

Blandford-Znajek process(BZ 機構)の全貌の理解に向けて～起電力の起源について～

西岡 新平 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

ガンマ線バースト (GRB) からは相対論的なジェットが放出されていると考えられているが、それを駆動するプロセスやエネルギー源は未だ十分に理解されていない。エネルギー源を説明するメカニズムの一つとして Blandford-Znajek process(R.D.Blandford&R.L.Znajek(1977)) がある。BZ 機構はブラックホールの回転エネルギーを周囲の磁場により引き抜くペンローズ過程の一種である。カーブラックホールのエルゴ層に突き刺さった磁場が存在すると、それに沿って外向きの Poynting flux が生成することが知られていたが、その起電力が明らかでなかった。そこで本発表ではその起電力の起源を解き明かした論文 Toma&Takahara(2014) のレビューを行う。

1 Introduction

GRB とは、宇宙最大の爆発現象と呼ばれ、突発的なガンマ線放射が観測される現象である。その光度は $L \sim 10^{51} \text{erg/s}$ にも達し、典型的な継続時間は $t \sim 10^0 - 10^2 \text{s}$ 程度で、放出するエネルギーは $E \sim 10^{51} - 10^{53} \text{erg}$ 程度であり、非常に高エネルギーな現象である。この中心エンジンやエネルギー源はわかっていない。そこで中心エンジンの候補の一つとして Blandford-Znajek process(BZ 機構) がある。これは電磁場を用いてカーブラックホールの回転エネルギーを引き抜くペンローズ過程の一種である。カーブラックホールのエルゴ層に突き刺さった磁場が存在し、ブラックホール磁気圏に無衝突プラズマが満ちており、 \vec{B} に沿って電場 \vec{D} を遮蔽する、つまり $\vec{D} \cdot \vec{B} = 0$ と仮定すると、エルゴ層を貫く開いた磁力線は必ず $D^2 > B^2$ の成り立つ領域を持つ。これによって磁力線に直交して流れる電流が生じ、外向きのポインティングフラックスを生成する。

2 Methods

2.1 Kerr metric

まず Kerr metric は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 ds^2 = & -(1 - \frac{2Mr}{\rho^2})dt^2 - \frac{4Marsin^2\theta}{\rho^2}dtd\varphi \\
 & + \frac{\Sigma sin^2\theta}{\rho^2}d\varphi^2 + \frac{\rho^2}{\Delta}dr^2 + \rho^2d\theta^2 \\
 \rho^2 = & r^2 + a^2 cos^2\theta \\
 \Delta = & r^2 - 2Mr + a^2 \\
 \Sigma = & (r^2 + a^2)^2 - a^2\Delta sin^2\theta
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで $\Delta = 0$ の解 $r_+ = M + \sqrt{M^2 - a^2}$ は事象の地平線となっている。 $g_{tt} = 0$ の解 $r_{sl} = M + \sqrt{M^2 - a^2 cos^2\theta}$ と事象の地平線との領域をエルゴ層とよび、ここでは g_{tt} 成分の符号が入れ替わっている。カー時空を 3+1 分解すると lapse: $\alpha = \sqrt{\frac{\rho^2\Delta}{\Sigma}}$ 、shift: $\beta^\phi = -\frac{2Mar}{\Sigma}$ 、空間計量: $\gamma_{ij} = g_{ij}$ となる。 $n^\mu = (\frac{1}{\alpha}, -\frac{\beta^i}{\alpha})$ を四元速度とする観測者を FIDO という。

2.2 Maxwell eq

Maxwell eq は共変な形式で

$$\nabla_\nu F^{\mu\nu} = 4\pi I^\mu \tag{2}$$

$$\nabla_\nu * F^{\mu\nu} = 0 \tag{3}$$

と書ける。これを 3+1 の形式で書き直すと

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 4\pi\rho \tag{4}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{5}$$

$$-\partial_t \vec{D} + \vec{\nabla} \times \vec{H} = 4\pi\vec{J} \tag{6}$$

$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \tag{7}$$

と書ける (Komissarov2004)。また

$$\vec{E} = \alpha\vec{D} + \vec{\beta} \times \vec{B} \tag{8}$$

$$\vec{H} = \alpha\vec{B} - \vec{\beta} \times \vec{D} \tag{9}$$

の関係がある。

簡単のために以下の仮定をする。□磁場 \vec{B}_p はエルゴ層を貫く open な形状。□磁場に沿って電場を遮蔽して $\vec{D} \cdot \vec{B} = 0$ が成り立つ。□重力は電磁力に比べて無視できる。□系は定常軸対称。ここで電磁場の EM tensor の保存則 $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = -F^{\nu\lambda} I_\lambda$ を仮定に基づき書き下すと

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{L} = B^i \partial_i \left(-\frac{1}{4\pi} H_\varphi \right) = -(\vec{J}_p \times \vec{B}_p) \cdot \vec{m} \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{S} = \Omega_F B^i \partial_i \left(-\frac{1}{4\pi} H_\varphi \right) = -\vec{E} \cdot \vec{J}_p \quad (11)$$

$$\vec{L} = -\frac{1}{4\pi} H_\varphi \vec{B}_p \quad (12)$$

$$\vec{S} = -\frac{1}{4\pi} \Omega_F H_\varphi \vec{B}_p \quad (13)$$

となるから $\vec{J}_p \perp \vec{B}_p$ の領域で $H_\varphi \neq 0$ となり、角運動量フラックスを生成する。角運動量は磁場に沿って流れていき、遠方で物質と相互作用してエネルギーを流すということを仮定する。つまり $H_\varphi \neq 0$ の時 $\Omega_F > 0$ を仮定する。すると $\vec{J}_p \perp \vec{B}_p$ の領域で Poynting flux を生成していることがわかる。どこで $\vec{J}_p \perp \vec{B}_p$ となるかを次節で考える。

2.3 電流

2.3.1 $B^2 > D^2$ のとき

粒子の運動は $\vec{D} \times \vec{B}$ drift と \vec{B} 方向の運動と \vec{B} 周りの回転に分解できる。よって電流としては \vec{B} 方向にしか流れない。つまり $\vec{J} \parallel \vec{B}$ 。

2.3.2 $B^2 < D^2$ のとき

座標変換により \vec{B} を消す座標が取れる。電流は \vec{D} の方向に流れる。これをもとの座標で見ても \vec{D} の方向に流れる。 $\vec{D} \cdot \vec{B} = 0$ から $\vec{J}_p \perp \vec{B}_p$ となる。この領域で磁場を横切って流れる電流を駆動し、Poynting flux を生成する。つまり $B^2 < D^2$ の領域が起電力となっていることがわかる。

2.4 起電力の起源

(9) 式より

$$(B^2 - D^2)\alpha^2 = -B^2(-\alpha^2 + \gamma_{\varphi\varphi}(\Omega_F - \Omega)^2) + \frac{1}{\alpha^2}(\Omega_F - \Omega)^2 H_\varphi^2 \quad (14)$$

が成立する。 $H_\varphi = 0, \Omega_F = 0$ とすると

$$(B^2 - D^2)\alpha^2 = -B^2(-\alpha^2 + \beta^2) \quad (15)$$

となり、エルゴ層では $\beta^2 - \alpha^2 > 0$ が成り立つので、 $B^2 < D^2$ となり $H_\varphi \neq 0, \Omega_F > 0$ を生成する。結果として、エルゴ層の有限の領域で $B^2 < D^2$ が成り立つように $H_\varphi \neq 0, \Omega_F > 0$ が決定される。

3 Results

エルゴ層のある領域で $D^2 > B^2$ となり磁場を横切って流れる電流が生じて、Poynting flux のソースとなることがわかる。これはエルゴ層で g_{tt} の符号が入れ替わることが原因であった。即ち、エルゴ層の性質が Poynting flux を生成している、つまり起電力はエルゴ層にあることがわかる。

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

- Toma & Takahara, 2014, MNRAS 442, 2855-2866
- Komissarov, 2004, MNRAS 350, 427-448
- R.D. Blandford & R.L. Znajek, 1977, MNRAS, 179, .433