

ガンマ線バーストからの高エネルギー ニュートリノとガンマ線



村瀬 孔 大

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: kmurase@yukawa.kyoto-u.ac.jp

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最も激しい天体爆発現象の一つである。GRB に伴って非常に高エネルギーまで加速された粒子が作られていると考えられている。高エネルギーまで加速された電子や陽子は種々の素過程を通して高エネルギーのガンマ線やニュートリノを生成することができる。ここでは、このような高エネルギーニュートリノやガンマ線が GRB から放射される可能性について議論する。特に GRB での陽子加速の証拠としての高エネルギーニュートリノと GRB からのガンマ線が宇宙空間を伝播する際に作られる遅延ガンマ線について解説する。

1. はじめに

ガンマ線バースト (GRB). それは宇宙で最も激しい天体現象の一つである。1日に1回ほど、宇宙のどこかからガンマ線が突発的にやってくる現象 (バースト, もしくはプロンプト放射と呼ぶ) で、宇宙に存在するすべての星を足してやっとその明るさになるくらい明るい。しかしこの GRB という現象はその発見から 40 年近くたつにもかかわらず、どのようにして起こるかがいまだに解明されていない謎の天体現象であり、現在、理論と観測の両面で活発に研究が進められている。

1997 年に残光と呼ばれる現象 (プロンプト放射の後に起こる, 時間とともにべき乗的に暗くなっていく光) が発見され, GRB が約 100 億光年彼方という宇宙論的な距離で起こっている爆発現象であることが決定的となった。その後, 近傍で起きた GRB で超新星爆発と関連しているも

のが見つかり, どうやら重い星が死ぬときに何らかのメカニズムで高速のジェットが噴出され, その後ジェットが光を出すことで GRB となっているのではないかと考えられるようになった^{*)}。2004 年に打ち上げられた Swift 衛星によってさらなる観測的な進展があったものの, バースト後数十秒から数千秒の間の残光 (初期残光) が理論的予測と異なる振舞いをしていることがわかるなど, 現在 GRB 研究は混沌とした状況にある。

この GRB というモンスターを理解するための手がかりの一つとして高エネルギーニュートリノとガンマ線の観測可能性が, 近年, 議論されている。このような高エネルギーシグナルはまだ検出されていないものが多いが, もし観測されれば, われわれにまさにディープインパクトをもたらしてくれるであろう。今回は近い将来このような高エネルギーシグナルが検出されることを期待して, 最新の理論的な予測と筆者らの科学的成果を

*1 長い継続時間の GRB と短い継続時間の GRB があるが, ここでは長い継続時間の GRB のみに話を限る。

紹介していくことにする*2。

2. 高エネルギー粒子加速器としての GRB

GRB のプロンプト放射は典型的に 100 keV から MeV くらいのエネギーの光を出し、残光は X 線や可視、および電波で光を出す。さらには MeV を超えるエネギーの光を出す GRB も観測されている。実際、1990 年代に EGRET 検出器によって GeV を超えるような放射を伴う GRB が観測されており、なかには GeV シグナルが長時間続いたものもある。地上のガンマ線望遠鏡によって TeV シグナルらしきものを受けたかもしれないという報告もなされている。

ではこうした高エネルギーの光はどのようにして作られたのであろうか？ プロンプト放射や残光が起きるメカニズムについては未解決な部分が多く残されているものの、標準的には源の中で高エネルギーまで加速された電子からの放射であると考えられている。例えばプロンプトの放射の説明のために受け入れられているモデルの一つとして内部衝撃波モデルがある。中心エンジンから噴出したジェットの中で速度の異なる部分同士が互いに衝突すると内部衝撃波が形成される。粒子はその衝撃波面を往復することでエネギーを獲得し加速することができる。加速された電子はシンクロトロン放射や逆コンプトン放射（光子が高エネルギー電子との散乱でより高エネルギーの光子となって放射される過程）などによって高エネルギー光子を作り出すことができる。このようなシナリオは広く受け入れられてはきたものの、加速機構をはじめ未解決の問題は数多く残されてい

る。高エネルギーガンマ線の観測は GRB が起きている物理的環境についての貴重な情報をわれわれに与えてくれると期待されている。

GeV 前後の高エネルギーガンマ線は、今年打ち上げ予定であるガンマ線衛星、GLAST によって検出されることが期待されている。また 100 GeV 前後のガンマ線も MAGIC や VERITAS などの地上のガンマ線望遠鏡での検出が期待されている。

電子の加速が GRB で起きているのならば、電子とともにジェットの中に含まれているであろう陽子も加速されている可能性があるだろう*3。

GRB で陽子加速が起これり、GRB が宇宙線を生産する天然の加速器になっているかもしれない。

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギー粒子のことであり、地上にも絶えず降り注いでいる。地上で観測されている宇宙線のスペクトルは最高エネルギー宇宙線と呼ばれる 10^{20} eV (何と粒子 1 個で時速 200 km のテニスボールの運動エネルギーに匹敵する!) 程度のエネルギー領域まで滑らかにつながって延びている。宇宙線に関連した未解決問題は多いが、その中でも最高エネルギー宇宙線の起源問題は現代宇宙物理学における最大の謎の一つとなっている。GRB はこの最高エネルギー宇宙線起源候補の一つでもあり²⁾、陽子加速器としての GRB も一つの面白い可能性であろう。

3. 陽子加速の証拠としてのニュートリノ

観測されている最高エネルギー宇宙線が本当に GRB 起源であるかはともかくとしても、GRB で

*2 ここでは一応、GRB の標準モデル（ジェットの運動エネルギーが衝撃波を介して粒子のエネルギーに変換され、やがて種々の素過程を通して放射エネルギーに転化されるというモデル）に準じて話を進めることにする。しかし、既存のモデルは標準と名前はついているものの説明できない観測事実も多く、問題となっている。プロンプト放射やフレアでは、磁場を介した散逸が重要かもしれないし熱的な放射が効いているかもしれない。初期残光についても、その振る舞いを説明するためには標準モデルにいくつか修正を加えなければならない。

*3 重い原子核が加速されている可能性もあるがここでは考えないことにする。

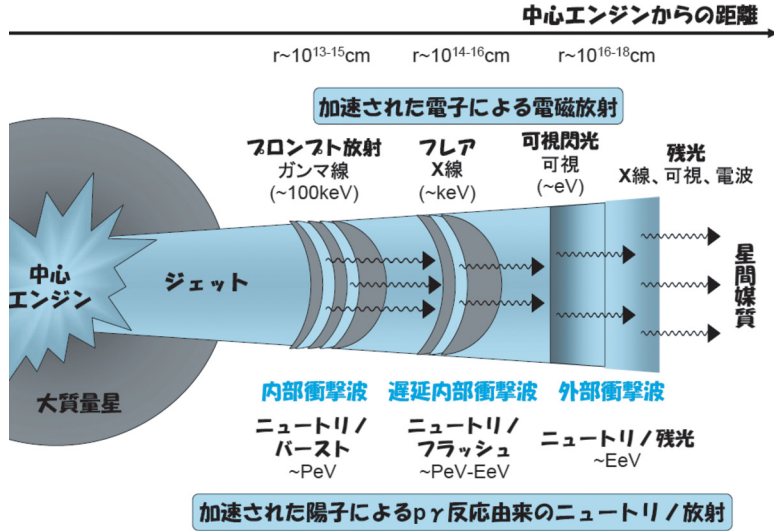


図1 GRBの標準的なモデルと、各々のモデルで予言されるニュートリノの典型的なエネルギー。大ざっぱにいうと、中心エンジンに近いところで起きたほうが光子密度が高いためニュートリノがたくさん出る一方、典型的なエネルギーは低くなる。ここで PeV=10¹⁵ eV であり、EeV=10¹⁸ eV である。

実際に陽子加速が起きている可能性はあるだろう。ところが加速機構やGRB自体の理解が十分に進んでいないために、陽子がどのくらい存在してどの程度加速に注入され、どれくらいのエネルギーまで加速されるのかがよくわからない。

逆に観測から陽子加速をプローブすることができると、これらの問題への重要な手がかりを得ることができるだろう。そこで活躍するのがニュートリノである。加速源で作られた高エネルギー陽子は陽子と衝突 (pp 反応) を起こすことができる。十分に高いエネルギーまで加速されていれば、周囲の光子と反応 (pγ 反応) できるようになる。これらの反応で作られるパイオンやケイオンは π[±]→μ[±]+ν_μ(ν̄_μ)→e[±]+ν_e(ν̄_e)+ν_μ+ν̄_μ や π⁰→2γ のように崩壊してニュートリノやガンマ線を放出する。

陽子加速を見たいのだから陽子を観測すればいいのではないかと、思うかもしれないが、陽子は電荷を持っているので、宇宙磁場が十分に弱くない

限り地球に届くまでに経路が曲がったり到達時間が遅れたりするため加速源を同定することが難しくなる。ガンマ線のほうは、前述のように逆コンプトン散乱によっても作られるし、源を抜け出すまでにいろいろな反応を起こす可能性があるため、加速陽子起源かどうか判定することは容易とはいえない。一方で、ニュートリノは物質との相互作用がたいへん弱いため、源をほとんどそのまま抜け出してまっすぐにわれわれの方向にやってくることができる。光を通さない高密度、高温の物質や放射場も貫通することができるため、電磁波観測では得られない天体深部の情報すらわれわれに与えてくれる。1987年のSN1987Aから超新星ニュートリノを観測したことで小柴昌俊東大名誉教授がノーベル賞を受賞されたことは記憶に新しいが、神岡実験による太陽および超新星ニュートリノ*4の観測は、まさにこの特徴を活かしたものであった。GRBなどの場合でも同様で、高エネルギーニュートリノは高エネルギー宇宙線

*4 典型的なニュートリノのエネルギーは MeV 領域で今回議論する高エネルギーニュートリノのエネルギー (主に TeV 以上) よりもずっと低い。

の起源に密接に関連するだけでなく、源からほとんどそのまま邪魔されることなくやってくるため、陽子加速のより、直接的な証拠となりうる。

このように夢の多い高エネルギーニュートリノ観測であるが、弱い相互作用が今度は仇となって検出は容易ではない。しかし、現在進行中のプロジェクトは数多く存在し、近い将来完成する観測装置で検出できるかもしれない。代表的な検出のためのテクニックは、海底の水や南極の氷を用いたチェレンコフ光やカスケードシャワーを利用するものである。最も大規模なものとして南極で1 km³ 検出器の IceCube が建設中である。光検出器を南極氷河に埋め込んでおいて、ニュートリノが氷にぶつかったときに出てくる粒子からの光を検出する仕組みとなっている。その前身である AMANDA 実験は既に終了し、大気ニュートリノのフラックスの値やニュートリノ背景放射のフラックスの上限値が与えられている。一方、地中海では海水を利用した1 km³ 検出器を建設する KM3Net 計画が進行している。さらに国際宇宙ステーションを利用した JEM-EUSO や広視野多目的望遠鏡 Ashra などの計画にも期待がもたれている。

4. GRB の標準モデルにおける高エネルギーニュートリノ放射の可能性

GRB からの高エネルギーニュートリノ放射の可能性に関する予言は Waxman & Bahcall によって行われた³⁾。彼らは GRB が最高エネルギー宇宙線の起源であるという仮定のもとでプロンプト放射に伴って放射されるニュートリノフラックスの簡単な見積もりを行った。彼らは $p\gamma$ 反応の断面積を簡単な取り扱いで近似し（この反応がもつ共鳴構造のところでは断面積を近似する取り扱いで、 Δ 共鳴近似と呼ばれる）、スペクトル

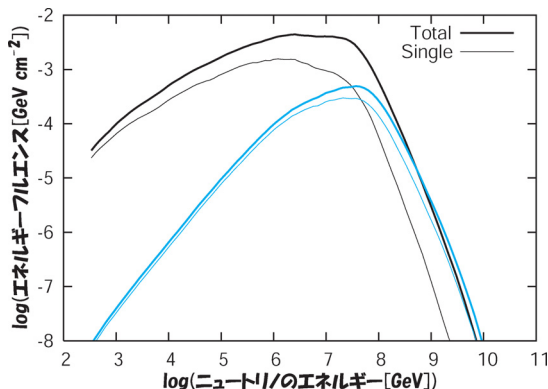


図2 z=1 で起きた GRB 1 発からのニュートリノスペクトル。青線は標準的な GRB の光子スペクトルを仮定した場合で、黒線は標準的なものよりハードな光子スペクトルを仮定した場合。ガンマ線の等方的なエネルギーは、青線では 10⁵³ erg、黒線では 10⁵⁴ erg を用いた。中心エンジンからの距離は 10¹⁴ cm 程度を仮定した。Single は主に Δ 共鳴で作られたニュートリノのスペクトルを表す。Total は多重パイオン生成などの効果も入れて計算した場合のニュートリノスペクトルを表す。

をべき則をつないだものとして近似式で表した。

筆者らは、 $p\gamma$ 反応の反応断面積を正確に考慮し、生成されるパイオンやミューオンの冷却過程も考慮した、より定量的な計算を行った^{4), 5)}。 Δ 共鳴が起こるエネルギー領域より高エネルギー側では、一つの陽子から複数のパイオンが作られる多重パイオン生成反応が起こる。筆者らの計算の結果、これらの効果によって高エネルギー側で 2-3 倍程度、ニュートリノフラックスが上がるのがわかった。よりハードなべきの光子スペクトルをもった GRB を考えると、高エネルギー光子の相対的な数が増えるので、高エネルギー側の断面積がより効いて 1 桁近くフラックスが上がる可能性もある（図2 参照）。

加速陽子のスペクトルや最大加速エネルギーの評価は加速機構に依存する。今回の計算では標準

*5 モンテカルロ法を用いた定量的な計算も行われている⁵⁾。

的な衝撃波加速理論で期待されるスペクトルを仮定し、加速時間の評価では最も良い効率が実現されていると仮定した。

ニュートリノスペクトルはどのような形になるのであろうか？もし $p\gamma$ 反応で作られたパイオンが冷えずにそのまま崩壊すると、ニュートリノのスペクトルはあるエネルギー以上では大体陽子スペクトルに似たものになる。しかし、GRB の場合にはシンクロトロン冷却や断熱冷却、逆コンプトン冷却などの冷却過程が重要になるので、高エネルギーのパイオンやミューオンは崩壊してニュートリノを出す前に冷えてしまい、高エネルギー側のニュートリノフラックスは抑制されることになる。

ニュートリノスペクトルがわかると、観測器でどれくらい検出可能か見積もることができる。しかし、現時点ではニュートリノ検出は難しいため、よほど近いバーストか明るいバーストでないと GRB 1 発からのニュートリノを検出することは難しい。したがってたくさんの GRB イベントを観測することが重要になってくる（ここではたくさんの GRB からの寄与を足し算したという意味でニュートリノ背景放射と呼ぶ）。詳細は論文にゆずるが、GRB の発生率のモデルを与えると、ニュートリノ背景放射のフラックスを計算することができる。結果を図3に示した。

IceCube で期待できるイベント数は、プロンプト放射のエネルギーと同程度のエネルギーが最高エネルギー宇宙線につき込まれているとして、年間 10 イベント程度と見積もることができる。しかし、残念ながら GRB のメカニズムがわかっていないためにモデルの不定性は大きい。とはいえ、筆者らの計算結果は現時点で最も定量的な計算の一つであり、IceCube グループのテンプレートとして用いられている⁶⁾。

GRB ニュートリノの観測で重要になるのは GRB 観測と同時にニュートリノを観測することである。ニュートリノ観測だけだと、地球に降り

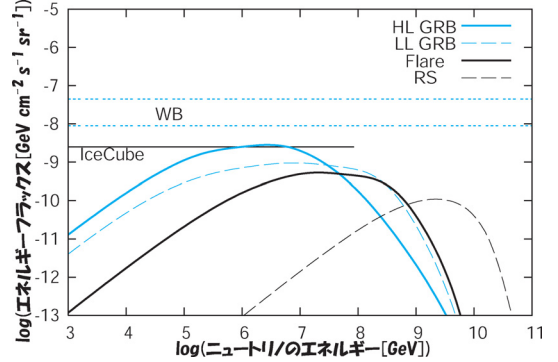


図3 種々のモデルによって予言されている GRB からのニュートリノ背景放射の典型的なスペクトル。HL GRB は通常の明るい GRB からの寄与、LL GRB は光度の暗い GRB からの寄与、Flare はフレアからの寄与、RS は逆行衝撃波モデルで期待される可視閃光からの寄与を表す。

注ぐ宇宙線に由来する大気ニュートリノや、最高エネルギー宇宙線が宇宙を伝播する際に宇宙背景放射の光子とぶつかって $p\gamma$ 反応を起こして作る GZK ニュートリノ（まだ検出はされていない）も背景放射に寄与するため、ニュートリノが GRB 起源かどうか同定することが難しくなる。しかし、GRB を衛星などで同時観測できていれば、時間的空間的に相関をとることができ、大気ニュートリノや GZK ニュートリノの寄与が無視できるようになる。すでにこのことに注目した解析により GRB ニュートリノフラックスに対する上限も与えられている。

プロンプト放射と同様に、残光からのニュートリノも議論されている⁷⁾。GRB の標準的なモデルでは残光はジェットが星間物質と衝突することによって形成する衝撃波（外部衝撃波）で加速された電子からの電磁放射だと説明されている。理論的には星間物質の中を前方に進む順行衝撃波とジェットの中を逆向きに進む逆行衝撃波の二つがありうる。この逆行衝撃波が存在する場合、そこで加速された電子からの電磁放射により可視赤外域で強い閃光が起きることが予言されていた。し

かし、そのような強い閃光は一部の GRB を除いては観測されていない。ダストによる減光や星間物質による吸収などの効果がからみ合うために一概に原因がこれだということが難しいが、閃光そのものが暗い可能性も指摘されている。そうだとすると、逆行衝撃波由来の高エネルギーニュートリノは従来予想よりも期待することが難しくなるであろう。

5. Swift による観測で示唆される高エネルギーニュートリノ放射の新たな可能性

Swift 衛星によって GRB のプロンプト放射が終わって約数十秒後から残光観測を開始することが可能になったことで、理論的に予期されなかった振舞いが初期残光中で起きていることが明らかになった。その中の一つに、主に X 線領域で見ついているフレアの活動がある。フレアの中にはプロンプト放射に匹敵するエネルギーをもつものや何回もフレアを起こすものもあり、中心エンジンがかなり長い間エネルギーを放出しているとの考えを支持している⁸⁾。正確にはわかっていないが、フレアは主に遠紫外域から X 線領域で光っていると考えられている。

フレア発生メカニズムもまだよくわかっていないがプロンプト放射とよく似た性質を多くの点でもっていることから同様のメカニズムで起きているのではないかと考えられている。その立場にたったモデルの一つが、プロンプト放射より遅れた内部衝撃波が起きて光を出すという遅延内部衝撃波モデルである。プロンプト放射を作るジェットより、フレアを作るジェットの速度が遅く、磁場も弱ければ、主に X 線で光ることができるだろう。

フレア中でも電子だけでなく陽子も加速している可能性も存在するであろう。筆者らはこの可能

性について考察し、初期残光の段階でフレアに 관련된観測可能なニュートリノシグナルが期待できることを示した⁹⁾。

フレアの場合、X 線領域で光っていることとジェットが遅いことから $p\gamma$ 反応を起こす相手の光子がたくさんおり、ニュートリノを効率よく作ることができる(もちろんフレアがどこで起きるかに依存する)。とはいえ、GRB 1 発からは、たとえ巨大フレアであっても近傍で起きないと IceCube での検出は難しい。しかし、GRB をたくさん見てやれば、なかには観測できるものが存在する可能性がある。典型的にプロンプト放射の 10 分の 1 程度のエネルギーをフレアで出しているとなると、フレアへの放射エネルギーと同程度のエネルギーが高エネルギー宇宙線につき込まれている場合、IceCube で年間 1 発程度検出できる可能性がある。このようなフレアからのニュートリノフラッシュは初期残光、特にフレアに相関して起きると期待される。もし検出できればフレア中での陽子加速や磁場についての情報が得られるなど、まだわかっていないフレアのメカニズムについての重要な示唆が得られるだろう。

その他の Swift 衛星による目覚しい成果の一つに昨年見つけた GRB060218^{*6)} の発見がある。この GRB は通常の明るい GRB よりずっと暗く、その後見つけた超新星成分の観測から中性子星誕生に関連しているのではないかと考えられている。また、この GRB が Swift による観測開始後わずか 1 年で起きたことと、もう少し遠い宇宙で起きたとすると検出できなかったということから、通常の明るい GRB よりも発生率が高い、光度の暗い GRB という別の種族が存在している可能性がある¹⁰⁾。これらの光度の暗い GRB 1 発からのニュートリノの検出は、通常の明るい GRB よりも難しくなると考えられるが、発生率がより高ければニュートリノ背景放射としては通常の明るい

*6) 主に X 線で光ったので X 線フラッシュ (XRF) とも呼ばれる。

GRBと同程度の寄与をする可能性がある。つまり、1発あたりのエネルギーの少なさをGRBの発生数で補うのである。この可能性は同時期に筆者らを含む異なる二つのグループによって指摘された^{11), 12)}。光度の暗いGRBからの高エネルギーニュートリノは高エネルギー宇宙線にプロンプト放射のエネルギーと同程度のエネルギーがつぎこまれたという仮定のもとではIceCubeで年間数発程度期待できるだろう。

ただし、光度の暗いGRBの場合、通常の明るいGRBの場合と異なり、ごく近傍で起きたバーストを除けばSwiftなどでは暗くても見つけることができない。そのため時間と空間の相関は期待できず、ニュートリノを光度の暗いGRB起源と断定することが難しい。しかし、ニュートリノの到来方向へ可視の望遠鏡を向けてやることで、GRBの発生後典型的には数日後に見える超新星成分を発見する可能性は残されているだろう。

このような光度の暗いGRBは最高エネルギー宇宙線源になりえるであろうか？残念ながら、可能性としては否定できないが難しいと思われる。GRBの発生率が大きければ、陽子の量自体はまかなうことができるかもしれないが、最高エネルギー領域まで加速するには種々の物理量がうまく選ばれていなければならない。

6. ガンマ線バーストからの高エネルギーガンマ線放射の可能性

今までGRBからの高エネルギーニュートリノについて述べてきたが、高エネルギーガンマ線が放射されている可能性も存在しており、現在まで議論が活発に行われてきている。実際、GeVを超えるガンマ線が観測によって報告されているし、理論的にも、加速電子からのシンクロトロン光子に加え、逆コンプトン散乱によってたたき上げられた光子がTeVを超えるエネルギーに達する可能性がある。加えて $p\gamma$ 反応起源の高エネルギーガンマ線や陽子自身のシンクロトロン放射も寄与

する可能性がある¹³⁾。しかしニュートリノと違ってガンマ線の場合はエネルギーが高くなると源の中で他の光子とぶつかって電子と陽電子を作ったり、電子とコンプトン散乱をしたりして源から脱出できない可能性がある¹⁴⁾。スペクトルもべき型とは限らず、理論的には多様なものになりうる。ケースバイケースになるが、ジェットの色が速いときなどはプロンプト放射でもTeVガンマ線が出るのが期待できる。また残光の場合は、こういったTeV光子が脱出できる可能性がより高いと思われる。

しかしGRBからTeV近いガンマ線が放射されても、このエネルギー領域ではニュートリノと違って宇宙空間を伝播する間に宇宙赤外背景放射(宇宙空間にうようよしている赤外域の波長をもつ光)とぶつかって電子陽電子対を作る。源からの一次的なスペクトルは、この宇宙赤外背景放射による吸収の効果で一部削れて観測されることになるだろう。この宇宙赤外背景放射による吸収の効果に関連して興味深い現象が理論的に予測されている。TeV領域の高エネルギー光子は宇宙赤外背景放射に吸収されると同時に、高エネルギーの電子陽電子対を作るが、この電子陽電子対は宇宙マイクロ波背景放射の光子を逆コンプトン散乱でたたき上げて、元の光子よりはやや低いエネルギーの光子を作る。この過程を繰り返して、削れた一次的なスペクトルとは別に、逆コンプトン散乱によってたたき上げられた光子による二次的なスペクトルが作られることになる。この二次的な成分は伝播する間に角度の広がりや宇宙磁場の効果で到達時間が遅れるので、遅延ガンマ線と呼ばれ、源からの放射が一過的なものであってもそれよりはるかに長い時間続いて起こる可能性がある。

筆者らは解析的な手法と数値的な手法の双方を用いてGRBのプロンプト放射で期待されるこの二次的な遅延ガンマ線のスペクトルの計算を行った¹⁵⁾。源のスペクトルとしてはべき則を高エネルギー

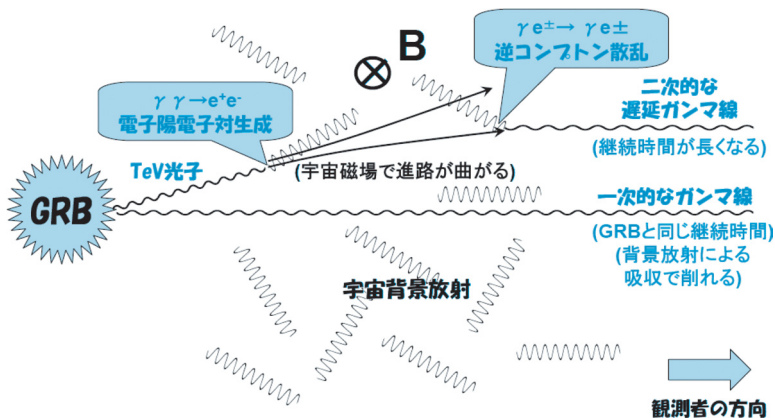


図4 遅延ガンマ線が作られるメカニズム。GRBからTeVに達する高エネルギーガンマ線が出ると宇宙赤外背景放射に吸収されて高エネルギー電子と陽電子を作り、その後逆コンプトン散乱で宇宙背景放射の光子をたたいて二次的なガンマ線を作る。この二次的なガンマ線は宇宙磁場などによって経路がずれると遅れてやってくるために継続時間がより長い放射として観測されることになる。

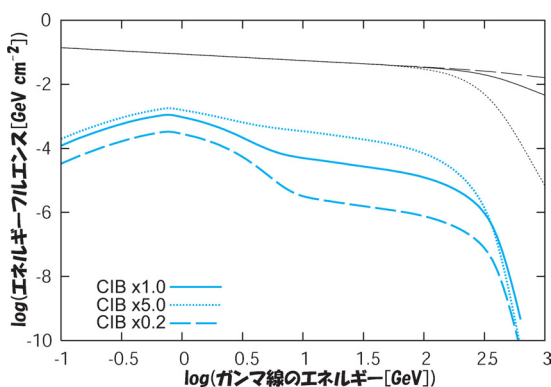


図5 $z=0.1$ で起きた GRB 1 発から TeV ガンマ線が出たときに期待される一次的なガンマ線のスペクトル(黒い細線)と二次的な遅延ガンマ線のスペクトル(青い太線)。宇宙赤外背景放射(CIB)の強度を5倍にした場合と5分の1倍にした場合の結果も図示してある。

ギーまで伸ばしたものと、逆コンプトン散乱や加速陽子の効果を考慮して数値計算したものをを用いた。

先行研究では宇宙赤外背景放射の光子による吸収のみを考慮し、それらが逆コンプトン散乱される効果を無視していた¹⁴⁾。しかし、筆者らの計算により、その寄与は無視できず、しかも GRB が

十分に近傍で起こっていれば、それに由来する成分を MAGIC などのガンマ線望遠鏡で検出できる可能性があることがわかった(図5参照)。またこの宇宙赤外背景放射の光子が逆コンプトン散乱される効果は、源からのスペクトルがべき則でなくても重要になる。

現在まで GRB を含め天体からの二次的な遅延ガンマ線がとらえられたという報告はないが、今後 GLAST が打ち上げられれば、観測のチャンスは増えるだろう。もしこのようなシグナルを観測できれば一次的なスペクトルの情報も加味して、理論的にも観測的にもあまりよくわかっていない宇宙赤外背景放射についての知見が得られる可能性がある。源のスペクトルをべき型だと仮定して、一次的なスペクトルの削れ具合を評価することでも情報が得られるが、GRB の場合は源でのスペクトルがべきであるとも限らないのでこのような二次的なスペクトルの観測は重要になるであろう。逆に宇宙赤外背景放射をよく知っていれば、GRB の物理的な情報が得られる可能性がある。

またこの二次的な遅延ガンマ線は、よくわかっていない宇宙磁場をプローブできる可能性を秘めている¹⁶⁾。今回の筆者らの計算ではボイド領域で

期待されるような弱い磁場を仮定したが、実は磁場によってフラックスは変化する。このことを利用して二次的なガンマ線の観測から宇宙磁場、ひいては宇宙初期に作られた磁場についての手がかりが得られる可能性もある。

7. 今後の期待

RGB という天体现象は高エネルギー粒子を生産する天然の加速器という側面をもっている。この天然の加速器で加速された電子や陽子に由来した高エネルギー光子やニュートリノをとらえることで謎の多い GRB についての有益な知見を得ることができるだろう。のみならず、最高エネルギー宇宙線や宇宙赤外背景放射といった GRB 以外のものへの重要な示唆を与えてくれるかもしれない。こうした高エネルギーシグナルをとらえる計画は現在数多く進行中であり、特にガンマ線観測では GLAST 衛星に大きな期待が寄せられている。高エネルギーニュートリノ天文学も夜明けを待っている段階にある。おそらく天体からのニュートリノを検出するためには現実的には Ice-Cube よりさらに大型のニュートリノ観測装置が望ましいと思われるが、現在計画されている観測装置でも数年内に貴重な情報をわれわれにもたらしてくれるであろう。GRB で期待される高エネルギーシグナルのイベント数は多くはない。したがって多数の GRB を見る必要があるし、通常のガンマ線、X 線、可視などを含めた多波長観測を続けていくことが不可欠なのはいうまでもないだろう。

謎の天体 GRB はこれまでさまざまな驚きをわれわれにもたらしてきたが、今後もさまざまな分野を巻き込みつつ、われわれに新鮮な発見をもたらしてくれることを期待したい。

謝 辞

この研究は長滝重博准教授、井岡邦仁助教、中村卓史教授、浅野勝晃氏との共同研究で、筆者

の修士論文の内容を簡単にまとめたものです。特に指導教官である長滝重博准教授に感謝を申し上げます。また有益なコメントをくださった井岡邦仁助教、戸谷友則准教授にも感謝いたします。

参考文献

- 1) 井岡邦仁, 2006, 天文月報 99, 220
- 2) Waxman E., 1995, Phys. Rev. Lett. 75, 386
- 3) Waxman E., Bahcall J. N., 1997, Phys. Rev. Lett. 78, 2292
- 4) Murase K., Nagataki S., 2006, Phys. Rev. D 73, 063002
- 5) Asano K., 2005, ApJ 623, 967
- 6) Achterberg A., et al., 2007, ApJ 664, 397
- 7) Waxman E., Bahcall J. N., 2000, ApJ 541, 707
- 8) Ioka K., Kobayashi S., Zhang B., 2005, ApJ 631, 429
- 9) Murase K., Nagataki S., 2006, Phys. Rev. Lett. 97, 051101
- 10) Soderberg A. M., et al., 2006, Nature 442, 1014
- 11) Murase K., Ioka K., Nagataki S., Nakamura T., 2006, ApJ 651, L5
- 12) Gupta N., Zhang, B., 2007, Astropart. Phys. 27, 386
- 13) Totani T., 1998, ApJ 509, L81
- 14) Razzaque S., Mészáros P., Zhang B., 2004, ApJ 613, 1072
- 15) Murase K., Asano K., Nagataki S., 2007, ApJ, submitted (astro-ph/0703759)
- 16) Plaga R., 1995, Nature 374, 30

High Energy Neutrinos and Gamma-Rays from Gamma-Ray Bursts

Kohta MURASE

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Gamma-ray bursts (GRBs) are the most violent phenomena in the universe. There will be high energy particles that are accelerated in relativistic jets making GRBs. High energy protons and electrons can produce high energy neutrinos and gamma-rays. We discuss possibilities of such high energy emission from GRBs. In particular, we focus on high energy neutrinos as a probe of proton acceleration and delayed secondary gamma-rays that are produced when high energy gamma-rays from GRBs propagate in the universe.