

ガンマ線バーストジェット内部における輻射輸送計算

柴田 三四郎 (甲南大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は宇宙で最も激しい現象の一つであり、放射されるエネルギーは 10^{51} erg にものぼる。そのため赤方偏移 ~ 8 といった宇宙論的遠方のものでも観測可能である。様々な観測的、理論的研究から GRB は大質量星の重力崩壊に付随して生まれる超相対論的なジェットに起因すると考えられている。しかしその放射メカニズム自体は未だ分かっていない。最近ではその放射メカニズムとして相対論的なジェットからの熱的放射が注目されており、精力的に議論されているが、相対論的ジェットからの熱的放射をきちんと調べるには親星や星周物質中におけるジェットの伝播とジェット中での光子の輸送の両方を考慮に入れ計算する必要がある。そこで我々は相対論的ジェット中での輻射輸送計算を行った。その結果ジェット中での輻射輸送を考慮に入れた場合には、光子が光学的厚さが 1 となる面 (光球面) から放射されると仮定するような場合とは異なるスペクトルが得られるということが分かった。この事はジェット中での輻射輸送計算の重要性を示している。

1 序論

ガンマ線バーストの放射メカニズムはその発見から 40 年以上経った今でも明らかにされていない。最近ではその候補として相対論的ジェットからの熱的放射が注目されている。その理由としては観測されている高い放射効率を説明できる事、実際にいくつかのバーストではプランク分布に近い幅の狭いスペクトルが観測されている事 (1) があげられる。

相対論的ジェットからの熱的放射はいくつかのグループにより調べられているが、彼等は放射は観測者から見た光学的厚さが 1 となる光球面から黒体放射として放射されると仮定して計算を行っている (2)(3)(4)。しかし実際に観測されるガンマ線が生成されるのはもっと内側の高温領域のはずであり (5)、その様な計算が正しい結果を与えるかどうかは疑問である。よって適切に相対論的ジェットからの熱的放射を調べるには、ジェットと星、星周物質との相互作用のみならず、ジェット中での輻射輸送を考慮に入れる必要がある。

この集録では我々が行った相対論的ジェット中での輻射輸送計算の結果について述べる。流体の構造は 2 次元の特殊相対論的流体コードにより計算し、光子を入射する位置によって得られるスペクトルに違いが出るという事を示す。2 節では流体計算のセッ

トアップと輻射輸送計算の方法について述べ、3 節では輻射輸送計算の結果について述べる。

2 計算方法

まず 2 次元の特殊相対論的流体計算コード (6) により、親星を突き破り星間物質中を伝播する相対論的ジェットの構造を求める。計算領域は $r_{in} = 10^9$ cm を内側境界とし、半径方向に 600 グリッド、天頂角方向に 150 グリッドとする。相対論的ジェットは r_{in} において境界条件を課すことにより注入する。ジェットの境界条件としては、ジェットのエネルギー注入率 $L_{jet} = 5.3 \times 10^{50}$ erg s⁻¹、初期ローレンツ因子 $\Gamma_0 = 5$ 、ジェットの半開き角 $\theta_0 = 10^\circ$ 、全エネルギー密度に対する熱エネルギーの割合 $f_{th} = 0.9925$ (これは比内部エネルギー密度に対する条件 $\varepsilon_0/c^2 = 80$ に相当する)。また 14 太陽質量の Wolf-Rayet 星を親星として用いる。

次に、上記の計算で求めたジェットの構造を背景流体としてジェット中での輻射輸送を計算する。ここで今回は $t = 40$ s におけるスナップショットを背景流体として用いる。光子はある光学的厚さ一定の面 $\tau = \tau_{inj}$ において入射される。光学的厚さはトム

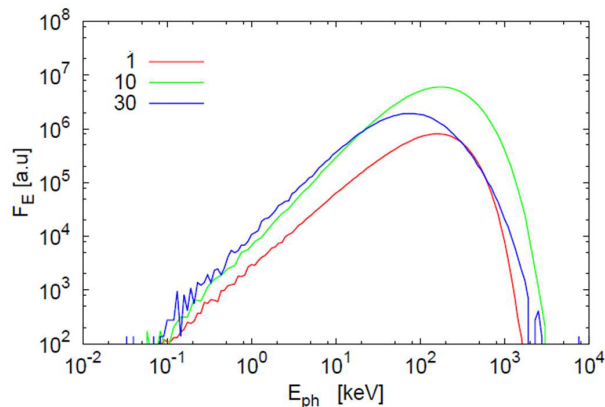


図 1: 観測されるエネルギースペクトル (エネルギーフラックス)。赤、緑、青の線が $\tau_{inj} = 1, 10, 30$ のモデルに対応している。

ソン散乱の断面積を用いて評価する (7)。

$$\tau = \int_z^\infty \sigma_T \Gamma (1 - \beta \cos \theta) n_e dz \quad (1)$$

ここで $\Gamma, \beta, n_e, \theta$ はそれぞれ流体のローレンツ因子、速度、電子の個数密度、流体の速度方向と光子の伝播方向とのなす角を表す。 σ_T はトムソン散乱の断面積である。今回の計算では $\tau_{inj} = 1, 10, 30$ の 3 通りとする。入射時における光子のエネルギーはその場所でのプランク分布に従うとし、入射方向は流体の共動座標系において等方的とする。輻射輸送計算にはモンテ・カルロ法を用いる。散乱過程としてはコンプトン散乱のみを考え、計算にはクライン・仁科の微分断面積を用いる。入射された光子はジェット中の電子により何度かの散乱を受けた後ジェットから抜け出す。抜け出した光子のエネルギーからジェット軸方向の観測者によって観測されるエネルギースペクトルを計算する。

3 計算結果

図 1 に観測されるスペクトルを示す。 $\tau_{inj} = 1$ の場合に比べて $\tau_{inj} = 10, 30$ の場合には観測されるフラックスが高くなっている事が分かる。また、スペクトルのピークエネルギーは $\tau_{inj} = 1, 10$ のモデルではあまり変わらないが、 $\tau_{inj} = 30$ の場合のみ比較的低い値となっている。

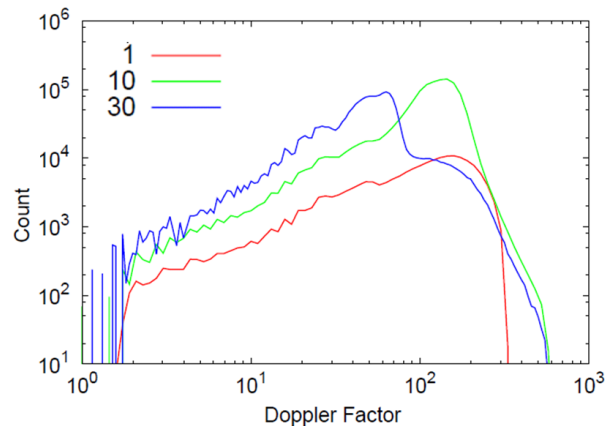


図 2: 最終散乱時のドップラー因子の分布。横軸は観測される各光子が最後に散乱を受けた時のドップラー因子を表し、縦軸はそのドップラー因子で散乱された光子の数を表す。

図 2 は横軸に相対論的なドップラー因子 $D = [\Gamma(1 - \beta \cos \theta)]^{-1}$ 、縦軸にそのドップラー因子で最終的な散乱を受けた光子の個数をとった図である。 $\tau_{inj} = 1, 10$ のモデルでは約 100 の所にピークが出来ているが、 $\tau_{inj} = 30$ のモデルではそれよりも低い約 60 の所にピークが出来ており、その影響で $\tau_{inj} = 30$ の場合の最終的なスペクトルは低いエネルギーにピークを持っている。

4 結論

相対論的ジェット中でのガンマ線光子の輻射輸送計算を行った。ジェットの構造は流体シミュレーションの結果を用い、輻射輸送計算にはモンテカルロ法を用いた輻射輸送計算コードを使用した。その結果ジェット中での輻射輸送を考慮に入れた場合には、光子が光学的厚さが 1 となる面 (光球面) から放射されると仮定するような場合とは異なるスペクトルが得られるということが分かった。この事はジェット中での輻射輸送計算の重要性を示している。特にガンマ線光子を発生させる位置をどう設定するかが最終散乱時のドップラー因子に影響を与え、その結果観測されるスペクトルにも大きく影響するという事が分かった。よって輻射輸送計算において光子を発生させる位置について適切な方法を考える必要がある。

Reference

- [1] F. Ryde, M. Axelsson, B. B. Zhang, et al. *Identification and Properties of the Photospheric Emission in GRB090902B*, *ApJL* **709** (2010) L172
- [2] D. Lazzati, B. J., Morsony, M. C. Begelman, *Very High Efficiency Photospheric Emission in Long-duration γ -ray Bursts*, *ApJL* **700** (2009) L47
- [3] A. Mizuta, S. Nagataki, J. Aoi, *Thermal Radiation from Gamma-Ray Burst Jets*, *ApJ* **732** (2011) 26
- [4] H. Nagakura, H. Ito, K. Kiuchi, S. Yamada, *Jet Propagation, Breakouts, and Photospheric Emission in Collapsing Massive Progenitors of Long-duration Gamma-Ray Bursts*, *ApJ* **731** (2011) 80
- [5] A. M. Beloborodov, *Regulation of the Spectral Peak in Gamma-Ray Bursts* (2012) [[arXiv:1207.2707](https://arxiv.org/abs/1207.2707)]
- [6] N. Tominaga, *Aspherical Properties of Hydrodynamics and Nucleosynthesis in Jet-induced Supernovae*, *ApJ* **690** (2009) 526
- [7] M. A. Abramowicz, I. D. Novikov, B. Paczynski, *The Appearance of Highly Relativistic, Spherically Symmetric Stellar Winds*, *ApJ* **369** (1991) 175
- [8] A. Pe'er, *Temporal Evolution of Thermal Emission from Relativistically Expanding Plasma*, *ApJ* **682** (2008) 463
- [9] A. M. Beloborodov, *Radiative Transfer in Ultrarelativistic Outflows*, *ApJ* **737** (2011) 68