



**最高エネルギー宇宙線と
バースト・フレア天体**

村瀬孔大

(京都大学基礎物理学研究所博士課程2年)

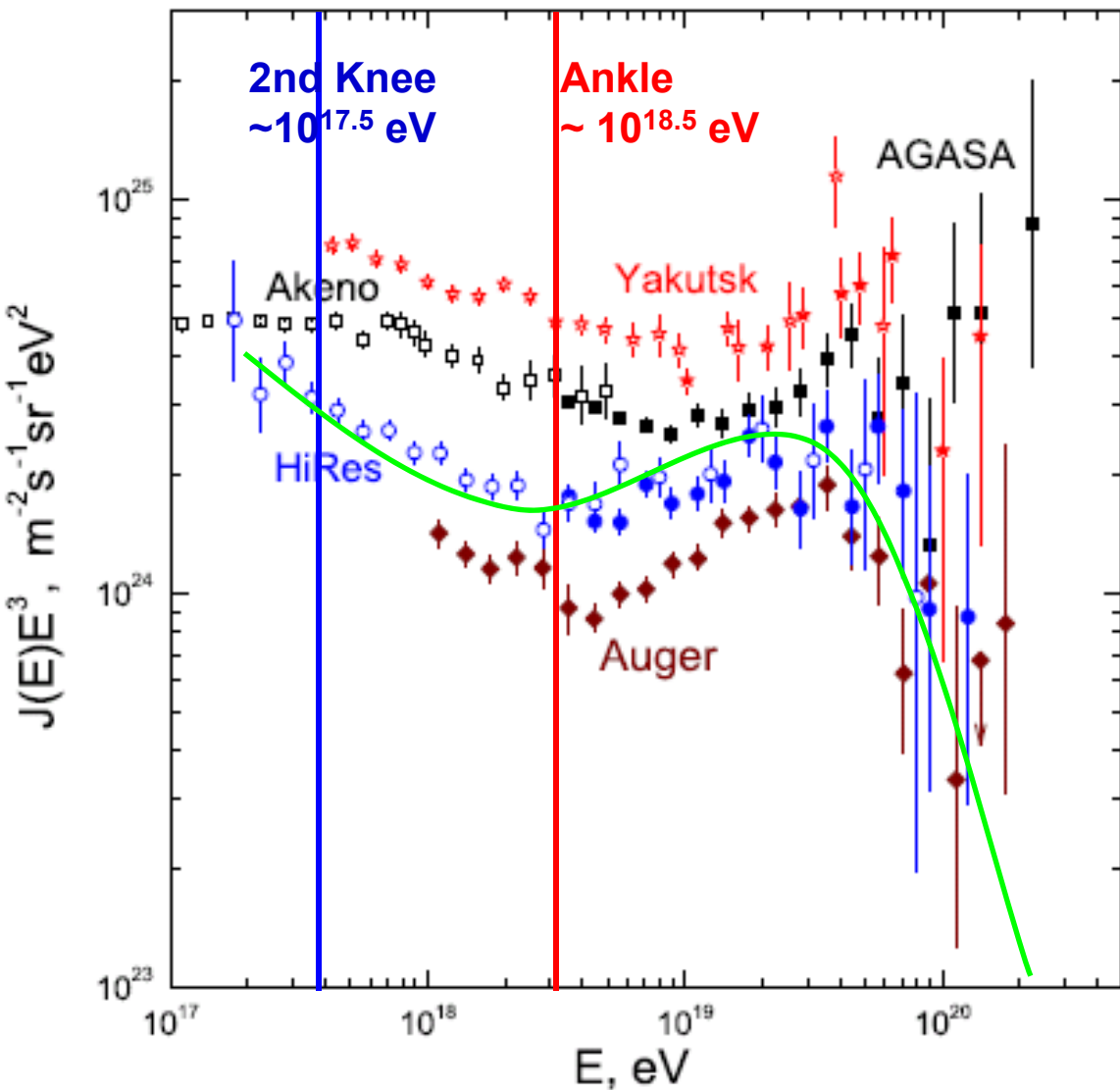
共同研究者: 高見一, Peter Meszaros, Asaf Peer

青井順一、浅野勝晃、井岡邦仁、市来浄興、井上進、佐藤勝彦、高橋慶太郎、
当真賢二、長滝重博、中村卓史、Fabio Iocco, Pasquale Serpico, Bing Zhang

理論懇シンポジウム, 17/Dec/2008



Ultra-High-Energy Cosmic-Ray Spectrum



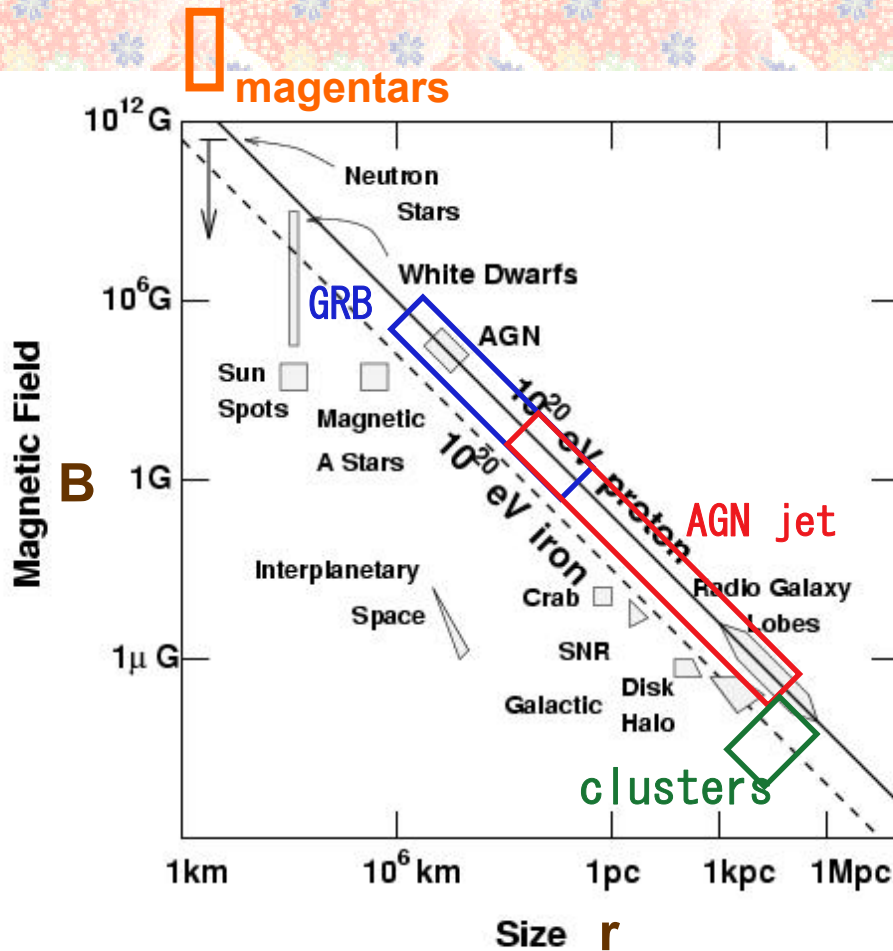
情報

- スペクトル(e.g., Ankle)
- 組成は何か?
- 到来方向

問い

- ソースは何か?
- そしてどうやって宇宙線が作られているか?

Astrophysical Cosmic-Ray Accelerators



Source candidates

The most extreme objects!



AGN

宇宙最大BH
 $M_{BH} \sim 10^{6-9} M_{sun}$



GRBs

宇宙最強爆発
 $E_{GRB} \sim 10^{51}$ ergs



Magnetars

宇宙最強磁場
 $B \sim 10^{15}$ G



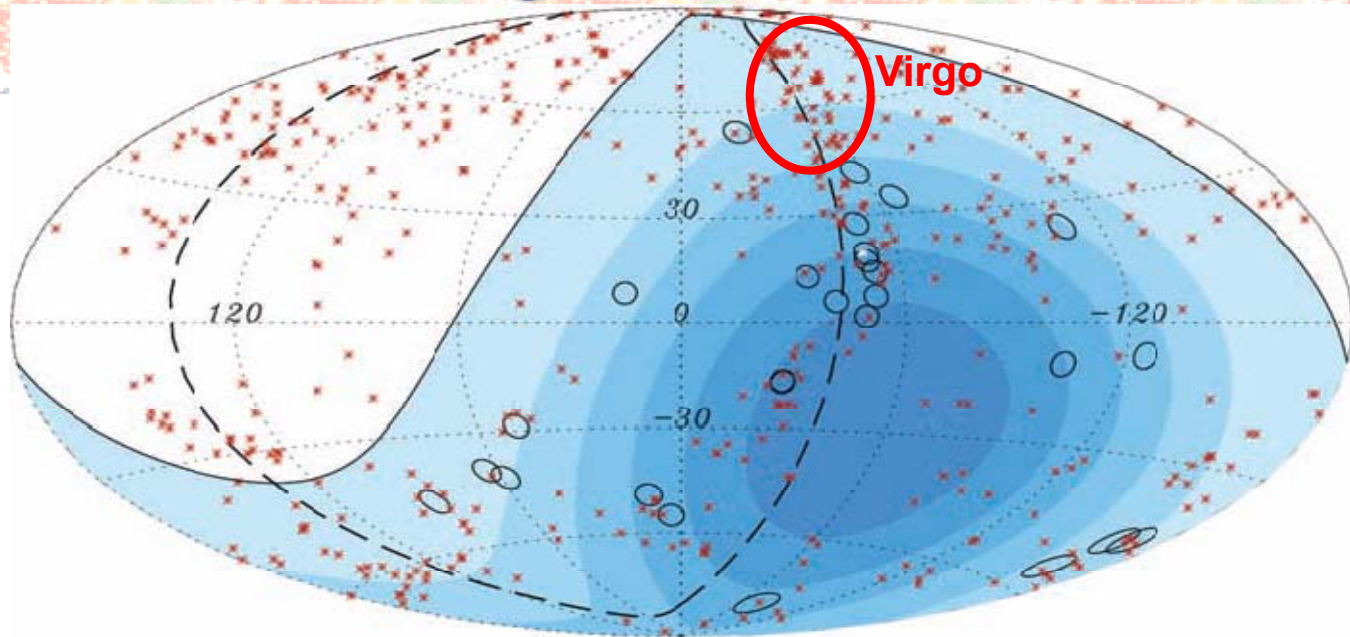
Cluster

宇宙最大重力束縛天体
 $r_{vir} \sim$ a few Mpc

Hillas condition $E < e B r \beta$
 “必要”条件 (最大エネルギー)

(井上さんのトラペより)

Augerの結果



- UHECRスペクトル中のGZK-like features (PAO, PRL, 08)
- 3σ 程度の非等方性 ($E > 57 E_{eV}$) (PAO, Science, 08)
- 大規模構造をトレース ($\varphi < \text{a few}^\circ$) ← (東大グループ、高見さんの講演)
AGNとの相関 (PAO, Astropart. Phys., 08 etc.),
銀河との相関 (Kashti & Waxman, JCAP, 08, Ghisellini +, MNRAS, 08, Takami+, 08)
- Compositionはよくわからない (proton & light nuc. vs heavy nuc.)
- Cen A方向からのイベント、Virgo方向からのイベントの欠如

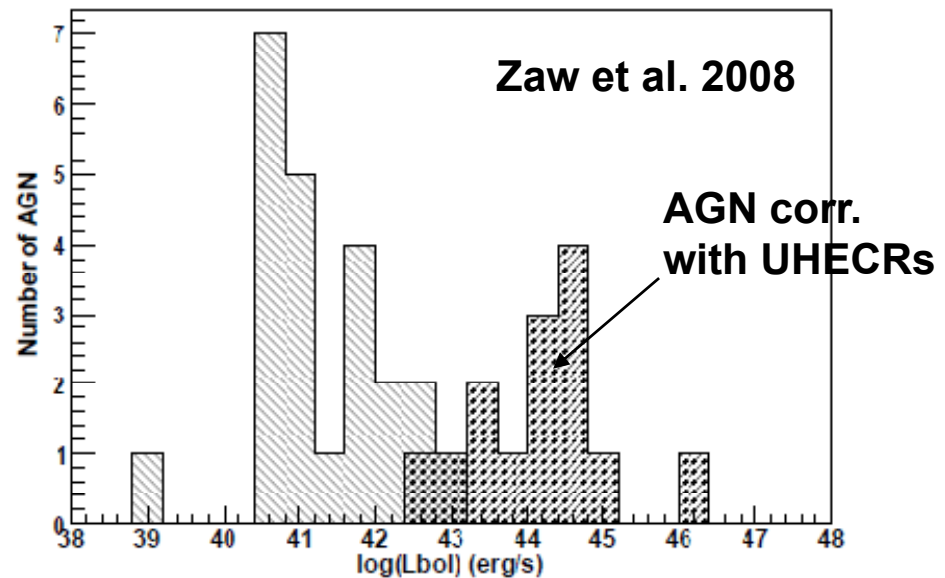
AGNでの衝撃波加速とジレンマ

- AGNでの衝撃波加速モデルの一つ(定常ソース)
internal shocks in jetsで衝撃波加速 → $p\gamma$ 反応で $p \rightarrow n$ にする
→ neutron escape → lobeの磁場で曲げる

- 加速の必要条件 (Hillas条件)
 $E < eBr\beta$, $B^2/8\pi = L_B/4\pi r^2 \Gamma^2 \beta c$
必要なmagnetic luminosity
 $L_B > 10^{46} \text{ erg/s } (\Gamma/3)^2 \beta^{-1}$

FR II $L_{\text{jet}} > 10^{45} M_9 \text{ erg/s}$
(パワー大、数が足りない)

FR I $L_{\text{jet}} < 10^{45} M_9 \text{ erg/s}$
(数は十分ある、パワー小)



- 相関AGNは暗い($L_{\text{bol}} < 10^{45} \text{ erg/s}$)
相関AGNはSeyfert, LINER... (Moskalenko+ 08)

AugerによるUHECR観測からもたらされている情報

1. Anisotropy (small scale and large scale)
2. Correlation with the matter (normal/spiral galaxies or AGNs)
3. Composition (light or heavy)

今回の前提
Augerの結果を全力で信じる

注意！！
まだ数が少なすぎる！

系外ソース

重い原子核

GRB, Hypernova, AGN (Cen A)

Cluster of Galaxy, Starburst Galaxy

「銀河磁場などによって強く曲がりうるので
物質分布との相関を再現するのは自明でない」

陽子(+軽い原子核)

定常ソース

AGN

AGN以外
未知のソース?

衝撃波加速

「FR I はエネルギー不足気味、
FR II は数が少なすぎる」

非衝撃波加速
???

非定常ソース

GRB

Magnetar

AGN Flare

未知のソース?

「電波銀河との明らかな相関は見えてない」

調べたいこと

非定常宇宙線ソースは一つの有力な可能性

- 最高エネルギー宇宙線の観測から非定常ソースについて何がいえるのか？
- 非定常宇宙線ソースの検出可能性

最高エネルギー宇宙線源が満たすべき条件

2つの条件

- 最高エネルギー($\sim 10^{20}$ eV)まで加速できること
Hillas条件以外にソースの磁場や光子密度などに依存
加速メカニズムにも依存
- 十分な宇宙線の数を供給できること
非定常ソースのとき、
(観測されている宇宙線の数)
=(バースト発生率) × (バースト1発が作る宇宙線の数)

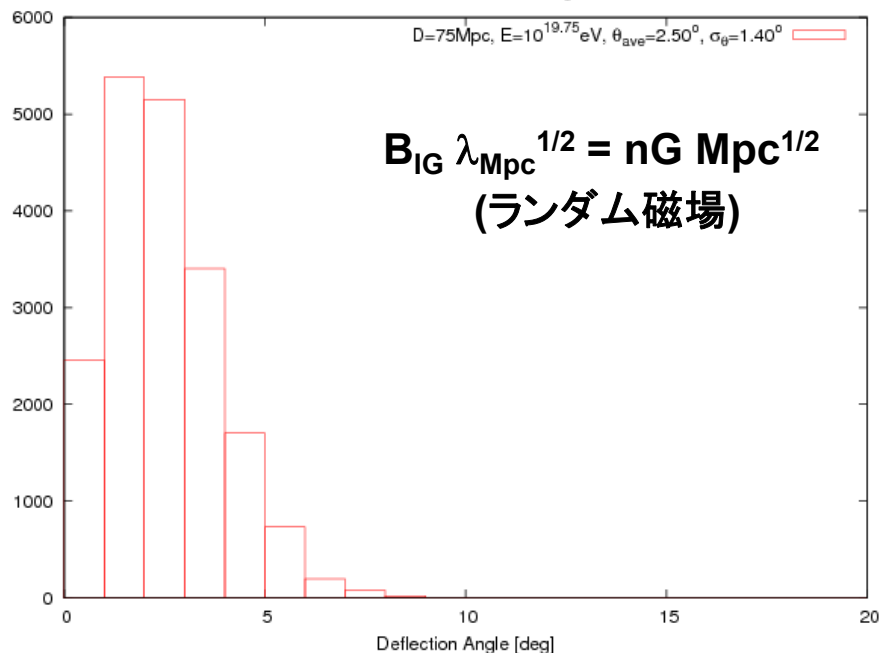
縮退→UHECRの観測で”ある程度”解くことができる

最高エネルギー宇宙線の性質

- UHECRは(多分)少し曲がってやってくる

$$\theta_d \approx \frac{\sqrt{2}ZeB_{EG}D}{3E_N\sqrt{D/\lambda}}$$

$$\simeq 2.5^\circ Z_1 E_{N,20}^{-1} B_{EG,-10} \lambda_{\text{Mpc}}^{1/2} D_{100}^{1/2} \text{ Mpc};$$



- 時間的にも遅延する
- (見かけの継続時間) ~ (宇宙線の遅延時間)

↑pathの効果+photomeson反応の効果

$$\sigma_d \sim \bar{t}_d \approx \frac{D\theta_d^2}{4c} \simeq 10^5 \text{ yr } E_{20}^{-2} D_{100}^2 \text{ Mpc } B_{\text{IG},-9}^2 \lambda_{\text{Mpc}}$$

非定常宇宙線ソースへの制限

$$(\text{見かけのソース密度}) = (\text{見かけの継続時間}) \times (\text{バースト発生率})$$

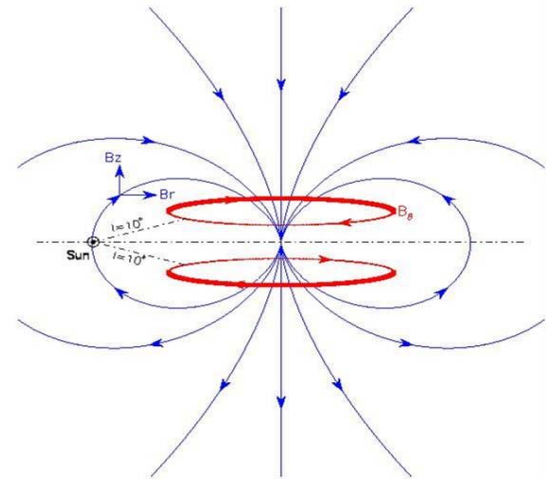
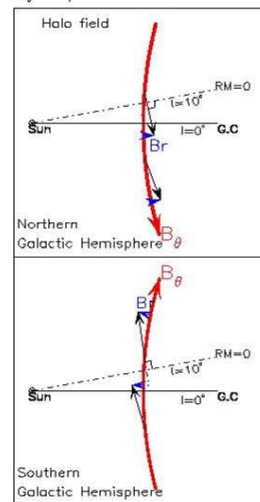
体積あたり

- 見かけのソース密度は観測で見積もられる ← 詳細は高見講演
Auger Era: $n_s \sim 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$ (e.g., Takami & Sato 08, Cuoco+ 08)
- 見かけの継続時間を制限すればバースト発生率を制限できる

ポイント

- 銀河内磁場は避けられない
(disk磁場 $B_G \sim \mu\text{G}$
+ “possible” dipole磁場)

$B_\theta + B_r$ viewed from Sun



- 特に銀河間磁場の強さはよくわかっていない。だが、磁場(銀河間 + 銀河内)が強すぎるとAugerの示唆($\varphi \sim \text{a few}^\circ$)に矛盾

- 銀河内及び銀河間磁場を考慮してUHECRの伝播を計算

(photomeson反応など考慮) (Yoshiguchi+ 03, Takami & Sato 07)

→ Augerの観測に矛盾しないようにUHECR fluxに寄与しているバーストの発生率を制限 **KM & Takami, ApJL, 690, L14 (2009)**

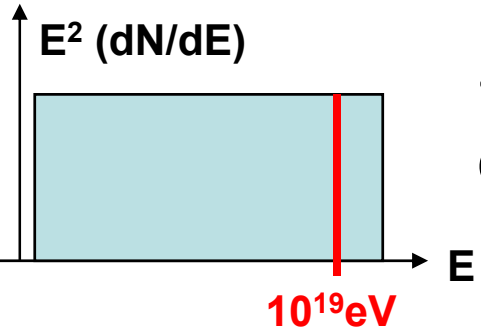
$$0.1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \lesssim \rho_0 \lesssim (60-3000) \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}.$$



- 観測されているスペクトルとfit→宇宙線の量が決まる

→バースト一発あたりの宇宙線の量が発生率と同時に決定

$$(0.3-20) \times 10^{50} \text{ erg} \lesssim \tilde{\mathcal{E}}_{HECR}^{iso} \lesssim 10^{54} \text{ erg. at } 10^{19} \text{ eV}$$



•宇宙線の全エネルギー E_{CR} はもっと大きいだろう
 $dN/dE \propto E^{-2}$ ならば $E_{CR} \sim \ln(10^{12} \text{ GeV/GeV}) E_{HECR}$

$$10^{51} \text{ ergs} \lesssim \mathcal{E}_{CR}^{iso} \lesssim 10^{55.5} \text{ ergs}$$

非定常宇宙線ソースへの示唆

KM & Takami, ApJL, 690, L14 (2009)

High Luminosity GRB

通常のロングガンマ線バースト
(Waxman 95, Vietri 95)

Low Luminosity GRB

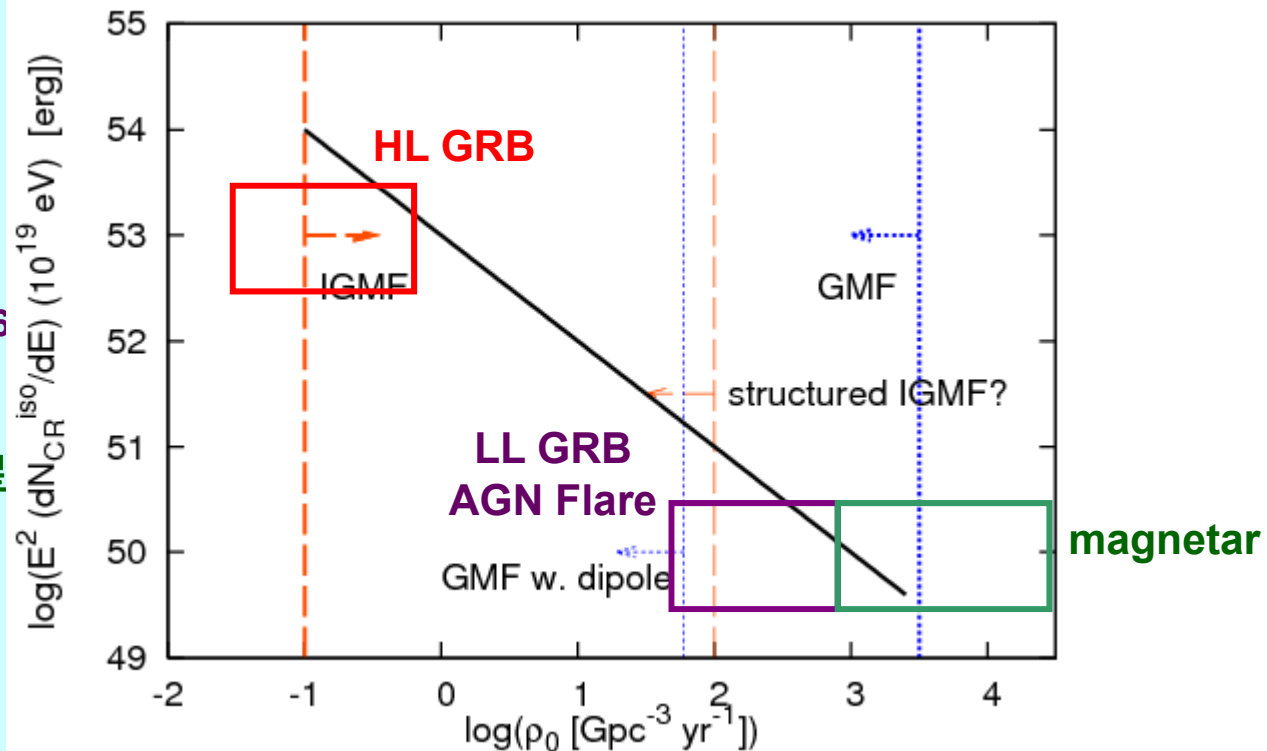
光度の暗いガンマ線バースト
(KM, Ioka, Nagataki, & Nakamura 06)

Magnetar

誕生直後(~ms)の強磁場中性子星
(Arons 03, Ghisellini+ 08)

Giant AGN Flare

10^{4-5} yrに一回程度~dayでフレア
(Farrar & Gruzinov 08)



例えあるソースの一部だけがUHECRに寄与しているのだとしても
バースト一発あたりのエネルギーは結構大きくなければならない！

不定性大だが構造磁場は重要 if $\sim 3 \text{ Mpc w. nG} \rightarrow < 100 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$

まとめ

Augerの結果に基づいて、非定常ソースの可能性を一般的に考察

バースト発生率とバースト1発で作られる宇宙線量への制限

- 銀河磁場の重要性を指摘(dipole磁場があると制限厳しい)
- 構造磁場もかなり重要(まだ途中)
- エラーの評価、光度関数の影響、重い原子核の影響など
→より詳細な研究が必要(まだ途中)

非定常ソースだと結構明るくならない

- 非熱的電子が非熱的バリオンの10%以上のエネルギーがあれば
X線やガンマ線で見える可能性有 (EXIST)
- ハドロンのシグナルはソースの環境(磁場や光子密度)に依存する
ニュートリノがわかる可能性も有 (IceCube, KM3Net)

起源について(個人的意見)

非定常ソース

一つの有力な可能性(といわれている)

バースト一発あたりのエネルギーが結構たくさん必要!

- HL GRBは候補の一つだが、energetics的に苦しめ
- Giant AGN Flareは今まで観測されていないことが問題(→Fermi?)
- LL GRB or magnetar? (効率良いバリオン加速が必要)

定常ソース

- 衝撃波加速でない可能性も十分あるだろう

e.g., 電波銀河のローブやBH (w. RIAF)近傍での非衝撃波加速?

一般にUHEでの原子核の影響の評価が重要(w. 構造磁場)

イベント数がもっと必要なのは自明(→AugerやTA, JEM-EUSO)

High Luminosity GRB

- High-luminosity GRB
 $E_{\gamma}^{\text{iso}} \sim 10^{52-54}$ ergs バースト天体では有名なUHECR起源候補
(Waxman 95, Vietri 95, Milgrov & Usov 95)
- local universeでのガンマ線バーストの発生率(不定性大)
pre-Swift era $\rightarrow \sim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
Swift era $\rightarrow 0.05-0.27 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (fast evolution at $z < 1$)
(e.g., Gueeta & Piran 07, Le & Dermer 07)
後者のとき $\rightarrow E_{\text{CR}}^{\text{iso}} \sim 10^{55}$ ergs 必要、energetics的に厳しい
- ある程度強い銀河間磁場が必要
“もし” $B_{\text{IG}} \lambda_{\text{coh}}^{1/2} < 0.1 \text{ nG Mpc}^{1/2}$ だと無理
- Prompt放射領域で宇宙線つくとニュートリノとガンマ線が出る
 \rightarrow testable (e.g., KM & Nagataki 06, Asano, Inoue, & Meszaros, 08)

Giant AGN Flare

- tidal disruption or disk instabilityによって 10^{4-5} yrに1発程度
~ (1-10) dayでflareが起きるかもしれない (Farrar & Gruzinov 08)
- local rate ~ 10^{2-3} Gpc⁻³ yr⁻¹, Flaring AGN $3 \times 10^{-(8-7)}$ Mpc⁻³

注意: optical/x-rayのsurveyで今までに報告されていない

1. ROSAT survey $< 10^{-9} L_{45}^{-2.2}$ Mpc⁻³ for 定常ソース
2. bright AGN 113個中6 yrの観測でtransientは3%以下
(~10 yrでactiveである確率 $< 10^{-4}-10^{-3}$ でconsistent)
3. tidal disruption search → $> 10^5$ yrで1発程度
4. Fermiでうかるかも(optimistic estimate)
~1 day time scale → ~ $30 L_{45}^{3/2}$ events/yr