

一般相対論的輻射磁気流体計算で探る ブラックホールへの突発的超臨界降着

2021年10月22日
筑波大学理工学群物理学類
201810857
島田悠愛

[目次]

1. 潮汐破壊現象とは何か
2. 先行研究(Dai et al. 2018)の紹介
3. 私の研究目的と進捗状況

[研究背景] 潮汐破壊現象とは

潮汐破壊現象(TDE, Tidal Disruption Event)
とはブラックホールに接近した恒星やガス雲
が潮汐力で破壊される現象

飛び散ったガスの一部がBHに降着し増光が
起こると予想されている

図1は観測されたTDEと考えられている2現象
の光度変化

$L \propto t^{-\frac{5}{3}}$ の減光が根拠のひとつ

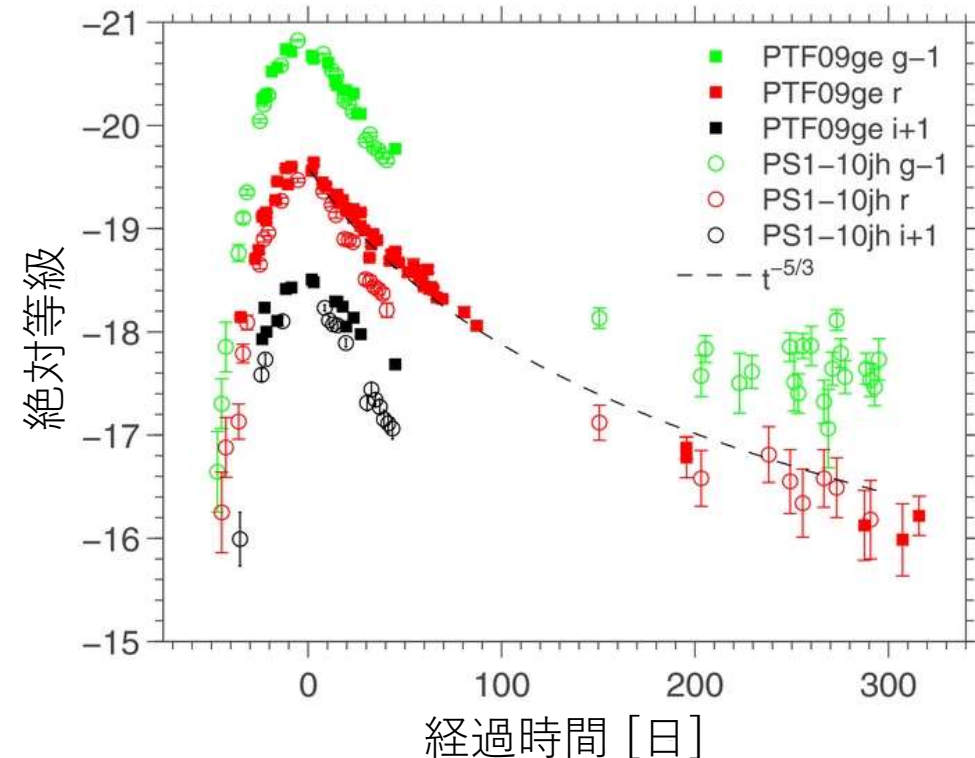


図1 : TDEと思われる現象の光度変化¹

¹ Arcavi et al. "A CONTINUUM OF H- TO He-RICH TIDAL DISRUPTION
CANDIDATES WITH A PREFERENCE FOR E+A GALAXIES"
ApJ, 2014, 793, 38

[研究背景] TDEによる光度変化則の導出 1

Rees(1988)とPhinney(1989)によって示されたTDEの光度変化則 $L \propto t^{-\frac{5}{3}}$ の導出

光度 L はBHに落ち込むガスの降着率 \dot{M} に比例する

M を落ち込むガスの質量、 e を単位質量あたりのガスのエネルギー、 a をガスの軌道の長半径とすると

$$L \propto \dot{M} \cong \frac{dM}{de} \frac{de}{da} \frac{da}{dt}$$

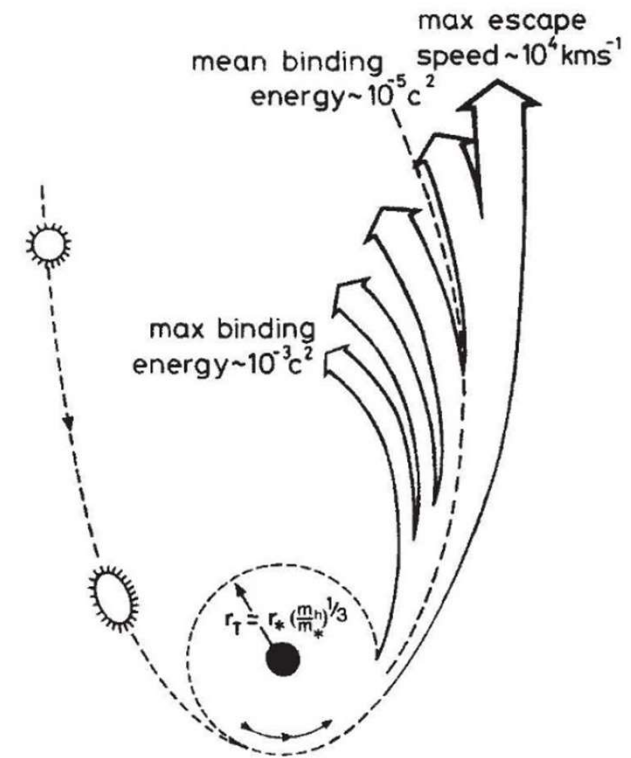


図2 : TDEの概要図²

² Martin J. Rees "Tidal disruption of stars by black holes of 106–108 solar masses in nearby galaxies" nature, 1988, 333, pages 523–528

[研究背景] TDEによる光度変化則の導出 2

各項の導出

(1) エネルギー e はBHの重力による寄与のみ

$$e \sim \frac{GM_{\text{BH}}}{a}, \quad e \propto a^{-1}$$

(2) e に対するガスの質量分布が一定と仮定

$$\frac{dM}{de} \sim \text{const.}$$

(3) Kepler第三法則

$$a \propto t^{2/3}, \quad a^{-2} \propto t^{-4/3}$$

$$\begin{aligned} L &\propto \dot{M} \cong \frac{dM}{de} \frac{de}{da} \frac{da}{dt} \\ &\propto \frac{d a^{-1}}{da} \frac{d t^{2/3}}{dt} \\ &= a^{-2} t^{-1/3} \propto t^{-5/3} \end{aligned}$$

(1)~(3)より $L \propto t^{-\frac{5}{3}}$ が得られた

数値シミュレーションによる検証が必要

[目次]

1. 潮汐破壊現象とは何か
2. 先行研究(Dai et al. 2018)の紹介
3. 私の研究目的と進捗状況

[先行研究]

最近発表された一般相対論輻射磁気流体シミュレーション (GR-RMHD) の論文を紹介する

A Unified Model For Tidal Disruption Events

LIXIN DAI, JONATHAN C. MCKINNEY, NATHANIEL ROTH, ENRICO RAMIREZ-RUIZ, AND M. COLEMAN MILLER

2018 ApJL 859 L20

Doi : 10.3847/2041-8213/aab429

[先行研究] 概要

- ◆TDEらしき現象は数十例報告されている。しかし、現象の数例は光学や近紫外線が主な放射なのに対し、X線が主な現象もあった
- ◆3例のTDEのみが相対論的ジェットを放出していた
- ◆上記の多様性の原因を探るため、BHへのガス降着現象のGR-RMHDシミュレーションと輻射輸送計算による放射スペクトルの調査を行った
- ◆その結果、降着円盤とアウトフロー，ジェットが形成された
- ◆放射スペクトルの特性は、観測者の視野角に依存することが分かった

[先行研究] 初期設定

三次元GR-RMHDシミュレーションHARMRAD³を使用

極座標を用い、セル数は r 方向に128、 θ 方向に64、 ϕ 方向に32

BH質量 $5 \times 10^6 M_{\odot}$ 、スピパラメータ $a = 0.8$

初期条件：

密度分布は球対称(右図参照)

回転速度はKeplerian

プラズマベータ(ガス圧/磁気圧)=20~30

のポロイダル磁場

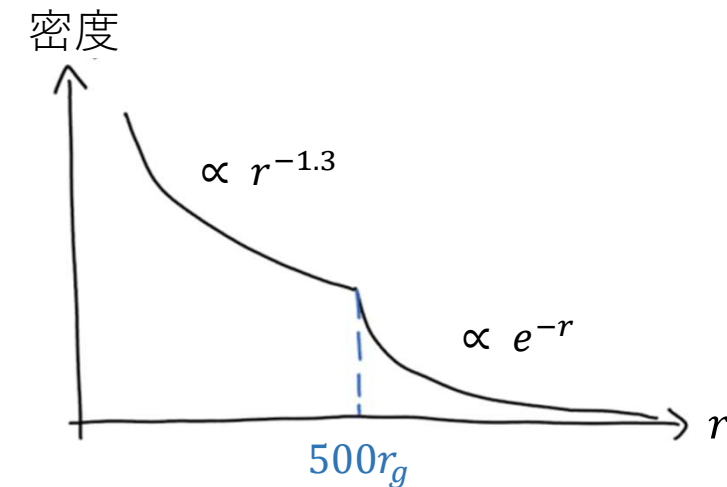


図3：初期密度分布

3 McKinney et al. "Three-dimensional general relativistic radiation magnetohydrodynamical simulation of super-Eddington accretion, using a new code HARMRAD with M1 closure"
MNRAS, 2014, 441, 4, 3177-3208

[先行研究] 結果

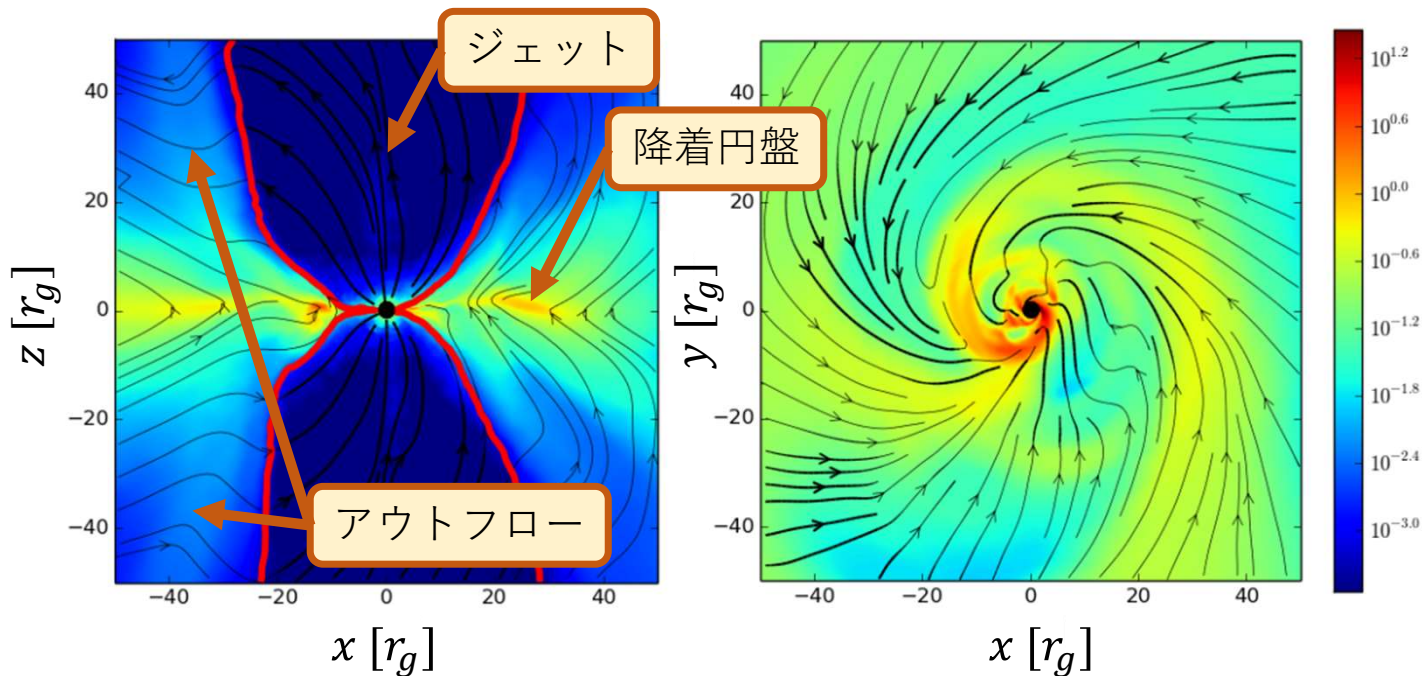


図4 : $t = 17400 R_g / c$ における密度分布(色)と磁力線(黒線)
赤線は電磁エネルギーと質量エネルギーが等しい境界

赤道面付近に降着円盤、
その上空にアウトフロー、
回転軸付近にジェットが
形成された

円盤は強磁場降着流
(MAD)となる

Blandford-Znajek過程に
よって相対論的ジェット
が生成された

[先行研究] 結果 時間発展

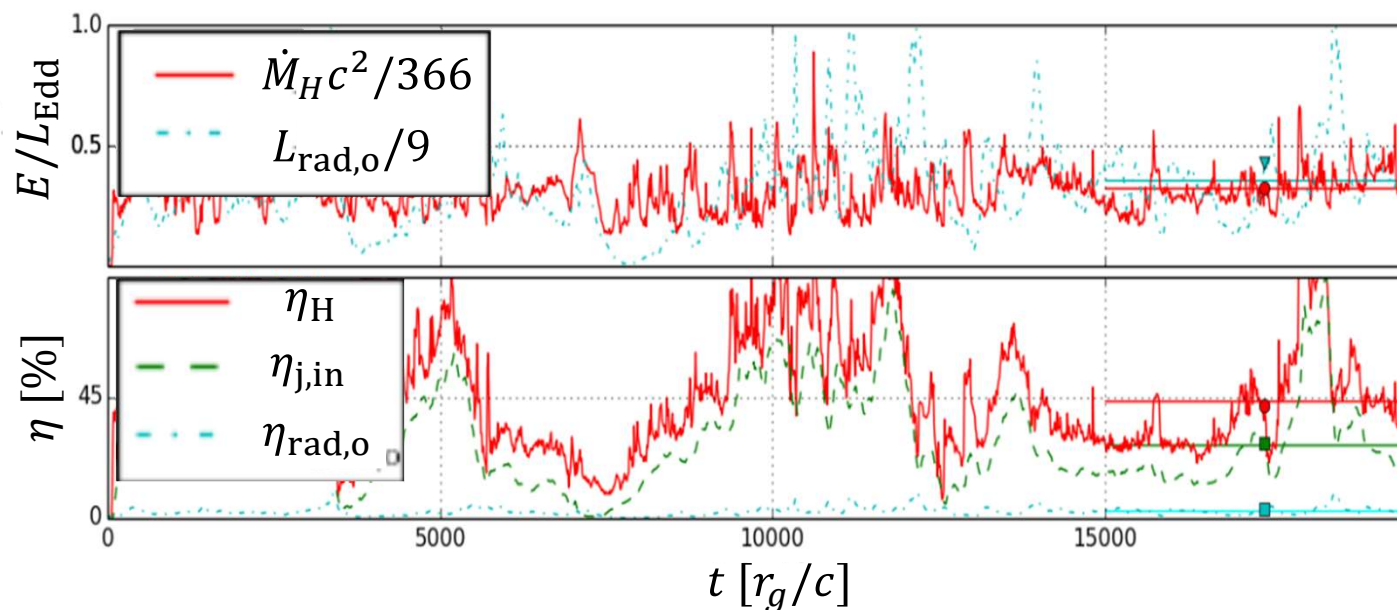


図5：上は降着率(赤)と放射光度(水色の点線)の時間変化
下はエネルギー変換効率の時間変化で、赤線がトータル、
緑破線がジェット、水色の点線は放射

平均降着量は $15\dot{M}_{\text{Edd}}$ (太陽型の星が破壊された時の fallback rate $12\dot{M}_{\text{Edd}}$ に近い)

輻射のエネルギー変換効率は $\eta_{\text{rad}} \sim 2.7\%$ で、
bolometric luminosityは $3.2L_{\text{Edd}}$

ジェットのエネルギー変換効率は $\eta_{\text{j,in}}$ は輻射のエネルギー変換効率($\eta_{\text{rad,o}}$)に比べ高い

[先行研究] 結果 物理量の傾斜角依存性

- 極に近い側(紫)は希薄で
 $\text{few} \times 0.1c$ と非常に速い

- 赤道面に近い側(赤)は
低速である

密度は $r < 1000r_g$ で高く、
 $r > 1000r_g$ で低い

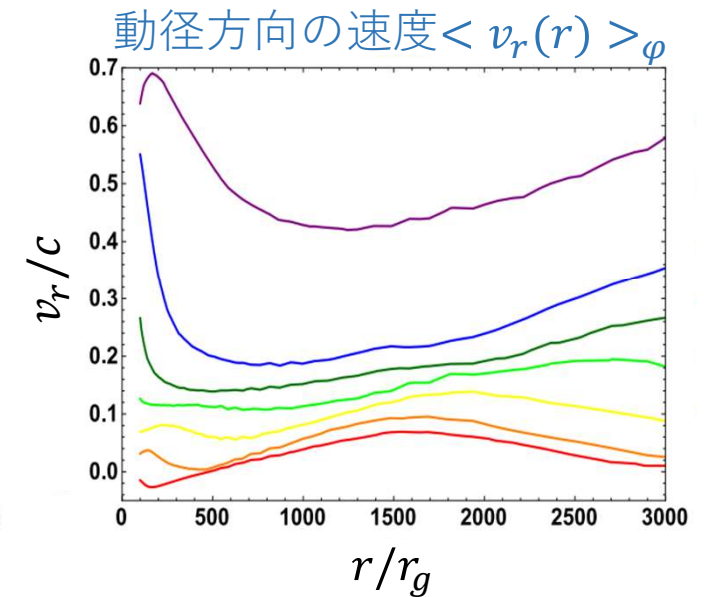
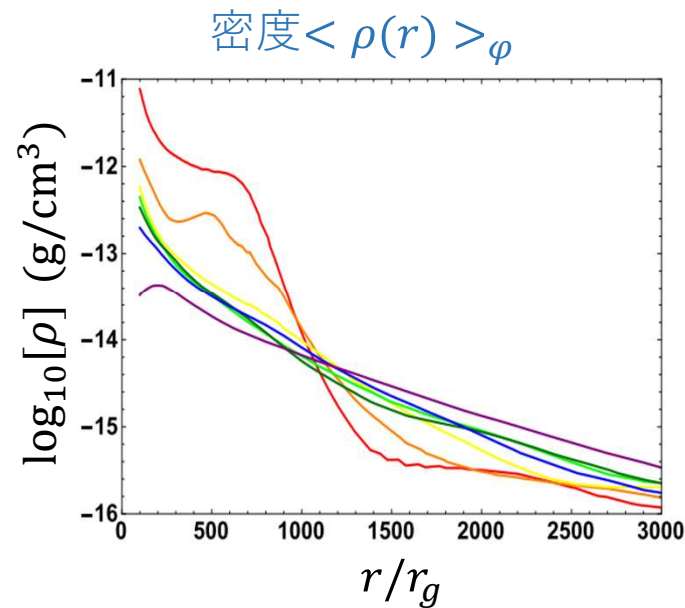
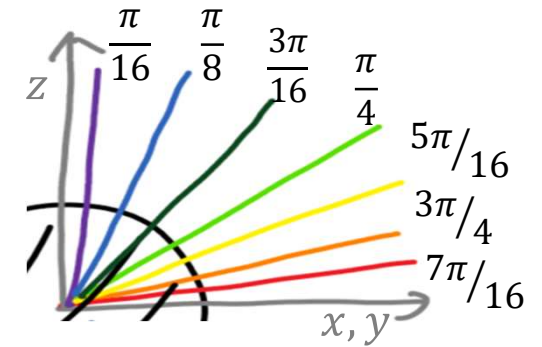


図6：傾斜角別の、時間- ϕ 平均したガス密度(左)と
動径方向の速度(右)
傾斜角の模式図は右上に示した。

[先行研究] 輻射スペクトル計算の方法

モンテカルロ輻射輸送計算ソフトコード、SEDONA⁴を利用
右図のように領域を4つに分けて各角度領域でガスの密度
と速度の平均値を算出

球対称な媒質中での輻射輸送計算を実施。考慮されている
素過程は、コンプトン散乱とトムソン散乱、自由-自由放射、
HとHeとOによる自由-束縛及び束縛-束縛放射

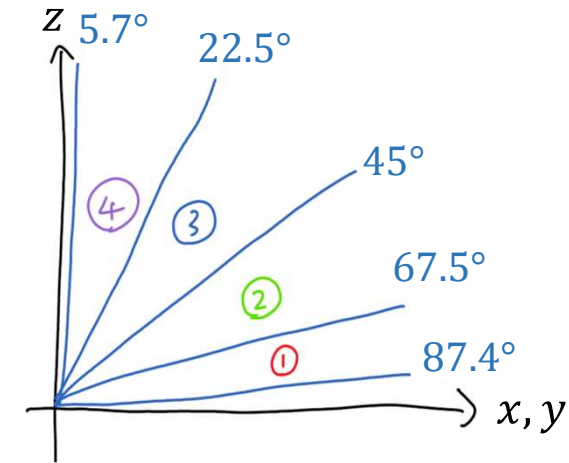


図7：輻射計算における
角度領域の設定

各領域で、速度場が負(流入)から正(流出)へと移行する半径を内側の境界とし、
 $T \sim 10^6$ Kの黒体輻射を定常的に注入

内側の境界へ戻った光子は無視、外側の境界から抜け出した光子から観測され
るスペクトルを作成

⁴ Kasen et al. "Time-dependent Monte Carlo Radiative
Transfer Calculations for Three-dimensional Supernova
Spectra, Light Curves, and Polarization"
ApJ, 2006, 651, 366

[先行研究] 結果 輻射スペクトルの見込み角依存性

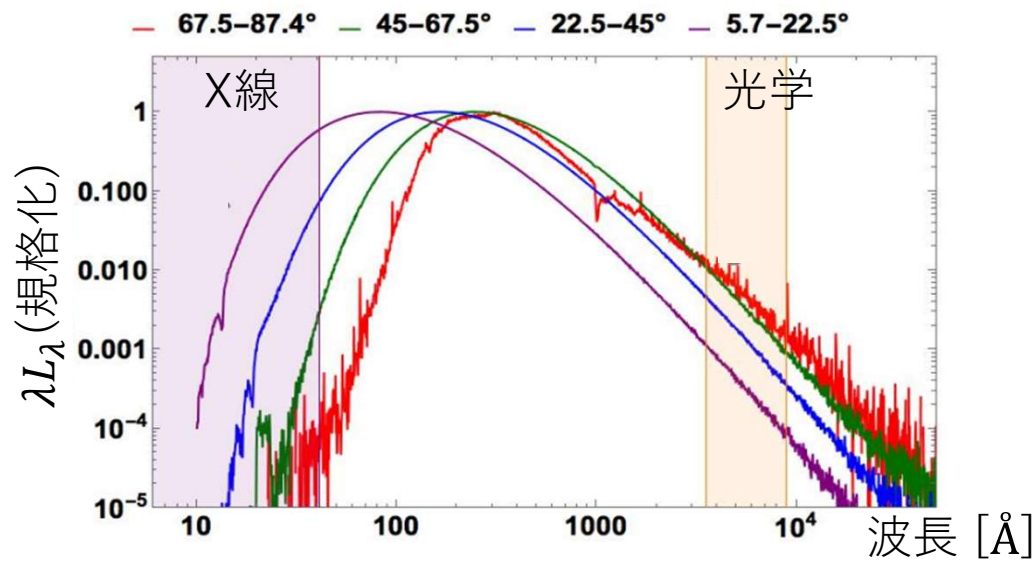


図8：角度領域における脱出スペクトル

光学近紫外線/X線の比率は極に近いほど小さいことがわかる

赤道面付近ではHeIIやOVIにより吸収、光学や近紫外線で再放射される
それ以外は断熱膨張により赤方偏移される

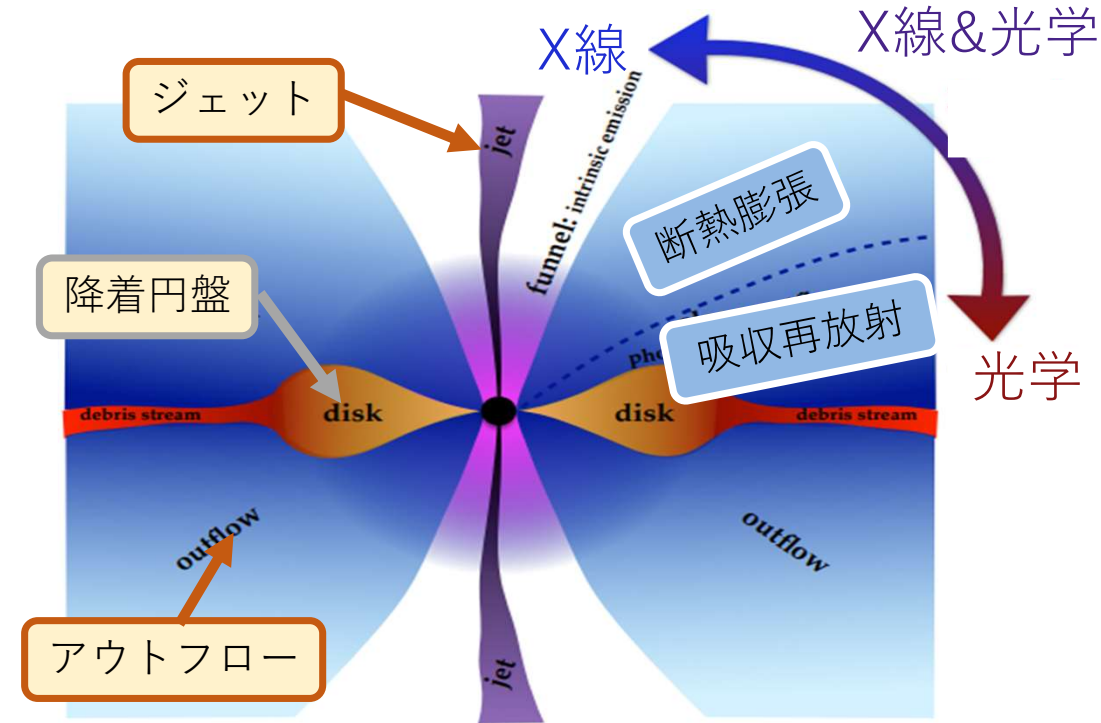


図9：輻射スペクトルの見込み角依存性の模式図

[先行研究] まとめ

1. TDEでは突発的な超臨界降着が起こり、降着円盤、アウトフロー、ジェットという構造ができる
2. 内部で生じたX線は赤道面付近では吸収再放射され光学や近紫外線になり、それ以外は断熱膨張される
3. 回転軸に近いほどX線が強く、赤道面に近いほど可視光や近紫外線が強く観測される

つまり、TDEの輻射スペクトルの多様性の起源は観測角度である

また、ジェットは条件が整えばBlandford-Znajek過程により生成される

[目次]

1. 潮汐破壊現象とは何か
2. 先行研究(Dai et al. 2018)の紹介
3. 私の研究目的と進捗状況

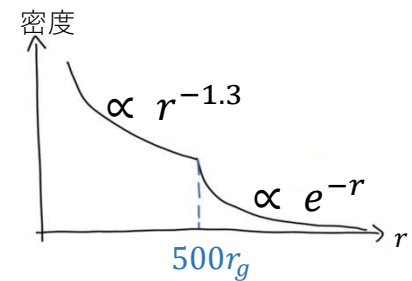
[目的/方法]

目標： Dai et al. 2018の結果の再現。パラメータを一つ変更、変化の考察

三次元GR-RMHDシミュレーションUWABAMI⁵を使用

状況設定の差異は表を参考

状況設定	Dai 2018	今回
cell数	128*64*32	128*128*1
BH質量 [M_{\odot}]	5×10^6	10
スピンパラメータ	$a=0.8$	$a=0$
プラズマベータ	20~30	100
質量密度分布	右図	トーラス型



⁵ Takahashi et al. “Formation of Overheated Regions and Truncated Disks around Black Holes: Three-dimensional General Relativistic Radiation-magnetohydrodynamics Simulations”
ApJ, 2016, 826, 23

[結果/展望]

第一弾のシミュレーションに成功した

今後の展望

BH質量を $M_{\text{BH}} = 10 \rightarrow 5 \times 10^6 M_{\odot}$



初期の質量分布を再現



スピンパラメータを $a = 0 \rightarrow 0.8$



cell数の増加、輻射輸送計算、
パラメータの変更など

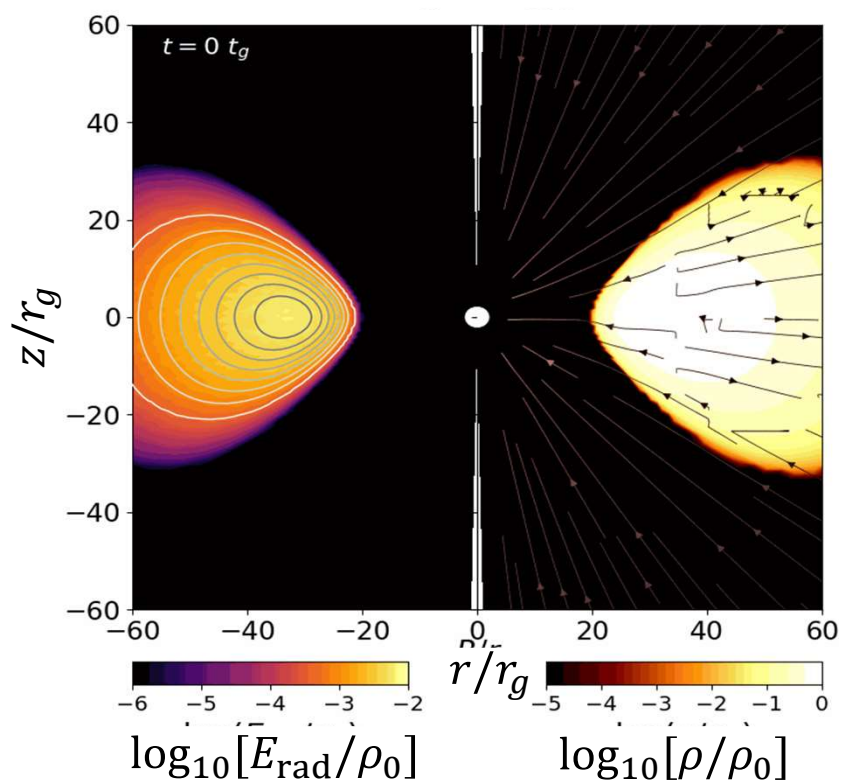


図10：左は輻射エネルギー(色)と磁力線(黒線)。
右は密度分布(色)とフロー(矢印)

[まとめ]

- ◆TDEと推測される現象が観測されているが、シミュレーションによる検証が必要である
- ◆観測されたTDEにはスペクトルの多様性がみられ、その起源は観測角度にあるとDai et al. 2018では結論づけている
- ◆しかし、シミュレーションは1例のみで、輻射スペクトルの計算は球対称近似で行っているため、詳しい検証が必要である
- ◆Dai et al. 2018の再現が当面の目標で、まずはUWABAMIでの最初のテスト計算に成功した

[先行研究] 補足：円盤の初期条件

密度分布は複数テストランのうち、流入平衡が達成されるまで十分な大きさを保ちつつ、できるだけコンパクトであったものを選択

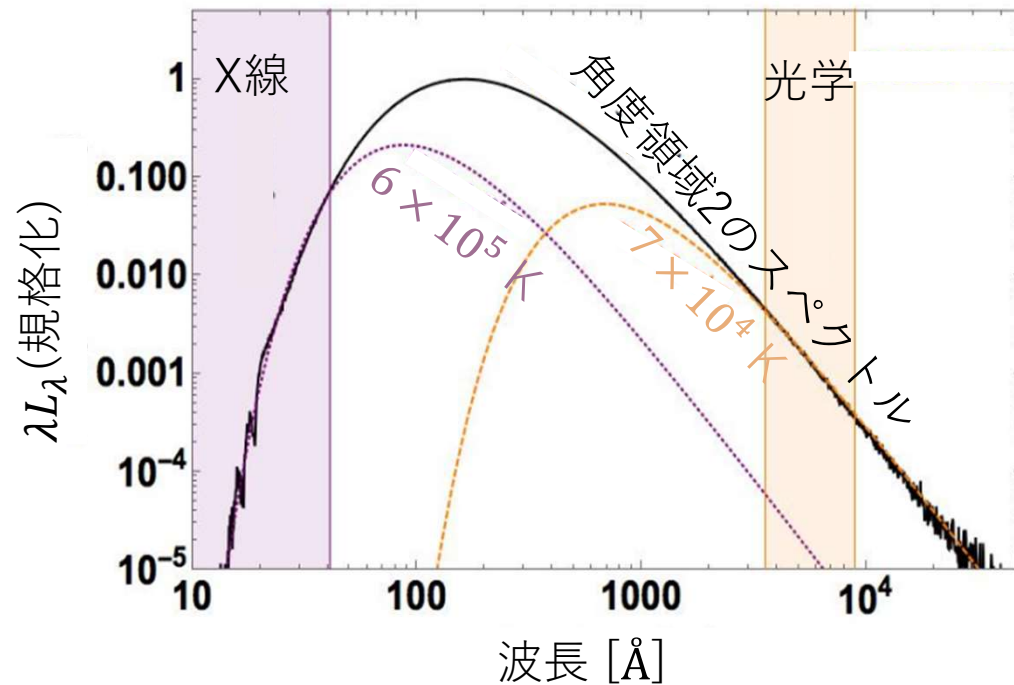
BHのごく近傍で起こるエネルギー出力は一降着速度に依存
降着速度が一般的なTDEと一致さえしていればシミュレーションは妥当

ガス組成比は太陽と同じ

-> 電子散乱オパシティは $\kappa_{\text{es}} = 0.2(1 + 0.7) [\text{cm}^2\text{g}^{-1}]$

放射と吸収は周波数平均オパシティ、コンプトン散乱を考慮

[先行研究] 補足：結果 推定温度



得られたスペクトルは黒体
輻射スペクトルより幅が広い

フィットする波長帯により
異なる推定温度が得られる
ことがわかる

図：角度領域2(22.5°～45°)のスペクトルと二つの
黒体輻射スペクトル(6×10^5 Kと 7×10^4 K)