

ガンマ線で観測する宇宙

加藤 翔 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

我々は電磁波や宇宙からの高エネルギー粒子（宇宙線）を通じ、宇宙で起こっているさまざまな現象を知ることができる。本講演では電磁波の中でも、高エネルギーであるガンマ線の観測についてレビューを行う。ガンマ線は高エネルギーの天体現象と関係し、主に相対論的なエネルギーを持つ荷電粒子による放射によって生じる。高エネルギーガンマ線の存在はこのような高エネルギーの荷電粒子が存在することを示している。したがってガンマ線の観測は、例えば超新星残骸における宇宙線加速のような高エネルギー現象を解明する手がかりとなる。

1 宇宙線

宇宙線は宇宙から到来する放射線である。最も高い宇宙線のエネルギーは GZK カットオフが有効となってくる 10^{20} eV あたりとなる。図 1 は宇宙線のエネルギースペクトルである。

宇宙線のエネルギースペクトルは広い範囲で冪関数の形となり、 10^{15} eV と 10^{18} eV のあたりに折れ曲がりが存在する。この折れ曲がりには宇宙線の発生源や加速機構の変化を反映していると考えられている。 10^{15} eV あたりまでのエネルギー領域では超新星残骸 (SNR) の衝撃波による加速モデルが有力であるが、それよりも大きなエネルギーでの加速機構は詳しくは判明していない。

宇宙線は周囲の物質や電磁場と相互作用してガンマ線を放射するため、ガンマ線と深く関係する。

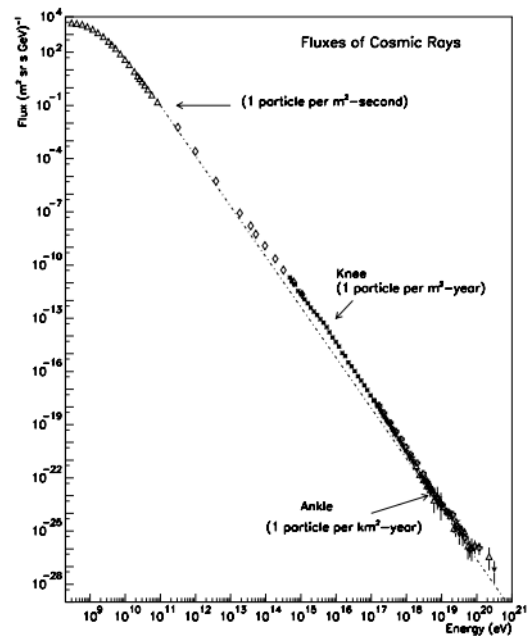


図 1: 宇宙線のエネルギースペクトル [1]

2 ガンマ線

ガンマ線は宇宙での高エネルギー現象に付随して起こる。そのため、ガンマ線の観測をすることで高エネルギー現象の調べることができる。

成され、電子起源では制動放射や、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱により生成される。

2.1 ガンマ線の発生

ガンマ線の発生は主にハドロン起源と電子起源にわけられる。ハドロン起源では崩壊によって生

2.1.1 制動放射

宇宙線電子が星間ガスなどの周りの物質の原子核に近づくと、原子核の電場により加速され、電磁波を放出する。これを制動放射とよぶ。

制動放射では、密度が高い領域や、入射電子の工

エネルギーが大きい場合に放射が大きくなる。

2.1.2 シンクロトロン放射

磁場によるローレンツ力を受け円運動する電子は、中心方向に加速度を持つため制動放射のように電磁波を放射する。この放射は電子の速度が光速に近い場合に顕著になり、シンクロトロン放射とよばれている。電子の速度が相対論的な場合はビーミング効果により、放射は円運動の接線方向に対し、短い時間に強く起こる。

2.1.3 逆コンプトン散乱

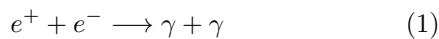
高エネルギーの電子が低エネルギーの光子と弾性衝突を起こし、光子のエネルギーを増加させる現象を逆コンプトン散乱とよぶ。逆コンプトン散乱はコンプトン散乱の逆過程となっている。

入射光子のエネルギーが十分小さく、 $\gamma h\nu \ll m_e c^2$ が成り立つ場合、エネルギー $h\nu$ の光子がローレンツ因子 γ の電子により散乱されたとすると、光子のエネルギーは平均で $h\nu' = \frac{4}{3}\gamma^2 h\nu$ にまで増加する。例えば 10GeV の宇宙線電子 ($\gamma = 2 \times 10^4$) は、1eV の星間光子を $\sim 500\text{MeV}$ のガンマ線にする。

エネルギーの高い電子ほど逆コンプトン散乱によるエネルギー損失が大きくなり、寿命が短くなる。

2.1.4 対消滅

物質と反物質が衝突すると対消滅を起こし、光子を生成する。この際質量全てが光子のエネルギーとなる。例えば電子-陽電子の対消滅では



という反応によりガンマ線を生成する。

2.1.5 π^0 中間子の崩壊

宇宙線陽子が星間物質と衝突すると、さまざま反応が起こり、粒子が生成される。そのうち π^0 中間子が生成されると、平均寿命 $8.4 \times 10^{-17}\text{s}$ で崩壊し、互いに逆向きのガンマ線光子を 2 つ生成する。

2.2 ガンマ線と物質の相互作用

ガンマ線と物質との相互作用は主に光電吸収、コンプトン散乱、電子-陽電子対の生成がある。ガンマ線の観測ではこれらの相互作用を用いてガンマ線を観測することになる。

また、 10^{16}eV 以上の高エネルギーガンマ線は宇宙空間を約 1Mpc 進むと宇宙背景放射と相互作用を起こして電子-陽電子対を生成する。生まれた電子-陽電子対は逆コンプトン散乱により宇宙背景放射を高エネルギーガンマ線に変える。このような反応が次々と起こることにより、電子、陽電子、ガンマ線の数が増えていき、高エネルギーガンマ線のエネルギーが下がっていく。

3 高エネルギー天体现象

3.1 活動銀河核

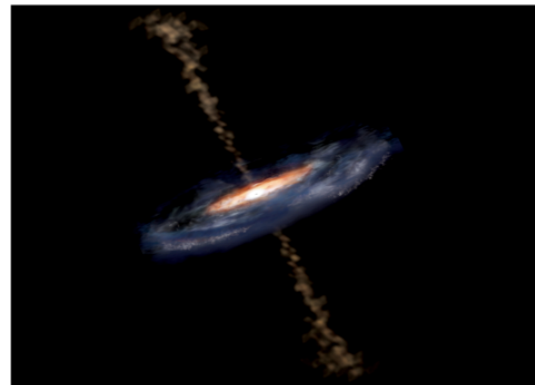


図 2: 活動銀河核の模式図。©Aurore Simonnet, Sonoma State University

活動銀河核 (AGN: Active galactic nuclei) は中心に巨大なブラックホールを持ち、降着物質の重力エネルギーが解放されることによって光っている。図 2 は AGN の模式図である。AGN には相対論的ジェットを放出しているものがあり、そのなかでも相対論的ジェットが地球の方向を向いているものをブレイザーとよぶ。高エネルギーガンマ線源の多くは、ブレイザー天体である。

AGN でのガンマ線放射は、超巨大ブラックホール近傍のジェットの物理状態を反映していると考えられる。AGN からのガンマ線を詳細に調べることで、まだよくわかっていない相対論的ジェットの構造等が解明できるかもしれない。

3.2 超新星残骸

超新星残骸 (SNR:Supernova remnant) は超新星爆発した後に残されるガス雲であり、衝撃波を成す。この衝撃波による加速が銀河系内の宇宙線加速源として有力であると考えられている。SN1006 の衝撃波面からは X 線シンクロトロン放射が検出され [2]、確かに電子が加速されていることが明らかとなった。また、RXJ1713.7-3946 など複数の SNR からは TeV ガンマ線が検出され [3]、粒子が TeV 以上のエネルギーまで加速されることがわかっているが、その起源が電子であるのか、または陽子であるのかは詳しくはわかっていない。図 3 は TeV ガンマ線でみた SNR である。電子起源であれば、電子が宇宙背景放射光子との逆コンプトン散乱によりガンマ線を放出すると考えられ、ガンマ線の分布は電子の分布と同じになる。また、同じ電子がシンクロトロン放射を起こすため、X 線の分布とガンマ線の分布も同じになる。一方陽子の場合、周囲の分子雲と作用し生成された⁰が崩壊することによりガンマ線を放出するため、ガンマ線の分布は分子雲の分布と一致する。しかし、現在のところ空間分解能の不足により、分布の違いをはっきりと区別できてはいない。

超新星残骸で加速可能な粒子の最高エネルギーや、粒子の種類、加速された粒子がどのようにして超新星残骸を抜け出すのかはまだ分かっていない。

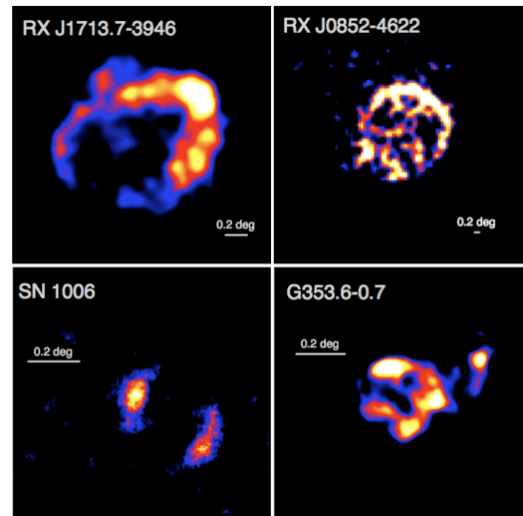


図 3: TeV ガンマ線で見る超新星残骸 [4]

3.3 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (GRB:Gamma-ray burst) はわずかに数十秒の間に 10^{42} erg ものエネルギーを放出する現象であり、最高エネルギー 10^{20} eV となる宇宙線の発生源として有力である。GRB では、数百秒以内に MeV 領域を中心として起こる即時放射と、電波から X 線にかけて広い領域でおこり、数日以上にわたって残る残光放射にわかれる。残光放射の赤方変位を調べることで距離を調べることができ、銀河系外での現象であることがわかっている。残光放射についてはある程度わかっているが、即時放射についてはよくわかっていない。即時放射では GRB ジェット中の内部衝撃波によるものとするのが有力ではあるが、放射効率などうまく説明できない。

GRB の継続時間はいろいろな値をとるが、図 4 のように 2 秒を境として 2 つのグループに分けることができ、短い GRB と長い GRB が存在する。長い GRB に関しては大質量星の超新星爆発に関連すると考えられているが、短い GRB に関してはよくわかっていない。

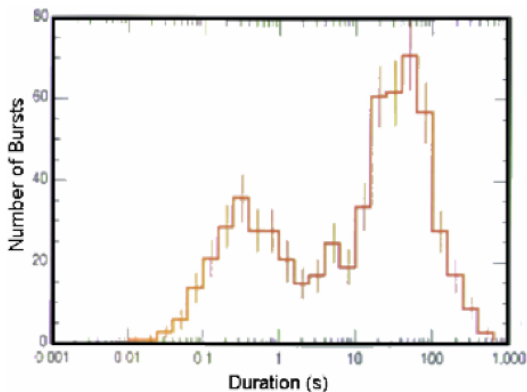


図 4: BATSE によって検出された GRB の継続時間の分布

多くの比較的明るい GRB では、MeV 放射からや遅れた GeV ガンマ線放射が観測され、ほとんどの場合 MeV 放射が終わった後も数千秒に及ぶ GeV 放射が見られる。この数千秒に及ぶ GeV 放射は残光成分と考えられており、長い GRB でも短い GRB でも起こるが、この放射がどのように説明できるかはまだよくわかっていない。

3.4 宇宙背景光

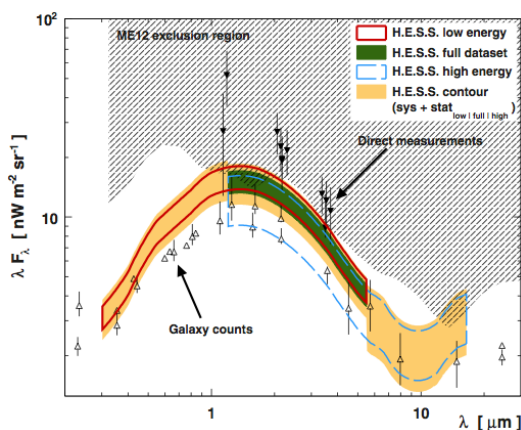


図 5: EBL の強度分布。オレンジ色の領域が推定された EBL の強度 [5]

宇宙背景光 (EBL: Extragalactic Background Light) は全ての銀河系外天体からの光の総量であり、その波長は紫外線から赤外線の波長までさまざ

までである。図 5 は推定された EBL の強度を示している。EBL は宇宙における銀河や星の形成史に関する情報を含んでいると考えられ、詳細に測定することであれば宇宙がどのように進化してきたを理解できるかもしれない。ガンマ線は宇宙空間で EBL と相互作用し、電子-陽電子対を生成する。したがって AGN や GRB からのガンマ線を観測することで EBL を測定することができる。

4 まとめ

高エネルギー天体現象に伴って生成される高エネルギーの電子や陽子は、相互作用などによりガンマ線を生じる。我々はそういったガンマ線を観測することで、宇宙で起きている高エネルギー現象を知ることができる。しかし、今まで見てきたように、まだまだ解明できていないことも多い。

現在進行中の Cherenkov Telescope Array (CTA) が稼働すれば、このような高エネルギー現象によるガンマ線を今までよりも詳細に観測することにより、高エネルギー現象を解明する手がかりを得られるだろう。例えば、TeV 領域での超新星残骸はあまり多くないが、CTA では新たに 100 個程度の超新星残骸の観測が期待されている [3]。

Reference

- [1] J. Cronin, T. K. Gaisser, and S. P. Swordy. 1997. Sci. Am., v276, p44
- [2] K. Koyama et al. 1995. Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN1006
- [3] F. Aharonian et al. 2004. Observations of 54 Active Galactic Nuclei with the HEGRA system of Cherenkov telescopes
- [4] Frank M. Rieger, Emma de Ona-Wilhelmi, Felix A. Aharonian. 2013. TeV Astronomy
- [5] A. Abramowski et al. 2013, Measurement of the extragalactic background light imprint on the spectra of the brightest blazars observed with H.E.S.S.*