



ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

福江 純@大阪教育大学




ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

- 1 Introduction (Introduction and Observations)
- 2 Physical Processes
- 3 Classical Models
- 4 Secular and Thermal Instabilities
- 5 Dwarf-Nova Type Instability $\times$
- 6 Observability of Relativistic Effects
- 7 Basic Equations
- 8 Transonic Flow
- 9 Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
- 10 Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
- 11 Basics of Disk Oscillations
- 12 Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 2




ブラックホール降着円盤の物理

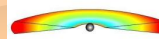
Black-Hole Accretion Disks: Revised

1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability $\times$
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks

1 Introduction

1. Accretion Energy-Historical Origin
2. Accretion Disk Paradigm
3. Accretion-Powered Objects:
 1. Young Stellar Objects
 2. Cataclysmic Variables and Supersoft X-ray Sources
 3. X-ray Binaries and Ultraluminous X-ray Sources
 4. Active Galactic Nuclei
4. Present Paradigm





ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

重力エネルギー

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 4

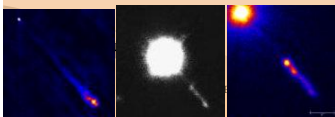
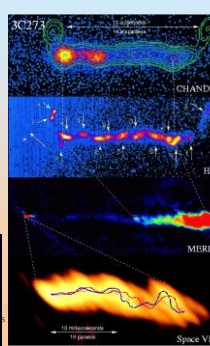



クェーサーの発見

- 3rd Cambridge Catalogue

3C48=16mag 'star'
(Matthews and Sandage 1960)

3C273=13mag 'star'
(Hazard et al. 1962)

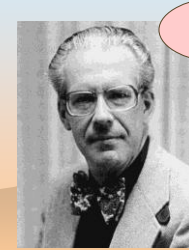
Space VLBI



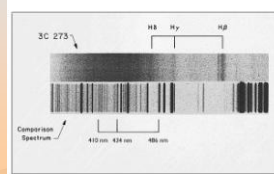
クェーサー3C273

スペクトル

- 3C273 (1963)

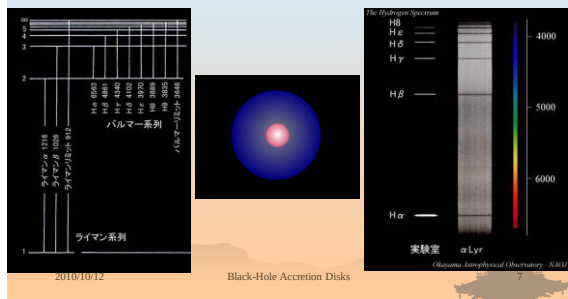




2010 Maarten Schmidt (1929-) in 1992 Jack-Hole A

クエーサー3C273 水素バルマー線

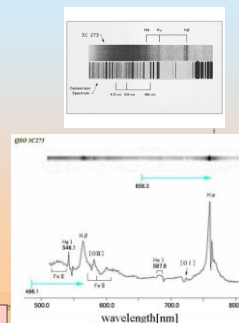


クエーサー3C273 赤方偏移

- 3C273 (1963)
bizarre lines=Balmer series
but
16 percent redshift

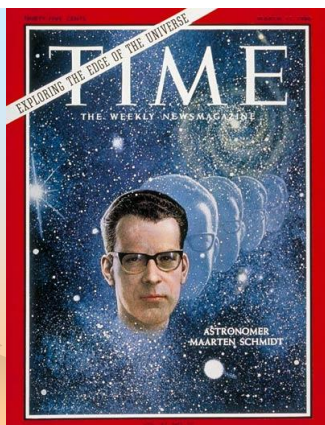
$$z = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda_0$$

- 'quasar'
coined by Chiu (1964)



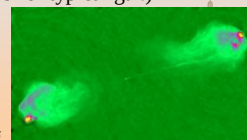
Takeuchi & Ishii / OAO

- 1966



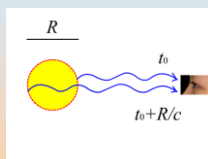
クエーサー エネルギーの大きさ

- 3C273
 $z=0.158 \rightarrow 2 \times 10^9$ ly
 $m=12.8$
 $\rightarrow 10^{47}$ erg/s (cf. 10^{44} erg/s for typical gal.)
- 光度 $L \sim 10^{45-46}$ erg/s
- 寿命 $\tau \geq 10^6$ yr
- エネルギー $E \geq 10^{60}$ erg

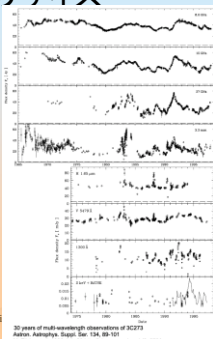


クエーサー エネルギー源のサイズ

- $R \leq ct$



- $R \leq 1$ 光日 $\sim 10^{15}$ cm



クエーサー エネルギー源

- 核反応
 $\eta=0.007$
 $E=0.007Mc^2$
 $M \sim 10^8 M_\odot$
- 重力エネルギー
 $\eta \sim 0.1$ (0.057~0.42)
 $E=GM^2/R$
 $M \sim 10^8 M_\odot$



重力エネルギーが本質的

理論家たち

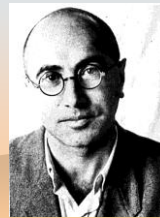
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

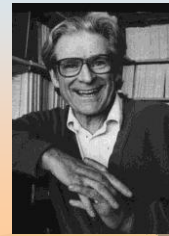
13

理論の系譜: 重力エネルギー

- Zel'dovich and Novikov 1964
- Salpeter 1964



Y.B. Zel'dovich (1914-1987)



E.E. Salpeter (1924-)

理論の系譜: X線星

- Hayakawa and Matsuoka 1964



早川幸男(1923-1992)



松岡 勝

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

15

理論の系譜: リンデンベル

- Lynden-Bell 1969 dead quasar



Donald Lynde-Bell (1935-)



Black-Hole Accretion Disks

16

理論の系譜: 標準モデル1

- Shakura and Sunyaev 1973



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

17

理論の系譜: 標準モデル2

- Novikov and Thorne 1973



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

18

理論の系譜: トーラスモデル

- Abramowicz et al. 1978
- Kozłowski et al. 1978
- Paczyński and Wiita 1980



2010/1

Black-Hole Accretion Disks

19

理論の系譜: 日本への導入

- 蓬茨霊運@立教大学
- 尾崎洋二@東京大学
- 加藤正二@京都大学 in 1978



20

Hole Acc

20

Intermission: 生きた伝説



2010/10/12

林 忠四郎 (1920-)

福江 純 (1956-)

21

理論の系譜: 新パラダイム

- Abramowicz, Czerny, Lasota, Szuszkiewicz 1988 Trieste/Polish group



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

22

理論の系譜: 新パラダイム

- Narayan and Yi 1994 Harvard group

2002/03/18

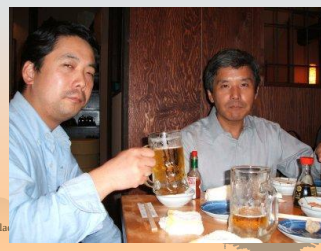


- 一丸節夫 1977

2010/10/12

理論の系譜: 新パラダイム

- 加藤正二/嶺重 慎ら Kyoto group



Black

降着円盤ワールド



宇宙ジェットワールド



降着円盤の概念

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

27

降着円盤 イメージ



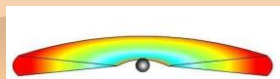
2010/10/12

Black-Hole A



降着円盤 定義

- 重力天体 (PS, MS, WD, NS, BH) のまわりに形成された回転ガス円盤
 - PS: protostar
 - MS: main sequence
 - WD: white dwarf
 - NS: neutron star
 - BH: black hole
- 宇宙における活動現象 (YSO, CV, SSXS, XB, BHB, ULX, AGN, jet) の主動者 prime mover
 - YSO: young stellar object
 - CV: cataclysmic variable
 - SSXS: supersoft X-ray sources
 - XB: X-ray binary
 - BHB: black hole binary
 - ULX: ultra-luminous X-ray source
 - AGN: active galactic nuclei



28

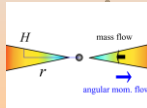
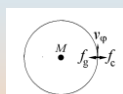
29

標準降着円盤 定性的描像

- 幾何学的に薄い: 平ら
- 光学的に厚い: 不透明
- ケプラー回転
- 粘性: 角運動量輸送
- 粘性: 加熱
- 内縁の存在 (相対論的效果)

$$\Omega = \Omega_K \equiv \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$$

$$r_{in} \cong r_{ms} = 3r_g$$



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

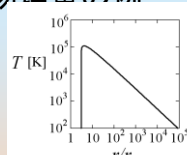
30

標準降着円盤 基本パラメータ

- 基本パラメータ
 - 外的要因
 - 中心天体の質量 M [g]
 - ガス降着率 $dM/dt: N$ [g/s]
 - スピンパラメータ a_* ($=0-1$)
 - 内的要因
 - 比熱比 γ ($=4/3-5/3$)
 - 粘性パラメータ α ($=0-1$)
 - 移流パラメータ f ($=0-1$)
 - 磁気パラメータ β ($>=0$)
 - その他
 - 傾斜角 i ($=0-90^\circ$)

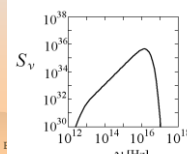
2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 31

標準降着円盤 物理量の例

- 温度分布
 
- 放射スペクトル

SED: spectral energy distribution

vS_v



$M=10^8 M_{\text{sun}}$
 $N=1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$

2010/10/12 32

標準降着円盤 光度の見積もり

- 単位質量あたりのエネルギー

$$K = \frac{1}{2} v_\phi^2 = \frac{GM}{2r}, \quad (1.17)$$

$$U = -\frac{GM}{r} = -2K, \quad (1.18)$$

$$0 - (U + K) = K = \frac{GM}{2r}, \quad (1.19)$$
- 円盤光度

$$L_d = \frac{GM\dot{M}}{2r_{\text{in}}}, \quad (1.20)$$

$$r_{\text{in}} = 3r_g = 6GM/c^2,$$
- 光度は質量によらない

$$L_d = \frac{1}{12} \dot{M} c^2, \quad (1.21)$$

$$L = \eta \dot{M} c^2, \quad (1.22)$$

$$\eta_{\text{NR}} = \frac{1}{12} \quad (1.23)$$

2010/10/12

標準降着円盤 光度の見積もり

- 光度

The disk luminosity for typical parameters becomes

$$L_d = 7.50 \times 10^{36} \left(\frac{\eta}{1/12} \right) \left(\frac{\dot{M}}{10^{17} \text{ g s}^{-1}} \right) \text{ erg s}^{-1} \quad (1.24)$$

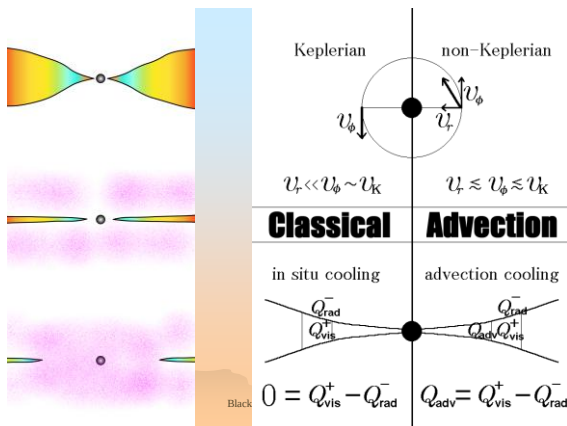
in the case of black-hole binaries, and

$$L_d = 4.72 \times 10^{45} \left(\frac{\eta}{1/12} \right) \left(\frac{\dot{M}}{1 M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right) \text{ erg s}^{-1} \quad (1.25)$$

in the case of active galactic nuclei.

For example, in the case of luminous active galactic nuclei with a luminosity of $L \sim 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$, the mass-accretion rate should be $\dot{M} \sim 3 M_\odot \text{ yr}^{-1}$, if the efficiency is $\eta \sim 0.1$.

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 34



ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability ×
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

2010/10/12



降着円盤の観測

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

2

降着エネルギー天体

1.3 Accretion-Powered Objects – Observational Reviews

Table 1.1 Central Objects in Various Objects.

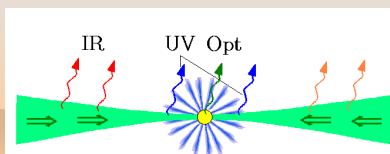
Object	Central "star"	Mass	Size
YSO	PS/TTS	$\sim M_{\odot}$	$\sim R_{\odot}$
CV/SSXS	WD	$\sim M_{\odot}$	$\sim 10^{-2} R_{\odot}$
XB	NS	$\sim M_{\odot}$	~ 10 km
BHB	BH	$\gtrsim 3M_{\odot}$	($r_g \gtrsim 10$ km)
ULX	IMBH	$\sim 10^2 - 10^4 M_{\odot}$	($r_g \sim 3000 - 30000$ km)
AGN	SMBH	$\sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$	($r_g \sim 0.02 - 20$ AU)

Table 1.2 Accretion Disks in Various Objects.

Object	Mass	Size	Temperature	Luminosity
YSO	$\sim M_{\odot}$	~ 100 AU	$\sim 10^1 - 4$ K	$\sim L_{\odot}$
CV/SSXS	$\ll M_{\odot}$	$\sim R_{\odot}$	$\sim 10^4 - 6$ K	$\sim 10^0 - 2 L_{\odot}$
XB/BHB	$\ll M_{\odot}$	$\sim R_{\odot}$	$\sim 10^4 - 9$ K	$\sim 10^0 - 5 L_{\odot}$
AGN	$\lesssim 10^6 M_{\odot}$	~ 1 pc	$\sim 10^5$ K	$\sim 10^{10} - 13 L_{\odot}$

原始星円盤

- Young Stellar Objects (YSOs)
 - Protostar
 - Protoplanetary disk

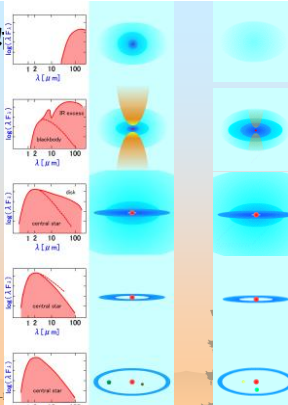


2010/10/12

4

原始星円盤

- Spectral Energy Distribution (SED)
- IR Class
 - Class 0
 - Class I: protostar
 - Class II: CTTS
 - Class III: WTTS
 - Class IV: ZAMS



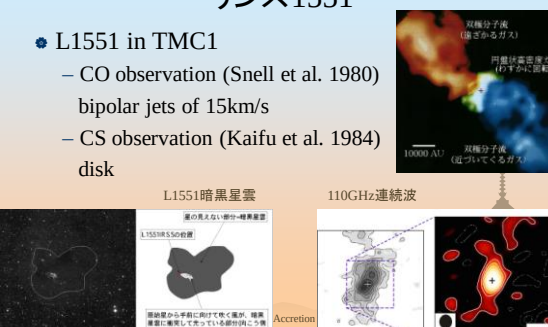
HaのEWは $\sim 10 \text{ \AA}$

Black-Hole

原始星円盤

リンズ1551

- L1551 in TMC1
 - CO observation (Snell et al. 1980) bipolar jets of 15km/s
 - CS observation (Kaifu et al. 1984) disk



L1551暗黒星雲

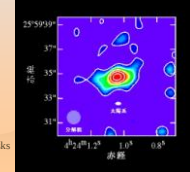
110GHz連続波

Accretion



原始星円盤 オリオンプロプリド

- Orion nebula M42 by HST
– 100 AU
- DG Tau by NRO



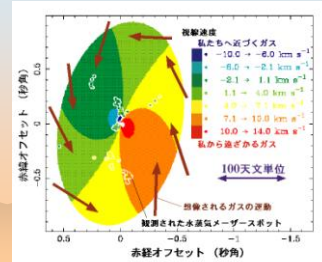
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



原始星円盤 メーザー円盤

- IRAS16293-2422 by H₂O maser

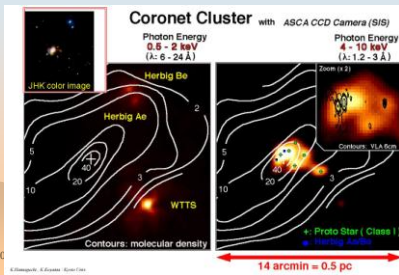


2010/10/12



原始星円盤 R CrA

- みなみのかんむり座R(CrA)分子雲



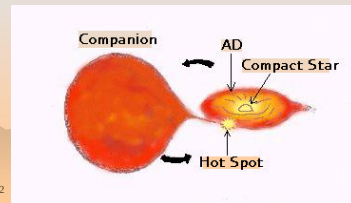
2010/10/12

9



激変星 & 超軟X線源

- Cataclysmic Variables (CVs)
- Supersoft X-ray Sources (SSXs)
– Close binary with white dwarfs (WDs)



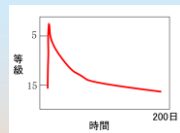
2010/10/12

10



激変星: 新星 & 再帰新星

- Novae
- Recurrent nova
- Nova-like variables
 - 星が突然明るくなる
 - 10^{44-43} erg
 - 10等級の増光/数日
 - 減光/数十日から100日
 - 白色矮星表面での核爆発



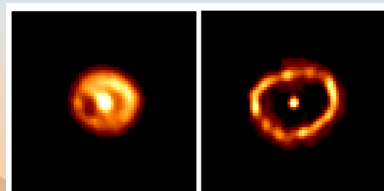
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



激変星: 新星 & 再帰新星 はくちょう座新星92

- Nova Cyg 92



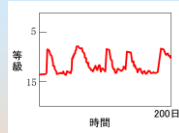
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

12

激変星:矮新星

- Dwarf novae
 - 小爆発がたびたび起こる
 - 2-5等級増光
 - 数日から数週間持続
 - 数ヶ月の間隔で
 - 降着円盤の不安定性



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

激変星:矮新星 ふたご座U星

- DN U Gem

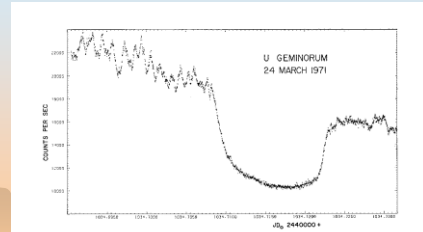


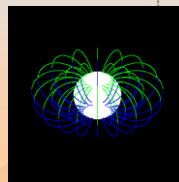
Fig. 1.13 Light curves of the eclipse of accretion disks in U Gem. (After Warner 1976)

2010/10

14

激変星:ポーラーズ

- Polars
 - 周期的な変光
 - 若い白色矮星が
 - 強い磁場をもっていて
 - 磁極が光る

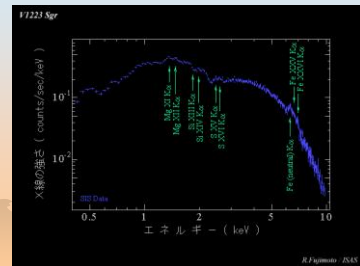


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

激変星:ポーラーズ いて座V1223

- いて座V1223

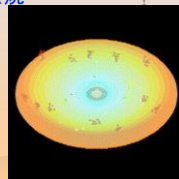


2010/10/12

16

超軟X線源

- Supersoft X-ray Sources (SSXSs)
 - 20-100eV
 - 10^{36-38} erg/s
 - 白色矮星表面での継続的核燃焼
 - 質量が大きい
 - $\sim 1M_{\odot}$
 - 質量降着率が大きい
 - $1 \sim 4 \times 10^{-7} M_{\odot} / \text{yr}$
 - Ia型超新星の前駆天体?

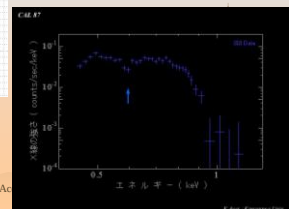
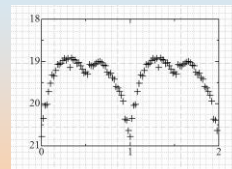


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

超軟X線源 CAL87

- CAL 87



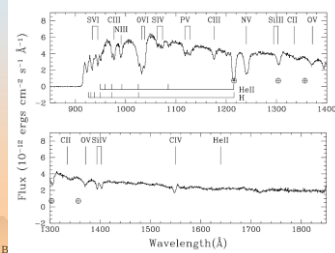
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



激変星 連続スペクトル

- Z Cam
- $10^4 \sim 4 \times 10^5 \text{K}$
- 降着円盤起源



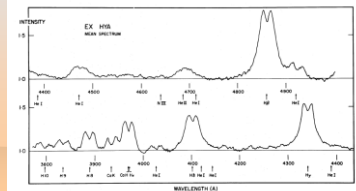
2010/10/12

B



激変星 輝線スペクトル

- EX Hya
- 2重ピーク
- 降着円盤起源



2010/10/12



激変星 輝線スペクトル

- P Cyg profile
 - 3000-5000km/s
 - 白色矮星の脱出速度程度
 - $i < 65^\circ$ の系のみで観測
 - ジェットの観測
 - 降着円盤風が白色矮星風

2010/10/12

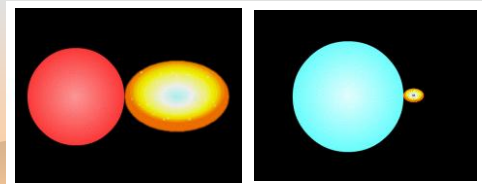
Black-Hole Accretion Disks

21



X線星

- X-ray Binaries (XBs)
 - Close binary with neutron stars (NSs) and BHs



Low Mass X-ray Binaries LMXB

High Mass X-ray Binaries HMXB

20

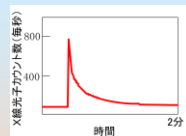
Accre

12



X線星:X線バースター

- X-ray burster
 - X線の急激な増光
 - 10^{38-39}erg/s
 - 数秒で立ち上がり
 - 数十秒で減光
 - 数時間から数日の間隔で
 - Low-Mass X-ray Binary
 - 中性子星表面の核爆発



2010/10/12

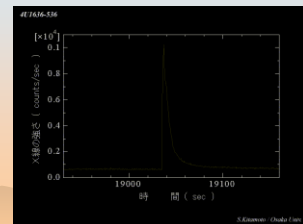
Black-Hole Accretion Disks

21



X線星:X線バースター X1636

- 4U1636-536/X1636



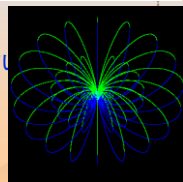
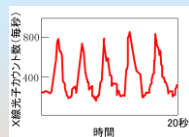
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

24

X線星:X線パルサー

- X-ray pulser
 - 周期的なX線パルス
 - 数秒から数十秒の周期
 - High-Mass X-ray Binary
 - 若い中性子星が
 - 強い磁場 (10^{12} gauss) をもって
 - 磁極が光る

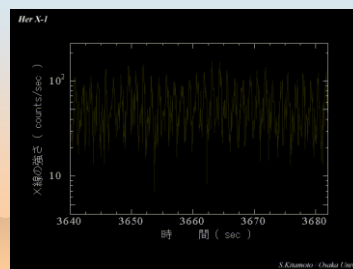


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

X線星:X線パルサー ヘラクレスX-1

- Her X-1



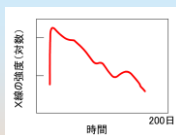
2010/10/12

S.Kimura (Osaka Univ)

26

X線星:X線新星

- X-ray nova/X-ray transient
 - 数日で数十倍の増光
 - 数ヶ月から1年で減光
 - 降着円盤の不安定性?

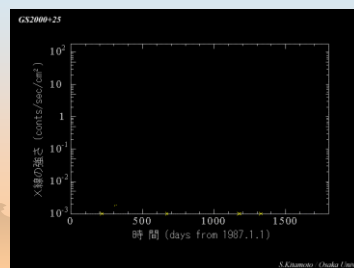


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

X線星:X線新星 こぎつね座X線新星GS2000

- こぎつね座のX線新星GS2000



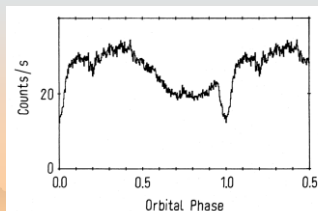
2010/10/12

S.Kimura (Osaka Univ)

28

X線星 光度曲線

- X 1822-371
- 降着円盤コロナ

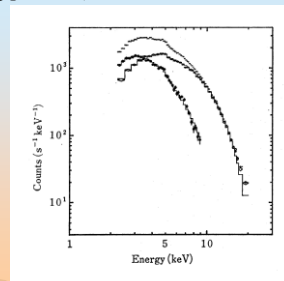


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

X線星 連続スペクトル

- Sco X-1
- 2成分モデル:
 - 1keV(AD)
 - +2keV(NS)
- 降着円盤起源



2010/10/12

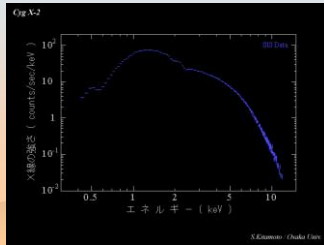
Black-Hole Accretion Disks

30



X線星 連続スペクトル

- 低質量X線連星はくちょう座X-2
- 1keV+2keV
- 降着円盤起源

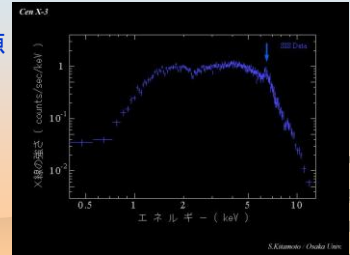


2010/10/12



X線星 輝線スペクトル

- X線パルサー Cen X-3
- Fe輝線
- 降着円盤起源

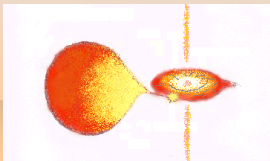


2010/10/12



ブラックホールX線連星

- Black Hole Binaries (BHBs)
 - Close binary with black holes (BHs)
- Microquasars (MQs/ μ Qs)
 - Black hole binaries with relativistic jets



2010/10/12

33

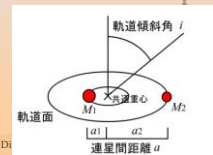


BHB 質量

- Mass function

$$f(M) \equiv \frac{(M_x \sin i)^3}{(M_x + M_2)^2} = \frac{PK^3}{2\pi G} = 10^{-7} \frac{P}{d} \left(\frac{K_2}{\text{km s}^{-1}} \right)^3 M_{\odot}, (1.27)$$

- If $M_x > 2-3M_{\odot}$,
- Then BH



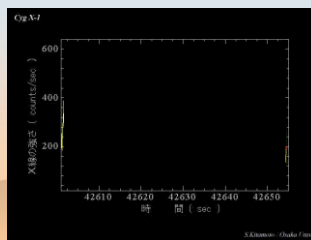
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



BHB 時間変動

- 時間変動がchaotic/fractal



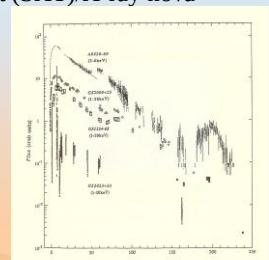
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



BHB 光度曲線

- Soft X-ray transient (SXT)/X-ray nova



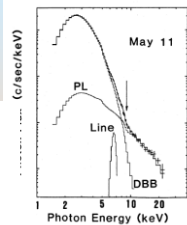
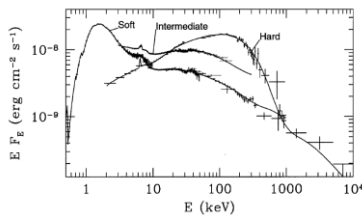
2010/10/12

Black-H

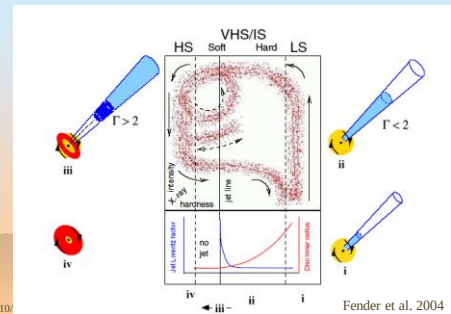
Fig. 1.55 X-ray light curves of the representative black-hole X-ray novae or black-hole X-ray transients. Outbursts are characterized by rapid rise on timescales of a few days, represented

BHB スペクトル

- High state / soft state
- Low state / hard state



BHB マイクロウェーサー



BHB マイクロウェーサー

Fig. 1.28 Schematic picture by Fender et al. (2004) for the disk-jet coupling in black hole binaries. The upper panel represents an X-ray hardness-intensity diagram in the high/soft state (HS), the very high/intermediate state (VHS/IS), and the low/hard state (LS). X-ray hardness increases to the right and intensity upwards. The lower panel represents the variation of the bulk Lorentz factor Γ of the outflow with hardness. In the LS and VHS/IS, the jet is steady with an almost constant Γ (< 2), progressing from state (i) to state (ii) as the luminosity increases. At some point, Γ increases rapidly, producing an internal shock in the outflow, state (iii), followed in general by cessation of jet production in a disk-dominated HS, state (iv). (After Fender et al. 2004)

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

Fender et al. 2004:39

BHB&MQ まとめ

Source	M_x ($M_\odot$)	P [d]	$f(M)$ ($M_\odot$)	d [kpc]	Companion
HMXBs					
Cyg X-1	$\gtrsim 9.5$	5.6	0.244 ± 0.005	2.0 ± 0.1	O9.7Iab
SS 433	~ 9.0	13.1	3.0 ± 0.6	5.0 ± 0.5	A5/A7I
LMC X-3	5.9–9.2	1.70	2.3 ± 0.3	50 ± 2.3	B3V
LMC X-1	4.0–10.0	4.23	0.14 ± 0.05	50 ± 2.3	O7III
LMXBs					
GRO J0422+32	3.2–13.2	0.21	1.19 ± 0.02	2.6 ± 0.7	M2V
A 0620–003 [†]	8.7–12.9	0.325	2.72 ± 0.06	1.2 ± 0.1	K4V
1009–45	6.3–8.0	0.28	3.17 ± 0.12	5.0 ± 1.3	K7/M0V
11184+480	6.5–7.2	0.17	6.1 ± 0.3	1.8 ± 0.5	K5/M0V
GS 1124–684 [†]	6.5–9.2	0.43	3.01 ± 0.15	5 ± 1.3	K3/K5V
15434+475	7.4–11.4	1.13	0.25 ± 0.01	7.5 ± 0.5	A2V
1550–564	8.4–10.8	1.54	6.86 ± 0.71	5.3 ± 2.3	G8/K8IV
GRO J1655–40	6.0–6.6	2.62	2.73 ± 0.09	3.2 ± 0.2	F3/F5IV
H1705–25	5.6–8.3	0.52	4.86 ± 0.13	8 ± 2	K3/7V
1819–25	6.8–7.4	2.82	3.13 ± 0.13	$7.4–12.3$	B9III
GRS 19154+105	$\gtrsim 10.0$	33.5	9.5 ± 3.0	11–12	K/MIII
GS 2000+25	7.1–7.8	0.35	5.01 ± 0.12	2.7 ± 0.7	K3/K7V
GS 2023+338 [†]	10.1–13.4	6.47	6.08 ± 0.06	$2.2–3.7$	K0III

はくちょう座X-1

- Cygnus X-1 (1956+356) found in 1971
- O9Iab HD226868+bb

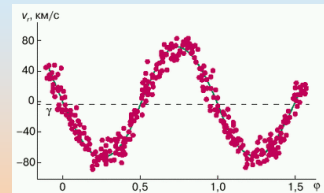
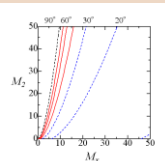


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

はくちょう座X-1 視線速度

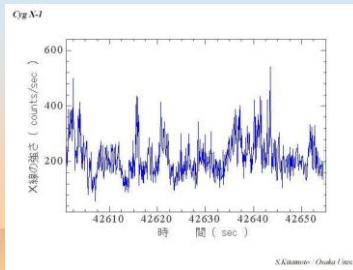
- 75km/s
- $f(M)=0.241M_\odot$
- $M_2 \sim 30M_\odot$
- $M_x \sim 10M_\odot$



$$f(M) \equiv \frac{(M_x \sin i)^3}{(M_x + M_2)^2} = \frac{PK_2^3}{2\pi G} = 10^{-7} \frac{P}{d} \left(\frac{K_2}{\text{km s}^{-1}} \right)^3 M_\odot, \quad (1.27)$$



はくちょう座X-1 X線時間変動



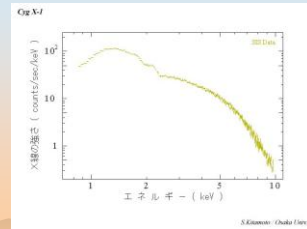
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

43



はくちょう座X-1 X線スペクトル



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

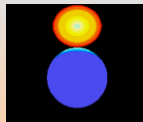
44



はくちょう座X-1 まとめ

Table 1.4 Elements of Cyg X-1.^a

Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	$V = 9/O9.7\text{Iab}$	
Distance d	2 kpc	
Binary period P	5.6017 d	1
Ephemeris T_0 (2 440 000+)	1869.17 d	1
Semi-amplitude K	75.0 km s ⁻¹	1
Mass function $f(M)$	$0.241 \pm 0.013 M_\odot$	
Inclination angle i	$27^\circ - 35^\circ$	2
Ellipticity e	< 0.1	3



2010/10/12

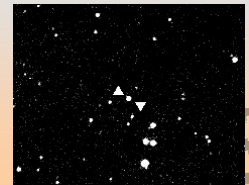
Black-Hole Accretion Disks

45



特異星SS433

- Stephenson-Sanduleak catalogue 433
- Its bizarre spectrum was found in 1984 (Margon et al. 1984)
- 14mag star with $A_V \sim 9$



2010/10/12

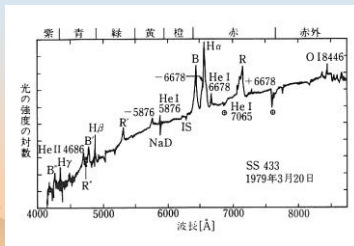
Black-Hole Accretion Disks

46



特異星SS433 スペクトル

- 奇妙なスペクトル線



2010/10/12

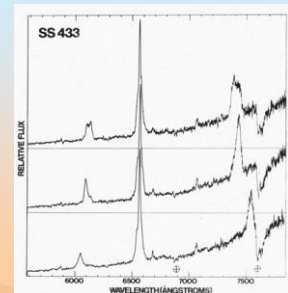
Black-Hole Accretion Disks

47



特異星SS433 スペクトル

- 動くスペクトル線



2010/10/12

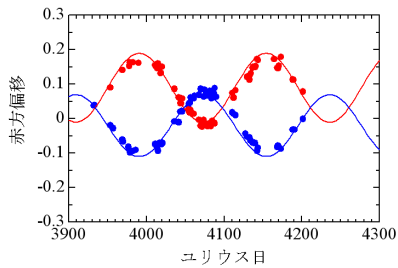
Black-Hole Accretion Disks

48



特異星SS433 スペクトル

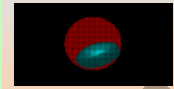
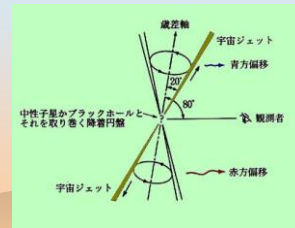
- 周期性
- 162日



2010/10/12



特異星SS433 モデル



2010/10/12

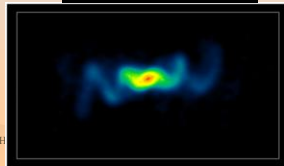
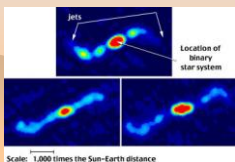
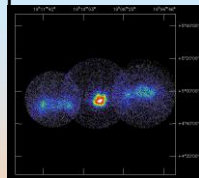
Black-Hole Accretion Disks

50

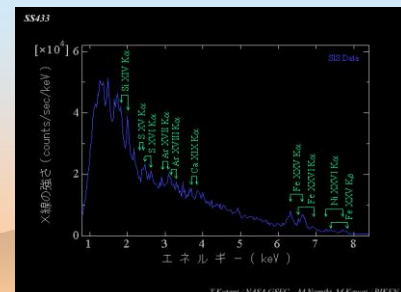


特異星SS433 ジェット

- Corkscrew pattern



特異星SS433 X線スペクトル



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

52



特異星SS433 光度曲線

- Light curve
 - 13d binary period
 - 162d precession period

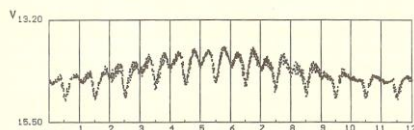
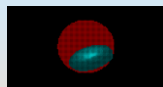
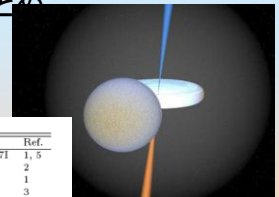


Fig. 1.27 Folded light curves of SS 433 obtained by 19-year optical monitoring. (After Goranskij et al. 1998)



SS433 まとめ

- 特異連星SS433
- ジェットの速度は光速の26% !



Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	V ~ 14/A5-A7I	1, 5
Distance d	5.0 ± 0.5 kpc	2
Binary period P	13.082 d	1
Binary ephemeris T_0 (2 440 000+)	6596.25 d	3
Semi-amplitude K_2	112 ± 5 km s ⁻¹	4
Mass function $f(M)$	132 ± 9 km s ⁻¹	5
	$2.0 \pm 0.3 M_{\odot}$	4
	$3.0 \pm 0.6 M_{\odot}$	5
Inclination angle i	78°	1
Precession period	162.5 d	1
Precession ephemeris (2 440 000+)	4483 d	3
Precession angle ψ	19°	1

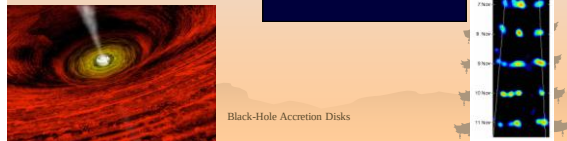
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

54

マイクロウェーサー GRS1915+105

- マイクロウェーサー
GRS1915+105
- ジェット速度は光速の
92% !!

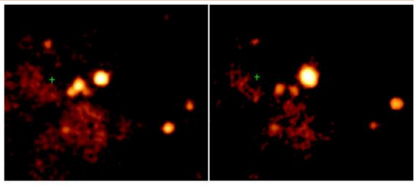


Black-Hole Accretion Disks

超光度X線源



- Ultra-Luminous X-ray Sources (ULXs)
 - A new class of X-ray sources
 - Bright, compact, off-nuclear X-ray sources
 - Revealed by ASCA, ROSAT, Chandra, XMM

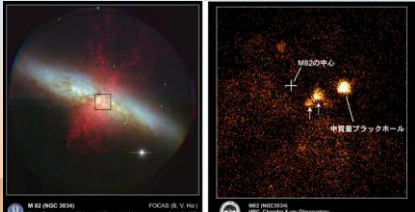


2010/10

超光度X線源 M82 X-1



- M82 X-1

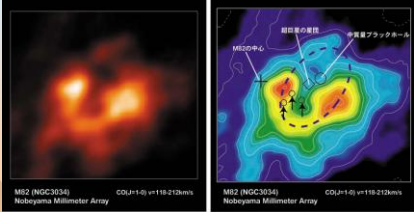


2010/10

超光度X線源 M82 X-1



- M82 X-1



2010/10/12

超光度X線源 実体

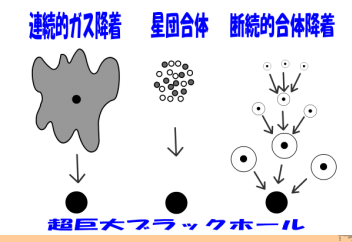
- $L_{\text{bol}} > L_{\text{Edd}}$ of several tens of M_{sun}
 - Beaming
 - Intermediate Mass Black Hole (IMBH)
of 20-50 M_{sun}
- M82 X-1
 - 10^{41} erg/s
 - 1000 M_{sun} by L_x (Matsumoto et al. 2001)
 - 50-260 M_{sun} by QPO (Dewangan et al. 2005)



2010/10/12

超光度X線源 ミッシングリンク

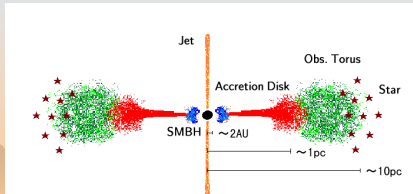
- 中間質量BHは通常の星の進化ではできない
- Stellar mass BHとSupermassive BHのリンク？



2010/10/12

活動銀河

- Active Galactic Nuclei (AGNs)
 - Activity in nucleus and other regions



2010/10/12

61

活動銀河 特徴

- (中心核が)非常に明るい
 - 銀河本体の100倍から10000倍くらい
- 電波やX線が強い
 - 希薄な高温ガスの存在
- 急激に変光する
 - 活動領域が小さい
- 特異な形状をしている
 - 中心核活動が周囲へ影響している
- 相対論的現象を示す
 - 相対論的天体の存在

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

62

活動銀河: セイファート銀河

- Seyfert Galaxies (Sy)
 - コンパクトで明るい中心核
 - 幅の広い輝線スペクトル
- Type 1 Seyfert (Sy1)
 - 許容線の幅が $\sim 10000 \text{ km/s}$
 - 禁制線の幅が $\sim 500 \text{ km/s}$
- Type 2 Seyfert (Sy2)
 - 許容線も禁制線も $\sim 500 \text{ km/s}$
- Carl K. Seyfert (1943)



NGC4151

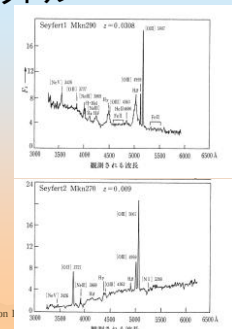
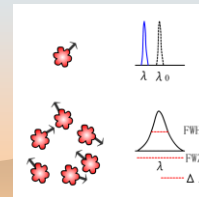
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

63

活動銀河: セイファート銀河 輝線スペクトル

- 輝線: Sy1 vs Sy2



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

活動銀河: スターバースト銀河

- Starburst Galaxies (SB)
 - 爆発的な星形成
 - 銀河中心領域
 - 周辺領域
 - リング状領域
- D. Weedman (1981)



おおぐま座銀河M82

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

65

活動銀河: 超光度赤外線銀河

- Ultraluminous Infrared Galaxies (ULIRG)
 - 赤外線で非常に明るい
 - 通常より10倍から100倍
 - 大量のガスやダスト
 - 90%以上は合体中

- IRASが発見



Arp220

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

66

活動銀河: 低光度活動銀河核

Low-Luminosity Active Galactic Nuclei (LLAGN)

- それほど明るくないが
- X線活動など活動性
- 水メーザー活動など →



NGC 4258/M106

2010/10/12

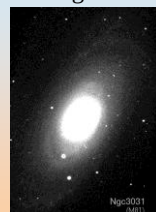
Black-Hole Accretion Disks

67

活動銀河: 低電離中心核放射領域

Low Ionized Nuclear Emission Region Galaxy (LINER)

- 電離度は低いが
- さまざまな輝線



NGC 3031/M81

T. M. Heckman (1980)

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

68

活動銀河: 電波銀河

- Radio Galaxies (RGs)
 - 強い電波放射 $E=10^{60}$ erg, $L=10^{40-46}$ erg/s
- Broad Line RGs vs Narrow Line RGs
- Powful RGs vs Weak RGs
 - 10^{32} erg/s/Hz at 1GHz

- Grote Reber (1944) Cyg A
- Baade & Minkowski (1951) 同定



M87/Vir A

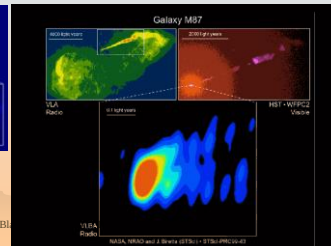
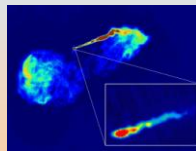
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

69

活動銀河: 電波銀河 M87／おとめ座A

- 電波ジェット／M87



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

活動銀河: 電波銀河 NGC 5128／ケンタウルス座A

- NGC 5128/Cen A

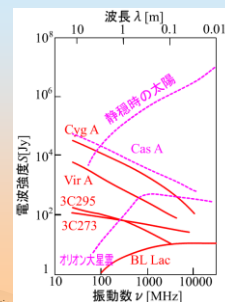
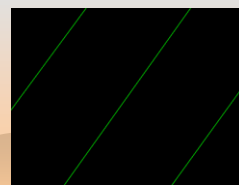


2010/10/12

71

活動銀河: 電波銀河 電波スペクトル

- 電波スペクトル
 - シンクロトロン放射



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

-

-
- Figure 1 consists of two panels. The top panel is a raw Channel 302 image showing a bright source at the center of a grid. The bottom panel is a processed image showing the source at the center of a grid, with a scale bar indicating 10 arcseconds.

Black-Hole Accretion Disks

-

-

Black-Hole Accretion Disks

-

Black-Hole Accretion Disks

-

Black-Hole Accretion Disks

-

Black-Hole Accretion Disks

78



活動銀河:ブレーザー

- BL Lac Objects (BLLac)
 - 恒星状天体
 - 強い連続光(輝線弱い)
 - 変光&偏光
- Blazar=BLLac + OVV
- E. A Spiegel (1977)



OJ 287

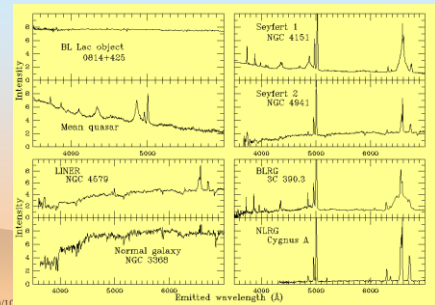
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

79



活動銀河 輝線スペクトル



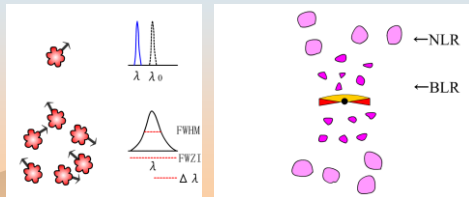
2010/10/12

80



活動銀河 輝線スペクトル

- 輝線の幅



2010/10/12

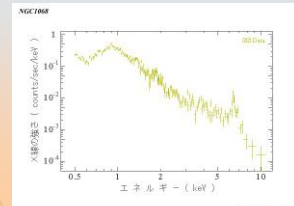
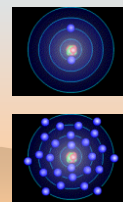
Black-Hole Accretion Disks

81



活動銀河 輝線スペクトル

- ヘリウムの鉄輝線(6.7keV)
- 鉄蛍光輝線(6.4keV)



2010/10/12

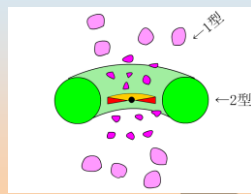
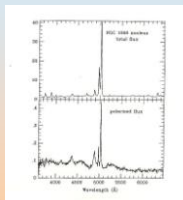
Black-Hole Accretion Disks

82



活動銀河:Sy統一モデル

- セイファート銀河の偏光分光観測



- Antonucci and Miller (1985)

2010/10/12

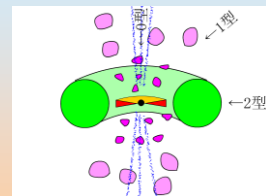
Black-Hole Accretion Disks

83



活動銀河:大統一モデル

- O型はbeaming



- Orr and Browne (1982)
- Barthel (1989)

2010/10/12

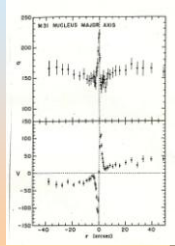
Black-Hole Accretion Disks

84



活動銀河: 超大質量BHの証拠 アンドロメダ銀河M31

- ★ 星の振る舞い
— 例M31



2010/10/12

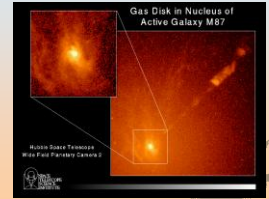
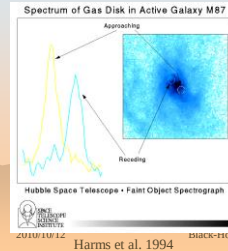
Black-Hole Accretion Disks

85



活動銀河: 超大質量BHの証拠 巨大楕円銀河 M87

- ★ ガスの振る舞い
— 例M87



Ford et al. 1994

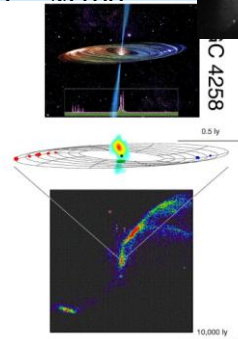
Harms et al. 1994

86



活動銀河: 超大質量BHの証拠 メガメーザーM106

- ★ 水メーザーの観測
— 例NGC4258(M106)



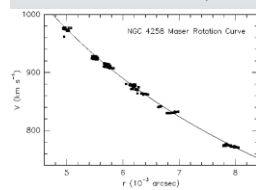
2010/10/12

Black-Hole



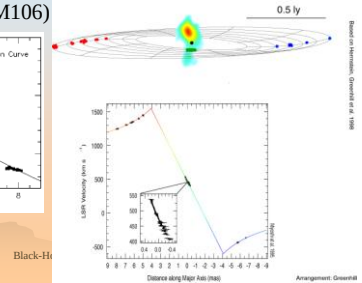
活動銀河: 超大質量BHの証拠 メガメーザーM106

- ★ 水メーザーの観測
— 例NGC4258(M106)



Miyoshi et al. 1995

2010/10/12

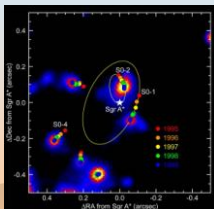


Amoroso, G. et al. 1998



活動銀河: 超大質量BHの証拠 銀河系中心いて座A*

- ★ 個々の星の運動 (Sgr A*)

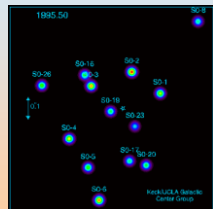


Ghez et al. 2000

2010/10/12

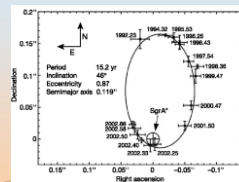
Black-Hole Accretion Disks

89



活動銀河: 超大質量BHの証拠 銀河系中心いて座A*

- ★ 個々の星の運動 (Sgr A*)

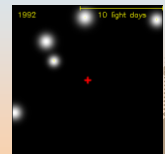


Schodel et al. 2002

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

90



活動銀河: 超大質量BHの証拠 まとめ

Table 1.6 Supermassive Black Holes.^{1,3}

Objects	Type	d	M
stellar dynamics			
Sgr A*/The Galaxy	Sbc	0.0085	3.7×10^6
M 31	Sb	0.7	3×10^7
M 32	dE	0.7	2×10^6
NGC 3115	SO	8.4	1×10^8
NGC 4594	Sa	9.2	5×10^8
NGC 3377	E	9.9	8×10^7
gas dynamics			
M 87	cD	15.3	3×10^9
NGC 4261	E	31.6	5×10^8
water maser			
NGC 4258/M 106	Sbc	7.5	4×10^7
NGC 1068	Sy	16	2×10^7
NGC 4258	Sy	7.2	4×10^7
IC 2560	Sy	38	3×10^6

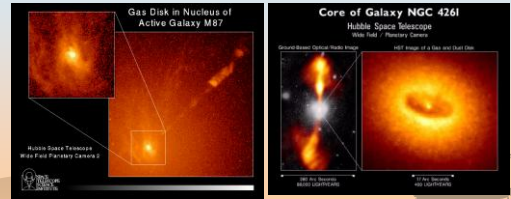
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

91

活動銀河: 降着円盤の証拠

★ ガス円盤の解像



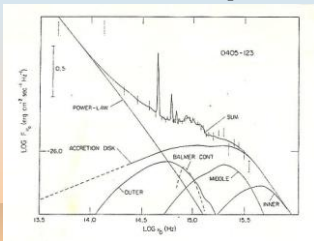
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

92

活動銀河: 降着円盤の証拠

★ 連続スペクトルのUV Bump



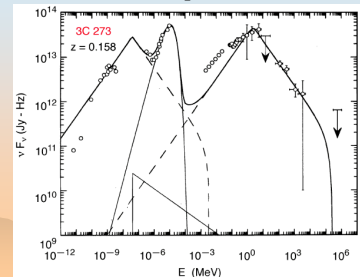
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

93

活動銀河: 降着円盤の証拠

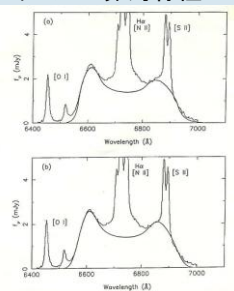
★ 連続スペクトルのUV Bump



2010/10/12

活動銀河: 降着円盤の証拠 Arp102B

- ★ H α 輝線スペクトルの非対称性
- ★ Arp102B



2010/10/12

95

活動銀河: 降着円盤の証拠 MCG-6-30-15

- ★ 鉄輝線スペクトルの非対称性
- ★ MCG-6-30-15

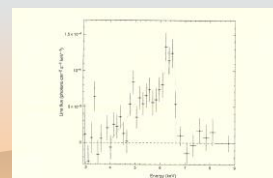
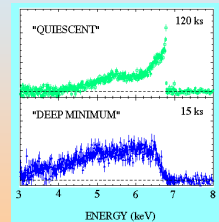


Fig. 1.81 X-ray line spectra of MCG-6-30-15. (After Tanaka et al. 1995. Reprinted by permission from Nature Vol.375 No.6533 pp.659-661 22 June 1995 ©Macmillan Magazines Ltd.)



2010/10/12

96



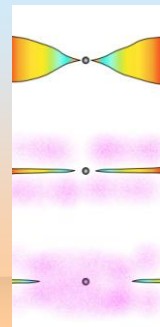
Present New Paradigm

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 97





Present New Paradigm



2010/10/12 98





ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability ×
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

2 Physical Processes Related to Accretion

1. Eddington Luminosity
2. Bondi Accretion
3. Viscous Process
4. Magnetic Instabilities
5. Relativistic Effects



1



2.1 エディントン光度

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

2



エディントン光度 定義

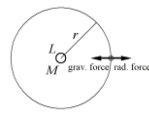
- 重力＝輻射圧となる天体の“最大”光度

– 重力

- 天体の質量 M
- 水素原子の質量 m_H
- 距離 r

– 輻射圧

- トムソン散乱の断面積 σ_T



$$F_g = \frac{GMm_H}{r^2},$$

$$\frac{\sigma_T}{c} f = \frac{\sigma_T}{c} \frac{L}{4\pi r^2},$$

$$L_E = \frac{4\pi cGMm_H}{\sigma_T},$$

$$= 1.25 \times 10^{39} \left(\frac{M}{10M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

$$= 1.25 \times 10^{46} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

- エディントン光度 L_E (Eddington luminosity)

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

3



エディントン光度 臨界降着率

- エディントン降着率

- 効率 $\eta \sim 0.1$

– “最大”降着率 (球対称)

– 臨界質量降着率

(critical accretion rate)

$$\dot{M}_{\text{crit}} \equiv \frac{L_E}{c^2} = 1.4 \times 10^{17} \frac{M}{M_\odot} \text{ g s}^{-1},$$

$$\dot{M} \lesssim \frac{1}{\eta} \frac{L_E}{c^2}.$$

- エディントン時間

– 質量に依存しない

$$t_E \equiv \frac{M}{\dot{M}_{\text{crit}}} = \frac{\sigma_T c}{4\pi G m_H} = 4.5 \times 10^8 \text{ yr.}$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

4



2.2 ホイル=リットルトン降着

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

5



ホイル=リットルトン降着 仮定

- 軸対称降着 (動いている)

– 質量 M の中心天体

– 定常

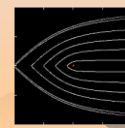
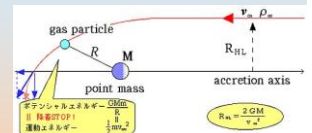
– 軸対称

– 非粘性

– 断熱

– 磁場・輻射なし

– Hoyle-Lyttleton 1939



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

6



ホイール＝リットルトン降着 粗い見積もり

- 中心天体に対するガス粒子の相対速度を v 、衝突パラメータを b とする
 - ガスの運動エネルギー $\sim v^2/2$
 - ガスの重力エネルギー $\sim GM/b$
- ガスが束縛される条件: 等置
 - $R_{\text{HL}} = 2GM/v^2$
- 精密な見積もりも同じになる

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

7



ホイール＝リットルトン降着 降着半径など

- ホイール＝リットルトン降着半径 R_{HL}
- ホイール＝リットルトン降着タイムスケール t_{HL}
- ホイール＝リットルトン質量降着率 $\dot{M}_{\text{HL}} = \rho v \pi R_{\text{HL}}^2$
- ホイール＝リットルトン成長時間 $t_{\text{growth}} = M/N_{\text{HL}}$

$$\begin{aligned} R_{\text{HL}} &= \frac{2GM}{v_{\infty}^2} \\ &= 2.65 \times 10^8 \frac{M}{10M_{\odot}} \left(\frac{v_{\infty}}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ cm.} \\ t_{\text{HL}} &= \frac{R_{\text{HL}}}{v_{\infty}} \\ &= 84.0 \frac{M}{10M_{\odot}} \left(\frac{v_{\infty}}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-3} \text{ yr.} \\ \dot{M}_{\text{HL}} &= \pi R_{\text{HL}}^2 \rho_{\infty} v_{\infty} = \frac{4\pi G^2 M^2}{v_{\infty}^3} \rho_{\infty} \\ &= 3.70 \times 10^8 \left(\frac{M}{10M_{\odot}} \right)^2 \frac{\rho_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \left(\frac{v_{\infty}}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-3} \text{ g s}^{-1} \\ t_{\text{growth}} &= \frac{M}{\dot{M}_{\text{HL}}} \\ &= 1.79 \times 10^6 \left(\frac{M}{10M_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{v_{\infty}}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \text{ yr.} \end{aligned}$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

8



2.2 ボンチ降着

2010/10/12

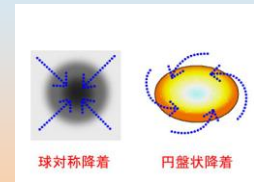
Black-Hole Accretion Disks

9



ボンチ降着 仮定

- 球対称降着
 - 質量 M の中心天体
 - 定常
 - 球対称(r)
 - 非粘性
 - 断熱
 - 磁場・輻射なし
 - Bondi 1957



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

10



ボンチ降着 基礎方程式

- 連続の式
 - 密度 ρ 、速度 v
- 運動方程式
 - 圧力 p
- 状態方程式
 - 比熱比 γ
- エネルギー積分
 - ベルヌーイ定数 E

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi r^2} \frac{d}{dr} (4\pi r^2 \rho v) &= 0, \\ v \frac{dv}{dr} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{GM}{r^2}, \\ p &= K \rho^{\gamma}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -4\pi r^2 \rho v &= \dot{M}, \\ \frac{1}{2} v^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} - \frac{GM}{r} &= E, \end{aligned}$$

2010/10/12

Black-Hole



ボンチ降着 風方程式

- 流速と音速
 - 音速 $c_s^2 = dp/d\rho$
- 積分形

$$\begin{aligned} -4\pi r^2 c_s^{\frac{2}{\gamma-1}} v &= (K\gamma)^{\frac{1}{\gamma-1}} \dot{M}, \\ \frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{\gamma-1} c_s^2 - \frac{GM}{r} &= E. \end{aligned}$$

- 微分形: 風方程式

$$\begin{aligned} (v^2 - c_s^2) \frac{1}{v} \frac{dv}{dr} &= \frac{2}{r} c_s^2 - \frac{GM}{r^2}, \\ c_s^2 &= (\gamma-1) \left(E + \frac{GM}{r} - \frac{1}{2} v^2 \right). \end{aligned}$$

2010/10/12

Black-Ho

ボンチ降着 風方程式

マッハ数

- マッハ数 $M = v/c_s$
- 臨界点 (critical point) / 遷音速点 (transonic point): $D=0=N$

$$\frac{dM}{dr} = \frac{N}{D}, \quad (2.29)$$

$$D = M^2 - 1, \quad (2.30)$$

$$N = M \left(\frac{\gamma-1}{2} M^2 + 1 \right) \left[\frac{2}{r} - \frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)} \frac{1}{E} + \frac{GM}{r^2} \right], \quad (2.31)$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

13

ボンチ降着 特異点

特異点解析

- 風方程式の分母 D と分子 N を、それぞれ、臨界点 (特異点) の近傍で2変数で線形展開する
- 展開係数は臨界点の値で評価する

$$D(r, M) \sim D|_c + \left. \frac{\partial D}{\partial r} \right|_c dr + \left. \frac{\partial D}{\partial M} \right|_c dM,$$

$$N(r, M) \sim N|_c + \left. \frac{\partial N}{\partial r} \right|_c dr + \left. \frac{\partial N}{\partial M} \right|_c dM.$$

$$\lambda_{11} \equiv \left. \frac{\partial D}{\partial r} \right|_c = 0,$$

$$\lambda_{12} \equiv \left. \frac{\partial D}{\partial M} \right|_c = 2,$$

$$\lambda_{21} \equiv \left. \frac{\partial N}{\partial r} \right|_c = \frac{5-3\gamma}{r_c^2},$$

$$\lambda_{22} \equiv \left. \frac{\partial N}{\partial M} \right|_c = 0$$

2010/10/12

ボンチ降着 特異点

特異点解析

- 風方程式に展開を代入すると、 dM/dr に関する2次方程式が得られる
- この方程式は臨界点のごく近傍だけで成り立つ方程式で、その解は2つの解をもつ

$$\frac{dM}{dr} = \frac{\lambda_{21} dr + \lambda_{22} dM}{\lambda_{11} dr + \lambda_{12} dM} = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{22} \frac{dM}{dr}}{\lambda_{11} + \lambda_{12} \frac{dM}{dr}}.$$

$$\lambda_{12} \left(\frac{dM}{dr} \right)^2 + (\lambda_{11} - \lambda_{22}) \frac{dM}{dr} - \lambda_{21} = 0,$$

$$\frac{dM}{dr} = \frac{-\lambda_{11} + \lambda_{22} \pm \sqrt{(\lambda_{11} - \lambda_{22})^2 + 4\lambda_{12}\lambda_{21}}}{2\lambda_{12}}.$$

$$\frac{dM}{dr} = \pm \sqrt{\frac{5-3\gamma}{2r_c^2}}.$$

2010/10/12

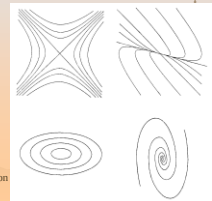
ボンチ降着 トポロジー

臨界点のトポロジー

- 鞍点 saddle
- 結節点 node
- 渦心点 center/spiral
- 非粘性、断熱
 - 鞍点
- 粘性、熱伝導
 - 結節点
 - But causality problem

Table 2.1 Roots and Types of Critical Points.

Roots	Type
Two real roots with opposite sign	saddle
Two real roots with same sign	node
Pure imaginary roots	center
Complex roots	spiral

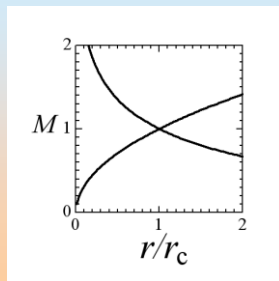


2010/10/12

Black-Hole Accretion

ボンチ降着 定常解

- 風解 (外向き)
 - Parker 1964
- 降着解 (内向き)
 - Bondi 1957



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

17

2.3 粘性過程

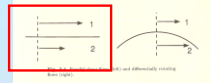
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

18



粘性過程 平行流



- x 方向の1次元流で、 y 方向に速度勾配
- 境界面に働く x 方向の粘性力(摩擦力)

- η : dynamical viscosity
- ν : kinetic viscosity
- y 方向の運動量流束 $=-t_{yx}$

$$t_{yx} = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right),$$

- y と $y-\Delta y$ の間の層に働く x 方向の体積力

- y で $t_{yx}(y)$ の粘性力を受け
- $y-\Delta y$ で $t_{yx}(y-\Delta y)$ の粘性力を与える

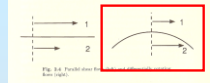
$$f_x = \frac{\partial t_{yx}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right).$$

2010/10/12

Black-H



粘性過程 回転流



- ϕ 方向の回転流で、 r 方向に速度勾配
- 境界面(円周上)に働く r 方向の粘性力(摩擦力)

$$t_{r\phi} = \eta \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right) = \eta r \frac{d\Omega}{dr}.$$

- 円周全域で働く全トルク

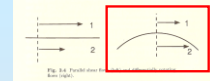
- r 方向の角運動量流束 $=-G(r)$

$$G(r) = 2\pi r \int r t_{r\phi} dz \approx 4\pi r^3 \eta H \frac{d\Omega}{dr},$$

2010/10/12



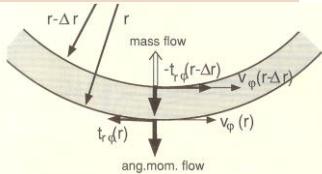
粘性過程 回転流



- r と $r-\Delta r$ の間の層に働く ϕ 方向の表面力

- r で $G(r)$ の粘性力を受け
- $r-\Delta r$ で $G(r-\Delta r)$ の粘性力を与える

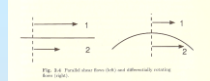
$$2\pi r \cdot r F_\phi = \frac{dG(r)}{dr},$$



21



粘性過程 粘性係数



- 粘性係数の大きさ

- 分子粘性

- v_{mol} : 分子運動の速度 $\sim$ 音速: $T=10^4\text{K}$
- l_{mfp} : 分子の平均自由行程: $\rho=10^{-8}\text{g/cm}^3$
- r : 半径 $=10^{11}\text{cm}$

$$\nu_{\text{mol}} \sim v_{\text{mol}} l_{\text{mfp}} \sim 10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{and} \quad t_{\text{vis}} \equiv \frac{r^2}{\nu} \sim 3 \times 10^{11} \text{ yr},$$

- 乱流粘性

- v_{turb} : 乱流速度 $\sim$ 音速
- l_{turb} : 乱流サイズ $\sim H=10^9\text{cm}$

$$\nu_{\text{turb}} \sim v_{\text{turb}} l_{\text{turb}} \sim 10^{15} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{and} \quad t_{\text{vis}} \sim 10^7 \text{ s},$$

2010/10/12



2.4 磁気不安定性

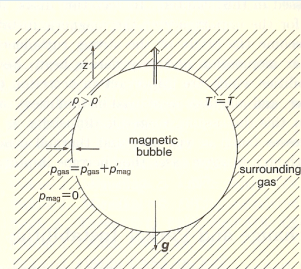
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

23



磁場の効果 磁気浮力



2010/10/12

磁場の効果 磁気浮力不安定

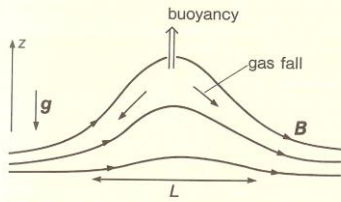


Fig. 17.3 Schematic picture showing the mechanism of the Parker instability.

As in the above subsection, we consider that unperturbed magnetic fields are in the horizontal direction in a stratified medium. A part of the magnetic fields is assumed to be perturbed upward, as is shown schematically in figure 17.3. The magnetic tension, of course, resists this deformation. In the present problem, however, a gas lifted up by

201

磁場の効果 磁気回転不安定

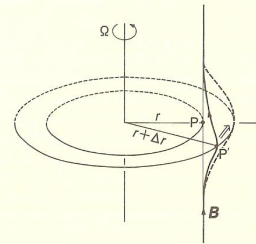


Fig. 17.8 Schematic picture showing magneto-rotational instability for the case of axisymmetric perturbations in disks with vertical magnetic field.

磁場の効果 磁気回転不安定

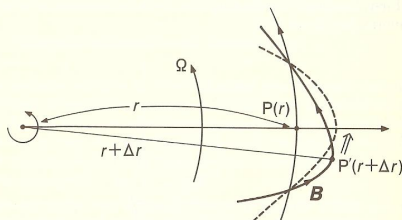


Fig. 17.9 Schematic picture showing magneto-rotational instability for the case of axisymmetric perturbations in disks with toroidal magnetic field.

20

2.5 相対論の効果

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

28

相対論の効果

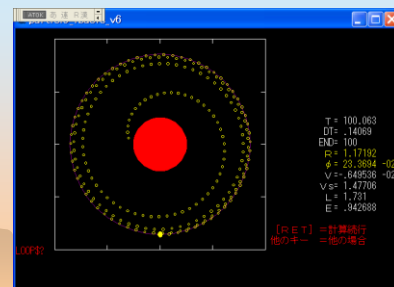
- 定性的
 - 最終安定円軌道の存在
 - エピサイクリック振動数の消失
- 定量的
 - 角速度などの量的違い(固有および観測)
 - 粘性への影響
 - 観測振動数への影響
 - 重力ポテンシャルの量的違い
 - 温度への影響
 - エネルギー解放の効率への影響
- 近似的扱い
 - 擬ニュートンポテンシャル
- 放射に関して
 - ドップラー効果
 - 重力赤方偏移
 - 光線の曲がり&重力レンズ効果

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

29

相対論の効果 最終安定円軌道



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

30



ニュートン類推 エネルギー

● 運動エネルギー

- 動径速度 v_r
- 角運動量 l

$$T = \frac{1}{2} v_r^2 + \frac{\ell^2}{2r^2},$$

● ポテンシャルエネルギー

回転運動による
エネルギー増加分

$$U = -\frac{GM}{r} \left(1 + \frac{\ell^2}{c^2 r^2} \right).$$

● 全エネルギー

- 静止質量の補正

$$E_{\text{NR}} = (1/2)(E^2/c^2 - c^2).$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

31



ニュートン類推 有効ポテンシャル

● エネルギー積分

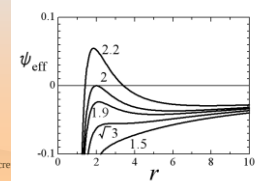
$$\frac{1}{2} \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 + \psi_{\text{eff}} = \frac{E^2 - c^4}{2c^2},$$

$$\psi_{\text{eff}}(r) \equiv -\frac{GM}{r} \left(1 + \frac{\ell^2}{c^2 r^2} \right) + \frac{\ell^2}{2r^2}.$$

● 有効ポテンシャル

- 半径 r/r_g
- ポテンシャル ψ/c^2
- 角運動量 l/cr_g

2でmarginally bound
√3でmarginally stable



2010/10/12

Black-Hole Accre



ニュートン類推 比角運動量

● 円運動の角運動量

- $d\psi_{\text{eff}}/dr=0$

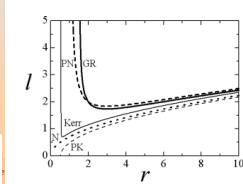
2でmarginally bound
√3でmarginally stable

$$\ell^2(r) = \ell_K^2 = \frac{GM r^2}{r - 3r_g/2},$$

$$r_{\text{ms}} = 3r_g$$

$$\ell_{\text{ms}} = \sqrt{3} r_g c.$$

$$E_b = c^2 - \left(\frac{8}{9} \right)^{1/2} c^2 = 0.0572 c^2,$$



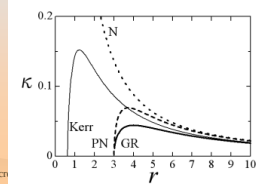
ニュートン類推 エピサイクリック振動

● エピサイクリック振動

- Newtonianだと
- $\kappa = \Omega$

$$\kappa_{\text{GR}}^2 = \frac{GM}{r^3} \left(1 - \frac{3r_g}{r} \right).$$

- General Rel.だと
- $4r_g$ で最大値
- $3r_g$ で消失



2010/10/12

Black-Hole Accre



擬ニュートンポテンシャル

● Pseudo-Newtonian potential (Paczynski and Wiita 1980)

$$R = \sqrt{(r^2 + z^2)}$$

$$r_g = 2GM/c^2$$

$$\psi_{\text{PN}} = -\frac{GM}{R - r_g},$$

- 力学的な性質をよく模倣する
 - $(r > r_{\text{ms}}$ で10~20%の精度)
- 時空の曲がりは再現できない
 - 光線の曲がりはダメ

2010/10/12

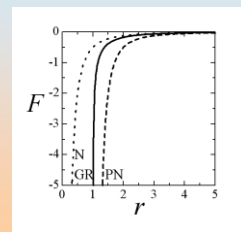
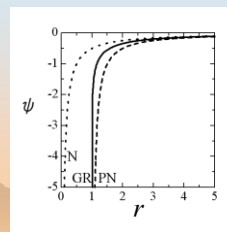
Black-Hole Accretion Disks

35



擬ニュートンポテンシャル ポテンシャルと力

● ポテンシャルと力



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

36

相对論的円運動 角速度

角速度

the Newtonian case. The angular velocity measured at infinity is

$$\Omega_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}.$$

in the Schwarzschild metric¹⁷, whereas it is expressed as

$$\Omega_{\text{PN}} = \sqrt{\frac{GM}{(r-r_g)^3 r}}$$

in the Paczyński-Wiita potential.

For the case of a rotating black hole, we have

$$\Omega_{\text{Kerr}} = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \left[1 + \frac{a_*}{(8r^3)^{1/2}} \right]^{-1},$$

where $\tilde{r} = r/r_g$ (see appendix A for details), in the Kerr metric,

$$\Omega_{\text{PK}} = \sqrt{\frac{GM}{r^{3-\beta} (r-r_{\text{H}})^2}}$$

$$\Omega_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{GM}{(r-3r_g/2)r^2}}$$

¹⁷The angular velocity measured at disk is

2010/10/12

37

相对論的円運動 回転速度

回転速度

Similarly, the rotational velocity $V (= r\Omega)$, which is $V_{\text{N}} = \sqrt{GM/r}$ in the Newtonian case, is expressed as

$$V_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (2.87)$$

$$V_{\text{PN}} = \sqrt{\frac{GM r}{(r-r_g)^2}}, \quad (2.88)$$

and for a rotating black hole,

$$V_{\text{Kerr}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \left[1 + \frac{a_*}{(8r^3)^{1/2}} \right]^{-1}, \quad (2.89)$$

$$V_{\text{PK}} = \sqrt{\frac{GM}{r^{1-\beta} (r-r_{\text{H}})^2}}, \quad (2.90)$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

38

相对論的円運動 比角運動量

比角運動量

The specific angular momentum ℓ , which is $\ell_{\text{N}} = \sqrt{GM}r$ in the Newtonian case, is expressed as

$$\ell_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{GM r^2}{r-3r_g/2}} \quad (2.91)$$

$$\ell_{\text{PN}} = \sqrt{\frac{GM r^3}{(r-r_g)^2}} \quad (2.92)$$

For the rotating black hole,

$$\ell_{\text{Kerr}} = \sqrt{GM r} \frac{1-2a_*/(8r^3)^{1/2} + a_*^2/(4r^2)}{\sqrt{1-3/(2r) + 2a_*/(8r^3)^{1/2}}}, \quad (2.93)$$

$$\ell_{\text{PK}} = \sqrt{\frac{GM r^{1+\beta}}{(r-r_{\text{H}})^2}}, \quad (2.94)$$

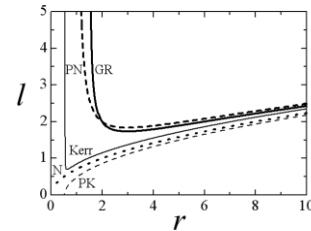
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

39

相对論的円運動 比角運動量

比角運動量



2010/10/12

40

相对論的円運動 エピサイクリック振動数

エピサイクリック振動数

The epicyclic frequency κ , which is $\kappa_{\text{N}} = \Omega_{\text{N}}$ in the Newtonian case, becomes

$$\kappa_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{GM}{r^3} \left(1 - \frac{3r_g}{r} \right)}, \quad (2.95)$$

$$\kappa_{\text{PN}} = \sqrt{\frac{GM(r-3r_g)}{r^2(r-r_g)^3}}. \quad (2.96)$$

For the rotating black hole,

$$\kappa_{\text{Kerr}}^2 = \frac{GM}{r^3} \frac{1-3r_g/r + 8a_*(r_g/2r)^{3/2} - 3a_*^2(r_g/2r)^2}{[1 + a_*(r_g/2r)^{3/2}]^2}. \quad (2.97)$$

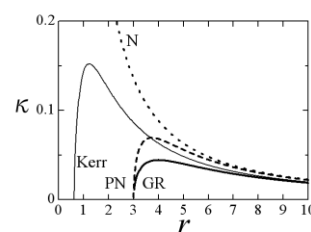
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

41

相对論的円運動 エピサイクリック振動数

エピサイクリック振動数



2010/10/12

42



ブラックホール降着円盤の物理

Black-Hole Accretion Disks: Revised

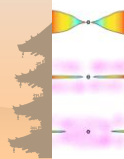
1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability ×
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

3 Classical Models

1. Viscous Accretion Disks
2. Standard Disks
3. Optically Thin Disks
4. Accretion Disk Corona
5. Relativistic Standard Disks
6. Relativistic Tori

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



3.1 粘性降着円盤

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



粘性降着円盤

• 粘性作用によるガス分布の時間変化をみる

- ケプラー回転 $v_\phi = v_K = \sqrt{GM/r^3}$
- 動径落下速度 $v_r \ll$ 回転速度 v_ϕ
- $H \ll r$
- ガス密度 ρ
- 面密度 Σ
- 粘性ストレス $t_{r\phi}$
- 積分した粘性ストレス $T_{r\phi} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} t_{r\phi} dz = \nu \Sigma r \frac{d\Omega}{dr}$
- 粘性率 ν

$$\Sigma = \int_{-\infty}^{\infty} \rho dz,$$

$$T_{r\phi} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} t_{r\phi} dz = \nu \Sigma r \frac{d\Omega}{dr}$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

3



粘性降着円盤 連続の式

• 連続の式

- r と $r + \Delta r$ の間の環 (annulus) での物質質量の変化

$$\frac{\partial}{\partial t} (2\pi r \Delta r \Sigma) = (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma)_r - (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma)_{r+\Delta r},$$

$$\simeq -2\pi \Delta r \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r), \quad (3.8)$$

$$r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r) = 0. \quad (3.9)$$

$$\text{質量降着率} \quad \dot{M} \equiv -2\pi r v_r \Sigma, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}. \quad (3.11)$$

2010/10/12



粘性降着円盤 角運動量輸送

• 角運動量の輸送

- r と $r + \Delta r$ の間の環での角運動量の変化

$$\frac{\partial}{\partial t} (2\pi r \Delta r \Sigma r^2 \Omega) = (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_r - (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_{r+\Delta r} + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r$$

$$\simeq -2\pi \Delta r \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r^2 \Omega) + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r, \quad (3.12)$$

$$\text{トルク} \quad G(r, t) = 2\pi r^2 T_{r\phi} = 2\pi r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr}. \quad (3.13)$$

$$r \frac{\partial (\Sigma r^2 \Omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r^2 \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial G}{\partial r}. \quad (3.14)$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

4



粘性降着円盤 角運動量輸送

$$r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r^2 \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial G}{\partial r}. \quad (3.14)$$

$$\dot{M} \equiv -2\pi r v_r \Sigma, \quad (3.10)$$

$$\dot{M} \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right] = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\phi}) = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr} \right), \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}. \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\phi}) \right] = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr} \right) \right]. \quad (3.16)$$

- 連続の式と角運動量保存の式から、表面密度 Σ の時間変化の式を立てる。
- ここでは、定常を仮定していないので、 dM/dt は一定ではない。
- とりあえずは、粘性率 ν も Ω も一般の場合。



粘性降着円盤 面密度の時間変化を表す式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\varphi}) \right] = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr}) \right] \quad (3.16)$$

In the case of a point-mass potential, especially, we find

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = -\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{r}{GM} \right)^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\varphi}) \right] \quad (3.17)$$

or

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right], \quad (3.18)$$

$$\nu = \text{一定} \quad \frac{\partial (r^{1/2} \Sigma)}{\partial t} = 3\nu \frac{\partial (r^{1/2} \Sigma)}{\partial (r^2)} + 3\nu \frac{\partial^2 (r^{1/2} \Sigma)}{\partial (r^2)}. \quad (3.19)$$

右辺第1項 = $r^2/3\nu$ の時間スケールで起こる質量降着
右辺第2項 = $r^2/3\nu$ の時間スケールで起こる質量拡散

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

7



粘性降着円盤 粘性による動径拡散

- $\nu \propto r$ のときの解析解

- 粘性散逸は半径方向に対称ではない
 - 質量は内へ
 - 角運動量は外へ

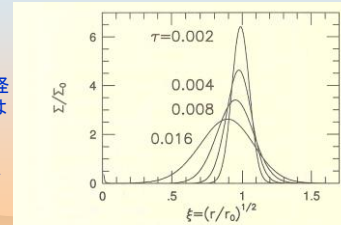


Fig. 3.1 Viscous diffusion for the case of $\nu \propto r$. The abscissa is $\xi \equiv (r/r_0)^{1/2}$, while the ordinate is the normalized surface density. The unit of time τ is the viscous timescale at $r = r_0$ ($\xi = 1$).

2010/10/12



3.2 標準円盤



天体構造のモデル

- ステップ
 - 構造 (静的、定常流)
 - 放射スペクトル
 - 安定性 (力学、熱)
 - 時間変化 (非線形振動)
 - 振動波動
- 手法 (物理)
 - 流体力学
 - 磁気流体力学
 - 輻射過程
 - 輻射輸送
 - 相対論
 - 素過程
 - 電離
 - 二温度 (イオンと電子)
 - 電子陽電子対
 - 元素組成
 - 核反応
 - 塵
- 手法 (数学)
 - 微分 (積分) 方程式
 - 代数学
 - 線形化
 - 離散化

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

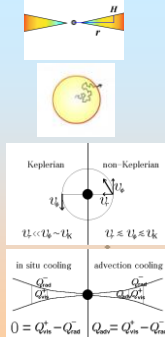
10



標準円盤

Shakura and Sunyaev 1973

- 質量降着率 < 臨界降着率 L_E/c^2
- 中心天体の重力のみ $\psi = -GM/r$
- 定常 $\partial/\partial t = 0$
- 軸対称 $\partial/\partial \varphi = 0$
- 幾何学的に薄い $H \ll r$
- 光学的に厚い $\tau \gg 1$
- ケプラー回転 $v_\varphi = v_K$
- 静水圧平衡
- 熱平衡 (粘性加熱 = 放射冷却)
- α 粘性



粘性流体の微分方程式系 → 代数方程式系

2010/10/12



標準円盤 質量保存／連続の式

- 一般形
 - ρ : ガス密度
 - $\mathbf{v}$: 速度ベクトル
- 円筒座標
 - (r, φ, z)
- z積分: 表面密度
 - $\Sigma = \int \rho dz$
- 積分形
 - $\mathbf{v}_r$: 動径速度成分 < 0
 - $\dot{M}$: 質量降着率

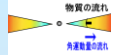
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho v_\varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0,$$

$$\Sigma = 2\rho H.$$

$$\dot{M} = -2\pi r v_r \Sigma,$$

定常だから質量降着率は一定!



標準円盤

運動量保存／ r 運動方程式

- 一般形
 - ψ : 重力ポテンシャル
 - p : 圧力
 - N : 粘性力
- 円筒座標
 - (r, ϕ, z)
 - v_ϕ : 回転速度
- ケプラー回転
 - Ω : 回転角速度

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\rho \nabla \psi - \nabla p + \rho N,$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_r}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + N_r,$$

$$\Omega = \Omega_K \equiv \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad \text{and} \quad v_\phi = v_K \equiv \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks aによらずに解けている

標準円盤

角運動量保存／ ϕ 運動方程式

- 一般形
 - N : 粘性力
- 円筒座標
 - (r, ϕ, z)
- 粘性力
 - $t_{r\phi}$: 粘性ストレステンソル
- 粘性ストレステンソル
- 粘性力 N_ϕ

$$\frac{dv}{dt} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\rho \nabla \psi - \nabla p + \rho N,$$

$$\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_\phi}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_\phi}{r} = -\frac{\partial \psi}{\partial \phi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \phi} + N_\phi,$$

$$\rho N_\phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 t_{r\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{\partial t_{z\phi}}{\partial z},$$

$$t_{r\phi} = t_{\phi r} = \eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right],$$

$$\rho N_\phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r t_{r\phi}) \quad \text{and} \quad t_{r\phi} = \eta r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right) = \eta r \frac{\partial \Omega}{\partial r},$$

$$\rho N_\phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta r^3 \frac{d\Omega}{dr} \right),$$

2010/10/12 14

標準円盤

角運動量保存／ ϕ 運動方程式

- z 積分
 - $T_{r\phi} = \int t_{r\phi} dz$
 - 粘性率: $\eta = \rho \nu$
- r 積分
 - 境界条件 (内縁 $r=r_{in}$)
 - $T_{r\phi} = 0$
 - $l = r^2 \Omega = l_{in}$
- ケプラー円盤
 - $l = \sqrt{GM} r$
 - $l_{in} = \sqrt{GM} r_{in}$

$$\dot{M} \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right] = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\phi}) = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr} \right),$$

$$\frac{\dot{M}}{2\pi} r^2 \Omega = -r^2 T_{r\phi} + \text{const.} = -r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr} + \text{const.}$$

$$\frac{\dot{M}}{2\pi} (\ell - \ell_{in}) = -r^2 T_{r\phi} = -r^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dr}$$

$$T_{r\phi} = -\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \dot{M} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right) \quad \text{or} \quad \nu \Sigma = \frac{\dot{M}}{3\pi} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right).$$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks aによらずに解けている

標準円盤

静水圧平衡／ z 運動方程式

- 一般形
- 円筒座標
 - (r, ϕ, z)
- 圧力勾配力 = z 重力
 - p : 圧力
- z 積分
 - H : 半厚み
- 最終的に
 - $c_s^2 = p/\rho$: 音速

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\rho \nabla \psi - \nabla p + \rho N,$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial v_z}{r \partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + N_z,$$

$$\frac{p}{H} = -\rho g_z(H), \quad g_z(H) \simeq -\frac{GM}{r^2} \frac{H}{r} = -\Omega_K^2 H,$$

$$\Omega_K^2 H^2 = \frac{p}{\rho} = c_s^2,$$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks Hはaに依存する

標準円盤

熱平衡／エネルギー式

- 熱エネルギーの保存: 一般形

$$\rho T \frac{ds}{dt} = \rho T \left[\frac{\partial s}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) s \right] = \rho \frac{de}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \Phi + \rho e - \text{div } F,$$

- T : 温度
- s : エントロピー
- e : 単位質量あたりの内部エネルギー
- ρe : 単位体積あたりの内部エネルギー
- Φ : 粘性加熱
- ρe : 他の加熱 (核反応など)
- F : 放射、伝導、対流などのフラックス

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 17

標準円盤

熱平衡／エネルギー式

- エネルギー式の左辺
 - 内部エネルギー ρe
- 左辺は
 - γ : 比熱比
 - B : ガス圧比
 - Γ : 一般化された比熱比

$$\rho \frac{de}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \Phi + \rho e - \text{div } F,$$

$$\rho e = \frac{1}{\gamma - 1} p_{\text{gas}} + 3p_{\text{rad}} = \left[\frac{\beta}{\gamma - 1} + 3(1 - \beta) \right] p, \quad \beta \equiv \frac{p_{\text{gas}}}{p}$$

$$\rho \frac{de}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\Gamma_3 - 1} \left[\frac{dp}{dt} - \Gamma_1 \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right],$$

$$\Gamma_1 = \beta + \frac{(\gamma - 1)(4 - 3\beta)^2}{\beta + 12(\gamma - 1)(1 - \beta)},$$

$$\Gamma_3 = 1 + \frac{(4 - 3\beta)(\gamma - 1)}{\beta + 12(\gamma - 1)(1 - \beta)}.$$

2010/10/12 18

標準円盤 熱平衡／エネルギー式

- エネルギー式の右辺
 - 粘性加熱Φ

$$\Phi = t_{ik} \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = \eta \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\zeta - \frac{2}{3} \eta \right) \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right)^2$$

- 核反応など他の熱源ρε
- 放射フラックスF
 - K: "熱"伝導率
 - κ: 不透明度
 - a: 放射定数

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$F = -K \nabla T,$$

$$F_{rad} = -\frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \nabla T,$$

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

Black-Hole Accretion Disks 19

標準円盤 熱平衡／エネルギー式

- 一般形
- 円筒座標
- 粘性加熱

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$\rho \frac{dc}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \Phi + \rho \epsilon - \text{div} \mathbf{F},$$

$$\frac{1}{\Gamma_3 - 1} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right) p - \Gamma_1 \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_\phi \frac{\partial}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \rho \right]$$

$$= \Phi + \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial r} \left(r K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(K \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\Phi = \eta \left[2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \phi} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right]$$

$$+ \left(\zeta - \frac{2}{3} \eta \right) \left[\frac{\partial (rv_\phi)}{\partial r} + \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right]^2$$

$$\Phi = t_{r\phi} \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right) = \eta \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right)^2 = \eta^2 \left(\frac{d\Omega}{dr} \right)^2$$

Black-Hole Accretion Disks 20

標準円盤 熱平衡／エネルギー式

- 熱平衡
 - $q_{vis} = q_{rad}$
 - zフラックス
- z積分
 - $Q_{vis} = Q_{rad}$
 - 光学的厚さτ

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$0 = \eta r^2 \left(\frac{d\Omega}{dr} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$F(z) = -\frac{4ac[T(z)]^3}{3\kappa(z)\rho(z)} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$Q_{vis}^+ = \int_{-\infty}^{\infty} \nu \rho \left(r \frac{d\Omega}{dr} \right)^2 dz = \frac{9}{4} \nu \Sigma \Omega^2 = -\frac{3}{2} T_{r\phi} \Omega,$$

$$Q_{rad}^- = \int_{-H}^H F(z) dz = 2 \frac{4acT_c^4}{3\tau} = \frac{32\sigma T_c^4}{3\tau}$$

$$\tau = \bar{\kappa} \rho H = \frac{\bar{\kappa} \Sigma}{2} \gg 1,$$

Black-Hole Accretion Disks 21

標準円盤 状態方程式

- 状態方程式
 - k_B : ボルツマン定数
 - m_H : 水素質量
 - a: 放射定数
 - T_c : 赤道面温度
- z積分
 - H: 円盤の半分の厚み
 - $\Pi = \int p dz$, $\Pi_{gas} = \int p_{gas} dz$, $\Pi_{rad} = \int p_{rad} dz$
- ガス圧優勢領域 vs 輻射圧優勢領域

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$p = p_{gas} + p_{rad} = \frac{2k_B}{m_H} \rho T_c + \frac{aT_c^4}{3},$$

$$\Pi = \Pi_{gas} + \Pi_{rad} = \frac{2k_B}{m_H} \Sigma T_c + \frac{aT_c^4}{3} \cdot 2H,$$

Black-Hole Accretion Disks 22

標準円盤 不透明度

- 不透明度 ($> 10^4 K$)
 - κ_{es} : 電子散乱
 - κ_{ff} : 制動放射
- 光学的厚み
 - τ: 全厚み
 - τ*: 有効厚み
- 電子散乱領域 vs 自由自由領域

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$\bar{\kappa} = \kappa_{es} + \kappa_{ff} = \kappa_{es} + \kappa_0 \rho T_c^{-3.5}$$

$$\kappa_{es} = 0.40 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\kappa_0 = 6.4 \times 10^{22} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\tau = \bar{\kappa} \rho H$$

$$\tau_* \equiv \sqrt{\kappa_{es} \kappa_{ff}} \rho H$$

Black-Hole Accretion Disks 23

標準円盤 粘性過程／α粘性

- α仮定
- z積分
- 粘性係数
- ケプラー円盤

in situ cooling advection cooling

$0 = Q_{in} - Q_{out}$ $Q_{in} = Q_{out} - Q_{adv}$

$$t_{r\phi} = \nu r \frac{d\Omega}{dr} = -\alpha p$$

$$T_{r\phi} = \nu \Sigma r \frac{d\Omega}{dr} = -\alpha \Pi,$$

$$0 < \mu < 1$$

$$\nu = A_\nu \alpha \frac{c_s^2}{\Omega} = A_\nu \alpha c_s H; \quad A_\nu \equiv \left(-\frac{d \ln \Omega}{d \ln r} \right)^{-1}$$

$$\nu = \frac{2}{3} \alpha c_s H, \quad \Omega = \Omega_K$$

Black-Hole Accretion Disks 24

標準円盤 粘性過程／ α 粘性

- 粘性パラメータ α の評価
 $0 < \alpha < 1$
- α を空間的・時間的に一定と“仮定”する(?)
- 粘性の起源(?)
 - 乱流粘性
 - 磁気乱流粘性
- 拡散型粘性(? @内縁近傍)

$$\nu_{\text{turb}} \sim v_{\text{turb}} \ell_{\text{turb}}$$

$$\alpha \sim \frac{v_{\text{turb}}}{c_s} \frac{\ell_{\text{turb}}}{H}$$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 25

標準円盤 エネルギー収支／円盤放射

- エネルギー収支 $Q_{\text{vis}} = Q_{\text{rad}}$
 - 粘性加熱 $Q_{\text{vis}}^+ = \int_{-\infty}^{\infty} v \rho \left(r \frac{d\Omega}{dr} \right)^2 dz = \frac{9}{4} v \Sigma \Omega^2 = -\frac{3}{2} v r_s \Omega$
 $r_s = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{\frac{GM}{\Sigma}} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right)$
 - 放射冷却: 円盤表面で黒体放射 $Q_{\text{rad}}^- = 2F = 2\sigma T_{\text{eff}}^4$
- 表面温度 T_{eff} が解ける★ α によらない!

$$F = \sigma T_{\text{eff}}^4 = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right)$$

2010/10/12 26

標準円盤 エネルギー収支／円盤放射

- 表面温度

$$T_{\text{eff}} = \left[\frac{3GM\dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right) \right]^{1/4}$$

$$T_{\text{eff}} \propto r^{-3/4}$$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 27

標準円盤 エネルギー収支／円盤光度

- 円盤黒放射を円盤全面で積分→円盤光度

$$L_d = \int_{r_{\text{in}}}^{\infty} 2F 2\pi r dr = \int_{r_{\text{in}}}^{\infty} \frac{3GM\dot{M}}{2r^2} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right) dr = \frac{GM\dot{M}}{2r_{\text{in}}}$$

- 無限遠と内縁の間の重力ポテンシャルの落差の半分が解放される

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 28

標準円盤 定常解／式のまとめ

代数方程式系

$$\begin{aligned} \dot{M} &= -2\pi r v_r \Sigma, \\ \Omega &= \Omega_K \equiv \sqrt{\frac{GM}{r^3}}, \\ \nu \Sigma &= \frac{1}{3\pi} \dot{M} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right), \\ H &= \frac{c_s}{\Omega_K}, \\ \frac{9}{4} \nu \Sigma \Omega_K^2 &= \frac{8\alpha c_s^4}{3\pi}, \\ p &= \frac{2\rho k_B T_c}{m_H} + \frac{\sigma T_{\text{eff}}^4}{3}, \\ \Sigma &= 2\rho H, \\ c_s &= \left(\frac{p}{\rho} \right)^{1/2}, \\ \tau &= \frac{1}{2} \kappa \Sigma, \\ \kappa &= \kappa_{\text{es}} + \kappa_0 \rho T_c^{-3.5}, \\ \frac{3}{2} \rho \nu \Omega_K &= \alpha p \quad (= -t_{\text{eq}}). \end{aligned}$$

11) physical quantities ($v_r, \Sigma, \Omega, H, \rho, \nu, c_s, p, T_c, \kappa$, and τ) as functions of radius r for given parameters ($M, \dot{M}$, and α).

規格化・無次元化

$$\tilde{m} \equiv \frac{M}{M_\odot}, \quad \tilde{\dot{m}} \equiv \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{crit}}} \cdot \tilde{r} \cdot \frac{r_g}{r_g}$$

Here, r_g is the Schwarzschild radius,
 $r_g \equiv \frac{2GM}{c^2} = 2.95 \times 10^6 m$,
 and the critical mass-flow rate is defined as
 $\dot{M}_{\text{crit}} \equiv \frac{L_E}{c^2} = 1.4 \times 10^{17} m \text{ g s}^{-1} = 2 \times 10^{-9} m M_\odot \text{ yr}^{-1}$,

20

標準円盤 定常解／(a)内部領域

- $p \sim p_{\text{rad}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$ $\dot{m} \geq 0.097(\alpha m)^{-1/8}$

$$\begin{aligned} H &= 5.5 \times 10^4 m \dot{m} f \text{ cm}, \\ \Sigma &= 1.0 \times 10^2 \alpha^{-1} \dot{m}^{-1} r^{-3/2} f^{-1} \text{ g cm}^{-2}, \\ \rho &= 9.0 \times 10^{-4} \alpha^{-1} \dot{m}^{-1} \dot{m}^{-2} r^{-3/2} f^{-2} \text{ g cm}^{-3}, \\ |v_r| &= 7.6 \times 10^8 \alpha \dot{m}^2 r^{-5/2} f \text{ cm s}^{-1}, \\ T_c &= 4.9 \times 10^7 (\alpha m)^{-1/4} \dot{m}^{-3/8} f^{-3/8} \text{ K}, \\ \tau_* &= 8.4 \times 10^{-3} \alpha^{-17/16} \dot{m}^{-1/16} \dot{m}^{-2} r^{93/32} f^{-2}, \\ f &\equiv 1 - \sqrt{\frac{3r_g}{r}}. \end{aligned}$$

20



標準円盤 定常解／(b)中間領域

• $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$

$$\begin{aligned} H &= 2.7 \times 10^3 \alpha^{-1/10} \dot{m}^{9/10} \dot{m}^{1/5} \dot{r}^{21/20} f^{1/5} \text{ cm}, \\ \Sigma &= 4.3 \times 10^4 \alpha^{-4/5} \dot{m}^{1/5} \dot{m}^{3/5} \dot{r}^{-3/5} f^{3/5} \text{ g cm}^{-2}, \\ \rho &= 8.0 \alpha^{-7/10} \dot{m}^{-7/10} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-33/20} f^{2/5} \text{ g cm}^{-3}, \\ |v_r| &= 1.7 \times 10^6 \alpha^{4/5} \dot{m}^{-1/5} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-2/5} f^{-3/5} \text{ cm s}^{-1}, \\ T_c &= 2.2 \times 10^8 \alpha^{-1/5} \dot{m}^{-1/5} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-9/10} f^{2/5} \text{ K}, \\ \tau_* &= 2.4 \times 10^1 \alpha^{-4/5} \dot{m}^{1/5} \dot{m}^{1/10} \dot{r}^{3/20} f^{1/10}. \end{aligned}$$

$$\dot{r}_{\text{ab}} \approx 18(\alpha \dot{m})^{2/21} \dot{m}^{16/21}$$

Accretion Disks

31



標準円盤 定常解／(c)外部領域

• $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{ff}}$

$$\begin{aligned} H &= 1.5 \times 10^3 \alpha^{-1/10} \dot{m}^{9/10} \dot{m}^{3/20} \dot{r}^{9/8} f^{3/20} \text{ cm}, \\ \Sigma &= 1.4 \times 10^5 \alpha^{-4/5} \dot{m}^{1/5} \dot{m}^{7/10} \dot{r}^{-3/4} f^{7/10} \text{ g cm}^{-2}, \\ \rho &= 4.7 \times 10^1 \alpha^{-7/10} \dot{m}^{-7/10} \dot{m}^{11/20} \dot{r}^{-15/8} f^{11/20} \text{ g cm}^{-3}, \\ |v_r| &= 5.4 \times 10^5 \alpha^{4/5} \dot{m}^{-1/5} \dot{m}^{3/10} \dot{r}^{-1/4} f^{-7/10} \text{ cm s}^{-1}, \\ T_c &= 6.9 \times 10^7 \alpha^{-1/5} \dot{m}^{-1/5} \dot{m}^{3/10} \dot{r}^{-3/4} f^{3/10} \text{ K}, \\ \tau &= 7.9 \times 10^1 \alpha^{-4/5} \dot{m}^{1/5} \dot{m}^{1/5} f^{1/5}. \end{aligned}$$

$$\dot{r}_{\text{bc}} \approx 2.5 \times 10^3 \dot{m}^{2/3}$$

c-Hole Accretion Disks

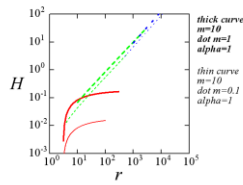
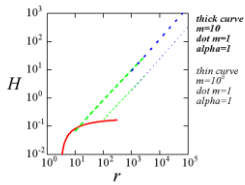
32



標準円盤 定常解：円盤厚み

赤：内部解
緑：中部解
青：外部解

- 質量の違い (dot $m=1$)
- 降着率の違い ($m=10$)
- $m=10$ (太線)
- $m=10^8$ (細線)
- dot $m=1$ (太線)
- dot $m=0.1$ (細線)



シールド半径が単位 Black-Hole Accretion Disks

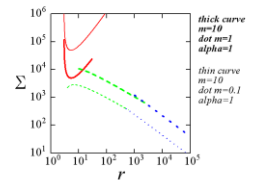
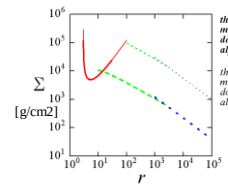
33



標準円盤 定常解：表面密度

赤：内部解
緑：中部解
青：外部解

- 質量の違い (dot $m=1$)
- 降着率の違い ($m=10$)
- $m=10$ (太線)
- $m=10^8$ (細線)
- dot $m=1$ (太線)
- dot $m=0.1$ (細線)



シールド半径が単位 Black-Hole Accretion Disks

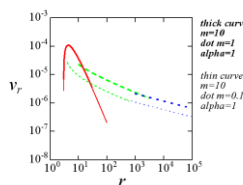
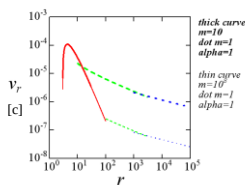
34



標準円盤 定常解：動径速度

赤：内部解
緑：中部解
青：外部解

- 質量の違い (dot $m=1$)
- 降着率の違い ($m=10$)
- $m=10$ (太線)
- $m=10^8$ (細線)
- dot $m=1$ (太線)
- dot $m=0.1$ (細線)



シールド半径が単位 Black-Hole Accretion Disks

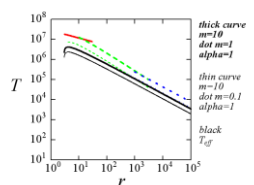
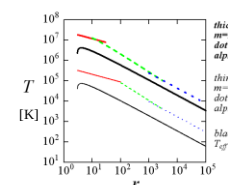
35



標準円盤 定常解：温度

赤：内部解
緑：中部解
青：外部解

- 質量の違い (dot $m=1$)
- 降着率の違い
- $m=10$ (太線)
- $m=10^8$ (細線)
- dot $m=1$ (太線)
- dot $m=0.1$ (細線)



シールド半径が単位 Black-Hole Accretion Disks

36

3.2 標準円盤 2

2010/10/12

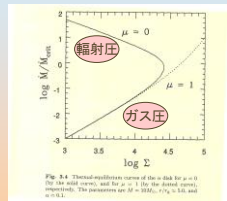
Black-Hole Accretion Disks

37

標準円盤 熱平衡曲線

- dot M - Σ 平面での熱平衡曲線 (r 固定)

- 2価関数!
- 上: 輻射圧優勢ブランチ
- 下: ガス圧優勢ブランチ



- こういうのは、たいてい、どちらか不安定

2010/10/12

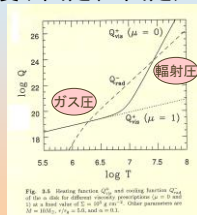
Black-Hole Accretion Disks

38

標準円盤 熱平衡曲線

- 加熱率 Q^+ と冷却率 Q^- vs温度 (r 固定、 Σ 固定)

- 2力所で交差
- 低温側: ガス圧
- 高温側: 輻射圧



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

39

標準円盤 熱平衡曲線

- 低温側: $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{ff}}$

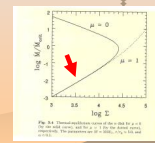
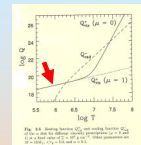
$$Q^+_{\text{vis}} \sim a \frac{p_{\text{gas}}}{\rho} \Omega \Sigma \propto T \Sigma$$

$$Q^-_{\text{rad}} \sim \frac{\sigma T^4}{\kappa_{\text{ff}} \Sigma} \propto \frac{T^8}{\Sigma^2}$$

$$Q^+_{\text{vis}} = Q^-_{\text{rad}} \quad T \propto \Sigma^{3/7}$$

$$\dot{M} \propto Q^+_{\text{vis}} \propto \Sigma T$$

$$\left(\frac{\partial \ln \dot{M}}{\partial \ln \Sigma} \right)_{Q^+_{\text{vis}} = Q^-_{\text{rad}}} = \frac{10}{7}$$



- こっちは熱的に安定

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

40

標準円盤 熱平衡曲線

- 高温側: $p \sim p_{\text{rad}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$

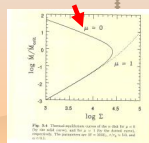
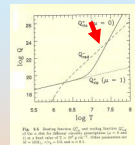
$$Q^+_{\text{vis}} \sim 2\alpha p_{\text{rad}} H \propto \frac{T^8}{\Sigma}$$

$$Q^-_{\text{rad}} \sim \frac{\sigma T^4}{\kappa_{\text{es}} \Sigma} \propto \frac{T^4}{\Sigma}$$

$$Q^+_{\text{vis}} = Q^-_{\text{rad}} \quad T \sim \text{constant};$$

$$\dot{M} \propto Q^+_{\text{vis}} \propto \Sigma^{-1}$$

$$\left(\frac{\partial \ln \dot{M}}{\partial \ln \Sigma} \right)_{Q^+_{\text{vis}} = Q^-_{\text{rad}}} = -1$$



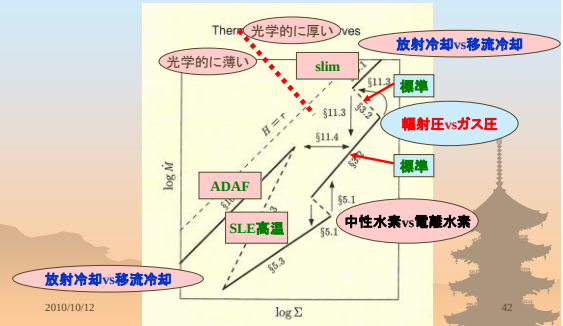
- こっちは熱的に不安定

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

41

標準円盤 熱平衡曲線



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

42



3.2 標準円盤 3

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

43



標準円盤

連続スペクトル: 円盤黒体放射

- 半径によって異なる温度の黒体放射を出す
 - r : 半径
- 観測されるスペクトル
 - i : 軌道傾斜角
 - D : 距離
- 近似的な温度分布
 - $T = T_{\text{in}}$ at $r = r_{\text{in}}$
 - $p = 3/4$
- スペクトルの振動数依存性
 - $x = h\nu/k_B T$

$$B_\nu(r) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp[h\nu/k_B T_{\text{eff}}(r)] - 1}$$

$$S_\nu = \int I_\nu d\Omega = \frac{\cos i}{D^2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} B_\nu(r) 2\pi r dr$$

$$T_{\text{eff}} = T_{\text{in}} \left(\frac{r}{r_{\text{in}}} \right)^{-p}$$

$$S_\nu = \frac{\cos i}{D^2} 2\pi \left(\frac{r_{\text{in}}^2}{p} \right)^{1/2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} B_\nu T^{-(2/p)-1} dT$$

$$= \frac{\cos i}{D^2} \frac{4\pi h}{c^3} \frac{r_{\text{in}}^2}{p} \left(\frac{k_B T_{\text{in}}}{h\nu} \right)^{2/p} \int_{x_{\text{in}}}^{x_{\text{out}}} \frac{x^{(2/p)-1}}{e^x - 1} dx$$

$$x_{\text{in}} = \frac{h\nu}{k_B T_{\text{in}}} \quad \text{and} \quad x_{\text{out}} = \frac{h\nu}{k_B T_{\text{in}}} \left(\frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{in}}} \right)^p$$

2010/10/12

Black-Hole Acc



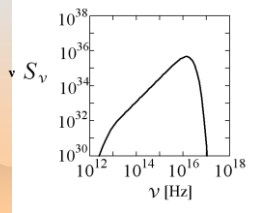
標準円盤

連続スペクトル: 円盤黒体放射

- 連続スペクトルの特徴
 - disk-blackbody
 - multi-color spectrum

$$S_\nu \propto \nu^{3-(2/p)} \quad \text{for} \quad \frac{k_B T_{\text{in}}}{h} \left(\frac{r_{\text{in}}}{r_{\text{out}}} \right)^p \ll \nu \ll \frac{k_B T_{\text{in}}}{h}$$

$$S_\nu \propto \nu^{-1/3}$$



2010/10/12

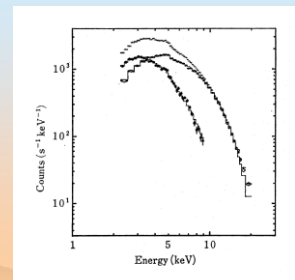
45



標準円盤

X線星の連続スペクトル

- Sco X-1
- 1keV(AD)
- +2keV(NS)
- 降着円盤起源



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

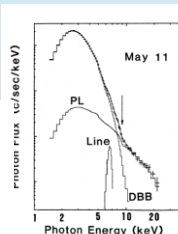
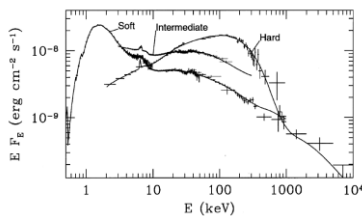
46



標準円盤

BHBの連続スペクトル

- High state / soft state
- Low state / hard state



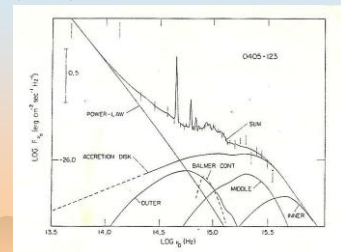
47



標準円盤

クェーサーの連続スペクトル

- Malkan (1983)



2010/10/12

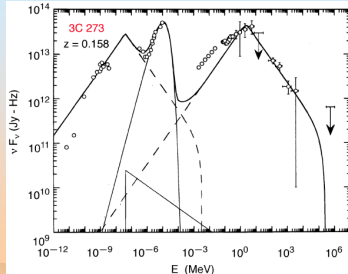
Black-Hole Accretion Disks

48



標準円盤 クエーサーの連続スペクトル

- 3C 273 SED



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

49



標準円盤 輝線スペクトル: 二重ピーク

- 赤方偏移
 - 視線ベクトル
 - 速度ベクトル
 - 視線速度

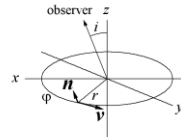
$$1+z = 1 - \mathbf{n} \cdot \frac{\mathbf{v}}{c},$$

$$\mathbf{n} = (\sin i, 0, \cos i),$$

$$\mathbf{v} = (-v_\phi \sin \varphi, v_\phi \cos \varphi, 0)$$

$$V = v_\phi \sin i \sin \varphi,$$

$$1+z = \frac{\lambda}{\lambda_e} = \frac{\nu_e}{\nu} = 1 + \frac{v_\phi}{c} \sin i \sin \varphi,$$



Black-Hole Accretion Disks

50



標準円盤 輝線スペクトル: 二重ピーク

- 観測される輝線スペクトル

- i : 軌道傾斜角
- D : 距離

j : 輝線放射率

ϕ : 線プロファイル関数

$$F_\nu = \int I_\nu d\Omega = \frac{\cos i}{D^2} \int j(r, \varphi) \phi_\nu r dr d\varphi,$$

$$j(r) \propto r^{-b},$$

$$\phi_\nu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\nu_e - \nu_0)^2 / 2\sigma^2},$$

$$\phi_\nu = \delta(\nu_e - \nu_0),$$

2010/10/12

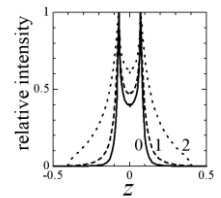
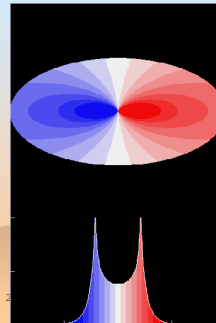
Black-Hole Accretion Disks

51



標準円盤 輝線スペクトル: 二重ピーク

- $j \propto r^{-b}$: b の違い



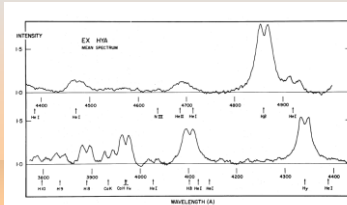
Black-Hole Accretion Disks

52



標準円盤 激変星の輝線スペクトル

- EX Hya
- 2重ピーク
- 降着円盤起源

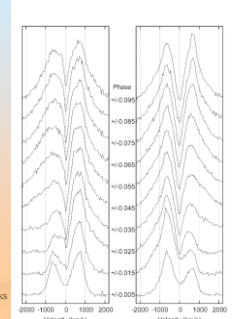


2010/10/12



標準円盤 激変星の輝線スペクトル

- Z ChaのH α 輝線
(Uemura et al. 2006)
- 2重ピーク
- 降着円盤起源



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



3.3 光学的に薄い円盤

2010/10/12

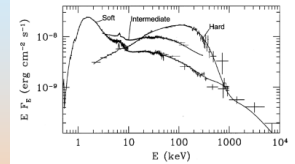
Black-Hole Accretion Disks

55



光学的に薄い高温円盤 BHBの高エネルギー成分

- 光学的に厚い標準円盤:
 - 10^7K (1keV) 程度
 - 高X線 (power law) 成分を説明できない
- 高温モデルの必要性
 - Thorne and Price (1975)
 - Shapiro, Lightman, Eardley (1976)



2010/10/12

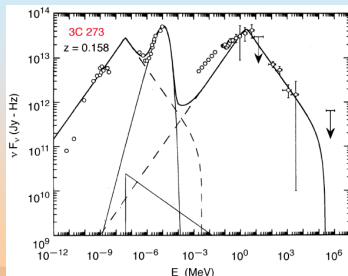
Black-Hole Accretion Disks

56



光学的に薄い高温円盤 ケーサーの高エネルギー成分

- 3C273 SED



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

57



光学的に薄い高温円盤 ガスの温度

- 光学的に厚い標準円盤: 表面温度

$$T_{\text{eff}} \sim 4 \times 10^6 \left(\frac{M}{10 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\dot{M}}{10^{18} \text{g s}^{-1}} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{10 r_g} \right)^{-3/4} \text{K},$$

- 光学的に薄い場合: ビリアル温度

$$T_{\text{vir}} \sim \frac{GMm_p}{k_B r} = \frac{1}{2} \frac{m_p c^2}{k_B} \left(\frac{r}{r_g} \right)^{-1} \sim 10^{12} \left(\frac{r}{10 r_g} \right)^{-1} \text{K}.$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

58



光学的に薄い高温円盤 熱平衡/エネルギー式

- イオン=電子間のエネルギー輸送(クーロン衝突): 単位面積あたりのエネルギー交換率
 • T_i : イオン温度
 • T_e : 電子温度
 • ν_E : イオン=電子衝突率
 • $\ln \Lambda$: Coulomb logarithm ~ 15
- イオンの熱平衡
 • $Q_{\text{vis}} = \Lambda_{\text{ie}}$
- 電子の熱平衡
 • $\Lambda_{\text{ie}} = Q_{\text{rad}}$
- 光学的に薄い場合の冷却: 逆コンプトン散乱の冷却率
 • E : 輻射エネルギー密度

$$\Lambda_{\text{ie}} = \frac{3}{2} \nu_E \frac{\Sigma k_B (T_i - T_e)}{m_p}$$

$$\nu_E = 2.4 \times 10^{21} (\ln \Lambda) \rho T_e^{-3/2} \text{s}^{-1},$$

$$Q_{\text{vis}}^+ = \frac{3GM\dot{M}}{4\pi r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right)$$

$$Q_{\text{rad}}^- = \left(\frac{4k_B T_e}{m_e c^2} \right) \Sigma \kappa_{\text{es}} E c,$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

59



光学的に薄い高温円盤 ガスの温度

- イオン温度

$$T_{\text{vir}} \sim \frac{GMm_p}{k_B r} = \frac{1}{2} \frac{m_p c^2}{k_B} \left(\frac{r}{r_g} \right)^{-1} \sim 10^{12} \left(\frac{r}{10 r_g} \right)^{-1} \text{K}.$$

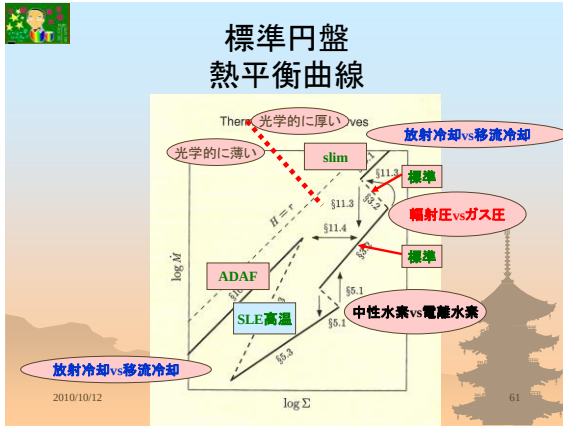
- 電子温度
 - だいたい 10^9K 程度

- ただしSLE高温モデルは熱的に不安定
 → 移流を入れたADAFモデルへの発展

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

60



相対論的標準円盤

Novikov and Thorne 1973

- 中心天体の重力のみ: **相対論的重力**
- 定常 $\partial/\partial t=0$
- 軸対称 $\partial/\partial\phi=0$
- 幾何学的に薄い $H \ll r$
- 光学的に厚い $\tau \gg 1$
- **相対論的**ケプラー回転 $v_\phi = v_K$
- 静水圧平衡
- 熱平衡
- α 粘性

2010

相対論的標準円盤 相対論的補正因子

- 相対論的補正因子
- a_* : スピンパラメータ $0 < a_* < 1$

$$A = 1 + \frac{a_*^2}{r^2} + \frac{a_*^4}{r^4}$$

$$B = 1 + a_* \sqrt{\frac{1}{r^3}}$$

$$C = 1 - \frac{2}{r} + 2a_* \sqrt{\frac{1}{r^3}}$$

$$D = 1 - \frac{1}{r} + \frac{a_*^2}{r^2}$$

$$E = 1 + \frac{2}{r} - \frac{a_*^2}{r^2} + \frac{2a_*^4}{r^4}$$

$$F = 1 - 2a_* \sqrt{\frac{1}{r^3}} + \frac{a_*^4}{r^2}$$

$$G = 1 - \frac{1}{r} + a_* \sqrt{\frac{1}{r^3}}$$

$$H = 1 - 4a_* \sqrt{\frac{1}{r^3}} + \frac{2a_*^2}{r^2}$$

$$J = \exp\left[\frac{3}{4} \int \frac{F}{R^2 D} dr\right]$$

$$L = \frac{r - r_{\text{in}}}{\sqrt{GM r}} = \frac{r}{\sqrt{GM r}} - \frac{r_{\text{in}}}{\sqrt{GM r}}$$

$$Q = L - \frac{3}{4\pi r^2} \int_{r_{\text{in}}}^r \frac{F}{R^2 D^2} dr$$

$$\dot{r} = \frac{r}{r_g}$$

2010/10/12

相対論的標準円盤 定常解/(a)内部領域

- $p \sim p_{\text{rad}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$

$$H = 5.5 \times 10^4 \text{ m} \dot{m} \times B^{-1} c^{1/2} \mathcal{H}^{-1} Q \text{ cm}$$

$$\Sigma = 1.0 \times 10^2 \alpha^{-1} \dot{m}^{-1} r^{3/2} \times B c^{1/2} D^{-1} \mathcal{H} Q^{-1} \text{ g cm}^{-2}$$

$$\rho = 9.0 \times 10^{-4} \alpha^{-1} \dot{m}^{-1} r^{-2} r^{3/2} \times B^2 D^{-1} \mathcal{H}^2 Q^{-2} \text{ g cm}^{-3}$$

$$v^r = -7.6 \times 10^8 \alpha \dot{m}^2 r^{-5/2} \times B^{-1} c^{-1/2} D^{1/2} \mathcal{H}^{-1} Q \text{ cm s}^{-1}$$

$$T_e = 4.9 \times 10^7 \alpha^{-1/4} \dot{m}^{-1/4} r^{-3/8} \times D^{-1/4} \mathcal{H}^{1/4} \text{ K}$$

$$\tau_* = 8.4 \times 10^{-3} \alpha^{-17/16} \dot{m}^{-1/16} r^{-2} r^{80/32} \times B^2 c^{1/2} D^{-17/16} \mathcal{H}^{25/16} Q^{-2}$$

2010/10/12



相対論の標準円盤 定常解／(b)中間領域

• $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$

$$\begin{aligned} H &= 2.7 \times 10^3 \alpha^{-1/10} m^{9/10} \dot{m}^{1/5} \dot{r}^{21/20} \\ &\quad \times B^{-1/5} c^{1/2} D^{-1/10} H^{-1/2} Q^{1/5} \text{ cm}, \\ \Sigma &= 4.3 \times 10^4 \alpha^{-4/5} m^{1/5} \dot{m}^{3/5} \dot{r}^{-3/5} \\ &\quad \times B^{-3/5} c^{1/2} D^{-4/5} Q^{3/5} \text{ g cm}^{-2}, \\ \rho &= 8.0 \alpha^{-7/10} m^{-7/10} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-33/20} \\ &\quad \times B^{-2/5} D^{-7/10} H^{1/2} Q^{2/5} \text{ g cm}^{-3}, \\ v^r &= -1.7 \times 10^6 \alpha^{4/5} m^{-1/5} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-2/5} \\ &\quad \times B^{3/5} c^{-1/2} D^{-1/5} Q^{-3/5} \text{ cm s}^{-1}, \\ T_e &= 2.2 \times 10^8 \alpha^{-1/5} m^{-1/5} \dot{m}^{2/5} \dot{r}^{-9/10} \\ &\quad \times B^{-2/5} D^{-1/5} Q^{2/5} \text{ K}, \\ \tau_* &= 2.4 \times 10^1 \alpha^{-4/5} m^{1/5} \dot{m}^{1/10} \dot{r}^{3/20} \\ &\quad \times B^{-1/10} c^{1/2} D^{-4/5} H^{1/4} Q^{1/10}. \end{aligned}$$

2010/10/12

67



相対論の標準円盤 定常解／(c)外部領域

• $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{ff}}$

$$\begin{aligned} H &= 1.5 \times 10^3 \alpha^{-1/10} m^{9/10} \dot{m}^{3/20} \dot{r}^{5/8} \\ &\quad \times B^{-3/20} c^{1/2} D^{-1/10} H^{-10/40} Q^{3/20} \text{ cm}, \\ \Sigma &= 1.4 \times 10^5 \alpha^{-4/5} m^{1/5} \dot{m}^{7/10} \dot{r}^{-3/4} \\ &\quad \times B^{-7/10} c^{1/2} D^{-4/5} H^{-1/20} Q^{7/10} \text{ g cm}^{-2}, \\ \rho &= 4.7 \times 10^1 \alpha^{-7/10} m^{-7/10} \dot{m}^{11/20} \dot{r}^{-15/8} \\ &\quad \times B^{-11/20} D^{-7/10} H^{17/40} Q^{11/20} \text{ g cm}^{-3}, \\ v^r &= -5.4 \times 10^5 \alpha^{4/5} m^{-1/5} \dot{m}^{3/10} \dot{r}^{-1/4} \\ &\quad \times B^{7/10} c^{-1/2} D^{-1/5} H^{1/20} Q^{-7/10} \text{ cm s}^{-1}, \\ T_e &= 6.9 \times 10^7 \alpha^{-1/5} m^{-1/5} \dot{m}^{3/10} \dot{r}^{-3/4} \\ &\quad \times B^{-3/10} D^{-1/5} H^{1/20} Q^{3/10} \text{ K}, \\ \tau &= 7.9 \times 10^1 \alpha^{-4/5} m^{1/5} \dot{m}^{1/5} \\ &\quad \times B^{-1/5} c^{1/2} D^{-4/5} H^{1/5} Q^{1/5}. \end{aligned}$$

2010/10/12

68



相対論の標準円盤 定常解: 相対論の効果

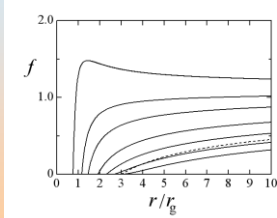
- 円盤放射および有効温度

$$F = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} f_R,$$

$$f_{\text{NR}} = 1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}},$$

$$f_R \equiv \frac{Q}{BC^{1/2}}$$

- 点線: f_{NR}
- 実線: f_R ($a_* = 0-1$)



a_* is 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.998

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

69



3.6 相対論的トーラス



Black-Hole Accretion Disks



幾何学的に厚いトーラス 角運動量分布 given

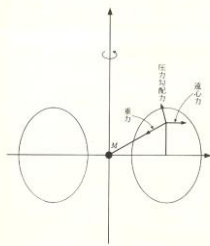
- 圧力勾配力+重力+遠心力=0

$$-(1/\rho) \nabla p + \nabla \phi - l^2/r^3 = 0$$

- ϕ : 重力ポテンシャル
- l : 比角運動量

- 積分すると、
- エンタルピー+有効ポテンシャル=一定

$$\gamma p / (\gamma - 1) + \phi + l^2 / 2r^2 = \psi_0$$



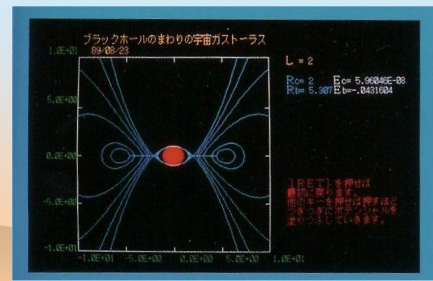
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

71



相対論的トーラス 等ポテンシャル面

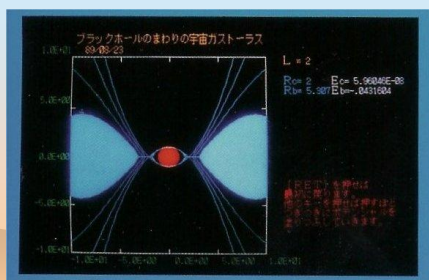


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

72

相対論的トーラス 等ポテンシャル面

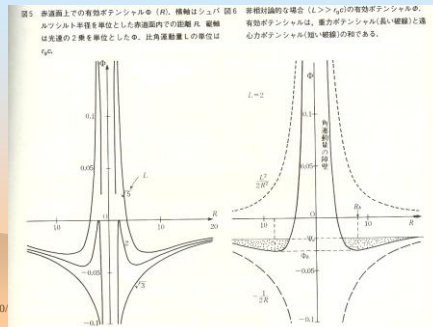


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

73

相対論的トーラス 赤道面のポテンシャル

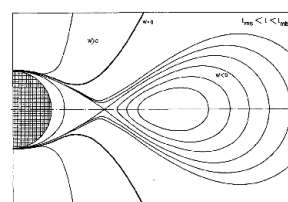


2010/

相対論的トーラス 等ポテンシャル面

- Abramowicz et al. 1978
- Kozłowski et al. 1978
- Paczynski and Wiita 1980

カスプの存在



2010/10/12

5

相対論的トーラス 等ポテンシャル面

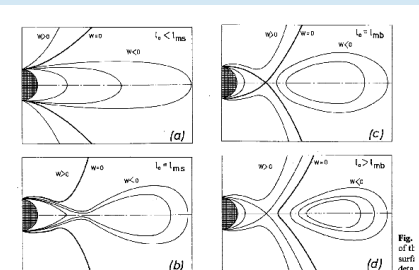


Fig. 8 of CL surf data

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

76

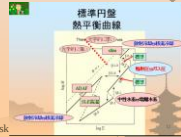


ブラックホール降着円盤の物理 Black-Hole Accretion Disks: Revised

1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability ×
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

4 Secular and Thermal Instabilities

1. Secular Instability
2. Thermal Instability
3. Stability Examination on N-Σ and T-Σ Planes
4. Mathematical Derivation of Stability Criterion



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disk



標準円盤 不安定性・振動モード

$$t_{\text{hyd}} = \frac{H}{c_s} \sim \frac{1}{\Omega_K} = t_{\text{dyn}},$$

$$t_{\text{th}} = \left| \frac{\Sigma C_p T_c}{T_{r\varphi} \Omega_K} \right| \sim \frac{1}{\alpha \Omega_K},$$

$$t_{\text{vis}} = \frac{\pi r^2 \Sigma}{\dot{M}} \sim \frac{1}{\alpha \Omega_K} \left(\frac{r}{H} \right)^2,$$

- 粘性過程による物質Σの再分布→力学平衡、熱平衡としてよい
- 熱平衡からのずれ・熱不安定性→力学平衡、Σ一定としてよい
- 力学平衡からのずれ→音波、磁気音波
- 成層大気からのずれ→重力波、バーカー不安定
- ケプラー回転からのずれ→エピソード振動

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

2



4.1 永年(粘性)不安定

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

3



標準円盤 永年(粘性)不安定: 輻射圧優勢

- ケプラー回転
- 静水圧平衡
- 熱平衡
- 粘性散逸
 - 連続+角運動量輸送
- 輻射圧優勢
- 粘性テンソル(α仮定)

$$\Omega = \Omega_K,$$

$$p = \frac{1}{2} \alpha^2 \Sigma H,$$

$$\frac{16\pi c p_{\text{rad}}}{\kappa \Sigma} = -\frac{3}{2} \Omega T_{r\varphi}$$

$$2\pi r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}, \quad \dot{M} \frac{d}{dr} (r^2 \Omega) = -\frac{\partial}{\partial r} (2\pi r^2 T_{r\varphi}),$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{r \partial r} \left\{ \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r^2 T_{r\varphi} \right) \right\},$$

$$p = p_{\text{rad}} = \frac{1}{3} a T^4$$

$$T_{r\varphi} = -2\alpha p H.$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

4



粘性降着円盤 粘性による動径拡散

- $v \propto r$ のときの解析解

- 粘性散逸は半径方向に対称ではない
 - 質量は内へ
 - 角運動量は外へ

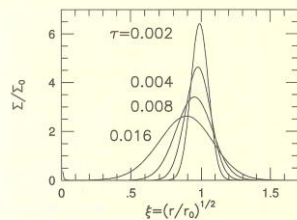


Fig. 3.3 Viscous diffusion for the case of $v \propto r$. The abscissa is $\xi \equiv (r/r_0)^{1/2}$, while the ordinate is the normalized surface density. The unit of time τ is the viscous timescale at $r = r_0$ ($\xi = 1$).

2010/10/12



標準円盤 永年(粘性)不安定: 輻射圧優勢

- ケプラー回転
- 静水圧平衡
- 熱平衡
- 粘性散逸
 - 連続+角運動量輸送
- 輻射圧優勢
- 粘性テンソル(α仮定)

$$\Omega = \Omega_K,$$

$$p = \frac{1}{2} \alpha^2 \Sigma H,$$

$$\frac{16\pi c p_{\text{rad}}}{\kappa \Sigma} = -\frac{3}{2} \Omega T_{r\varphi}$$

$$2\pi r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}, \quad \dot{M} \frac{d}{dr} (r^2 \Omega) = -\frac{\partial}{\partial r} (2\pi r^2 T_{r\varphi}),$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{r \partial r} \left\{ \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r^2 T_{r\varphi} \right) \right\},$$

$$p = p_{\text{rad}} = \frac{1}{3} a T^4$$

$$T_{r\varphi} = -2\alpha p H.$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

6

標準円盤

永年(粘性)不安定: 輻射圧優勢

$$p = \frac{1}{2}\Omega^2\Sigma H,$$

$$\frac{16c p_{\text{rad}}}{\kappa\Sigma} = -\frac{3}{2}\Omega T_{r\varphi}$$

$$T_{r\varphi} = -2\alpha p H,$$

$$p = \frac{1}{2}\Omega^2\Sigma H,$$

$$T_{r\varphi} \propto H$$

$$p \propto \Omega$$

$$H \propto 1/\Sigma$$

$$-T_{r\varphi} \propto \frac{1}{\Sigma}.$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r^2 T_{r\varphi} \right) \right\}.$$

$$\propto -D\partial(B\partial\Sigma)/\partial r^2$$

- “負”の粘性係数
- ガスはリング状に集まる

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 7

標準円盤

永年(粘性)不安定: 輻射圧優勢

- **Physics !**
- ガス密度が揺らいで、リング状に集まったとする[Σ増加]
- 輻射圧優勢なので圧力 $p(\propto T^4)$ は変化しない
- このとき、粘性ストレス $T_{r\varphi} (= -2\alpha p H)$ は H に比例する
- 一方、静水圧平衡($p = \Omega^2 \Sigma H/2$)より、 H は $1/\Sigma$ に比例する
- したがって、粘性ストレス $T_{r\varphi}$ は $(-1/\Sigma)$ に比例する
- ガスがリング状に集まってΣが増加した領域では、厚さ H が小さくなって、粘性ストレス $T_{r\varphi}$ が減少し、粘性拡散の効果が弱くなって、さらにものが集まる・・・粘性不安定
- “負”の粘性係数
- ガスはリング状に集まる！・・・粘性不安定

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 8

- A and B and C Ring

Black-Hole Accretion Disks

標準円盤

永年(粘性)不安定: 一般

- ガス圧+輻射圧
 - パラメータβ
- 粘性則
 - パラメータμ
- 線形化して永年不安定の条件を求める

$$p = p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}} = \frac{k_B}{\mu m_H} \rho T + \frac{1}{3} a T^4,$$

$$\beta \equiv \frac{p_{\text{gas}}}{p},$$

$$T_{r\varphi} = -2\alpha (p_{\text{gas}}^{\mu} p^{1-\mu}) H.$$

$$4 - 10\beta - 7\mu + 7\beta\mu > 0.$$

Fig. 4.3 Stably unstable domain in the parameter space (the β-μ plane). The dimensionless parameters are β [≡ p_{gas}/p] and μ specifying the opacity (κ_{rad} = κ_{gas} μ^{1-μ}).

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 9

4. 2 熱不安定

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 11

標準円盤

熱平衡曲線

- dot M-Σ平面での熱平衡曲線(r固定)
 - 2価関数!
 - 上: 輻射圧優勢ブランチ
 - 下: ガス圧優勢ブランチ

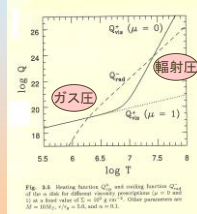
Fig. 5.4 Thermal-equilibrium curves of the disk for μ = 0 (the solid curve), and for μ = 1 (the dashed curve), respectively. The parameters are M-dot = 10⁻⁶ M_☉/yr, κ_{gas} = 0.34 and κ_{rad} = 0.04.

- こういうのは、たいてい、どちらか不安定

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 12

標準円盤 熱平衡曲線

- 加熱率 Q^+ と冷却率 Q^- vs 温度 (r 固定、 Σ 固定)
 - 2力所で交差
 - 低温側: ガス圧
 - 高温側: 輻射圧



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

13

標準円盤 熱平衡曲線

- 低温側: $p \sim p_{\text{gas}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{ff}}$

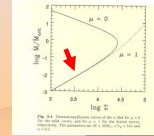
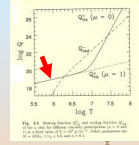
$$Q_{\text{vis}}^+ \sim \alpha \frac{p_{\text{gas}}}{\rho} \Omega \Sigma \propto T \Sigma$$

$$Q_{\text{rad}}^- \sim \frac{\sigma T^4}{\kappa_{\text{ff}} \Sigma} \propto \frac{T^8}{\Sigma^2}$$

$$Q_{\text{vis}}^+ = Q_{\text{rad}}^- \quad T \propto \Sigma^{3/7}$$

$$\dot{M} \propto Q_{\text{vis}}^+ \propto \Sigma T$$

$$\left(\frac{\partial \ln \dot{M}}{\partial \ln \Sigma} \right)_{Q_{\text{vis}}^+ = Q_{\text{rad}}^-} = \frac{10}{7}$$



- こっちは熱的に安定

標準円盤 熱平衡曲線

- 高温側: $p \sim p_{\text{rad}}$ & $\kappa \sim \kappa_{\text{es}}$

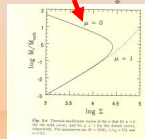
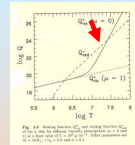
$$Q_{\text{vis}}^+ \sim 2\alpha p_{\text{rad}} H \propto \frac{T^8}{\Sigma}$$

$$Q_{\text{rad}}^- \sim \frac{\sigma T^4}{\kappa_{\text{es}} \Sigma} \propto \frac{T^4}{\Sigma}$$

$$Q_{\text{vis}}^+ = Q_{\text{rad}}^- \quad T \sim \text{constant};$$

$$\dot{M} \propto Q_{\text{vis}}^+ \propto \Sigma^{-1}$$

$$\left(\frac{\partial \ln \dot{M}}{\partial \ln \Sigma} \right)_{Q_{\text{vis}}^+ = Q_{\text{rad}}^-} = -1$$



- こっちは熱的に不安定

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

標準円盤 熱不安定: 輻射圧優勢

- ケプラー回転
- 静水圧平衡
- 表面密度一定
- 輻射圧優勢
- 粘性テンソル (α 仮定)

$$\Omega = \Omega_K$$

$$p = \frac{1}{2} \Omega^2 \Sigma H$$

$$\Sigma = \text{const.}$$

$$p = p_{\text{rad}} = \frac{1}{3} a T^4$$

$$T_{r\phi} = -2\alpha p H$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

16

標準円盤 熱不安定: 輻射圧優勢

$$p = \frac{1}{2} \Omega^2 \Sigma H$$

$$\Sigma = \text{const.}$$

$$T_{r\phi} = -2\alpha p H$$

$$Q_{\text{vis}}^+ (= -3\Omega T_{r\phi} / 2)$$

$$Q_{\text{rad}}^- (= 16cp_{\text{rad}} / \kappa \Sigma)$$

- $p \propto H$
- $T_{r\phi} \propto H^2$

- $Q_{\text{vis}} \propto H^2$
- $Q_{\text{rad}} \propto H$

- 厚み(温度)が少し増えたとき: 加熱率の増加が大きい
- 熱的に不安定

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

17

熱平衡曲線 安定ブランチと不安定ブランチ

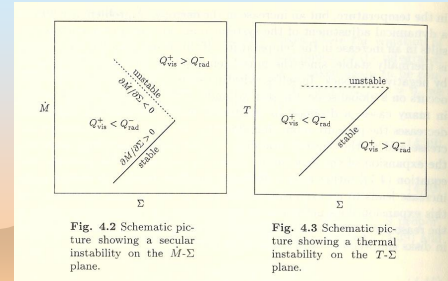


Fig. 4.2 Schematic picture showing a secular instability on the M - Σ plane.

Fig. 4.3 Schematic picture showing a thermal instability on the T - Σ plane.

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

18



標準円盤 熱不安定：一般

● ガス圧＋輻射圧

- パラメータ β

● 粘性則

- パラメータ μ

● 線形化して永年不安定の条件を求める

$$4 - 10\beta - 7\mu + 7\beta\mu > 0.$$

● 永年不安定と同じ条件

$$p = p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}} = \frac{k_B}{\mu m_H} \rho T + \frac{1}{3} a T^4,$$

$$\beta \equiv \frac{p_{\text{gas}}}{p}.$$

$$T_{\text{eq}} = -2\alpha(p_{\text{gas}}^{\mu} p^{1-\mu}) H.$$

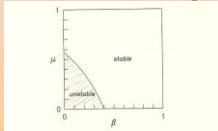


Fig. 4.3. Secularly unstable domain in the parameter plane (the μ - β plane). The dimensionless parameters are $\beta \equiv p_{\text{gas}}/p$ and $\mu \equiv \text{specifying } \log \mu$ (in $\log \mu = -\log \mu_{\text{ref}} + \mu$).

2010/10/12

Black-Hole Accretion



4.3 熱平衡曲線

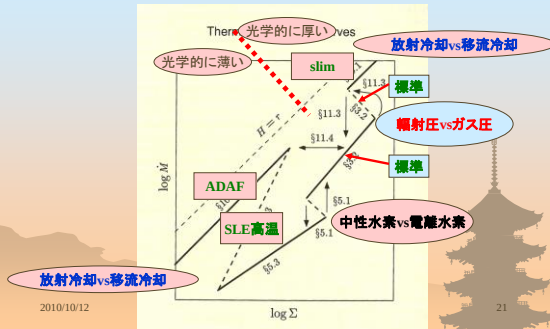
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

20



標準円盤 熱平衡曲線



2010/10/12

21



4.4 不安定性の条件

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

22



不安定性の条件

● より詳細な不安定性解析

- Shakura and Sunyaev 1976

● 定常解に微小摂動を与えて方程式を線形化

– ただし、力学平衡(ケプラー回転＋静水圧平衡)

● 平面波解 $[\exp(nt - ikr)]$ を仮定

● 分散関係式 $[n = n(k)]$ と成長率 n を導き

$$C_1 n^2 + \left[2\alpha (kr)^2 C_2 \left(\frac{c_s}{kT} \right)^2 - G_{\text{eq}} \right] n + 2\alpha (kr)^2 \left(\frac{c_s}{kT} \right)^2 G_{\text{eq}} = 0. \quad (4.70)$$

● 粘性不安定性と熱不安定性を同時に解く

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

23



不安定性の条件

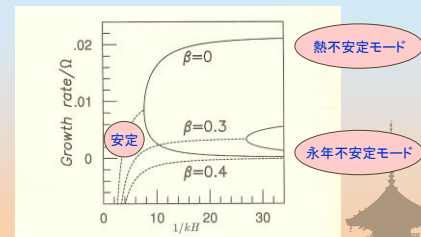


Fig. 4.4. Growth rate $R(n/2i)$ as functions of the radial wavelength of perturbations for some values of β . The ordinate is n and the abscissa is $(\beta H)^{-1}$. The disk models adopted are the standard α -model with $\alpha = 0.1$ and $\gamma = 5/3$. The upper branch of the curves denotes the thermal mode, while the lower one represents the secular one. On the dotted curves the growth rates of both modes become complex conjugates, real parts being the same.

2010/10/12

24



ブラックホール降着円盤の物理 Black-Hole Accretion Disks: Revised

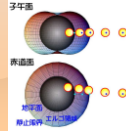
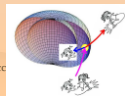
1. Introduction (Introduction and Observations)
2. Physical Processes
3. Classical Models
4. Secular and Thermal Instabilities
5. Dwarf-Nova Type Instability ×
6. Observability of Relativistic Effects
7. Basic Equations
8. Transonic Flow
9. Radiatively Inefficient Accretion Flow and ADAF
10. Supercritical Accretion Flow and Slim Disk
11. Basics of Disk Oscillations
12. Quasi-Periodic Oscillations
- ** Relativistic Radiation Flow: Velocity-Dependent Variable Eddington Factor

2010/10/12

Black-Hole Acc

6 Observability of Relativistic Effects

1. Ray Tracing
2. Imaging – Black Hole Silhouette
3. Photometry – Light Curve Diagnosis
4. Spectroscopy – Continuum and Line
5. Other Effects – Lensing and Jets



天体の観測

撮像観測 Imaging

- 構造 (射影)
- 構造 (3次元)
- 各部分の輝度情報
- 各部分の物理情報 (ρ, T)
- 各部分の運動情報 (v)

測光観測 Photometry

- 各バンドBVRIの明るさ
- 色指数→色温度
- (バンドごとの)光度変化
- 周期性

分光観測 Spectroscopy

- 連続スペクトル
 - 物理状態 (ρ, T)
- 同 時間変化
 - 物理状態の変化
- 線スペクトル
 - 元素組成
 - 物理状態 (ρ, T)
 - 運動状態 (v)
- 同 時間変化
 - 周期性

偏光観測 Polarimetry

- その他

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

2



6.1 光線追跡法

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

3

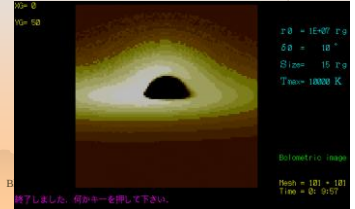


光線追跡法

相対論的降着円盤の写真を撮影する

- Luminet 1979
- Fukue and Yokoyama 1988

- 光線の曲がり
- 重力赤方偏移
- ドップラー効果

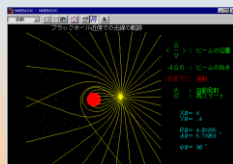
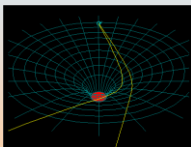


2010/10/12

B



光線追跡法 光線の軌跡



2010/10/12

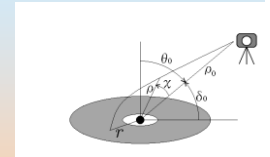
Black-Hole Accretion Disks



光線追跡法 光線の軌跡

光線の軌跡

- シュバルツシルトBH
- 円盤は薄く内縁をもつ
 - $r_{in}=3r_g$
- 観測者極座標 (ρ_0, θ_0)
 - 俯角 $\delta_0 = \pi/2 - \theta_0$
- 光線の極座標 (ρ, χ)



$$\frac{d^2}{d\chi^2} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} = \frac{3r_g}{2\rho^2},$$

2010/10/12

6



光線追跡法 光線の軌跡

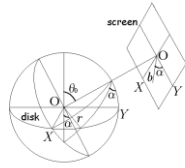
● 光線の軌跡

- スクリーン座標 (X, Y)
- スクリーン座標 (b, α)
 - b : 衝突パラメータ
 - α : 位置角

球面三角法で求める!

- 光線の方程式のエネルギー積分

$$\left[\frac{d\chi}{d\ell} \left(\frac{1}{\ell} \right) \right]^2 + \frac{1}{\ell^2} \left(1 - \frac{r_g}{\ell} \right) = \frac{1}{b^2},$$



2010/10/12

Black-Hole

有効ポテンシャル

7



光線追跡法 赤方偏移

● 赤方偏移 z

- ν_{em} : 放射された光の振動数
- ν_{obs} : 観測される光の振動数
- L : 重力赤方偏移に伴う遅延関数 (lapse function)
- γ : 相対論的速度に伴うローレンツ因子
- D : 縦ドップラー因子

$$1+z = \frac{\nu_{em}}{\nu_{obs}} = L^{-1} \gamma D^{-1},$$

$$L = \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}},$$

$$\gamma = \sqrt{1 + r^2 \Omega^2 / c^2}$$

$$\Omega = \sqrt{r_g c^2 / [r^2 (2r - 3r_g)]}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 - r_g/r}{1 - 3r_g/2r}},$$

$$D = 1 - v \cdot n/c$$

$$D^{-1} = 1 + \sqrt{\frac{r_g}{2r^3}} b \sin \theta_0 \sin \alpha,$$

● 結局

$$1+z = \left(1 - \frac{3r_g}{2r} \right)^{-1/2} \left(1 + \sqrt{\frac{r_g}{2r^3}} b \sin \theta_0 \sin \alpha \right)$$

8



光線追跡法

“観測される” 輻射強度、輻射流束

- 相対論的円盤モデル (Page and Thorne 1974)

$$F(r) = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r_g^3} \frac{1}{(\tilde{r} - 1.5)^{3/2}} \left(\sqrt{\tilde{r} - \sqrt{r_{ms}}} + \frac{\sqrt{1.5}}{2} \ln \frac{\sqrt{\tilde{r} + \sqrt{1.5}} \sqrt{r_{ms}} - \sqrt{1.5}}{\sqrt{\tilde{r} - \sqrt{1.5}} \sqrt{r_{ms}} + \sqrt{1.5}} \right)$$

$$\tilde{r} \equiv r/r_g \text{ and } r_{ms} \equiv r_{ms}/r_g = 3$$

$$T(r) = (F/\sigma)^{1/4}$$

- 輻射強度 $I(\nu)$:
 - $I_{obs}(\nu) = (\nu_{obs}/\nu_{em})^3 I_{em}(\nu) = I_{em}(\nu)/(1+z)^3$
- 全輻射強度 $I = \int I(\nu) d\nu$:
 - $I_{obs} = (\nu_{obs}/\nu_{em})^4 I_{em} = I_{em}/(1+z)^4$
- 全輻射流束 F :
 - $F_{obs} = F_{em}/(1+z)^4$
- 黒体温度 T :
 - $T_{obs} = T_{em}/(1+z)$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

相対論的不変量
 $I(\nu)/\nu^3$

相対論的不変量
 I/ν^4

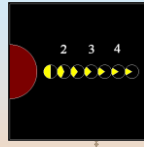
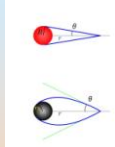
相対論的不変量
 F/ν^4

相対論的不変量
 T/ν



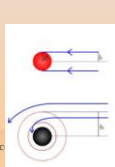
撮像: ブラックホールのシルエット (補) ブラックホールのサイズ

- ブラックホールの見かけのサイズ



- ブラックホールの断面積 @ 無限遠

- 衝突パラメータの臨界値
 $b_c = 1.5\sqrt{3}r_g \sim 2.6r_g$



2010/10/12

Black-Hole Ac

11



撮像: ブラックホールのシルエット (補) ブラックホールのサイズ

- $\psi = 1/\rho^2 - 1/\rho^3$
- $\psi' = (-2\rho + 3)/\rho^4$
- $\rho = 3/2$ for $\psi' = 0$
- $\psi_{max}(\rho = 3/2) = 4/27 = 1/b^2$
- $b^2 = 27/4$
- $b = 3\sqrt{3}/2 \sim 2.6$

$$\left[\frac{d\chi}{d\ell} \left(\frac{1}{\ell} \right) \right]^2 + \frac{1}{\ell^2} \left(1 - \frac{r_g}{\ell} \right) = \frac{1}{b^2},$$

2010/10/12

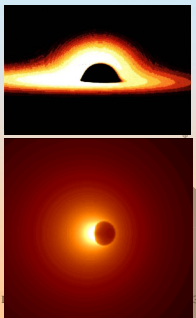
Black-Hole

有効ポテンシャル

12

撮像: ブラックホールのシルエット
シルエットとシャドー

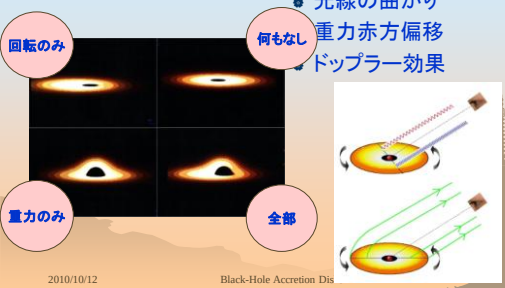
- Standard disks around a Schwarzschild hole
 - Luminet 1979; Fukue and Yokoyama 1988
- Standard disks around a Kerr hole
 - Fanton et al. 1997; Takahashi 2004
- Spherically-distributed optically thin gas
 - Falcke et al. 2000
- Supercritical disks around a Schwarzschild hole
 - Fukue 2003; Watarai et al. 2005



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 13

撮像: ブラックホールのシルエット
標準円盤の場合

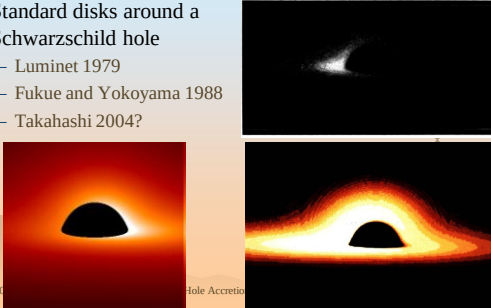
- 光線の曲がり
重力赤方偏移
ドップラー効果



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 14

撮像: ブラックホールのシルエット
シュバルツシルトの場合

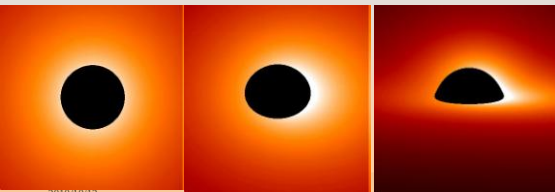
- Standard disks around a Schwarzschild hole
 - Luminet 1979
 - Fukue and Yokoyama 1988
 - Takahashi 2004?



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 15

撮像: ブラックホールのシルエット
シュバルツシルトの場合

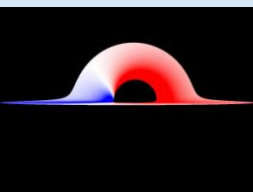
- Standard disks around a Schwarzschild hole
 - Takahashi 2004?
 - $i=0, 45^\circ, 80^\circ$



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 16

撮像: ブラックホールのシルエット
カーの場合

- Standard disks around a Kerr hole
 - Fanton et al. 1997;
 - Takahashi 2004



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 17

撮像: ブラックホールのシルエット
カーの場合

- Standard disks around a Kerr hole
 - Fanton et al. 1997;
- a_* の違い
- $i=30^\circ$

LINE EMISSION FROM ACCRETION DISCS AROUND BLACK HOLES: THE ANALYTIC APPROACH

Andrej Čadež and Claudio Fanton
Dept. of Physics, University of Ljubljana, Slovenia
Massimo Calvani and Paolo Marziani
Astronomical Observatory of Padova, Italia



2010/10/12 18

撮像: ブラックホールのシルエット
カーの場合

- Standard disks around a Kerr hole
 - Fanton et al. 1997;
- i の違い
- $a_* = 0.9981$

LINE EMISSION FROM
ACCRETION DISCS AROUND
BLACK HOLES:
THE ANALYTIC APPROACH

Andrej Čadež and Claudio Fanton
Dept. of Physics, University of Ljubljana, Slovenia
Massimo Calvani and Paolo Marziani
Astronomical Observatory of Padova, Italia

2010/10/12 19

撮像: ブラックホールのシルエット
カーの場合

- Standard disks around a Kerr hole
 - Fanton et al. 1997;
- i の違い
- $a_* = 0.5$
- Ghost image

LINE EMISSION FROM
ACCRETION DISCS AROUND
BLACK HOLES:
THE ANALYTIC APPROACH

Andrej Čadež and Claudio Fanton
Dept. of Physics, University of Ljubljana, Slovenia
Massimo Calvani and Paolo Marziani
Astronomical Observatory of Padova, Italia

2010/10/12 20

撮像: ブラックホールのシルエット
超臨界円盤の場合

- Supercritical disks around a Schwarzschild hole
 - Fukue 2003
 - Watarai et al. 2005
 - Kawata et al. 2005

標準

標準的

Slim的

Black-Hole Accretion Disks

2010/10/12 21

撮像: ブラックホールのシルエット
超臨界円盤の場合

- Supercritical disks around a Schwarzschild hole
 - Fukue 2003
 - Watarai et al. 2005
 - Kawata et al. 2005

2010/10/12

撮像: ブラックホールのシルエット
超臨界円盤の場合

- Supercritical disks around a Schwarzschild hole
 - Fukue 2003
 - Watarai et al. 2005
 - Kawata et al. 2005

2010/10/12

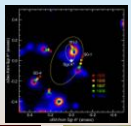
撮像: ブラックホールのシルエット
シルエットのサイズ

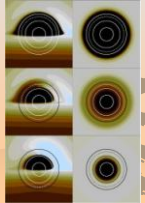
標準円盤
内縁円盤

2010/10/12

撮像: ブラックホールのシルエット シルエットのサイズ

- Sgr A*
 - $\sim 3 \times 10^6 M_\odot$
 - $\rightarrow r_g = 9 \times 10^{11} \text{ cm}$
 - $\rightarrow 7 \mu\text{sec}$
- BH shadow of $5r_g$
 - $35 \mu\text{sec}$
- standard case: $6r_g$
 - $42 \mu\text{sec}$
- slim case: $4r_g$
 - $28 \mu\text{sec}$





2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks

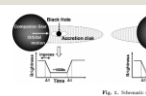
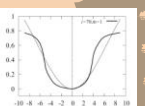
6.3 測光: 光度曲線診断法



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 26

測光: 光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

- 降着円盤の内部領域が掩蔽される
 - Fukue 1987
 - Watarai et al. 2005
- タイムスケール
- 食の入と出が非対称になる

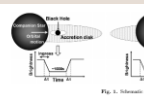
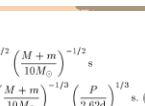



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks

測光: 光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

- Δt
 - r : 内部領域
 - a : 連星間
 - P : 公転周期
 - GRO J1655
- t_{duration}
 - r_* : 伴星半径

$$\Delta t \sim \frac{2r}{v_{\text{orb}}} = 0.85 \left(\frac{r}{20r_g} \right) \left(\frac{M}{10M_\odot} \right) \left(\frac{a}{R_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{M+m}{10M_\odot} \right)^{-1/2} \text{ s}$$

$$= 4.24 \left(\frac{r}{20r_g} \right) \left(\frac{M}{10M_\odot} \right) \left(\frac{M+m}{10M_\odot} \right)^{-1/3} \left(\frac{P}{2.624} \right)^{1/3} \text{ s. (6.11)}$$



2010/10/12

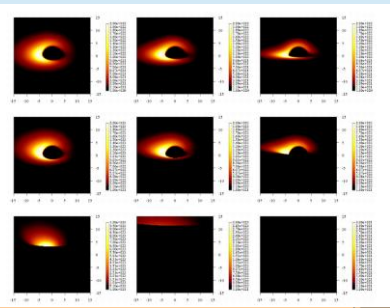
測光: 光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

Object name	Black Hole Mass [$M_\odot$]	P [day]	Δt [s]	t_{eclipse} [s]
GRS 1915+105	~ 14	~ 33.5	12.0	5.9×10^3 (K-M)
GRO J1655-40	~ 7	~ 2.62	3.04	5.5×10^3 (F3)
V4641 Sgr	~ 9.6	~ 2.82	3.56	1.1×10^4 (B9)
M33 X-7	~ 2.5	~ 3.45	0.78	4.6×10^4 (O-B)



2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 29

測光: 光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

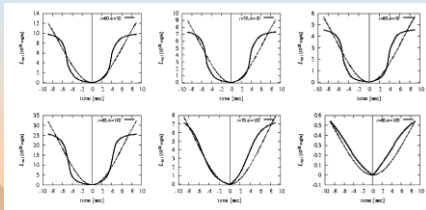


2010/10/12 30



測光:光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

dot m
=1(上)
=10(下)



$i=60^\circ$ (左), 70° (中), 80° (右)

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

31



測光:光度曲線診断法 内部領域の掩蔽

- Mean (平均)
- Variation (偏差)
- Skewness (尖度)
- Kurtosis (歪度)

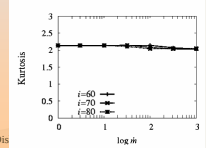
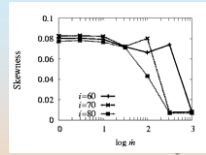
$$N = \sum_{i=1}^n f_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i f_i$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 f_i$$

$$S = \frac{1}{N \sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 f_i$$

$$K = \frac{1}{N \sigma^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 f_i$$



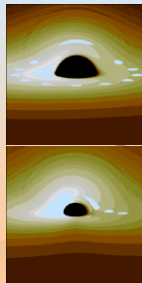
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



測光:光度曲線診断法 輝点の周回運動

- 降着円盤内の輝点が公転運動する
 - Asaoka 1989
 - Karas and Bao 1992
 - Karas et al. 1992
 - Karas 1996
 - Fukue 2003
- Newton だったら変化なし
- 相対論的效果で明るさ変化
 - ドップラー効果
 - 重力レンズ効果



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



測光:光度曲線診断法 輝点の周回運動

- 降着円盤内の輝点が公転運動する
 - Nowak だったと思う

Episode I: <i>The Phantom Monster</i>	Episode II: <i>Into the Fray</i>	Episode III: <i>Plumbing the Depths</i>
Episode IV: <i>A One-way Ticket</i>	Episode V: <i>Pacman Strikes Back</i>	Episode VI: <i>Return to the Dark Side</i>

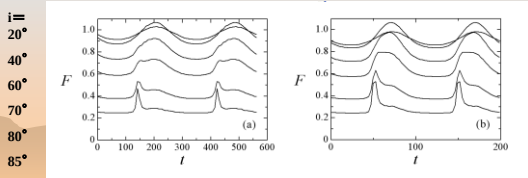
20

34



測光:光度曲線診断法 輝点の周回運動

- 相対論的效果で明るさ変化
 - ドップラー効果...幅広いサイン的変動
 - 重力レンズ効果...幅の狭いピーク



2010/10/12

$rs=10rg$

Black-Hole Accretion Disks

$rs=5rg$

35



6.4 分光変光とスペクトル

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

36

分光:連続&輝線スペクトル

- 連続スペクトルへ影響
 - Cunningham 1975, 1976
 - Czerny et al. 1984
 - Asaoka 1989
 - Fu and Taam 1990
 - Yamada and Fukue 1993
 - Yamada et al. 1994
 - Shimura and Takahara 1993
- 輝線スペクトルへ影響
 - Gerbal and Pelat 1981
 - Chen et al. 1989
 - Chen and Halpern 1989
 - Fabian et al. 1989
 - Matt et al. 1989
 - Laor 1991
 - Kojima 1991
 - Tanaka et al. 1995
- 光線の曲がり
 - 射影面積が変わる
- 重力赤方偏移
 - 影響は弱い(face-onで効く)
- ドップラー効果
 - 一番影響がある
- 光線の曲がり
 - 重力赤方偏移
 - ドップラー効果
 - ピークの非対称性

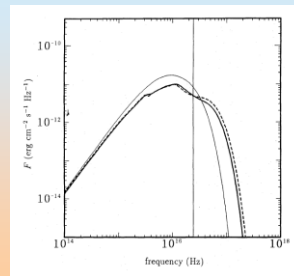
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

37

分光:連続&輝線スペクトル 連続スペクトル

- Yamada et al. 1994
- $M=10^6 M_\odot$
- $N=0.01 M_\odot/\text{yr}$
- $i=80^\circ$
- コンプトン効果
- 細実線: BB
- 太破線: N
- 太実線: GR
- NとGR似ている
- 円盤モデル→soft
- ドップラーなど→hard



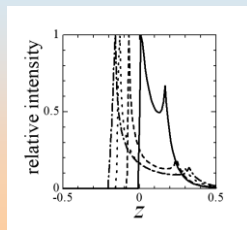
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

38

分光:連続&輝線スペクトル 輝線スペクトル

- $f \propto r^{-b}$: bの違い



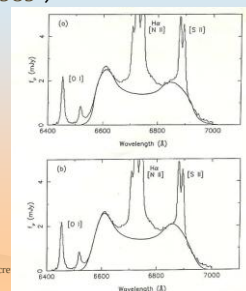
Black-Hole Accretion Disks

39

分光:連続&輝線スペクトル H α 輝線スペクトルの非対称性

- Arp102B (Chen et al. 1989)

たくさん見つかっている;
ただし、円盤形状の
歪みという説もあり



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

40

分光:連続&輝線スペクトル 鉄輝線スペクトルの非対称性

- MCG-6-30-15 (Tanaka et al. 1995)

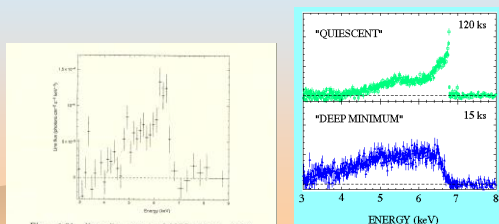


Fig. 1.81 X-ray line spectra of MCG-6-30-15. (After Tanaka et al. 1995. Reproduced by permission from Nature Vol.375 No.6533 pp.659-661 22 June 1995 ©Macmillan Magazines Ltd.)

21

isks

41

6.5 他効果:重力レンズとジェット

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

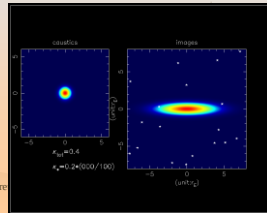
42



他の効果: 重力レンズ マイクロ重力レンズ

- 星などによるマイクロ重力レンズ効果をもちいて降着円盤の内縁近傍を探る
 - Wambsganss and Paczynski 1991
 - Jaroszynski et al. 1992
 - Yonehara et al. 1998, 1999
 - Takahashi et al. 2001

- 光度曲線
- 円盤モデルで差が出る



2010/10/12

Black-Hole Accretion



他の効果: 重力レンズ マイクロ重力レンズ

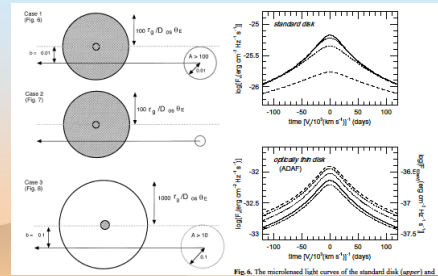


Fig. 4. The microdimensional light curves of the standard disk (upper) and

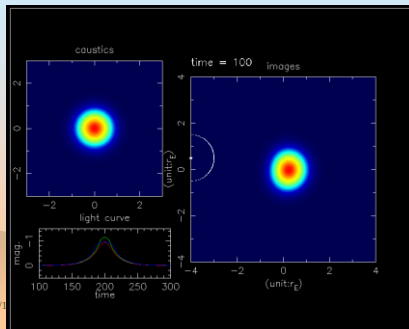
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

44



他の効果: 重力レンズ マイクロ重力レンズ



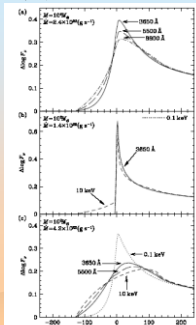
2010/10/12

45



他の効果: 重力レンズ マイクロ重力レンズ

- Caustic crossing light curve
 - (a) standard disk
 - (b) optically thin ADAF
 - (c) disk-corona model

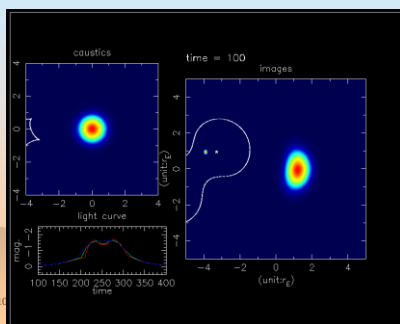


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



他の効果: 重力レンズ マイクロ重力レンズ



2010/10/12

47



他の効果: 重力レンズ おまけ



2010/10/12

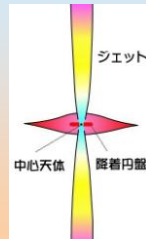
Black-Hole Accretion Disks

48



他の効果: 相対論的ジェット

- 中心の天体から双方向に吹き出す、細く絞られたプラズマの流れが「宇宙ジェット」
- ジェットの噴出速度はしばしば光速の数割!



2010/10/12

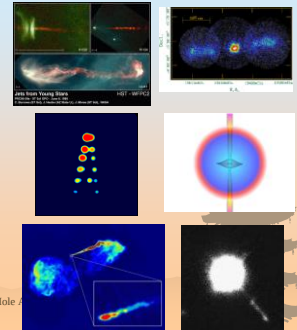
Black-Hole Accretion Disks

49



他の効果: 相対論的ジェット ジェット天体

- YSO
- CVs, SSXSSs
- Crab pulsar
- SS 433
- microquasar
- AGN
- quasar
- gamma-ray burst



2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



他の効果: 相対論的ジェット 典型量

- 系内ジェット (microquasar)
 - SS433 $> L_E$ ep cont/blob 0.26c
 - 1E1740 ee? 0.26c
 - GRS1915 $\sim L_E$ ee? bloby 0.92c
 - GROJ1655 ee? bloby 0.92c
- 系外ジェット
 - 3C 273 $> L_E$? ? 0.99c?
 - M87 $<< L_E$? ? ?

2010/10/12

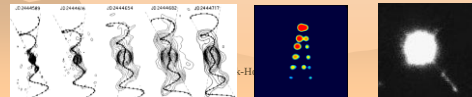
Black-Hole Accretion Disks

51



他の効果: 相対論的ジェット 典型量

- 光度 $L > L_E$
- 成分 ep通常プラズマ vs ee対プラズマ
- 形態 continuous / periodic / intermittent
- 速度 mildly relativistic $\beta=0.26, \gamma=1.04$
highly relativistic $\beta=0.92, \gamma=2.55$
ultra relativistic $\beta=0.99, \gamma=10$

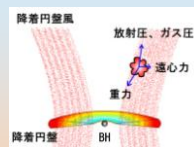
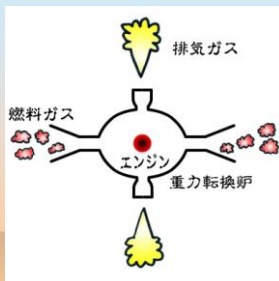


2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks



他の効果: 相対論的ジェット エンジンと降着円盤風



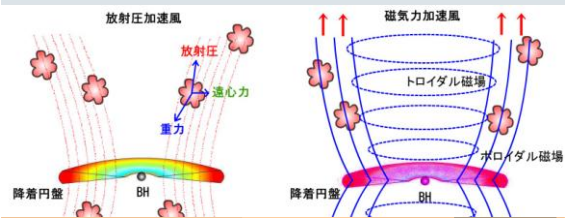
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

53



他の効果: 相対論的ジェット 放射圧加速と磁気力加速



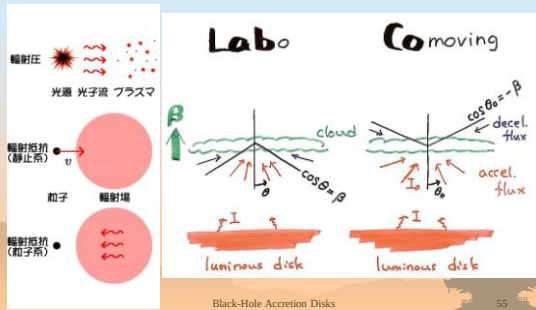
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

54



他の効果: 相対論的ジェット (補) 輻射抵抗



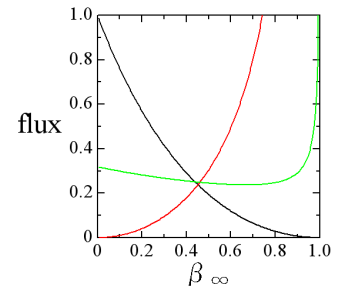
Black-Hole Accretion Disks

55



他の効果: 相対論的ジェット (補) flat disk から受ける F_{co}

- 黒: 後方
- 赤: 前方
- 緑: 側方
- $\beta \sim 0.45$
で、釣り合う



2010/10/12



他の効果: 相対論的ジェット (補) 輻射抵抗

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_0 + \beta}{1 + \beta \cos \theta_0}$$

$$\frac{v_0}{v} = \frac{1}{\gamma(1 + \beta \cos \theta_0)}$$

$$I_0 = \left(\frac{v_0}{v}\right)^4 I$$

for infinite disk with uniform brightness

$$\beta_{eq} = \frac{4 - \sqrt{7}}{3} \sim 0.45$$

magic speed (Icke 1989)

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

57



他の効果: 相対論的ジェット (補) 平衡速度と終末速度

- 運動方程式

$$\frac{du^a}{d\tau} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x^a} + \frac{\sigma_T}{mc} \left[\gamma F^a - c \gamma^2 E u^a - c P^{ab} u_b + c u^a (2 \gamma F^b u_b / c - P^{bc} u_b u_c) \right]$$

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{GM}{(z - r_g)^2} + \frac{\sigma_T}{mc} [\gamma(1 + 2u^2)F - \gamma^2 uc(E + P)]$$

Force = -gravity + radiative flux - rad.drag

- 平衡速度: $0 = \text{rad.flux} - \text{rad.drag}$
- 終末速度: $0 = -\text{gravity} + \text{rad.flux} - \text{rad.drag}$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

58



他の効果: 相対論的ジェット (1) 円盤風の放射圧加速モデル

- Bisnovatyi-Kogan and Blinnikov 1977
- Katz 1980
- Icke 1980
- Melia and Konigl 1989
- Misra and Melia 1993
- Tajima and Fukue 1996, 1998 for Schwarzschild case
- Watarai and Fukue 1999 for supercritical disk
- Hirai and Fukue 2001 for Kerr case
- Fukue et al. 2001 for radiative collimation
- Orihara and Fukue 2003 for radiative collimation

2010/10/12

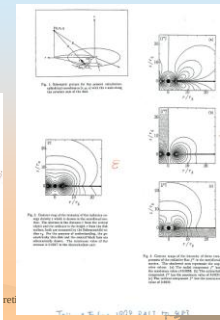
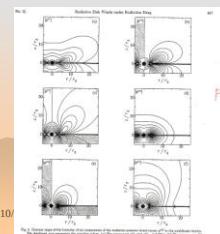
Black-Hole Accretion Disks

59



他の効果: 相対論的ジェット

- Tajima and Fukue 1996, 1998 for Schwarzschild case



2010/

ret

60

他の効果: 相対論的ジェット

– Tajima and Fukue 1996, 1998 for Schwarzschild case

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 61

他の効果: 相対論的ジェット

– Hirai and Fukue 2001 for Kerr case

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 62

他の効果: 相対論的ジェット

(2) 軸上ジェットの放射圧加速モデル

– Icke 1989 flat disk → magic speed = 0.45c
 – Marcowith et al. 1995
 – Sikora et al. 1996
 – Renaud, Henri 1998
 – Luo, Protheroe 1999

● 従来の研究: standard(-like) disk
 eeならいいがepは吹き出せない
 (角運動量のassistがないため)
 supercritical (slim) diskを考えるべき

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 63

他の効果: 相対論的ジェット

超臨界降着円盤の軸上ジェット

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 64

他の効果: 相対論的ジェット

軸上の $\varepsilon_{(上)}$ 、 $f_{(中)}$ 、 $p_{(下)}$ と、 $g_{(破線)}$

$dm=100, r_{cr}=200, H/r=0.45$ $dm=1000, r_{cr}=2000, H/r=0.98$

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 65

他の効果: 相対論的ジェット

軸上の f (いろいろな dm)

2010/10/12 Black-Hole Accretion Disks 66



他の効果: 相対論的ジェット 平衡速度と終末速度



$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{1}{2(z-1)^2} + \frac{1}{2} \frac{m_p}{m} [\gamma(1+2u^2)f - \gamma^2 u(\varepsilon+p)]. \quad (34)$$

For electron-proton plasmas, $m_p/m = 1$, whereas, for electron-positron plasmas, $m_p/m = m_p/m_e = 1840$.

Under the effect of radiation drag, the *equilibrium speed* is defined as a speed, where the net radiative force vanishes:

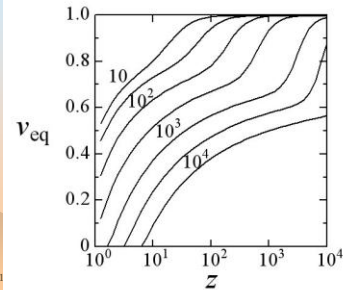
$$[\gamma(1+2u^2)f - \gamma^2 u(\varepsilon+p)] = 0. \quad (35)$$

On the other hand, the *terminal speed* is a speed, where the total force vanishes:

$$-\frac{1}{2(z-1)^2} + \frac{1}{2} \frac{m_p}{m} [\gamma(1+2u^2)f - \gamma^2 u(\varepsilon+p)] = 0. \quad (36)$$



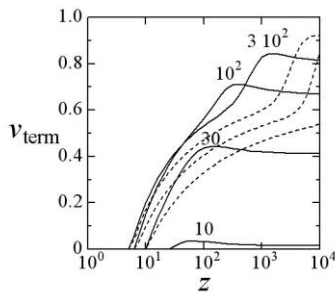
他の効果: 相対論的ジェット 平衡速度 (いろいろな dm)



2010/10/11



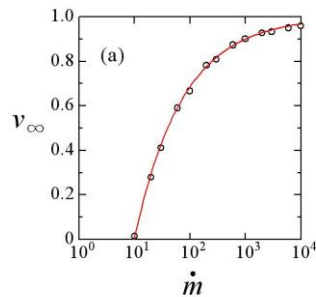
他の効果: 相対論的ジェット 終末速度 (いろいろな dm)



2010/10/11



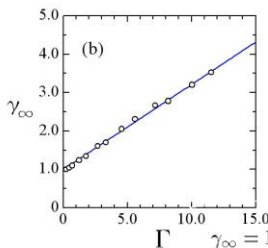
他の効果: 相対論的ジェット 終末速度 @ 無限遠



$$\frac{v_\infty}{c} = 1 - \frac{\pi}{\sqrt{dm}}.$$



他の効果: 相対論的ジェット 終末速度の無限遠



$\gamma_\infty = 1/\sqrt{1-(v_\infty/c)^2}$ and $\Gamma = L/L_E$.
fitting relation (solid curve):

$$\gamma_\infty = 1 + 0.2229\Gamma.$$

2010/10/12



他の効果: 相対論的ジェット 超臨界降着円盤の軸上ジェット



- 最終速度と規格化した降着率の関係

$$v_\infty/c = 1 - \pi/\sqrt{dm}$$

- ローレンツ因子と規格化した光度の関係

$$\gamma_\infty = 1 + 0.2229(L/L_E)$$

2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

72



他の効果: 相対論的ジェット 終末速度—光度関係



• $\gamma_{\infty} = 1 + 0.22 (L/L_E)$

多数の“明るい”活動銀河に対して、
上記の関係が成り立つか。

少なくとも、放射圧で加速されるジェットでは、
“明るい”活動銀河の光度と
ジェットの(終末)速度の間には
何らかの関係が存在するだろう。

終末速度と光度の関係を知りたい！

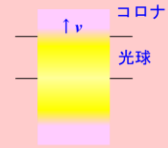
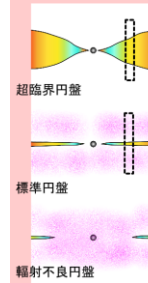
2010/10/12

Black-Hole Accretion Disks

73

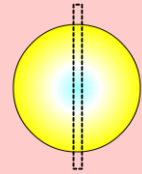


他の効果: 相対論的ジェット (2) 輻射流



円盤内(輻射球内)の
輻射圧駆動プラズマ流を
鉛直方向(半径方向)に
輻射輸送を考慮して解く。

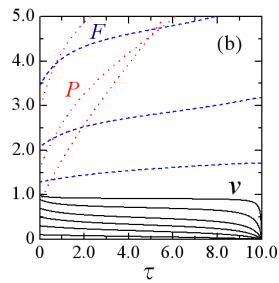
表面が動いているとして
正しい境界条件を用いる。



ガンマ線バースト



他の効果: 相対論的ジェット 輻射流



2010/10/12

75