



宇宙ジェット現象 観測

Astrophysical Jets Observational Overviews



全体目次

- 1 宇宙ジェット現象:観測の概要 (Lv 5-)
- 2 宇宙ジェット現象:理論の概要 (Lv 5-)
- 3 流体力学的(HD/RHD)モデル (Lv 10-)
- 4 磁気流体力学的(MHD/RMHD)モデル (Lv 20-)
- 5 輻射流体力学的(RHD/RRHD)モデル (Lv 30-)
- 6 相対論的輻射流体力学の定式化 (Lv 40-)
- 7 最近の研究の進展 (Lv 30-): 詳細は『天文月報』連載予定
一般化されたミルン-エディントン解、ブラックホール風の見え方
輻射圧駆動ブラックホール風のモデル、相対論的変動エディントン因子
(時間の範囲でアラカルトに)
- 8 お宝地図 (Lv ?)

2010/10/12 Review : Jet Observation 2

相対論的宇宙ジェット

宇宙ジェット(astrophysical jets)
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

- (YSO)
- (CVs, SSXSs)
- Crab pulsar
- SS 433
- microquasar
- AGN
- quasar
- gamma-ray burst

2010/10/12 Review : Jet Observation 3

宇宙ジェットの発見

観測

- 1918年 “星雲”M87の光の矢(Curtis)
- 1963年 クェーサー 3C273の同定(Schmidt)
- 1978年 特異星SS433の発見(Margon)
- 1994年頃 マイクロクェーサーの類別(Mirabel)
- 1997年 ガンマ線バーストの同定(BeppoSAX)

理論

- 1969年 超巨大ブラックホールの提唱(Lynden-Bell)
- 1973年 標準降着円盤モデル(Shakura and Sunyaev)
- 1986年 ファイアボールモデル(Paczynski)

2010/10/12 Review : Jet Observation 4

活動銀河

活動銀河核(active galactic nuclei)
中心核が何らかの活動性を示す銀河

電波銀河M87

2010/10/12 Review : Jet Observation 5

活動銀河

電波銀河Cen A

さまざまな波長で見た活動銀河ケンタウルス座A(NGC5128(<http://physics.gmu.edu/~rms/astro113/myimages/cenacomp.jpg>)).

右上:可視光では、赤道面が塵の多いガスで隠された楕円銀河のようにみえる。

右下:赤外線では、塵の帯を通して中心部が非常に明るく輝いているのがわかる。

左下:電波では、塵の帯に垂直方向に広がる二つ目玉がわかる。

左上:電波では、二つ目玉の方向に細く伸びるジェットが写っている。

2010/10/12 Review : Jet Observation 6

クェーサー

クェーサー (quasar) 非常に遠方の活動銀河核

多波長で観測したクェーサー3C273のジェット (NASA/STScI/JAXA) 上から、
X線 (チャンドラ衛星) 可視光 (ハッブル宇宙望遠鏡) 電波 (マリリン干渉計)

クェーサー 3C273

電波 (宇宙電波干渉計はるか) 1番目のチャンドラの画像と着目のハッブルの画像にはジェットの先端半分程度のほぼ同じ部分が写っている。3番目のマリリンの画像にはだいたいジェットの全体が写っていて、左隣の3C273中心核から右方向へジェットが伸びている。一番下ののはかへ星の画像には中心核部分を拡大したものが写っており、数十光年ぐらいの領域がみえている。

電波・光・X線

クェーサー・AGN 分光学的証拠

BAL (broad absorption line) クェーサー

クェーサーの10%程度
N V, C IV, Si IV 高階電離線
幅が広く青方偏移した吸収線
10000~30000km/s ~0.1c
高い柱密度 ($10^{23} \sim 10^{24}$ g/cm²)
濃密なガスが視線方向に吹き出していると推測されている。

P Cyg プロファイル

BALクェーサー APM0827 (z=3.78) (<http://www.astro.keele.ac.uk/tdeser/ej/quasar.html>)

2010/10/12 Review: Jet Observation

クェーサー・AGN 分光学的証拠

クェーサー PG1211+143

チャンドラX線観測
幅広い吸収線 ~0.3-0.4c

狭輝線 I 型セファート (NLSy1)

1H0707-495
X線観測
P Cyg プロファイル

クェーサー PG 1211+143のX線スペクトル (http://cxc.harvard.edu/newsletters/ncws_13/letg.html)。2カ所の吸収線は、25階電離した鉄 Fe XXVの Ly α 吸収線だと推測されている。

2010/10/12 Review: Jet Observation

マイクロクェーサー

特異星 SS433
14等、X線連星

SS433 VLBA

Amy Mioduszewski
Michael Rupen
Craig Walker
Greg Taylor

X線衛星ぎんがの撮像した特異星SS433のジェット (<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/>)。光速の26%もの速度で星間空間に突入したジェットガスと、星間物質との間の摩擦によって、ガスが高温になりX線を放射していると想像されている。

電波で観測したSS433ジェットのコルク抜きパターン (<http://www.nrao.edu/pr/2004/ss433corkscrew/>)。SS433ジェットは、ある固定軸 (旋差軸) のまわりを約20°の傾角をもつ円錐面内で周期163日で、斜めた独流の輪が揺れるような歳差運動をしている。

SS433ジェットのパラメータで作成したアニメ

マイクロクェーサー

マイクロクェーサー (microquasar) 亜光速ジェットをもった系内ブラックホール連星

GRS1915+105
速度は光速の92%！！

電波で撮像したマイクロクェーサーGRS 1915+105 (<http://universe-review.ca/~108-17-microquasar/g1/>)。異なった時期に得られた3つの画像が上から下に並べてある。中心の電波源から図の左右に電波源点が移動しているのがわかる。

2010/10/12 Review:

マイクロクェーサー 分光学的証拠

特異星 SS433

X線衛星ぎんがの撮像した特異星SS433のジェット (<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/>)。光速の26%もの速度で星間空間に突入したジェットガスと、星間物質との間の摩擦によって、ガスが高温になりX線を放射していると想像されている。

電波で観測したSS433ジェットのコルク抜きパターン (<http://www.nrao.edu/pr/2004/ss433corkscrew/>)。SS433ジェットは、ある固定軸 (旋差軸) のまわりを約20°の傾角をもつ円錐面内で周期163日で、斜めた独流の輪が揺れるような歳差運動をしている。

ガンマ線バースト

ガンマ線バースト(gamma-ray burst)
数十秒にわたり、強いガンマ線を放つ
宇宙最大の高エネルギー天体現象

Short GRB/Long GRBの2種類

宇宙論的天体(1991年)
10⁴⁵Jを超えるエネルギー

2010/10/12 Review : Jet Observation

コンパクト衛星/BATSEで検出した数千例のGRB (NASA)。非ほど明るく貴ほど強いが、どれも全天で一様に分布している。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

ガンマ線バースト

残光の発見(1997年)
可視光の追観測
~100億光年
GRB970508は70億光年

極超新星との関連(2003年)
GRB030329/ SN2003dh

2010/10/12 Review : Jet Observation

BepoSAX衛星がX線で捉えたオリオン座のガンマ線バーストGRB970228の残光 (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/doc/objects/grbs/grb970228.html)。左は1997年2月28日のバースト時で、右は3月3日で随分と暗くなっている。

SN2003dhとSN1998bwを比較したスペクトル。GRB030329の残光を連続観測している中で出現してきたので、GRB030329と超新星SN2003dhの関連が明白に示された。

ガンマ線バースト

コンパクトネス問題
相対論的炎の玉の膨張
(Rees&Meszaros 1992年)
ファイアボールエンジン
(Paczynski 1986年)
速度は光速の99.99%！！
大質量星の崩壊に伴い、ほぼ光速で膨張するファイアボールが吹き出す

初期の輻射のエネルギー密度がバリオン
のエネルギー密度のγ倍あれば、最終
的なローレンツ因子もγとなる。

2010/10/12 Review : Jet Observation

大量のガンマ線光子を狭い領域に閉じ込めると、電子-陽電子対を作り出す。ガンマ線は電子や陽電子に衝突して散乱し、外部へ抜け出せない。

超高速の放射体一相対論的炎の玉がX線を出している。相対論的效果のために、観測者は早い時間変動をするガンマ線として検出する。

ブラックホール近傍でできたファイアボールが非球対称に膨張し、重力崩壊する星の外層を貫いて、光速の99.99%のジェットが吹き出している(NASA)。

ブラックホールジェットのまとめ

物理量	活動銀河ジェット	原始星ジェット	系内ジェット
サイズ	pc ~ Mpc	0.1 ~ 1 pc	100 AU ~ 100 pc
速度	~c	10 ~ 150 km/s	0.26 c ~ 0.92 c (NS, BH)
年齢	~ 10 ⁶ 年	~ 10 ⁴ 年	~ 10 ³ 年
収束度	< 1°	~ 10°	< 1°
中心天体 (脱出速度)	超大質量ブラックホール ~ c	原始星 ~ 400 km/s	コンパクト天体 ~ c (NS, BH) ~ 5000 km/s (WD)
例	3C 273, M 87 Cyg A, Cen A	L 1551, Orion A AFGL 490	SS 433, Sco X-1 R Aqr, Cyg X-3 1E 1740-2942

2010/10/12 Review : Jet Observation

ブラックホールジェットのまとめ

- マイクロクェーサー
 - SS433 > L_E ep cont/blob 0.26c/1.04
 - 1E1740.7-2942 ? ee? 0.26c/1.04
 - GRS 1915+105 ~ L_E ee? bloby 0.92c/2.55
 - GRO J1655-40 ~ L_E ee? bloby 0.92c/2.55
 - XTE J1748-288 ~ L_E ee? bloby > 0.92c/2.55
- クェーサー、活動銀河
 - 3C 273 > L_E ? ? 0.99c ? /10
 - M87 << L_E ? ? 0.99c ? /10
- ガンマ線バースト
 - GRB030329/SN2003dh >> L_E ee? fireball 0.9999c /100

2010/10/12 Review : Jet Observation

放射圧加速ジェット

- 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 β=0.26, γ=1.04
highly relativistic β=0.92, γ=2.55
ultra relativistic β=0.99, γ=10
extremely relativistic β=0.9999, γ=100

2010/10/12 Review : Jet Observation



宇宙ジェットの加速機構



- エネルギー源
 - 重力エネルギー
 - 自転エネルギー (エルゴ圏)
- 加速・駆動方法
 - 高温ガスの圧力
 - 輻射(光)の圧力
 - 磁場の力
- 輻射力加速にせよ磁気力加速にせよ、光速の9割ぐらまでなら可能だが、 γ が10とか100の超相対論的ジェットはまだ実現できていない。



2010/10/12

Review : Jet Observation

19



5. 影響 関連する天体现象

輻射場が重要な相対論的天体现象全般

- ブラックホール降着流: 光子捕捉
- 相対論的天体風: 超相対論的ジェット
- ガンマ線バースト: ファイアボール
- ニュートリノ円盤: ニュートリノトラス
- 初期宇宙: 最初の降着円盤、最初のジェット



2010/10/12

Review : Jet Observation

21





目次

- 1 理論モデルの概要(分類)
- 2 流体力学的(HD)モデル
 1. 爆発モデル
 2. ブランドフォード-リースモデル
 3. ファンネルモデル
- 3 磁気力駆動(MHD)モデル
 1. ブランドフォード-ペイン磁気遠心力加速モデル
 2. 内田-柴田磁気圧加速モデル
- 4 輻射圧駆動(RHD)モデル
 1. 光学的に薄いモデル
 2. 光学的に厚いモデル
 3. 相対論的輻射流体モデル
 4. ファイアボールモデル
- 5 今後の課題

2010/10/12 Review : Jet Model 2

宇宙ジェットの理論モデル 1 概要

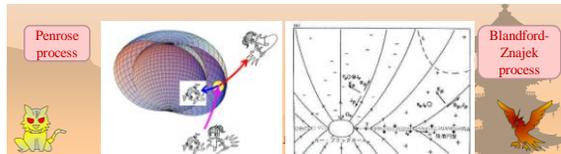
Theoretical Models for Astrophysical Jets
1 Overview



宇宙ジェットモデルの類別

表 9.6 宇宙ジェットのモデルの類別

加速機構	加速機構		
収束機構	ガス圧	輻射圧	磁場
外因説	中心爆発モデル ビームモデル	コンパクト星風	
降着円盤	熱的加速風 超臨界降着	輻射圧加速風	磁気遠心力風 磁気圧加速風
トラス	ファンネル風	ファンネル輻射圧風	磁気トラスジェット
その他		ラインロッキング コンプトンロケット	中心星に凍結した磁場 ブラックホール駆動



重力エネルギー転換炉

- 機械的イメージ

「エネルギー論 (energetics)」から考えれば、どんなに高速のジェットでも原理的には駆動できる。すなわち、最初にブラックホールなどの重力場中に束縛された物質(負の束縛エネルギーをもつ)があって、その重力エネルギーを解放することによって、大部分の物質はますます重力場深くに束縛される一方、一部の物質は正のエネルギーを得て、システムから亜光速で脱出することが可能になる。そして、その比率を極端にすれば、ジェット物質がもう単位質量あたりのエネルギーは増えるので速度を大きくできる(ただし、物質があまり少ないとジェットとしての体積が取れなくなる)

$$\dot{M} c^2 \frac{\epsilon + p}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} + 4\pi R^2 g_{00} F_{\text{lab}} + S = \dot{E}$$

2010/10/12 Review: Jet Model

重力エネルギー転換炉

- 分配、変換、配分問題

難しいのは、ブラックホールに落ち込む物質と正のエネルギーを得てジェットとなる物質の割合がどのように決まるかという「分配」の問題と、重力エネルギー(や核反応エネルギー)から内部エネルギー(や放射エネルギー)などを経て運動エネルギーへいたる「変換」の問題である。それらから、ジェットとして放出される物質・放射・磁場・その他(電子陽電子対やニュートリノなど)の割合がどうなるかという「配分」の問題、そしてそれらの成分間での「相互作用」などの詳細である。

これらの問題を一つ一つ解決していくことが、ジェットの仕組みを最終的に明らかにすることにつながるに違いない。

2010/10/12 Review: Jet Model 9

宇宙ジェットの理論モデル

2 流体力学的モデル

Theoretical Models for Astrophysical Jets

2 Hydrodynamical Models

2010/10/12 Review: Jet Model

HD: 爆発モデル

球対称爆発
+ 非球対称エンベロープ
= 双極ジェット

Sakashita 1971
Mollenhoff 1976

手法: 衝撃波面の形状を半解析的に計算

結果: エンベロープの短軸方向へ吹き出す

2010/10/12 Review: Jet Model

HD: ビームモデル

ラバール管(ノズル)的
相対論的定常流

Blandford and Rees 1974

手法: 特殊相対論の1次元定常流として解析
- エレガントな扱い

結果: ノズル位置で遷音速となり、流速が相対論的音速(c/√3)になる

2010/10/12 Review: Jet Model

HD: 超臨界降着

超臨界降着

Meier 1979

手法: 半解析的扱い

2010/10/12 Review: Jet Model

宇宙ジェットの理論モデル
3 磁気力駆動モデル

Theoretical Models for Astrophysical Jets
3 Magnetohydrodynamical Models

MHD: 磁気力駆動風

Blandford and Payne 1982 Uchida and Shibata 1985

筑波にて (2008/03/12) 博多にて (2007/10/11)

Review : Jet Model

MHD: 磁気遠心力風

磁力線に沿う重力+遠心力の等ポテンシャル面
 60° より傾くと不安定

Blandford and Payne 1982

Figure 1. Equipotential surfaces for a disk on a star, assuming with the Keplerian angular velocity $\Omega(r) = \sqrt{GM/r^3}$ or a millisecond pulsar, which is obtained from rest at r_0 . The equation of the surfaces is $\Phi(r, z) = -\frac{GM}{r} - \frac{1}{2}\Omega^2 r^2 + \frac{1}{2}gz^2 = \text{constant}$.

2010/10/12 Review : Jet Model 16

MHD: 磁気遠心力風

2次元MHD定常流
 手法: 自己相似解
 - エレガントな扱い
 結果: 定常加速解の存在

Blandford and Payne 1982

2010

MHD: 磁気圧加速風

MHDジェットの世界初の2.5次元MHD数値シミュレーション
 Uchida and Shibata 1985
 Shibata and Uchida 1986

結果: ジェットの速度~ケプラー速度

20

Weak twist case
 ~ linear Alfvén wave

$B_\phi / B_p = V_\phi / V_{Ap}$

$\rho \frac{d}{dt}(V_{jet}) = \frac{d}{dz}(B\phi^2 / 8\pi)$

$\rho V_{jet} \sim B\phi^2 / (8\pi) / (z/t)$

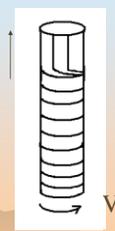
$V_{jet} \sim B\phi^2 / (8\pi\rho) / V_{Ap}$

$V_{jet} \sim V_{Ap}^2 / V_{Ap}$

2010/10/12 Review : Jet Model 19

Strong twist case

~ magnetic pressure driven flow



$$\rho \frac{d}{dt}(V_{jet}) = \frac{d}{dz}(B\phi^2 / 8\pi)$$

$$\rho V_{jet} \sim B\phi^2 / (8\pi) / (z/t)$$

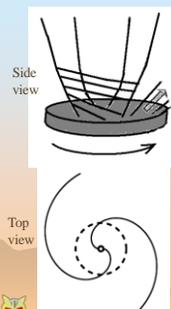
$$z/t \sim V_{A\phi}$$

$$V_{jet} \sim B\phi^2 / (8\pi\rho) / V_{A\phi}$$

$V_{jet} \sim V_{A\phi}$

2010/10/12 Review : Jet Model 20

Magneto-centrifugally driven outflow



$$V_{jet} \sim V_{A\phi}$$

$$B\phi / Bp = r\Omega / V_{jet}$$

$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho V_{jet}$

$V_{jet} \approx \left(\frac{\Omega^2 B_p^2 r^4}{\dot{M}} \right)^{1/3}$

Michel velocity (1969)

2010/10/12 Review : Jet Model 21

宇宙ジェットの理論モデル

4 輻射力駆動モデル

Theoretical Models for Astrophysical Jets

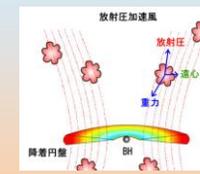
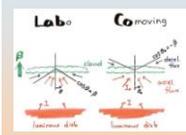
4 RadiationHydrodynamical Models

2010/10/12 Review : Jet Model 25

RHD:

光学的に薄い降着円盤風

● 光り輝く降着円盤の輻射場でガスを加速する

- 輻射場を外場として扱うので原理的には簡単
- × 輻射抵抗で頭打ち
- × 質量放出率が悪い

2010/10/12 Review : Jet Model 25

RHD:

降着円盤からの降着円盤風

Bisnovatyi-Kogan+ 1977
Icke 1980, 1989
Tajima, Fukue 1998
Watarai, Fukue 1999
Hirai, Fukue 2001
Fukue+ 2001
Orihara, Fukue 2003

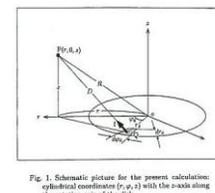


Fig. 1. Schematic picture for the present calculation: cylindrical coordinates (r, ϕ, z) with the z-axis along the rotation axis of the disk.

2010/10/12 Review : Jet Model 26

RHD:

標準円盤からの降着円盤風

Tajima, Fukue 1998

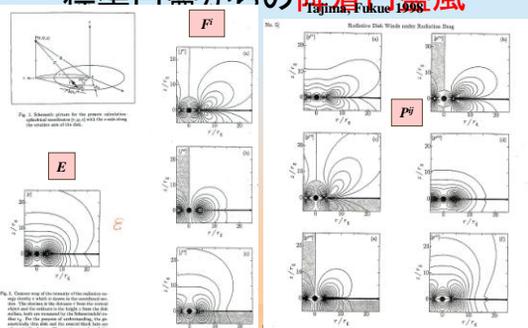


Fig. 2. Schematic picture for the present calculation: cylindrical coordinates (r, ϕ, z) with the z-axis along the rotation axis of the disk.

Fig. 3. Contour plots of the density ρ and velocity v_z in the (r, z) plane. The density is shown in the upper row and the velocity in the lower row. The contours are labeled with their values. The velocity is shown in the lower row. The contours are labeled with their values. The velocity is shown in the lower row. The contours are labeled with their values.

Fig. 4. Contour plots of the density ρ and velocity v_z in the (r, z) plane. The density is shown in the upper row and the velocity in the lower row. The contours are labeled with their values. The velocity is shown in the lower row. The contours are labeled with their values.

2010/10/12 Review : Jet Model 26

RHD: 標準円盤からの降着円盤風

Tajima, Fukue 1998

- 最終速度 $\sim 0.2c$ 程度

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: 標準円盤からの降着円盤風

Hirai, Fukue 2001

- シュバルツシルトとカー
- 最終速度 $\sim 0.8c$ 程度

2010/10/12 Review: Jet Model 29

RHD: 光学的に薄いファンネルジェット

光り輝くトーラスのファンネル内で加速する

Sikora and Wilson 1981

- ガスと輻射を別々に扱うので簡単
- ✗ 輻射抵抗の問題

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: 光学的に厚いファンネルジェット

光り輝くトーラスのファンネル内で加速する

Fukue 1982
Calvani and Nobili 1983

- ガスと輻射を一体として扱うので簡単
- ファンネルに束縛された太陽風型相対論的流体風

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: 光学的に厚いファンネルジェット

- 相対論的ベルヌーイ式

$$\dot{M} c^2 \frac{e+p}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} = \dot{E}$$

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\Gamma - 1} \frac{c_T^2}{c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}} = \dot{e} = \gamma_\infty$$

- 臨界点条件

$$\frac{c_T^2}{c^2} = \frac{1}{4r/r_g - 3}$$

- dot M: mass loss rate
- e: internal energy
- rho: mass density
- p: pressure
- gamma: Lorentz factor
- g00: metric
- dot E: total energy

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: 一般的な相対論的輻射流体風

- 光学的に厚い領域から薄い領域まで

- ガスと輻射を2流体として厳密に扱う
- ほとんど未知の分野
- ✗ 輻射流体がムズイ
- ✗ 多次元がムズイ

2010/10/12 Review: Jet Model 53

RHD:
一般的な相対論的輻射流体風

- 拡散近似
 - Lindquist 1966
 - Castor 1972
 - Ruggles & Bath 1979
 - Mihalas 1980
 - Quinn & Paczynski 1985
 - Paczynski & Proszynski 1986
 - Turolla et al. 1986
 - Paczynski 1990
 - Nobili et al. 1993
 - Nobili et al. 1994
 - King & Pound 2003
- 変動エディントン因子
 - Fukue 2005, 2006
 - Akizuki, Fukue 2006, 2007
 - Akizuki, Fukue 2008
- シミュレーション
 - Eggum+ 1985, 1988
 - Kley 1989
 - Okuda+ 1997
 - Kley, Lin 1999
 - Okuda 2002
 - Okuda+ 2005
 - Ohsuga+ 2005

2010/10/12 Review: Jet Model Ohsuga 2006

RHD:
一般的な相対論的輻射流体風

Fukue, Akizuki 2006b

- 特殊相対論: $(v/c)^2$
- 定常・軸対称
- 1次元 (z) 平行平板
- 速度依存変動E因子

2010/10/12 Review: Jet Model 55

RHD:
一般的な相対論的輻射流体風

RHD数値シミュレーション Eggum et al. 1988

- 特殊相対論: $(v/c)^1$
- Flux-Limited Diffusion 近似 ← あまりよくない

2010/10/12

RHD:
一般的な相対論的輻射流体風

RHD数値シミュレーション ● Ohsuga et al. 2005

- 特殊相対論: $(v/c)^1$
- 非定常
- 多次元
- Flux-Limited Diffusion 近似 ← あまりよくない

2010/10/12

星取表1999 in 『活動する宇宙』

表 9.7 宇宙ジェットモデルの「星取り表」

特徴	輻射圧モデル*	MHD モデル*
エネルギー性	○○	○○
収束性	??	○○
特性速度	マジックスピード	ケプラー速度
標準降着円盤との共存	○○	?○
ADAF との共存	??	?○
対象天体		
原始星ジェット	?×	○○
激変星	○?	×○
超軟 X 線源	○?	×○
X 線星	○?	?○
SS 433	○?	?○
1E 1740-2942	○?	?○
活動銀河ジェット	○?	○○

○×は、左(福江)右(柴田)

2010/10/12

星取表2008

表 9.7 宇宙ジェットモデルの「星取り表」

特徴	輻射圧モデル*	MHD モデル*
エネルギー性	○○	○○
収束性	??	○○
特性速度	マジックスピード	ケプラー速度
標準降着円盤との共存	○○	?○
ADAF との共存	??	?○
対象天体		
原始星ジェット	?×	○○
激変星	○?	×○
超軟 X 線源	○?	×○
X 線星	○?	?○
SS 433	○?	?○
1E 1740-2942	○?	?○
活動銀河ジェット	○?	○○

○×は、左(福江)右(柴田)

2010/10/12

RHD: ファイアボール

- 降着円盤 (縮退円盤)
- Paczynski 1986
- 近接連星 (近似式)
- 降着トラス
- 擬ニュートンポテンシャル
- ファイアボールモデル
- 重力レンズ現象



2010/10/12 Review: Jet Model

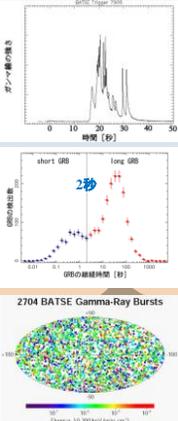
ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (gamma-ray burst)
数十秒にわたり、強いガンマ線を放つ
宇宙最大の高エネルギー天体現象

Short GRB/Long GRBの2種類

宇宙論的天体 (1991年)
10⁴⁵Jを超えるエネルギー

コンプトン衛星/BATSEで検出した数千例のGRB (NASA)。赤ほど明るく青ほど暗いが、どれも全天で一様に分布している。

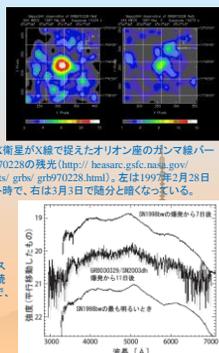


2010/10/12 Review: Jet Model

ガンマ線バースト

残光の発見 (1997年)
可視光の追観測
~100億光年
GRB970508は70億光年

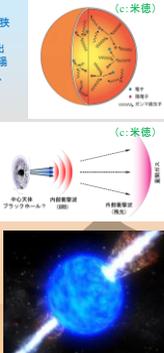
極超新星との関連 (2003年)
GRB030329/ SN2003dh



2010/10/12 Review: Jet Model

ガンマ線バースト

コンパクトネス問題
相対論的の火の玉の膨張
(Rees&Meszaros 1992年)
ファイアボールエンジン
(Paczynski 1986年)
速度は光速の99.99%!!
大質量星の崩壊に伴い、ほぼ光速で膨張するファイアボールが吹き出す
初期の輻射のエネルギー密度がバリオンのエネルギー密度のγ倍あれば、最終的なローレンツ因子γとなる。



2010/10/12 Review: Jet Model

コンパクトネス問題

- 高エネルギーのガンマ線光子が他の光子に衝突したとき、電子陽電子対の生成される閾値エネルギー:
- ある光度LとサイズRの領域でのガンマ線光子の光学的厚み:

$$\tau_{\gamma\gamma} \approx \frac{l}{60}$$

$$l \equiv \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \frac{L}{R}$$

$$\left(\frac{h\nu}{m_e c^2}\right)_{\gamma\text{-ray}} \left(\frac{h\nu}{m_e c^2}\right)_{\text{target}} > \frac{2}{(1-\cos\theta)}$$

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: ファイアボール

- 連続の式 $4\pi R^2 \rho v \gamma \sqrt{g_{00}} = \dot{M}$
- 相対論的ベルヌーイの式 $(T_{\mu}^{\nu} + R_{\mu}^{\nu})_{;\nu} = 0$

$$\dot{M} c^2 \frac{\varepsilon + p}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} + 4\pi R^2 g_{00} F_{\text{lab}} = \dot{E}$$

$$F_{\text{lab}} = \gamma^2 [(1 + \beta^2) F_{\text{co}} + \beta (cE_{\text{co}} + cP_{\text{co}})]$$

$$\dot{M} c^2 \frac{\varepsilon + p + E_{\text{co}} + P_{\text{co}}}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} + \gamma^2 g_{00} (1 + \beta^2) 4\pi R^2 F_{\text{co}} = \dot{E}$$

2010/10/12 Review: Jet Model

RHD: ファイアボール

- 相対論的ベルヌーイの式

$$\dot{M} c^2 \frac{\varepsilon + P}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} + 4\pi R^2 g_{00} \gamma^2 [(1 + \beta^2) F_{\text{co}} + \beta(cE_{\text{co}} + cP_{\text{co}})] = \dot{E}$$

$$\dot{M} c^2 \frac{\varepsilon + P + E_{\text{co}} + P_{\text{co}}}{\rho c^2} \gamma \sqrt{g_{00}} + \gamma^2 g_{00} (1 + \beta^2) 4\pi R^2 F_{\text{co}} = \dot{E}$$

$$L_{\text{dif}} = 4\pi R^2 g_{00} \gamma^2 (1 + \beta^2) F_{\text{co}}$$

$$L_{\text{adv}} = 4\pi R^2 g_{00} \gamma^2 \beta (cE_{\text{co}} + cP_{\text{co}})$$

2010/10/12 Review: Jet Model 72

RHD: ファイアボール

- 相対論的ベルヌーイの式
 - 重力無視、バリオン無視、 L_{dif} 無視

$$L_{\text{adv}} = 4\pi R^2 \gamma^2 \beta (cE_{\text{co}} + cP_{\text{co}}) = \dot{E}(\text{const})$$

- 断熱の式

$$T_{\text{co}} \gamma = \text{const}$$

- 運動方程式

$$\frac{dP_{\text{co}}}{dR} = -(E_{\text{co}} + P_{\text{co}}) \frac{d \ln \gamma}{dR}$$

2010/10/12 Review: Jet Model 73

RHD: ファイアボール

$$cE_{\text{co}} = 3cP_{\text{co}} = aT_{\text{co}}^4 = (4\sigma/c)T_{\text{co}}^4$$

- 相対論的ベルヌーイの式

$$4\pi R^2 \gamma^2 \beta (cE_{\text{co}} + cP_{\text{co}}) = 4\pi R^2 \gamma^2 \beta \frac{16}{3} \sigma T_{\text{co}}^4 = \dot{E}$$

- 断熱の式

$$T_{\text{co}} \gamma = \text{const}$$

- 運動方程式

$$\frac{d \ln T_{\text{co}}^4}{dR} = -4 \frac{d \ln \gamma}{dR}$$

2010/10/12 Review: Jet Model 74

RHD: ファイアボール

- 自己相似解 ($R \gg R_{\text{in}}$)

$$\gamma = \frac{R}{R_{\text{in}}}$$

$$T_{\text{co}} = T_{\text{in}} \frac{R_{\text{in}}}{R}$$

$$\dot{E} = 4\pi R_{\text{in}}^2 \frac{16}{3} \sigma T_{\text{in}}^4$$

2010/10/12 Review: Jet Model 75

5. 影響 関連する天体現象

輻射場が重要な相対論的天体現象全般

- ブラックホール降着流: 光子捕捉
- 相対論的天体風: 超相対論的ジェット
- ガンマ線バースト: ファイアボール
- ニュートリノ円盤: ニュートリノトーラス
- 初期宇宙: 最初の降着円盤、最初のジェット

2010/10/12 Review: Jet Model 79