

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400227

研究課題名(和文)天体放射の時間変動から探る高エネルギー宇宙線

研究課題名(英文) Study of Cosmic Rays Based on the Temporal Variability of Emissions from Astronomical Objects

研究代表者

浅野 勝晃 (Asano, Katsuaki)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：80399279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：多くの天体における高エネルギー粒子の加速過程及びそれらから放たれるX線やガンマ線の放射過程は謎に包まれている。我々は従来のシンプルな仮定に基づいたモデルを乗り越え、粒子の加速・注入・放射の時間進化を再現するシミュレーションコードを開発した。これまでの標準理論であった衝撃波による粒子加速ではなく、乱流による遅い粒子加速を考えることで、銀河中心からのジェットやガンマ線バーストなどの様々な天体の放射を再現することに成功し、高エネルギー天体の新たな描像を提案することができた。この過程は時間発展が本質的であり、我々の狙いが最大限に生かされた成果である。

研究成果の概要(英文)：The particle acceleration and succeeding X/gamma-ray emission mechanisms in high-energy astronomical objects have not been revealed yet. In order to establish a new picture beyond the previous simple models, we develop numerical simulation codes that can follow the temporal evolutions of particle acceleration, injection, and emissions. We propose a slow acceleration process due to turbulence rather than shock wave, which has been mostly considered as the acceleration site. Our models succeed in reproducing the emissions from jets launched from active galactic nuclei, and gamma-ray bursts, and so on. Our results propose a new picture for high-energy astrophysical objects. For the turbulence acceleration, the time-dependence is essential to reproduce the observations, so that our unique method is a powerful tool to investigate the particle acceleration and emissions.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：宇宙線加速 ガンマ線 ガンマ線バースト 活動銀河核 相対論的ジェット

1. 研究開始当初の背景

宇宙線の起源として、高エネルギー天体での衝撃波による粒子加速が標準モデルとして考えられてきた。多くのモデルでは、エネルギーに対して定常的なベキ乗の分布をした電子や陽子を考え、そこからの電磁波やニュートリノの放射が計算されてきた。

しかし、近年の多波長観測の発展によって、こうした単純なモデルでは観測をうまく説明できないことが判明してきた。活動銀河核 (AGN) ジェット起源の放射スペクトルは衝撃波理論よりも Hard な上に、ベキ乗ではなく曲率をもっている。これは従来のモデルを再考する契機となっている。時間発展の効果は必ず存在するもので、今まで簡単のためにあまり真剣に取り上げられてはこなかったが、我々の研究の発展によってその重要性が認識されてきていた。

2. 研究の目的

AGN やガンマ線バースト (GRB) などの高エネルギー天体における、粒子加速や放射過程に関する時間発展の効果を明らかにする。その放射スペクトルや光度曲線などが、モデルによってうまく再現できるかどうかを通して、妥当性をチェックし、宇宙線と放射の両面から高エネルギー天体現象の謎に迫る。特に明らかにしたいポイントは以下の 5 つである。

GRB 放射を担う電子の加速は衝撃波による瞬間的なものなのか？あるいは乱流による緩やかなものなのか？あるいは熱的放射が支配的なものなのか？

GRB の GeV 放射の光源は MeV ガンマ線と同じなのか？あるいはなめらかな変動を示す残光からなのか？

ブレイザー (AGN の一種) での電子加速は衝撃波によるものか？乱流によるものか？

GRB やブレイザーの GeV-TeV 放射は電子起源か？加速陽子起源か？

こうした天体の中に最高エネルギー宇宙線を加速できるものはあるか？

3. 研究の方法

我々が開発してきた時間発展放射計算コードを発展させ、電子や陽子の加速及び電磁波・ニュートリノ放射を計算する。加速機構の違いは放射スペクトルの時間発展に現れると期待できる。また、電子だけではなく陽子も加速されている場合、そこからのカスケードは、中間子、ミュオン、電子・陽電子対などの二次粒子の生成、そこからのさらなるガンマ線やニュートリノの放射、吸収などからなる。以上の物理過程は高度に非線形なものである。しかし、時間発展を追える私の計算コードはこれらの物理過程を余すことなく網羅し、最終スペクトルを計算できる。今後観測が期待されるガンマ線、

ニュートリノのスペクトルをこのコードで再現、あるいは予言し、宇宙線加速効率を定量的に評価し、放射モデルにも制限を加える。

4. 研究成果

(1) GRB 放射過程

GRB の古典的なモデルでは、衝撃波によって加速された電子からのシンクロトロン放射によって、ガンマ線放射を説明する。しかし、このモデルでは、低エネルギーの放射スペクトルが Soft になりすぎ、観測と合わないことが以前から指摘されていた。その代替モデルとして、光球モデルが提案されていた。このモデルでは、相対論的なジェットが外側に伝播するにつれ、光学的に薄くなり、そこからの熱的放射によって、ガンマ線放射を説明する。このモデルは低エネルギー側のスペクトルを Hard にできる一方、高エネルギー側の放射を説明するために、光球半径付近での何らかのエネルギー散逸を要求する。一つは磁気散逸や乱流による電子のゆっくりとした加熱。もう一つは陽子-陽子衝突によるエネルギー散逸である。我々は時間発展シミュレーションを用いて、上記の過程の再現を試みた。パラメータによっては観測に近いスペクトルの再現に成功したものの、そのパラメータには高度な微調整が必要とされた。この結果は脚光を浴びている光球モデルに再考を促すものとなった。

そこで我々は従来の衝撃波や光球モデルに代わる GRB 放射モデルを提案した。このモデルでは、乱流によって電子を加速すると考えた。この時、シンクロトロン冷却と加速との釣合から、狭いエネルギー分布を持つ電子群が生成され、その結果、低エネルギー側の放射スペクトルは、観測と驚くべき一致を見せた。一方、高エネルギー側のスペクトルに対しては、乱流の時間発展によって、徐々に放射スペクトルが進化することで、観測を説明できるモデルを提案した (図 1)。このモデルでは従来の GRB 放射モデルとは全く異なる新しい機構を提案している。

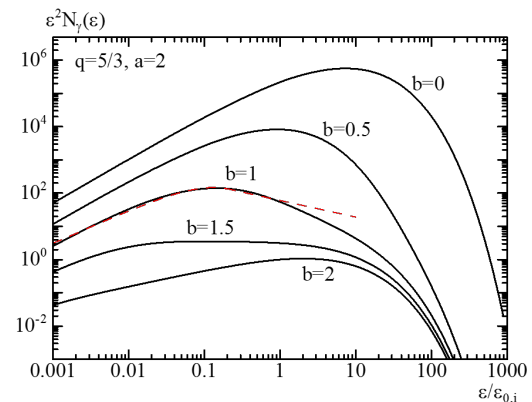


図 1 乱流加速モデルによる GRB スペクトル

(2) GRB での最高エネルギー宇宙線加速
GRB は 10^{20} eV にまで達する最高エネルギー

宇宙線の加速源の候補でもある。しかし、その発生率の低さから、観測されている宇宙線の Flux を再現するためには、GRB1 回当たりに放出する宇宙線の量がガンマ線のそれをはるかに超えていなくてはならない。先行研究では単純にそうした多量の宇宙線が加速されていると仮定して、そこで二次生成されるニュートリノ放射を計算し、IceCube によって得られている制限と比較していた。しかし、先行研究ではニュートリノ生成に伴うガンマ線生成については無視してきた。我々の計算コードは時間発展の効果も入れた上で、ニュートリノとガンマ線の放射を無矛盾に計算することができる。我々の計算は、ガンマ線観測に矛盾しない程度に宇宙線加速を抑えた場合、最高エネルギー宇宙線の限られたエネルギー領域だけが、GRB によって説明できることを示した(図2)。現在、この問題を乗り越えるため、GRB における宇宙線乱流加速モデルの構築を進めている。

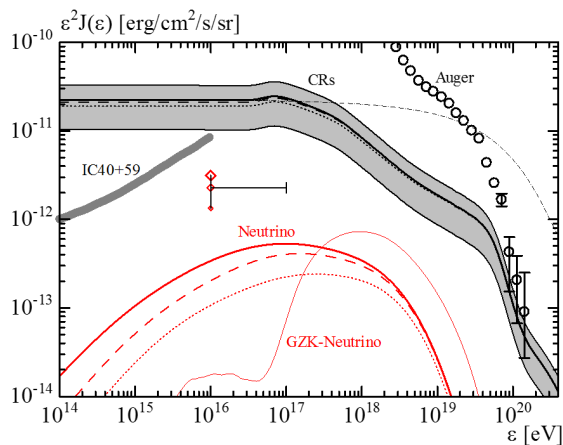


図2 GRB からの宇宙線モデルスペクトルと AUGER による観測データとの比較

(3) ブレーザーにおける乱流加速モデル

従来のブレーザー放射は、衝撃波によってベキ乗分布をした電子からの放射を考えていた。しかし、観測を説明するために、場当たりに電子スペクトルを折り曲げて、その形だけを説明してきた。我々は乱流によって電子が加速されていく様子をシミュレーションし、見事その曲率を持ったスペクトルを再現することに成功した。そこに含まれるパラメータはわずかで、無理な仮定をせずとも観測を説明することに成功した。

特に最近強烈なフレアを見せた 3C 279 というブレーザーの異常に Hard なスペクトル(図3)と、その短い時間変動を再現することに成功した。多くの研究者はこうした Hard なスペクトルは磁気再結合モデルの証拠だと考えてきたが、今回のフレアでは、要求される磁場が非常に低いことから、磁場エネルギーの解放とは考えにくい。我々の乱流加速モデルが最も有力なモデルだと考えている。

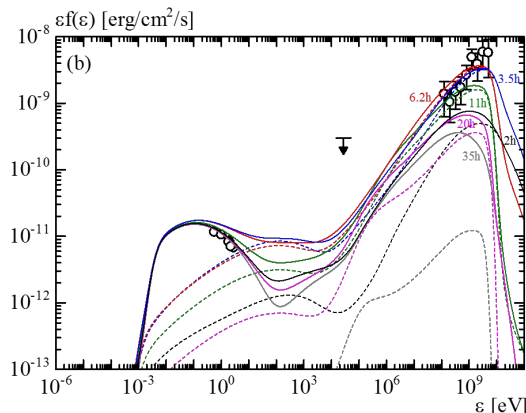


図3 乱流加速モデルによる 3C 279 のフレアのスペクトル

(4) フェルミバブル

GeV ガンマ線を主なターゲットとする Fermi 衛星の大きな発見の一つは、我々の銀河中心付近に数 kpc にも及ぶ巨大なガンマ線の構造「フェルミバブル」を発見したことである。これは過去の銀河中心の活動により、泡状に高エネルギー粒子が注入されていると考えられる。このガンマ線構造の表面輝度は一定に近く、衝撃波による電子加速では再現できない。従って、領域全体で電子がゆっくりと加速されていると考えられるが、従来のモデルは定常を仮定したものであった。しかし、この巨大な構造は明らかに定常状態には達しておらず、時間発展に基づいた議論が必要であった。我々は乱流による電子加速モデルをシミュレーションし、観測を再現することに成功した。そこで要求される加速の速さなどはプラズマ乱流のモデルに制限を与えるであろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

Katsuaki Asano and Peter Meszaros, "Photon and Neutrino Spectra of Time-Dependent Photospheric Models of Gamma-Ray Bursts", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有、09、2013、008
DOI:10.1088/1475-7516/2013/09/008

M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano et al., "The First Fermi LAT Gamma-Ray Burst Catalog", Astrophysical Journal Supplement, 査読有、209、2013、11
DOI:10.1088/0067-0049/209/1/11

Katsuaki Asano, Fumio Takahara, Masaaki Kusunose, Kenji Toma, and Jun Kakuwa, "Time-Dependent Models for Blazar Emission with the Second-Order Fermi Acceleration", Astrophysical Journal, 査読有、780、2014、64
DOI:10.1088/0004-637X/780/1/64

M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano et al., "Fermi-LAT Observations of the Gamma-Ray Burst GRB 130427A", *Science*, 査読有、343、2014、42-47
DOI: 10.1126/science.1242353

Katsuaki Asano and Peter Meszaros, "Neutrino and Cosmic-Ray Release from Gamma-Ray Bursts: Time-Dependent Simulations", *Astrophysical Journal*, 査読有、785、2014、54
DOI:10.1088/0004-637X/785/1/54

Jun Kakuwa, Kenji Toma, Katsuaki Asano, Masaaki Kusunose, and Fumio Takahara, "Synchrotron Self-Compton Emission by Relativistic Electrons under Stochastic Acceleration: Application to Mrk 421 and Mrk 501", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有、449、2014、551-558
DOI:10.1093/mnras/stv281

Katsuaki Asano and Masaaki Hayashida, "The Most Intensive Gamma-Ray Flare of Quasar 3C 279 with the Second-Order Fermi Acceleration", *Astrophysical Journal*, 査読有、808、2015、L18
DOI:10.1088/2041-8205/808/1/L18

Katsuaki Asano, and Toshio Terasawa, "Stochastic Acceleration Model of Gamma-Ray Burst with Decaying Turbulence", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有、454、2015、2242-2248
DOI:10.1093/mnras/stv2152

Kento Sasaki, Katsuaki Asano, and Toshio Terasawa, "Time-Dependent Stochastic Acceleration Model for the Fermi Bubbles", *Astrophysical Journal*, 査読有、814、2015、93
DOI:10.1088/0004-637X/814/2/93

[学会発表](計 20 件)

Katsuaki Asano, Peter Meszaros, and Shan Gao, 「High-energy neutrinos and gamma-rays from GRBs」(招待講演)、2013 Multi-Messenger Transient Astrophysics Workshop、2013年5月6日-10日、北京大学 KIAA (中国)

浅野勝晃、Peter Meszaros, 「ガンマ線バーストからの逃走中性子とニュートリノ」、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月 10 日-12 日、東北大学 (仙台)

浅野勝晃、Peter Meszaros, Shan Gao, 「時間発展シミュレーションに基づいた GRB からのニュートリノ背景放射」、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 20 日-23 日、高知大学 (高知)

Katsuaki Asano, 「Acceleration and Emission in GRBs」(招待講演)、Multi-Messenger Approaches to Cosmic Rays: Origins and Space Frontiers、2013 年 11 月 27 日-29 日、Institut d'Astrophysique de Paris (フランス)

浅野勝晃、 「ガンマ線バーストは UHECR 源たりうるか?」(招待講演) Cosmic Neutrino PeVatron (NuPeV 2014)、2014 年 2 月 17 日-19 日 ホテル一宮シーサイドオーツカ (千葉県一宮)

寺澤敏夫 / 浅野勝晃、 「宇宙における粒子加速素過程について」(招待講演) CRC タウンミーティング 2014、2014 年 7 月 12 日-13 日、名古屋大学 (名古屋)

Katsuaki Asano, Fumio Takahara, Masaaki Kusunose, Kenji Toma, Jun Kakuwa, 「Second-Order Fermi Acceleration and Emission in Blazar Jets」、The 40th COSPAR Scientific Assembly、2014 年 8 月 2 日-10 日、Lomonosov Moscow State University (ロシア)

Katsuaki Asano、 「UHECRs, Neutrinos, and GRBs」(招待講演) 超新星・ガンマ線バースト研究会 2014、2014 年 8 月 25 日-27 日、理化学研究所 (和光)

浅野勝晃、寺澤敏夫、 「乱流電子加速に基づくガンマ線バーストスペクトルの再現」、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 11 日-13 日、山形大学 (山形)

浅野勝晃、寺澤敏夫、 「乱流加速モデルに基づくガンマ線バースト放射」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日-21 日、佐賀大学 (佐賀)

浅野勝晃、林田将明、 「乱流二次加速による FSRQ 3C 279 のガンマ線フレアモデル」、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日-11 日、甲南大学 (神戸)

Katsuaki Asano、 「Radiation Processes in GRBs」(招待講演) Jets and Winds in Pulsar Wind Nebulae, Gamma-ray Bursts and Blazars: Physics of Extreme Energy Release、2015 年 11 月 16 日-20 日、International Space Science Institute (スイス)

浅野勝晃、 「Stochastic Particle

Acceleration via Turbulence in Various High-Energy Astrophysical Phenomena」(招待講演)、宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015」、2016年1月13日-14日、東京大学(柏)

浅野勝晃、Peter Meszaros、「ガンマ線バーストジェット内での最高エネルギー宇宙線の加速」、日本天文学会 2016年春季年会、2016年3月14日-17日、首都大学東京(八王子)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~asanok/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野勝晃 (ASANO, Katsuaki)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：80399279