

ガンマ線バーストジェットからの熱的放射のモンテカルロシミュレーション

柴田 三四郎

甲南大学大学院博士課程 1 年

概要

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。本講演ではその結果について発表する。

1 導入

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 $r_{\text{in}} = 10^9$ cm を内側境界とし、半径方向に 600 グリッド、天頂角方向

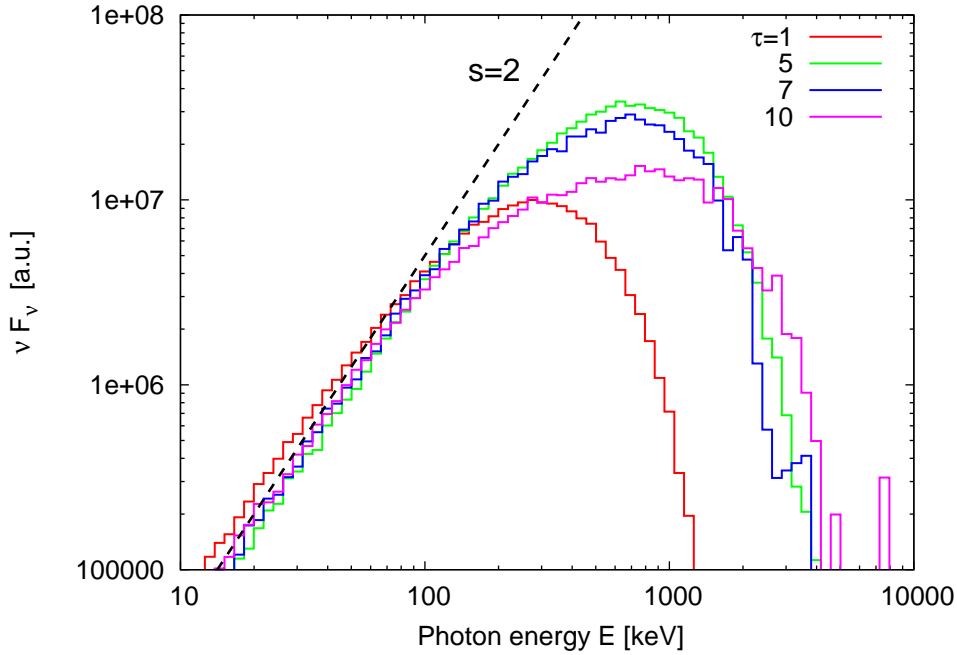


図1 観測されるエネルギースペクトル (SED)。赤、緑、青、マゼンタがそれぞれ $\tau_{inj} = 1, 5, 7, 10$ の場合の結果を示す。

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 $L_{jet} = 5.3 \times 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$ 、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 [7]。

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 $t = 40 \text{ s}$ 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。光学的厚さはトムソン散乱の断面積を用いて評価する [8]。

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

今回の計算では $\tau_{inj} = 1, 5, 7, 10$ の 4 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 結果と考察

図1に得られたエネルギースペクトルを示す。

スペクトルのピークエネルギーは τ_{inj} が大きい、つまりより内側から光子が入射された場合に高くなる。

低エネルギー側のべき指数は $\nu F_\nu \propto E^s$ とすると、 $s = 2$ となっており、これは観測されている典型的な値 $s = 1$ よりもハードになっているが、プランク分布の場合 ($s = 3$) よりはソフトとなっている。

光学的厚さが大きい様な状況では、光子はコンプトン散乱を通じてジェット中の電子とカップルされるため断熱冷却が働く。しかし光学的厚さが $\tau < 10$ ぐらいまで小さくなるとはや断熱冷却は効率的に効かなくなる [9] [10]。それ故光子が $\tau \gg 10$ において入射される場合には入射された場所でのプラズマの温度は観測されるスペクトルには影響しない。しかし一方で光子が $\tau < 10$ という様な比較的小さな光学的厚さにおいて入射される場合には、入射光子のエネルギーは実際よりも小さく与えられてしまい入射される場所におけるプラズマの温度が観測されるスペクトルに影響してしまう。これは入射光子のエネルギーをそこでのプラズマの温度をもったプランク分布として与えるためである。

本集録では相対論的ジェットの構造として時刻 $t = 40$ s におけるスナップショットを用いた。しかしジェットは光速に非常に近い速度で光子とともに運動するため、光子の伝播中におけるジェットの運動が結果に影響する事が予想される。その様な時間に依存した背景流体中での輻射輸送計算は今後の課題である。

参考文献

- [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]
- [6] N. Tominaga, *Aspherical Properties of Hydrodynamics and Nucleosynthesis in Jet-induced Supernovae*, *ApJ* **690** (2009) 526
- [7] H. Umeda & K. Nomoto, *Variations in the Abundance Pattern of Extremely Metal-Poor Stars and Nucleosynthesis in Population III Supernovae*, *ApJ* **619** (2005) 427
- [8] M. A. Abramowicz, I. D. Novikov, B. Paczynski, *The Appearance of Highly Relativistic, Spherically Symmetric Stellar Winds*, *ApJ* **369** (1991) 175
- [9] A. Pe'er, *Temporal Evolution of Thermal Emission from Relativistically Expanding Plasma*, *ApJ* **682** (2008) 463
- [10] A. M. Beloborodov, *Radiative Transfer in Ultrarelativistic Outflows*, *ApJ* **737** (2011) 68