

γ 線バーストのサイクロトロン吸収線と中性子星磁場

吉田 篤正*・村上 敏夫**

1. はじめに

『 γ 線バーストとは何か?』。この問いに答えられる人はあまり多くないだろう。『 γ 線バースト』という天文用語になじみのある人はほとんどいないと想像される。

γ 線バーストとは宇宙の彼方から突然多量の γ 線が短時間(典型的には数秒から数10秒)だけ飛来する現象である。アメリカのヴェラ衛星によって偶然観測されたことにより、この特異な現象が天文学の長い歴史の上に姿を現すことになった(1)。それは1973年のことである。以来、気球や人工衛星をもちいて多くの観測が行われてきたにもかかわらず、この現象の発生源・発生機構

は謎につつまれたままであった。 γ 線バーストは起こる時刻・位置があらかじめ予想できないうえに、バーストを起こしていないときには、発生源が γ 線ばかりか他の波長領域(可視光、電波、X線など)でも観測できず、既知の天体に同定された例もない。つまりバースト源は、突然、短時間だけ γ 線を放射して光輝くが、通常は非常に暗く観測できない不思議な天体なのである。地球に降り注ぐエネルギーは1回あたり、大きいもので1平方センチメートルあたり 10^{-8} エルグにも及ぶ。これは他の天体現象と比較してもかなり大きな値である。一方 10^{-6} erg/cm²程度の小さいバーストまで含めると、年間数100個も発生していると予想され、その特異な性質にもかか

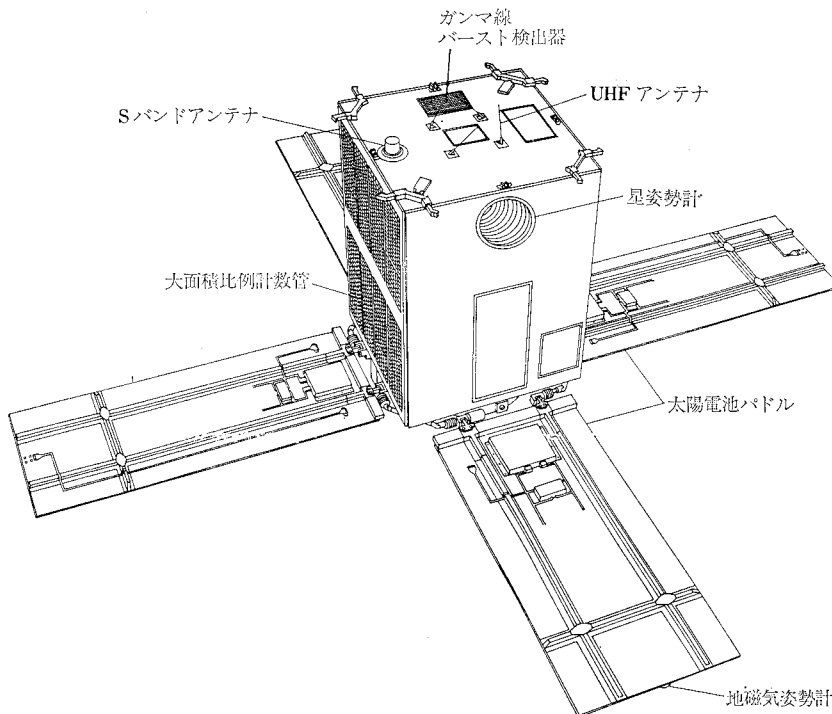


図1 人工衛星「ぎんが」

「ぎんが」を斜め上から見たところである。 γ 線バースト検出器は上部パネルの網で覆われた四角い枠の下に搭載されている。衛星本体の重さは420 kgあるが、 γ 線バースト検出器はたった3 kgの重量しかない。側面の網の下には「ぎんが」の主観測器である大面積比例計数管が、その反対側には(この角度では見ることができないが)X線全天モニターが搭載されている。4枚の太陽電池パドルがいつも太陽の方向を向くように「ぎんが」は姿勢制御されるので、 γ 線バースト検出器は常に太陽と反対の方向を向いている。

* 理研 Atsumasa Yoshida, ** 宇宙研 Toshio Murakami:
Cyclotron Absorption Features in γ -ray Bursts and Related Magnetic Fields of Neutron Stars

ならず、むしろ数としてはありふれた天体現象とさえいえる。

このようにありふれた現象ではあっても観測を行おうとすると、厚い大気層に阻止されて地上では不可能で、気球や人工衛星などの大がかりな観測装置が必要となる。このため1970年代から80年代前半にかけての時期は、おもに人工衛星が使えるアメリカとソ連によって観測・研究がリードされてきた。この時期、人工衛星や人工惑星に搭載された、いわゆる「第2世代の検出器」によって、 γ 線バーストのスペクトルが精度良く観測されるようになった。代表的なものにソ連のヴェネラ衛星シリーズに搭載された Konus 実験をあげることができよう。こうした観測器はかなり大量のデータを収集し、その結果、 γ 線バーストはきわめて多様で複雑な時間変動を示し、黒体放射とは全く異なる、数千電子ボルトから 10^7 電子ボルト (10 MeV) におよぶ硬いエネルギースペクトルをもつ天体現象であることが明らかにされた。

1987年2月、文部省宇宙科学研究所によって打ち上げられた「ぎんが」衛星には、日本ではじめて本格的な γ 線バースト検出器が搭載された。この検出器はアメリカのロスアラモス国立研究所との国際協力の下、設計・開発されたものである。これにより、わが国でもやっと本格的な γ 線バーストの観測が開始されたのである。以来今日までに、「ぎんが」は50個あまりのバーストを観測している。そのうち1987年3月3日と1988年2月5日に起きたバーストでは、エネルギースペクトルの中にみごとな吸収線構造を観測した(2)(3)。とくに1988年2月5日のバーストで見いだされた構造はきわめて明瞭で、過去に観測された同様のスペクトル構造に比較して、はるかに優越する統計的有意性をみせている。詳しい解析の結果、このスペクトル構造は、 10^{12} ガウス程度の強磁場でのサイクロトロン散乱により生じたと考えるのが妥当であると結論された。本稿ではこのスペクトル構造について解説する。

2. サイクロトロン吸収線

γ 線バーストの吸収線構造について初めて報告したのはソ連の Mazets たちである(4)。彼らは Konus 実験のデータを解析した結果、10パーセント程度のバーストで、約20~70キロ電子ボルト付近に吸収線のような構造を見いだした。彼らはこれを 10^{12} ガウス程度の強磁場中でのサイクロトロン吸収として解釈した。このように強い磁場中では磁力線のまわりを螺旋運動する電子の軌道半径は、100分の1オングストローム (10^{-10} cm) 程度になり、電子の波としての性質が効いてくる。原子の場合と同じように、エネルギー準位は量子化されて離散的な値をとる。サイクロトロン吸収とは光子を吸収し

て、電子が励起準位に遷移される過程である。この離散的なエネルギー準位は近似的に

$$E_n = 11.6nB_{12} \text{ (キロ電子ボルト) } (n=0, 1, 2, \dots)$$

と表される。ここで B_{12} とは 10^{12} ガウスを単位にとったときの磁場の強さ、 n は正の整数で原子の場合の主量子数に対応する。このエネルギー準位はランダウレベルとよばれ、上式からわかるように、サイクロトロンエネルギー ($11.6B_{12}$ キロ電子ボルト) の整数倍としてあたえられる“はしご状”の準位である(図4)。

Mazets たちの解釈にしたがうと観測された吸収線構造は基底ランダウレベルから第1励起レベルへの電子の遷移に対応し、バースト発生源での磁場の強さは $(2 \sim 6) \times 10^{12}$ ガウスとなる。この値は電波パルサーやX線パルサーで推定されている中性子星の磁場の強さと同程度であった。実際彼らの解釈の背景となったのはX線パルサーでそのとき既に発見されていたサイクロトロン過程による輝線/吸収線構造であった。彼らの解釈が正しいなら、このように強い磁場は中性子星でしか実現できないことから、 γ 線バーストの発生源を中性子星とする仮説を強力に支持することになる。しかしながら、彼らの観測そのものがいくつかの点から批判の対象となり、事実として完全にうけいれられたわけではなかった。要約すればそれは次のような4点にしばれるだろう。

(1) 見いだされた吸収線がいずれも観測器 (NaI シンチレーションカウンター) の測定下限ぎりぎりのところに位置しており、多くの例で吸収線の低エネルギー側の端まで観測されていない。そのため観測された構造は検出器の特性による人工的なものかもしれない。また“吸収線”ではなくスペクトルの連続成分が変化するという可能性も残る。

(2) シンチレーター中のよう素のK吸収端 (33キロ電子ボルト) の考慮が不十分であり、エネルギースペクトルの解析がまちがっているのではないかと指摘されている。

(3) 彼らは発見したスペクトル構造の統計的有意性について述べていない。この構造は連続成分の統計的なゆらぎである可能性がある。

(4) スペクトル構造が複数の観測器で同時に観測された例はない。

結局のところ Mazets たちの観測結果は、『本当らしくはあるけれど事実とするには不十分』という状態にとどまっていたといえる。バーストの発生源を解明する上からも吸収線構造存在の有無を確かめることは非常に重要であり、次世代の観測器によるより精度の良い観測が待たれていたのがあった。

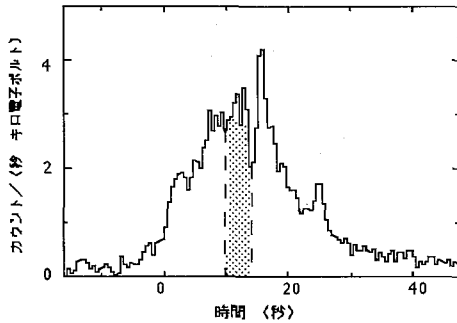


図2 1988年2月5日に起きたバーストのタイムプロファイル。この図はシンチレーションカウンターのデータを示している。バーストは約60秒ほど続いたが、吸収線構造が見つけれられたのは影をつけた部分だけであった。

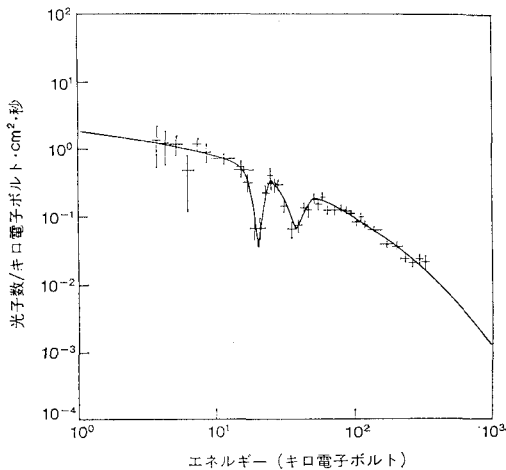


図3 1988年2月5日に起きたバーストで見いだされた吸収線構造。きわめて明瞭な2本の吸収線が観測された。この図では19.3キロ電子ボルトと38.6キロ電子ボルトの位置に吸収線を入れている。

3. 「ぎんが」の観測

「ぎんが」に搭載された γ 線バースト検出器は、バーストの低エネルギー部(X線領域)の観測に主眼をおいて設計されたものである。数10キロ電子ボルト付近の吸収線構造の有無を確かめることも主要な観測目的の1つとされた。観測器はガス比例計数管とNaIシンチレーションカウンターからなり、約1キロ電子ボルトから約500キロ電子ボルトまでの広いエネルギー領域を精度良く測定することができる。

すでに述べたように「ぎんが」は2例のバーストで吸収線構造を見いだした。とくに1988年2月5日のバーストで発見された構造は顕著であった。以下はこのイベントについて述べる。

このバーストは、約60秒ほど続いたが、そのうち限

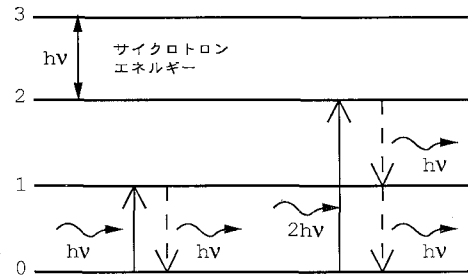


図4 サイクロトロン吸収/散乱。

10^{12} ガウス程度の強磁場中では電子のエネルギー準位はサイクロトロンエネルギーの整数倍となる。基本波の光子は基底レベルの電子を第1励起レベルに、2倍波の光子は第2励起レベルに励起することができる(サイクロトロン吸収)。第1レベルに励起された電子は基本波の光子を再放出して基底レベルに戻るが、第2レベルの電子は2個の基本波の光子を再放出して基底レベルに戻る(サイクロトロン散乱)。

られた短い時間(<10秒)にスペクトル構造が発見された。「ぎんが」の観測の特徴は、第1に約20キロ電子ボルトと約40キロ電子ボルトに2本の吸収線構造が発見されたことである。同時に2本の吸収線が検出された例は過去にない。第2に構造ははっきりした“吸収線”であることである。Konus等の過去の観測例では、多くのものが“吸収線”というより“吸収帯”とよぶべき広かった構造を示しているのと対照的である。

Konusの観測結果について投げかけられた4つの批判のうち最初の3点については、「ぎんが」の観測については問題とならない。「ぎんが」の測定器では検出限界は約1キロ電子ボルトと低く、吸収線構造より十分低いエネルギー領域までスペクトルを測定することができる。この結果、スペクトルの連続成分は吸収線の両端でなめらかにつながっていることが見いだされた(図3参照)。第2の点に関しては、入射 γ 線の検出器中での相互作用を考慮したモンテカルロシミュレーションを行い、よう素のK吸収端等のスペクトルを変形させる効果を充分考慮した上で解析をおこなった。シミュレーションの結果は「ぎんが」打ち上げ前に実験室でおこなった測定とよく一致しており、この点からも観測された構造が検出器中で生成されたものではないといえる。第3点に関しては、われわれはとくに慎重な解析をおこない、種々のなめらかなモデルを仮定して、連続成分の統計的ゆらぎにより吸収線構造が生じるか否かを調べた。この結果、ゆらぎにより構造が偶然に生成される可能性は99.99パーセントという非常に高い信頼度で棄却できることが示された。第4番目の点に関して述べると、残念ながら「ぎんが」と同時に吸収線を観測した検出器はない。金星周回軌道上にあるPVO衛星もこのバーストを観測

したが、PVO の検出器では、300 キロ電子ボルト以下のスペクトルを測定することはできず、そのため吸収線構造は見いだせなかったと思われる。

以上まとめると、「ぎんが」による観測は Mazets たちによる最初の報告以来問題とされてきた吸収線構造存在の有無について、最終的な回答をあたえたといえるだろう。すなわち、 γ 線バーストには数 10 キロ電子ボルトに構造をもつものが確かに存在すると結論できる。さらに強調しなければならないのは、1 本ではなく 2 本の吸収線を見出したことである。「ぎんが」のもつ高いエネルギー分解能がスペクトル構造の詳細をはじめて明らかにしたといえよう。

4. 吸収線構造の解釈

それではこの構造はどのようなメカニズムにより生成されたのであろうか。まず光電吸収について考えてみよう。観測された吸収線が数 10 キロ電子ボルトという高いエネルギー領域にあることを考えると、光電効果で説明するためには、原子番号 (Z) のかなり大きな元素を考えなくてはならない。実際 $Z > 57$ となる元素でなくてはならないだろう。宇宙に普通に存在する元素の成分比を考慮すると、 γ 線バースト発生源にこうした特殊な元素が多量に存在するとは考えにくく、光電吸収によりスペクトル構造が生成されたとは考えられない。しかしながら、もし非常に強い磁場が存在するとなると事情は異なってくる。 B/Z^2 が 5×10^9 ガウスを越えるような磁場が存在すると、電子は原子核よりもさらに強く磁場に束縛されるようになる。このため原子は磁場に沿って針のように細長く変形し、束縛された電子は普通の原子よりも原子核に近付くことができる。これにともない原子の束縛エネルギーは増大し、鉄のような(宇宙に比較的多く存在する)重元素ではその値が数 10 キロ電子ボルトの領域に達する。われわれは、磁場の大きさが 4×10^{18} ガウスのとき、観測された 2 本の吸収線が鉄イオンによる光電吸収で説明できることを示した (3)。これはなかなか魅力的で興味深いアイデアであるが、実際にこのモデルの実現を考えるのはかなり困難であることがわかった。それは次のような事情による。磁場が 4.4×10^{18} ガウス(臨界磁場)程度以上になると、 1×10^6 電子ボルト以上の γ 線が磁場を介して真空中で電子-陽電子対生成を起こす確率が著しく大きくなる。実際 4×10^{18} ガウスの磁場中では、対生成が起こるまでに電子が走れる距離は、わずか 1 ミクロン程度にすぎない。一方前述した PVO 衛星は $(1 \sim 2) \times 10^6$ 電子ボルトの信号を記録しており、このバーストがこのように強い磁場が存在する場所で発生したと考えるにはかなり無理が生じる。このことから、この解釈は適当ではないと結論した。

磁場の存在を仮定するならばやはりサイクロトロン過程を考えるのが自然であろう。この場合 2 本の吸収線どのように解釈するかが鍵となる。観測データのモデルあてはめの結果(図 2 参照)は、2 本の吸収線の中心エネルギーの比が 2 であることを示す。ランダウレベルは“はしご”状のエネルギー準位であるから、1 本目の吸収線を基底レベルから第 1 励起レベルへの遷移、2 本目の吸収線を第 2 励起レベルへの遷移と考えると、2 本の吸収線をうまく説明できる。2 本の吸収線のエネルギー比が 1:2 であるという観測結果は、サイクロトロン過程によりスペクトル構造が生成されたという仮説を強く支持するものである。この場合中心エネルギーの大きさから直接磁場の強さがもとまり約 2×10^{12} ガウスと推定される。

サイクロトロン過程による吸収線の生成メカニズムについて、もうすこし詳しくみてみると、Konus 実験での発見当初考えられていたような、単純な“吸収”のアイデアでは「ぎんが」のデータを説明できないことがわかってきた。反応断面積は、第 2 励起レベルへの遷移のほうが第 1 励起レベルへのものに比べてかなり小さく、磁場の強さに依存するが 2×10^{12} ガウス程度では、約 20 倍以下である。「ぎんが」の観測では吸収線の強度は 1 本目も 2 本目も同程度であり、したがって単純な“吸収”では説明がつかないことになる。それではどのように考えればよいのだろうか? いま考えているような強い磁場が存在するときには、サイクロトロン過程は他の素過程に比較してはるかに効率がよく、極言すれば、もっぱらサイクロトロン過程だけを考えればよいことになる。そうすると、励起された電子は吸収とは逆の過程をたどり、光子を再放出して基底レベルにもどる、と考えねばなるまい。つまり光子は電子によって散乱(サイクロトロン散乱)されるのである。この散乱メカニズムは基本周波数(サイクロトロン周波数)の光子によって第 1 レベルに励起された電子と、2 倍波の光子によって第 2 レベルに励起された電子とでは様子が異なる。励起レベルにある電子の遷移確率は、隣合うレベルへの遷移のときがもっとも大きく、 2×10^{12} ガウスでは第 2 レベルの電子の約 93 パーセントはいったん第 1 レベルに遷移し、つづいて基底レベルにもどる。結果として、第 2 レベルに励起された電子の大部分は基本波の光子を 2 個再放出することになる。つまり倍波の光子(「ぎんが」イベントでは 40 キロ電子ボルトの光子)は電子との散乱によりほとんど 2 個の基本波の光子に壊れる(図 4 参照)。一方基本波の光子は散乱で壊れることはないから、光子数を保存したまま、プラズマ中でサイクロトロン散乱を繰り返すことになる。この散乱過程の相違を考慮すると、「ぎんが」の観測結果は矛盾なくサイクロトロン散乱で

解釈することができる。詳しい計算をおこなうと、電子温度が数千電子ボルト (10^4 K) 程度のとき観測データを説明できることがわかった。

結局「ぎんが」がみた吸収線はサイクロトロン散乱で生成されたと考えるのが妥当であろう。このことから、 γ 線バースト(少なくともその一部)は強磁場をともなった中性子星起源であると結論できるだろう。逆の見方をすると、中性子星の磁場がこれほど精度良く測定された例はない。 γ 線バーストはその発生頻度から、古い中性子星起源であると考えられるが、若い中性子星である電波パルサーが示す磁場の強さに匹敵する磁場をもっていたことは驚きである。

5. 吸収線生成領域

サイクロトロン散乱の解釈にしたがうと、吸収線生成領域について強い制限をくわえることができる。観測された幅は、電子の熱運動によるドップラーシフト、生成領域における磁場の強度変化などに起因すると考えられる。磁場がほぼ一様とすると、観測された幅はドップラー幅よりも大きくなくてはならないことから、電子温度の上限値として約6千電子ボルトがもとまる。この値は上で述べた解釈とつじつまがあう。一般に γ 線バーストスペクトルの連続成分は非常に硬く、とくにこのバーストでは、熱運動する電子からの制御輻射もしくはシンクロトロン輻射を仮定すると、実に500千電子ボルト以上の電子温度が要求される。したがって、あきらかに吸収線はバーストの発生領域とは異なる比較的冷たい領域で生成されたと考えなくてはならない。

磁場の変化がおもに幅をあたえている場合には、

$$\delta E/E_0 > \delta B/B$$

となる (δE は吸収線の幅, E_0 は中心エネルギーである)。双極子磁場を仮定すると、推定される δB から吸収線生成領域の大きさは、高さにして中性子星半径の15パーセント、広がりには中性子星表面積の10パーセント以下の比較的小さい領域であると考えられる。

以上の結論は、バーストの発生機構について大きな制限をあたえることになるだろう。発生機構については、これまで熱核爆発、彗星の落下、あるいは星震によるなど種々のモデルが提案されてきたが、どれも決定打に欠け今なお五里霧中という観がある。「ぎんが」の観測によりすぐれたモデルが現れることを期待したい。

6. おわりに

γ 線バーストの発見が1973年であることは、本稿の最初でも書いたが、これは実にX線バーストの発見よりも早い。すなわち、 γ 線バーストは『由緒正しき天体现象』なのである。にもかかわらず、その風変わりな星格

(?)のために、研究の進展では後続のX線バースト(中性子星表面での熱核反応)にはるかに後れをとってしまった。日本ではまだまだマイナーな研究対象であり、片手で数えられるほどの研究者が取り組んでいるのが現状である。幸い今回の観測で、「ぎんが」はきわめて豊かで示唆に富んだ物理を提供することができた。今後はサイクロトロン吸収が知られているX線パルサーとも関連して、超強磁場での物理や中性子星の磁場の起源・消滅などのテーマに取り組んでいく時であろう。そうした興味をもつ全ての人々にとって「ぎんが」の発見が福音となれば幸いである。

γ 線バースト検出器(GBD)は多くの人々の熱意と協力の賜である。GBDに携わった日米の科学者・技術者、また衛星の運用という骨の折れる仕事に真摯に取り組んでいる「ぎんが」チームのスタッフ・大学院生諸氏にあらためて感謝を述べたい。

参考文献

- (1) Klebesadel, Strong and Olsen, 1973, Ap. J. (Letters), **182**, 185.
- (2) Murakami et al., 1988, Nature, **335**, 234.
- (3) Fenimore et al., 1988, Ap. J. (Letters), **335**, L71.
- (4) Mazets et al., 1979, Nature, **282**, 587.
- (5) 村上敏夫, サイエンス, 1989年7月号(日経サイエンス)

* * *

訃 報

本会元庶務理事の 田中捷雄氏 には、かねて病氣療養中のところ、去る1月2日午後7時44分に東京大学医科学研究所付属病院で逝去されました。享年46歳。

謹んでご冥福をお祈りするとともに会員諸氏にお知らせ致します。

* * *

訂 正

第82巻12月320頁の

江上氏記事の右側1行目

Bethe → Baade

の誤りでしたので訂正します。