

Neutrino Shadow and Explosion Mechanism of GRB

高橋 芳太*†

東京大学総合文化研究科

1 はじめに

ガンマ線バースト (GRB) の爆発エネルギー源の有力な候補にニュートリノ対消滅エネルギーがある。過去の研究により、off-axis部分の寄与が重要であることが指摘されている。ニュートリノ対消滅のエネルギーはニュートリノの温度の9乗に比例し、発生するニュートリノのほとんどはブラックホール (BH) の超近傍で発生するので一般相対論的效果が本質的に重要となる。過去の研究で、降着円盤に注目しているものは測地線を正確に解いておらず、また、測地線を解いているものは降着円盤を解いていない。今回、この2つの効果をフルに入れた計算を世界で初めて行った。

2 Hyperaccreting Black Holes

ガンマ線バーストの中心天体が超新星の重力崩壊から生成されるブラックホールと降着円盤のシステムであるとする、質量降着率 $0.01 \sim 10$ 太陽質量毎秒程度の降着円盤が生成されることが理論的に示唆されている。中心にあるブラックホールの質量を3太陽質量程度である場合には、この質量降着率は10の14乗エディントン質量降着率程度になる。ここまで質量降着率が大いいと降着円盤の中心部分では、降着流の密度が10の10乗 [g/cc] 以上、温度が10の10乗 [K] 以上になり得る。このような高温高密度になると、ニュートリノ冷却の効果が無視できなくなる。このことから、このような降着円盤は Neutrino Dominated Accretion Flow (NDAF) と呼ばれることがある。回転するブラックホール周りの NDAF の遷音速解は Popham, Woosley & Fryer (1999) によってはじめて計算された。このモデルでは、エネルギー方程式において粘性加熱、ニュートリノ冷却、移流冷却、光分解による冷却による効果を考慮し、状態方程式ではガス圧、輻射圧、電子縮退圧を考慮している。本研究において我々は、Popham, Woosley & Fryer (1999) のモデルにおいて Blinnikov et al. (1996) の状態方程式を使い、降着流の遷音速解をカー時空上で計算したものをを用いている。

3 Neutrino Shadow

NDAF から発生したニュートリノと反ニュートリノはブラックホール周りのある点においてある割合で対消滅をし電子陽電子対を生成する。この電子陽電子対が対消滅をし、光子を生成する。これらのエネルギーが GRB の爆発エネルギーの有力な候補の一つであると考えられている。NDAF 中心部分では光子に対しては光学的に厚いので、光子はニュートリノのように外に抜けていくことができない。図1は、ブラックホールの中心から $10[M]$ にある

* rohta@providence.c.u-tokyo.ac.jp

† 本研究は長滝重博氏(京大基研)との共同研究

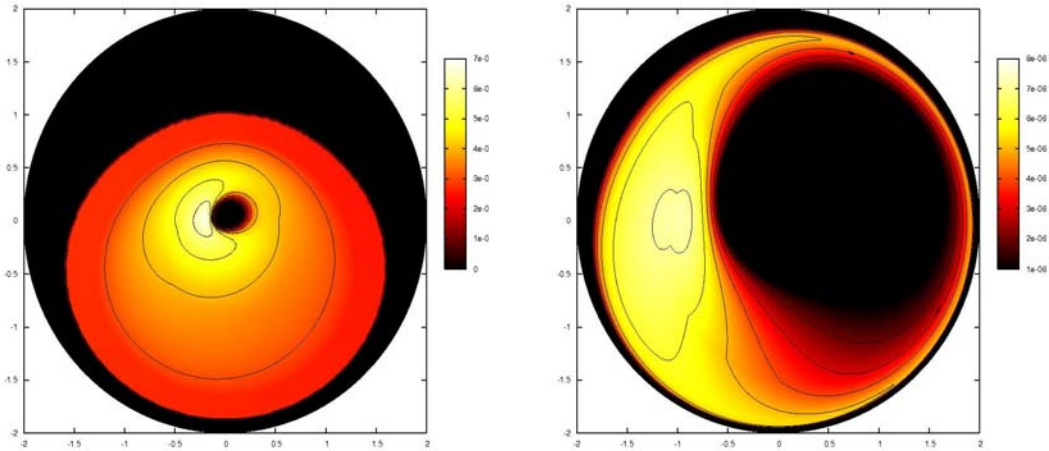


図1：最大回転するブラックホール周りのニュートリノ全天マップ。回転軸からの角度45度、中心からの距離は25M(左)と5M(右)。

点に来るニュートリノの全天マップの計算例である。流体静止系の観測者に対する全天マップを計算している。この全天マップはランベルト正積方位図法で図示されており、図の中心がブラックホールの質量中心、円の外縁がブラックホールと逆方向を表す。この計算では、NDAFで発生するニュートリノは赤道面のみから発生するという近似を用いている。

4 ニュートリノ対消滅により発生するエネルギーの空間分布

図1のような計算により、ブラックホール周りの各点に来るニュートリノと反ニュートリノのフラックスを計算し、それを用いてニュートリノの対消滅により生成するエネルギーを計算する。図2に結果を示す。左図が最大回転するブラックホールの場合、右図が回転なしの場合である。ブラックホールの回転により、局所的に対消滅エネルギーが増加す

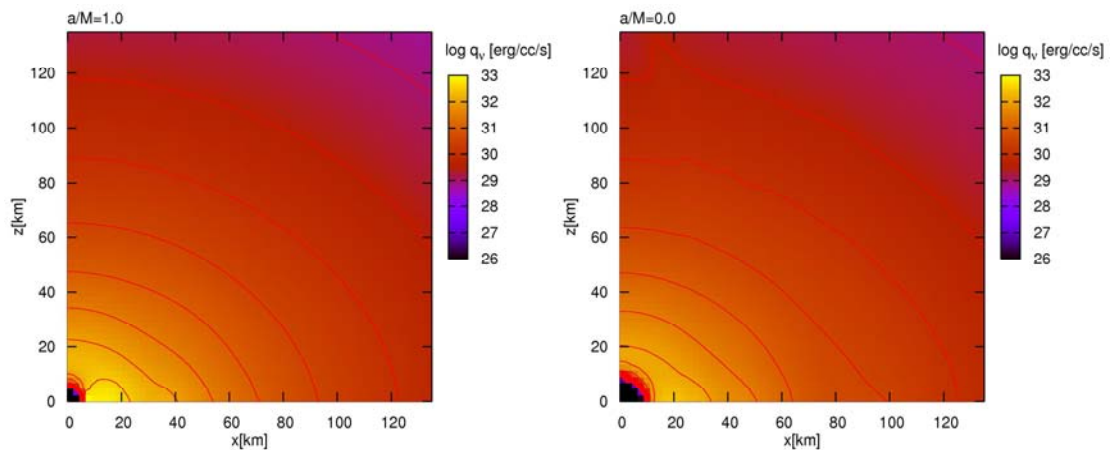


図2：ニュートリノ対消滅により発生するエネルギーの空間分布図。ブラックホール質量は3太陽質量、スピンは $a/M=1$ (左)と $a/M=0$ (右)。

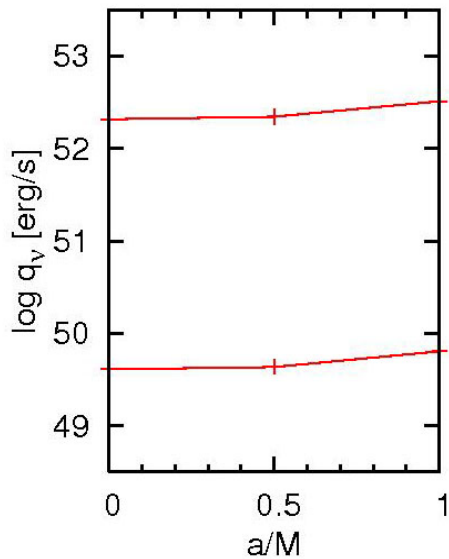


図 3: 全ニュートリノ対消滅エネルギーとブラックホールスピン及び降着流の最大温度との関係。最大温度は 2×10^{11} 乗(上)、 10^{11} 乗(下)。上線は遷音速解に基づいて計算しているが、下線は人為的にファクター 2 だけ温度を下げて計算したもの。

る。ニュートリノ対消滅により生成されるエネルギーは赤道面上で中心から 30-40 km (=3-4[M]) 以内で最も卓越する。これより、BH 超近傍で降着流および生成されるニュートリノ量を正確に解くことが重要であることがわかる。

5 全ニュートリノ対消滅エネルギー

図 2 の計算に基づき、全空間でのニュートリノ対消滅により生成されるエネルギー総量を計算する。結果を図 3 に示す。ブラックホールの回転は、数ファクターだけ対消滅エネルギー総量を増加させる。ニュートリノ対消滅のエネルギーは、ニュートリノの温度の 9 乗に比例するので、対消滅エネルギー総量はニュートリノ温度に非常に敏感に依存する。ファクター 2 だけニュートリノ温度を下げると、対消滅エネルギー総量は 2-3 桁小さくなるのが図 3 からわかる。

6 まとめ

本研究により、我々が得た結論は以下の通りである。(i) BH 外側のある点に来るニュートリノのほとんどは BH 周囲の不安定最内縁軌道の外側の青方偏移した部分から来る。これは、測地線を正確に解くことが本質的に重要であることを示す。(ii) 対消滅のエネルギーは赤道面上で中心から 30-40 km (=3-4[M]) 以内で最も卓越するので、BH 超近傍で降着流を正確に解くことが重要である。(iii) 温度がほんの数ファクター変わるだけで対消滅エネルギーは 2-3 桁以上変化する。よって、非常に慎重に対消滅エネルギーを計算しないと、GRB の爆発エネルギーとして、ニュートリノ対消滅エネルギーが本質的かどうかの結論が得られない。(iv) BH の回転によってホライズンの大きさが小さくなることにより、対消滅エネルギーは局所的に 1 桁以上増加するが、全体のエネルギーは 1 桁以内の増加で収まる。(v) ニュートリノ対消滅エネルギーを計算する際に、過去の研究が用いているニュートリノを赤道面上の円盤からしか発生しないとする近似を用いた場合と 3 次元の輻射輸送方程式を解いてより現実的な状況で解いた場合とでは全ニュートリノ対消滅エネルギーの計算結果が異なる。