

## シヴァルツシルド BH 事象限界近傍におけるプラズマ波動の発生

# 大家 寛 [1]  
[1] 東北大・理・地物

### Generation of Plasma Waves in the Region close to the Event Horizon of Schwarzschild Black Holes

# Hiroshi Oya[1]  
[1] Geophysics, Tohoku Univ.

#### 1. Introduction

Since 1984 for the decameter range and 2006 for the decimeter range, the quest of radio wave pulses from the center of our Galaxy have currently been carried out; for the decameter and decimeter radio wave pulses it is concluded that these pulses are generated from the rotating black holes whose rotation periods supposed to be coinciding with the observed radio wave pulses.

Furthermore it is proposed that the source positions are located in the region very close to the event horizon of the black holes being based on the lowness of the observed frequency and steadiness of the period. Criticisms for this proposal of closeness of source position toward the event horizon, however, are raised based on the discussion of the possible power generation in the region close to the event horizon; the arguments state that no intense radio wave source can exist in the region close to the event horizon due to effects of general relativity. To clarify validity of these concept of depression effects, we have here investigated the possibility of generation radio waves theoretically, based on the electromagnetism under the condition of general relativity.

#### 2. Theory

The analyses are based on the 4-dimensional gauge potential equations where the source currents consist of wave components in plasma which are subjected to the momentum transfer as results of resonance with the electron beams that are flowing towards event horizon being enhanced by intense gravity of BH. Numerical analyses are made to solve the 4x4 elements matrix that are required to have non-trivial solution for the four dimensional gauge potential equation in plasma. That is, the angular frequency,  $\omega$  and imaginary part of refractive index  $M_{\text{my}}(\text{imaginary})$  are obtained numerically for given real part of refractive index  $M_{\text{r}}(\text{real})$ .

#### 3. Results and Discussion

Numerical analyses have been carried out mainly for angular frequency around decameter frequency, 20MHz which are kept as constant value through whole range of space of the present interest, near the event horizon whose position are expressed by the parameter  $R$ ;  $R=1-r_g/r$  where  $r_g$  is Schwarzschild radius and  $r$  is the distance from the center of the black hole. The amplification of the waves are indicated for the case where the wave propagate with directional component towards inside that is in parallel to the direction of the electron beam. Significant growth of the waves take place in the regime of the UHR branch that appears between local plasma frequency and upper hybrid frequency; in an example case of refractive index  $M_{\text{r}}(\text{real})=5$  that propagates with angle 15 degree with respect to the magnetic fields and also beam direction, the growth of the waves becomes to 1200dB/km, for the beam-wave interaction rate  $Z=1E-4$ , at positions  $R=0.4$  and  $R=1E-6$ . Between these position the amplification rates are around 600dB/km. That is, we can state that the wave make significant growth even in region deep inside or close to the event horizon.

These inside mode of plasma waves that propagate towards event horizon where plasma density increases toward inside enter into the region coinciding with the local plasma frequency. In this coincide region, the waves are converted into the mode of the wave that can escape outside in the form of radio waves by changing propagation directions outwards at the same time.

#### 4. Conclusion

The present study on generation of the plasma waves based on the electromagnetic equation of the general relativity condition, considering together the beam plasma wave interaction, gives results that the region deep inside, toward event horizon, even at  $R=1E-6$ , for an example, possibly becomes the source region of the low frequency radio wave such as the case of decameter radio waves.

#### 1. 序

デカメータ、およびデシメータ波帯において、我が銀河系中心からの電波パルスを受信していて、これが、自転するブラックホールを起源とすること、そのパルス周期は電波源となるブラックホールの自転と同期していること、またその電波源は事象限界近傍に位置し事象限界からの距離は事象限界の BH 中心から距離との比として表す時、デカメータ電波源が  $10E-6$  から  $10E-4$ 、デシメータ電波源が  $10E-2$  以上と推測してきた。これに対し、BH 事象限界近傍では全てのエネルギー放射は抑圧され、デカメータ、デシメータいずれに対しても、回転と同期する程度に事象限界に近づく電波源はありえないとの批判が出されていた。

本研究では、まず、回転のない場合として、シヴァルツシルド BH をとりあげ、事象限界近傍での電波源の可能性をプラズマ波動の成長の視点から検討した。モデルとして、高密度の磁化プラズマの存在とこのプラズマと相対運動をする電子ビームの存在を仮定し、以下の理論形成をおこなった。

#### 2. 理論の骨子

## 2.1) 方程式

一般相対論における電磁方程式は二種のアプローチが確立されているが、本論ではいわゆる4元ゲージポテンシャルによる表現を用い、ポテンシャル場の源となる4元電流に対しては重力場、電磁場の影響を受けるプラズマ波動成分とCherenkov過程を通じて相互作用する電子ビームの存在を仮定した。

## 2.2) 波動・ビーム相互作用の取り扱い

本論では、波動に協働するプラズマ運動は平均化モデル(いわゆるコールド近似)を用い、ビームとの共鳴状態ではビームからプラズマ運動の波動成分へ運動量が平均的に輸送されるマクロモデルを用いた。輸送量パラメータは波動の角周波数 $\omega$ に対し $Z = \eta/\omega$ を用いた。

## 2.3) 演算対象

モノクロマティックな波動において、角周波数 $\omega$ 、屈折率 $Myu(\text{real})+i \cdot Myu(\text{imag})$ に対し4元ゲージポテンシャルに関する4個の方程式に対しNon-trivial Solutionをもたらす条件となる4行4列の複素行列式を数値解法によって解いた。

## 3. 結果と検討

### 3.1 基礎事項

シヴァルツシルド時空の湾曲を特徴づけるのは事象限界からの比距離を代表するパラメータ $R (= 1 - r_g/r)$ :ただし $r_g$ はシヴァルツシルド半径、 $r$ はBH中心からの距離)であるが、 $R$ の関数として示される波動の特徴の第一は、光速度が $cR$ となる点で、従ってビームの速度の上限も $R$ に比例して減少する。効果的なビーム・波動相互作用はプラズマ周波数と高域ハイブリッド周波数の間に存在する高域ハイブリッド波ブランチとホイッスラーモード波において確認される。

### 3.2 波動成長の状況

磁場が垂直下方を向くモデルにおいてBH中心方向に重力エネルギーの解放による高速電子ビームが存在するとき、この電子ビームと共鳴するよう下方に向う位相速度成分をもったUHRブランチの波動が効果的な成長を起こす。これは $R=1E-6$ に至る深部まで、起こりうることを示され、一例として22MHzの電波を取り上げるとき、局所屈折率(重力場のある局所での屈折率)が5の場合、線形成長率としては1kmの伝搬に対し $R=0.2$ と $R=1E-6$ にて1200dB/km,その中間にては約600dB/kmと十分な電波源強度を与えることが判明した。

### 3.3 電波源としての役割

これら、UHRブランチの波は十分な強度に成長しつつ下方(BH中心部方向)に向かうが周囲プラズマ密度の増大により局所プラズマ周波数と一致した点で外部方向に転換すると同時にモード変換をして電磁波モードになってBHから脱出する。太陽方向に伝搬する途中では降着円盤領域の磁場強度、密度ともに高い領域に入るとき再びホイッスラーモードなど、プラズマ内部伝搬モードに変換されるが、最終的に銀河系空間に脱出することが、可能と考えられる。

なお、本論は回転のないBHについて検討したものであるが、Kerr BHについても

本論の結果が動径方向の本質は適用でき、Kerr BHにおいても事象限界近傍が電波源になりうるということが理解される。しかし方位方向の特性の議論には、今後Kerr Metricによる理論を構築する必要がある。

## 4. 結論

シバルツシルド時空において事象限界近傍において、一般相対論的電磁気方程式を解くことにより電磁波放射の可能性を検討した。結果は従来の熱的放射が $R$ の関数として抑圧されるとの認識は誤りで、強い重力場中で加速・形成された電子ビームが周囲プラズマとの間でうむ非熱的プラズマ波放射が重要である。このビーム・プラズマ相互作用によって生まれるUHRブランチのプラズマ波動は事象限界近傍 $R=1E-6$ までも十分発生し、このような深部の事象限界近傍でもデカメータ波電波およびデシメータ波の電波源が存在しうる。