

# 降着円盤の光度変動を考慮した ラインフォース駆動型円盤風の研究

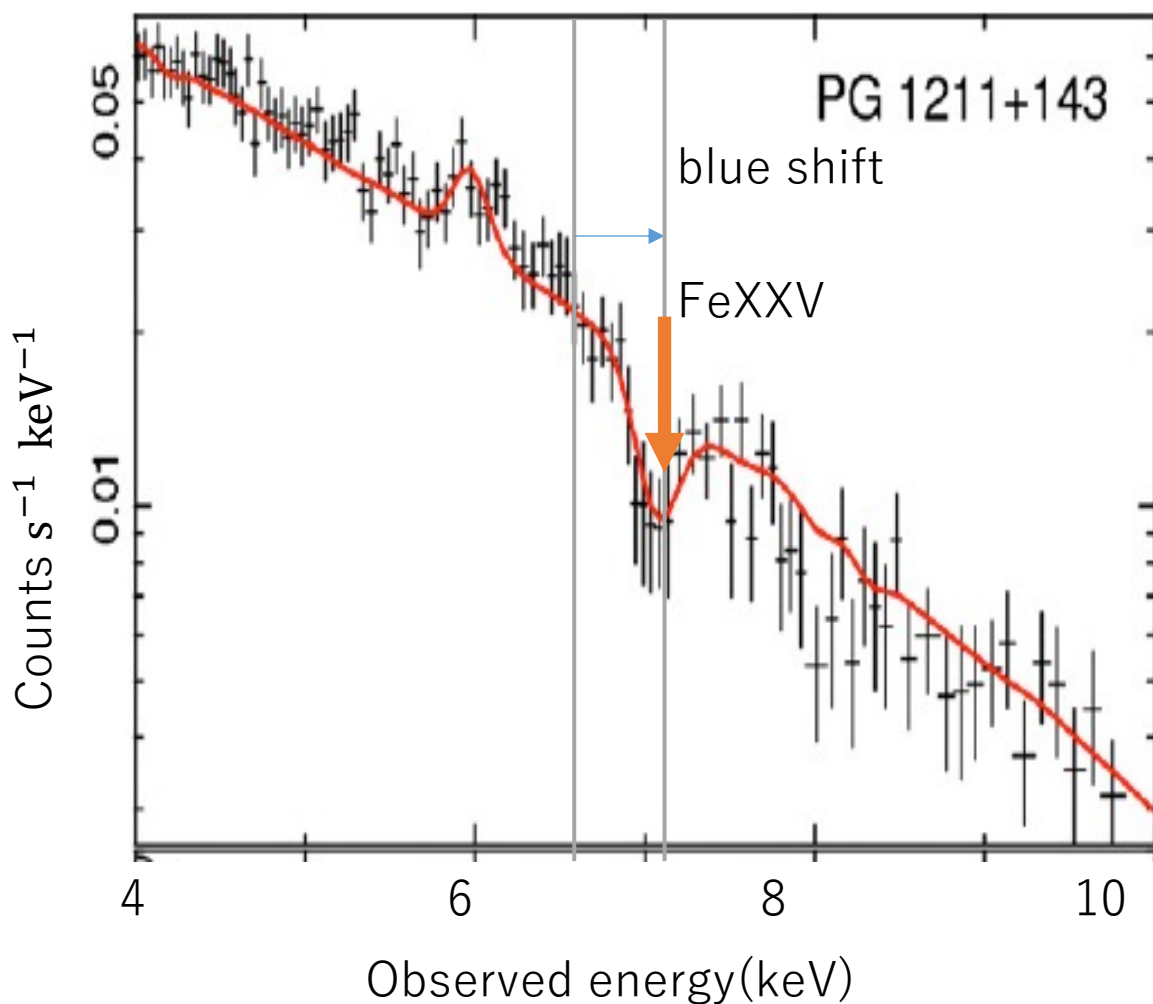
M1 黒田裕太郎(筑波大学)

共同研究者

大須賀健(筑波大学) 野村真理子(弘前大学)

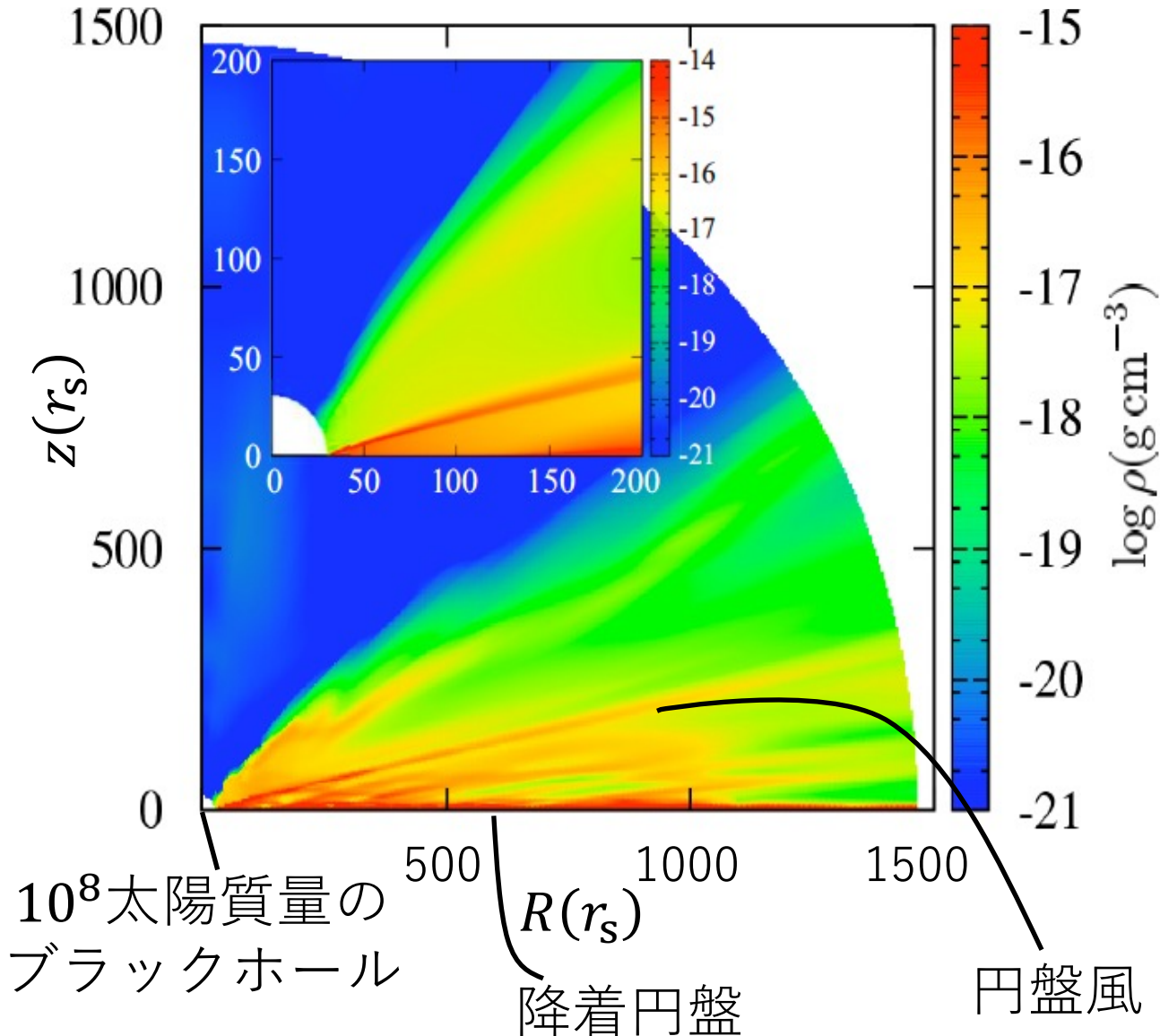
渡會兼也(金沢大学附属高校)

Tombesi et al 2011



- 活動銀河核(AGN)で発生
- 光速の約10パーセントの速度
- 青方偏移した吸収線のアウトフロー
- 巨大ブラックホールの成長過程や母銀河の星形成にも影響している
- 42個の電波静穏なAGNのうち、UFOを示す天体の確率は40% (Tombesi et al 2011)
- **起源は未だ不明**

Nomura et al 2015 log density



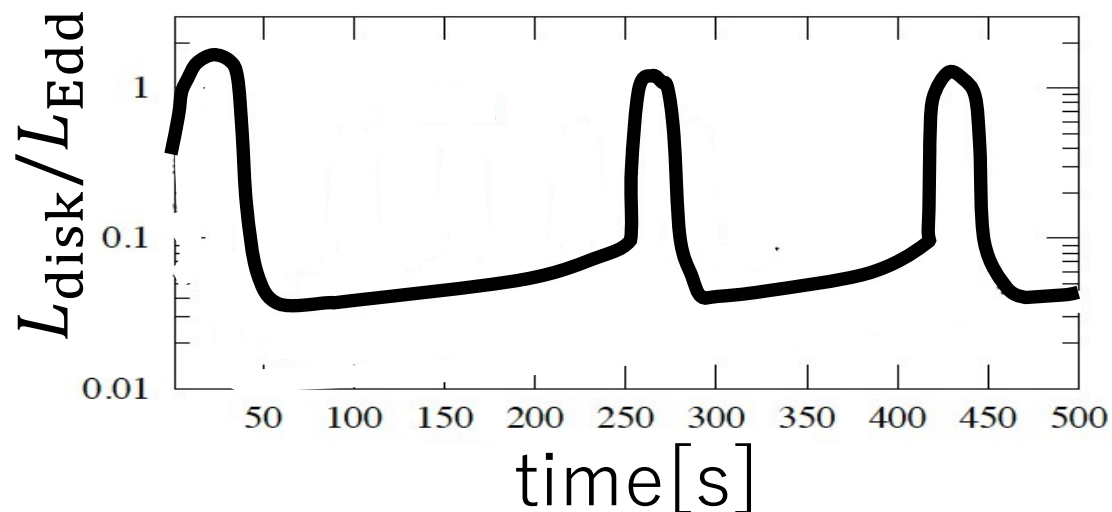
- Nomura et al. 2015の輻射流体計算により、UFOはAGNの約13~28%と推測した。これは観察された割合~40%(Tombesi et al 2011)と矛盾していない。
- Nomura et al. 2015では、定常な標準降着円盤を仮定しているが、**標準円盤で外部からいれる質量降着率が数 $L_{\text{Edd}}/c^2$ の時は光度変動することが知られている**

# 降着円盤の光度変動を考える理由

## 理論的側面

Watarai et al. 2003

- 1次元流体計算
- ブラックホールの質量10太陽質量
- 外部からいれる質量降着率 $3L_{\text{Edd}}/c^2$



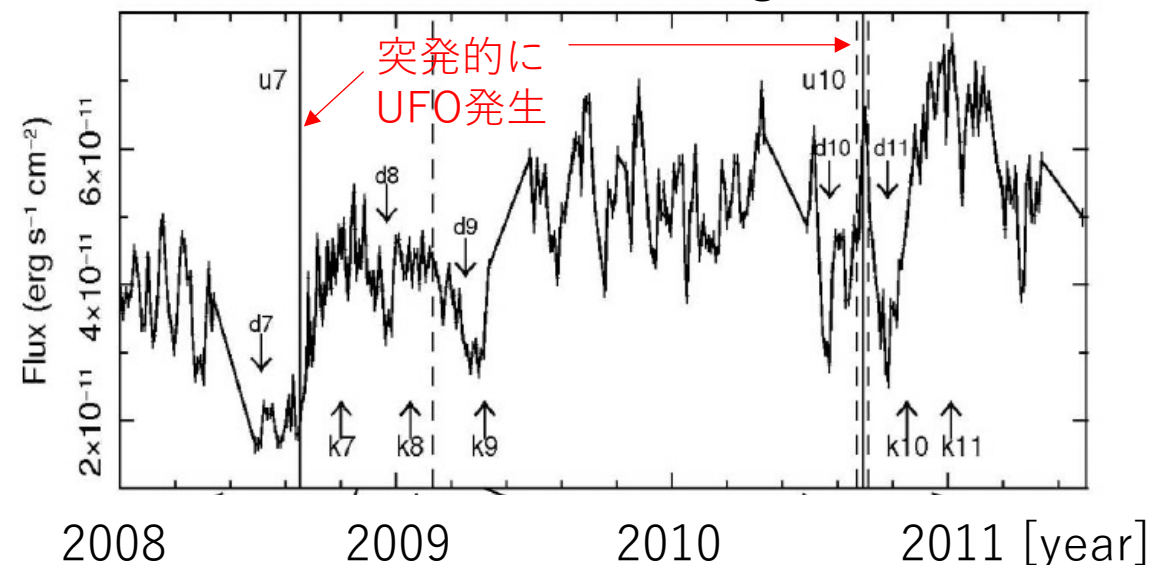
- 降着円盤の熱的不安定により周期的な光度変動が見られる
- 熱的不安定は観測結果も再現している

## 観測的側面

Tombesi et al. 2012

- 3C111をX線と電波で観測
- ブラックホールの質量 $10^8$ 太陽質量

2.4 – 10keV flux RXTE light curve



約1年ごとに突発的にUFOが見えている

**降着円盤の熱的不安定による光度変動とUFOが時間変動するため**

降着円盤の光度変動を考慮した  
ラインフォース駆動型円盤風の研究

発表内容

**降着円盤の熱的不安定で光度変動するラインフォース駆動型円盤風の構造を2次元輻射流体計算によって調査**

# 基礎方程式

- 降着円盤の回転軸を軸対称と仮定し、2次元輻射流体シミュレーションを実施
- 円盤上空のガスダイナミクスを計算
- 輻射源は降着円盤 & 点X線源（円盤コロナを想定）

連続の式 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

運動方程式 
$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left[ \frac{v_\theta^2}{r} + \frac{v_\psi^2}{r} + g_r + \underline{\mathbf{f}_{\text{rad},r}} \right] \\ \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \vec{v}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left[ -\frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_\psi^2}{r} \cot\theta + g_\theta + \underline{\mathbf{f}_{\text{rad},\theta}} \right] \\ \frac{\partial(\rho v_\psi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\psi \vec{v}) = -\rho \left[ \frac{v_\psi v_r}{r} + \frac{v_\psi v_\theta}{r} \cot\theta \right] \end{cases}$$

エネルギー方程式 
$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \vec{v} \left( \frac{1}{2} v^2 + e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \rho \vec{v} \cdot \vec{g} + \rho \vec{v} \cdot \underline{\vec{\mathbf{f}}_{\text{rad}}} + \rho \mathcal{L}$$

輻射  
冷却/加熱

$$\underline{\vec{\mathbf{f}}_{\text{rad}}} = \frac{\sigma_e \vec{F}_D}{c} + \frac{\sigma_e \vec{F}_{\text{line}}}{c} M(\xi, t)$$

電子散乱  
による力

ラインフォース

$M(\xi, t)$ : フォースマルチプライヤー  
電離パラメータ  $\xi(F_X, n)$   
光学的厚みパラメータ  $t$

輻射力

## □ 円盤光度( $L_D$ は3モデル計算)

- $L_D = 0.1L_{\text{Edd}}$
- $L_D = 0.6L_{\text{Edd}}$
- $L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$ , (5-8.3と24.8-28.1yearで $0.6L_{\text{Edd}}$ )

□ ブラックホール質量:  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$

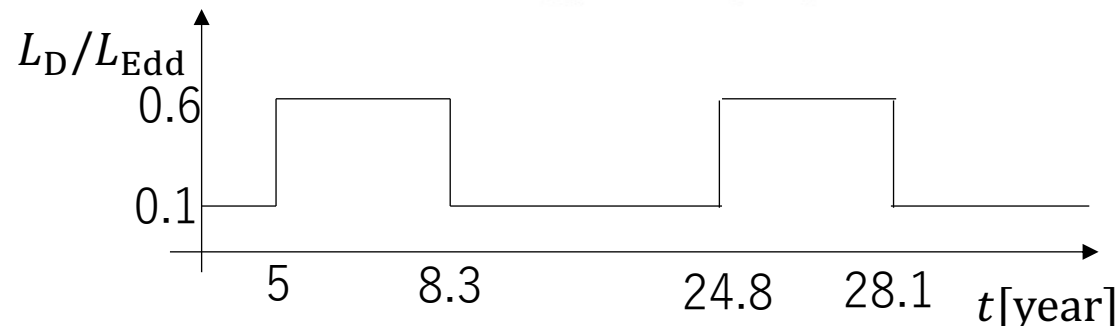
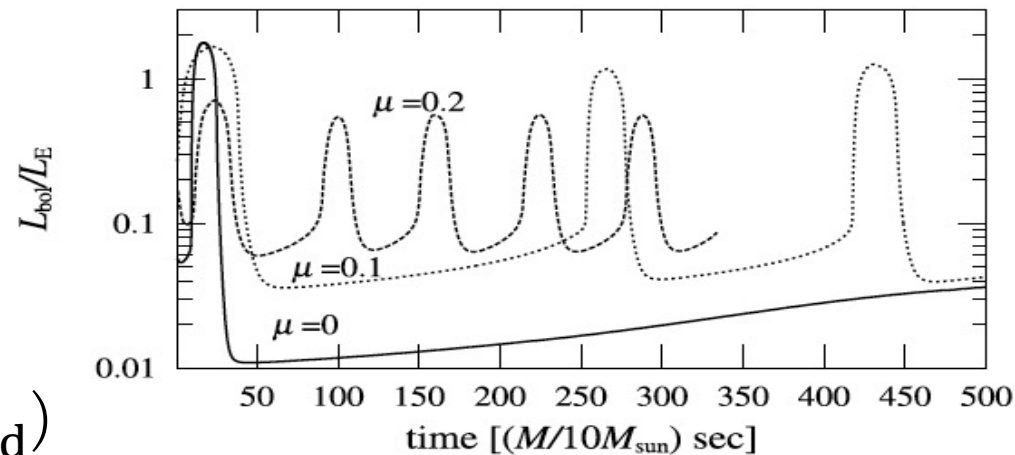
□ 点X線源の光度:  $L_X = 0.1L_D$

□ 空間グリッド:  $(N_r, N_{\theta}, N_{\psi}) = (148, 160, 1)$

□ 計算領域:  $r = [30r_s, 15000r_s]$   $\theta = [0^{\circ}, 90^{\circ}]$

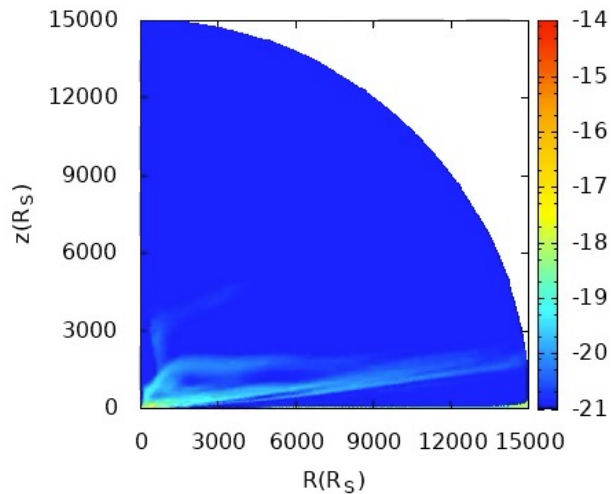
□ 初期条件: 降着円盤の垂直方向に静水圧平衡, ケプラー回転と設定

Watarai et al. 2003

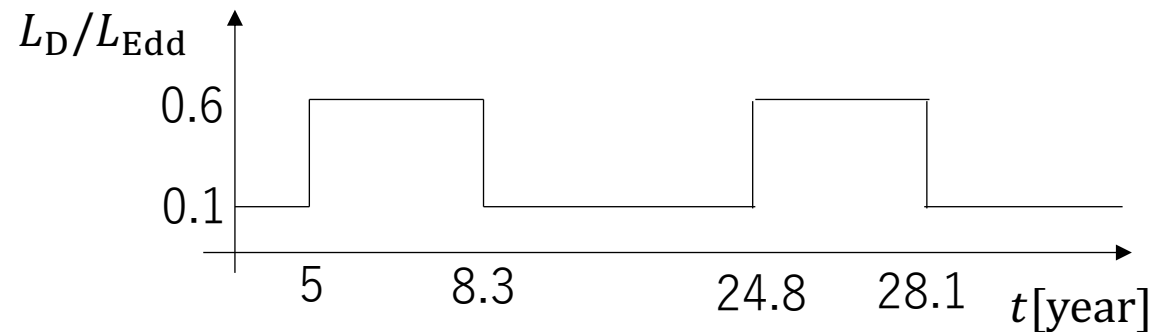


光度変動するモデル( $L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$ )の  
光度の時間依存性

$L_D = 0.1L_{\text{Edd}}$   $t=16.7$  year log density

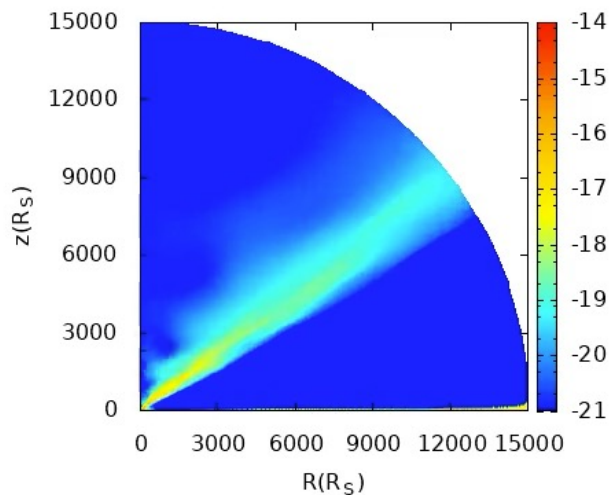


真横方向に  
円盤風発生



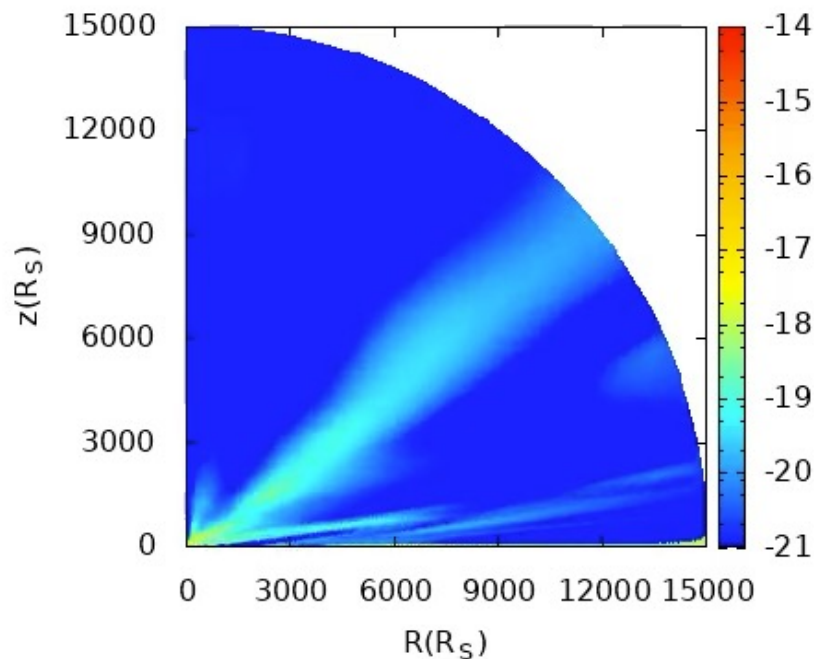
光度変動するモデル( $L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$ )の  
光度の時間依存性

$L_D = 0.6L_{\text{Edd}}$   $t=16.7$  year



右斜め上に  
円盤風発生

$L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$   $t=31.3$  year



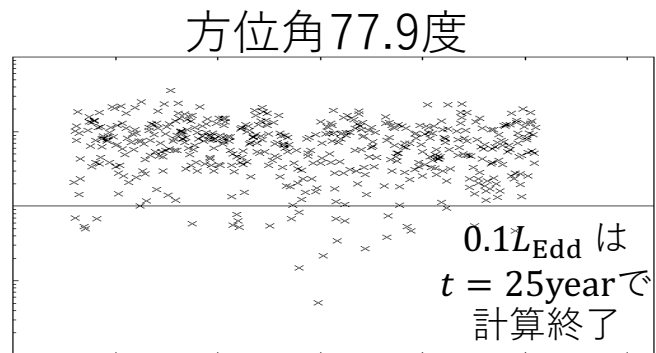
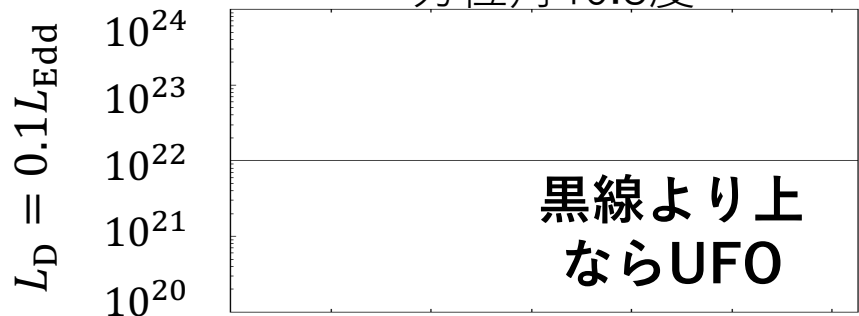
円盤光度が高い時に  
右斜め上に円盤風が発生  
円盤光度の低い時に  
横方向に円盤風が発生



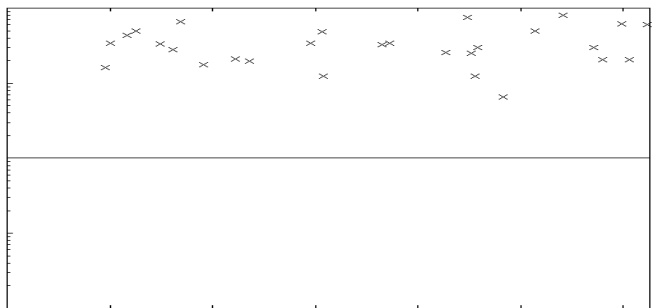
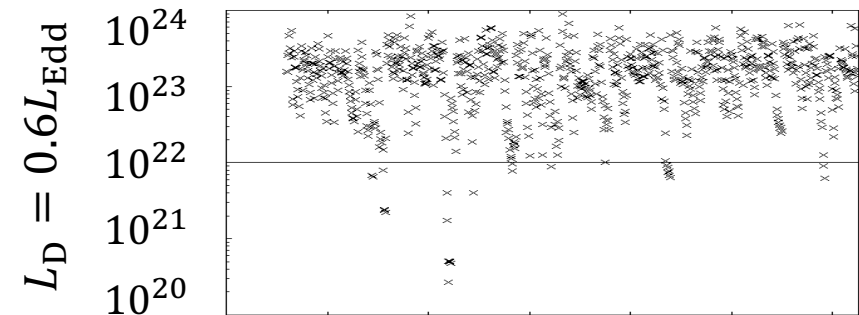
# 方位角を固定した時のUFO時間依存性

それぞれの方位角 $[\theta]$ で、 $2.5 \leq \log \xi < 5.5$ かつ速度 $10^4 \text{ km s}^{-1}$ 以上の物質の柱密度が $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 以上を満たす場合、UFOと定義する

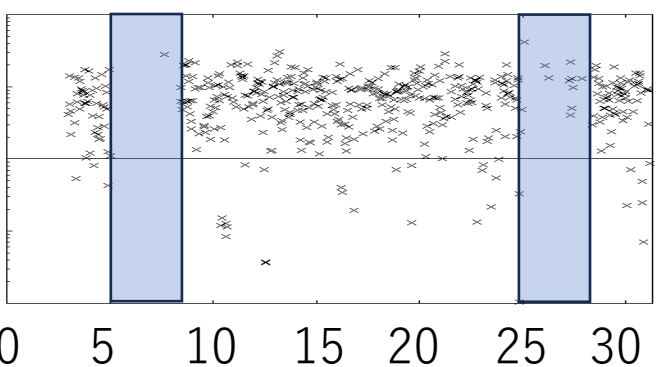
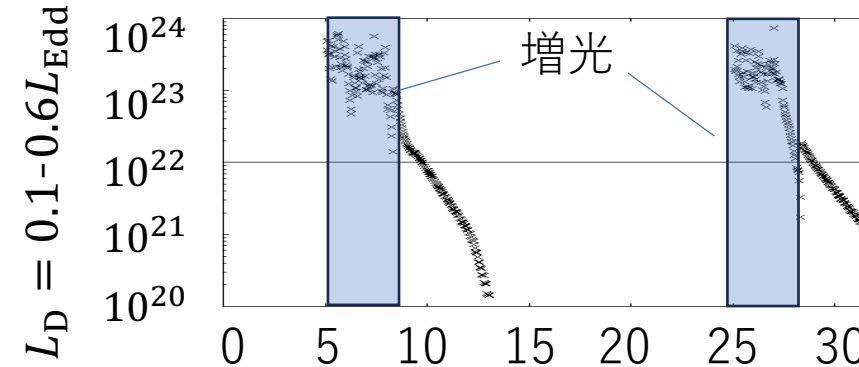
2.5  $\leq \log \xi < 5.5$ かつ速度 $10^4 \text{ km s}^{-1}$ 以上の物質の柱密度  
方位角46.8度



$0.1 L_{\text{edd}}$ には、大きい方位角でUFOになる

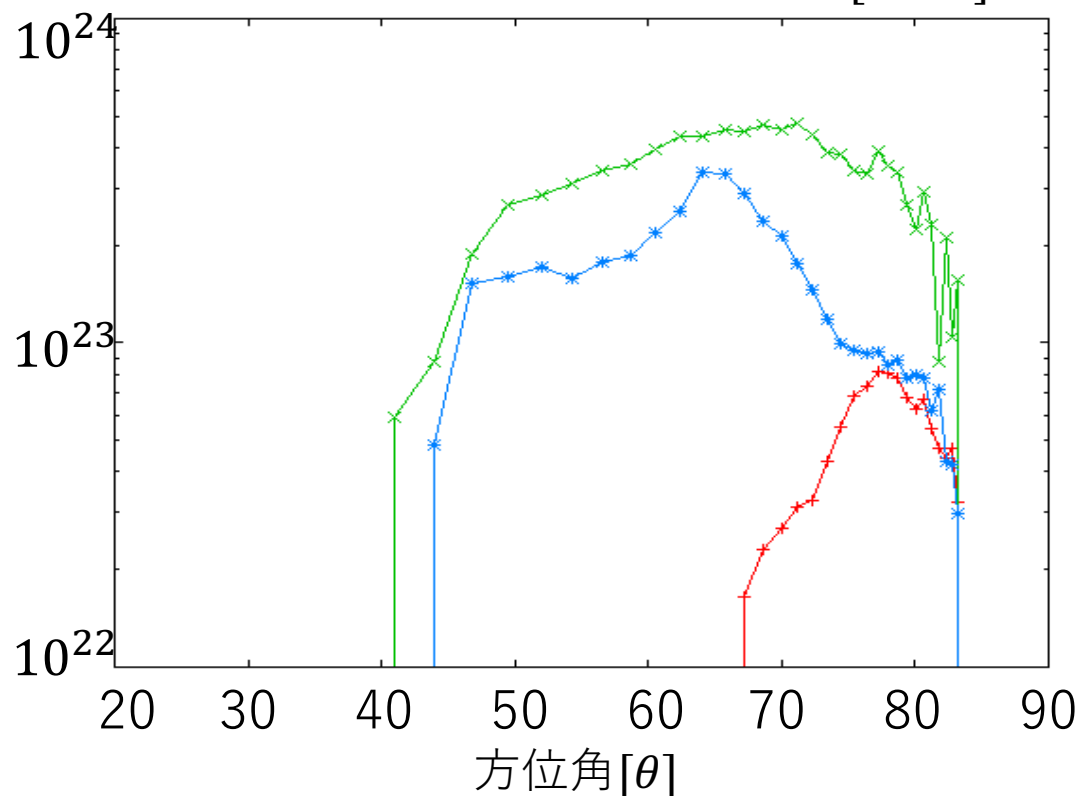


$0.6 L_{\text{edd}}$ 時には、小さい方位角でUFOになる



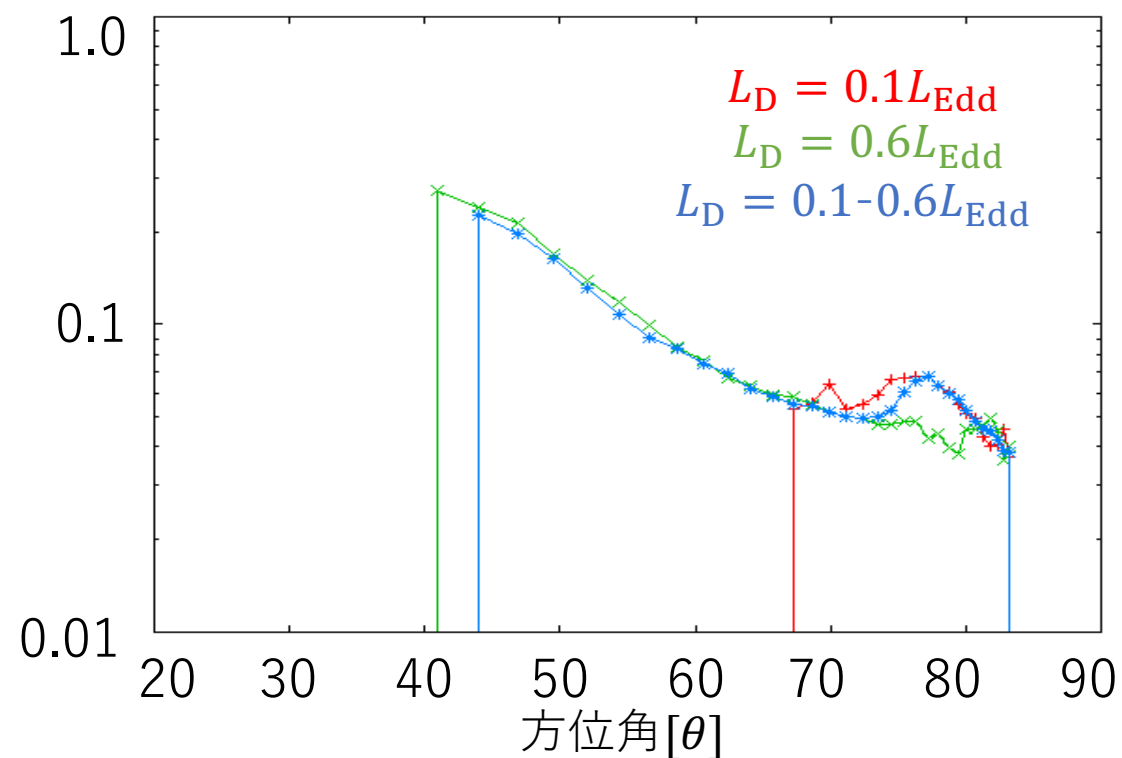
増光時に小さい方位角でUFOになり、  
静穏時は大きい方位角でUFOになる

$t[\text{year}]$

UFO時の柱密度の時間平均[ $\text{cm}^{-2}$ ]


UFOの条件を満たしている  $L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$  の柱密度は、 $L_D = 0.1L_{\text{Edd}}$  と比べると大きい、 $L_D = 0.6L_{\text{Edd}}$  と比べると小さくなった

- 吸収線の深さはモデルごとに依存する

 UFO時の密度平均した速度の時間平均[ $\text{cm/s}$ ]


特定の方角から見たUFO時の密度平均した  $L_D = 0.1-0.6L_{\text{Edd}}$  の速度は、73度未満では  $L_D = 0.6L_{\text{Edd}}$  とほぼ等しくなり、73度以上では  $L_D = 0.1L_{\text{Edd}}$  とほぼ等しくなった

- 光度変動のモデルと定常のモデルを比較しても、同じ振動数帯で吸収される

## まとめ

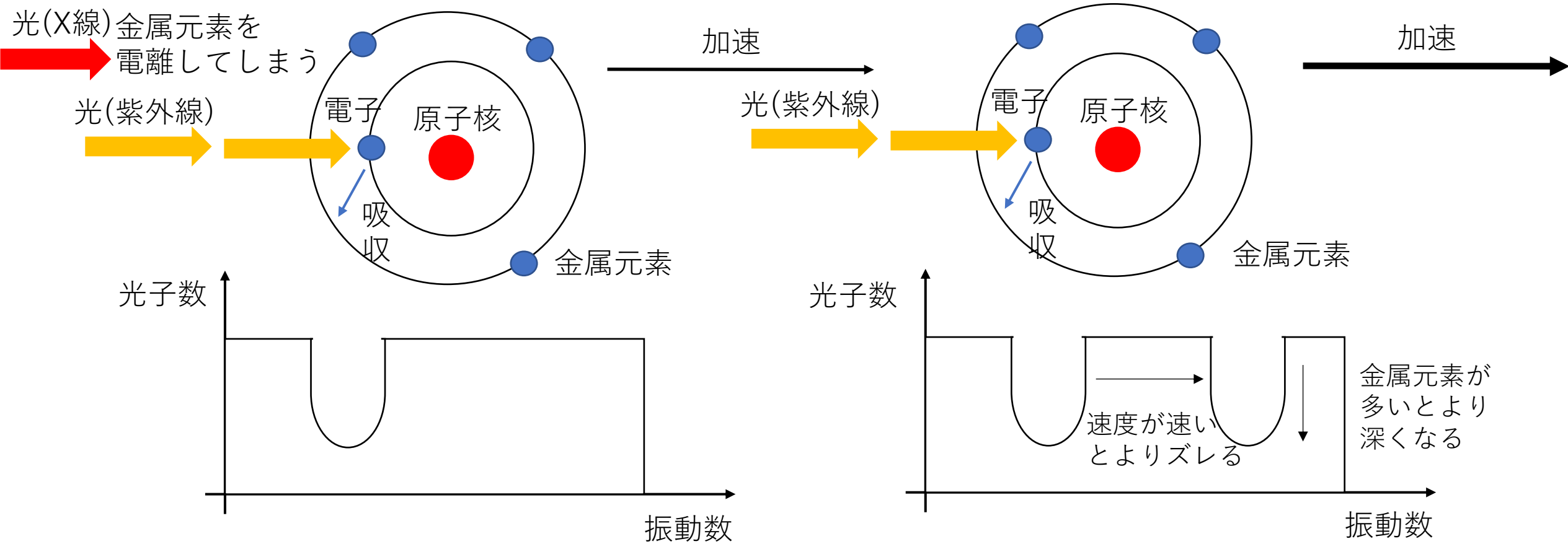
- 降着円盤の熱的不安定で光度変動するラインフォース駆動型円盤風の構造を2次元輻射流体計算によって調査
- 光度変動を計算したモデルでは、増光時には小さい方位角(46.8度)でUFOとなり、静穏期では大きい方位角(77.9度)でUFOとなる
- 静穏期で光度を定常にしたモデルと増光期で光度を定常にしたモデルを、光度変動したモデルで方位角ごとに比較した時、観測される吸収線のスペクトルの深さに差は見られるが、吸収される振動数は同じとなることがわかった

## 今後の展望

- 他の降着円盤の光度変動の周期を採用して計算して、観測と比較
- 降着円盤からのフラックスを降着円盤の熱的不安定による数値計算の有効温度を使用して計算

金属元素による束縛-束縛遷移吸収で特定の振動数の光子を吸収し、ガスを加速させる力(ラインフォース)

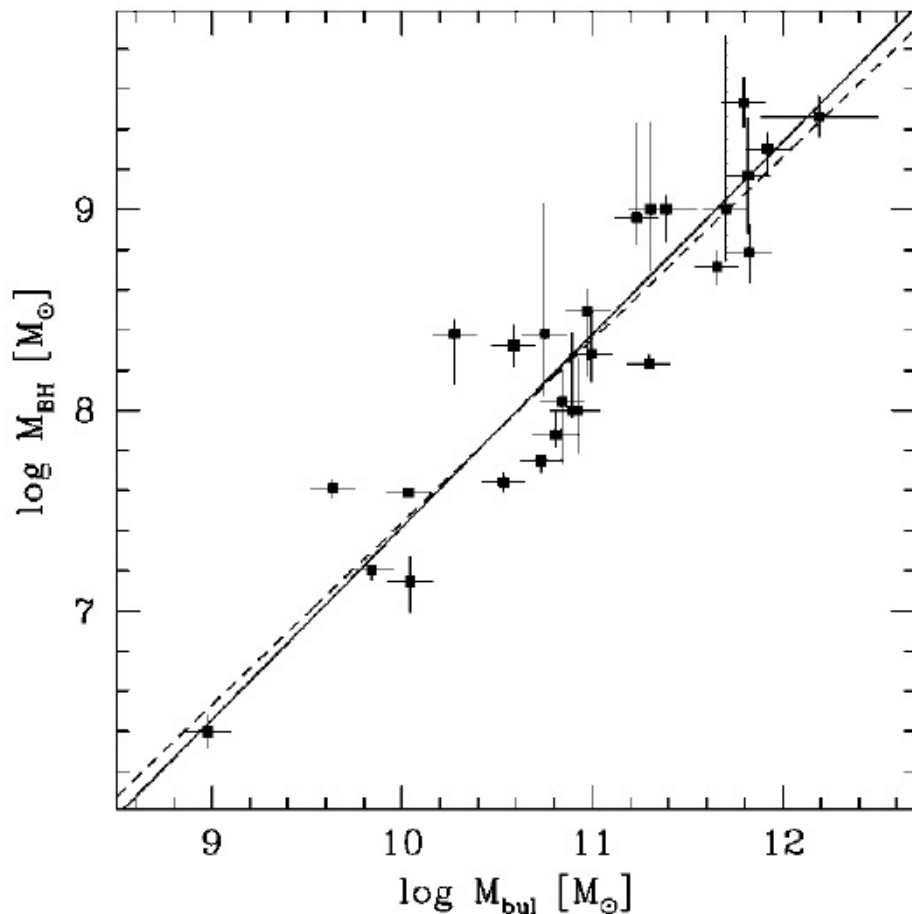
ドップラーシフトにより、吸収される光子の振動数がズレて、ふたたび加速



**ラインフォース駆動型円盤風は、UFOを説明できる可能性あり**

back up slide

Marconi and Hunt et al. 2003



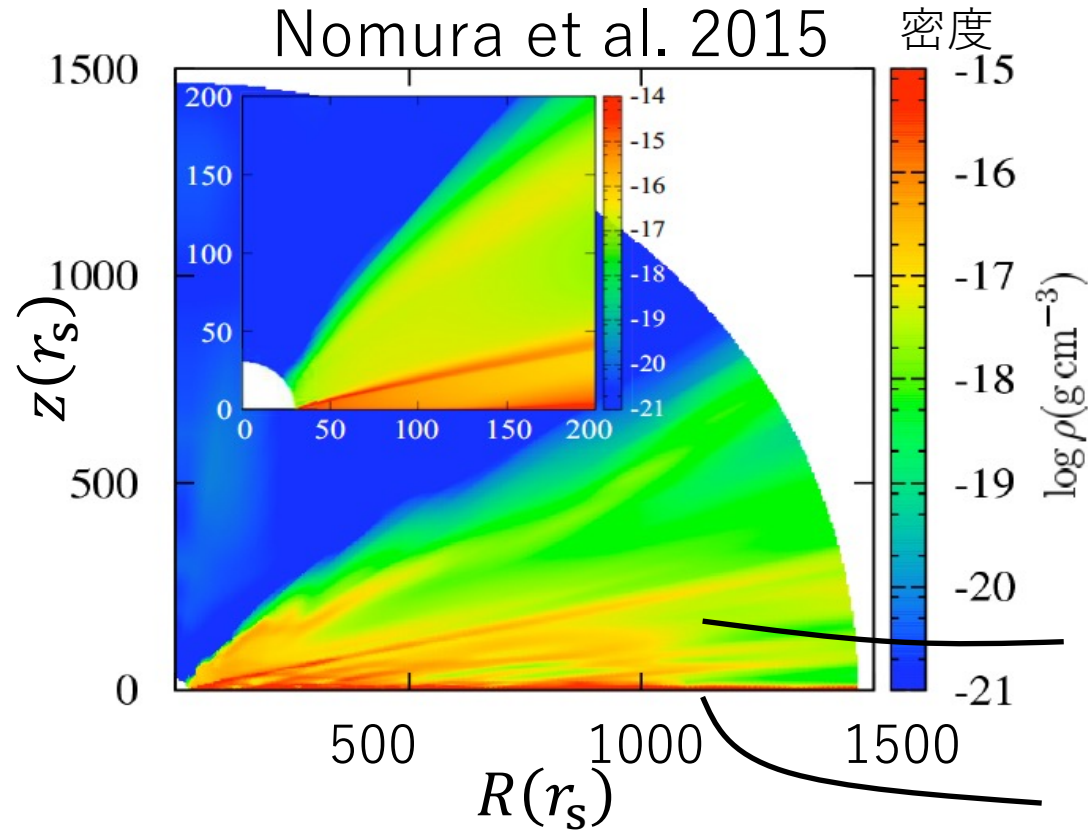
銀河中心の  
ブラックホール  
の質量

銀河のバルジの質量

- 銀河の中心に、巨大なブラックホールが存在する
- 銀河のバルジと中心のブラックホールには相関があることが観測からわかっている
- 活動銀河核(AGN)は銀河の中心の巨大ブラックホールの重力エネルギーを解放して膨大なエネルギー(jet, wind, radiation)を放出していると考えられており、とても明るい

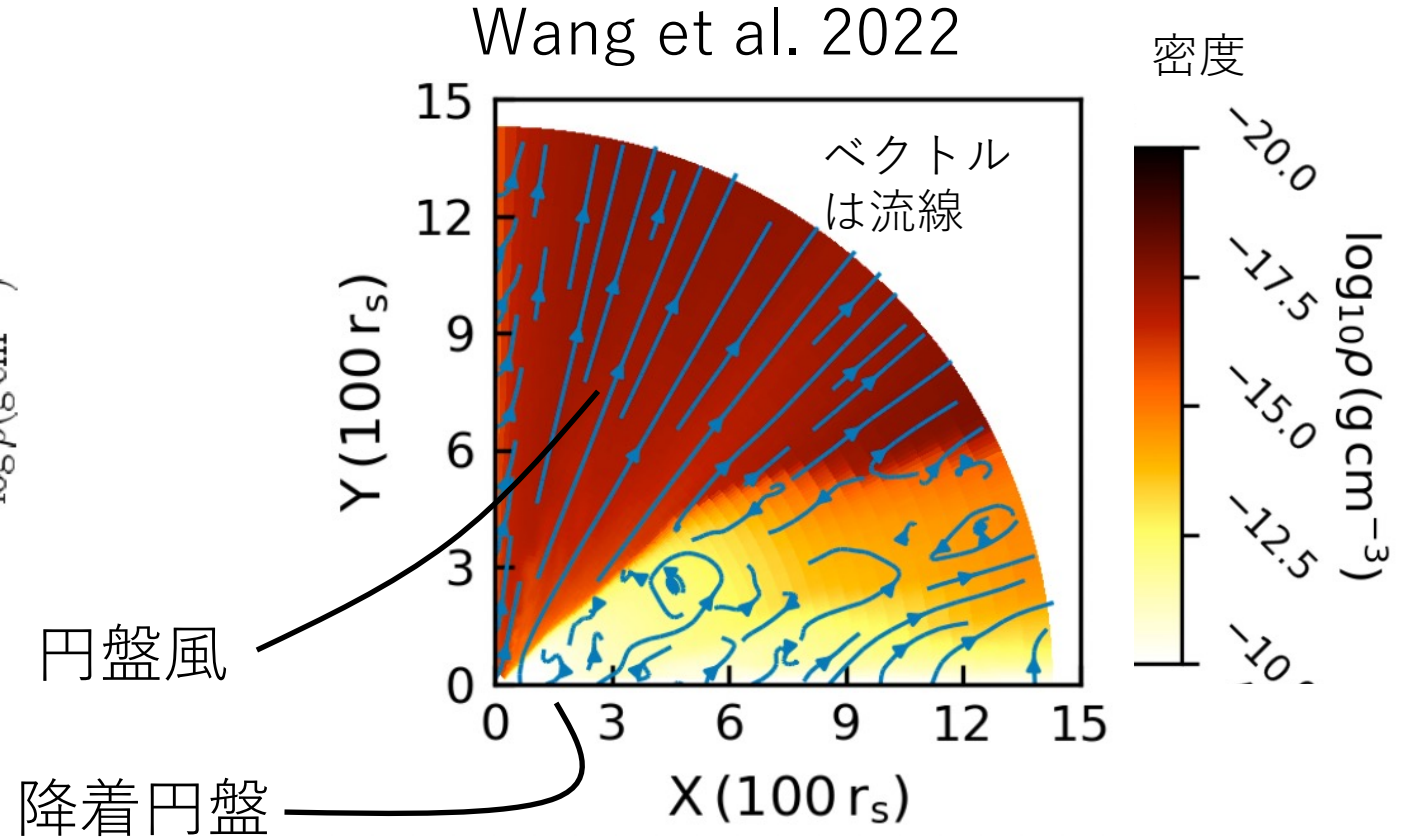
# UFOを説明できるモデルは?

## ■ ラインフォース駆動型円盤風



- 電子散乱と金属元素の束縛束縛遷移吸収による加速
- 降着円盤付近で円盤風が発生

## ■ 磁気駆動型円盤風

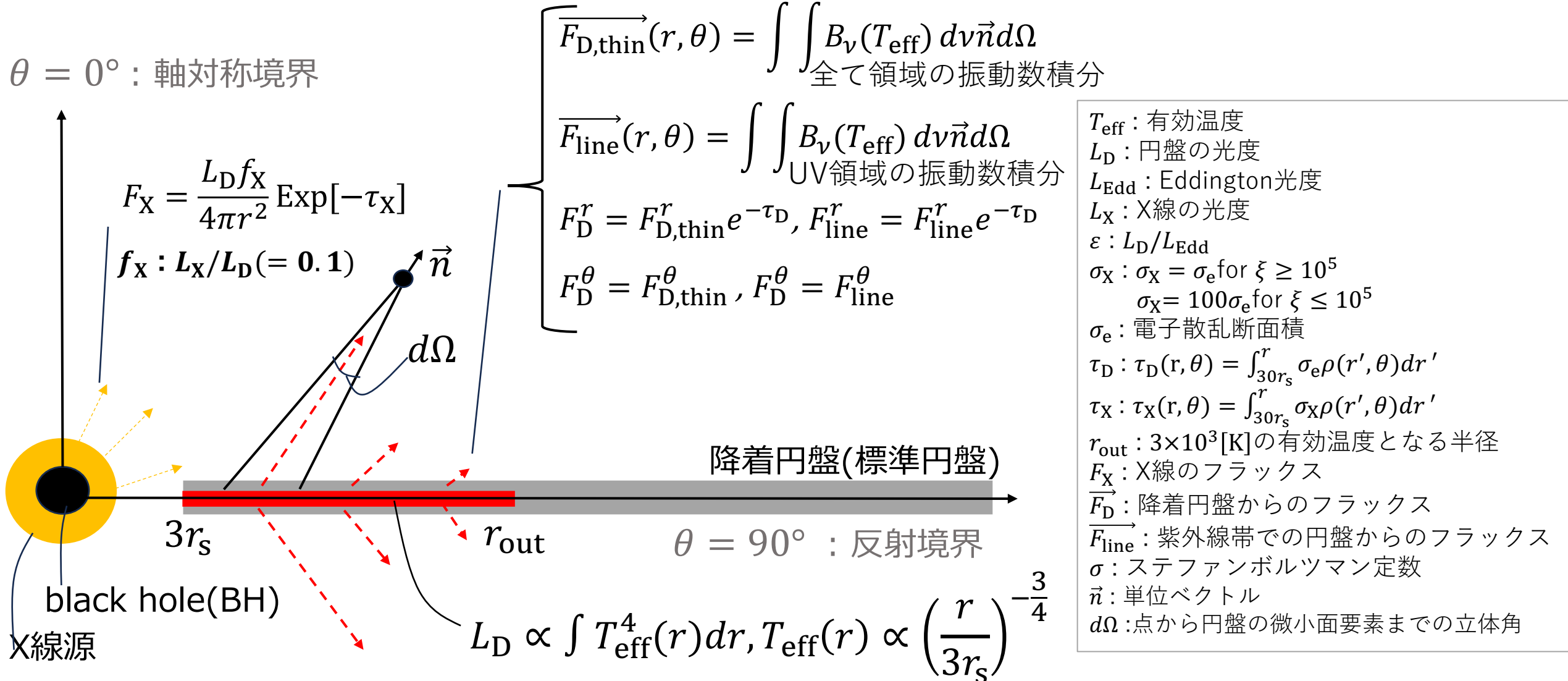


- 磁気( $r, \theta$ 方向の磁場)遠心力による加速
- 軸付近で円盤風が発生

どちらの可能性もあるが、今回はラインフォース駆動型円盤風にフォーカス

# 輻射フラックス (と境界条件)

- 輻射によるフラックスは、**中心のX線源由来**と**降着円盤由来**の2種類ある
- $r$ 方向のフラックスは減光する





# フォースマルチプライヤー $M(\xi, t)$

## □ $\xi$ (電離パラメータ)

- $\xi = \frac{4\pi F_X}{n}$

## □ $t$ (光学的厚みパラメータ)

- $t = \sigma_e \rho v_{th} \left| \frac{dv}{dr} \right|^{-1}$

## □ $M(\xi, t)$ (フォースマルチプライヤー)

- $M(\xi, t) = kt^{-0.6} \left[ \frac{(1+t\eta_{max})^{0.4} - 1}{(t\eta_{max})^{0.4}} \right]$

- $k = 0.03 + 0.385 \exp[-1.4\xi^{0.6}]$

- $\log_{10}\eta_{max} = 6.9 \exp[0.16\xi^{0.4}] \dots \log\xi \leq 0.5$   
 $= 9.1 \exp[-7.96 \times 10^{-3}\xi] \dots \log\xi \geq 0.5$

- $t$  または  $\xi$  が小さいほど、フォースマルチプライヤーは大きくなる。

$n$ : 数密度

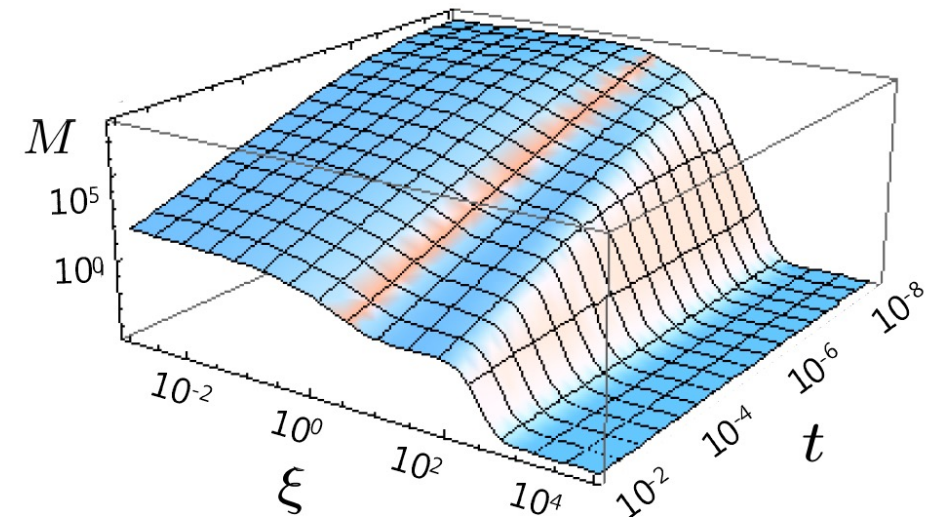
$F_X$ : X線のフラックス

$$\tau_X: \tau_X(r, \theta) = \int_{30r_s}^r \sigma_X \rho(r', \theta) dr'$$

$\sigma_X$ :  $\sigma_X = \sigma_e$  for  $\xi \geq 10^5$

$\sigma_X = 100\sigma_e$  for  $\xi \leq 10^5$

$v_{th}$ : 熱速度 ( $20 \text{ km s}^{-1}$ )



$M(\xi, t)$  のプロファイル

連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

運動方程式

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \vec{v}) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left[ \frac{v_\theta^2}{r} + \frac{v_\psi^2}{r} + g_r + f_{\text{rad},r} \right] \\ \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \vec{v}) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left[ -\frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_\psi^2}{r} \cot\theta + g_\theta + f_{\text{rad},\theta} \right] \\ \frac{\partial(\rho v_\psi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\psi \vec{v}) &= -\rho \left[ \frac{v_\psi v_r}{r} + \frac{v_\psi v_\theta}{r} \cot\theta \right] \end{aligned} \right.$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \vec{v} \left( \frac{1}{2} v^2 + e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \rho \vec{v} \cdot \vec{g} + \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_{\text{rad}} + \rho \mathcal{L}$$

$\gamma : \gamma = 5/3$

$(r, \theta, \psi)$ : 球座標

$\rho$ : 密度

$\vec{v}$ : 速度  $(v_r, v_\theta, v_\psi)$

$p$ : ガス圧

$\vec{g}$ : 重力加速度

$n$ : 数密度

$G_{\text{Compton}}$ : コンプトン 加熱/冷却

$G_X$ : X線光電離加熱と再結合冷却の割合

$L_{b,1}$ : 制動放射とライン冷却

$\mathcal{L}$ : 輻射 加熱/冷却  $(n^2(G_{\text{Compton}} + G_X - L_{b,1}))$

$e$ : 単位質量あたりの内部エネルギー  $\left( e = \frac{P}{\rho} \left( \frac{1}{\gamma-1} \right) \right)$

$\vec{f}_{\text{rad}}$ : 輻射力  $(\vec{f}_{\text{rad}} = \frac{\sigma_e \vec{F}_D}{c} + \frac{\sigma_e \vec{F}_{\text{line}}}{c} M)$

$\sigma_e$ : 単位質量あたりの電子散乱断面積

$\vec{F}_D$ : 円盤からのフラックス

$\vec{F}_{\text{line}}$ : 紫外線帯での円盤からのフラックス

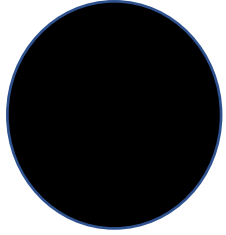
$\xi$ : 電離パラメータ

$t$ : 光学的厚みパラメータ

$M(\xi, t)$ : フォースマルチプライヤー

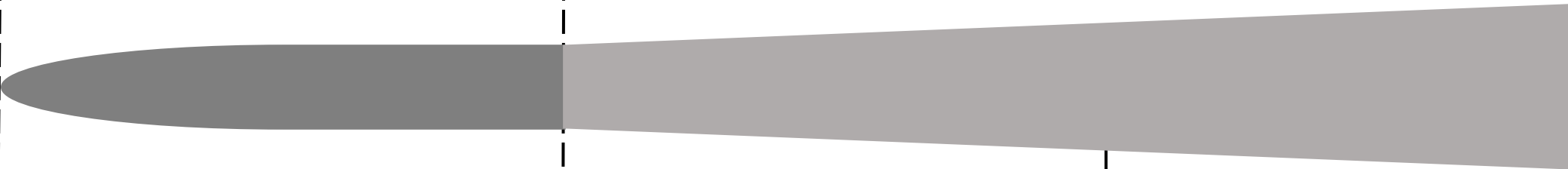
\*  $\vec{F}_D, \vec{F}_{\text{line}}, \xi, t, M(\xi, t)$  は後で説明

ブラックホール  
(BH)



スリム円盤

標準円盤



輻射圧優勢領域

ガス圧優勢領域

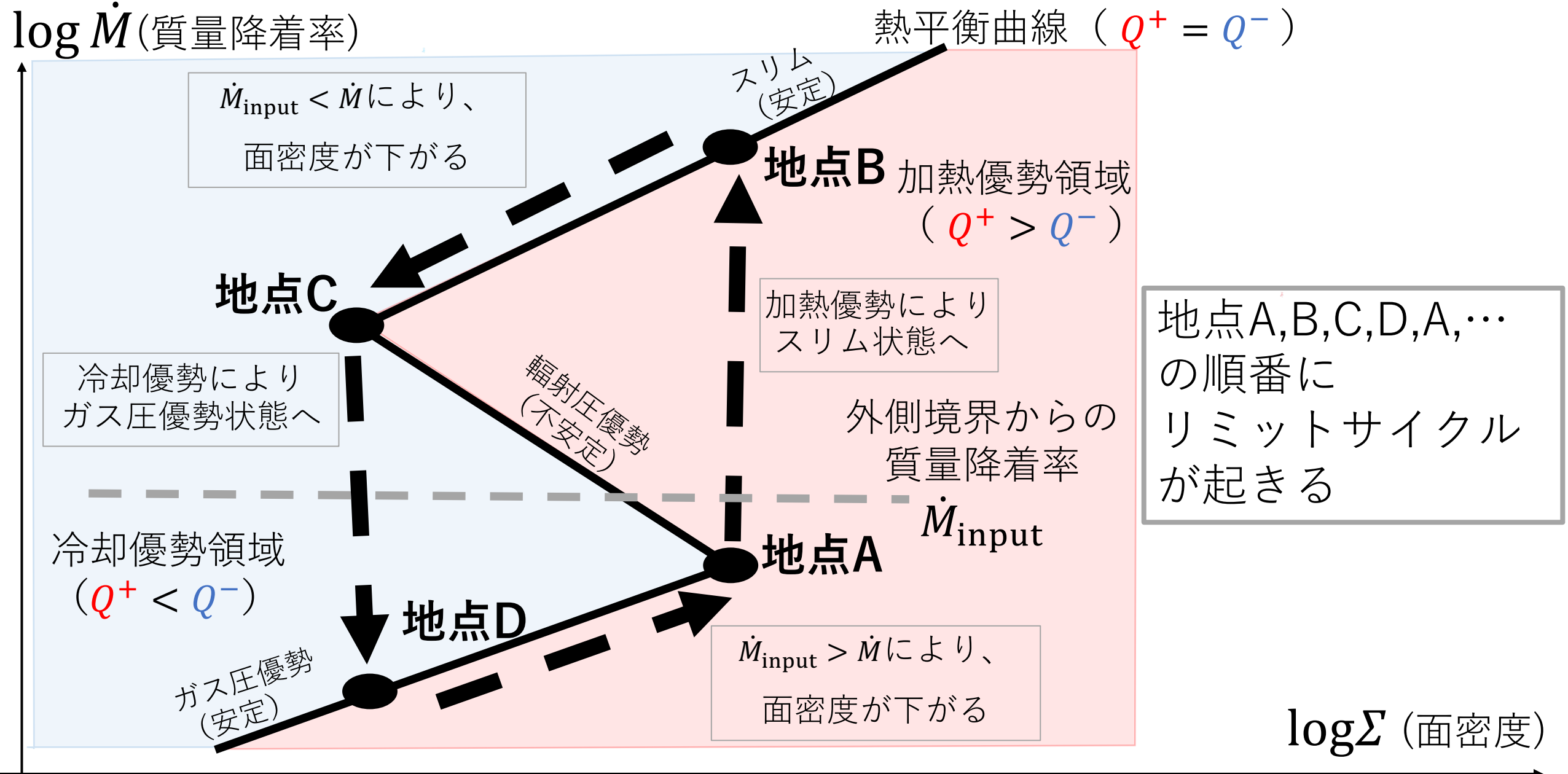
加熱率 $Q^+$	粘性加熱 $T^{-7\mu+8}$	粘性加熱 $T^{-7\mu+8}$	粘性加熱 $T^1$
冷却率 $Q^-$	移流冷却 $T^{-7\mu+16}$	放射冷却 $T^4$	放射冷却 $T^8$
安定/不安定	安定	不安定 ( $\mu < \frac{4}{7}$ )	安定

$T$  : 赤道面上の温度

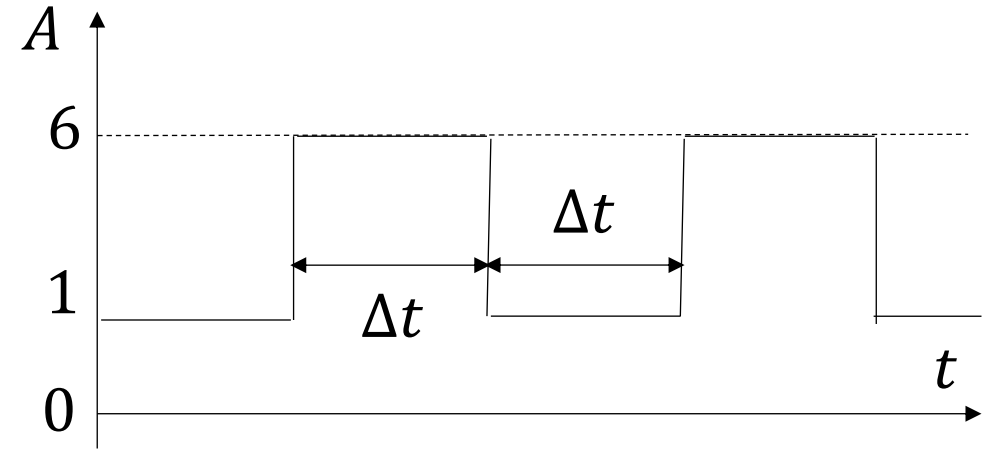
$\frac{dQ^+}{dT} > \frac{dQ^-}{dT}$  だと熱的不安定.

➤ なぜなら、温度が上がった(下がった)場合、より加熱(冷却)されて再び温度が上がる(下がる)ため.

# 周期的変動の原因(2):リミットサイクル



- ブラックホール質量： $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$
- 円盤光度： $L_{\text{D}} = 0.1 A L_{\text{Edd}}$ 
  - A1 ( $A = 1$ で定常)
  - A6 ( $A = 6$ で定常)
  - T3 ( $\Delta t = 10^3 t_{\text{g}}$  (0.033年) 間隔で  $A = 1 \leftrightarrow A = 6$ )
  - T4 ( $\Delta t = 10^4 t_{\text{g}}$  (0.33年) 間隔で  $A = 1 \leftrightarrow A = 6$ )



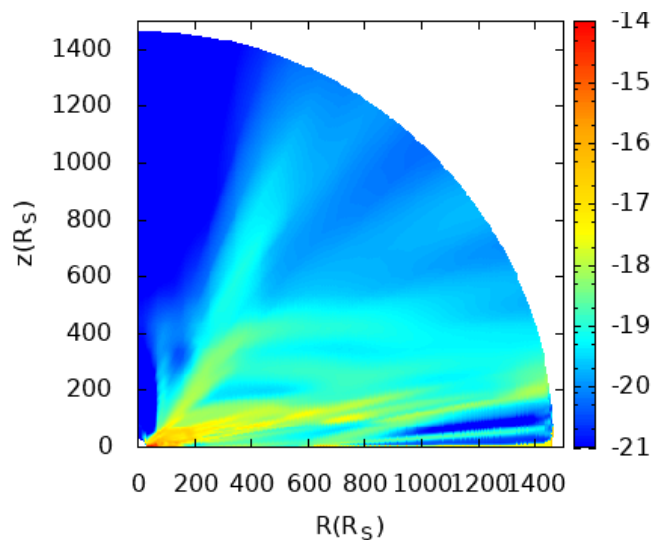
T3, T4のイメージ図

- 点X線源の光度： $L_{\text{X}} = 0.1 L_{\text{D}}$
- 空間グリッド： $(N_r, N_{\theta}, N_{\psi}) = (100, 160, 1)$
- 計算領域： $r = [30 r_s, 1500 r_s]$   $\theta = [0^\circ, 90^\circ]$
- 初期条件：降着円盤の垂直方向に静水圧平衡, ケプラー回転と設定

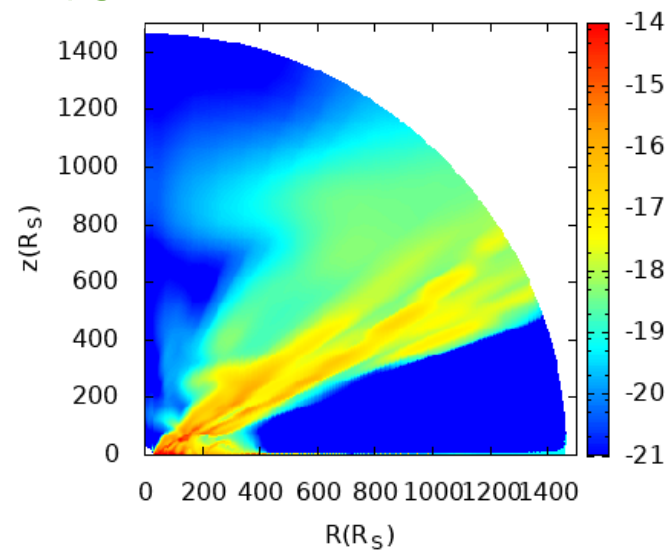
## 結果(密度分布)

モデルA1

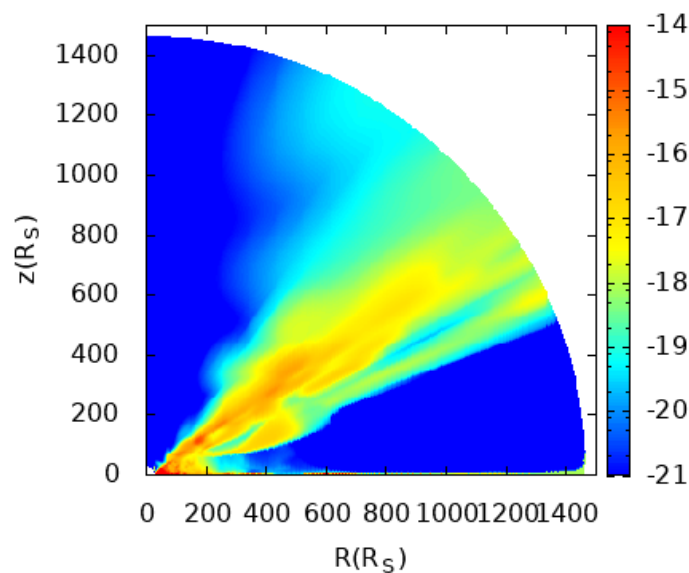
log density



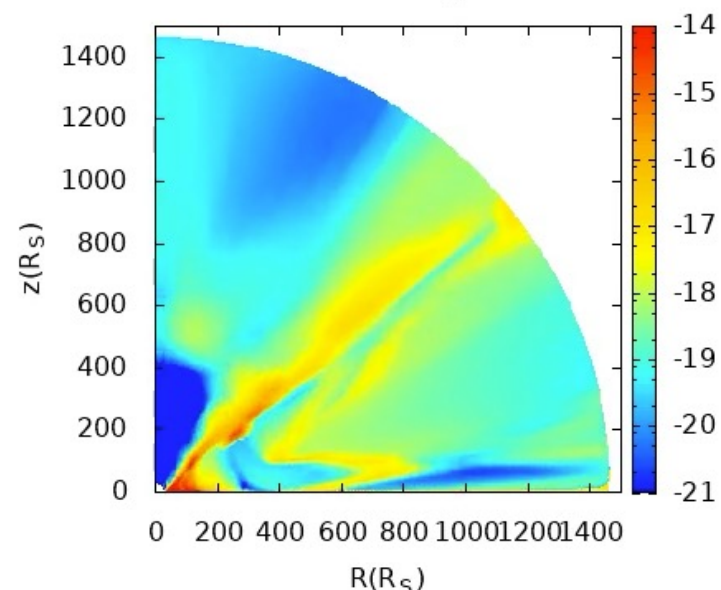
モデルT3



モデルA6



モデルT4

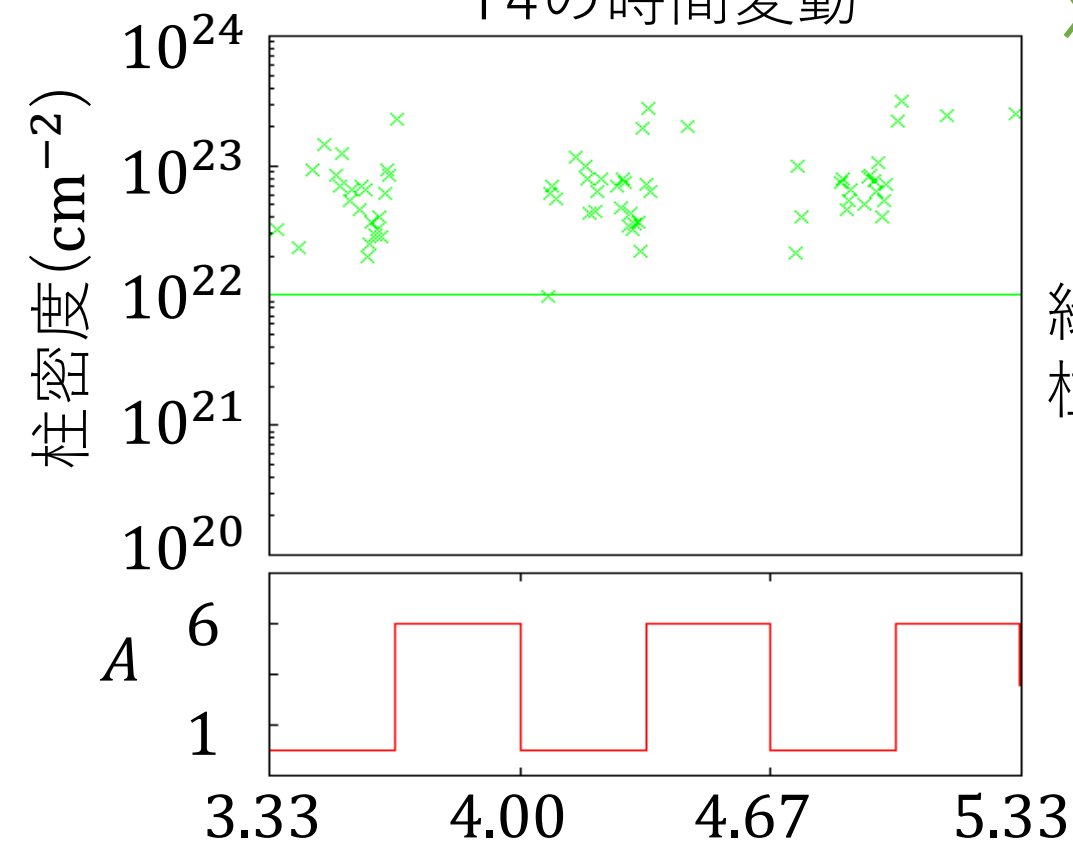

 $t=161200 t_{g,0}$ 

0だと、 $A=1$ (静穏期)  
1だと、 $A=6$ (増光期)

# 方位角75度から見た時のT4のUFOの時間変動

それぞれの方位角 $[\theta]$ で、 $2.5 \leq \log \xi < 5.5$ かつ速度 $10^4 \text{ km s}^{-1}$ 以上の物質の柱密度が $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 以上を満たす場合、UFOと定義する

方位角75度から見た時の  
T4の時間変動



X  $2.5 \leq \log \xi < 5.5$   
かつ速度 $10^4 \text{ km s}^{-1}$   
以上の物質の  
柱密度

緑線よりも大きい  
柱密度だとUFO

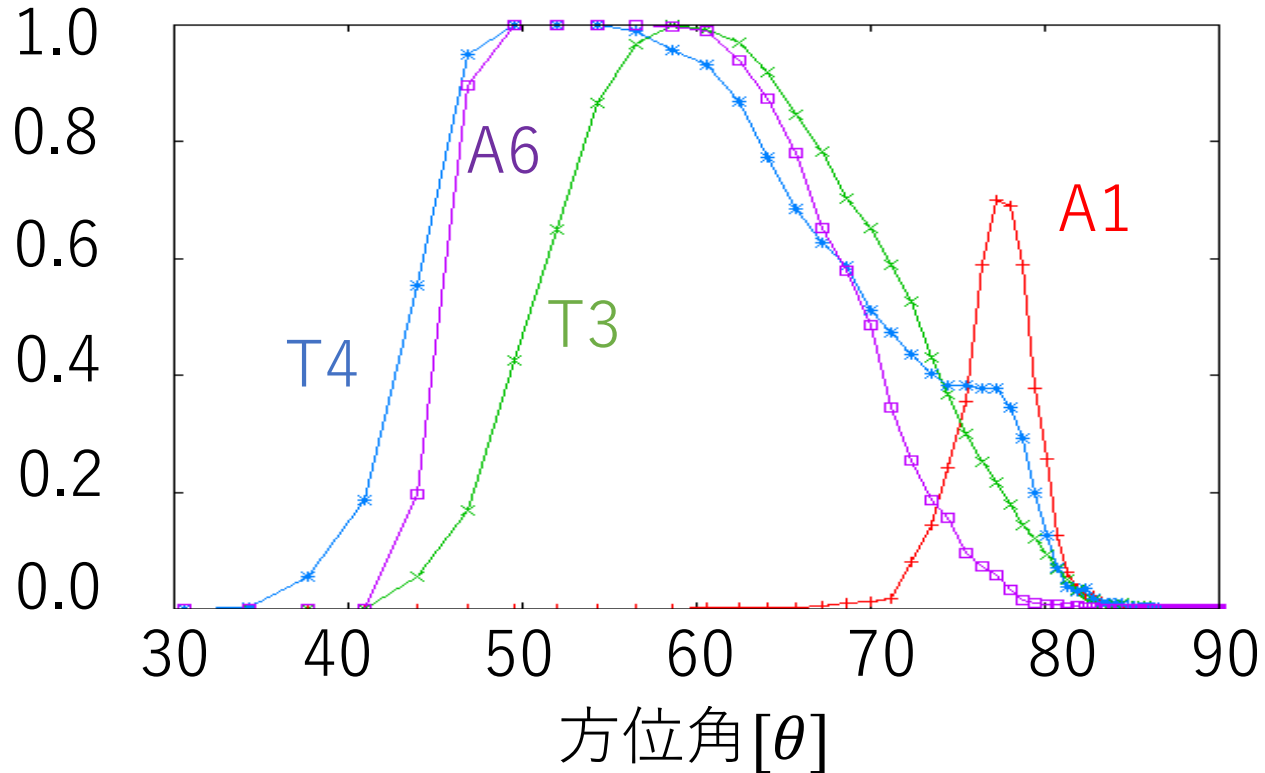
円盤光度：  
 $L_D = 0.1AL_{\text{Edd}}$

$t[\text{year}]$

- 増光する時にUFOが見えるようになる
- 約0.66yearの時間間隔でUFOが発生
- **約1年ごとに突発的にUFOが見えている観測結果 (Tombesi et al . 2012)はT4の方位角75度の計算結果で再現可能**

# UFOの角度依存性とUFOの観測確率

UFOが検出される確率(時間平均)の角度分布

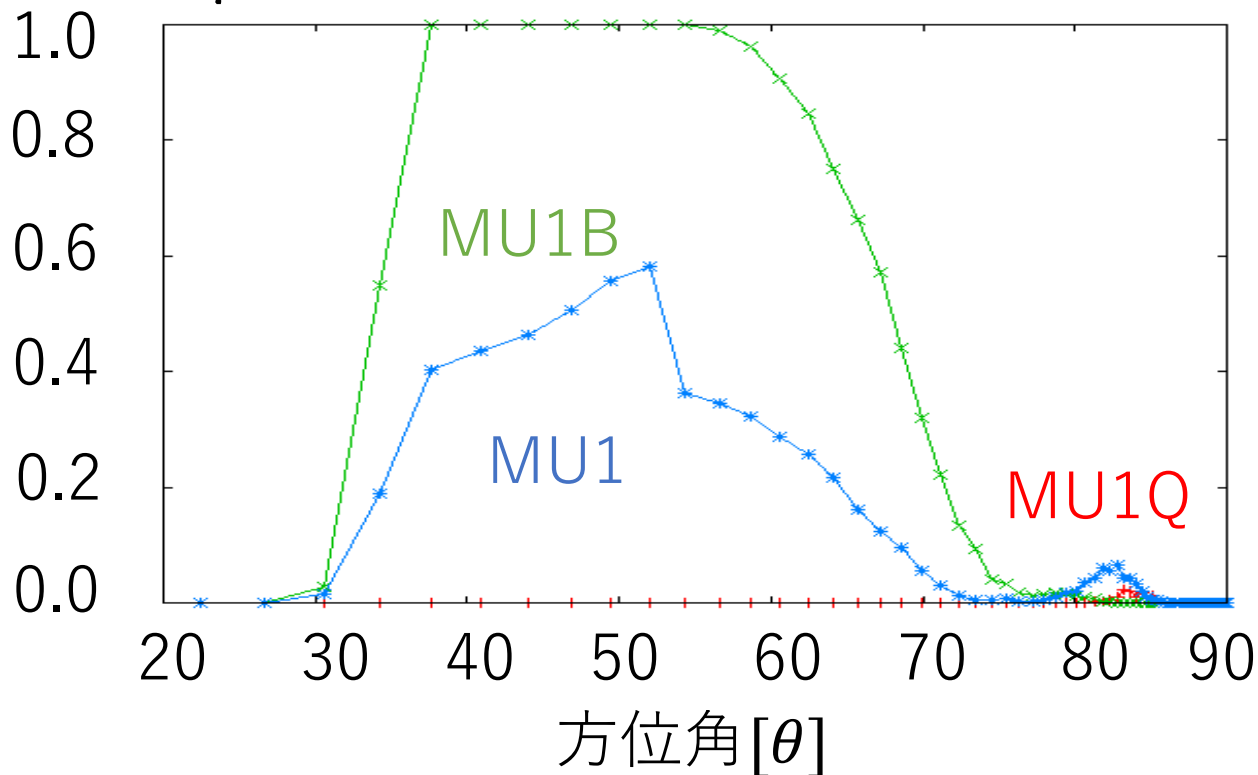


- T3のピーク方位角(UFO観測確率が最大の方位角)はA1とA6のピーク方位角の間にある
- T4はUFO観測確率の方位角方向の領域の広がりが大きく、A6と同じピーク方位角
- T3のUFO観測確率はA1とA6のUFO観測確率の間になる
- T4のUFO観測確率はA6のUFO観測確率より大きい
- **T4のUFO観測確率の値が最も観測結果の値(約40%)と近くなる**

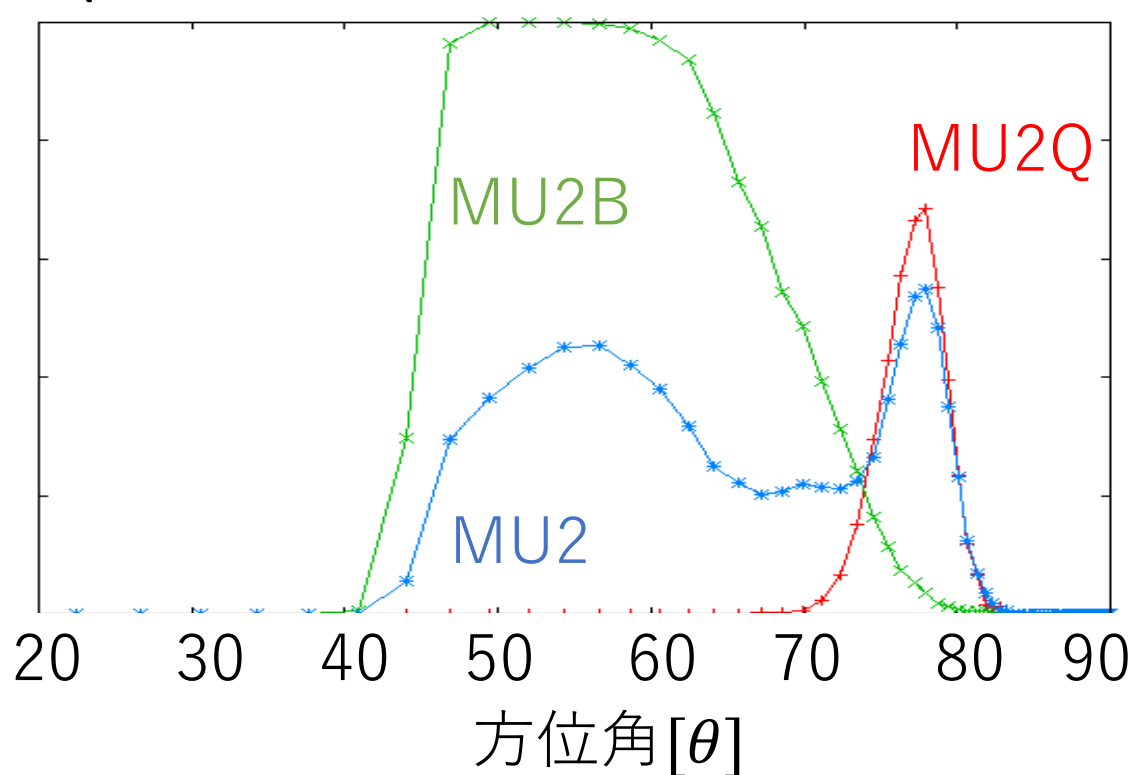
モデル名	A1	A6	T3	T4	Tombei et al. 2011
UFOの観測確率	5.97%	35.7%	33.5%	<b>40.9%</b>	約40%



$\mu = 0.1$ の場合でのUFOの観測確率



$\mu = 0.2$ の場合でのUFOの観測確率



モデル名	MU1B	MU1Q	MU1
UFOの観測確率	44.8%	0.0831%	17.8%

MU2B	MU2Q	MU2
36.2%	5.91%	18.4%

- MU1はMU1B,MU1Qを重ね合わせたような方位角分布となっている(MU2も同じく)
- MU1はMU1BとMU1Qの間の観測確率になっている(MU2も同じく)