

ガンマ線バーストによる超高エネルギー宇宙線の加速

柴田 三四郎

甲南大学大学院修士課程 1 年

概要

宇宙線の中でもそのエネルギーが 10^{19} eV に達するようなものは、超高エネルギー宇宙線 (Ultra High Energy Cosmic Ray; UHECR) と呼ばれており、地上からの観測によりその存在が知られている。しかし宇宙線がどのようにしてその様なエネルギーにまで加速されるかについては未だ解明されていない。加速源としての候補はいくつか考えられているが、その中の一つにガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) と呼ばれる天体がある。GRB では内部衝撃波や外部衝撃波と呼ばれる衝撃波が存在すると考えられており、衝撃波でのフェルミ加速により、荷電粒子が 10^{20} eV といった超高エネルギーにまで加速される可能性が指摘されている (Waxman 1995, Vietri 1995 等)。本集録では、提案されている GRB による UHECR の加速というシナリオについて紹介する。

1 UHECR と GRB

1.1 UHECR について

図 1 に観測されている宇宙線のスペクトルを示す。 $E \sim 10^{15}$ eV に存在する knee と呼ばれる領域までは、超新星残骸での衝撃波によって加速されるのではないかと考えられているが、それ以上のエネルギーの宇宙線の加速源はよく分かっていない。中でも、 $E \sim 10^{19}$ eV 以上の様な超高エネルギー宇宙線 (Ultra High Energy Cosmic Ray; UHECR) と呼ばれる宇宙線が地上からの観測により確認されており (図 2)、これらの起源がどういふ天体なのか活発に議論されている。

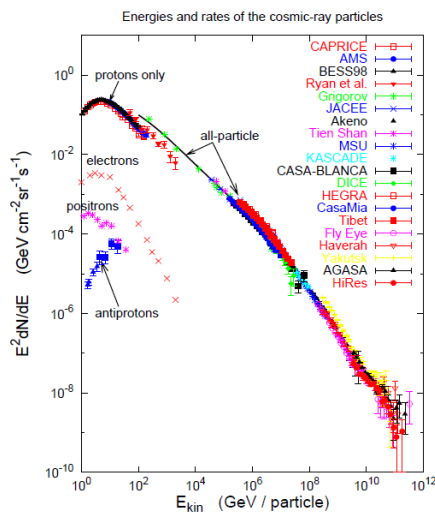


図 1 宇宙線のスペクトル (Hillas 2006)

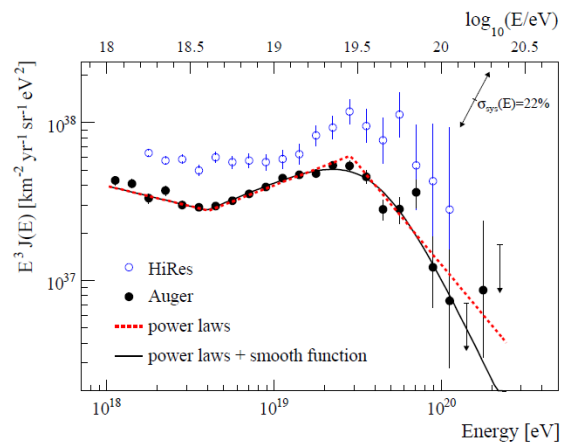


図 2 UHECR のスペクトル (The Pierre Auger Collaboration 2010)

1.2 GRB について

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) は、最初硬 x 線 \sim γ 線で $10^{-3} \sim 10^3$ の間明るく輝き (prompt emission、図 3)、その数時間後から x 線、可視光、電波で光る天体である (afterglow、図 4)。それらの起源は超新星爆発や中性子星同士の合体等によって出来る、超相対論的 ($\Gamma > 100$) なジェットであると考えられている。もしジェット中に速度が異なる部分が存在すれば、それらの衝突の際に発生する衝撃波 (内部衝撃波、internal shock) において電子が加速され、加速された電子によるシンクロトロン放射が prompt emission であるとする internal shock モデルが、prompt emission の放射機構として現在よく引用されている。また、超相対論的なジェットが外へ伝播すると外部の物質を掃き集め、外部衝撃波 (external shock) と呼ばれる衝撃波を作ると考えられ、そこで加速された電子によるシンクロトロン放射によって afterglow を説明する、external shock モデルが afterglow のモデルとして現在最有力である。そしてこれらの衝撃波によって、電子だけでなく陽子も加速され、その最高エネルギーが 10^{20} eV にまで達する可能性が指摘されている (Waxman 1995, 2004, Vietri 1995)。以下ではその可能性について議論する。

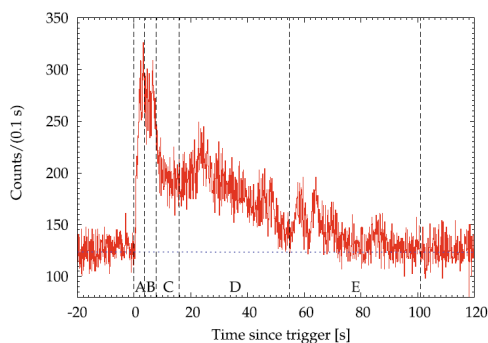


図 3 prompt emission の光度曲線 (Amati et al. 2009)

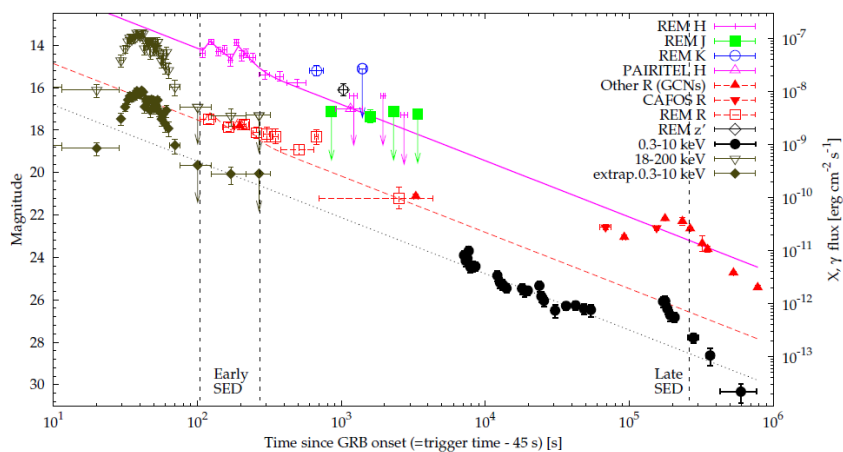


図 4 prompt emission から afterglow までの光度曲線 (Guidorzi et al. 2007)

2 GRB における UHECR の加速の可能性

まず、UHE までの加速に必要な主な条件を挙げると、

1. 系が冷える前に加速し終わらなければならない。
2. シンクロトロン放射によるエネルギー損失のタイムスケールよりも、短い時間で加速しなければならない。

GRB においてこれらの条件が満たされているかどうか議論する。

必要な条件 1

ジェットは膨張するので、系の dynamical timescale t_{dyn} ぐらい経過すると冷えてしまう。よってその間に加速される必要がある。つまり、 $t_{\text{acc}} < t_{\text{dyn}} = r_d/\Gamma c$ が必要になる。加速に必要なタイムスケール t_{acc} は、2 次のオーダーのフェルミ加速を考えると、 $t_{\text{acc}} = f R_L/c\beta^2$ となる。ここで f は 1 のオーダーの係数、 β は Alfvén 速度を光速で割ったものでほとんど光速の Alfvén 波を考えると $\beta \sim 1$ とできる。 R_L はラーモア半径であり、 $R_L = E/\Gamma e B$ を代入すれば、上の条件から磁場 B に対する下限が出てくる。

$$B > f \frac{E}{e r_d} = 3 \times 10^4 f E_{20} r_{d,13}^{-1} \text{ G} \quad (1)$$

ただし、 $E_{20} = E/10^{20} \text{ eV}$ 、 $r_{d,13} = r_d/10^{13} \text{ cm}$ で、 E は宇宙線のエネルギー、 r は internal shock 等の系の半径である。これを、磁場のエネルギー密度 u_B 、電子のエネルギー密度 u_e を用いて書き直せば、

$$u_B/u_e > 0.02 \Gamma_{2.5}^2 E_{p,20}^2 L_{\gamma,52}^{-1} \quad (2)$$

ただし、 $L_{\gamma,52} = L_\gamma/10^{52} \text{ ergs s}^{-1}$ である。これが磁場に対する下限を与える。

必要な条件 2

磁場があれば proton はシンクロトロン放射でエネルギーを失う。そのタイムスケールは、 $t_{\text{syn}} = (6\pi m_p^4 c^3 / \sigma_T m_e^2) E^{-1} B^{-2}$ なので、これが t_{acc} よりも大きくなければならないとすると、今度は磁場に対する上限が出てくる。

$$B < 3 \times 10^5 \Gamma_{300}^2 E_{20}^{-2} \text{ G} \quad (3)$$

さらにこれと $t_{\text{acc}} > t_{\text{dyn}}$ とが同時に満たされるためには、(下限) < (上限) である必要があるので、

$$r_d > 10^{12} \Gamma_{300}^{-2} E_{20}^3 \text{ cm} \quad (4)$$

が満たされなければならない。ところで、prompt emission の時間変動は $\Delta t \sim r_d/\Gamma^2 c$ と見積もられるので、逆に時間変動のタイムスケール Δt を用いて、 $r_d \sim \Gamma^2 c \Delta t$ と書くことが出来る。これを先程の r_d に対する条件へ代入すれば、ジェットのローレンツ因子 Γ に対する条件となる。

$$\Gamma > 130 E_{p,20}^{3/4} \Delta t_{-2}^{-1/4} \quad (5)$$

必要な条件をまとめると、

$$u_B/u_e > 0.02 \Gamma_{2.5}^2 E_{p,20}^2 L_{\gamma,52}^{-1} \quad (6)$$

$$\Gamma > 130 E_{p,20}^{3/4} \Delta t_{-2}^{-1/4} \quad (7)$$

ガンマ線が pair-production に対して optically thin であるためには、 $\Gamma > 300$ 程度が必要なので、2 つ目の条件は満たされているだろう。さらに internal shock が prompt emission の起源だとすれば、 $u_B/u_e \sim 0.1$ が必要なので 1 つ目の条件も満たされている。また external shock が afterglow の起源である場合にも $u_B/u_e \sim 0.1, \Gamma > 100$ が必要なので、2 つの条件は満たされている。

3 GRB energy generation rate

GRB によって放出されるエネルギーと、UHECR のフラックスから推測されるエネルギーとがどういう関係にあるか考える。

GRB の多くは $z > 1$ で見つかったので、 $z > 1$ での event rate から、star formation rate を使って $z=0$ での GRB event rate を見積もると、

$$R_{\text{GRB}}(z=0) \sim 0.5 \times 10^{-9} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \quad (8)$$

となる。これに GRB 一発あたりの平均エネルギー

$$\varepsilon_\gamma \sim 2.9 \times 10^{53} \text{ ergs} \quad (9)$$

をかけると、0.02MeV から 2MeV のガンマ線として GRB から放出される energy generation rate は、

$$\dot{\varepsilon}_{\gamma[0.02\text{MeV}, 2\text{MeV}]}^{\text{GRB}} \sim 10^{44} \text{ ergs Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \quad (10)$$

一方で、観測される宇宙線フラックスから推測される、 $z=0$ での $10^{19} \sim 10^{21}\text{eV}$ の proton の energy generation rate は (Bahcall & Waxman 2003)、

$$\dot{\varepsilon}_{[10^{19}, 10^{20}]\text{eV}}^{\text{CR}} = 3 \times 10^{44} \text{ ergs Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \quad (11)$$

この値は、GRB の prompt emission として観測されるガンマ線のエネルギーと同程度になっている。

4 問題点

問題点としては以下の事が挙げられる。

- そもそも internal shock モデルは prompt emission のモデルとして正しくないかもしれない。
- GRB において、宇宙線にどの程度のエネルギーが渡されるのかが不明。加速のメカニズムが不明。
- 非等方性はどうか。
- 加速された proton は 10^{19}eV 以下にも広がっているはず。非熱的な proton 全体を考えると、ガンマ線の数十倍のエネルギーが必要？ (Wick et al. 2004)

5 まとめ

GRB による UHECR 加速の可能性について調べた。internal shock が prompt emission の起源だとすれば、加速に必要なタイムスケール t_{acc} は $t_{\text{dyn}}, t_{\text{syn}}$ よりも小さくなり得るので、proton を $\sim 10^{20}\text{eV}$ まで加速できる可能性がある。これは afterglow を説明する external shock でも同様である。さらに $10^{19} \sim 10^{21}\text{eV}$ の宇宙線に対する energy generation rate は、GRB ガンマ線による energy generation rate と同程度になっているので、energetics の観点から考えても可能性はある。

参考文献

- [1] Amati,L et al. 2009, *Astron. Astrophys*, 508, 173
- [2] Bahcall,J.N, Waxman,E. 2003, *Phys. Lett. B*, 556, 1
- [3] Guidorzi,C. 2007, *Astron. Astrophys*, 474, 793
- [4] Hillas,A.M. 2006, arXiv:astro-ph/0607109v2
- [5] Mészáros,P. 2006, *Rep. Prog. Phys*, 69, 2259
- [6] Pierre AUGER Collaboration, 2010, *Phys. Lett. B*, 685, 239
- [7] Vietri,M. 1995, *ApJ*, 453, 883
- [8] Waxman,E. 1995, *Phys. Rev. Lett*, 78, 386
- [9] Waxman,E. 1995, *ApJ*, 452, L1
- [10] Waxman,E. 2004, *ApJ*, 606, 988
- [11] Wick,S,D et al. 2004, *Astropart. Phys*, 21. 125