

活動銀河核ジェットが駆動する シェルからのシンクロトロン放射 から探る衝撃波の電子加速

早稲田大学 伊藤 裕貴

共同研究者

紀 基樹 国立天文台

川勝 望 国立天文台

山田 章一 早稲田大学

アウトライン

1. イントロダクション

- ・シェルの概要・観測

2. 本研究

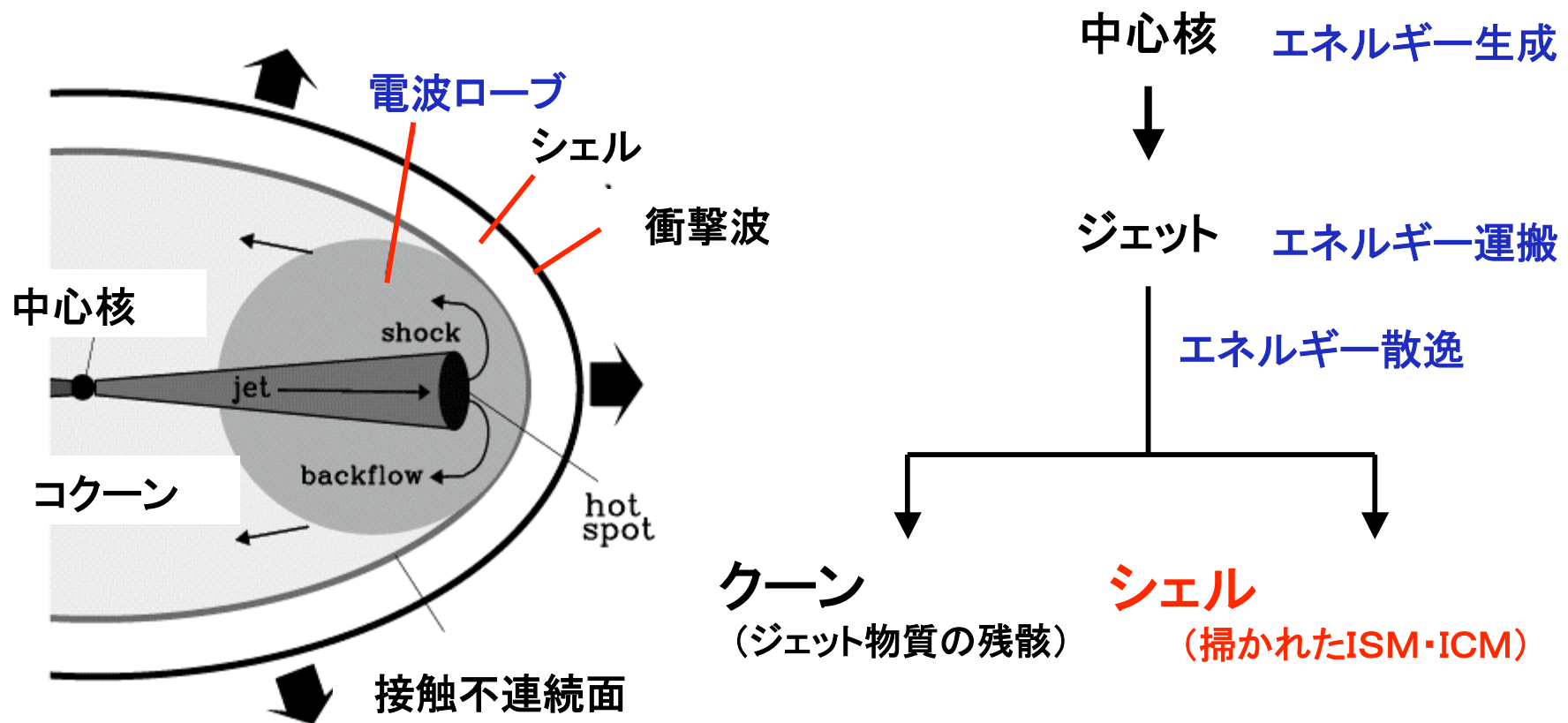
- ・シェルのダイナミクス

- ・シェルからのシンクロトロン放射

3. まとめ

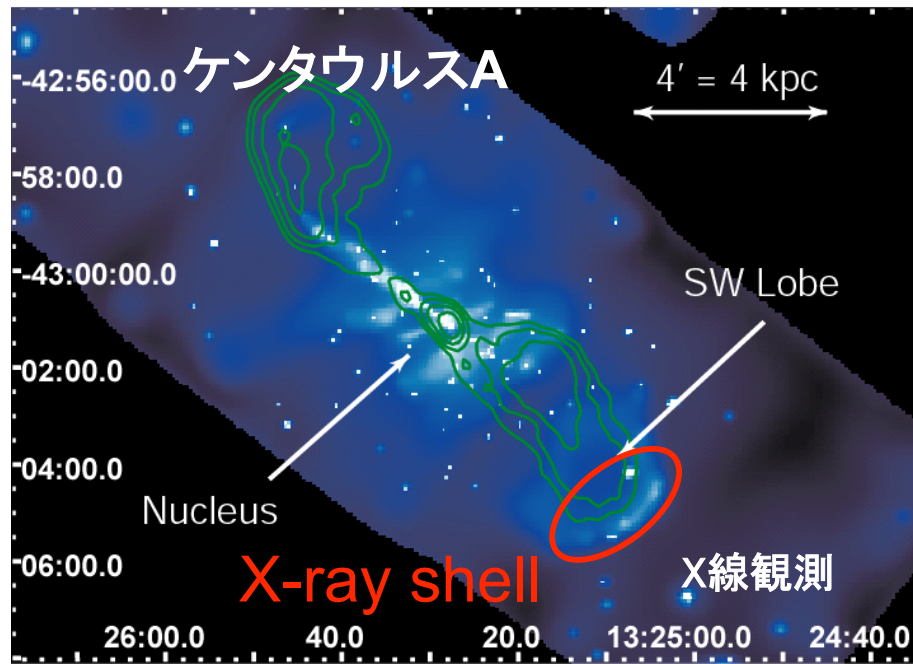
1. イントロダクション

活動銀河核 (AGN) ジェットと周辺物質の相互作用



シェルの観測

星間物質 (ISM) への衝撃波



(Kraft et al. 2003,2007)

X線観測

NGC3801 (Croston et al. 2007)

Centaurus A (Kraft et al. 2003,2007)

シンクロトン起源と思われる
非熱的成分も受かっている

Croston et al.(2009)



超新星残骸と同様に粒子加速を
起こしている

衝撃波における電子加速の情報を観測から引き出せる

2. 本研究

シェル内のシンクロトン放射スペクトルの進化を評価

加速効率を特徴づけるパラメーター

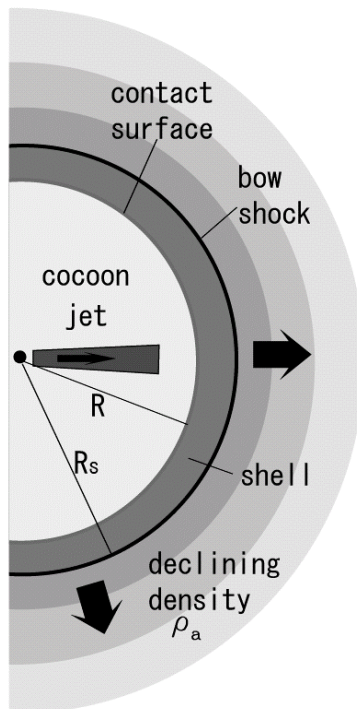
$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_e : \text{エネルギーの転換効率} \\ \xi \sim (B/\delta B)^2 : \text{加速電子の平均自由行程を決める量} \end{array} \right.$
--

スペクトルがどのようにこれらのパラメーターに依存するか

→ 観測との比較で加速効率を制限

手法

シェル膨張のダイナミクスに基づき、
シェル内の物理量の時間発展を求める



ϵ_e ξ を元に

加速電子の分布関数を求める

シンクロトン放射スペクトル

シェル膨張のダイナミクス

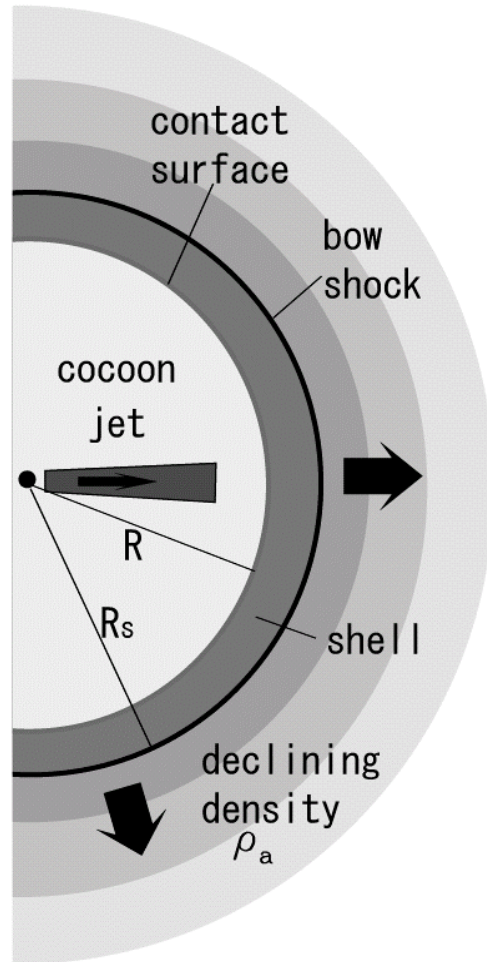
仮定

- ・球対称膨張
- ・シェルの厚みは小さい ($R_s \sim R$)
- ・周辺物質の分布 $\rho_a(r) = \rho_0(r/r_0)^{-\alpha}$

基礎方程式

$$\frac{d}{dt} (M_s \dot{R}) = 4\pi R^2 P_c \quad : \text{運動方程式}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_c(t) V_c(t)}{\hat{\gamma}_c - 1} \right) + P_c(t) \frac{dV_c(t)}{dt} = 2L_j : \text{エネルギー方程式}$$



L_j : ジェットのパワー	P_c : コクーンの圧力
R : シェルの半径	M_s : シェルの質量
$\hat{\gamma}_c$: 比熱比	$\dot{R}$: 膨張速度

シェル膨張のダイナミクス

仮定

- ・球対称膨張
- ・シェルの厚みは小さい ($R_s \sim R$)
- ・周辺物質の分布 $\rho_a(r) = \rho_0(r/r_0)^{-\alpha}$

シェルの膨張則

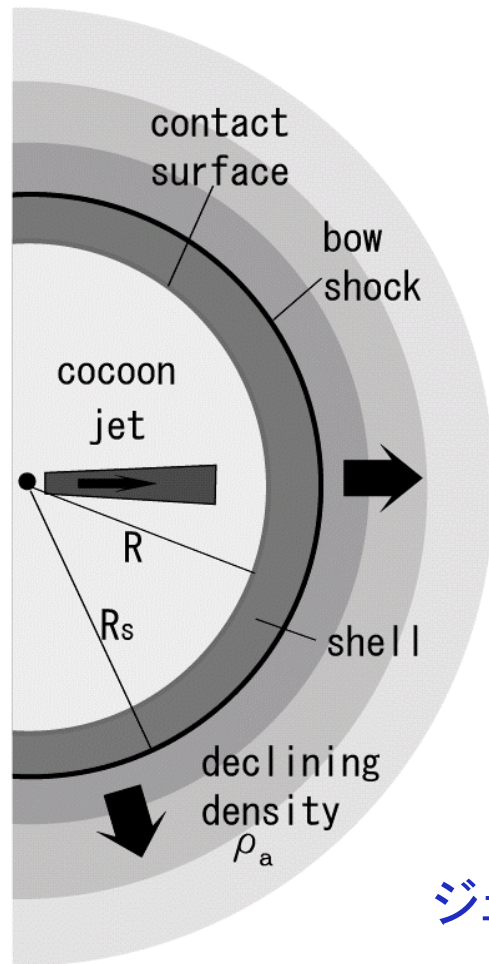
$$R(t) = C_R r_0^{\alpha/(\alpha-5)} \left(\frac{L_j}{\rho_0} \right)^{1/(5-\alpha)} t^{3/(5-\alpha)}$$

強い衝撃波のランキン=ユゴニオの関係式

➡ シェルの内部エネルギー

$$E_s = f L_j t \simeq 0.1 L_j t$$

ジェットが運んできたエネルギーの約10%がシェルに転化



$$C_R = \left[\frac{(3-\alpha)(5-\alpha)^3(\hat{\gamma}_c - 1)}{4\pi\{2\alpha^2 + (1-18\hat{\gamma}_c)\alpha + 63\hat{\gamma}_c - 28\}} \right]^{1/(5-\alpha)} \quad f = \frac{18(\hat{\gamma}_c - 1)(5-\alpha)}{(\hat{\gamma}_a + 1)^2[2\alpha^2 + (1-18\hat{\gamma}_c)\alpha + 63\hat{\gamma}_c - 28]}$$

非熱的電子のエネルギー分布

放射冷却が効かない

$$\gamma_{\max} < \gamma_{\text{br}}$$

$$\longrightarrow N(\gamma_e) = K\gamma_e^{-2}$$

放射冷却が効く

$$\gamma_{\max} > \gamma_{\text{br}}$$

$$\longrightarrow N(\gamma_e) = \begin{cases} K\gamma_e^{-2} & (\gamma_{\min} < \gamma_e < \gamma_{\text{br}}) \\ K\gamma_{\text{br}}(\gamma_e/\gamma_{\text{br}})^{-3} & (\gamma_{\text{br}} < \gamma_e < \gamma_{\max}) \end{cases}$$

加速電子の最大のローレンツ因子

$$\gamma_{\max} = \min(\gamma_{\max 1}, \gamma_{\max 2})$$

年齢による制限

$$t_{\text{acc}} = t$$

$$\longrightarrow \gamma_{\max 1} = \frac{3eB\dot{R}^2}{20\xi m_e c^3} t \propto t^{(1+\alpha)/(5-\alpha)}$$

放射冷却による制限

$$t_{\text{acc}} = t_{\text{syn}}$$

$$\longrightarrow \gamma_{\max 2} = \left[\frac{9\pi e}{10B\sigma_T \xi} \right]^{1/2} \frac{\dot{R}}{c} \propto t^{(\alpha-2)/(5-\alpha)}$$

ブレイクのローレンツ因子

$$t = t_{\text{syn}}$$

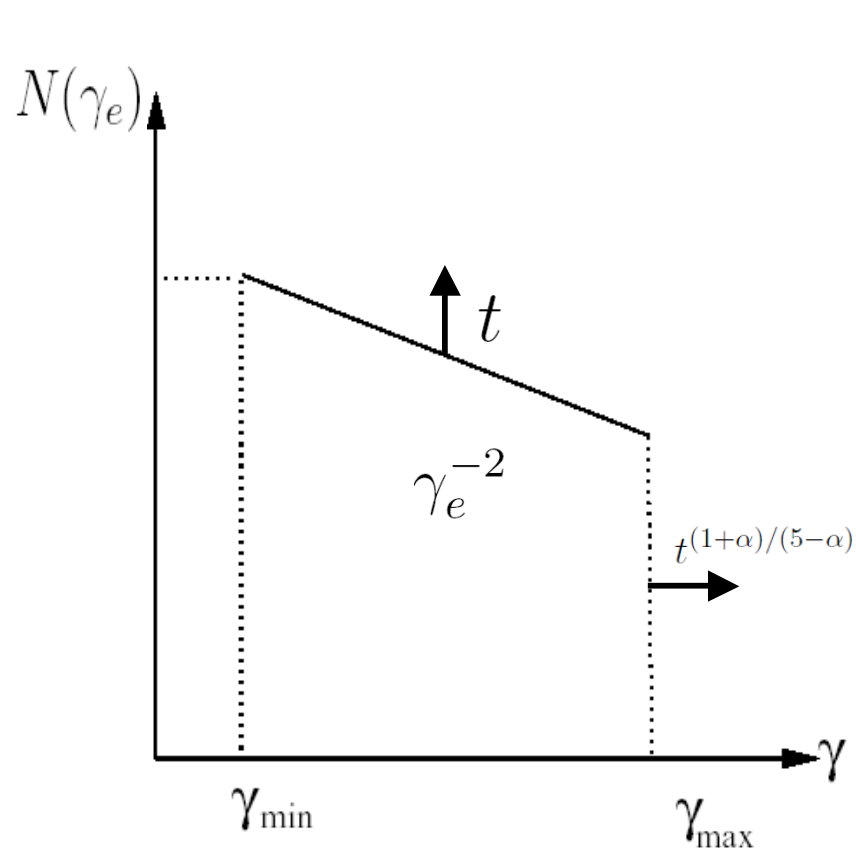
$$\longrightarrow \gamma_{\text{br}} = \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T B^2 t} \propto t^{-1}$$

全エネルギー

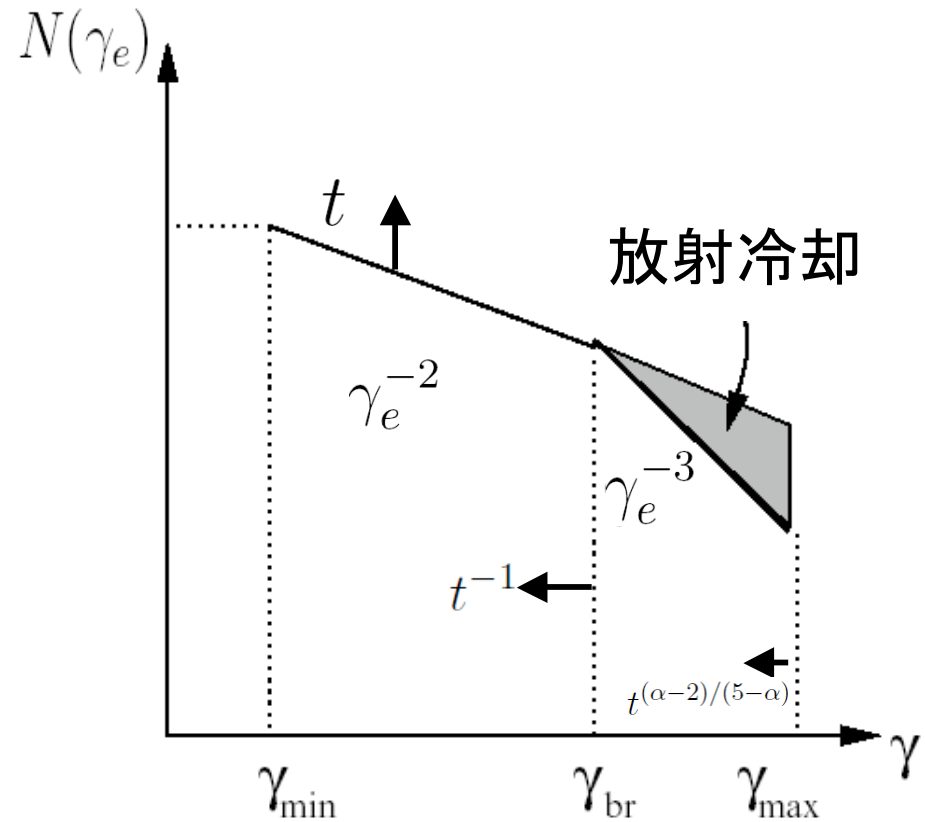
$$E^{\text{NT}} = \underline{\epsilon}_e E_s \quad E^{\text{NT}} = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} (\gamma_e - 1) m_e c^2 N(\gamma_e) d\gamma_e \approx K m_e c^2 \ln \gamma_{\max}$$

非熱的電子の分布の時間進化

一様磁場を仮定



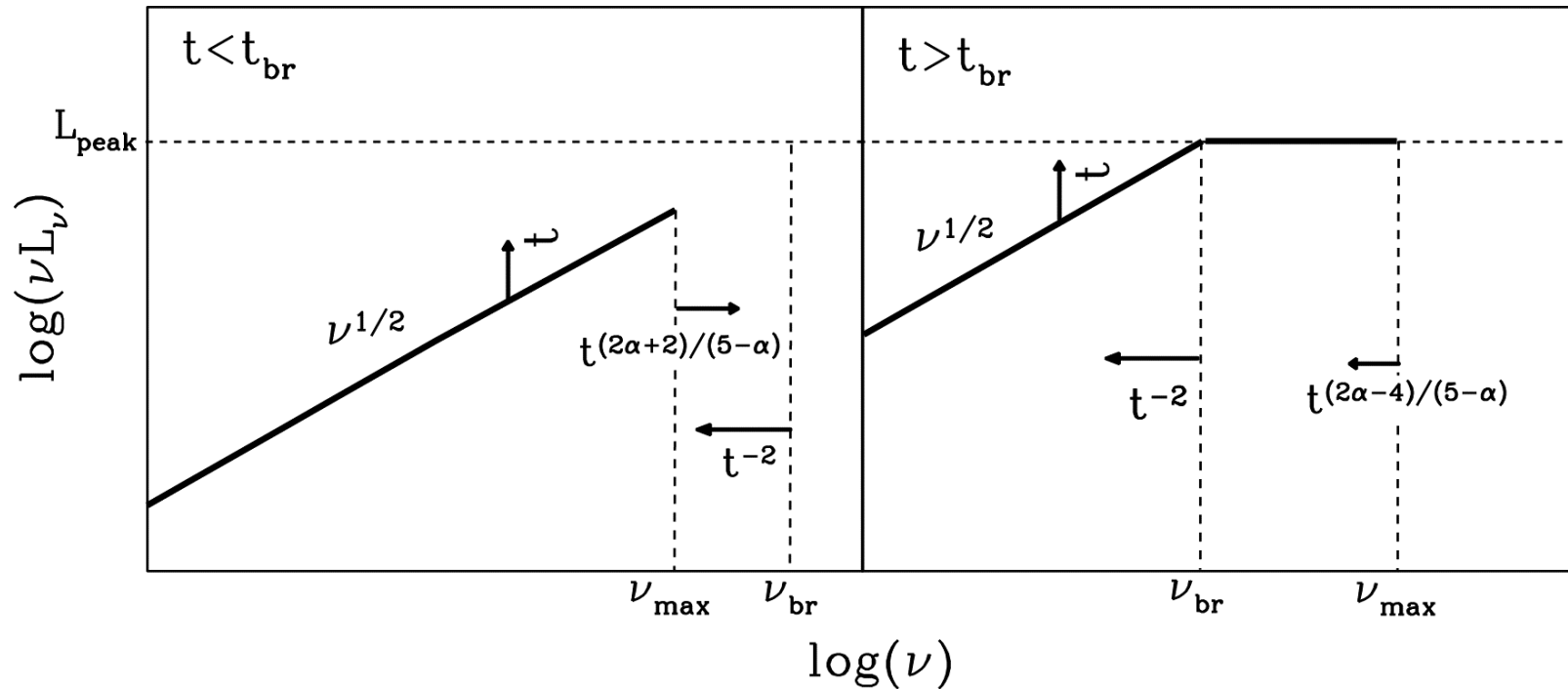
初期は冷却が効かない



高エネルギー側の粒子数は変化しない

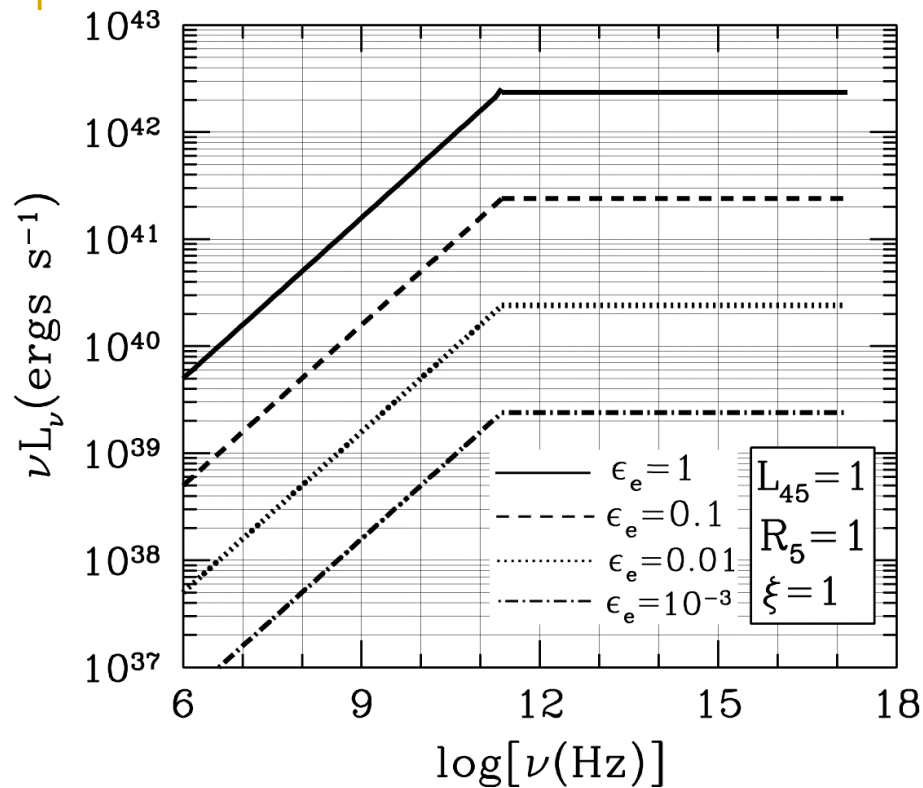
初期 $\longrightarrow$ 冷却が重要

シンクロトロンスペクトルの時間進化



- ・年齢が古い(サイズが大きい)ほどシェルの光度は上がる
- ・高波長域の光度は放射冷却の影響で一定になる

光度スペクトル



$$L_{\text{peak}} \approx 2.4 \times 10^{42} \epsilon_e L_{45} \text{ ergs s}^{-1}$$

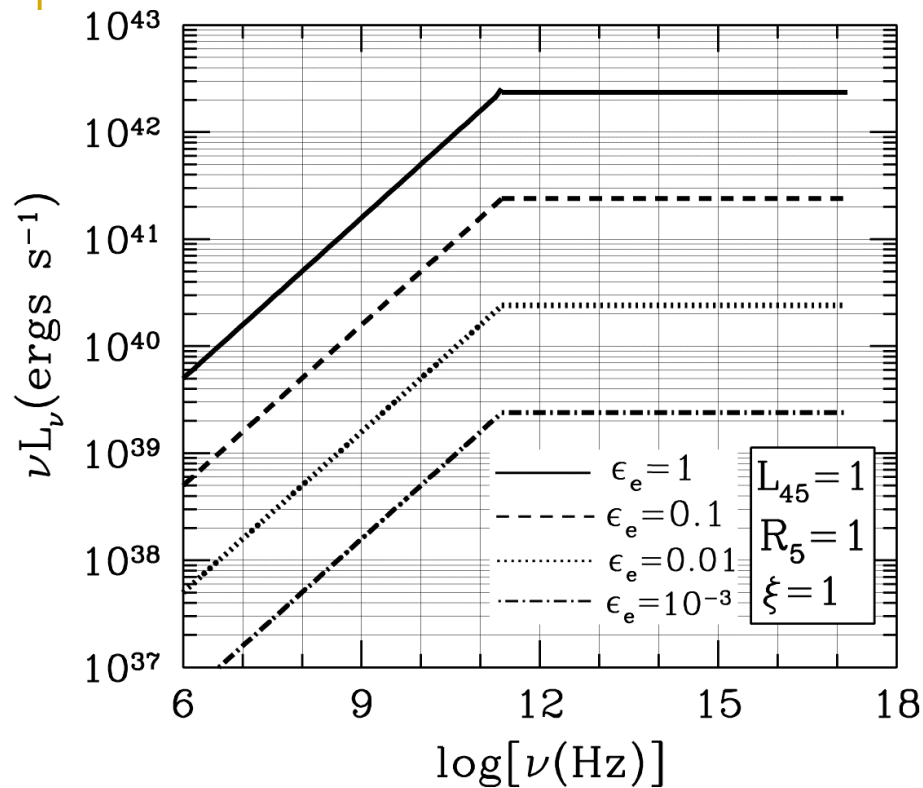
$$\nu_{\text{max}} \approx 1.5 \times 10^{17} \xi^{-1} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-1/3} \text{ Hz}$$

$$\nu_{\text{br}} \approx 2.3 \times 10^{11} B_{-5}^{-3} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-7/3} \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} L_{45} &= L_j / 10^{45} \text{ ergs s}^{-1} & \rho_{0.1} &= \rho_0 / 0.1 m_{\text{H}} \text{ cm}^{-3} \\ R_5 &= R / 5 \text{ kpc} & B_{-5} &= B / 10 \mu\text{G} \end{aligned}$$

- ・最大光度は ϵ_e と L_j に線型に比例する
- ・カットオフの振動数はボーム極限 $\xi = 1$ においてはX線まで達する

光度スペクトル



$$L_{\text{peak}} \approx 2.4 \times 10^{42} \epsilon_e L_{45} \text{ ergs s}^{-1}$$

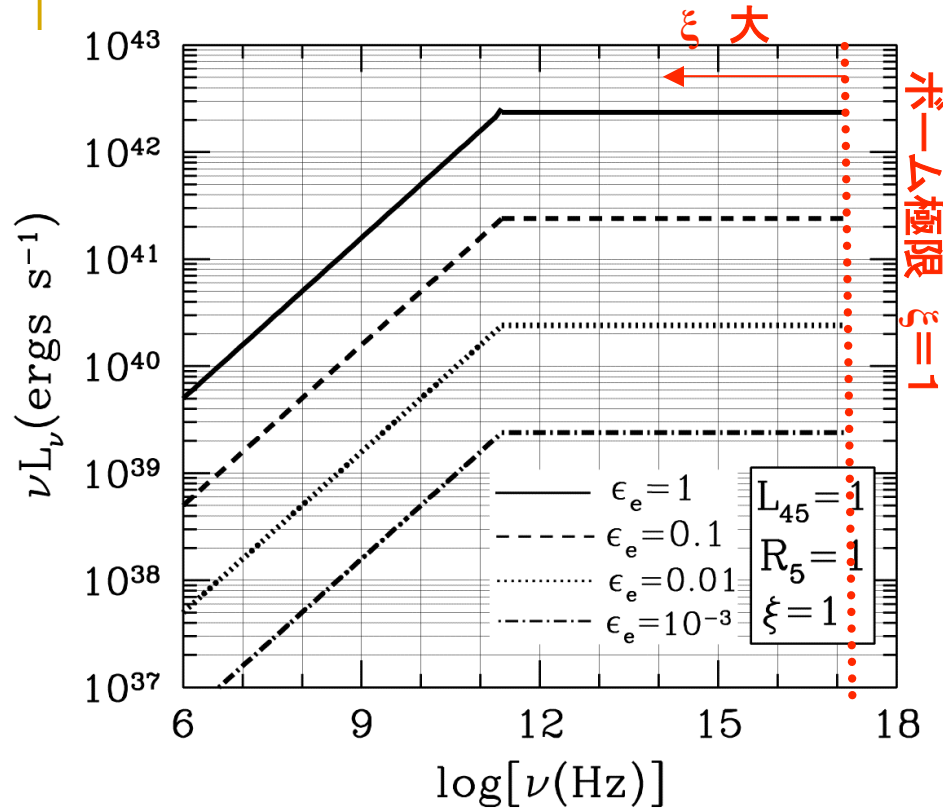
$$\nu_{\text{max}} \approx 1.5 \times 10^{17} \xi^{-1} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-1/3} \text{ Hz}$$

$$\nu_{\text{br}} \approx 2.3 \times 10^{11} B_{-5}^{-3} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-7/3} \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} L_{45} &= L_j / 10^{45} \text{ ergs s}^{-1} & \rho_{0.1} &= \rho_0 / 0.1 m_{\text{H}} \text{ cm}^{-3} \\ R_5 &= R / 5 \text{ kpc} & B_{-5} &= B / 10 \mu\text{G} \end{aligned}$$

- ・最大光度は ϵ_e と L_j に線型に比例する
- ・カットオフの振動数はボーム極限 $\xi = 1$ においてはX線まで達する

光度スペクトル



$$L_{\text{peak}} \approx 2.4 \times 10^{42} \epsilon_e L_{45} \text{ ergs s}^{-1}$$

$$\nu_{\text{max}} \approx 1.5 \times 10^{17} \xi^{-1} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-1/3} \text{ Hz}$$

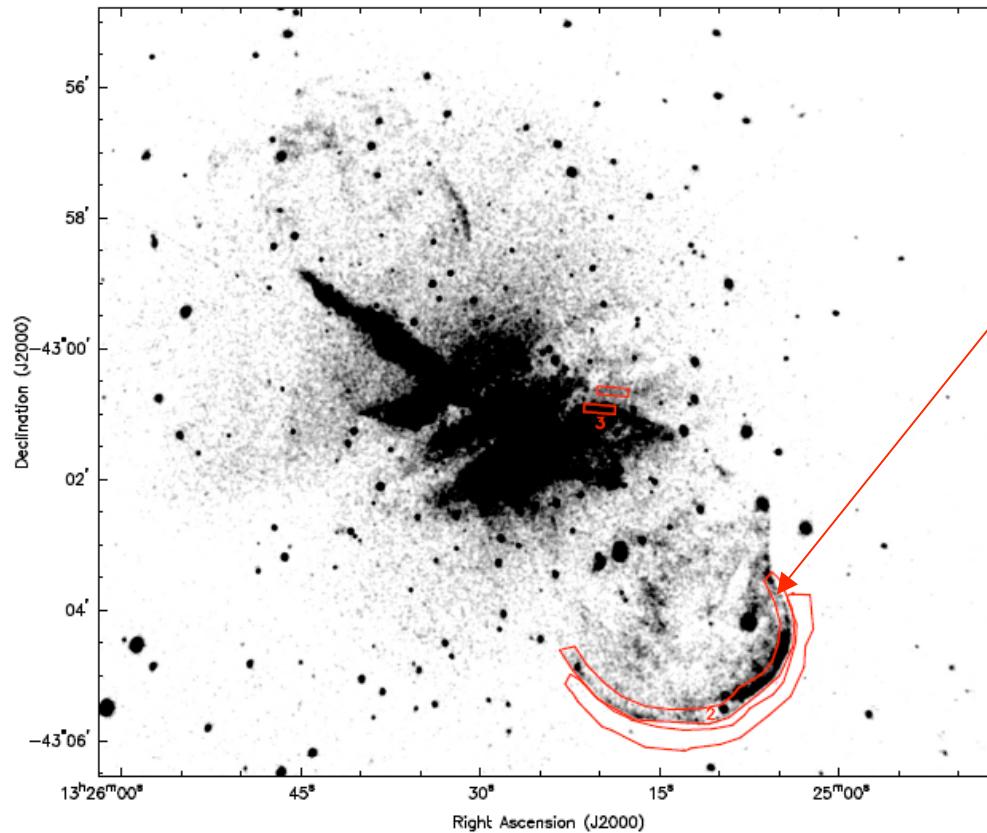
$$\nu_{\text{br}} \approx 2.3 \times 10^{11} B_{-5}^{-3} r_{\text{kpc}}^{-1} \rho_{0.1}^{-2/3} L_{45}^{2/3} R_5^{-7/3} \text{ Hz}$$

$$L_{45} = L_j / 10^{45} \text{ ergs s}^{-1} \quad \rho_{0.1} = \rho_0 / 0.1 m_{\text{H}} \text{ cm}^{-3}$$

$$R_5 = R / 5 \text{ kpc} \quad B_{-5} = B / 10 \mu\text{G}$$

- ・最大光度は ϵ_e と L_j に線型に比例する
- ・カットオフの振動数はボーム極限 $\xi = 1$ においてはX線まで達する

Centaurus A



Photon index ($h\nu \sim 0.4\text{--}3.0\text{keV}$)

$$\Gamma \sim 2.00^{+0.15}_{-0.06}$$

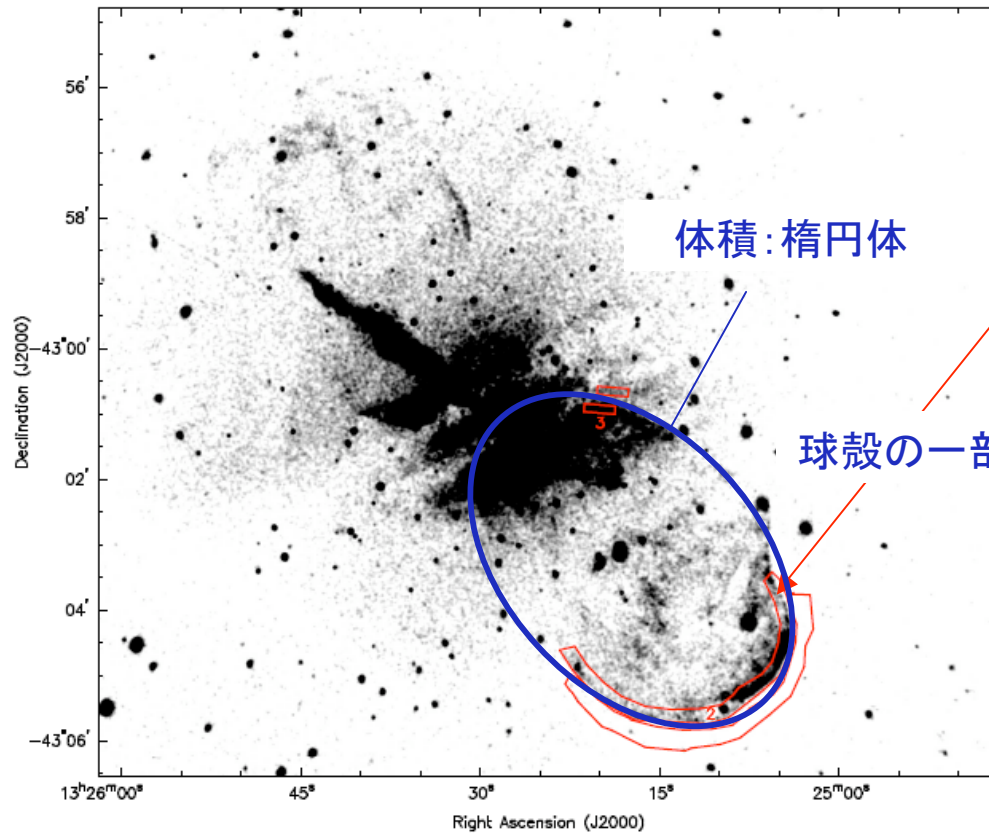
ブレイク振動数より上の波長のベキと一致

Luminosity

$$\sim 2 \times 10^{39} \text{erg s}^{-1}$$

Croston et al. (2009)

Centaurus A



Croston et al. (2009)

Photon index ($h\nu \sim 0.4-3.0 \text{ keV}$)

$$\Gamma \sim 2.00^{+0.15}_{-0.06}$$

ブレイク振動数より上の波長のベキと一致

Luminosity

$$\sim 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$$



$$L_j \sim 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$$

$\xi \sim 1$ Bohm 極限

$$\epsilon_e \sim 0.1 - 0.01$$

3. まとめ

ダイナミクスに基づき、シェル内の非熱的電子からの
シンクロトロン放射を評価した

- ・年齢と共に明るくなり、明るさは加速効率に比例
- ・高波長域の光度は放射冷却の影響で一定になる
- ・Bohm極限ではX線までスペクトルがのびる

観測との比較により、 ξ や ϵ_e を制限できる

→ **衝撃波加速効率への重要な示唆**

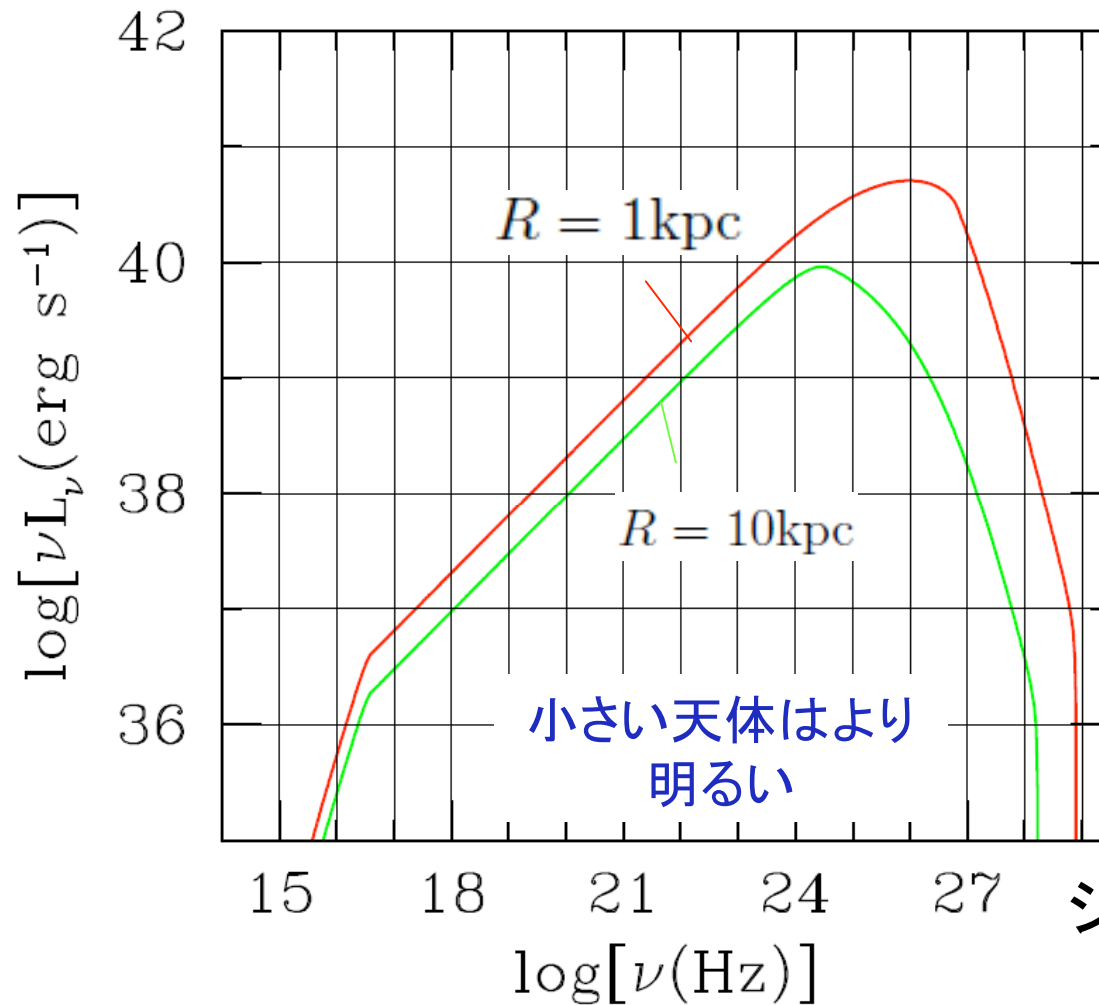
今後の課題

- ・CenAのX線観測より $\xi \sim 1$ が示唆される
- ・H.E.S.S.によってCenAからのTeVガンマ線が発見された

Aharonian et al. (2009)

→ シェルの逆コンプトンによるガンマ線を調べ、シェルの
GeV-TeVガンマ線源としての可能性を探る

Preliminary



$$L_j = 10^{45} \text{erg s}^{-1}$$

$$\epsilon_e = 0.1 \quad \xi = 1$$

$$\rho = 0.1 m_{\text{H}} \text{cm}^{-3} \quad B = 10 \mu\text{G}$$

seed photon

$$\nu \sim 10^{14} \text{Hz}$$

$$U_{\text{star}} \approx 3.0 \times 10^{-11} \text{erg cm}^{-3} \left(\frac{L_V}{10^{44} \text{erg s}^{-1}} \right) \left(\frac{R}{1 \text{kpc}} \right)^{-2}$$

ジェットに駆動されるシェルは
高エネルギーガンマ線源