

コクーン膨張力学から探る  
3C84ミニジェットパワーの時間進化  
とプラズマ組成

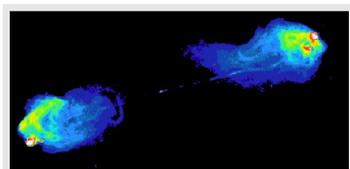
川勝望（呉高専）  
紀基樹（工学院大学/国立天文台）

ブラックホール大研究会 2/28-3/2@御殿場

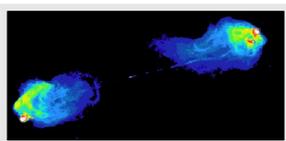
# 発表内容

- 研究背景・目的
- コクーン/シェルの力学モデル
- 結果
  - ★3C84ジェットパワーと $<10\rho_c$ ガス密度
  - 結果1：ジェットパワー/周辺ガス密度への制限
  - 結果2：シェルの伝搬速度から周辺ガス密度への制限
  - 結果3：ジェットパワーの時間進化
  - ★3C84ジェット組成：陽電子は必要か？
  - 結果4：コクーン圧力から探るジェット組成
- 議論
- まとめ

# 電波源の進化⇒ジェットパワー $L_j(t)$ 、周辺密度 $\rho(r)$



Giant cocoon  
( $R < 1\text{kpc}$ )



Intermediate cocoon  
( $1\text{kpc} < R < 10\text{kpc}$ )



Mini cocoon  
( $R < 1\text{kpc}$ )

## ★理論

ジェットパワー&周辺密度 ( $< 10\text{pc}$ )  
⇒良く分かっていない

## ★観測

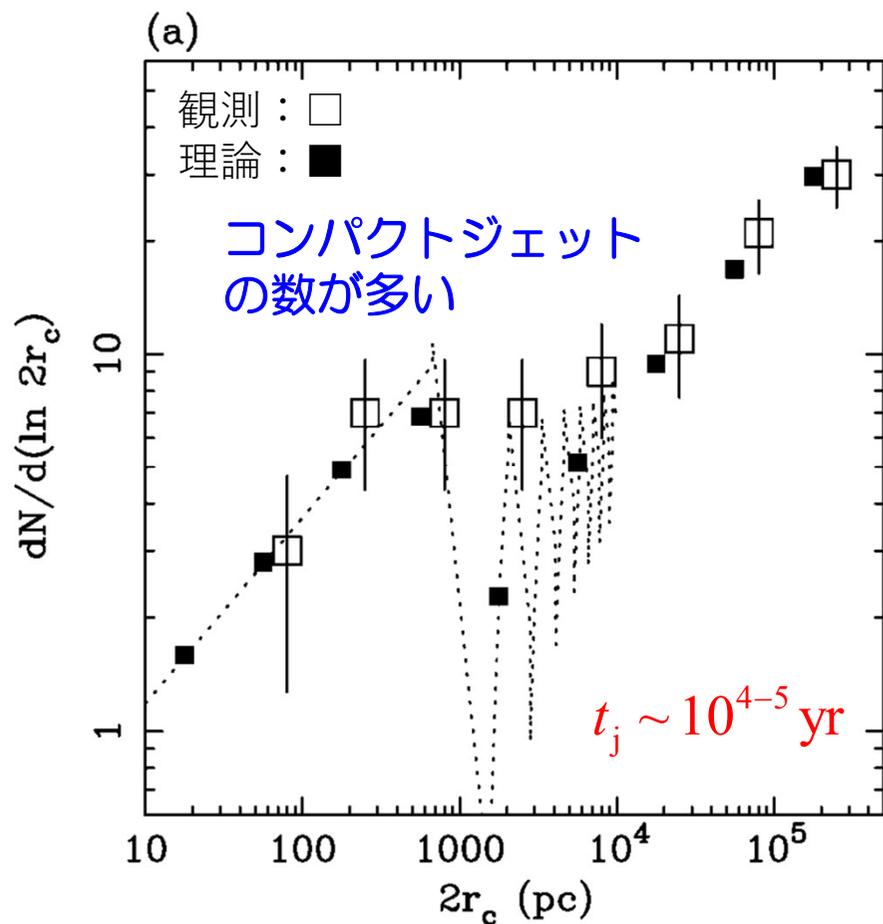
- ジェットパワー：放射のみの推定は不定性大
  - 周辺密度：diffuse gasからの放射は暗い
- ⇒  $L_j(t)$  &  $\rho(r)$ の観測的制約は難しい

## 【本研究の目的】

コクーン/シェル動力学を用いて、3C84の  
1-10pcジェットパワー&周辺ガス密度について調べる。

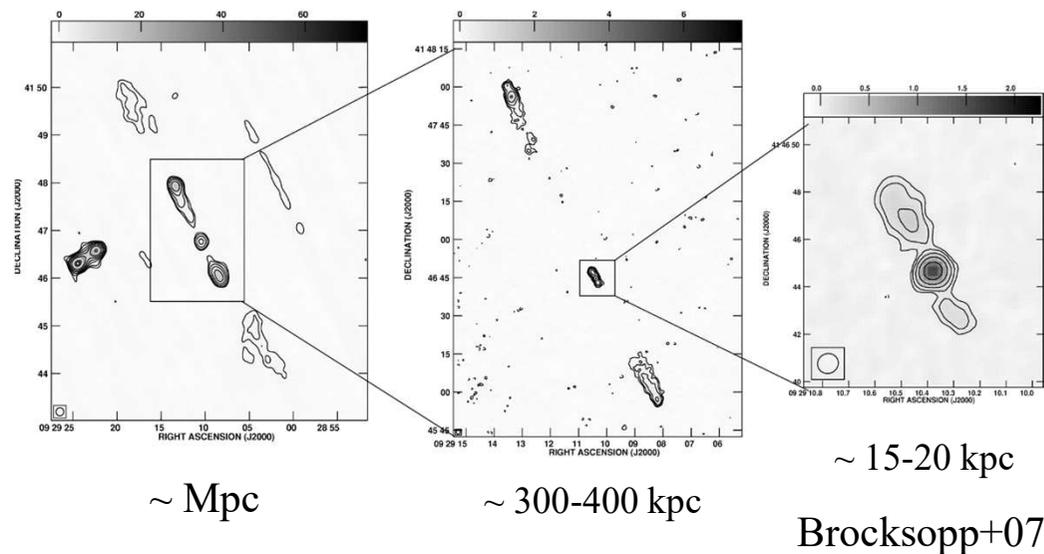
(ジェット組成についても簡単に触れる)

# ジェット活動は間欠的か？ ジェットパワーは一定？



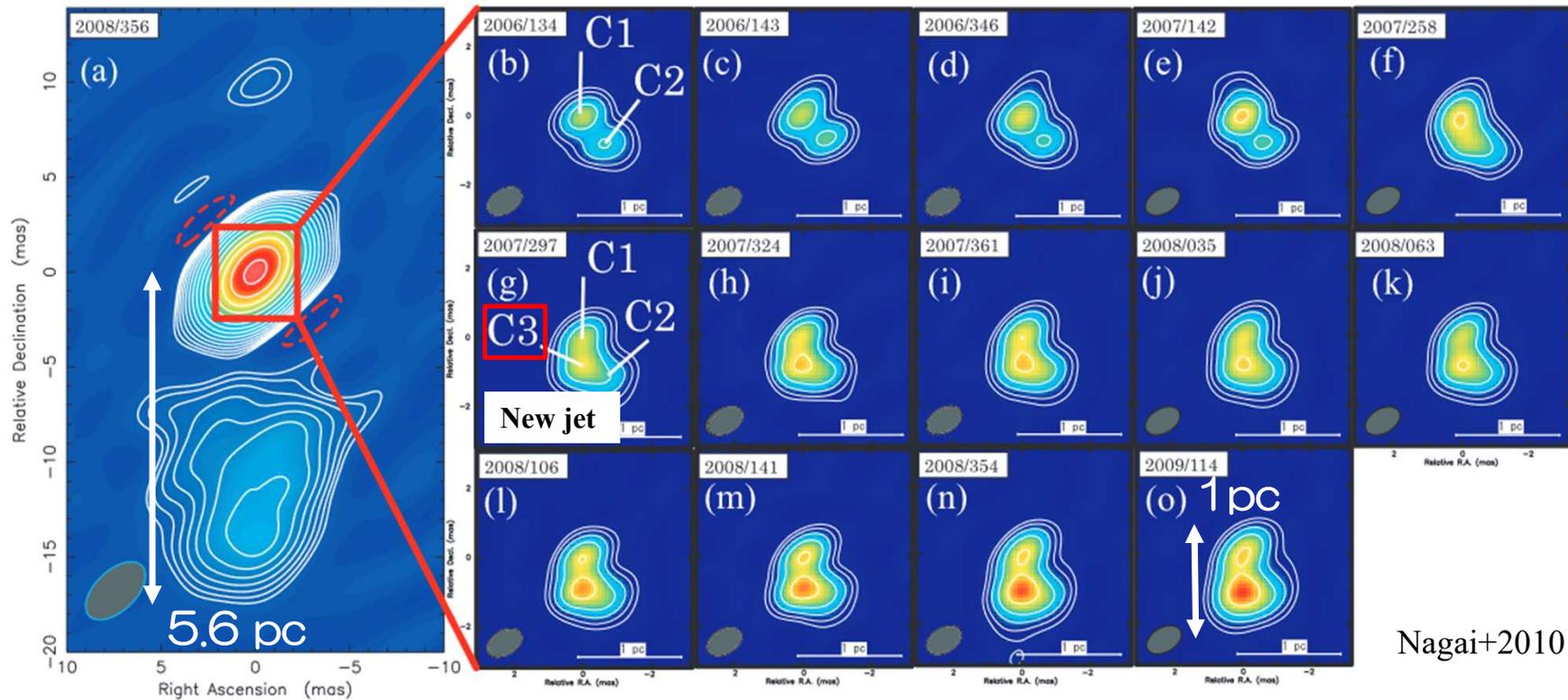
Reynolds and Begelman 1997

## Double-Double Radio Sources



- ジェットの間欠的？：銀河スケールではYes  
もっと小さいスケールではどうか？
- ジェットパワーは一定？：全く分かっていない

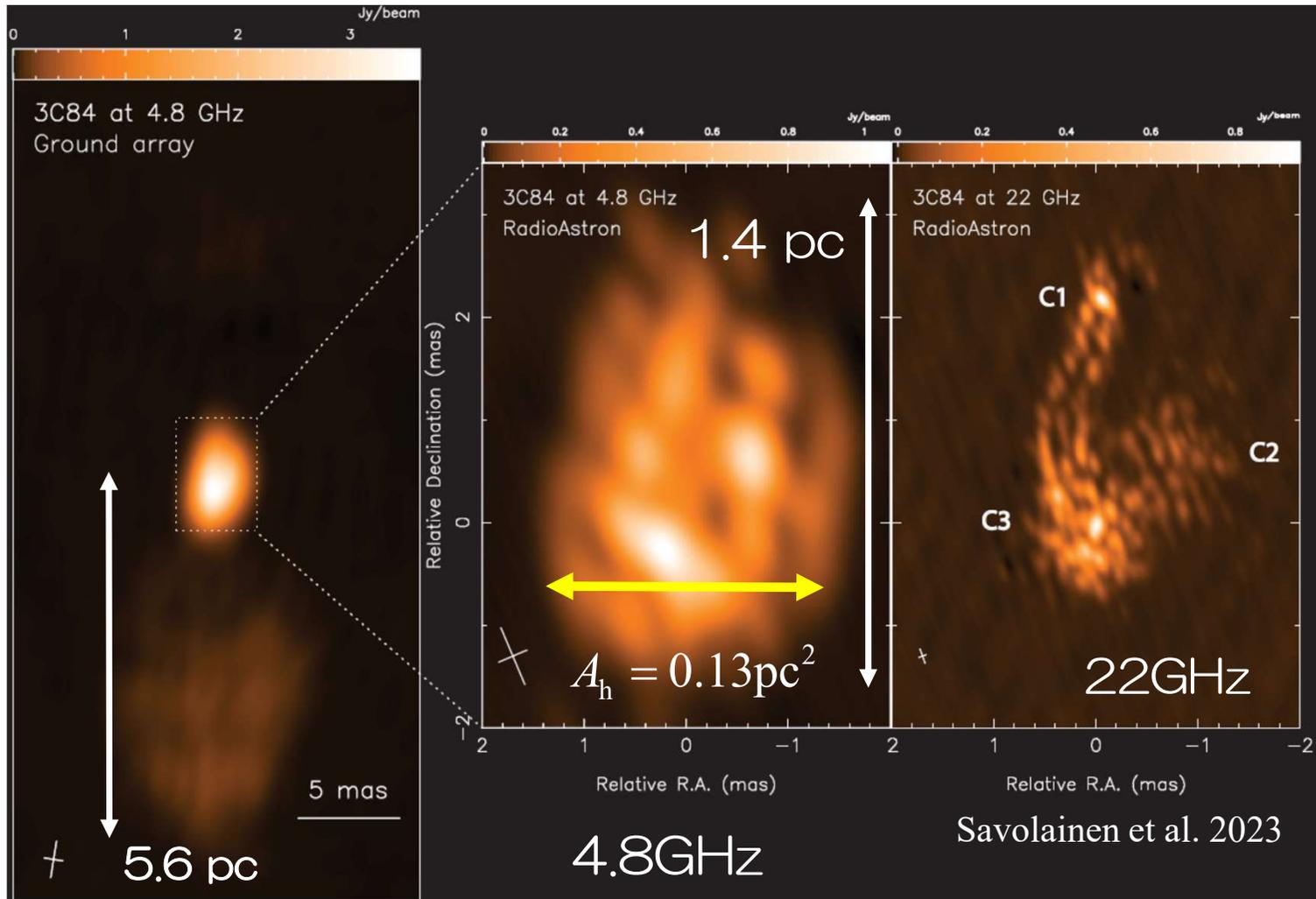
$L_j$ と  $\rho(r)$   $\rightarrow$  3C84が唯一！



Nagai+2010

1pc & 6pcというコンパクトジェットのコクーン形状、伝搬速度、年齢などの力学情報があり

# 3C84 ミニコクーン (~1 pc) の発見 @ 4.8 GHz *Radio Astron*



*RadioAstron* (Space VLBI)

○コクーン形状

$$A_h = 0.13 \text{ pc}^2$$

○膨張速度

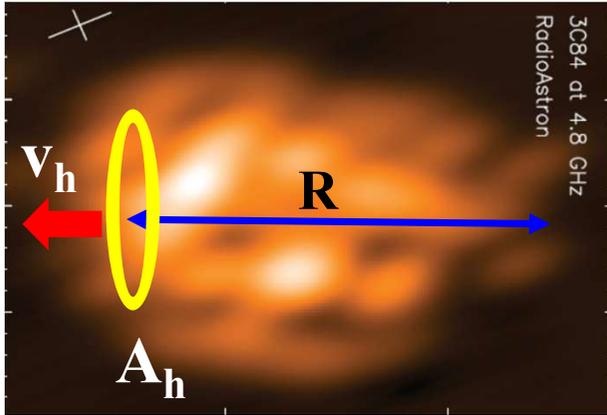
$$v_h = 0.2 - 0.55c$$

○年齢

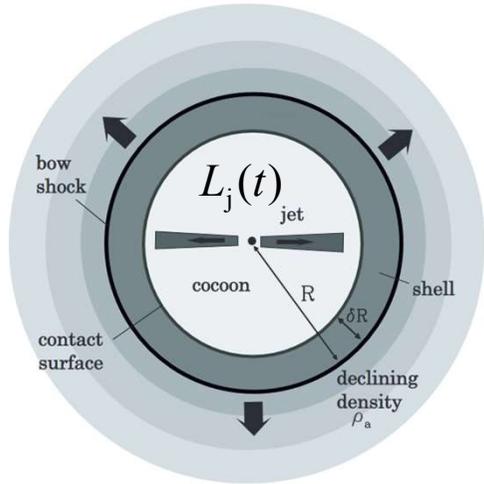
$$t_{\text{age}} = 12 - 15 \text{ yr}$$

# Evolution of AGN cocoon/shell

3C84 ミニコクーン (観測)



ココーン/シェルモデル



$$\rho_a(r) = \bar{\rho}_a \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha}$$

$$A_h(r) = \bar{A}_h \left( \frac{r}{r_0} \right)^\beta$$

$R, A_h,$   
 $v_h, t_{age}$

観測量

$L_j, \rho_a$

未知量



★ココーン形状：軸方向の運動量バランス

$$\rho_a(r) v_h^2(r) A_h(r) = \frac{L_j}{c} \Rightarrow \frac{L_j}{\rho_a(r)} = A_h(r) v_h^2(r) c$$

★ココーンの年齢

$$t_{age} = \frac{2r}{2 - \alpha + \beta} \left( \frac{L_j}{\rho_a(r) A_h(r) c} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

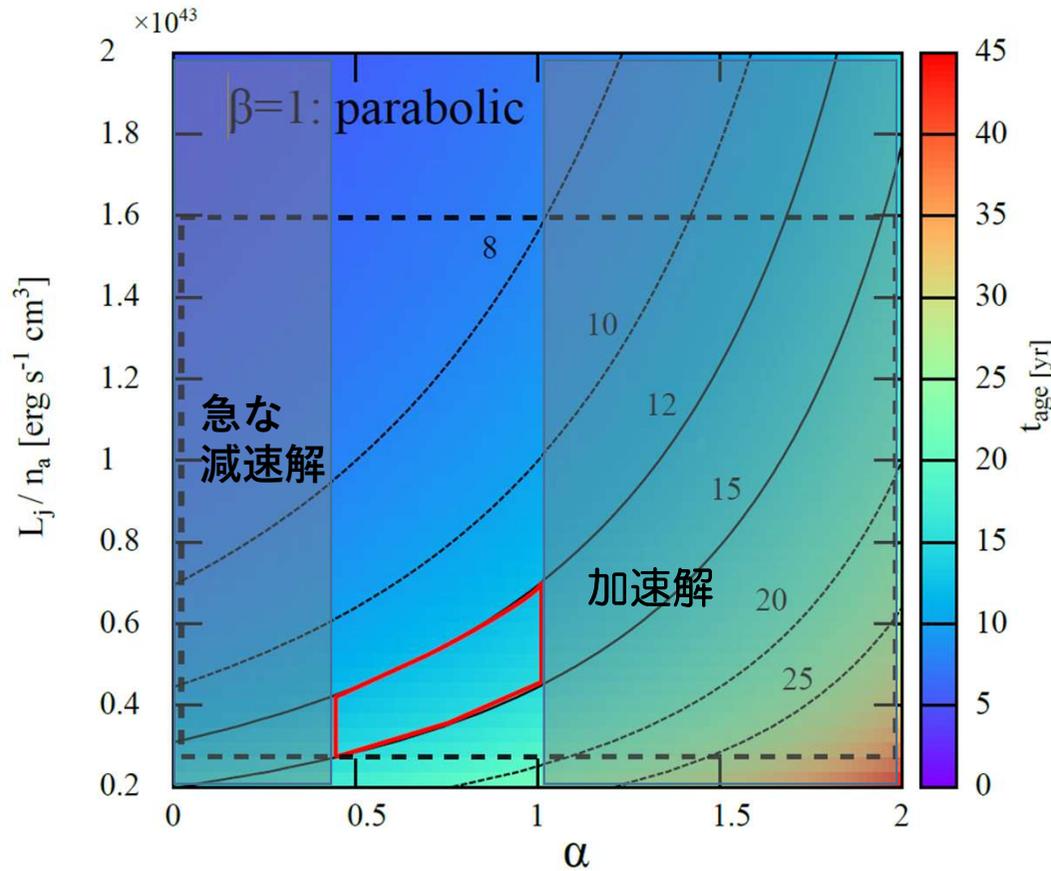
★ココーンの膨張速度  
ほぼ一定 (観測)

$$v_h(r) \propto r^{\frac{\alpha - \beta}{2}}$$

結果：ジェットパワーと周辺ガス密度の関係

$$A_h(r) = \bar{A}_h \left( \frac{r}{r_0} \right) \rightarrow r_h \propto r^{1/2}$$

【観測量： $A_h = 0.13 \text{pc}^2$ ,  $v_h = 0.2 - 0.55c$ ,  $t_{\text{age}} = 12 - 15 \text{yr}$ 】



### ★ジェットパワーと周辺ガス密度

- コクーンヘッドの形状のみ：黒点線枠

$$\frac{L_j}{n_a} = (0.3 - 1.6) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

- コクーンヘッドの形状+年齢+速度：赤線枠

$$\frac{L_j}{n_a} = (0.3 - 0.7) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

factor 2

### ★周辺ガス密度プロファイル

$$\alpha = 0.4 - 1$$

# Old 6pc コクーンと New 1pcコクーン

## ○6pcコクーン

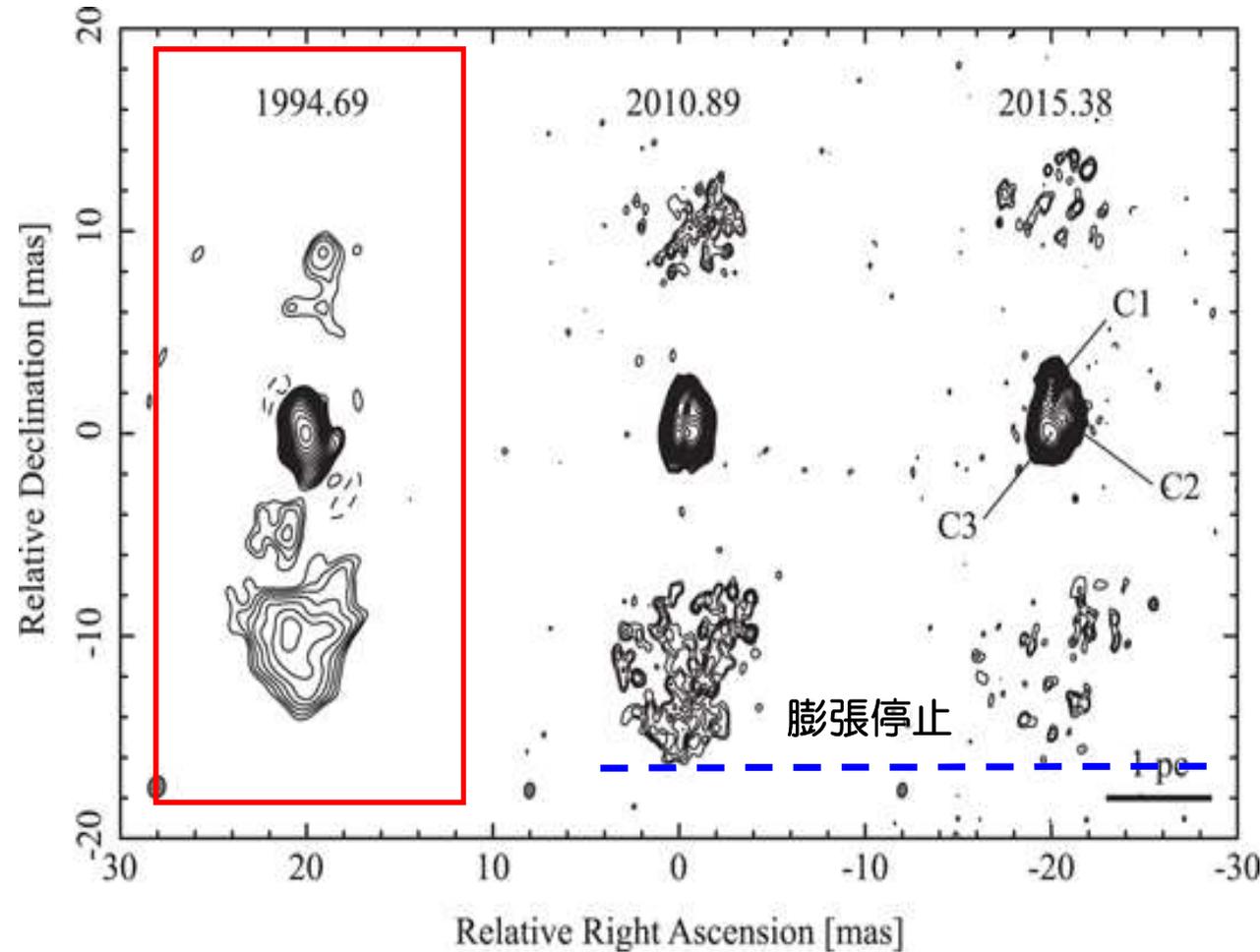
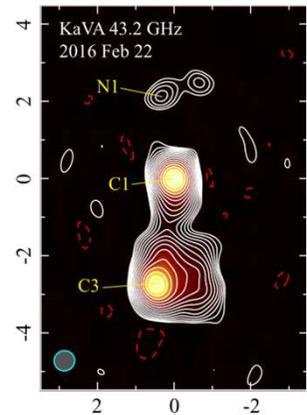
- ジェットパワーと周辺密度の比

$$\frac{L_j}{n_a} = (0.9 - 3.7) \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$$

- ジェット活動の停止  
(ローブの形状・フラックス低下)
- コクーン膨張の速度：**亜音速**  
(左のイメージより)

## ○1pcコクーン

- コクーン膨張の速度  
**超音速**



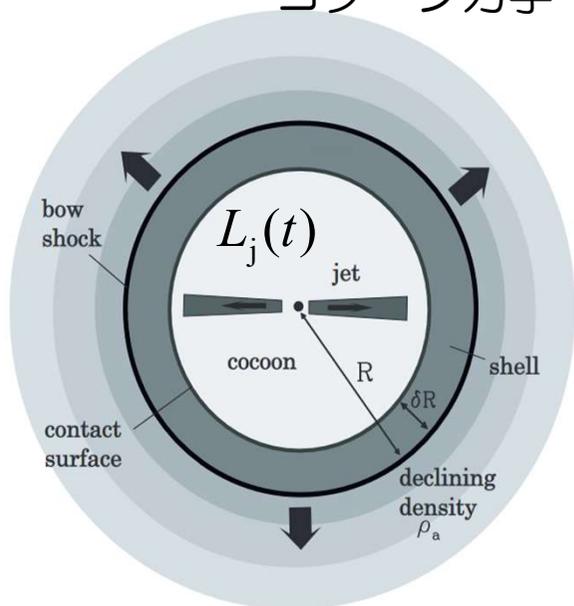
# シエルの膨張速度と周辺ガス密度プロファイル

(シエル：ジェット噴出停止後も伝搬速度をトレース)

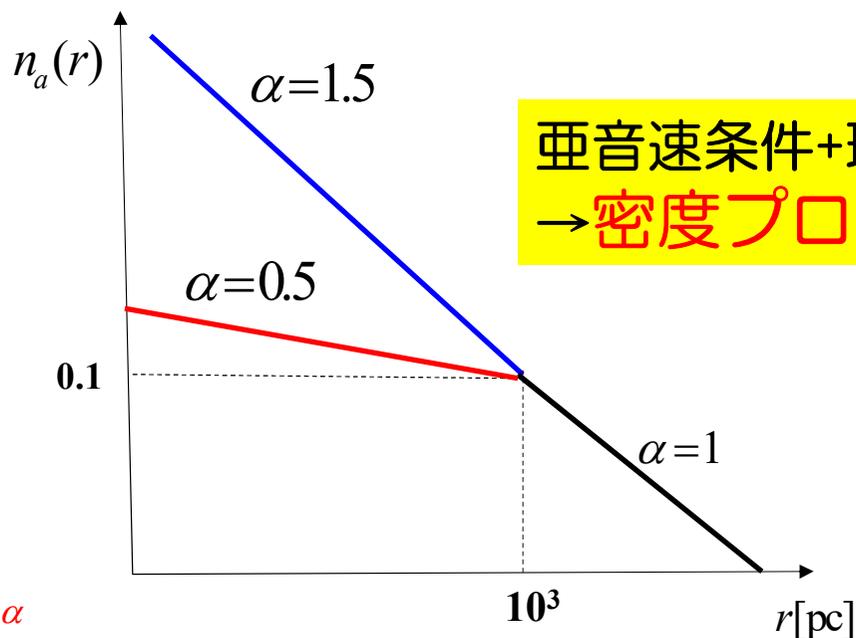
ジェット停止後 ( $t > t_j$ ) に**伝搬速度が亜音速になる条件** (cf. Ito et al. 2015)

$$\frac{L_j}{n_a} = 7.5 \times 10^{44} \times 10^{3\alpha-9} \left( \frac{R}{1\text{pc}} \right)^{3-\alpha} \left( \frac{t_j}{10^5\text{yr}} \right)^{-1}$$

コクーンカ学

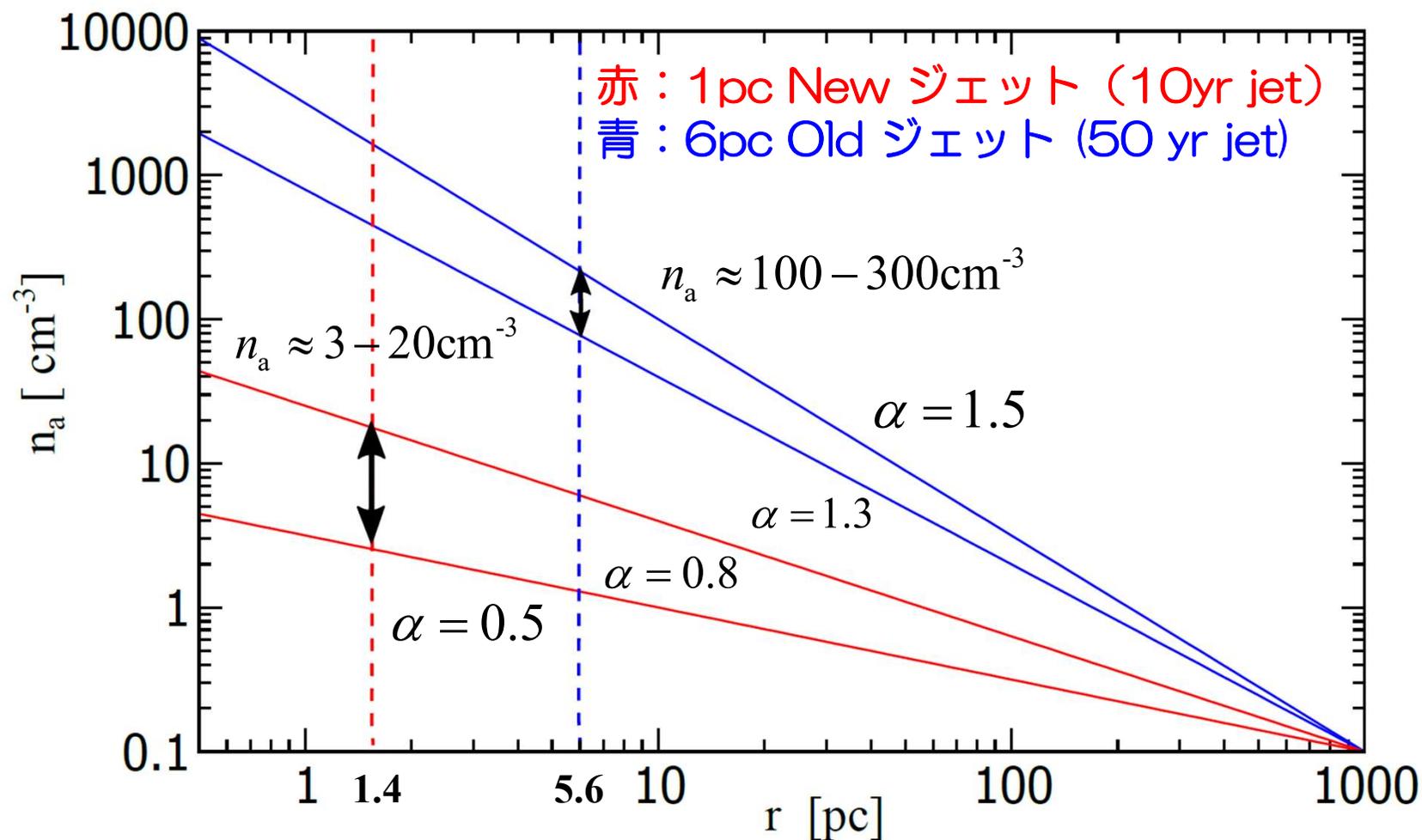


$$\rho_a(r) \propto r^{-\alpha}$$



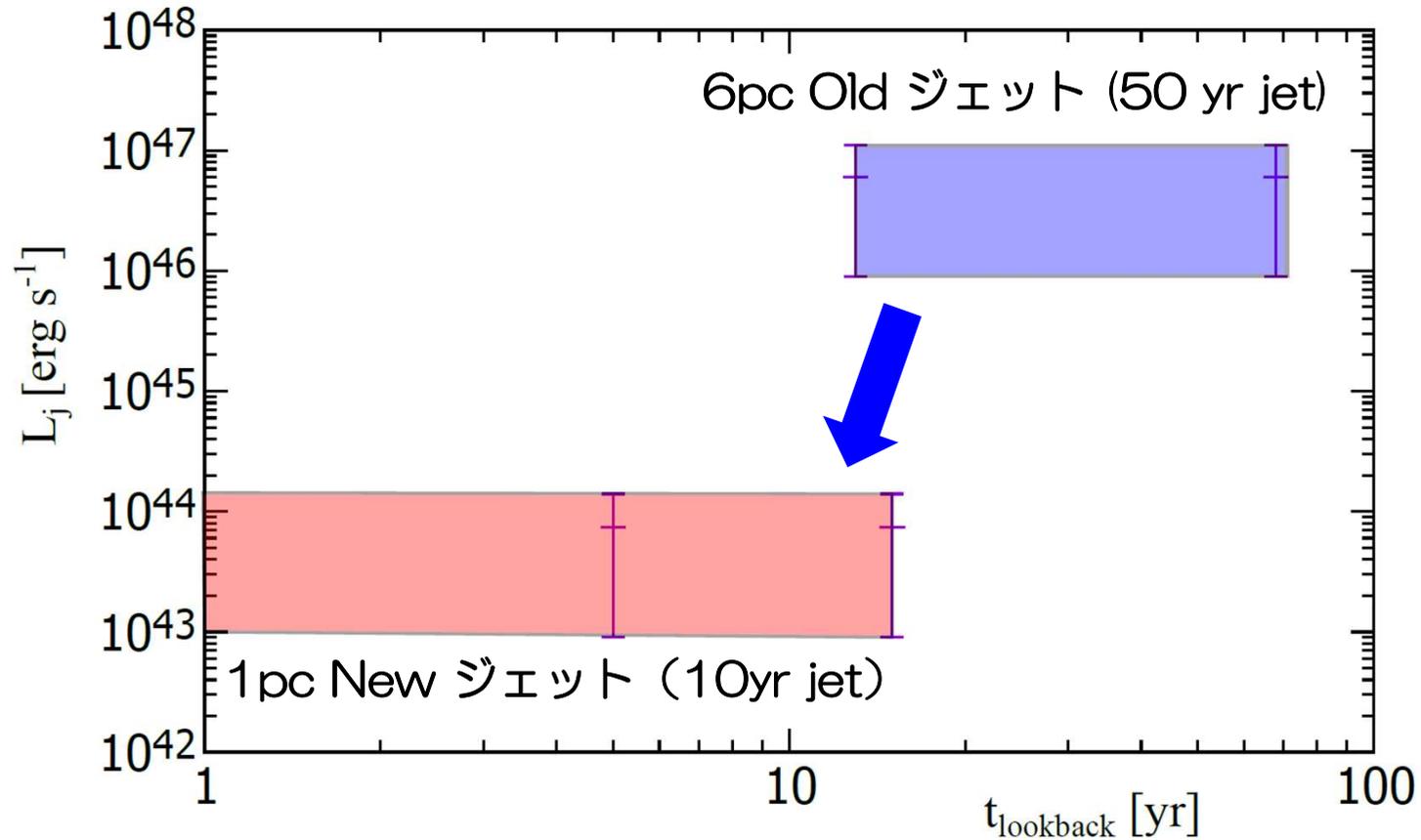
亜音速条件+理論・観測で既知の量  
→**密度プロファイル ( $\alpha$ ) に制限**

# 結果：ミニコクーン周辺の密度プロファイル



噴出時期の異なる2つのジェット：密度が大きく異なる環境を伝播

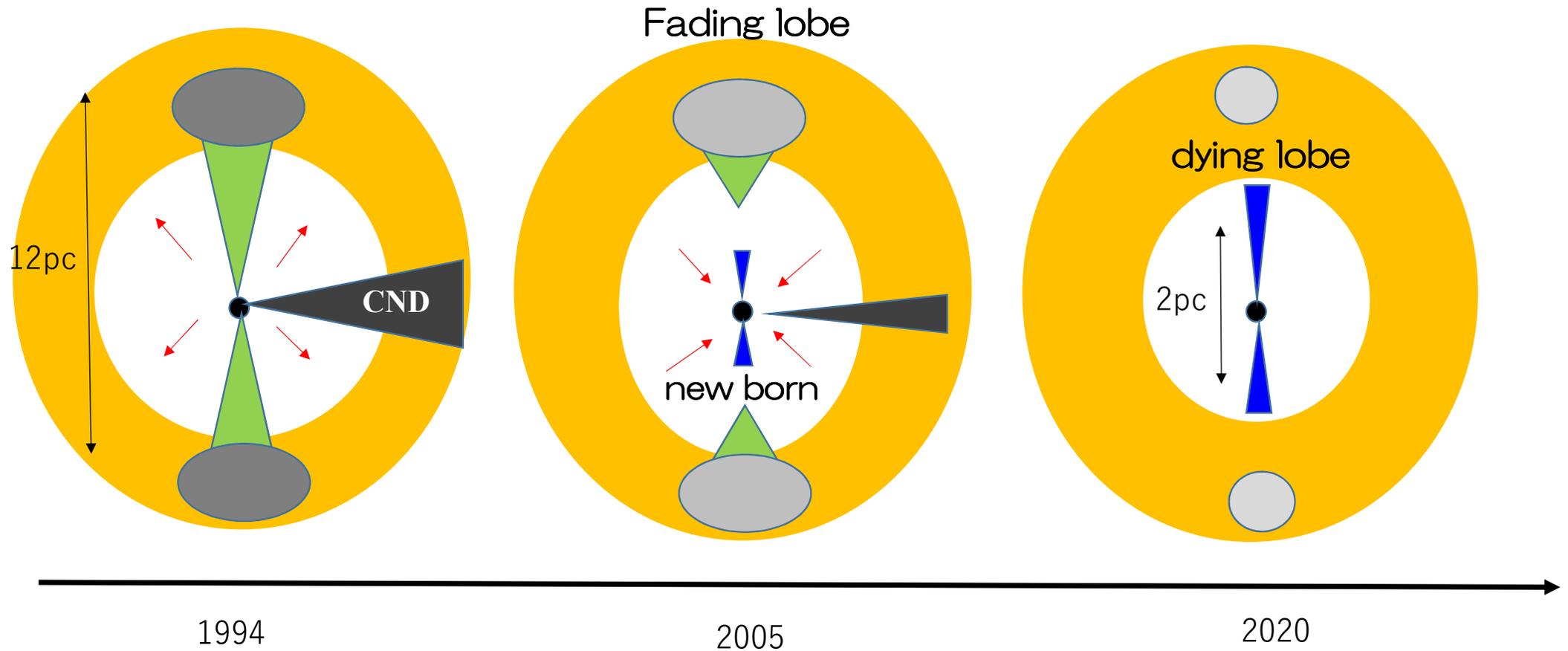
# 結果：3C84ジェットの状態の歴史 $L_j(t)$



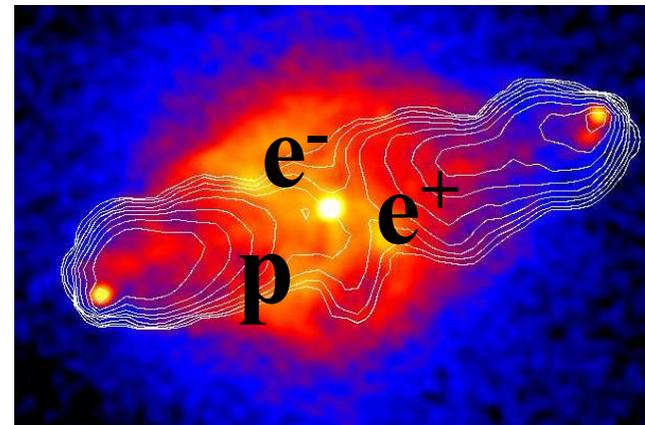
周辺密度が1桁下がり、ジェットパワーは2-3桁下がった  
(ジェットパワーは一定でない)

# 議論：3C 84ジェットと周辺環境

6pcコクーンが周辺ガスを押し出し、密度の低いcavity形成  
→低密度環境で新しいジェット活動開始、ジェット伝播して1pcコクーン形成



## ジェット組成への制限



$$P_c = \underbrace{P_-^T + P_+^T + P_p^T}_{\text{熱的成分}} + \underbrace{P_-^{\text{NT}} + P_+^{\text{NT}} + P_p^{\text{NT}}}_{\text{非熱的成分}}$$

$$P_c = \frac{L_j t_{\text{age}}}{2V}$$

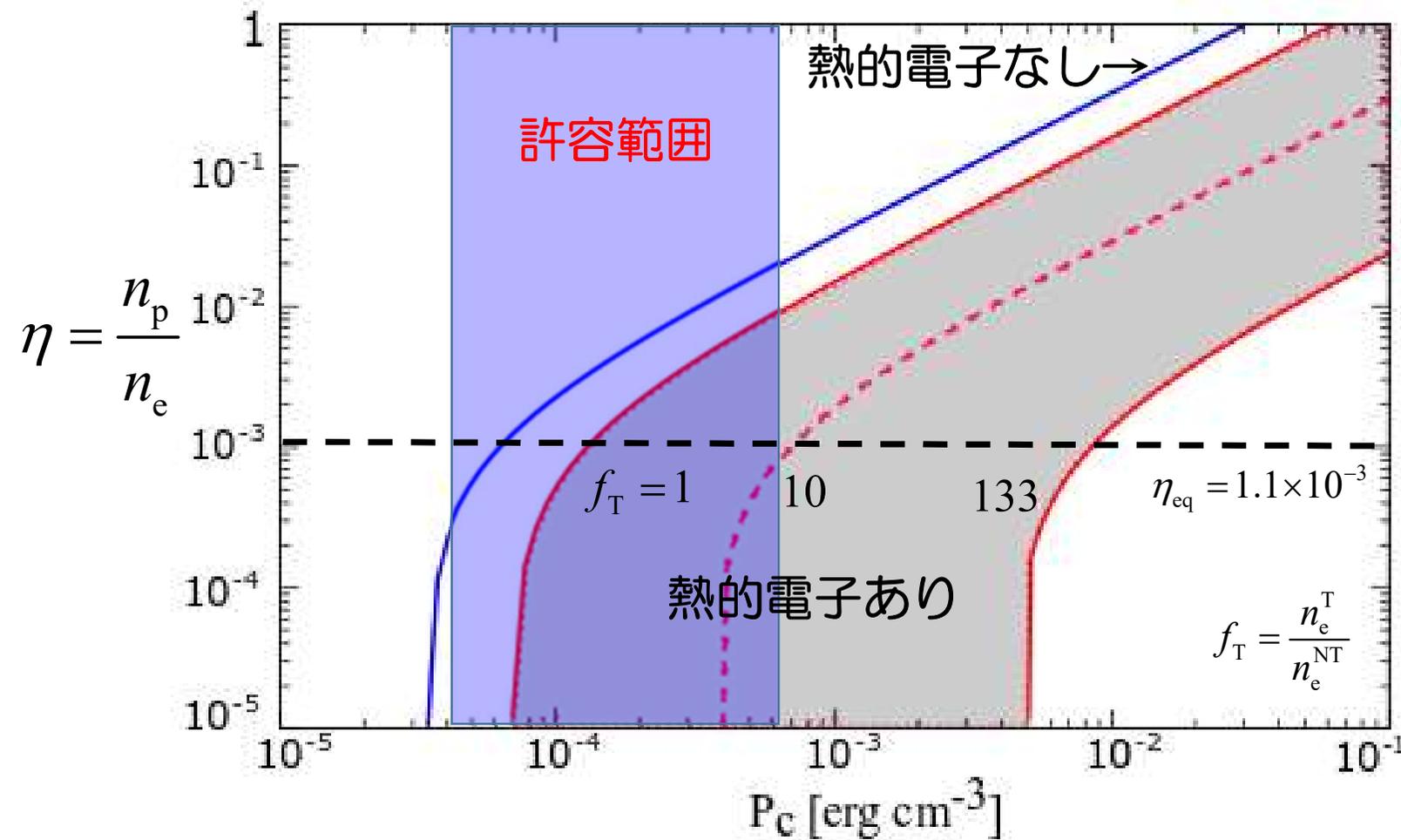
1. コクーンの全圧力  $P_c$  の決定: コクーン膨張力学
2. 1 粒子 (電子、陽電子、陽子) の平均エネルギーを評価
3. 電子の個数密度を制限する。  
コクーン非熱的放射 (下限)、熱的制動放射の未検出 (上限)
4. 状態方程式より、  
「陽子と電子の個数密度比」と「コクーン圧力」との関係

$$\eta = \frac{n_p}{n_e} \quad P_c$$

# 3C84 1 pc ジェットの組成

preliminary

$$L_j(R = 1.4 \text{ pc}) = (0.9 - 14) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$$



膨大な陽電子の混入が必要！

$$\eta = \frac{n_p}{n_e} < 10^{-2}$$

## まとめ

コクーン・シェル動力学を用いて、3C84のコンパクトジェットの詳細な活動性の歴史と組成を調べた、

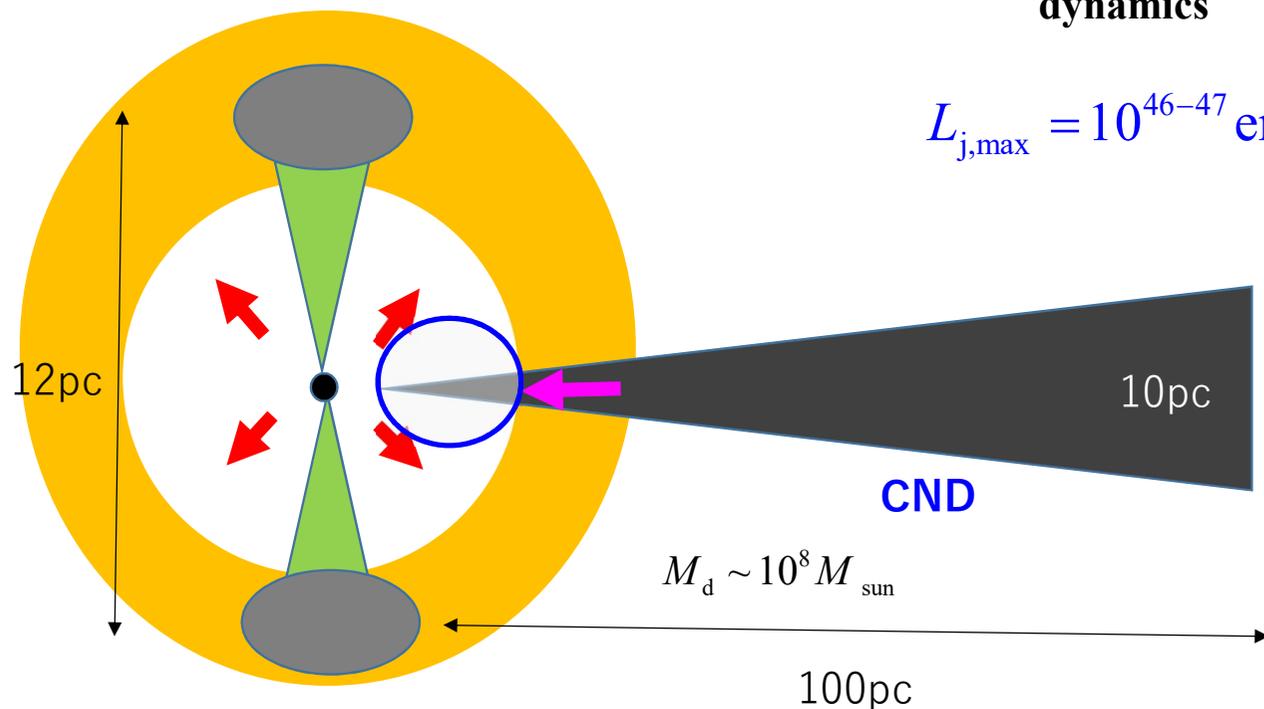
- コクーン形状・年齢・膨張速度 →  $L_j/n_a$  の精密測定
- コクーン膨張速度 vs 音速 → 周辺密度に制限  
Old jet (6 pc):  $n_a \approx 100 - 300 \text{ cm}^{-3}$       New jet (1 pc):  $n_a \approx 3 - 20 \text{ cm}^{-3}$
- ジェットパワーは一定でなく、数10yrで約3桁下がったことを示唆  
*AGN jet driven FBでBHへの降着が阻害されたか？*
- ジェット組成  
陽子と電子の個数密度比  $< 10^{-2} \Rightarrow$  膨大な量の陽電子の混入が必要

Backup slides

# Mini-cocoonによるFeedback (CNDに対する)

$$\left\{ \begin{aligned} F_{d,g} &= \frac{GM_d M_{\text{BH}}}{r_d^2} \\ F_{d,\text{out}} &= \dot{P} \left( \frac{h_d}{r_d} \right) \sim \frac{L_j}{c} \left( \frac{h_d}{r_d} \right) \end{aligned} \right. \Rightarrow \frac{F_{d,\text{out}}}{F_{d,g}} \sim 0.1 \left( \frac{L_j}{10^{46} \text{ erg/s}} \right) \left( \frac{h_d}{10 \text{ pc}} \right) \left( \frac{r_d}{100 \text{ pc}} \right) \left( \frac{M_d}{10^8 M_{\text{sun}}} \right)^{-1} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_{\text{sun}}} \right)^{-1}$$

不明な物理量
cocoon dynamics
観測量

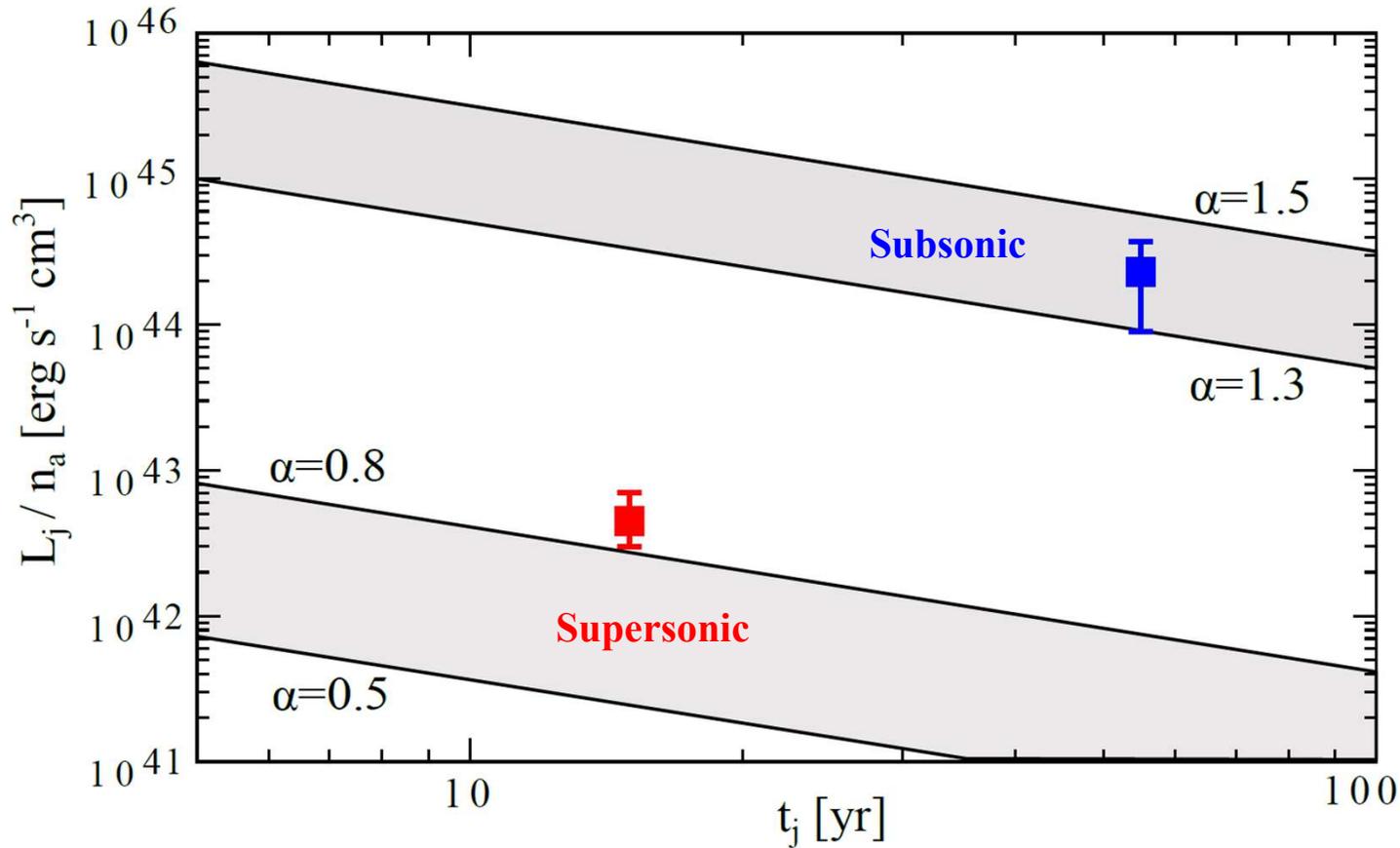


$$L_{j,\text{max}} = 10^{46-47} \text{ erg s}^{-1}, h_d > 10 \text{ pc} \Rightarrow \frac{F_{d,\text{out}}}{F_{d,g}} \sim O(1)$$

AGN jet driven feedback  
 $\Rightarrow$  SMBHへの降着を阻害か。  
**CNDに観測的な兆候は？**

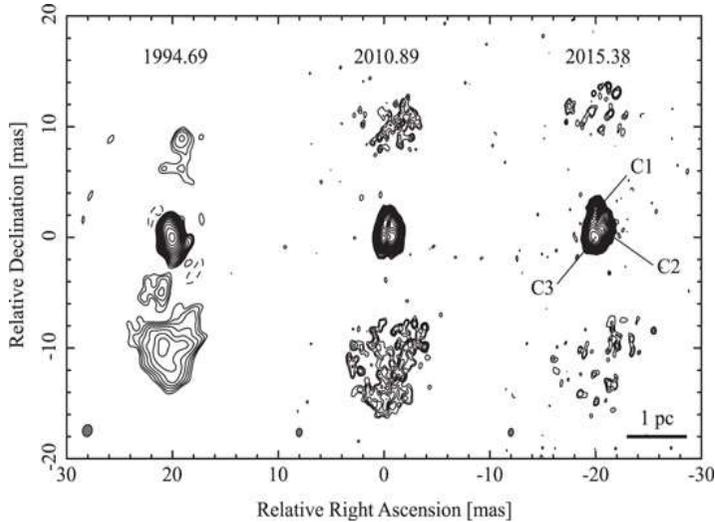
Strong FB後にHI吸収を観測したので  
 未検出？ (Morganti+2023)

## 結果：AGN シェル速度 vs 音速



- 1.4 pc コクーン：  $t_j \sim t_{\text{age}} = 15 \text{ yr}$  supersonic  $\Rightarrow 0.5 < \alpha < 0.8$
- 5.6 pc コクーン：  $t_j \leq t_{\text{age}} = 55 \text{ yr}$  subsonic  $\Rightarrow 1.3 < \alpha < 1.5$

# Old cocoon (6pc-scale jet 起源) の性質



## Old cocoon内の密度 (Kino+2007)

$$\rho_c \approx \left(\frac{v_h}{c}\right)^2 \Gamma_j \rho_a (LS = 5.6 \text{ pc}) \tilde{A} \quad \left( \because \tilde{A} = \frac{2A_h v_j t}{V_c} \sim 0.3 - 0.4 \right)$$

$$\Rightarrow \frac{n_c}{n_a} \sim \left(\frac{v_h}{c}\right)^2 \Gamma_j \tilde{A} \sim 10^{-2} \quad \text{密度変化予想とほぼ一致}$$

Old cocoonの圧力：dying phaseのコクーンサイズ  $R_c = 9.3 - 16.6 \text{ pc}$  (Kino+2017)  
 (注：Active phaseより大きくなっている)

$$\frac{P_{c,old}}{P_{c,new}} \sim 0.1 - 0.5 \quad \left( \because P_c = \frac{L_j t_{age}}{4V_c} \right) \quad \text{コクーン力学と観測量で評価可能}$$

高圧のOld cocoonの中をnew jetが伝播

→3C84 サブパーセクジェットのコリメーションにも寄与している可能性あり