

銀河団における粒子加速と 最高エネルギー宇宙線

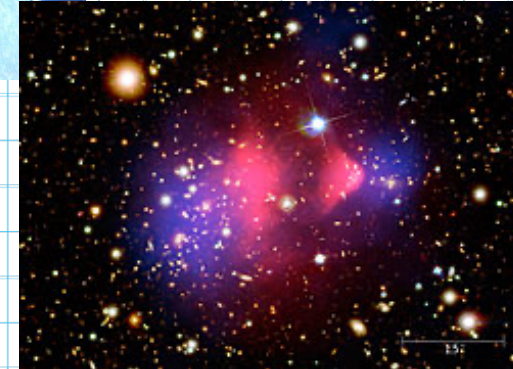
宇宙線研究所
西脇 公祐

背景:

貯蔵庫モデルと背景ニュートリノ

大問題: 宇宙線の起源

GeVガンマ線の検出あり!



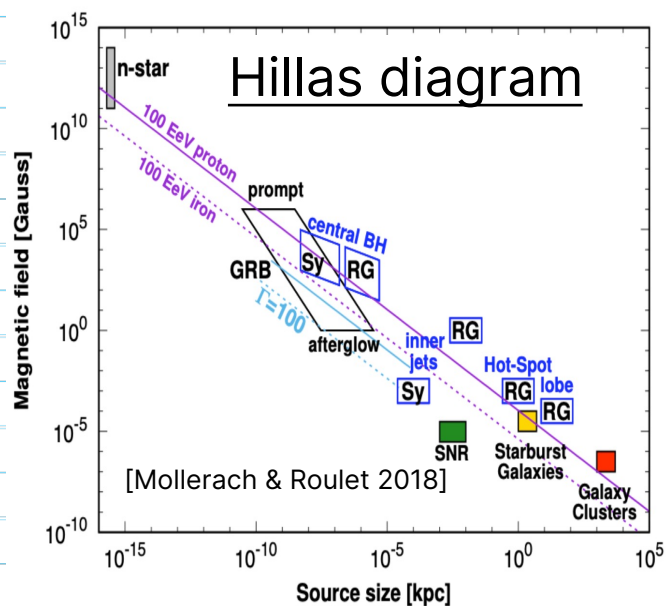
電磁波観測 (電波～ガンマ線)
→ 系外天体で陽子を加速している証拠がない!

宇宙線起源の放射はノイズ

- ダークマターの正体
 - 無衝突プラズマ物理
- を理解する上で**絶対に**解決しなければならない問題

なぜ銀河団か？

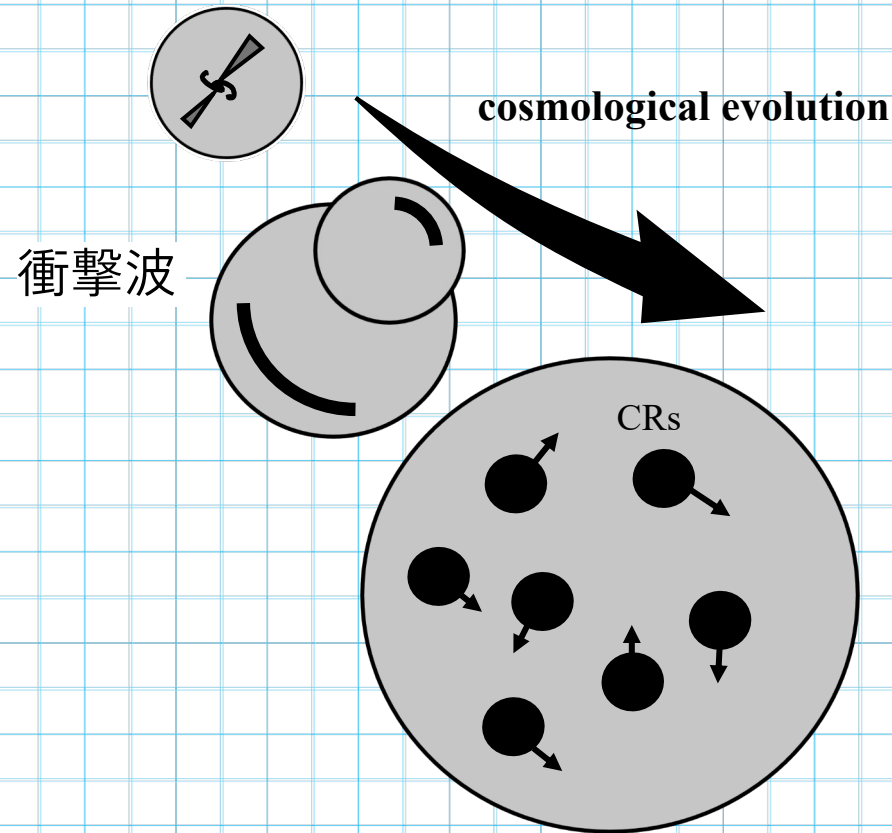
- 陽子はバリオンである
- バリオンが濃い環境の方が陽子宇宙線は多いはず
- 宇宙線生成は主に宇宙の大規模構造に沿って起こるはず



銀河団はUHECRまで加速できる

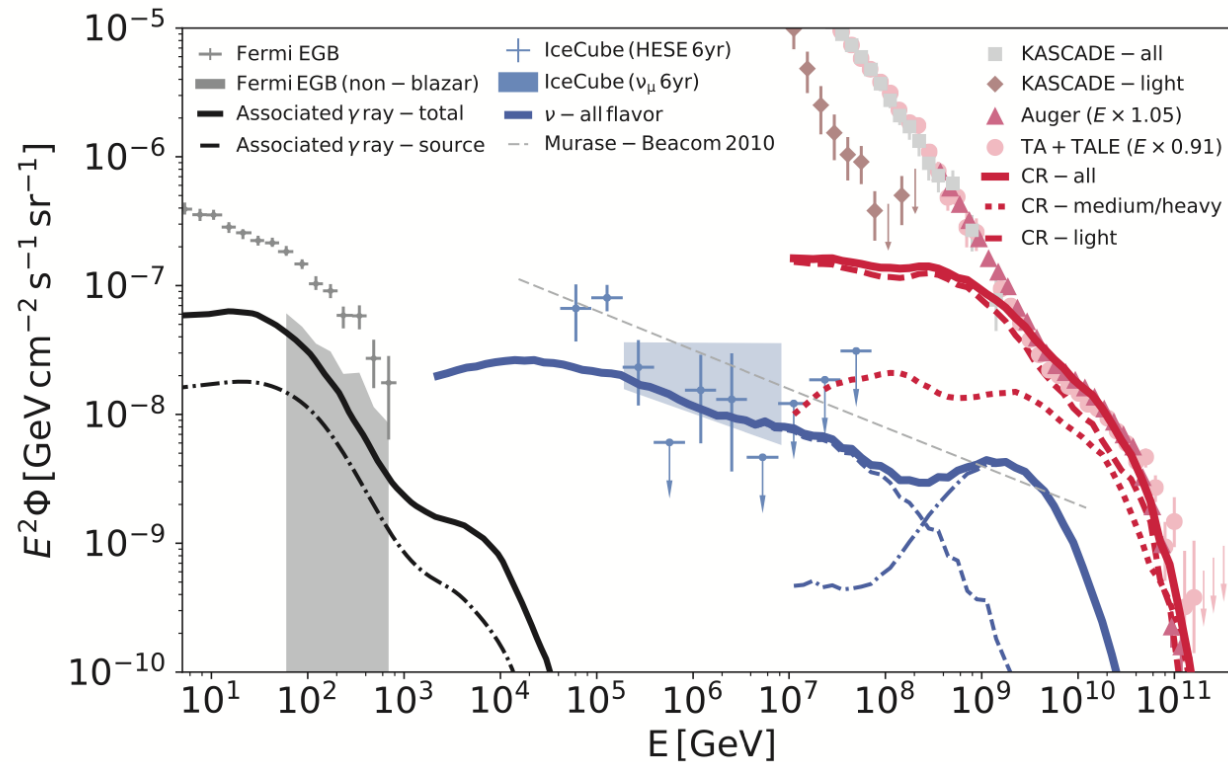
宇宙線の”貯蔵庫”モデル

銀河・AGN



最も楽観的なモデル

[Fang & Murase 2018]



銀河団は高エネルギーニュートリノおよびUHECRの起源になりうる

- injection from AGNs in clusters

$$L_{CR} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$$

- energy-loss due to adiabatic cooling

$$\propto \exp\left(-\frac{t_{diff}}{t_{adv}}\right)$$

- power-law + cut-off injection

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-2.3} \exp\left(-\frac{R}{10^{21}V}\right)$$

Waxman-Bahcall limitに近い予言

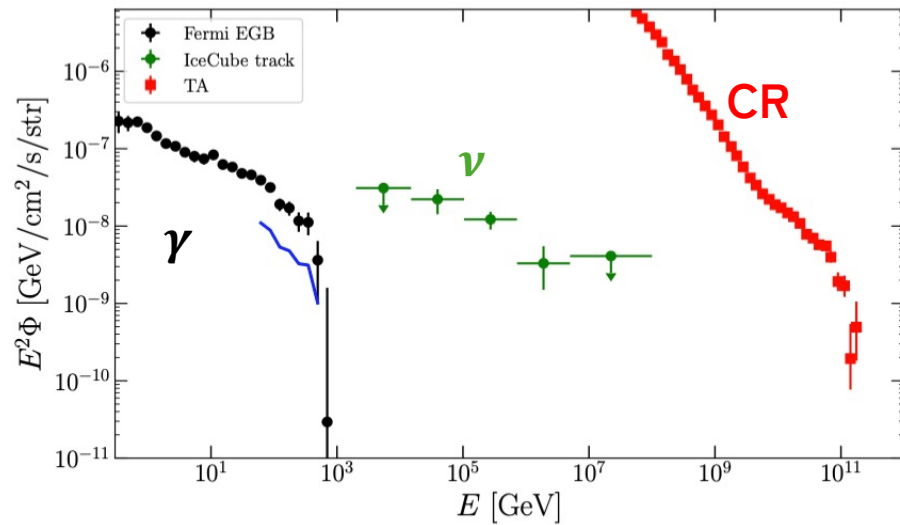
- 一方で、銀河団からは非熱的な電波放射も観測されている。
- 電波で制限すると、 γ, ν はもっと暗いという指摘も [Zandanel+2017]

IceCubeとマルチメッセンジャー天文学

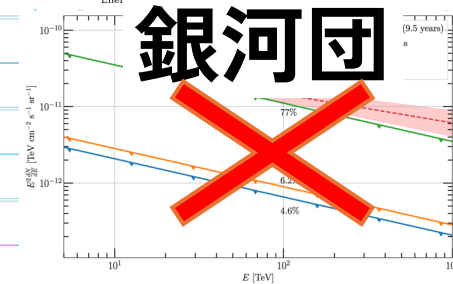
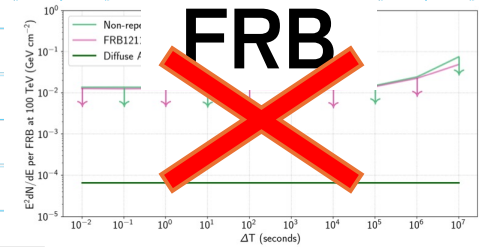
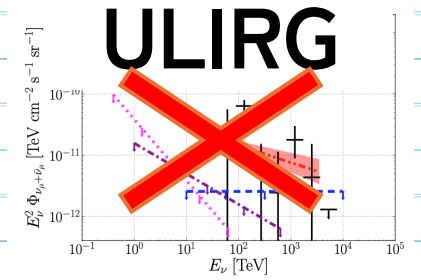
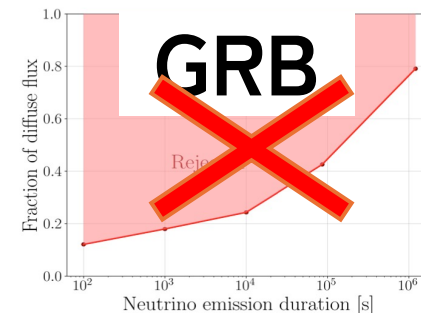


pp や pγによる
ニュートリノ放射

- 伝播の過程で曲げられない&消滅しない
- 検出は難しい



しかし、



TeV-PeV 背景ニュートリノの発見！

- エネルギーフラックスがankle付近のUHECRと同等
- Waxman-Bahcall limitの予想と同レベル

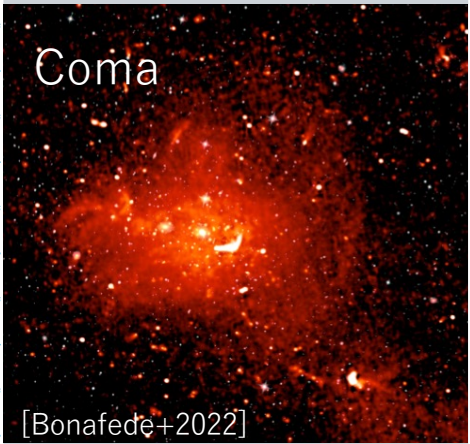
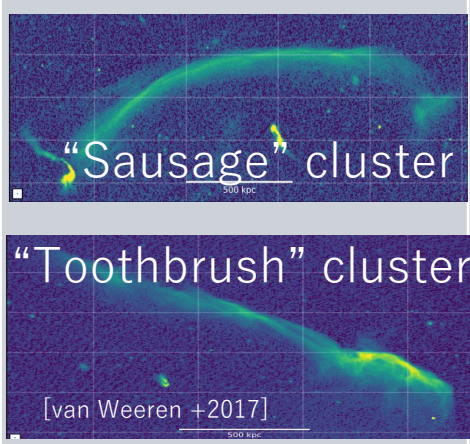
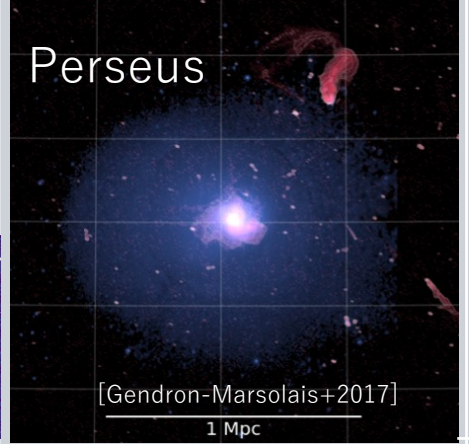
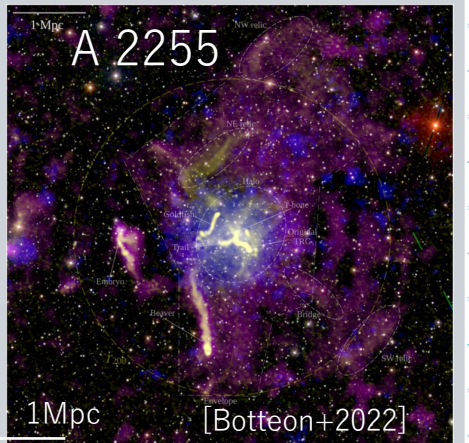
主要な放射源を特定できていない

- high-zの天体起源？
- 我々がまだ知らない現象？

銀河団の広がった電波放射

～ 再加速モデル vs 2次電子モデル～

銀河団の非熱的電波放射 (100 MHz – 5 GHz)

<u>Giant halo</u>	<u>Radio relic</u>	<u>Mini halo</u>	<u>Mega halo</u>
 <p>Coma</p> <p>[Bonafede+2022]</p>	 <p>“Sausage” cluster</p> <p>“Toothbrush” cluster</p> <p>[van Weeren +2017]</p>	 <p>Perseus</p> <p>[Gendron-Marsolais+2017]</p> <p>1 Mpc</p>	 <p>A 2255</p> <p>1Mpc</p> <p>[Botteon+2022]</p>
spherical	elongated	spherical	spherical
~ 1Mpc	~ 1Mpc	~ 300 kpc	> 1.5 Mpc
merger	merger	cool-core	???

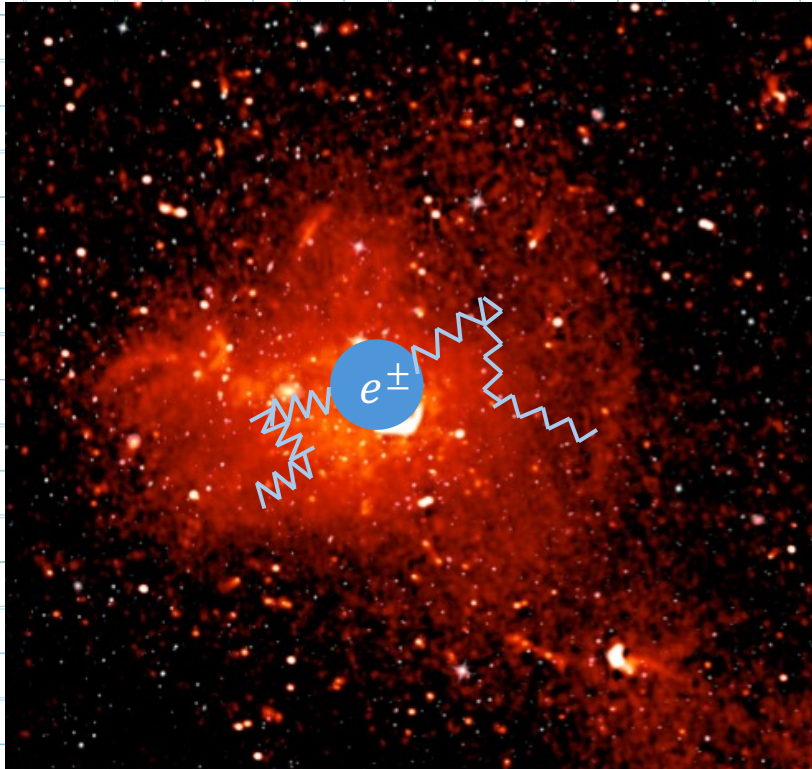
(巨大な電波銀河と同程度の輝度)

特徴

- とにかく大きい (銀河団スケール)
- 銀河団の動的状態と相関

slow-diffusion problem

= 電波ハロー大きすぎ問題



- 電子放射冷却タイムスケール

$$t_{\text{cool}} = \frac{\sqrt{27\pi e m_e c}}{\sigma_T} \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{\text{CMB}}^2} \xi^{1/2} v_s^{-1/2},$$
$$\approx 300 \text{ Myr} \quad \text{for } B \sim B_{\text{CMB}} \sim 3.4 \mu\text{G}, v_s \sim 1 \text{ GHz}$$

- 電子空間拡散タイムスケール (pitch angle scattering)

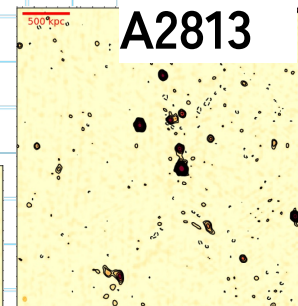
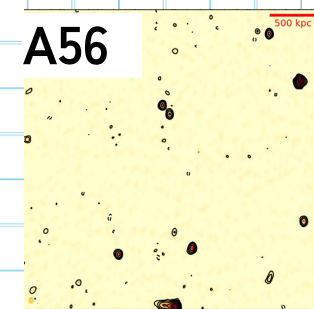
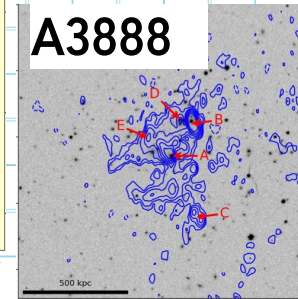
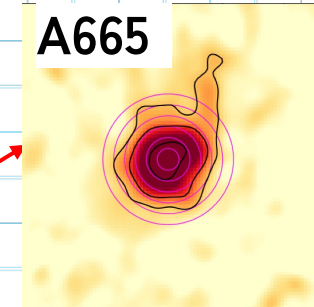
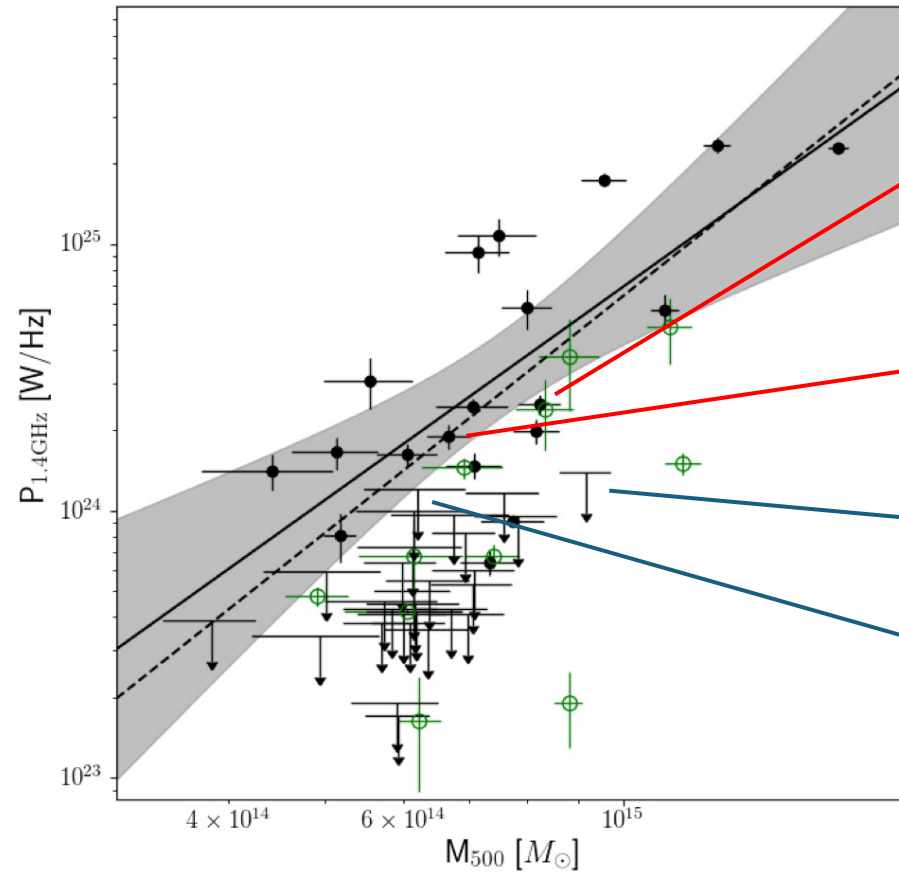
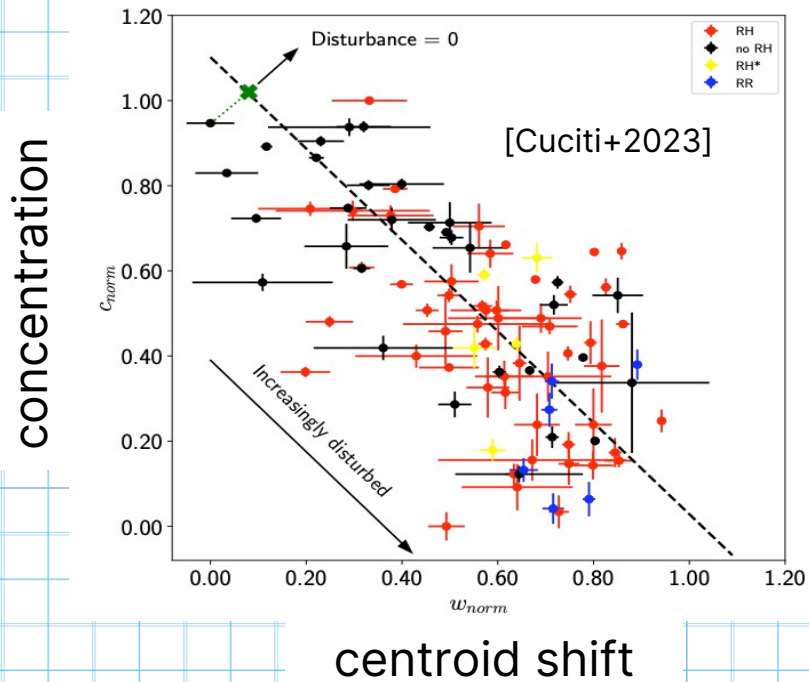
$$t_{\text{diff}} \equiv \frac{R^2}{2D} \approx 9.1 \times 10^2 \text{ Gyr} \left(\frac{R}{2 \text{ Mpc}} \right)^2 \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right)^{-1/3} \left(\frac{l_A^c}{0.1 \text{ Mpc}} \right)^{-2/3} \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right)^{1/3} \quad (2.349)$$

$$t_{\text{diff}} \gg t_{\text{cool}}$$

宇宙線の拡散や銀河団の動的タイムスケールに比べ、電子の放射冷却が早すぎる

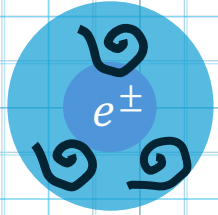
radio bimodality

= 電波ハロー “あり” と “なし” の2種族



電波ハローは銀河団同士の衝突に起因？

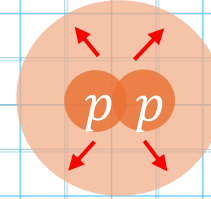
再加速モデル v.s. 2次電子モデル



乱流再加速モデル

- 乱流による”種電子”の加速で説明
- 銀河団ガスには乱流がある(X線観測、シミュレーション)
- 陽子は必ずしも必要ではない

Schlikeiser+1987
Brunetti+2001,
Petrosian+2001,
Fujita+2007, etc...

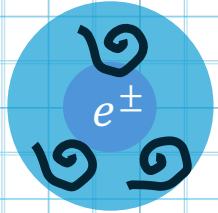


2次電子モデル

- pp衝突による2次電子生成で説明
- 銀河団が“貯蔵庫”であることから当然期待される
- ガンマ線・ニュートリノの放射を伴う

Dennison 1980,
Blasi & Colafrancesco 1999,
Dolag & Ensslin 2000,
Miniati+2001, etc...

再加速モデル v.s. 2次電子モデル



乱流再加速モデル

- 乱流による”種電子”の加速で説明
- 銀河団ガスには乱流がある(X線観測、シミュレーション)
- 陽子は必ずしも必要ではない

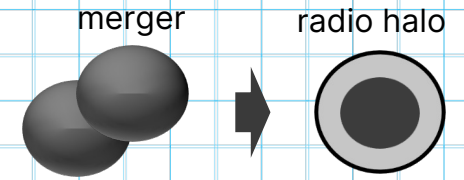
Schlikeiser+1987
Brunetti+2001,
Petrosian+2001,
Fujita+2007, etc...

- Slow-diffusion problem

銀河団を満たす乱流による
“その場” (in-situ) 加速

- Radio bimodality

衝突による乱流励起



- 予言

再加速の効率に応じてcut-offした
スペクトル → USSRH

乱流観測による検証

再加速モデル v.s. 2次電子モデル

- **Slow-diffusion problem**

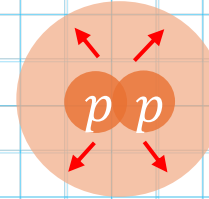
宇宙線陽子の拡散 ($E_p \gtrsim 100$ GeV)
降着衝撃波での加速、銀河団辺縁からの注入

- **Radio bimodality**

バニラモデルでは説明できない
ただし、衝突による拡散係数の変化
などで説明できる可能性あり。

- **予言**

ガンマ線やニュートリノの放射
ただし、現行の観測機で検出は困難



2次電子モデル

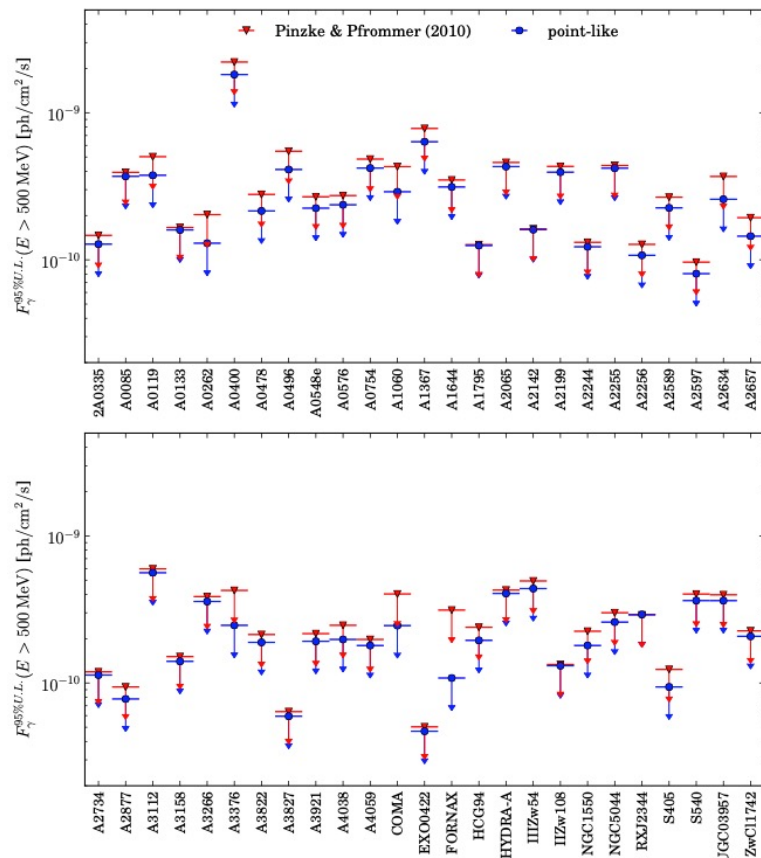
- pp衝突による2次電子生成で説明
- 銀河団が“貯蔵庫”であることから当然期待される
- ガンマ線・ニュートリノの放射を伴う

Dennison 1980,
Blasi & Colafrancesco 1999,
Dolag & Ensslin 2000,
Miniati+2001, etc...

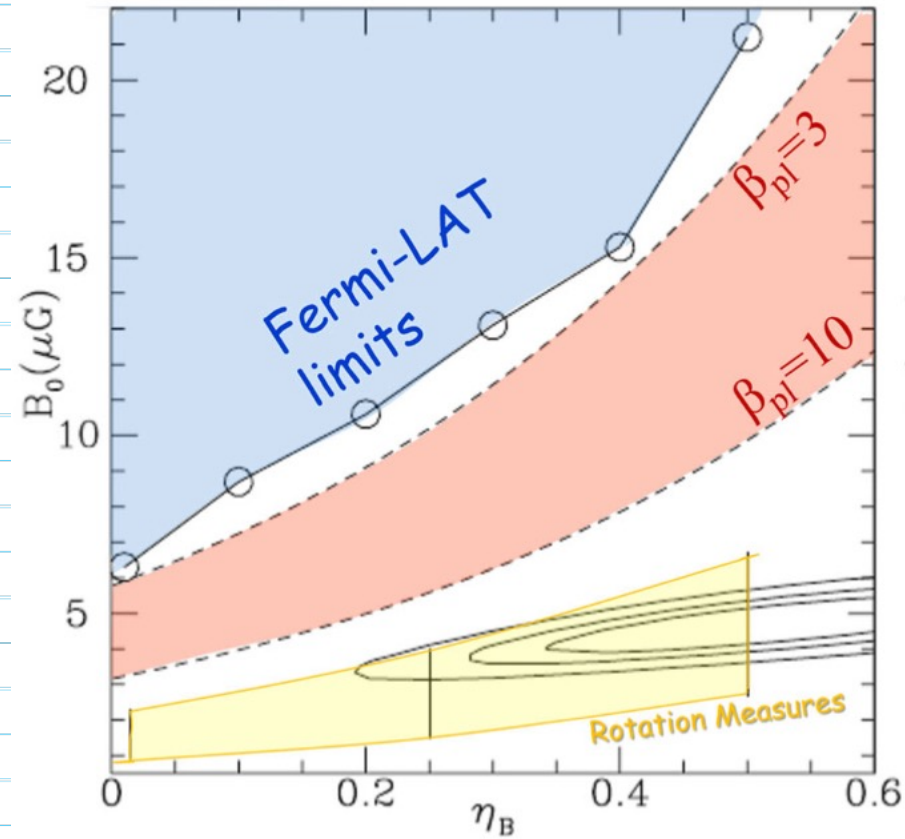
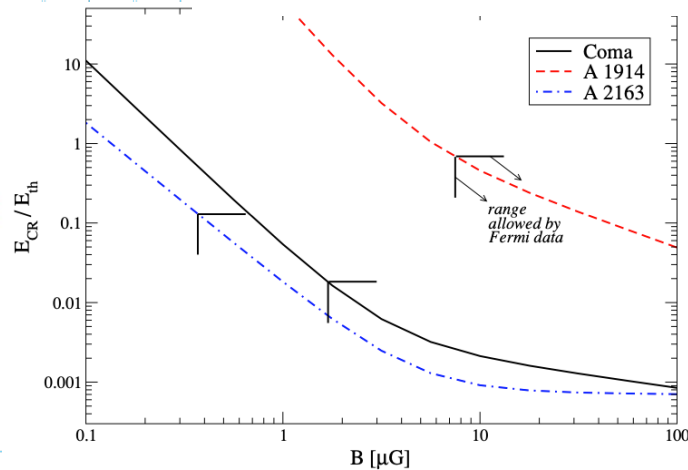
ガンマ線上限(Fermi)

Rotation measureによる磁場測定と
pure-hadronicモデルの磁場下限値の比較

[Ackerman+2014]



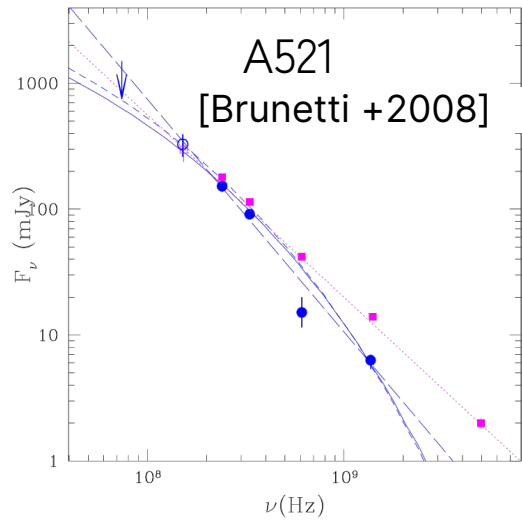
[Jeltema & Profumo 2011]



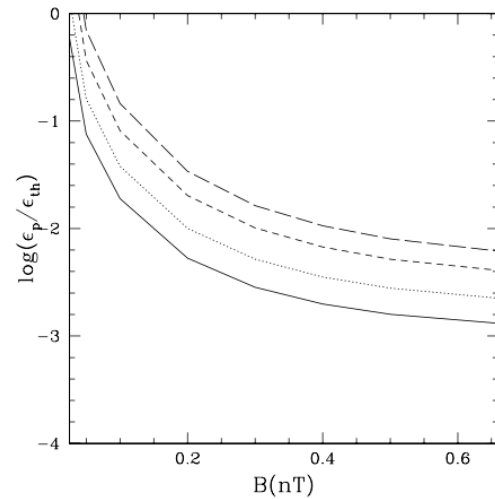
[Brunetti+2017]

Comaなど、ごく一部の銀河団で2次電子モデルが否定された

USSRH, メガハロー: 電波spix



$$X_{CR} \equiv \frac{\epsilon_{CR}}{\epsilon_{th}} > 1\%$$

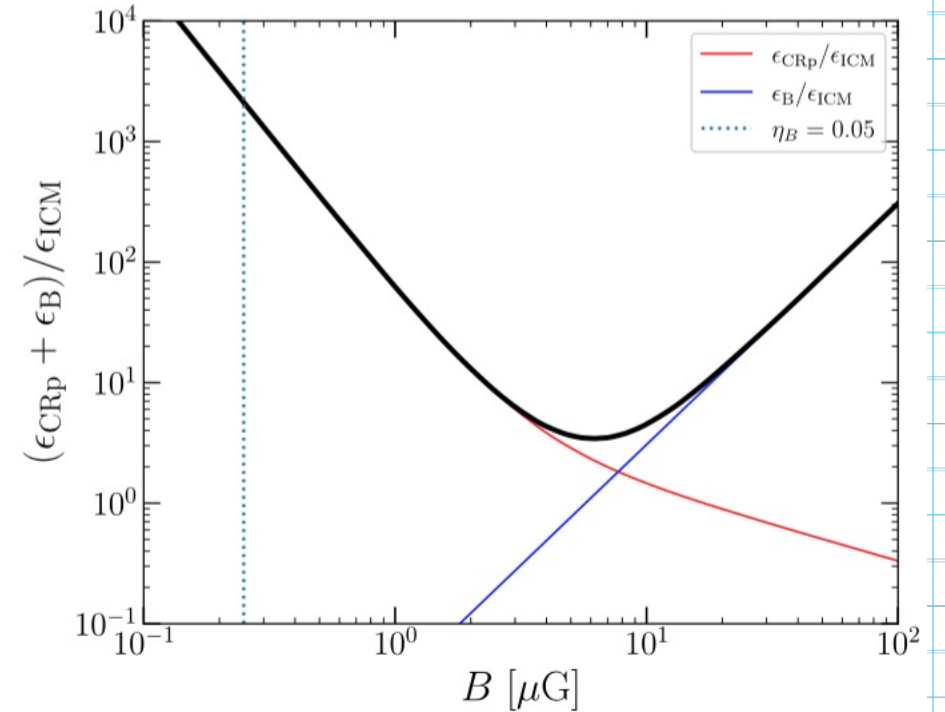


$$\alpha_{syn} = \frac{\delta_e - 1}{2}$$

$$\delta_e \approx \delta_p + 1.05$$

pure-hadronic: $\alpha_{syn} = 1.8 \rightarrow \delta_p \approx 3.6$
 (α_{syn} が0.5大きい \rightarrow δ_p が1大きい)

メガハロー(A2255)の $r \sim 1.5$ Mpc付近の放射

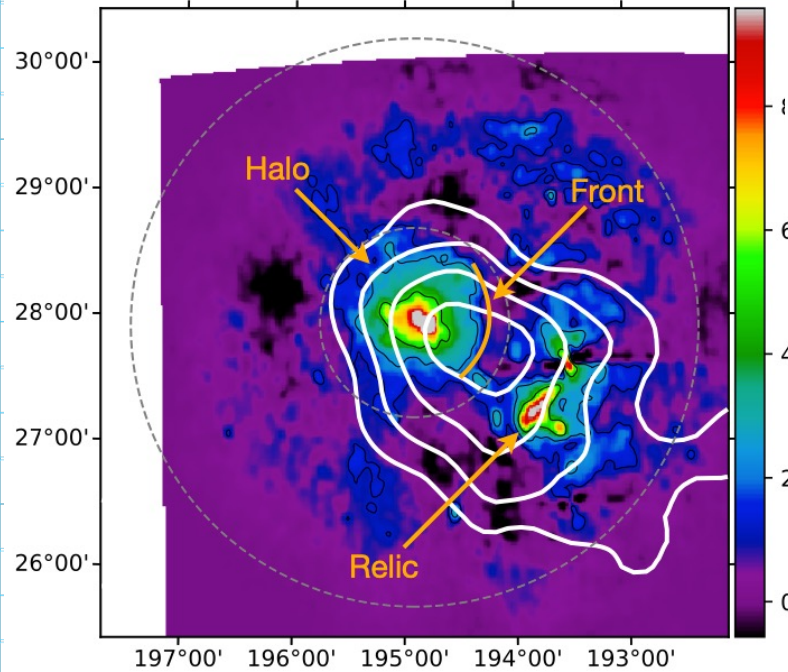


$$\epsilon_{non-thermal} > \epsilon_{thermal}$$

hadronicモデルでは、非熱的エネルギー密度が熱的成分より大きくなってしまふ

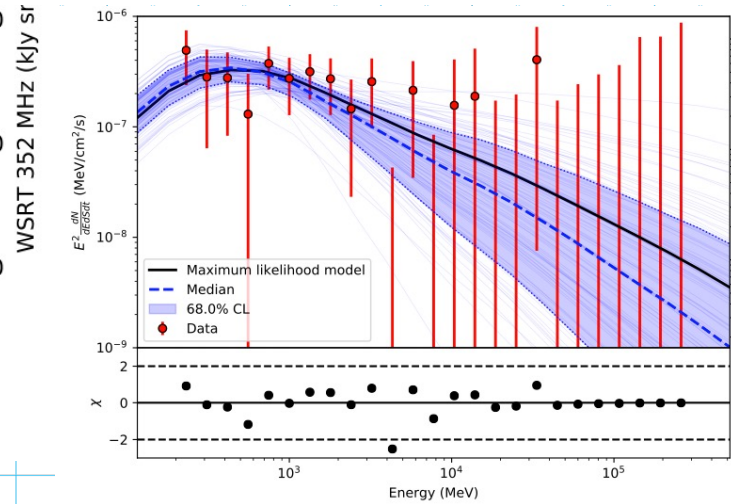
Comaからのガンマ線検出(?)

Adam+21
LAT TS map

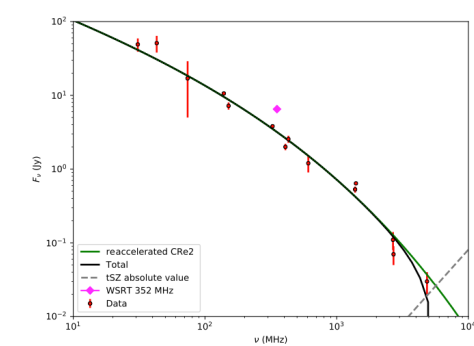


中心からズレてる

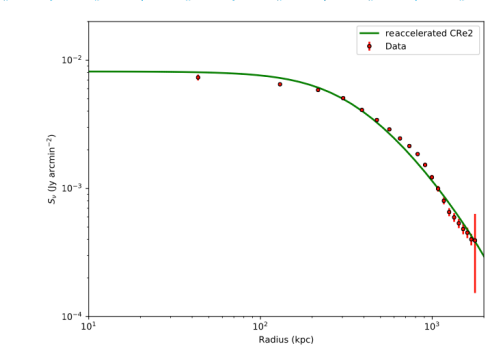
Model	$X_{\text{CRp}} (\%)$	α_{CRp}	Flux ($10^{-10} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	Luminosity ($10^{41} \text{ erg s}^{-1}$)
4FGL J1256.9+2736 replaced by ICM model (scenario 2)				
Compact model ($n_{\text{CRp}} \propto n_{\text{gas}}$)	$1.49^{+1.21}_{-0.25}$	$2.89^{+0.82}_{-0.11}$	$11.52^{+3.98}_{-2.08}$	$14.98^{+2.43}_{-3.75}$
Extended model ($n_{\text{CRp}} \propto n_{\text{gas}}^{1/2}$)	$1.79^{+1.13}_{-0.29}$	$2.79^{+0.69}_{-0.13}$	$13.61^{+3.90}_{-2.71}$	$19.15^{+5.35}_{-3.76}$
Flat model ($n_{\text{CRp}} = \text{constant}$)	$1.45^{+0.86}_{-0.19}$	$2.71^{+0.75}_{-0.11}$	$16.58^{+4.67}_{-3.12}$	$24.90^{+3.76}_{-8.14}$
Isobar ($n_{\text{CRp}} = P_{\text{gas}}$)	$1.49^{+1.16}_{-0.29}$	$2.92^{+0.78}_{-0.15}$	$11.32^{+3.22}_{-2.35}$	$13.58^{+3.21}_{-3.08}$
Both 4FGL J1256.9+2736 and ICM models included (scenario 3)				
Compact model ($n_{\text{CRp}} \propto n_{\text{gas}}$)	$0.75^{+1.05}_{-0.11}$	$2.56^{+1.39}_{-0.06}$	$6.20^{+3.87}_{-1.75}$	$10.89^{+1.75}_{-5.38}$
Extended model ($n_{\text{CRp}} \propto n_{\text{gas}}^{1/2}$)	$1.06^{+0.96}_{-0.22}$	$2.58^{+1.12}_{-0.09}$	$8.32^{+3.46}_{-3.12}$	$14.25^{+1.66}_{-7.21}$
Flat model ($n_{\text{CRp}} = \text{constant}$)	$0.83^{+0.85}_{-0.16}$	$2.58^{+1.38}_{-0.10}$	$9.86^{+3.61}_{-3.46}$	$13.06^{+5.52}_{-5.80}$
Isobar ($n_{\text{CRp}} = P_{\text{gas}}$)	$0.73^{+0.95}_{-0.11}$	$2.59^{+1.25}_{-0.07}$	$6.98^{+2.92}_{-2.77}$	$9.19^{+3.32}_{-3.18}$



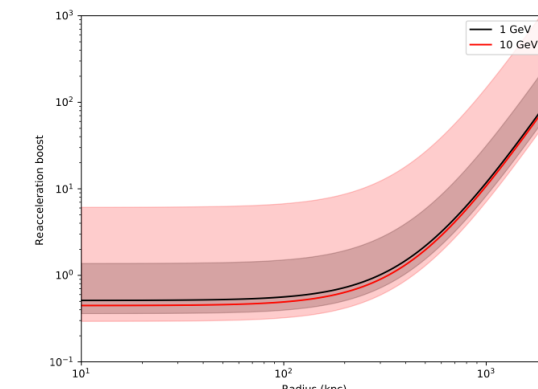
ややSoftなスペクトル?



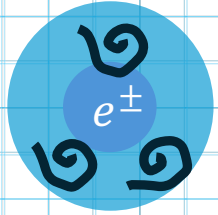
電波を説明するには陽子が少なすぎるので、1次電子か再加速が必要



急な陽子スペクトルを支持

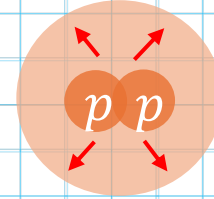


再加速モデル v.s. 2次電子モデル



乱流再加速モデル

- 銀河団には乱流がある(X線,SZ,シミュレーション)
- 銀河団衝突と電波ハローの出現の相関を自然に説明
- 乱流加速は電波銀河でも効くと考えられている
- 急なスペクトル指数を自然に説明(2次電子モデルでは困難)



2次電子モデル

- 銀河系、SNRからの類推
- 貯蔵庫になる
- Comaからのガンマ線検出(ただし論文によってフラックスにバラツキあり)
- ほかの銀河団からガンマ線が受からないことと矛盾なし
- Fermi-LATの感度がもう少しだけ良ければ、、、

再加速モデルに軍配が上がりつつある。しかし議論は尽きない

まとめ 1

- 銀河団の電波放射の起源は長らく議論されてきた
- 銀河団衝突との相関やガンマ線の未検出から、乱流再加速モデルが有力になりつつある
- “再加速が有力”の主張には、しばしばバイアスがかかっており、Coma以外のハローに関しては根拠が不足していることが多い
- 1次宇宙線の起源が未解決。AGNジェットなのか、銀河風なのか、衝撃波なのか
- 銀河団の宇宙線描像が確立すれば、大規模構造(フィラメント)中の宇宙線分布も概ね予想がつく？

宇宙線陽子の行方？

~再加速モデルの定量的な議論~

銀河団にある”はず”の宇宙線陽子

宇宙線注入率の概算

1. 星形成率に比例

銀河系: $SFR_{MW} \sim 3M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{42}$ erg/s

銀河団全体: $SFR_{MW} \sim 30 - 300M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{43-44}$ erg/s

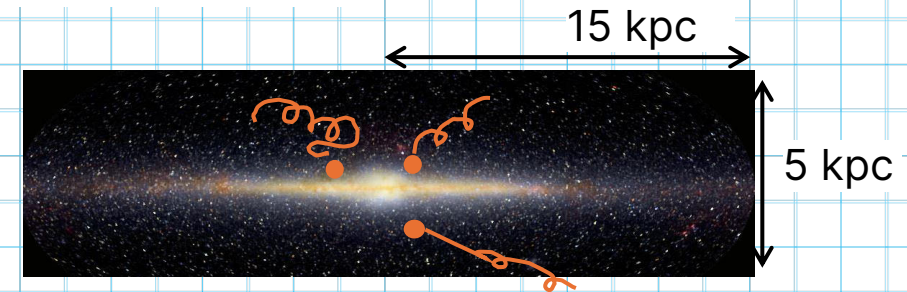
2. 電波ジェットのnon-radiative power

$P_{jet} \sim 10^{44}$ erg/s, $P_{radio} \sim 10^{42}$ erg/s

$L_{CR} \lesssim 10^{44}$ erg/s

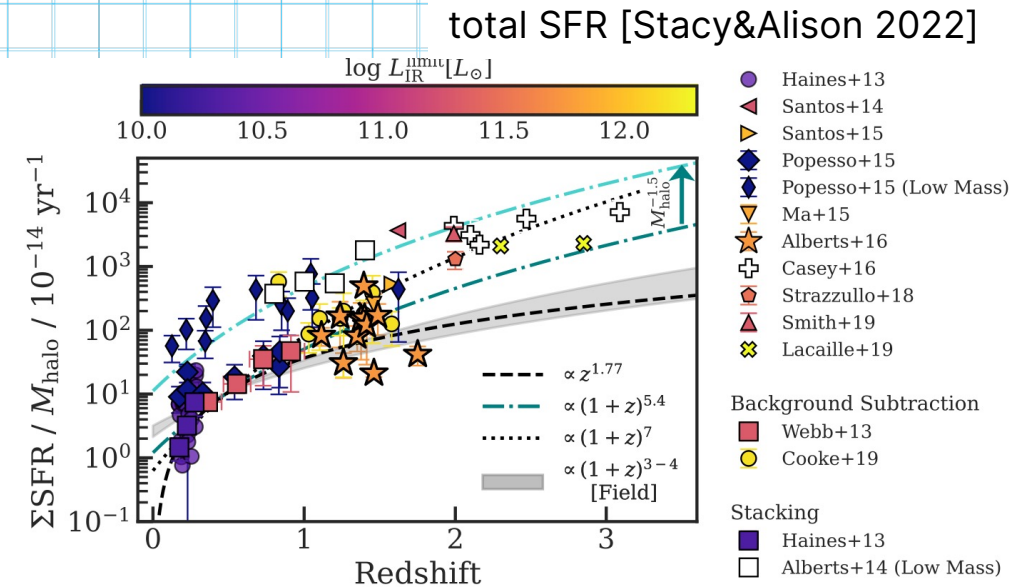
3. 降着衝撃波

$$L_{CR} \sim 8 \times 10^{43} \left(\frac{\eta_{acc}}{10^{-2}}\right) \left(\frac{f_b}{0.12}\right) \left(\frac{\Delta}{200}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{M}{10^{15}M_{\odot}}\right)^{1.76} \text{ erg/s}$$



$$\epsilon_{CR}^{MW} \sim 1 \text{ eV/cc}$$

$$L_{CR}^{leaky-box} \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{\epsilon_{CR}^{MW}}{1 \text{ eV cm}^{-3}}\right)$$



銀河団にある”はず”の宇宙線陽子

宇宙線注入率の概算

1. 星形成率に比例

銀河系: $SFR_{MW} \sim 3M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{42}$ erg/s

銀河団全体: $SFR_{MW} \sim 30 - 300M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{43-44}$ erg/s

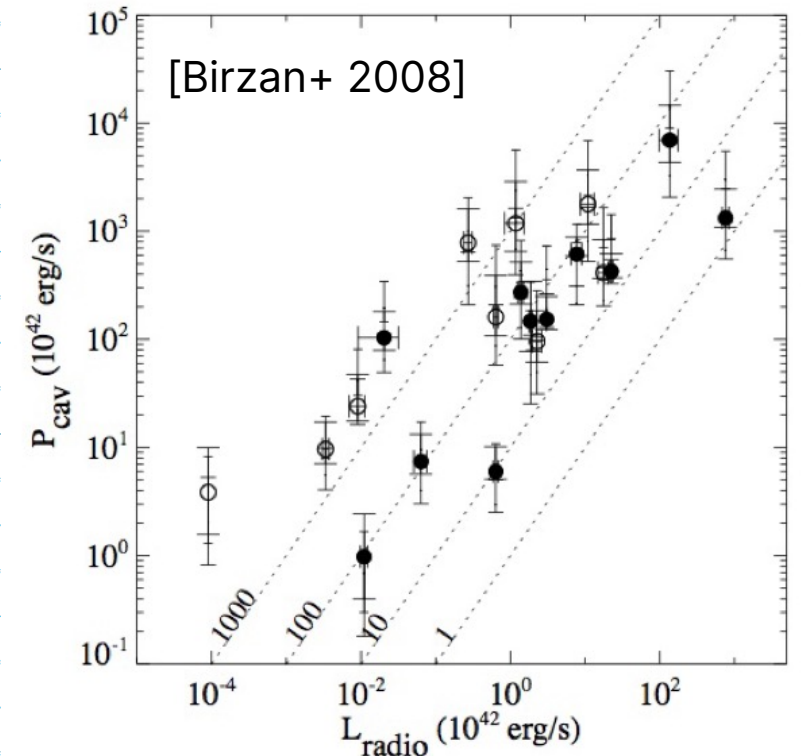
2. 電波ジェットのnon-radiative power

$$P_{jet} \sim 10^{44} \text{ erg/s}, P_{radio} \sim 10^{42} \text{ erg/s}$$

$$L_{CR} \lesssim 10^{44} \text{ erg/s}$$

3. 降着衝撃波

$$L_{CR} \sim 8 \times 10^{43} \left(\frac{\eta_{acc}}{10^{-2}} \right) \left(\frac{f_b}{0.12} \right) \left(\frac{\Delta}{200} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{M}{10^{15} M_{\odot}} \right)^{1.76} \text{ erg/s}$$



銀河団にある”はず”の宇宙線陽子

宇宙線注入率の概算

1. 星形成率に比例

銀河系: $SFR_{MW} \sim 3M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{42}$ erg/s

銀河団全体: $SFR_{MW} \sim 30 - 300M_{\odot}yr^{-1}$, $L_{CR} \sim 10^{43-44}$ erg/s

2. 電波ジェットのnon-radiative power

$P_{jet} \sim 10^{44}$ erg/s, $P_{radio} \sim 10^{42}$ erg/s

$L_{CR} \lesssim 10^{44}$ erg/s

3. 降着衝撃波

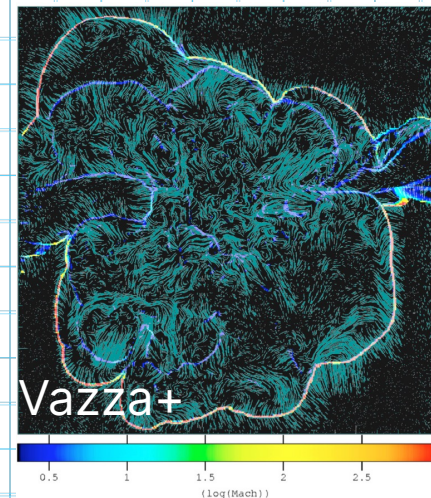
$$L_{CR} \sim 8 \times 10^{43} \left(\frac{\eta_{acc}}{10^{-2}} \right) \left(\frac{f_b}{0.12} \right) \left(\frac{\Delta}{200} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{M}{10^{15}M_{\odot}} \right)^{1.76} \text{ erg/s}$$

- mass accretion rate

$$\langle \dot{M} \rangle_{\text{median}} = 25.3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{M}{10^{12} M_{\odot}} \right)^{1.1} \times (1 + 1.65z) \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda}}.$$

ほぼ M^1 に比例

$$F_{CR} = \eta_{acc} \frac{f_b}{4\pi R_{\Delta_{vir}}^2} \frac{GM_{\Delta_{vir}}}{R_{\Delta_{vir}}} \left(\frac{dM}{dt} \right)_{acc},$$



strong shock
 $M \sim 10^2 - 10^3$

銀河団にある”はず”の宇宙線陽子

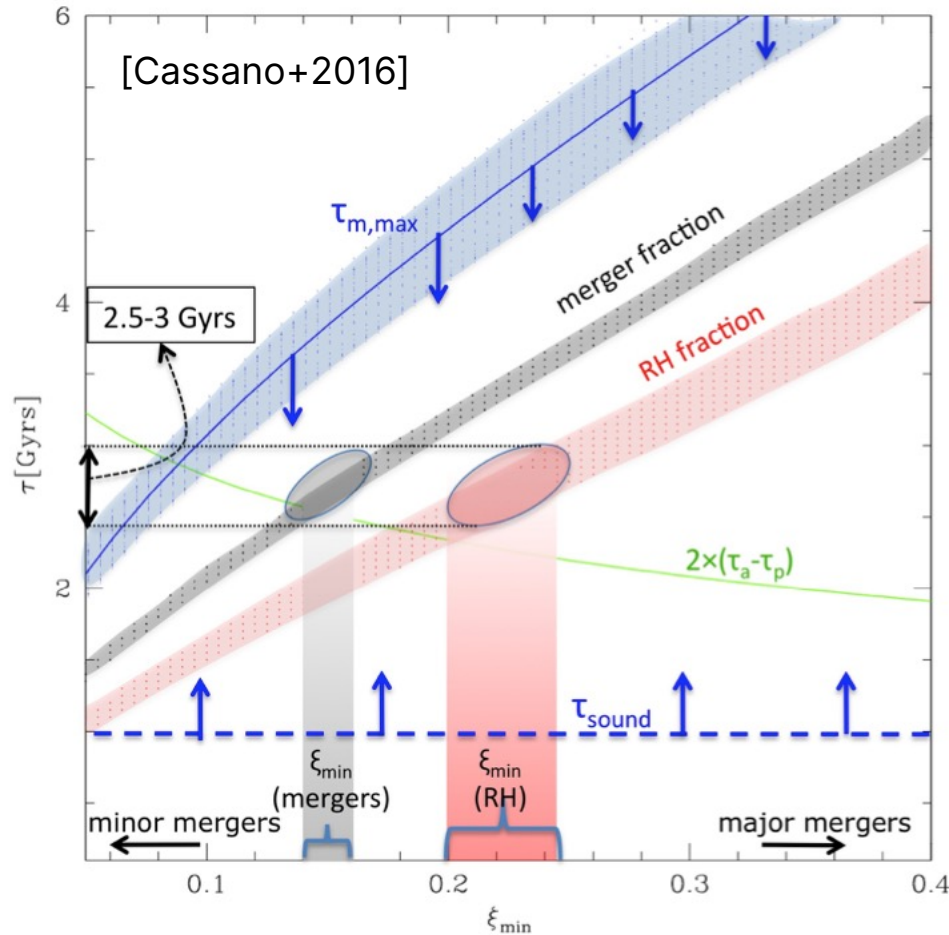
宇宙線エネルギー密度の概算

$$\varepsilon_{CRp} \sim 10^{-12} \text{ erg/cc} \left(\frac{L_{CRp}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right) \left(\frac{t_{age}}{10 \text{ Gyr}} \right) \left(\frac{V_{cl}}{10 \text{ Mpc}^3} \right)^{-1}$$

$$\frac{\varepsilon_{CRp}}{\varepsilon_{th}} \sim 0.03 - 0.1 \quad \leftarrow \text{楽観的なhadronicモデルで期待されるCR陽子エネルギー密度}$$

従来の再加速モデルは、(最大で)熱エネルギーの1~10%もある宇宙線陽子を無視してる！

再加速モデルへの要請:電波放射の寿命



- DM halo merger rate

$$\frac{dN_m}{d\xi dz}(M, \xi, z) = A \left(\frac{M}{10^{12} M_\odot} \right)^\alpha \xi^\beta \exp \left[\left(\frac{\xi}{\xi_c} \right)^\gamma \right] (1+z)^\eta.$$

Mass ratioが大きい (1:1)に近いほどレアな衝突

- RH occurrence : $f_{RH} = 40\%$

← 衝突前後でどれくらいの期間光っていれば
ハロー数を説明できるか

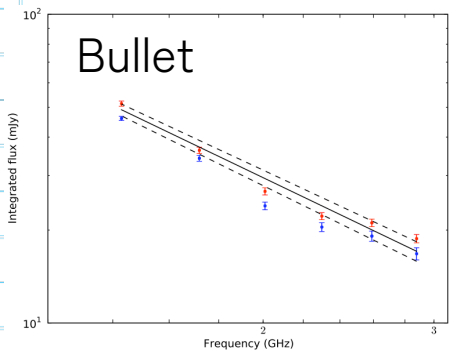
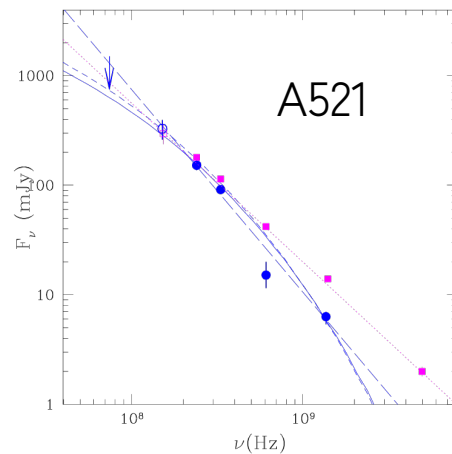
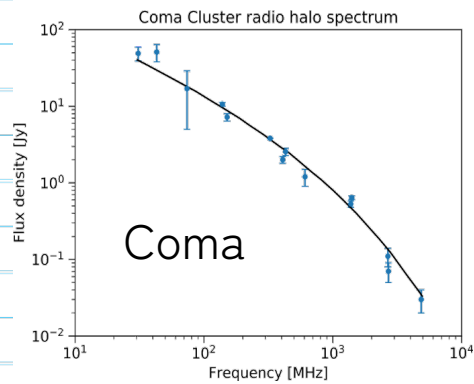
$$T_{dur} \sim 3 \text{ Gyr}$$

$$\text{for } \xi_{min} \sim 0.2$$

再加速は銀河団の動的時間くらい継続

再加速モデルへの要請: 再加速効率

電波ハロースペクトル



300 MHz ~ 1 GHz ($\gamma_e \sim 10^4$)
くらいまで再加速が効いてる

宇宙線電子

$$t_{\text{cool}} = \frac{\sqrt{27\pi e m_e c}}{\sigma_T} \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{\text{CMB}}^2} \xi^{1/2} \nu_s^{-1/2},$$

$\approx 300 \text{ Myr}$ for $B \sim B_{\text{CMB}} \sim 3.4 \mu\text{G}$, $\nu_s \sim 1 \text{ GHz}$

$$t_{\text{acc}} = t_{\text{cool}}(\nu = \nu_{\text{break}})$$

$\approx 300 \text{ Myr}$

$$T_{\text{dur}} \gtrsim 10 t_{\text{acc}}$$

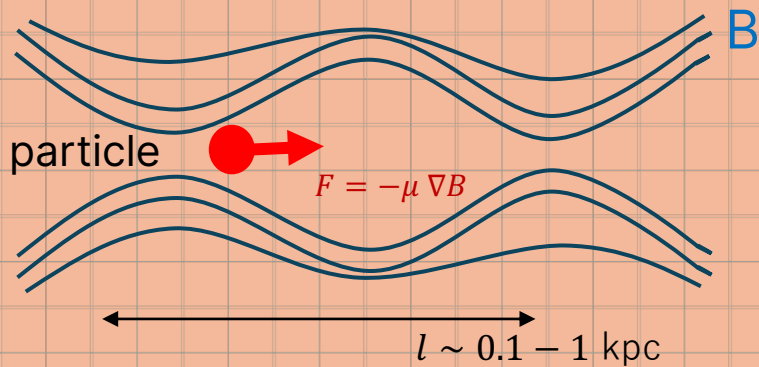
電子の冷却や再加速のタイムスケールは、
再加速の”継続時間”よりもかなり小さい

→ CR陽子スペクトルに多大な影響(後述)

再加速モデルのミクロな描像

Transit-time damping (TTD)

[e.g., Stix 1992, Barns 1968, Brunetti & Lazarian 2007]

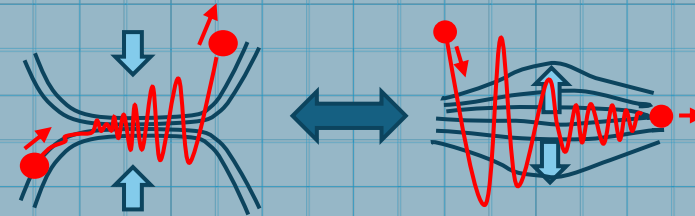


$$t_{acc} \approx 300 \text{ Myr} \left(\frac{M_s}{0.5}\right)^{-4} \left(\frac{L}{300 \text{ kpc}}\right) \left(\frac{c_s}{1500 \text{ kms}^{-1}}\right)^{-2}$$

- MHD fast modeと粒子の共鳴
- $\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = 0$
- magnetic mirror force
- 圧縮性乱流が熱的電子のTDDで減衰

Stochastic acceleration at turbulent reconnection/dynamo

[e.g., Brunetti & Lazarian 2016]



$$t_{acc} \approx 300 \text{ Myr} \left(\frac{M_s}{0.5}\right)^{-3} \left(\frac{\psi_{mfp}}{0.5}\right)^3 \left(\frac{L}{300 \text{ kpc}}\right) \left(\frac{c_s}{1500 \text{ kms}^{-1}}\right)^{-2} \left(\frac{\beta_{pl}}{100}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

- 乱流ダイナモに伴って起こる粒子加速
- Alfvénスケールの構造に散乱される2次Fermi加速
- 非圧縮性乱流との相互作用

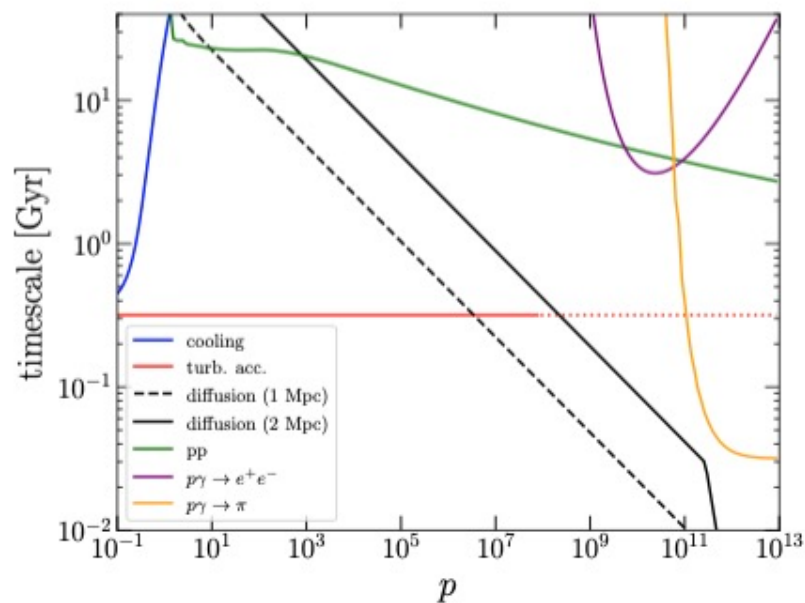
$t_{acc} \approx 300 \text{ Myr}$ を自然に説明できるモデルが(複数)ある

陽子と電子の再加速

hard-sphereモデル $D_{pp} \propto p^2$
 $t_{acc} \propto p^0$

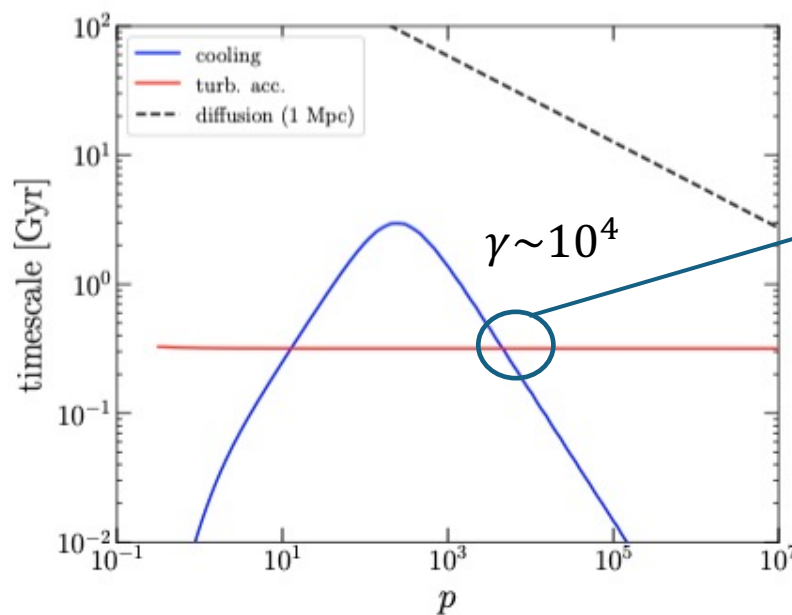
エネルギーによらず、一定のスケールの乱流によって加速される

CRp



$\gamma \sim 10^7$ まで冷却・拡散に邪魔されず加速できる

CRe

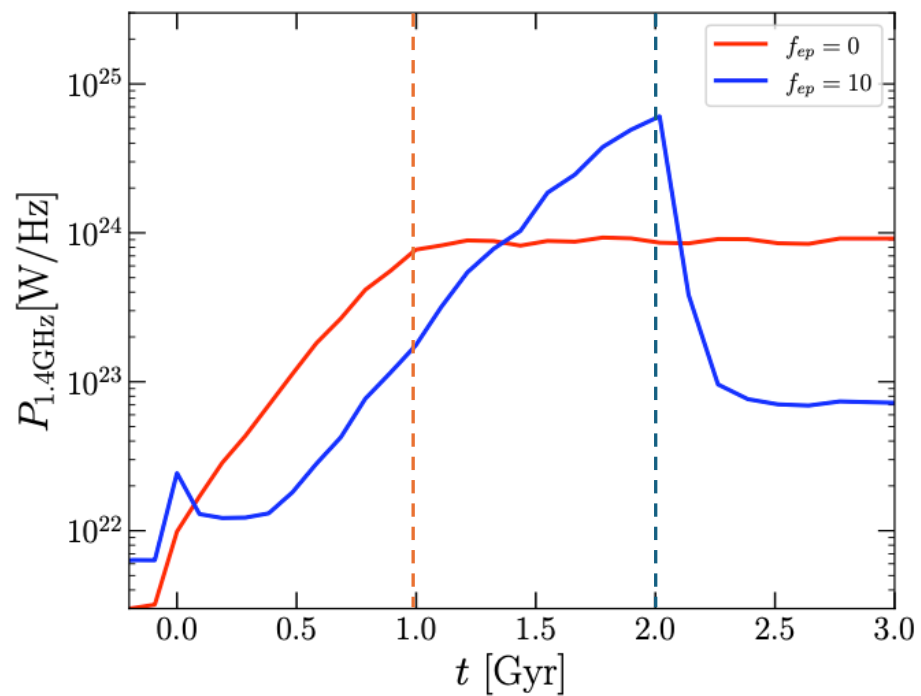


加速と冷却の釣り合い
 → spectral break

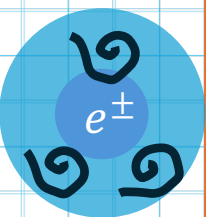
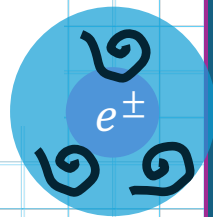
再加速で高エネルギーの宇宙線陽子を作れる可能性がある

陽子と電子の再加速

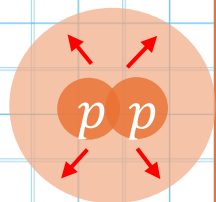
synchrotron light curve (@ 1.4 GHz)



time since merger

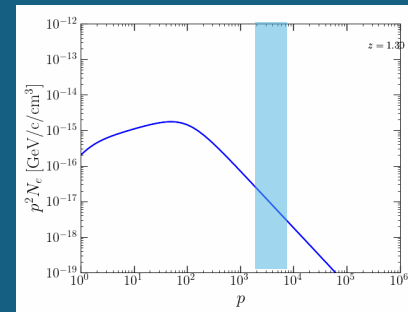


&



$f_{ep} = 10$: primary e^-

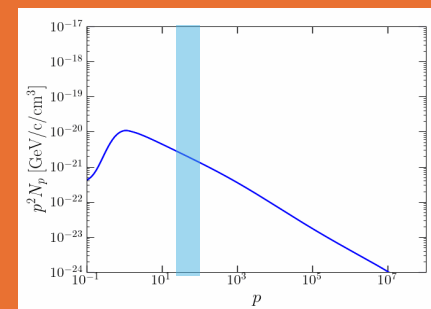
fast radiative cooling of CRE



“short-lived” halo

$f_{ep} = 0$: secondary(pp) e^\pm

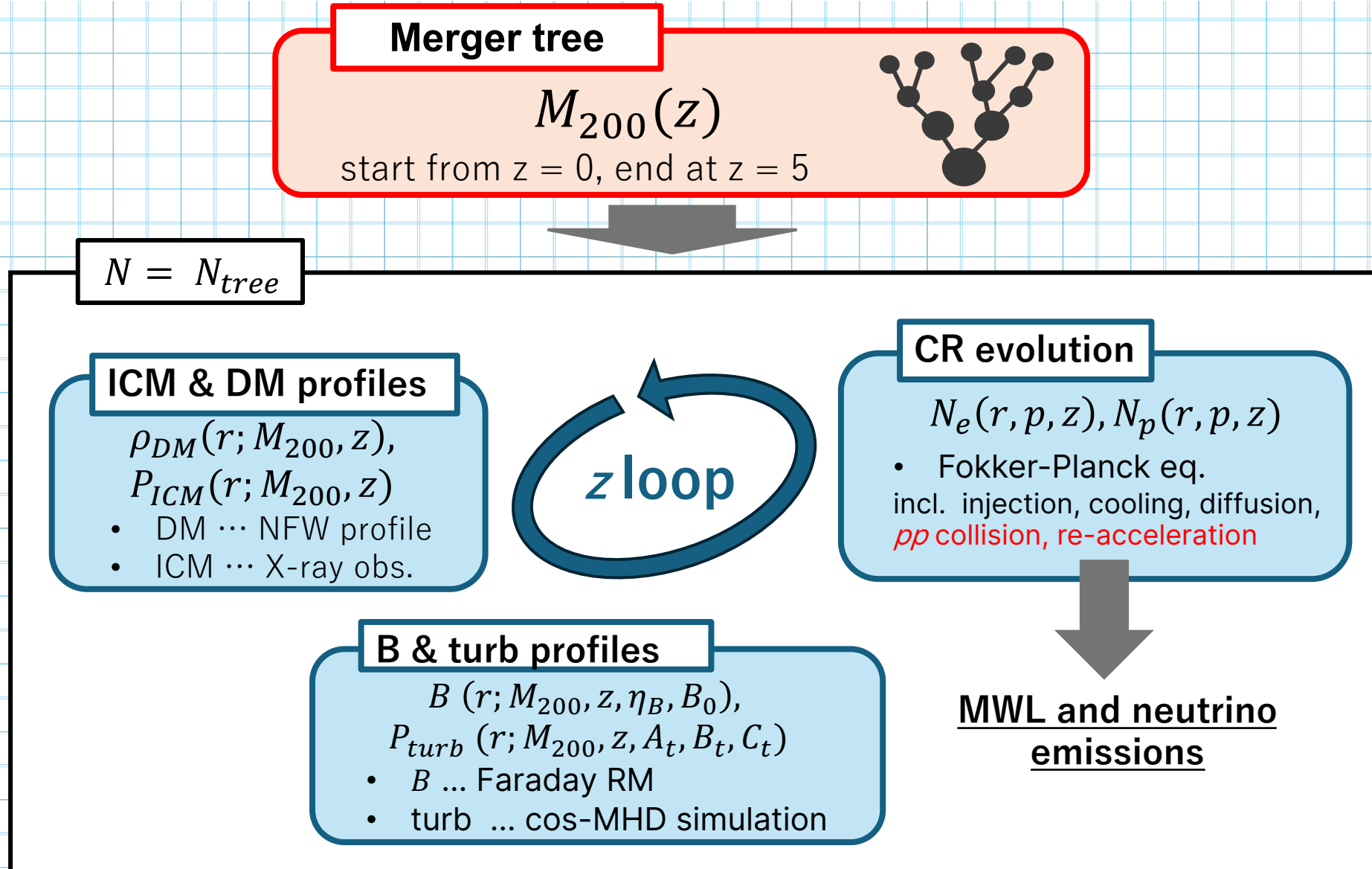
inefficient radiative cooling of CRp



“everlasting” halo

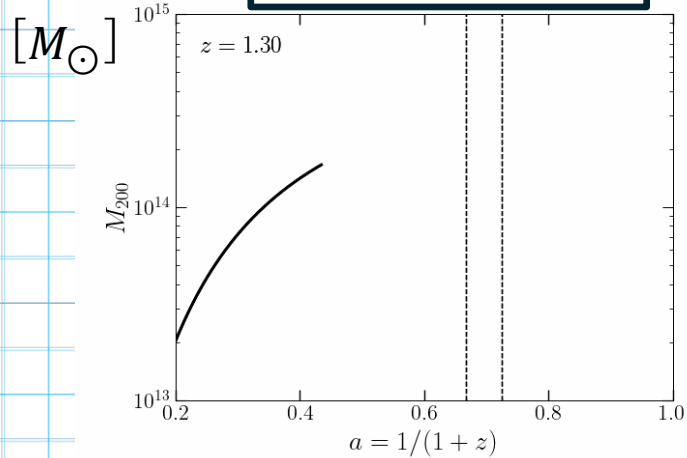
“つきっぱなし”モデルと“すぐ消える”モデルどっちが正しい？

我々の研究：銀河団進化＋宇宙線モデル

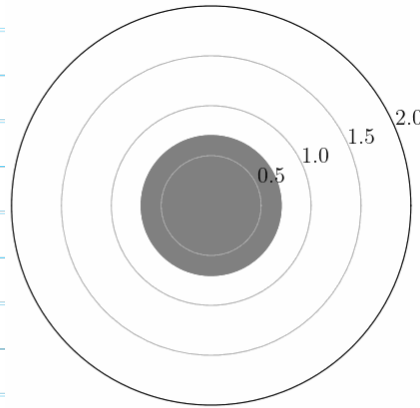


我々の研究：銀河団進化＋宇宙線モデル

mass evolution

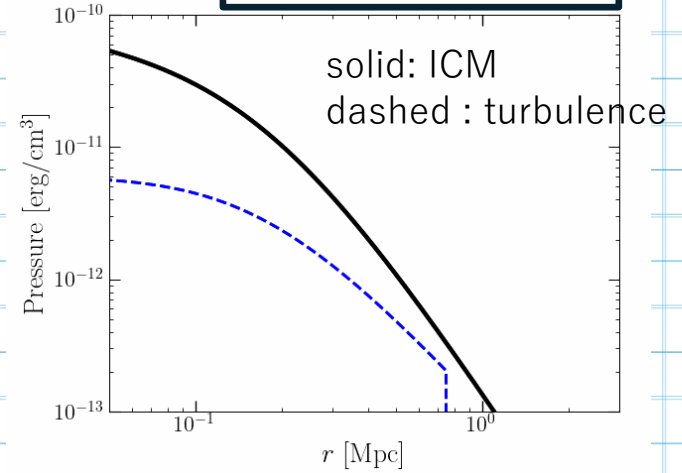


$z = 1.30$
Re-acc. OFF
 R_{200} [Mpc]

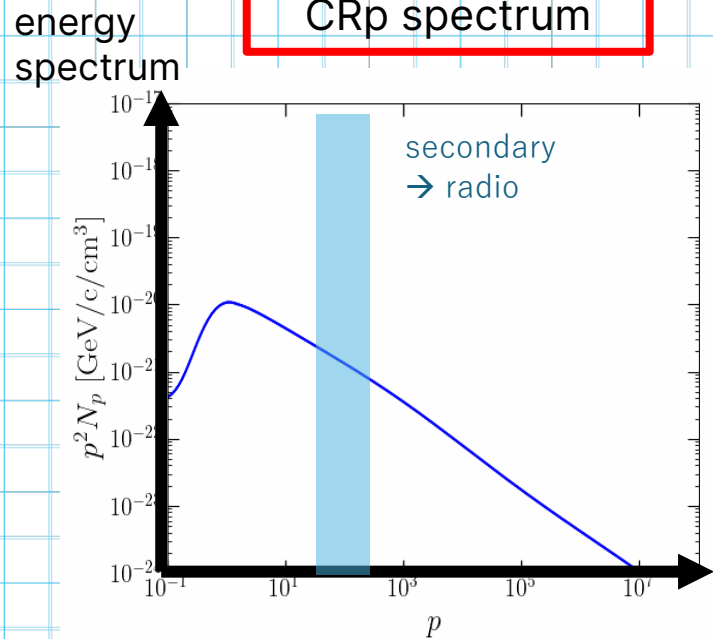


merger at
 $z = 0.5$

pressure profile

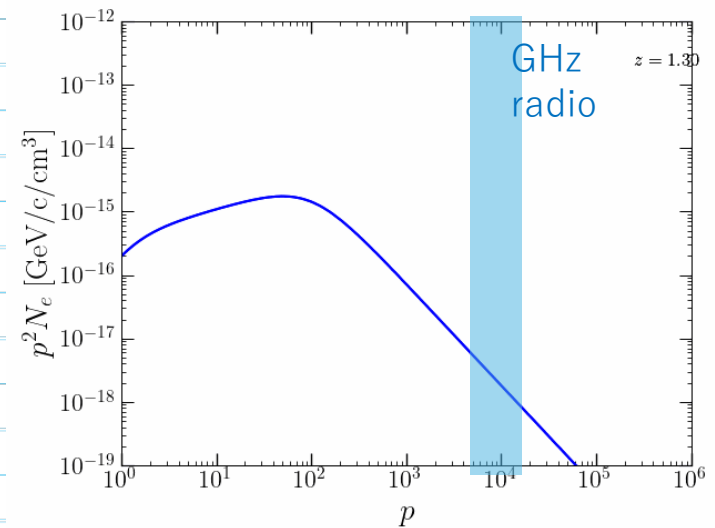


CRp spectrum



momentum

CRe spectrum



モデルパラメータ

	parameter	symbol	fixed value
Magnetic field	Central field strength (Eq. (2.205))	B_0	$5\mu\text{G}$
	Index of the radial profile	η_B	0.5
Turbulence	Outer (injection) scale of the turbulence	L	$0.5R_{500}$
	Radial profile of turbulence (Eq. (4.18))	Tab. 4.2	
	Energy fraction of the compressible mode:		
	in merging state	$f_{\text{comp}}^{\text{mer}}$	- 0.9
	in relaxed state	$f_{\text{comp}}^{\text{rel}}$	0.1 0.9
	Threshold mass ratio for the re-acceleration	ξ_{th}	-
	Duration of the post-merger state	T_{dur}	-
CR injection	Minimum momentum of primary CRP	$p_{\text{min}}^{\text{inj}}$	0.1
	Primary electron to proton ratio	f_{ep}	-
	Spectral index	α_{inj}	-
	Shock acceleration efficiency	η_{acc}	-
	AGN CR injection luminosity	$L_{\text{CR}}^{\text{AGN}}$	-
Normalization (Coma)	Redshift of the onset of re-acceleration	z_{on}	-
	Merger mass ratio	ξ_{Coma}	0.6

衝突前のrelaxed状態でも再加速を考える
(ただし衝突によって乱流は増幅)

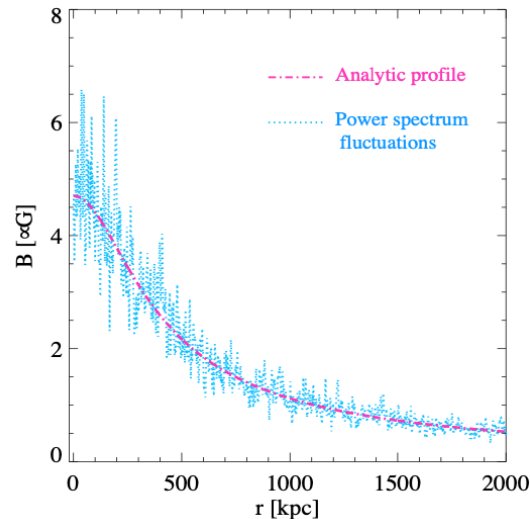
陽子と電子の注入率を独立に指定
 $L_{\text{CRE}}(M_{500}, z)$, $L_{\text{CRP}}(M_{500}, z)$

磁場と乱流の1次元モデル

magnetic field

profile seen in **Faraday RM obs.**
and **MHD simulation**

[Bonafede+2010 ,Vazza+, Steinwandel+]



$$B(r) = B_0 \left(\frac{n_{ICM}(r)}{n_{ICM}(0)} \right)^{\eta_B},$$

$$B_0 \approx 5.0 \mu G, \eta_B \approx 0.5$$

turbulence

turbulence profile in recent

MHD simulations [Vazza+]

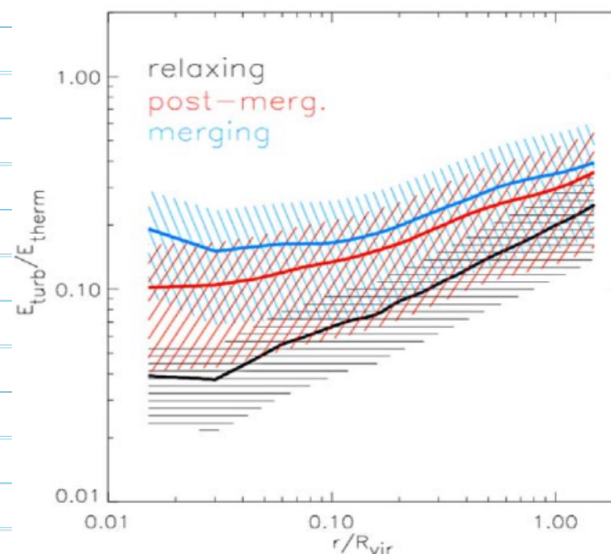


Table 4.2. parameters for the turbulence profile

	A_t	B_t	C_t
merging	0.10	0.051	0.18
relaxed	0.036	0.037	0.26

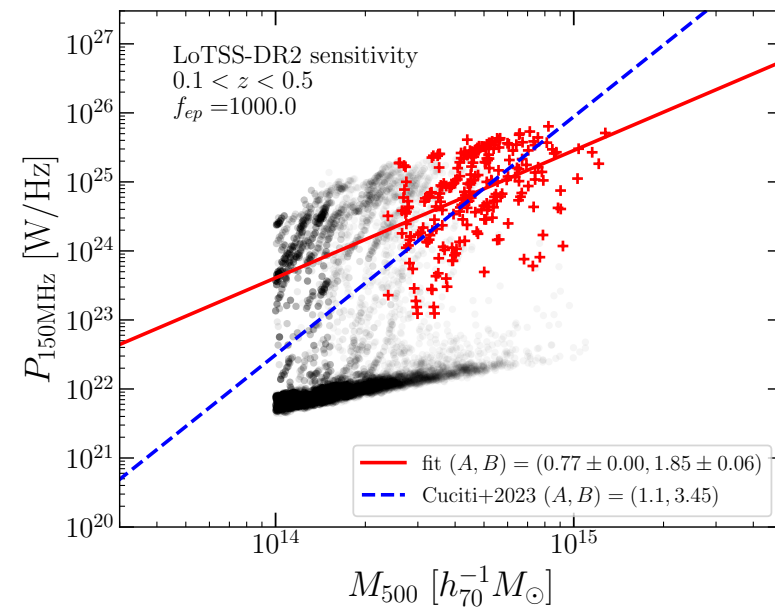
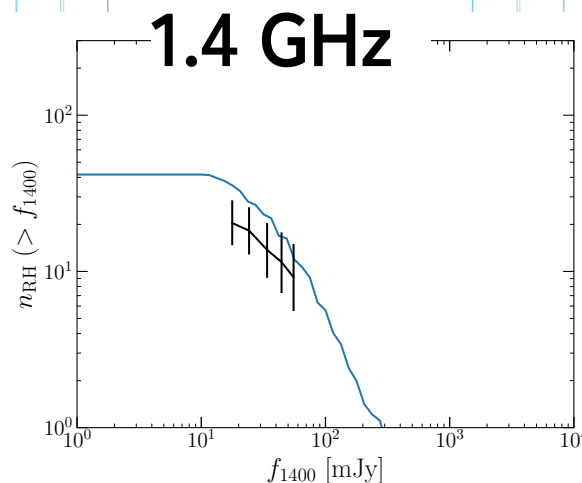
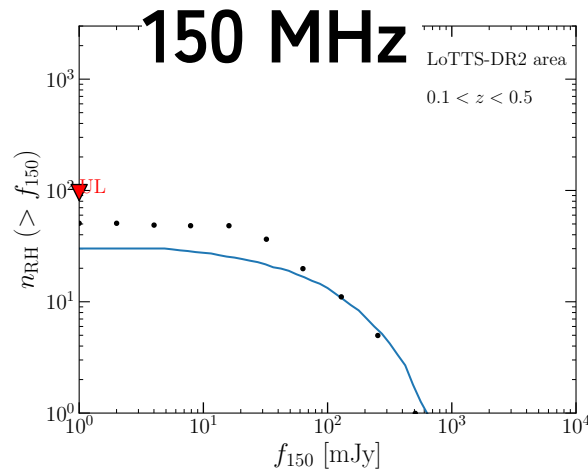
$$\frac{E_{turb}}{E_{th}} = A \left(1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^B \right)^C$$

電波ハローの再現：CR陽子なし

パラメータ

- 宇宙線電子注入率 ($z = 0$)
 $L_{CRe} = 10^{41}$ erg/s
- 宇宙線陽子注入率
 $L_{CRp} = 0$ erg/s
- 注入 γ_{min} (電子)
 $\gamma_{min} = 10^3$
- 乱流励起に必要な衝突質量比
 $\xi_{th} = 0.2$
- 再加速継続時間
 $T_{dur} = 4t_{eddy} \sim 3\text{Gyr}$

観測可能なハロー数



電波ハローの再現：CR陽子あり

パラメータ

- 宇宙線電子注入率 ($z = 0$)

$$L_{CRe} = 10^{41} \text{ erg/s}$$

- 宇宙線陽子注入率

$$L_{CRp} = 10^{41} \text{ erg/s}$$

- 注入 γ_{min} (電子)

$$\gamma_{min} = 10^3$$

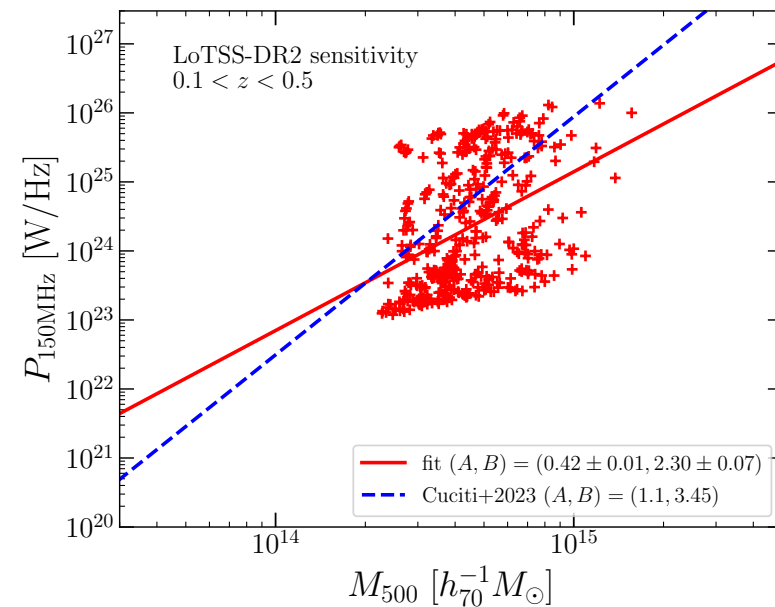
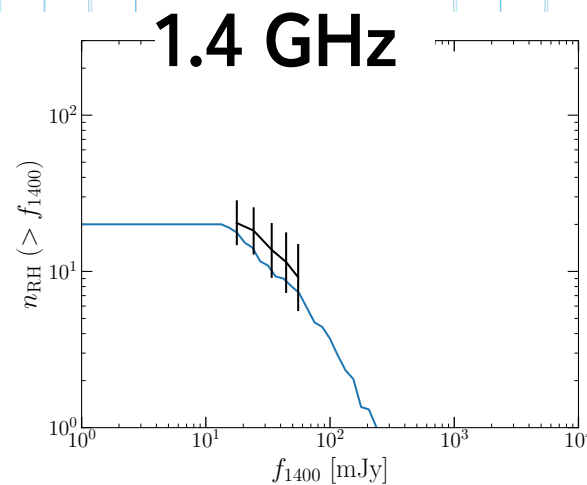
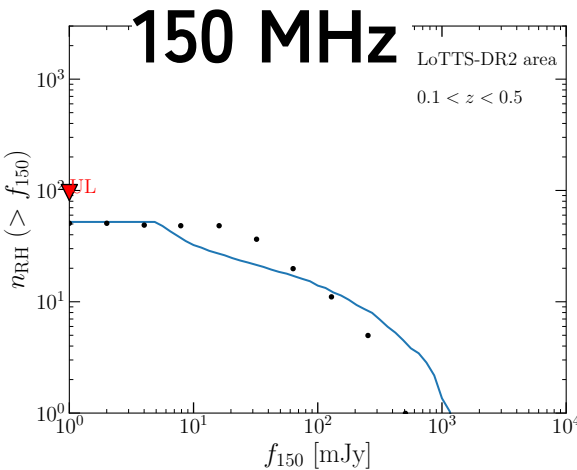
- 乱流励起に必要な衝突質量比

$$\xi_{th} = 0.2$$

- 再加速継続時間

$$T_{dur} = 4t_{eddy} \sim 3\text{Gyr}$$

観測可能なハロー数

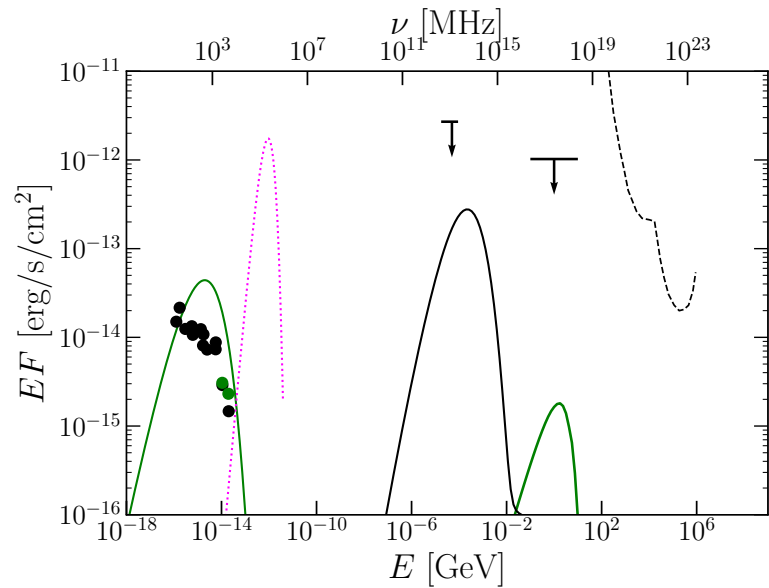


Coma clusterの再現



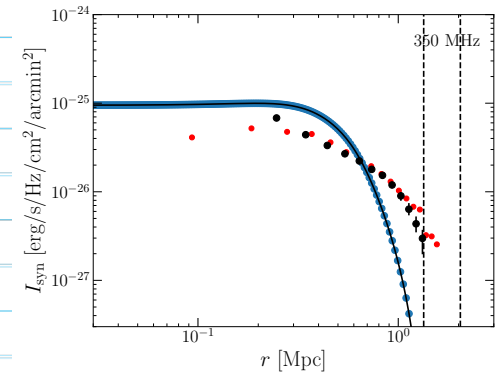
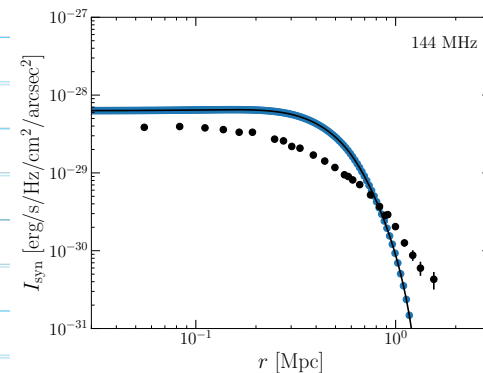
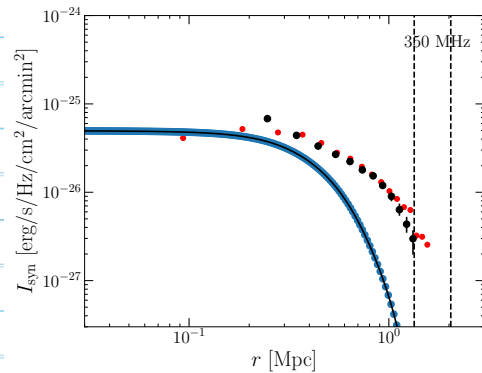
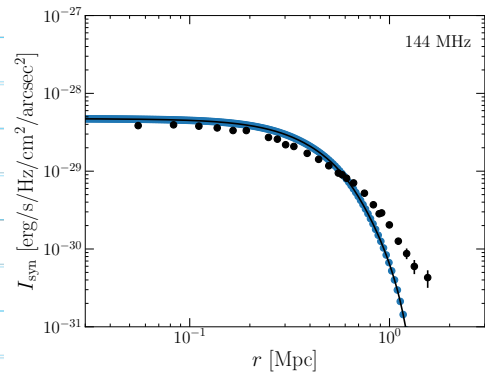
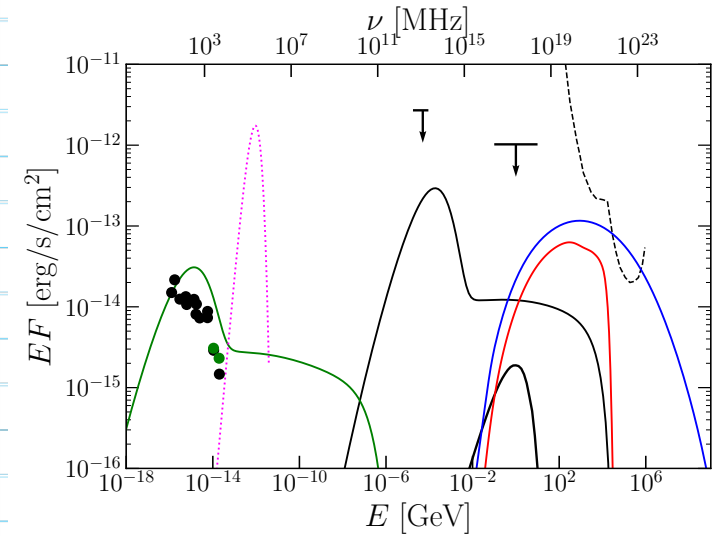
CR陽子なし

merger: $z = 0.06$

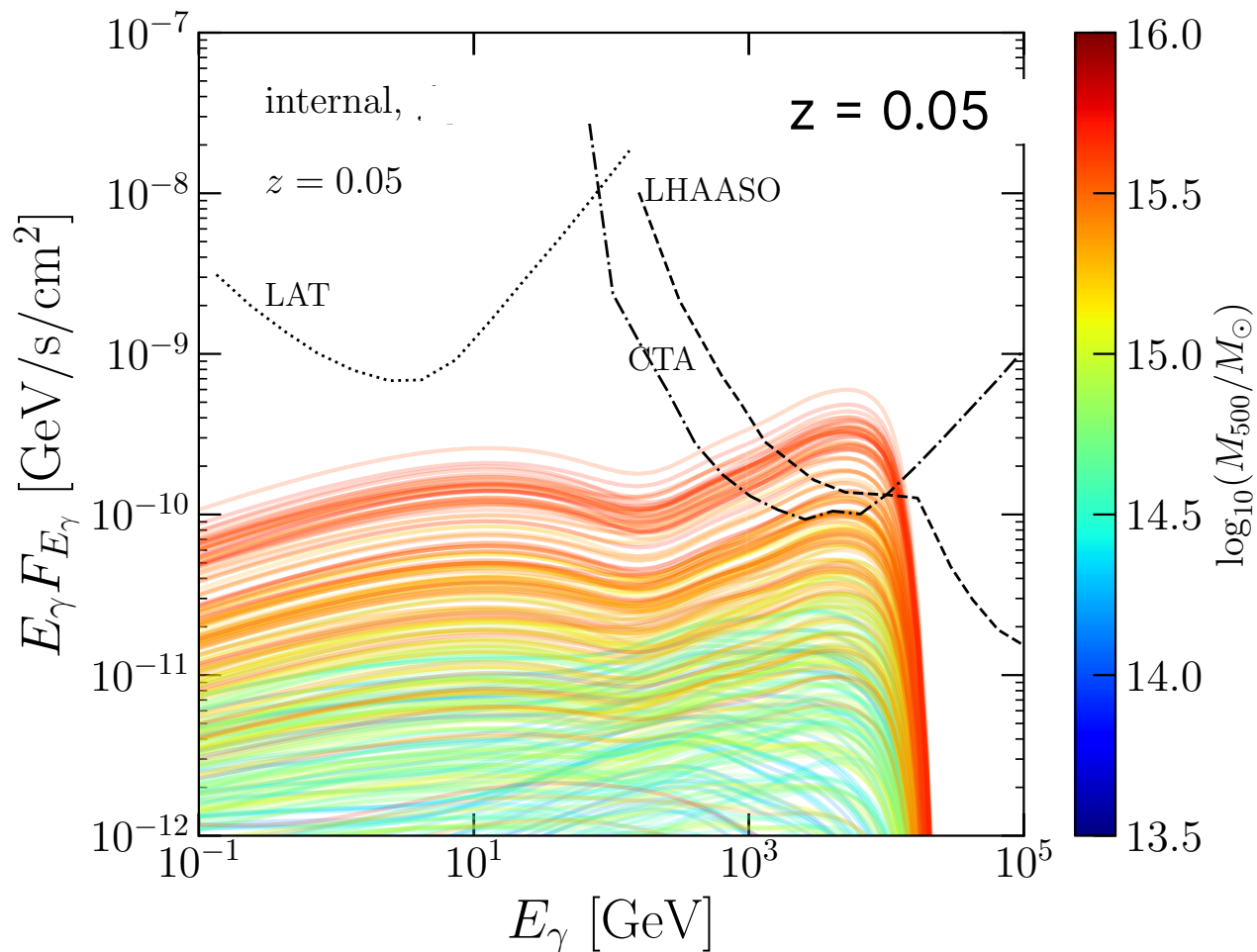


CR陽子あり

merger: $z = 0.05$

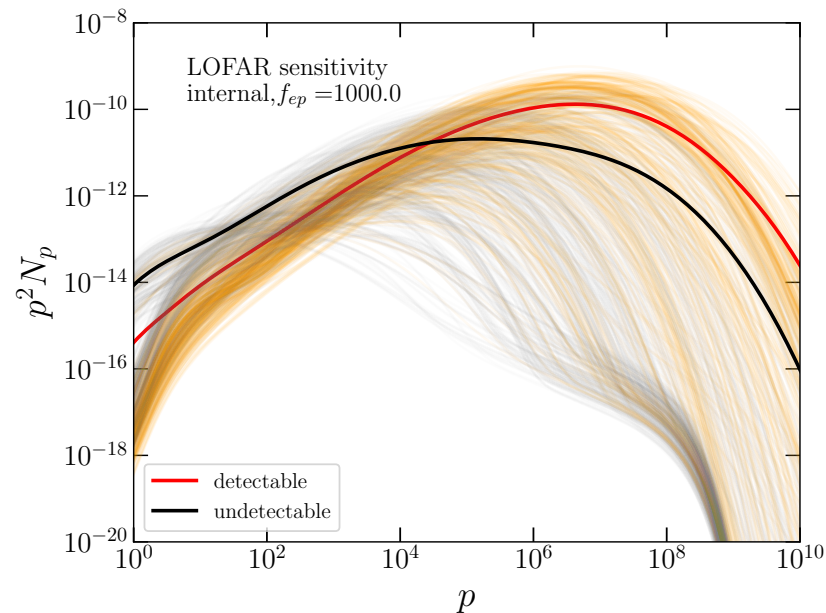


期待されるガンマ線: CR陽子あり



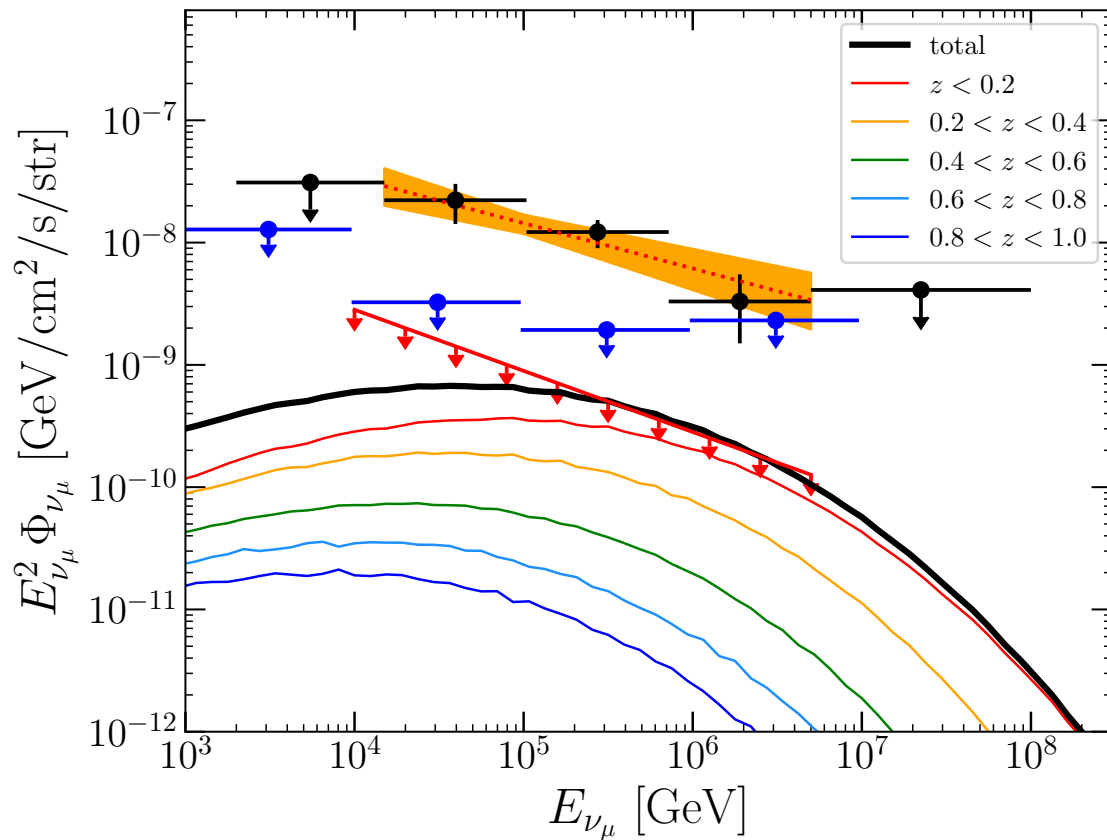
$$T_{dur} \gtrsim 10 t_{acc}$$

長時間の再加速にさらされ、
陽子のスペクトルがハードになる



- 十分近傍の大質量銀河団からのTeVガンマ線放射はLHAASOやCTAで観測できる可能性がある
- 全天の観測可能数はLHAASO感度で~1個程度
(3倍の感度で~10個程度)

期待されるニュートリノ: CR陽子あり



注入率: $L_{CRp} = 10^{41}$ erg/s

Planck-SZカタログに対するIceCube muon eventのstacking analysisから得られた上限値(青色)と整合的

1. 近傍の大質量銀河団はニュートリノ背景放射の主な起源にならない
2. ニュートリノ上限から
 $L_{CRp} > 10^{42}$ erg/sのモデルを棄却
(given B, t_{acc}, T_{dur})

将来観測で上限がさらに厳しくなれば、陽子注入率や磁場をさらに制限できる

単純な再加速モデルの困難

宇宙線注入率が小さすぎる！

minimum mass ratio of RH-clusters [Cassano+2016]

	L_{CRe} [erg/s]	L_{CRp} [erg/s]	γ_{min} (electron)	ξ_{th}	T_{dur}/t_{eddy}
CR陽子なし	10^{41}	0	10^3	0.2	4.0
CR陽子あり	10^{41}	10^{41}	10^3	0.2	4.0

$\ll 10^{44}$ erg/s

(星形成率や、衝撃波のkinetic energyから期待される値)

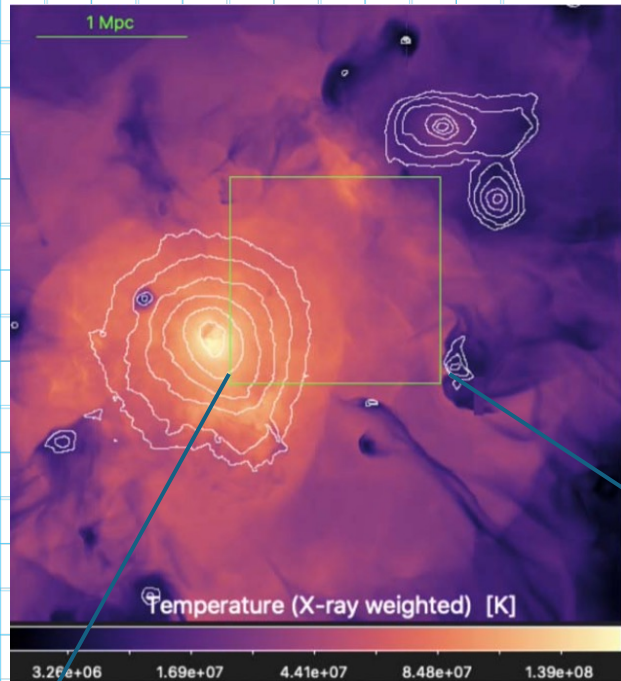
$\gamma_{min} = 10^2 - 10^3$ in observations and simulations of radio galaxies [Carilli+, Turner+, Hardcastle+, Ohmura+]

~ 3-4 Gyrs since merger

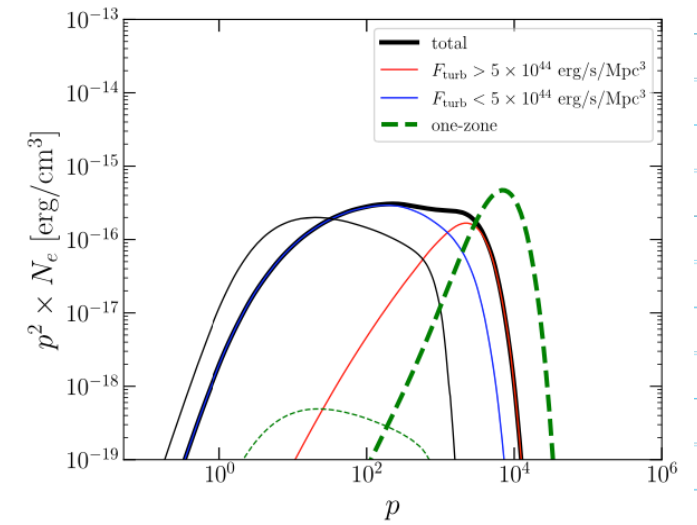
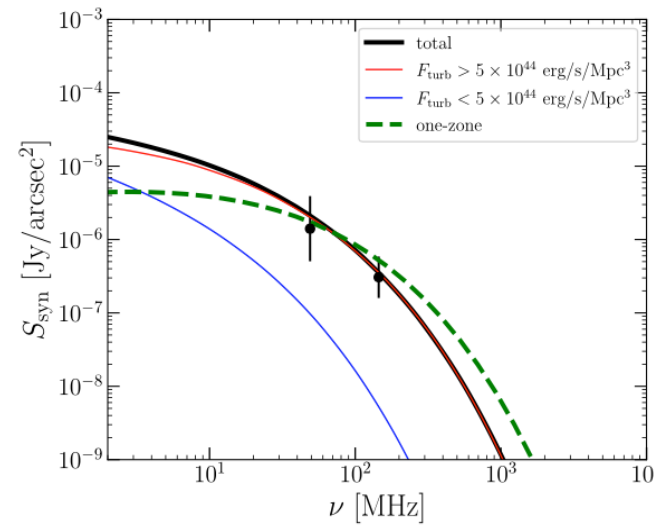
乱流や磁場分布の“ムラ”により有効体積が小さい？
or 銀河からの宇宙線供給や衝撃波加速の効率が悪い？

乱流の分布を考慮したメガハローモデル

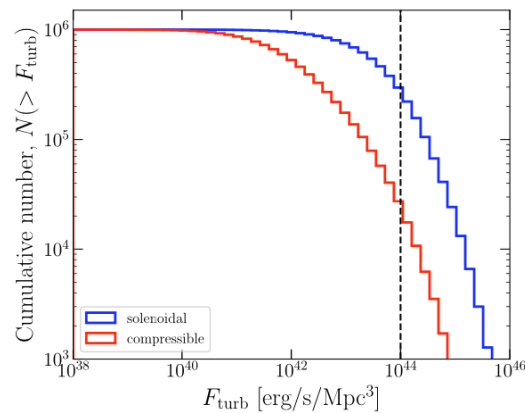
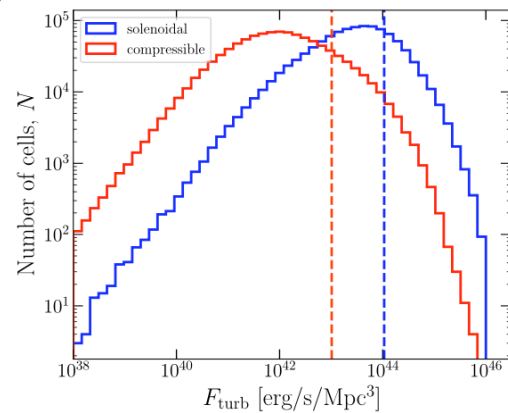
[Nishiwaki+2024]



観測のビームサイズを考慮して視線方向に積分



メガハロー領域の乱流分布



↑

- 放射のほとんどは乱流の強い一部の領域(赤線)で稼いでいる
- 大部分の低エネルギー電子(青色)からの放射は見えていない
- 平均値を用いたone-zoneモデル(緑色)では、ハードで鋭いピーク(放射に効く成分)を持つ電子分布を予言しがち

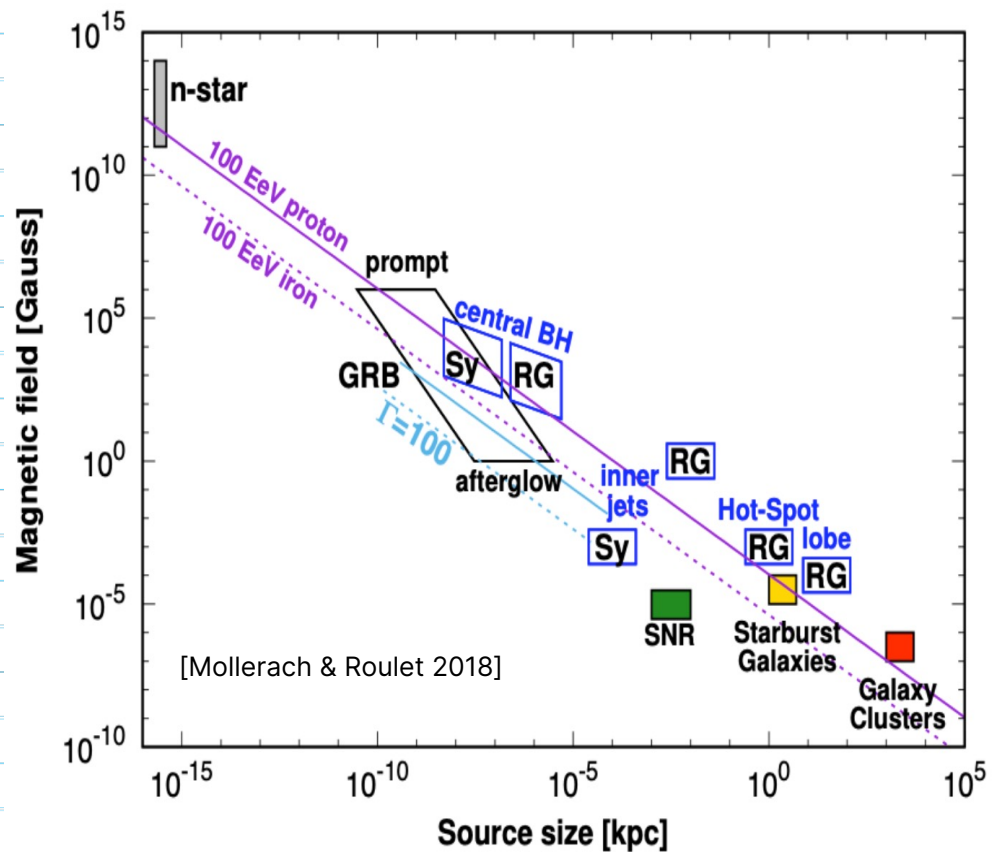
まとめ 2 : 再加速モデルとCR陽子

- 再加速モデルで電波ハローの発生を再現
- 「銀河団衝突のモンテカルロ計算」 「運動量 1次元+空間 1次元 FP」
- 電波に寄与する 2次電子(10GeV)、IceCubeニュートリノ(PeV)、それぞれの起源となるCR陽子のエネルギーは5桁以上の差がある。
- 広いエネルギー幅でCR陽子がどのようなスペクトルになっているかは極めて非自明
- 電波で規格化したモデル → **銀河団はニュートリノ背景放射の起源にならない**
- $T_{dur} \gtrsim 10 t_{acc}$ が必要となるため、もしCR陽子が同じメカニズムで再加速されていれば、そのスペクトルはハードになる → **TeV - PeVのガンマ線・ニュートリノ放射?**

再加速モデルでは、陽子の注入が抑えられてなければならない。
非一様な再加速? 降着衝撃波は粒子加速できない?

最高エネルギー宇宙線の起源
になりうるか

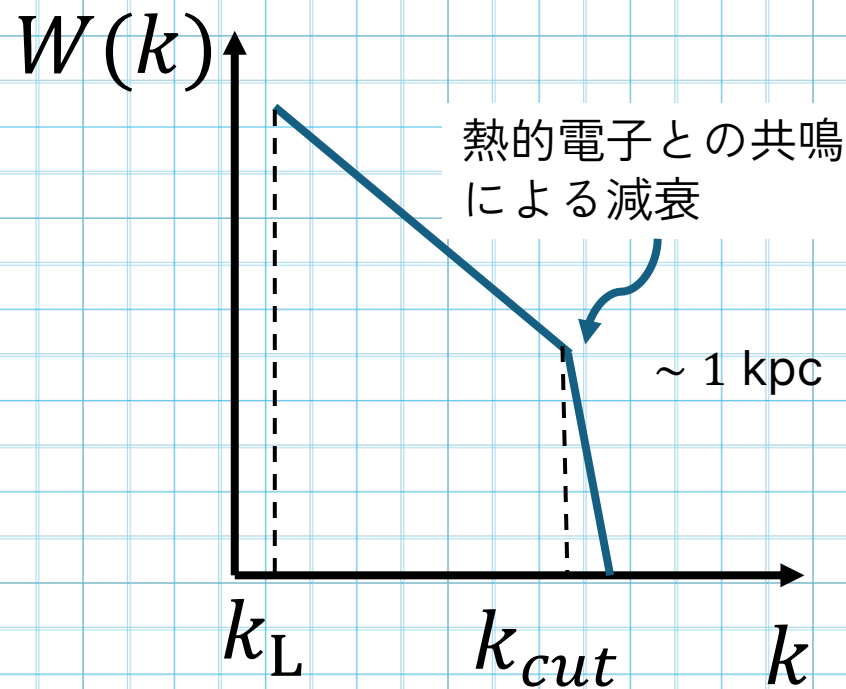
Hillas diagram



- 銀河団をMpcサイズの加速器だと思えば、UHECRの起源になりうる
- Mpcのラーモア半径の粒子を効率よく加速するメカニズムがあるか？

乱流再加速モデル

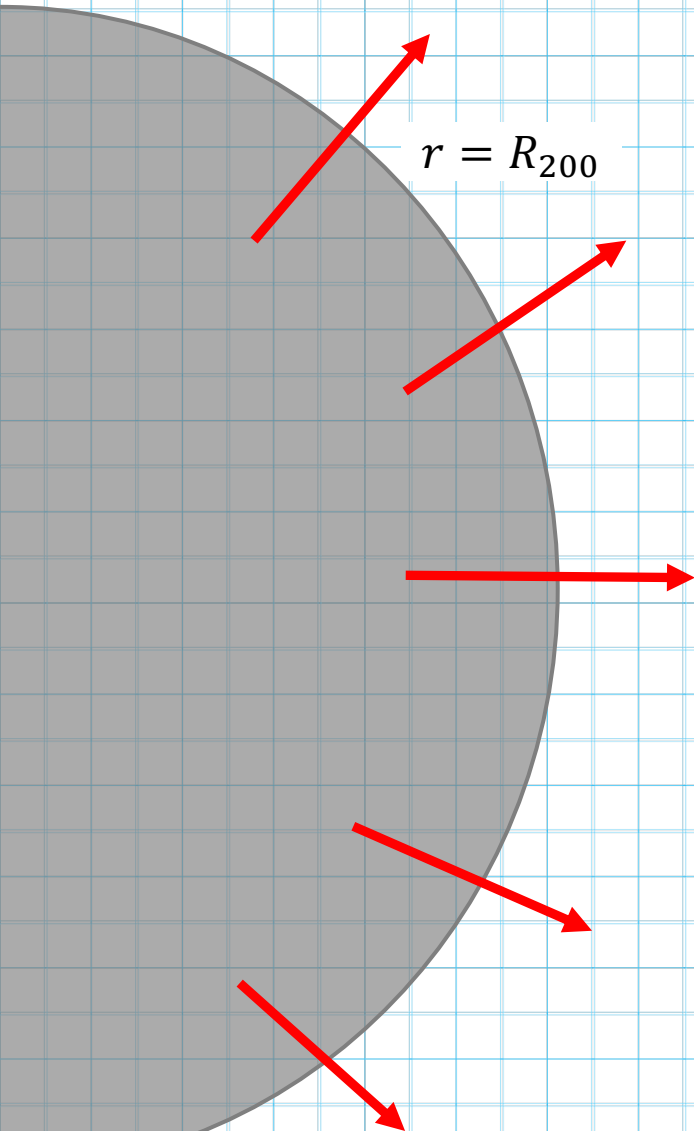
$$\text{TTD} \quad \dots \quad \omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = 0$$



$$E_{max} \sim 10^{17} \text{ eV } Z \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{L_{max}}{1 \text{ kpc}} \right)$$

乱流のeddy-sizeで制限されるなら、~100PeVまで電波ハローの乱流再加速モデルでは、UHECRの加速は期待できない

高エネルギー宇宙線のone-zoneモデル



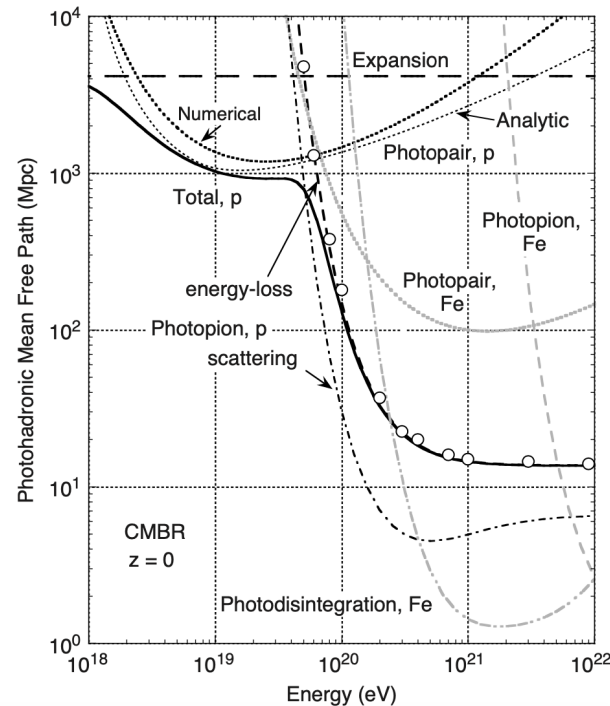
diffuse escape flux

$$F_{CR} = -D_{rr} \frac{\partial n_{source}}{\partial r}$$

簡単のため陽子のみ考える

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} n_p) + Q_p$$

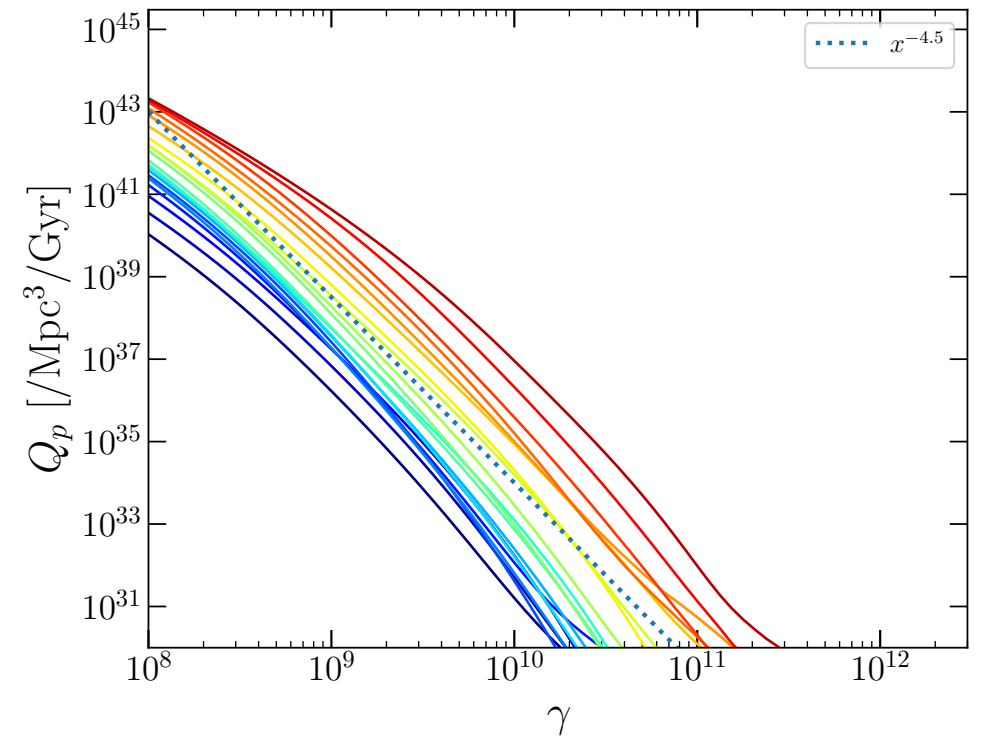
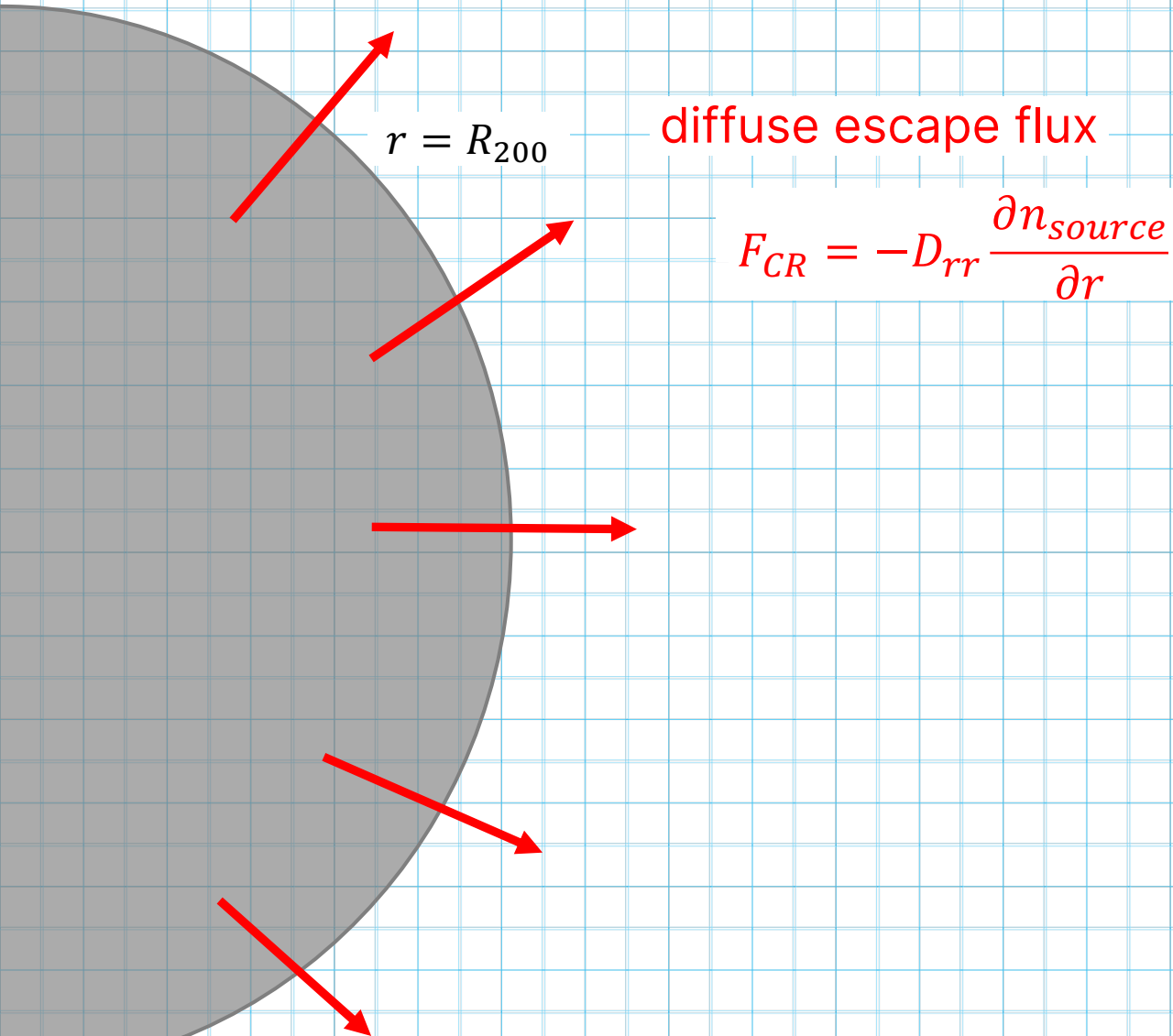
n : comoving number density of CRp



cooling process:

- BH loss
- photo-meson loss
- adiabatic loss

Injection (escape) spectrum



最高エネルギー(~100PeV)以上で
softなスペクトル

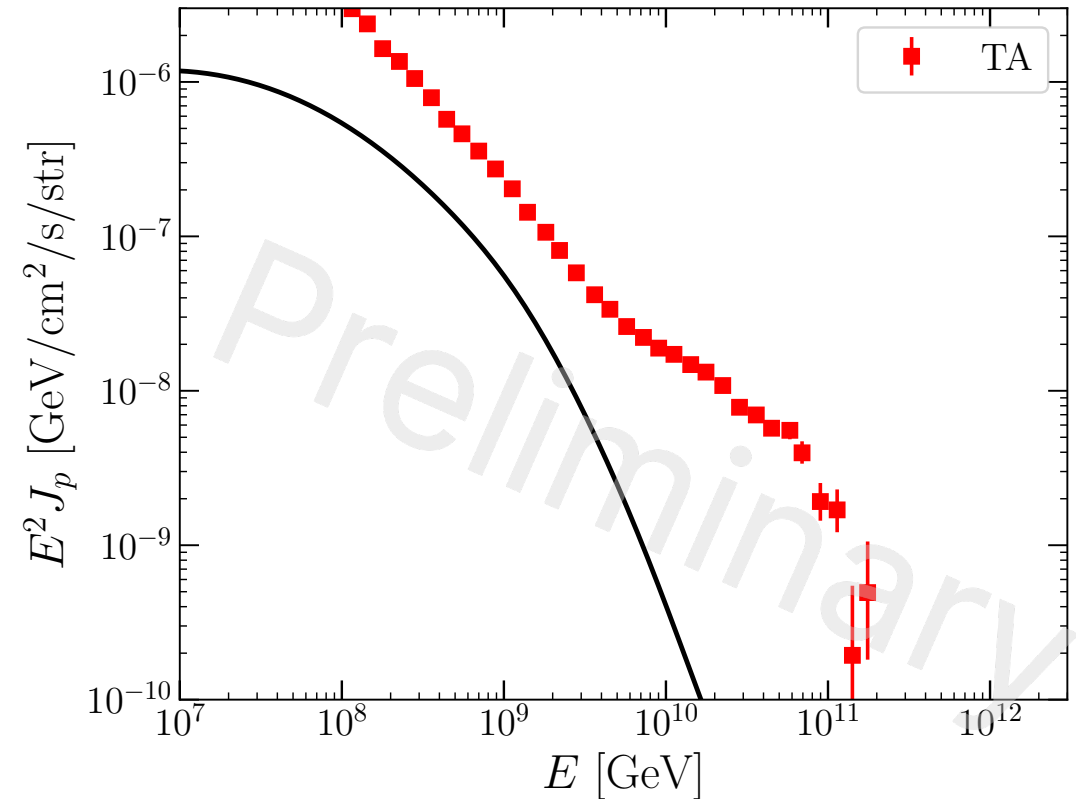
background intensity

宇宙全体の宇宙線密度進化のonezoneモデル

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} n_p) + Q_p$$

- ~1EeV付近のフラックスは観測とコンパラ
- Ankleより上のエネルギーでの寄与は無視できる

陽子のみ



再加速モデルでは、UHECRを加速できないが、
~1EeV宇宙線までは作れる？

全体のまとめ

- 究極目標 (学部生でもわかる目標) ... 宇宙線起源の解明、ダークマターの正体
- 銀河団は宇宙論と宇宙物理の両方で面白い
- 電波放射の起源 ... 「再加速モデル」 vs 「2次電子モデル」の論争が長年続いている
- 衝突との相関、急峻なスペクトル、メガハローの存在など、再加速モデルに有利な証拠が揃ってきている
- しかし、再加速モデルでは宇宙線陽子の注入を抑えなければならない
- パッチーな乱流、hard-sphereではない加速メカニズム、multi-phaseなガス降着による衝撃波加速の抑制、などなど、まだ研究されていないテーマに関連
- たぶん電波ハローは「電波銀河のおまけ」みたいな放射

おわり

テスト計算：power-law injection

$$N_p \propto \gamma^{-2}$$

