしく、低温度が 4 keV、高温度が 11 keV に集中すること、(3) フルーツに対する短いバーストの数の累積分布は時期によって変わることを見いだした。

1. 宇宙の灯台

みなさんは灯台をご存知だろうか。港などに設置されており、周期的に明るくなったり、暗くなったりする船舶の航路標識である。宇宙にも灯台のように周期的に明るさが変わる天体があり、パルサーと呼ばれている。パルサーは数ミリ秒（1 ミリ秒は 1,000 分の 1 秒）から数秒の周期で明るさが変化する天体であり、その極めて正確な周期性から「宇宙の灯台」とも呼ばれている。さかのぼること今から 40 年前の 1967 年、アントニー・ヒューイッシュ博士とジョセリン・ベル博士は、宇宙からの電波を調べているときに、約 1.3 秒の周期で明るさが変わる天体（現在では PSR 1919+21 という名前で知られている）を発見したり。このように周期的に明るさが変わる天体がパルサーなのだが、これだけ高速に回転していると、通常の星は自分自身の遠心力によりばらばらになってしまう。その遠心力を支える“何かしらの力”が必要となるのだが、それまで理論上の産

物だと思われていた中性子星（詳細は次節で説明する）の重力でしか説明ができなかった。この PSR 1919+21 の発見は、まさに中性子星の発見であり、当時の天文学者を非常に驚かせるものであった。

2. 中性子星と磁場の強さ

中性子星は、中性子の縮退圧（複数の同じ粒子が一つの量子状態を占められないことによる）で自分自身の重力を支える星である。半径は約 10 km と小さく、質量は太陽の約 1.4 倍である。そのため、重力は地球表面の約 1,000 億倍、密度は角砂糖 1 個当たり 10 億トンにも達する。これを聞いただけでも極限の環境を思い浮かべるだろうが、実はもう一つの大きな特徴があり、それは“強い磁場をもつ”ということである。本稿では磁場の強さの単位として“ガウス”を用いるが、中性子星は約 1 兆ガウスもの強い磁場をもつと考えられている。これがどれだけ強い磁場なのかをイメージするのが難しいと思うので、身近なもの

比較してみよう。われわれの周りには多くの磁場をもつものがあり、最も身近な地球は約 0.6 ガウスである。学校や会社などでホワイトボードに紙を貼るための使うマグネットは約 100 ガウスであり、家庭にある肩こりを治すピッコエレキバンは約 1,300 ガウスである。ピッコエレキバンの場合、磁場が強いほうが良く効くようだが、中性子星の約 1 兆ガウスの磁場では、肩こりを治すどころか水の反磁性のために身体の組織が破壊されてしまう。人類がこれまでに達成した磁場の強さは約 1,000 万ガウスである。これでもまだイメージするのが難しいかもしれないが、中性子星の磁場が極めて強いことはおわかりいただけるだろう。この中性子星の中でも特に強い磁場、通常の 1,000 倍にも達する約 1,000 兆ガウスの磁場をもつ天体が本稿の主役の超強磁場中性子星（マグネターという呼び名のほうが馴染み深いかもしれない）である。

3. パルサーの磁場測定

前節ではパルサーの正体が中性子星であり、強い磁場をもつことを説明したが、ここでは磁場測定の方法を紹介する。現在までに主に 3 種類のパルサーが知られている。それは、回転運動をエネルギー源として電波で輝く「回転駆動型パルサー」、伴星からの物質の降着をエネルギー源として X 線で輝く「降着駆動型パルサー」、そして本稿の主役である「超強磁場中性子星」である。これらのうち、回転駆動型パルサーと降着駆動型パルサーについてはかなり理解が進んでおり、磁場の強さが測定されている。回転駆動型パルサーは、回転運動により磁気双極子放射を行うので、時間の経過とともに回転運動の速度が小さくなっていく。そのため、自転を 1 回するのに何秒を要するかを表す「回転周期」、その回転周期が 1 秒当たり何秒だけ減衰するかを表す「回転周期の減衰率」を用いて“間接的に”磁場の強さを測定することができる。一方、降着駆動型パルサーの回

転周期は物質の降着の効果に支配されているので、回転駆動型パルサーの手法は適用できない。しかし、別のアプローチによって“直接的に”磁場の強さを測定することが可能である。荷電粒子が磁場の中を運動すると軌道が曲げられて、サイクロトロン運動（磁力線の周りをらせん運動すると考えれば良い）を行う。中性子星のような非常に強い磁場の環境では、荷電粒子のエネルギー単位はとびとびの値になる。そこに X 線の連続エネルギースペクトル（例えば、べき関数の分布に従うさまざまなエネルギーの X 線の集まり）が入射すると、特定のエネルギーの X 線が共鳴散乱される。散乱された X 線はわれわれに届きにくいので、われわれが観測すると連続エネルギースペクトルに吸収構造として現れる。この吸収構造が現れるエネルギーは磁場の強さに比例しているので、磁場の強さを求めることができる。さて、超強磁場中性子星はどうかと言うと、磁場を測定する手法は確立したとは言いがたく、そもそも本当に約 1,000 兆ガウスもの磁場をもつ中性子星が存在するのかに疑問の声が向けられている。次節では、この超強磁場中性子星が考え出された歴史を振り返るとともに、特徴を紹介する。

4. 超強磁場中性子星

「強磁場中性子星」と聞くと、約 1 兆ガウスの磁場をもつ中性子星を思い浮かべる方が多いだろう。それよりも 1,000 倍も強い約 1,000 兆ガウスの磁場をもつ中性子星を区別するために、“超”を先頭につけて「超強磁場中性子星」と呼んでいる。候補天体としては「軟ガンマ線リピータ」(Soft Gamma Repeater; SGR) や「異常な X 線パルサー」(Anomalous X-ray Pulsar; AXP) が有名であり、それぞれ 4 天体と 9 天体が知られている (X 線の対応天体が見つかった天体のみ)。なお、このほかにも多くの候補天体があるが、本稿の内容から外れるのでここでは述べない。

そもそも超強磁場中性子星が考え出されたきつ

かけは、1979年1月7日にSGRの一つであるSGR 1806-20が起こしたバースト（典型的に数十ミリ秒から数百ミリ秒ほどの間にX線やガンマ線を放出する現象であり、明るさはエディントン光度を超える）であろう^{2),3)}。その後、二つ目のSGRであるSGR 1900+14が発見された⁴⁾。それに続いて1979年3月5日に、三つ目のSGRであるSGR 0526-66が数百秒にもわたる巨大フレア（通常の100万倍の明るさにも達する特殊なバースト）を起こしたのである⁵⁾⁷⁾。これらのバーストは、当初は宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト⁸⁾の一つだと分類されていた。しかし、エネルギースペクトルが軟らかく（低いエネルギーの光子が卓越していることを“軟らかい”と言い、高いエネルギーの光子が卓越している場合は“硬い”と言う）、同じ天体が何度もバーストを起こすので、ガンマ線バーストとは別の現象だと考えられるようになった。

SGRとAXP、共に候補天体なのに呼び名が違うのはなぜだろうか。歴史的には、バーストを起こした天体として発見された場合は“SGR”と呼ばれ、定常的に輝くパルサーとして発見された場合は“AXP”と呼ばれているようである。しかし、これまでの観測から得られた結果を総合的に考えると、両者の間に明確な線を引くのは難しく、多くの共通点がある。それは、(1) 回転周期は5-12秒に分布する、(2) 回転周期の減衰率は 10^{-11} - 10^{-13} 秒/秒に分布する、(3) 伴星の兆候がない、(4) 銀河面に分布する、(5) 主に軟X線を放射する、(6) 超新星残骸に付随する、(7) バーストを起こす、である。ただし、AXPのうち4天体はバーストを起こしておらず、バーストを起こすか起こさないかを定める要因の解明は今後の研究課題である。SGRとAXPがX線で輝いていることはすでに述べたが、発見された当時、そのエネルギー源が問題となった。まず、それまでに知られていたパルサーでの説明が試みられた。しかし、観測された回転周期と回転周期の減衰率から

考えると、回転エネルギーでは放射エネルギーをまかなうことができず、回転駆動型パルサーでは説明ができなかった。さらに、伴星からの降着の兆候がないので、降着駆動型パルサーでも説明ができなかった。そのため、どのように輝くかが問題となったが、実は観測された回転周期と回転周期の減衰率を使って、回転駆動型パルサーの手法を用いて“近似的に”磁場の強さを求めると約1,000兆ガウスとなり、磁場がエネルギー源ではないかと考えられ始めた。

超強磁場中性子星の磁場の強さは、SGRの観測により別の手法からも見積もられている。この節の最初で述べたSGR 0526-66が起こした巨大フレアの時間に対する強度の変化を調べたところ、一定の周期で強度が変化する現象が見られた。このような現象は、中性子星の回転によるものだと解釈できる。数百秒にもわたって中性子星の回転と同期してX線やガンマ線を放射するためには、中性子星の近傍にプラズマを閉じ込めておく必要がある。そのためには磁場の強さが約400兆ガウス以上という途方もない磁場が必要になることがわかったのである⁹⁾。

SGRとAXPは、おおよそ2-10 keVのX線領域で輝き、可視光や赤外では暗く、電波では全く輝いていない。ところが最近のINTEGRAL衛星（欧州宇宙機関が打ち上げた硬X線衛星）の観測によって、一部の天体では20 keV以上のガンマ線領域に非熱的な放射があることがわかった¹⁰⁾⁻¹²⁾。しかも、その放射は周期性をもっているというのである¹⁰⁾。これは、超強磁場中性子星の磁気圏などで定常的な粒子の加速が起きていることを示唆している。これまで軟らかなエネルギースペクトルをもつと考えられていたが、実は非常に硬い成分をもっていたのである。この硬い成分の起源はわかっていないが、日本で5番目のX線天文衛星である「すざく」衛星に搭載されている硬X線検出器により、新たな知見が得られると期待している。

超強磁場中性子星について、これまでに活発に議論が行われているが、主な課題は、(1) 約 1,000 兆ガウスという強い磁場の有無への決着、(2) 強い磁場が形成されるメカニズムの解明、(3) X 線やガンマ線の放射のメカニズムの解明、に集約できるだろう。特に“超強磁場中性子星が存在するか”は非常に重要な課題である。

5. 軟ガンマ線リピータの“短いバースト”

SGR のバーストと聞くと、有名な巨大フレアを思い浮かべる方が多いと思うが、本稿の主演は数十ミリ秒から数百ミリ秒のバーストである。巨大フレアのような特殊なバーストと混同しないように、本稿では“短いバースト”と呼ぶことにする。

短いバーストはエディントン光度を超える明るさに達する。しかし、これほどの明るさをどのようにして実現するのかはわかっていない。理論的にはいくつかの提案があり、「星震」(中性子星で起こる地震と考えれば良い)が起源^{9), 13)}とか、磁場のつなぎ換えによる磁気コロナの加熱が起源¹⁴⁾、という説がある。さらには、そもそも中性子星ではなくて、p-star (一種のクォーク星)が起こすグリッチだとする説¹⁵⁾まである。

SGR の短いバーストの放射のメカニズムを解明するためには、そのエネルギースペクトルがどのようなモデルで再現されるか(熱的か非熱的かなど)を調べることが重要である。そのために、観測から得られたエネルギースペクトルに対してモデルあてはめを行い、どのようなモデルがもっともらしいかを調べるのである。これまでに、SGR のうち SGR 1806-20 と SGR 1900+14 は、頻繁に短いバーストを起こしており、多くの衛星によって観測されてきた。しかし、エネルギースペクトルがどのようなモデルで再現されるかはわかっていなかった。歴史的には「光学的に薄いプラズマからの熱制動放射モデル」で再現されると

考えられてきた。しかし、このモデルは約 15 keV 以上のエネルギースペクトルを再現していただけであり、筆者を含む複数の研究グループにより完全に棄却された^{3), 16)-20)}。代替モデルとしては、「二温度黒体放射」¹⁷⁾⁻²⁰⁾ や「カットオフをもつべき関数」¹⁷⁾ が提案されていたが、どちらがもっともらしいかは最近まで決着がつかなかった。

短いバーストにおけるエネルギースペクトルの時間変化は、ほとんどないか、あったとしても弱いと報告されていた^{16), 21)}。その後、一部のバーストにおいて、エネルギースペクトルの時間に対する軟化傾向が報告され²²⁾⁻²⁴⁾、最近の観測では有意なエネルギースペクトルの時間変化が報告されている^{23), 29)}。

6. HETE-2 衛星

HETE-2 衛星²⁶⁾は、日本・アメリカ・フランスの国際協力により打ち上げられた天文衛星である(図 1)。HETE-2 衛星は非常に小型であり、高さが 89 cm、重さはわずか 124 kg である。HETE-2 衛星の主な観測対象は、ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB)⁸⁾ であるが、北半球の夏季に

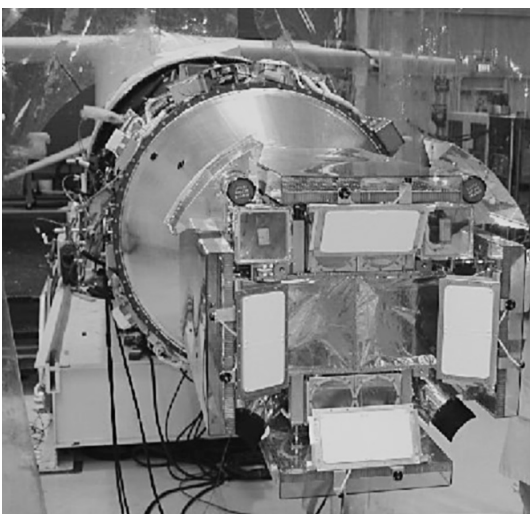


図 1 HETE-2 衛星をペガサスロケットに取り付けた様子。

あたる期間は、検出器が銀河中心の方向を向くので、SGR からの短いバーストを観測できる。

HETE-2 衛星に搭載されている検出器は、0.5–14 keV の軟 X 線領域を担う Soft X-ray Camera (SXC), 2–25 keV の X 線領域を担う Wide-field X-ray Monitor (WXM), 6–400 keV のガンマ線領域を担う French Gamma Telescope (FREGATE) である。WXM 検出器は、理研を中心とした日本のグループが主に開発を行った検出器であり、全天の約 10 分の 1 を監視している。WXM 検出器はバースト現象の位置決定を担っており、視野の中で起きると機上で即座に位置決定を行い、地上に位置を通報する。その後、地上にデータが降りたら、WXM 検出器のデータに基づいて詳細な位置決定を行う。明るければ SXC 検出器のデータに基づいて、さらに詳細な位置決定を行う。また、WXM 検出器と FREGATE 検出器のデータを用いれば、2–400 keV という幅広いエネルギー帯域でバースト現象のエネルギースペクトルを調べることができる。

せっかくなので、HETE-2 衛星との思い出を書いてみようと思う。筆者が HETE-2 衛星にかかわり始めたのは打ち上げ直後の学部 4 年生の頃であったが、今では長い付き合いになる。HETE-2 衛星は常に運用が行われており（運用の体制については、天文月報の第 94 巻 7 号の河合誠之先生の記事を参照していただきたい²⁶⁾）、日本とアメリカで運用の当番を分担している。HETE-2 衛星は GRB をとらえると、ほぼ全メンバーの携帯電話に通知してくれるのだが、時には真夜中に起こされ、眠い目をこすりながら位置決めやエネルギースペクトル解析を行うことがあった。GRB は発生直後にも輝き続ける「残光」を伴っており、他の X 線衛星や地上の望遠鏡で観測することも重要である。しかし、すぐに減光してしまうので、1 秒でも早く位置を報告しなければならない。そのため、GRB が起きるとメールやチャットを活用しながら議論を行い、まさに“時間と戦い”な

がら位置決めを行う。なお、HETE-2 衛星の GRB に関する成果については、例えば天文月報の第 98 巻 8 号の坂本貴紀博士の記事を参照していただきたい²⁷⁾。また、毎年 12 月になると検出器の機上校正のために、かに星雲を観測する。良質のデータをとるためには日本時間の深夜に観測を行う必要があるのだが（衛星の軌道がからむ話なので、ここでは詳しくは述べない）、いろいろな理由により観測が始まる直前にコマンドを送信する。さすがに深夜なので、2 人がかりでチェックを行いながらの作業になる。これを 90 分（衛星が地球を 1 周するのに要する時間）ごとに行い、1 晩に 3 回ほど繰り返すのだが、1 カ月ほど（さすがに毎日ではありませんが）続けることもある。日本時間の真夜中にもかかわらず、スケジュールどおりにコマンドを送り、チャットに状況を報告するものだから、マサチューセッツ工科大学の方に「ユージン（筆者のこと）は優秀なスクリプトを作ったのか？ それとも実はロボットだったのか!？」というようなことを言われた。HETE-2 衛星のチームメンバーはみんな気さくな方々で、たいへんな作業も楽しく行える。ちなみに、目覚ましのアラームをいくつもかけて、スケジュールどおりに起きていたのが真相である。決してロボットではない。こう振り返ってみると、学生時代の多くの時間を HETE-2 衛星と過ごしていた気がする。

7. HETE-2 衛星がとらえた“短いバースト”の解析

7.1 短いバーストの観測数

HETE-2 衛星は 2001 年から 2005 年の 5 年間に、SGR 1806–20 から 50 個、SGR 1900+14 から 5 個の短いバーストを検出した。2004 年は SGR 1806–20 が非常に活発な状態にあり、実は 50 個のうち 33 個もの短いバーストが 2004 年だけで起きたのである。そう、2004 年といえば、SGR 1806–20 が巨大フレアを起こした年である。巨大フレアが起きたのは、2004 年 12 月

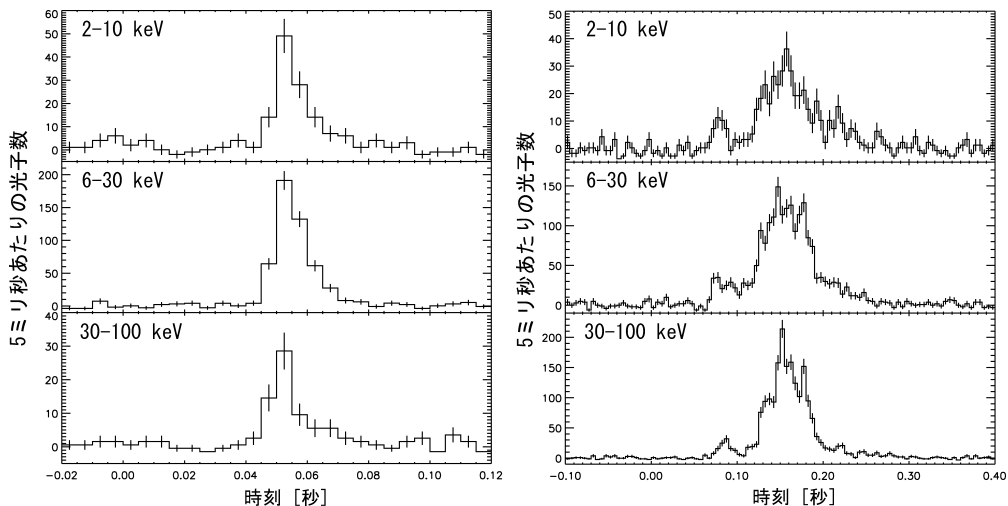


図2 HETE-2 衛星で検出された、SGRの短いバーストの光度曲線。左側が一つのスパイクをもつ短いバーストの例、右側が複数のスパイクをもつ短いバーストの例である。

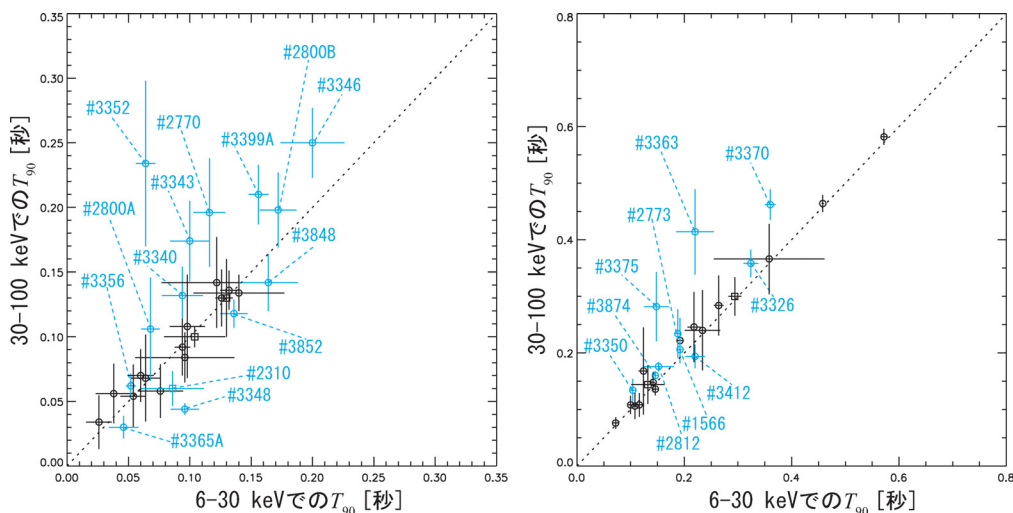


図3 6-30 keVでの T_{90} (総光子数の90%を含む時間領域) と30-100 keVでの T_{90} との関係。左側が一つのスパイクをもつ短いバーストについて、右側が複数のスパイクをもつ短いバーストについてである。図中の点線は6-30 keVの T_{90} と30-100 keVの T_{90} が同じであることを表しており、その直線から外れている短いバーストを青色で示している。なお、図中の4桁の数字は、HETE-2 衛星のバースト番号である。

27日であるが、その前の5月から7月にかけてHETE-2衛星は短いバーストを検出していたのである。当時のことを思い返してみると、HETE-2衛星がとらえた短いバーストの解析を行いつつ、心の中で“巨大フレアが起きたりして”とつぶや

いていた。冗談まじりで考えていた巨大フレアが本当に起きたものだから、知らせを聞いたときは驚くと同時に、新たな知見が得られるだろうことに、非常にワクワクしたのを覚えている。ちなみに、HETE-2衛星は運用上の制限から検出器の高

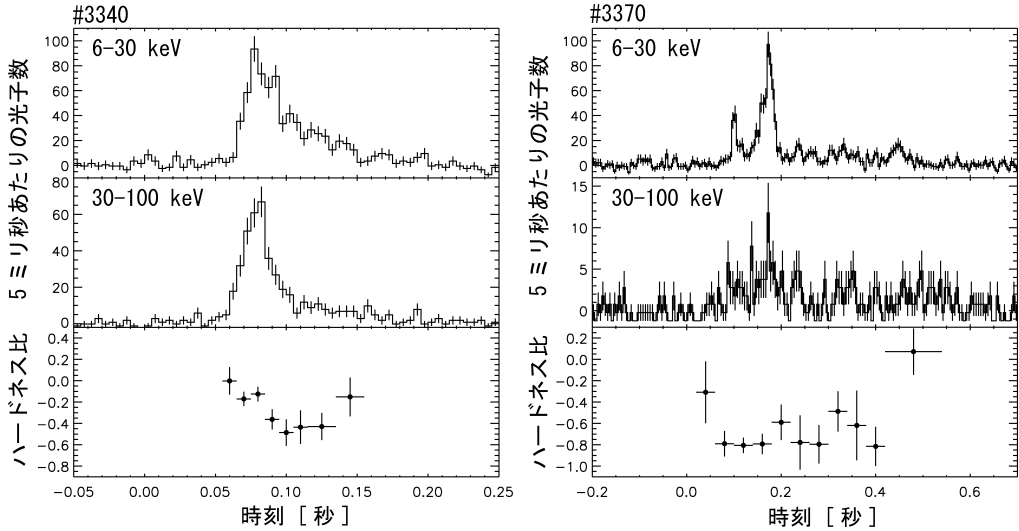


図4 エネルギースペクトルの時間変化が見られた短いバーストのハードネス比（本文を参照）の例を示す．上部にバースト番号が書かれている．

圧を落としていたので、残念ながら巨大フレアをとらえることはできなかった。

図2にHETE-2衛星がとらえた短いバーストの光度曲線の例を示す．光度曲線の形状はさまざまであり、一つのスパイクをもつもの（図2の左側）、複数のスパイクをもつもの（図2の右側）がある。

7.2 エネルギースペクトルの時間変化

最近の研究によりエネルギースペクトルの時間変化は、一部のバーストにおいて有意に見られると報告されている^{20), 25)}．HETE-2衛星は、幅広いエネルギー帯域を有するとともに、多くの短いバーストを検出しているので、エネルギースペクトルの時間変化を系統的に調べるには適している．そこで、これらの特徴を活かしてエネルギースペクトルの時間変化を調べた。

短いバーストにエネルギースペクトルの時間変化があれば、それが継続時間に表れるはずである．そこで、6-30 keVと30-100 keVのそれぞれのエネルギー帯域で T_{90} （短いバーストの総光子数の90%を含む時間領域）を調べた．これにより、人為的なフィルターを入れずにエネルギー

スペクトルの時間変化を調べることができる．図3は、横軸に6-30 keVの T_{90} をとり、縦軸に30-100 keVの T_{90} をとり、両者の関係を示したものである．左側が一つのスパイクをもつ短いバーストについて、右側が複数のスパイクをもつ短いバーストについてであり、図中の点線は6-30 keVの T_{90} と30-100 keVの T_{90} が同じであることを表している．さて、多くの短いバーストは点線に沿って分布しているが、一部のものは外れているのがわかる．これらの外れている短いバーストについて、エネルギースペクトルの時間変化の有無をより詳細に調べるために、6-30 keVと30-100 keVでの光度曲線を作成し、その間のハードネス比を調べた．ここで、ハードネス比は $HR = (H - S) / (H + S)$ と定義する（ H は30-100 keVでの光子数、 S は6-30 keVでの光子数）．その結果、エネルギースペクトルの時間変化は一般的ではないが、一部の短いバーストでは軟化傾向（図4の左側）が見られ、もしくは短いバーストの最後だけで硬くなる傾向（図4の右側）が見られることがわかった。

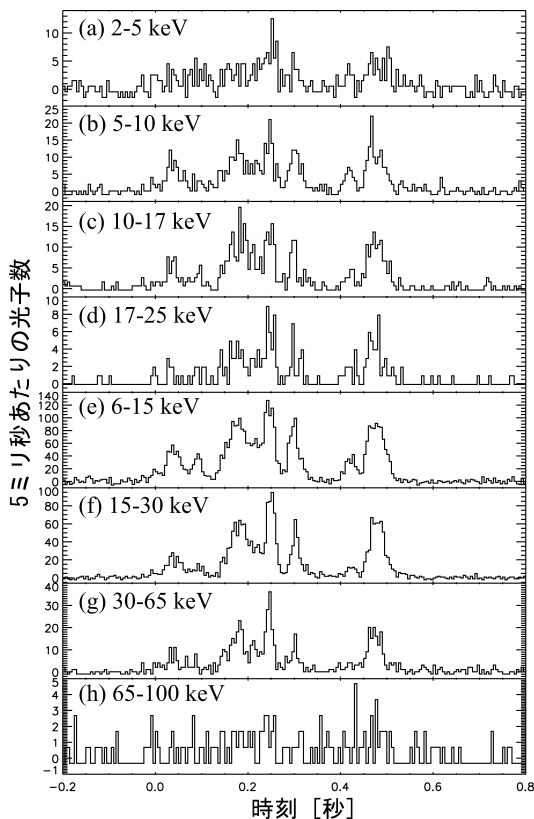


図5 SGRの短いバーストの光度曲線の例. 2-5 keVの放射が30-65 keVの放射より遅れているように見える.

7.3 軟X線とガンマ線の時間差到来

HETE-2衛星がとらえた短いバーストの光度曲線の例を図5に示す。目を凝らしてよく見ると、軟X線（例えば2-5 keV）の放射がガンマ線（例えば30-65 keV）の放射より、時間的に遅れているような気がする。しかし、気がするだけでは意味がないので、サンプル数が多いSGR 1806-20の短いバーストを用いて、本当に遅れがあるかどうかを定量的に調べた。手法としては、明るく、かつエネルギースペクトルが時間に対して軟化傾向を示さない、短いバーストについて2-10 keVと30-100 keVの光度曲線を作成し、その間の相互相関を調べることにより、時間の遅れがあるかどうかを探った。その結果、軟X線（2-10 keV）

の放射がガンマ線（30-100 keV）の放射と比べて 2.2 ± 0.4 ミリ秒だけ遅れていることがわかった。軟X線の放射が遅れることの解釈の一つとして、エネルギースペクトルの時間に対する軟化が考えられるが、そのような短いバーストは解析から外している。したがって、エネルギースペクトルの時間に対する軟化があるとしたら数ミリ秒以下のタイムスケールで起こると考えることができる。もう一つの解釈は、短いバーストには二つの放射領域が存在することである。この場合は、それらの放射領域が密接に関係していることを示唆している。このことから、エネルギースペクトルは二つのモデルの重ね合わせだと考えることもできる（7.4節で述べる二温度黒体放射モデルを支持する結果である）。ただし、X線の定常放射に関してだが、理論的には超強磁場中性子星の大気や磁気圏での散乱により、エネルギースペクトルがゆがめられて、あたかも二温度黒体放射のように見えるという提案もある²⁸⁾。

7.4 短いバーストのエネルギースペクトルのモデルは何か？

短いバーストのエネルギースペクトルがどのようなモデルで再現されるかを調べることは、放射のメカニズムを調べるうえで重要である。しかし、5節でも述べたように、どのモデルがもっともらしいかは決着がついていなかった。この主な原因は、狭いエネルギー帯域でエネルギースペクトルを調べていたことだと言える（ただし、先人たちの尽力による技術の進歩のおかげで現在は幅広いエネルギー帯域で観測できるようになった、ということをつけ加えておく）。HETE-2衛星は2-400 keVという幅広いエネルギー帯域のエネルギースペクトルを取得できるので、この状況を打破することができる。そこで、HETE-2衛星の特徴を活かして、どのようなモデルが短いバーストのエネルギースペクトルとしてもっともらしいかを調べた。

エネルギースペクトルのモデルの検討には8種

のモデルを用いたが、このうち二温度黒体放射モデルやカットオフをもつべき関数モデルを含む5種のモデルでエネルギースペクトルを再現できることがわかった。X線の定常放射の観測から星間吸収量は中性水素の柱密度に換算して 10^{22} cm^{-2} のオーダーだと見積もられているが、実は二温度黒体放射モデル以外のモデルでは 10^{23} cm^{-2} ほどの星間吸収が要求される。しかし、短いバーストが起きるときだけに冷たい吸収物質が放出されると考えるのは難しい。したがって、二温度黒体放射モデルがもっともらしいと考えた。また、天体や短いバーストの規模によらず、二温度黒体放射モデルの低温度は約 4 keV、高温度は約 11 keV に集中することがわかった。時間の遅れが存在することを考えると、高温度成分は中性子星の近傍で放射されて、低温度成分は最大で 700 km ほど離れた場所にあるプラズマなどでの高温度成分の再放射と考えることができる。もしくは、磁力線に沿って広がって分布するプラズマが、例えば星震で生じたアルヴェーン波（磁場の中のプラズマを伝わる波）によって加熱され、放射する、と考えることもできる。ただしこの場合、二温度黒体放射モデルはエネルギースペクトルの形を“真似”しているに過ぎない、ということになる。

7.5 フルーエンスに対する短いバーストの数の累積分布

これまでさまざまな衛星の観測によって、フルーエンス（単位面積当たりの総放射エネルギーを指す）に対する短いバーストの数の累積分布（以後、「累積分布」と呼ぶ）が調べられており、冪関数の形になることが知られている。HETE-2衛星は SGR 1806-20 から多くの短いバーストを検出しているので、これを活かして累積分布を調べた。

結果を図6に示すが、階段状の点線が観測データに基づく累積分布であり、階段状の実線が観測効率の補正をかけた累積分布である。後者の累積分布を調べたところ、既存の研究と同じように分

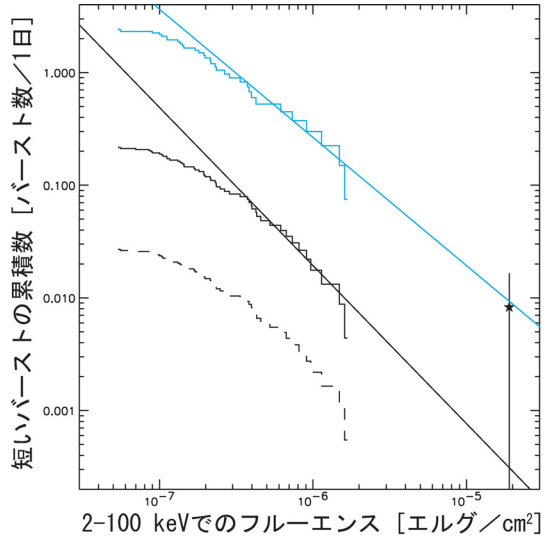


図6 2-100 keV でのフルーエンスに対する短いバーストの数の累積分布。黒色がすべての短いバーストを用いた累積分布、青色が2004年の短いバーストだけを用いた累積分布である。

布はべき関数でよく再現できるが、べきの値（つまり、累積分布の傾き）は -1.4 ± 0.4 となり既存の研究 (-0.67 から -0.91)²⁰⁻²¹⁾ と大きく異なっていた。考えられる原因の一つは、衛星ごとのエネルギー帯域の違いがある。そこで、2-10 keV と 10-100 keV の累積分布を調べたところ、それぞれべきの値が -1.6 ± 0.5 と -1.4 ± 0.4 となった。エネルギー帯域ごとの違いはあるようだが、いま問題にしている違いは説明できない。もう一つの可能性は、それぞれの衛星の観測時期による違いである。2004年は SGR 1806-20 が多くの短いバーストを起こしたので、この年だけで累積分布を調べたところ、べきの値が -1.1 ± 0.6 となり既存の研究と誤差の範囲で一致した（図6の階段状の青い実線）。これは、べきの値が時期によって変化することを示唆している。言い換えれば、天体に固有の活動状態を反映している可能性がある。このような累積分布がべき関数で再現されることは、地震や太陽フレアでも知られているが、地震は発

生地域によってべきの値が変わる。このことは、SGRの短いバーストが地震に似たメカニズム(例えば、星震)で起きており、中性子星での発生地地域の違いが、べきの値の違いに現れているのかもしれない。また、通常の短いバーストより継続時間が長く、滅多に起こらない中規模バースト(SGR 1900+14)¹⁸⁾は、2004年の累積分布と矛盾しないことを示した(図6の星印)。これは、より強大なバーストは活発な時期に頻繁に起こることを示唆する。

8. まとめと今後の課題

本研究では、HETE-2衛星が2001年から2005年の5年の間にとらえたSGR 1806-20とSGR 1900+14の短いバーストのデータを用いて、タイミング解析およびエネルギースペクトル解析を行った。タイミング解析からは、X線領域(2-10 keV)の放射がガンマ線領域(30-100 keV)の放射より 2.2 ± 0.4 ミリ秒だけ遅れていることを見いだした。時間の遅れの解釈として、例えば、数ミリ秒以下のタイムスケールで起こるエネルギースペクトルの軟化、もしくは二つの密接に関連する放射領域が存在していると考えられる。また、エネルギースペクトルの時間変化は一般的な現象ではないが、一部の短いバーストでは見られることを示した。エネルギースペクトル解析からは、エネルギースペクトルは二温度黒体放射モデルがもっともらしく、天体や短いバーストの規模によらず、低温度が4 keVに集中し、高温度が11 keVに集中することを明らかにした。ある温度に集中することは、天体や短いバーストの規模に共通の放射メカニズムが存在することを示唆している。時間の遅れの存在および二温度黒体放射モデルがもっともらしいことを考えると、短いバーストの放射メカニズムとして、(1)数ミリ秒以下のタイムスケールで起こるエネルギーの再注入と冷却、(2)高温度成分は中性子星の近傍での放射であり、低温度成分は最大で700 kmほど離れた

場所にあるプラズマなどによる高温度成分の再放射、(3)磁力線に沿って広がって分布したプラズマの加熱による放射、ということが考えられる。また、フルーエンスに対する短いバーストの数の累積分布を調べた結果、累積分布のべき値が観測時期により変わることを明らかにした。さらに、SGR 1900+14が起こした中規模バーストがSGR 1806-20が活発だった2004年の短いバーストだけを用いた累積分布と矛盾しないことを見いだした。これは、より強大なバーストはSGRが活発な時期に起こる可能性があることを示唆している。また、地震と類似したメカニズムにより短いバーストが発生している可能性があることを見いだした。

今後の課題の一つは、短いバーストのエネルギースペクトルが本当に二温度黒体放射であるかを明らかにすることである。二温度黒体放射を考えた場合、放射のメカニズムを説明するのが難しく、見かけ上の形に過ぎない可能性は棄却できないと考えている。これは、X線領域からガンマ線領域を同時に観測できる現存の検出器の中では最も高性能である「すざく」衛星の「X線CCDカメラ」と「硬X線検出器」を用いた観測により解明できると期待している。

二つ目の課題は、短いバーストの起源を明らかにすることである。フルーエンスに対する短いバーストの数の累積分布により、地震や太陽フレアと類似したメカニズムにより発生している可能性を見いだしたが、明確な証拠はない。

最後に、本稿で紹介した研究はPASJ誌に掲載されているので³¹⁾、より詳しい内容を知りたい方はそちらをご覧ください。

謝辞

本稿の内容は、筆者が青山学院大学で行った学位論文の研究成果の一部をもとにしています。青山学院大学における6年間にわたる学生生活において、熱心に研究指導をしてくださった吉田篤正

先生に深く感謝をいたします。また、カリフォルニア大学のケビン・ハーレー博士には、研究手法や議論に関して多くの助言をいただきました。そして、HETE-2 衛星の運用や解析の指導をしてくださった、理化学研究所の玉川 徹博士、ゴダード宇宙飛行センターの坂本貴紀博士に感謝をいたします。研究を進めるに当たり、宇宙航空研究開発機構の松岡 勝先生、東京工業大学の河合誠之先生にはさまざまな助言をいただきました。HETE-2 衛星の WXM 検出器の機上較正では、国立天文台の白崎祐治博士、宇宙航空研究開発機構の鈴木素子博士にはたいへんお世話になりました。また、HETE-2 衛星を支えてくださった多くのチームメンバー、そして HETE-2 衛星に感謝をいたします。最後に、本稿を投稿するに当たり、内容をチェックしてコメントをくださった、理化学研究所の寺田幸功博士に感謝をいたします。

参考文献

- 1) Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D., Scott P. F., Collins R. A., 1968, *Nature* 217, 709
- 2) Mazets E. P., et al., 1981, *Ap&SS* 80, 3
- 3) Laros J. G., Fenimore E. E., Fikani M. M., Klebesadel R. W., Barat C., 1986, *Nature* 322, 152
- 4) Mazets E. P., Golenetskii S. V., Gur'yan Yu A., 1979, *Soviet Astron. Lett.* 5, 343
- 5) Cline T., et al., 1980, *ApJ* 237, L1
- 6) Evans W. D., et al., 1980, *ApJ* 237, L7
- 7) Fenimore E. E., Klebesadel R. W., Laros J. G., 1996, *ApJ* 460, 964
- 8) 吉田篤正, 井岡邦仁, 2007, シリーズ現代の天文学 第8巻 ブラックホールと高エネルギー現象 (日本評論社), 第5章
- 9) Thompson C., Duncan R., 1995, *MNRAS* 275, 255
- 10) Kuiper L., Hermsen W., Den Hartog P. R., Collmar W., 2006, *ApJ* 645, 556
- 11) Götz D., Mereghetti S., Tiengo A., Esposito P., 2006, *A&A* 449, L31
- 12) Molkov S., Hurley K., Sunyaev R., Shtykovsky P., Revnitvsev M., Kouveliotou C., 2005, *A&A* 433, L13
- 13) Thompson C., Duncan R., 1996, *ApJ* 473, 322
- 14) Lyutikov M., 2003, *MNRAS* 346, 540
- 15) Cea P., 2006, *A&A* 450, 199
- 16) Fenimore E. E., Laros J. G., Vmer A., 1994, *ApJ* 432, 742
- 17) Feroci M., Calliandro G. A., Massaro E., Mereghetti S., Woods P. M., 2004, *ApJ* 612, 408
- 18) Olive J.-F., et al., 2004, *ApJ* 616, 1148
- 19) Nakagawa Y. E., et al., 2005, *Il Nuovo Cimento C Vol. 28 Issue 4*, p. 625
- 20) Götz D., et al., 2006, *A&A* 445, 313
- 21) Kouveliotou C., et al., 1987, *ApJ* 322, L21
- 22) Strohmayer T. E., Ibrahim A., 1998, in *Fourth Huntsville Symp. on Gamma-Ray Bursts*, AIP Conf. Proc. 428, ed. Meegan C. A., Preece R. D., Kosshut T. M. (AIP, Woodbury), 947
- 23) Ibrahim A. I., et al., 2001, *ApJ* 558, 237
- 24) Golenetskii S. V., Aptekar R. L., Guryan Y. A., Il'inskii V. N., Mazets E. P., 1987, *Sov. Astron. Lett.* 13, 166
- 25) Götz D., Mereghetti S., Mirabel I. F., Hurley K., 2004, *A&A* 417, L45
- 26) 河合誠之, 2001, 天文月報, 94, 287
- 27) 坂本貴紀, 2005, 天文月報, 98, 507
- 28) Güver T., Ozel F., Lyutikov M., 2006, arXiv: astro-ph/0611405
- 29) Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V., Il'inskii V. N., Mazets E. P., Pal'shin V. D., et al., 2001, *ApJS* 137, 227
- 30) Göğüs E., Woods P. M., Kouveliotou C., Paradijs J. V., Briggs M. S., Duncan R. C., Thompson C., 2000, *ApJ* 532, L121
- 31) Nakagawa Y. E., et al., 2007, *PASJ*, 59, 653

Observations of Short Bursts from Soft Gamma Repeaters Detected by HETE-2

Yujin E. NAKAGAWA

Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara, Kanagawa 229-8558, Japan

Abstract: The HETE-2 satellite detected 55 SGR short bursts from 2001 to 2005. Timing and energy spectral analyses of the short bursts were performed using 2–400 keV data. There are three main results. First, a time lag of 2.2 ± 0.4 ms between 30–100 keV and 2–10 keV emissions is found from the timing analysis. Second, energy spectra are well reproduced by a two-blackbody function with temperatures ~ 4 keV and ~ 11 keV. Third, a power-law index of a cumulative number-intensity distribution varies in each period.