

超大質量星は Gamma-Ray Burst を起こすのか？

松本達矢 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

赤方偏移 $z \gtrsim 6$ で観測されている超巨大ブラックホール (BH) は、短時間で多くの質量を獲得する必要があるため、形成過程には多くの問題がある。近年、盛んに議論されている形成過程の 1 つに $10^5 M_{\odot}$ の質量をもつ超大質量星が初期宇宙に形成され、重力崩壊によって大質量 BH を形成し、これが種 BH となって成長していくというシナリオがある。超大質量星の具体的な形成過程が確立しつつあるが、実際に超大質量星が存在しているという観測は現在までに報告されていない。本研究では、超大質量星の存在を観測的に検証する方法として、重力崩壊時に Gamma-Ray Burst (GRB) が起こす可能性を議論した。超大質量星は、非常に大きな天体のため、相対論的ジェットが表面に到達できるかは非自明である。我々は、超大質量星内のジェットの運動を数値的に計算し、ジェットは表面を突き破って GRB を起こしうることを確かめた。期待される GRB の flux は、 10^{-11} - $10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ であり、これは現行の Swift 衛星で観測可能な値である。また、prompt emission は 10^4 s 以上になることが期待される。

1 Introduction

我々の銀河系を含め、ほとんどの銀河の中心には質量が 10^6 - $10^9 M_{\odot}$ の超巨大ブラックホール (BH) が存在する。近年では、赤方偏移 $z \gtrsim 6$ の初期宇宙でも、このような超巨大 BH が観測されている。初期宇宙では、恒星質量の BH がガス降着で質量を獲得したとすると、時間が足りないことが指摘されており、宇宙物理学の大問題の 1 つと認識されている。最近、多くの研究者に注目されている形成過程に、direct collapse scenario というものがある。このシナリオでは、初期宇宙におよそ $10 M_{\odot}$ の超大質量星が形成される。この天体の重力崩壊によって形成された大質量 BH が種 BH でガス降着により成長するというものである。

超大質量星の形成過程は、精力的な研究により確立されつつある。しかし、超大質量星自体が現在までに観測された例はない。本研究では、超大質量星の直接観測を目的として、超大質量星の重力崩壊時に起こしうる Gamma-Ray Burst に着目する。

GRB とは、大質量星が一生を終え、重力崩壊するときに起こす爆発現象である。標準的なシナリオでは、次のようになっている。まず重力崩壊時に中心部分で BH と降着円盤 (中心エンジン) が形成され、そこから相対論的ジェットが駆動される。ジェットが

親星内部を伝播し、表面に到達すると、突き破ってガンマ線を放射する。GRB の光度は非常に大きく、遠方でも観測できる宇宙論的な爆発現象である。よって、初期宇宙の探査にも利用できるうるということが議論されている。

従って、超大質量星が GRB を起こすと、観測できる可能性がある。しかし、超大質量星は非常に大きな天体のため、ジェットが表面に到達できるかは非自明な問題である。本研究の目的は、超大質量星が GRB を起こしうるかを調べ、その観測可能性を議論することである。なお、本公演での内容は文献 [Matsumoto (2015)] をもとにしている。

2 Methods

ジェット伝播を計算するあらしを述べる。ジェットについては中心 BH へ落下するエネルギーのうち、一定の割合がジェットに転換されるとして、parameter η_j を用いて

$$L_j = \eta_j \dot{M} c^2 \quad (1)$$

と与える。ここに \dot{M} は、親星の密度分布を既知として、各質量殻が自由落下時間で落下するとして定義される。

中心エンジンで駆動されたジェットは、親星内部を表面に向かって伝播する。しかし、途中で親星内部の物質と衝突することによって衝撃波を形成する。この衝撃波面での flux の保存則から、ジェットの速度は

$$\beta_h \simeq \frac{1}{1 + \tilde{L}^{-\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

$$\tilde{L} \simeq \frac{L_j}{\rho_a(r_h)c^3\Sigma_h} \quad (3)$$

と与えられる。ここに、 $\rho_a(r_h)$ 、 $3\Sigma_h \simeq \pi(\theta r_h)^2$ はそれぞれ、ジェットの先端 r_h での親星の質量密度、ジェットの断面積である。ジェットは三角錐状であるとし、ジェットの開口角は θ である。さらに、ジェットの先端部の衝撃波で圧縮された物質は、側方に漏れだしてコクーンという構造をつくる。コクーンも親星の内部を衝撃波を形成しながら膨張していく。この速度も、衝撃波面の flux の保存則から

$$\beta_c = \sqrt{\frac{P_c}{\bar{\rho}_a c^2}}, \quad (4)$$

と与えられる。ここで、 P_c と $\bar{\rho}_a$ はコクーン内の圧力と密度である。コクーンの圧力は、コクーンが輻射圧優勢として、コクーンの体積とエネルギーを用いて $P_c \simeq E_c/3V_c$ と与えられる。

以上で与えられた β_h と β_c を時間積分することで、親星内部でのジェットとコクーンの伝播過程が計算できる。

3 Results

本研究では親星として、質量 $10^5 M_\odot$ 、ゼロメタルの ZAMS から進化したモデルを用いた。この密度分布を図 1 に示す。

このモデルの半径は、 $R_* \simeq 10^{14}$ cm に達し、赤色超巨星に匹敵する。赤色超巨星は GRB を起こすことができないという考えられており、同程度の半径をもつ超大質量星も GRB を起こすことができない可能性がある。赤色は今回考える超大質量星、青色と緑色は比較のため掲載した $10^4 M_\odot$ の超大質量星と赤色超巨星での密度分布である。

ジェットの伝播結果を図 2 に示す。実線はジェットの先端部、点線はコクーンの色度である。赤色は今

回考えた超大質量星を親星としたもの、青色と緑色は比較のため掲載した $10^4 M_\odot$ の超大質量星、赤色超巨星内での伝播の様子である。この図より、ジェットは親星内部を伝播し、表面に到達していることがわかる。これに対して、赤色超巨星内部では、ジェットの先端部は途中で減速し、コクーンに追い越されている。この場合、親星内では減速したジェットがコクーンに飲み込まれてしまうため、ジェット状の爆発である GRB を起こせないことがわかる。一方、超大質量星内ではジェット先端部は加速しているため、コクーンに飲み込まれずに表面に到達している。よって、超大質量星は重力崩壊時にジェットが駆動されると、GRB を起こしうるといえる。

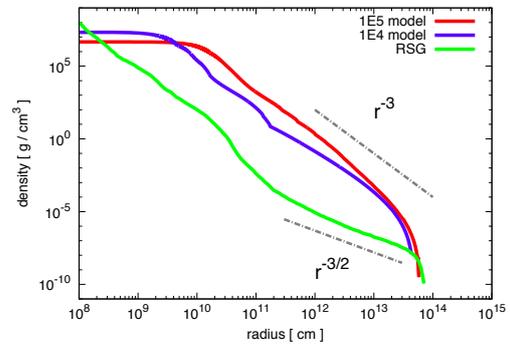


図 1: 超大質量星 (赤: $10^5 M_\odot$ 、青: $10^5 M_\odot$)、赤色超巨星 (緑) の密度分布。

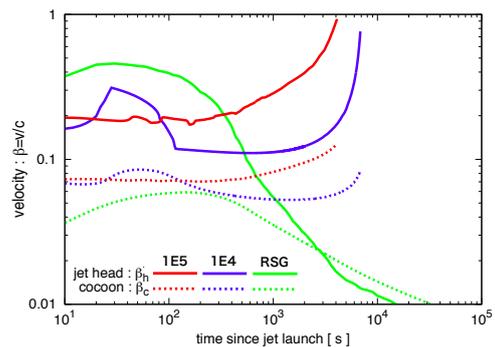


図 2: 超大質量星 (赤: $10^5 M_\odot$ 、青: $10^5 M_\odot$)、赤色超巨星 (緑) の内部を伝播するジェット先端部 (実線) とコクーン (点線) の時間発展。

4 Discussion

前節の計算結果をもとに、超大質量星の起こす GRB の prompt emission の光度曲線を見積もった。ジェットが親星表面を突き破った後、自身のエネルギーのうち 10% を解放してガンマ線を放射するとした。また、スペクトラムのピークエネルギーは米徳関係式と呼ばれる観測で得られた経験則を用いて予言した。この光度曲線を図 3 に示す。色は各親星に対応し、赤方偏移 $z = 10, 15, 20$ の 3 つの場合を想定している。Flux は $10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ に匹敵し、これは現行の Swift 衛星で十分観測しうる。各積分時間に対応した Swift 衛星 BAT 検出器の感度も図中には灰色の点線で示してある。また、GRB の継続時間は 10^4 s を超える、非常に長い GRB になる。

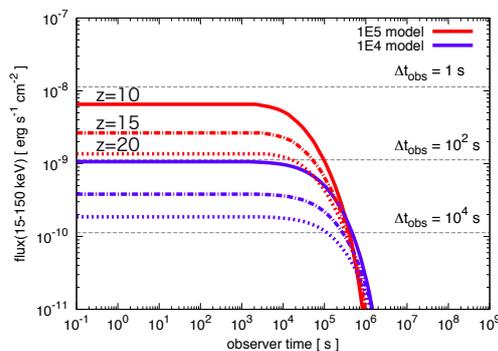


図 3: 超大質量星の GRB で期待される flux。

Reference

Tatsuya Matsumoto et al, 2015, arXiv1506.05802

5 Conclusion

本研究では、超大質量星の起こす GRB の可能性を考えた。超大質量星は赤色超巨星に匹敵する非常に大きな半径をもつが、ジェットが駆動されると表面に到達し、GRB を起こしうることがわかった。また、期待される GRB は明るく、Swift 衛星で観測でき、非常に大きな継続時間をもつことがわかった。

—謝辞—

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

また、共同研究者である仲内大翼氏、井岡邦仁准教授、Alexander Heger 教授、中村卓史教授にはこの場を借りて感謝の意を示したいと思います。