

回転ブラックホール近傍での粒子衝突におけるエネルギー引き抜き過程

小笠原 康太 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

角運動量が適当に制限されている 2 粒子が回転ブラックホール近傍で衝突するとき、それらの重心系エネルギーは発散することが知られている。我々は、この高エネルギー粒子衝突とブラックホールからのエネルギー引き抜き過程 (衝突 Penrose 過程) の研究を、最大回転 Kerr 時空の赤道面内 ($\theta = \pi/2$) で、解析的に行った。発散する重心系エネルギーは、高エネルギー及び超質量粒子の生成を示唆する。本研究では、負のエネルギーをもった超質量粒子が生成されブラックホールに落ち、各粒子の角運動量や質量比が適当に制限された場合、入射粒子の約 14 倍のエネルギーをもった粒子が脱出可能であることを示した。

1 Introduction

宇宙物理学の理論、観測両面から我々の宇宙にはブラックホール (以下、B.H.) が存在することが確実視されている。B.H. はその性質から直接観測は困難であり、周辺環境の観測から間接的にその性質を探る研究が盛んに行われている。Einstein 方程式の解である B.H. は、特異点定理により一般に特異点を生じることが知られている。それら特異点の多くは事象の地平面に覆われ外側の世界とは隔離されているが、特殊な条件下においては事象の地平面に覆われない特異点が存在することが知られており「裸の特異点」と呼ばれている。裸の特異点は宇宙検閲官仮説によって禁止されると考えられているが、あくまで仮説であり実際に証明はされていない。こうした中で、B.H. 近傍での物理現象をより深く理解することは、B.H. 観測に対して理論的な予言と指針を与えるという点で非常に重要であり、また、理論的にも未解決問題への解決の糸口を探る 1 つの手立てになると考えられる。

2 衝突 Penrose 過程

本研究では衝突 Penrose 過程と呼ばれる回転 B.H. 近傍での粒子衝突に注目した。回転 B.H. には事象の地平面の外側にエルゴ領域と呼ばれる領域が存在する。そこでは負のエネルギー状態が可能になり、エネルギー保存則と合わせて考えると、衝突後の粒子は衝突前より大きなエネルギーを持つことが可能にな

る。この過程は回転ブラックホールが角運動量を失い、失った分のエネルギーを脱出粒子に与えたことになる。つまり、衝突 Penrose 過程とは B.H. からのエネルギー引き抜き過程である。

Bañados, Silk, West らは、角運動量が適当に制限された 2 つの粒子の重心系エネルギーが、回転 B.H. 近傍で発散することを示した。これは B.S.W. 効果と呼ばれている。重心系エネルギーが発散ということは、衝突後に高エネルギー粒子が生成される可能性を示唆する。そこで本研究では、B.S.W. 効果を衝突 Penrose 過程に取り入れ、重心系エネルギーの発散とエネルギー引き抜き効率の関係性を明らかにし、より高いエネルギー引き抜き効率の実現を目指す。このような研究によって、B.H. 近傍という強重力場での物理現象の理解と、その性質を明らかにすることを目的とする。

3 Kerr 時空と基礎方程式

以下、 $c = G = 1$ の幾何学単位系を用いる。計算の簡単化のため、粒子は自由粒子で軌道は最大回転 Kerr 時空の赤道面に限る。Kerr 時空は時間並進及び空間回転対称性をもつので、これらに起因する Killing ベクトル $\xi_{(t)}$, $\xi_{(\varphi)}$ が存在する。これより、自由粒子に対して $E := -p \cdot \xi_{(t)} = -p_t$, $L := p \cdot \xi_{(\varphi)} = p_\varphi$ は保存される。質量 m , エネルギー E , 角運動量 L をもつ粒子の 4 元ベクトル p^μ において、 $\mu = t, \varphi$ は $E = -p_t$ 及び $L = p_\varphi$ から求まり、 $\mu = r$ は規格化条件から以

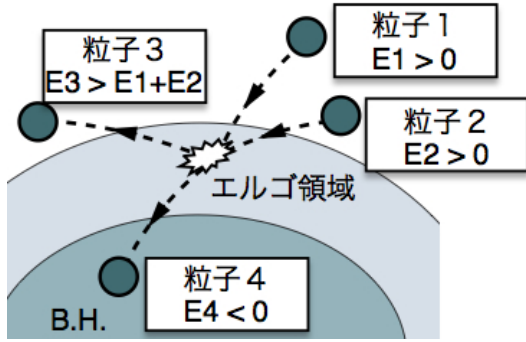


図 1: Collisional Penrose process : 入射粒子 1 及び 2 がエルゴ領域で衝突し, 入射前より大きなエネルギーをもった粒子 3 が脱出する. (arXiv:1409.7502)

下のように表される.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(p^r)^2 + V(r) &= 0, & (1) \\ V(r) &= -\frac{Mm^2}{r} + \frac{L^2 - M^2(E^2 - m^2)}{2r^2} \\ &\quad - \frac{M(L - ME)^2}{r^3} - \frac{E^2 - m^2}{2}. & (2) \end{aligned}$$

$V(r)$ は有効ポテンシャルである.

ここで, 粒子 1 及び 2 が地平面近傍で衝突し, 粒子 3 及び 4 となる過程を考える. 4 元ベクトルの保存則

$$p_1^\mu + p_2^\mu = p_3^\mu + p_4^\mu, \quad (3)$$

において, $\mu = t, \varphi$ はそれぞれエネルギーと角運動量の保存則を表し, $\mu = r$ は

$$\sigma_1 |p_1^r| + \sigma_2 |p_2^r| = \sigma_3 |p_3^r| + \sigma_4 |p_4^r|, \quad (4)$$

を満たし, $\sigma_i = \pm 1$ は粒子の運動方向を表す. 地平面近傍を $r = M/(1 - \epsilon)$, $0 < \epsilon \ll 1$ と表し, 各粒子の $|p_i^r|$ を ϵ で展開する. これより, 式 (4) における ϵ のべき毎の方程式を得る.

4 エネルギー引き抜き効率

衝突 Penrose 過程におけるエネルギー引き抜き効率は以下のように定義される.

$$\eta := \frac{E_3}{E_1 + E_2}. \quad (5)$$

先ほど求めた p^r の保存則において, この η を最大化するパラメータを探す. $\sigma_3 = -1, m_1 = m_3 = 0$ と選ぶことで, 1 次の保存則から E_3 の最大値, 2 次の保存則から E_2 の最小値が求まり, 結果として $\eta \simeq 2.19$ を得る.

衝突後の粒子の質量と重心系エネルギーには $m_3 + m_4 \leq E_{\text{cm}}$ の関係がある. B.S.W. 効果は重心系エネルギーが $E_{\text{cm}} \propto 1/\sqrt{\epsilon}$ で発散するものなので, $m_4 \propto 1/\sqrt{\epsilon}$ を仮定して η の最大値を計算すると, $\eta \simeq 13.9$ を得る. これは B.S.W. 効果がエネルギー引き抜き効率を高める効果があることを意味し, η の値も先行研究の結果と一致する.

5 まとめ

衝突 Penrose 過程において, 地平面近傍で衝突が起こった場合のエネルギー引き抜き効率を解析的に求めた. 衝突粒子の条件は, 一方の粒子は critical で外向き, もう一方の粒子は subcritical で内向きとした.

この仮定のみでエネルギー引き抜き効率を最大化出来るのは, 衝突前後で一方は massless, もう一方は massive な場合で, 放射光子は一度内向きに進み, ポテンシャルによって外向きに軌道を変える. これは, エルゴ領域内で各粒子のパラメータが適当に制限されている Compton 散乱が起こった場合, 衝突前のエネルギーの 2 倍以上のエネルギーをもった光子が放射されることを示す.

B.S.W. 効果を取り入れた解析では, 重心系エネルギーの発散と同次のエネルギー及び質量発散を新たな仮定として加えた. この場合, 粒子 4 (これは負のエネルギーをもち, B.H. に落ちる粒子) の質量のみ発散を仮定した場合がエネルギー引き抜き効率の最大値, $\eta \simeq 13.9$ を与える. これ以外のエネルギー及び質量発散を仮定した解析では, ϵ を用いた運動量保存則の整数べき展開が破綻する. より正確には, $|p_3^r|$ 及び $|p_4^r|$ に ϵ の非整数べきの項が現れ, 衝突前の $|p_i^r|$ との釣り合いがとれなくなる. これは, 衝突後の粒子が脱出できる条件を課した場合, B.S.W. 効果は負のエネルギー粒子の質量にのみ寄与を与えると考えられる.

Acknowledgement

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。

Reference

- M. Bañados, J. Silk, and S. M. West, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 111102. [arXiv:0909.0169 [hep-ph]]
- T. Harada, H. Nemoto, and U. Miyamoto, Phys. Rev. D **86** (2012) 024027. [arXiv:1205.7088 [gr-qc]]
- J. D. Schnittman, Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 261102. [arXiv:1410.6446 [gr-qc]]
- E. Berti, R. Brito, and V. Cardoso, arXiv:1410.8534 [gr-qc]