

***Gamma-Ray and Neutrino Signals from
Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources and
Implications of Ultrahigh-Energy Nuclei
Production in the Sources***

村瀬 孔大
(TIT, CCAPP OSU)

ICRRセミナー



Outline

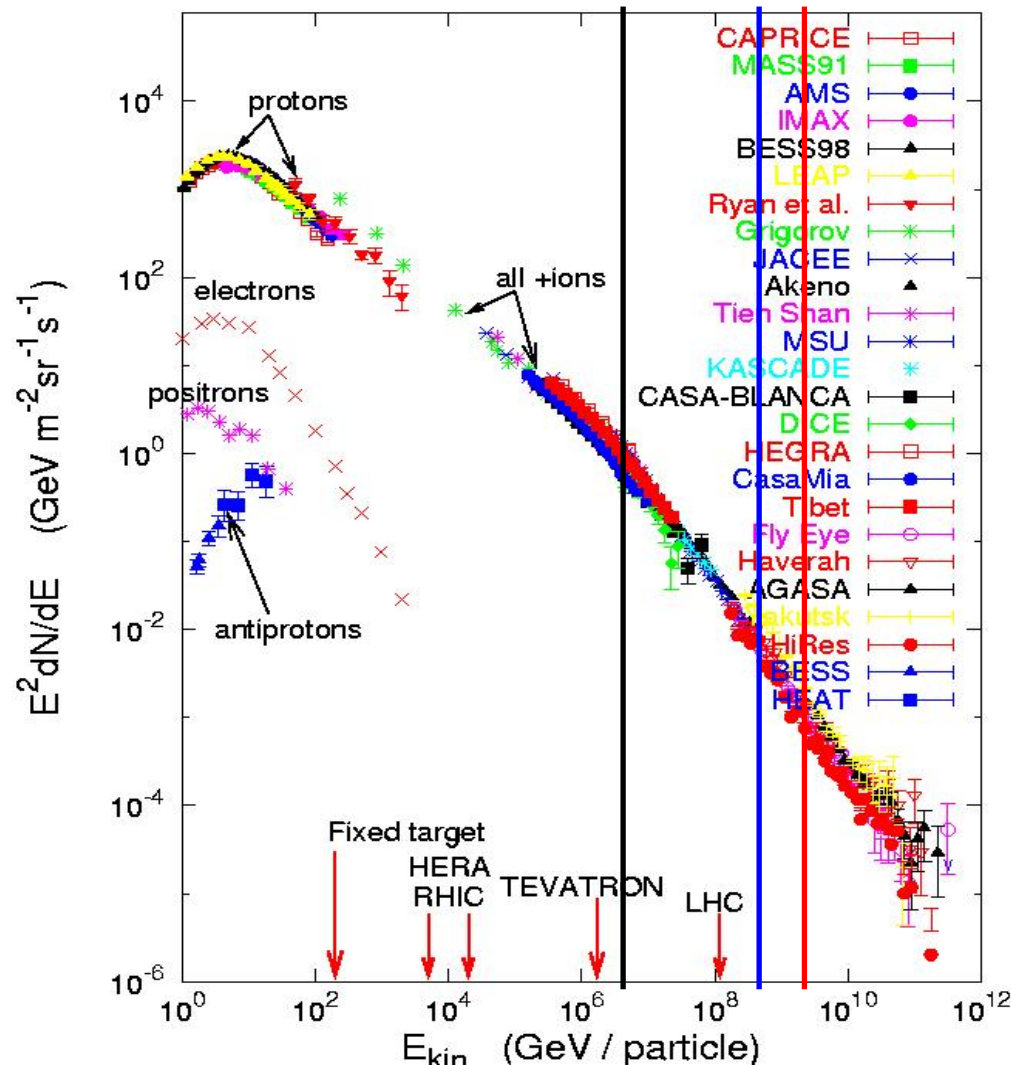
**40年以上謎であるUHECR起源をそろそろ知りたい
最新の観測はソースについて示唆することは何か？**

- 1. UHECR源が非定常である可能性について
非定常UHECR源から期待されるシグナル**
- 2. UHECRが重い原子核である可能性について
重い原子核のとき期待されるシグナル**

**それぞれの場合における決定的なシグナルを提案
近未来へのニュートリノやガンマ線観測への示唆**

Cosmic-Ray Spectrum

Energies and rates of the cosmic-ray particles



Knee $\sim 10^{15.5}$ eV

2nd Knee $\sim 10^{17.5}$ eV

Ankle $\sim 10^{18.5}$ eV

Problems

- 起源?
- 加速機構?

2nd knee以下

系内起源、超新星残骸が有力

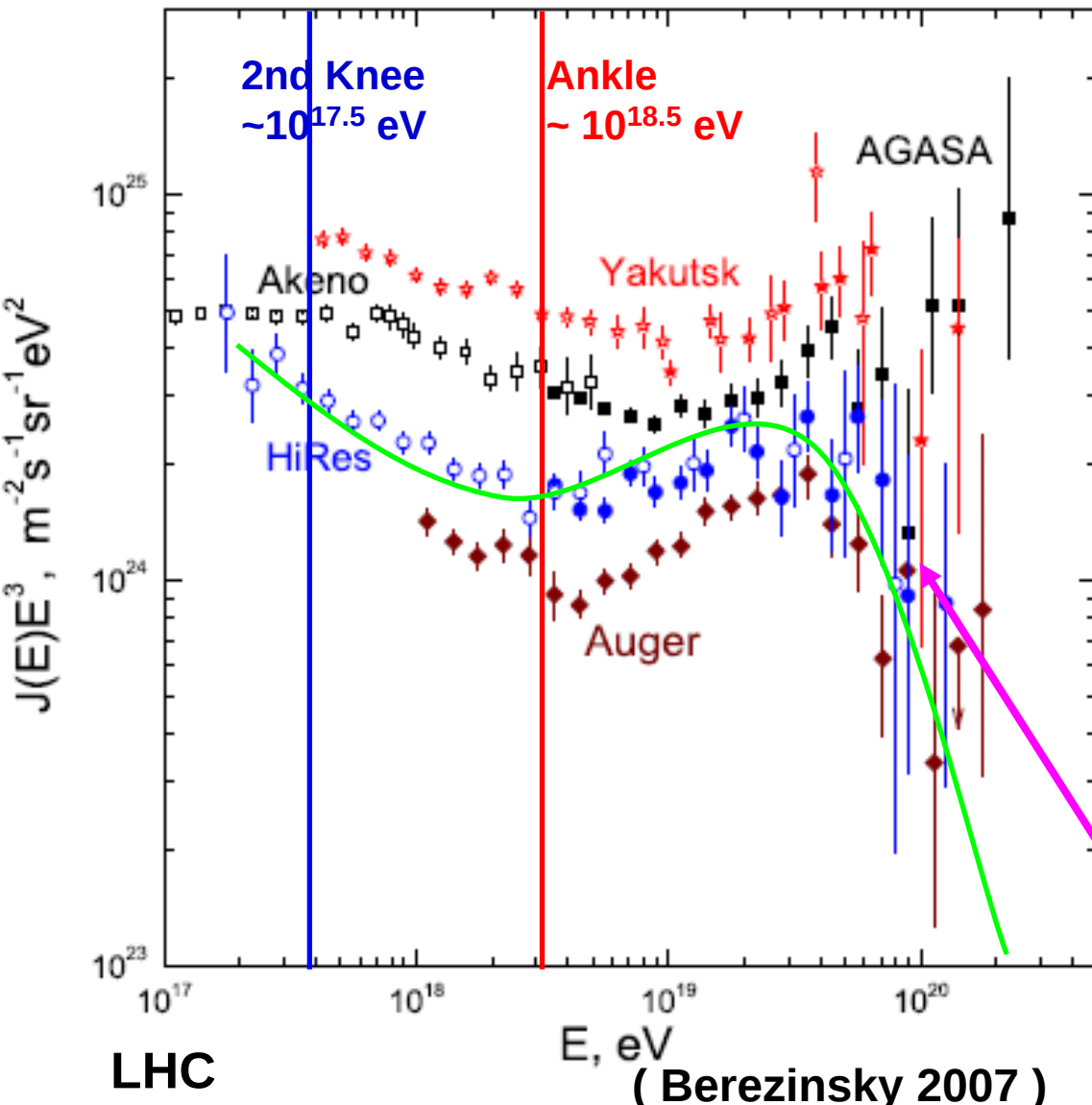
2nd kneeからankle

系内起源か系外起源かも不明

ankle以上

系外起源、有力候補は複数

最高エネルギー宇宙線(UHECR)



UHECR

10^{20} eV ~ 20 J

→地上では実現できない
程の超高エネルギー！！

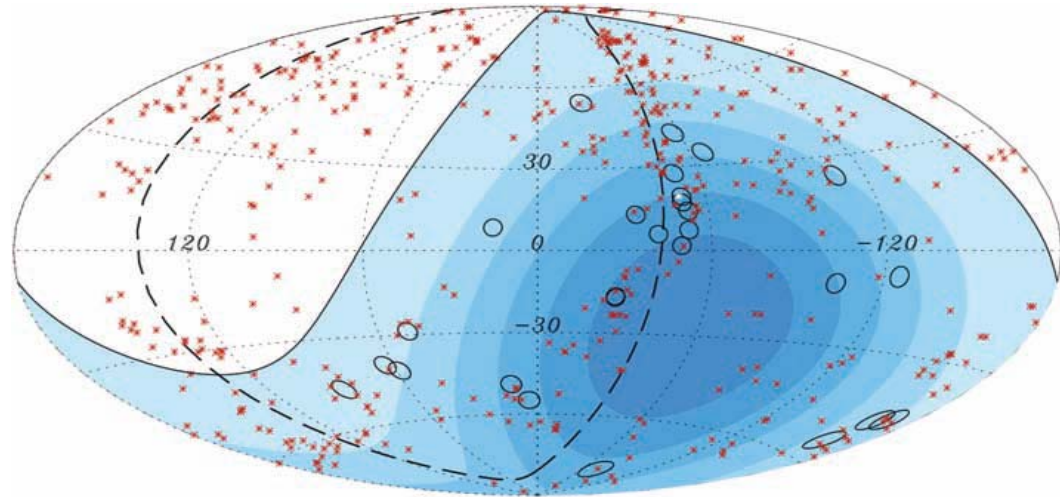
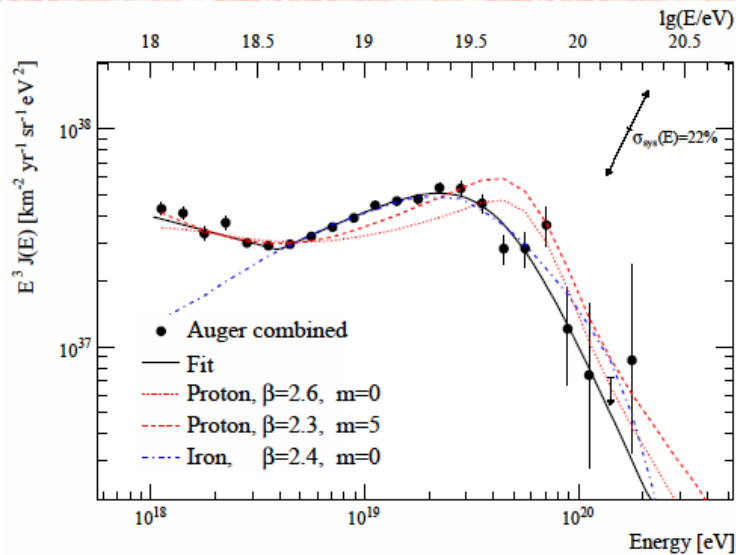
情報

- スペクトル(e.g.,Ankle)
- 組成
- 到来方向分布

GZKカットオフ？

(pとCMB光子の $p\gamma$ 相互作用)
→源は100Mpc以内にある

UHECR 観測の現状=混乱



AugerとHiResによる最新の観測成果

•Spectrum

60 EeV以上でカットオフ (Auger & HiRes)

陽子: GZKカットオフ?, 鉄: photodisintegration(光分解)カットオフ?

•Arrival distribution

60EeV以上で非等方性 (Auger) vs 等方 (HiRes)

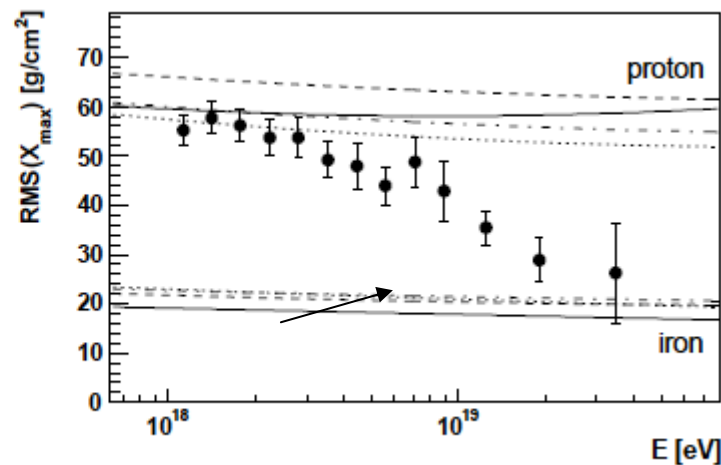
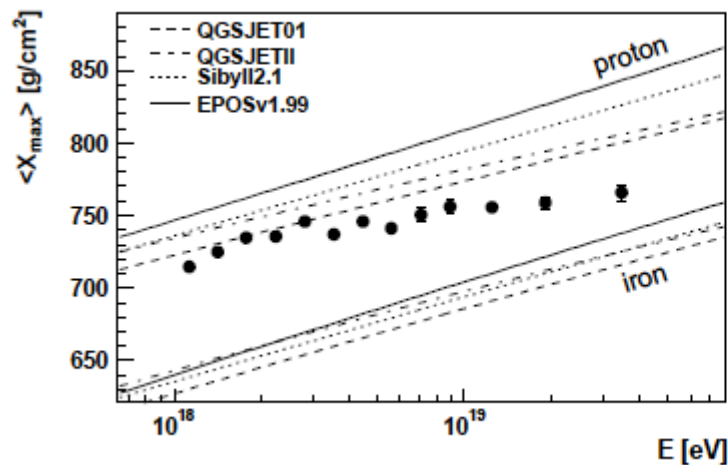
•Composition (ただしハドロン相互作用の不定性大)

陽子 (HiRes) vs 重い原子核 (Auger)

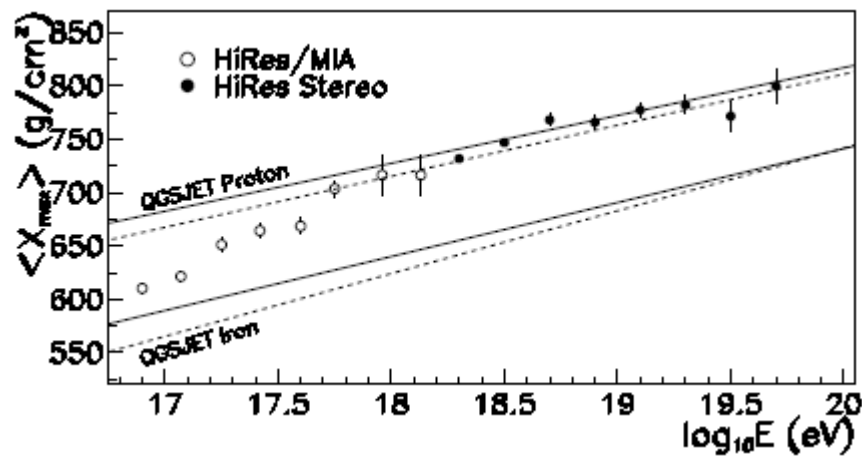
Composition

$X_{\max}$ の平均と $X_{\max}$ の揺らぎの観測

Proton: $X_{\max}$ 大 $\Leftrightarrow$ Iron: $X_{\max}$ 小



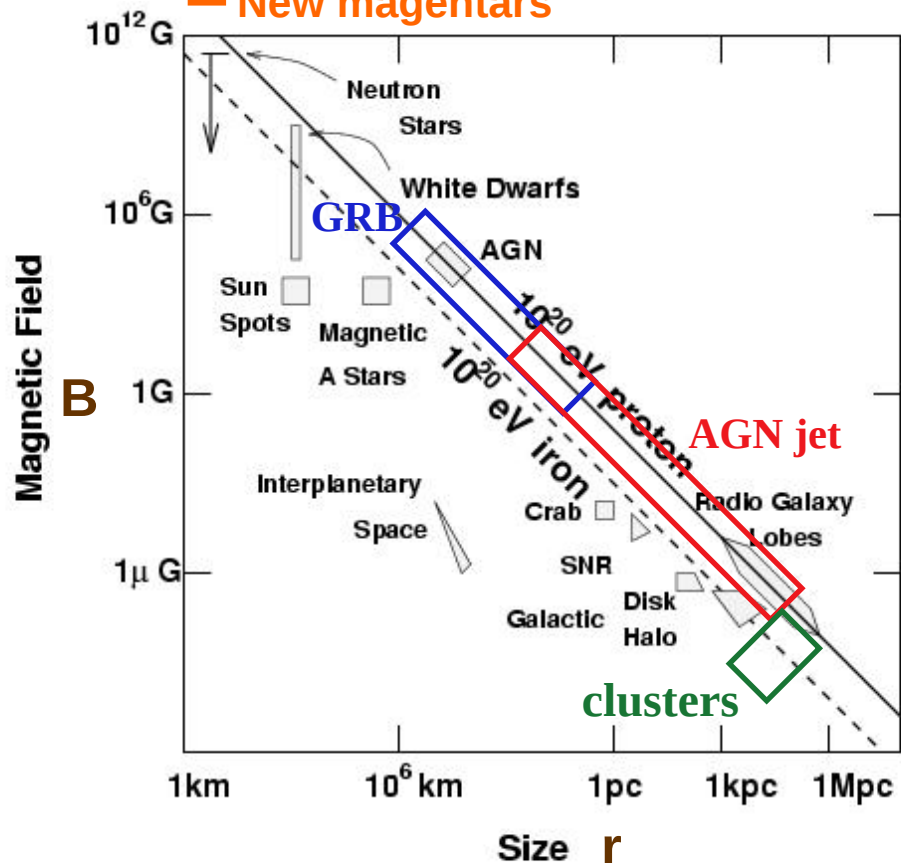
Auger



HiRes

UHECRの起源候補天体

New magnetars



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

New Magnetars



宇宙最強磁場
 $B \sim 10^{15}$ G

GRBs



宇宙最強爆発
 $E_{\text{GRB}} \sim 10^{51}$ erg

AGN



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

Clusters



宇宙最大重力束縛天体
 $r_{\text{vir}} \sim \text{a few Mpc}$

Augerの結果の解釈

- 最高エネルギー陽子加速の必要条件 (Hillas条件)

$$E < eBr\beta, \quad B^2/8\pi = L_B/4\pi r^2 \Gamma^2 \beta c$$

→ 必要なアウトフローの磁場 $L_B \equiv \varepsilon_B L > 10^{45.5} \text{ erg/s } \Gamma^2 \beta^{-1} Z^{-2}$

- 活動銀河 (AGN)=代表的な定常ソース

○AGNや銀河との相関を重視する立場では

1. $L_{\text{jet}} > 10^{45.5} \text{ erg/s}$ のAGN(e.g., FR II銀河)は近傍では少ない

$$(n_{\text{FR II}} \sim 10^{-(7-8)} \text{ Mpc}^{-3} \ll \text{Auger2007: } n \sim 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3})$$

2. 相関しているAGNは暗い

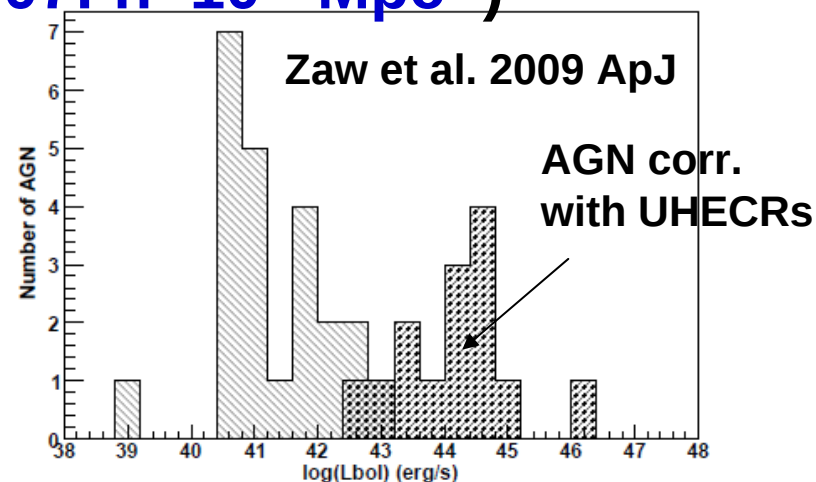
$$(L_{\text{bol}} < 10^{45} \text{ erg/s})$$

→ UHECR生成は非定常的？

(e.g., Farrar & Gruzinov 09)

○組成の観測を重視する立場では

→ UHECRは鉄like？



Information from UHECR observations

1. Spectrum (SD+FD) -> GZK or non-GZK cutoff?
2. Anisotropy (above the GZK energy) -> correlation with the sources?
3. Composition ($X_{\max}$ and its fluctuation) -> p or Fe or mixed?

Composition?

Nuclei-dominated or mixed

Proton-dominated

AGNs, GRBs, clusters, SB galaxies,
or only a few AGNs such as Cen A
(GMF is important!)

AGNs, GRBs, or magnetars

Persistent

Transient

AGNs

???

(Absence of corr. with sufficiently bright AGNs)

AGNs with powerful jets

(Absence of corr. with many radio galaxies)

(FR II galaxies are too few)

- DSA in or with kinetic jets

- Non-DSA in Poynting jets?

AGNs without powerful jets

- Non-DSA in the vicinity of BH?

- Non-DSA in lobes?

GRBs

- High-luminosity GRBs

- Low-luminosity GRBs

AGNs

- Blazar-like flares in radio AGNs

- Giant flares?

- Active young AGNs?

Newly born magnetars

これから話すこと

- AugerとHiResの結果はあべこべなセンス
consistentな解釈はない
- 現状では以下の2通りの立場があるだろう
 - ソースが非定常であるとし、銀河との相関の説明重視。
 - UHECRは陽子ではなく重い原子核であるとし、組成の観測結果を重視。

80年代以降UHECR源としては定常ソースの議論が多かった
しかし非定常や原子核の場合の議論はずっと少ない
昨今の観測結果を鑑みて2つの可能性について議論する

Multi-Messenger Observations

Cosmic Rays: Auger, TA, JEM-EUSO? (AGASA, HiRes etc.)

- $>10^{19}\text{eV}$ の陽子では異方性が期待できる
- 重い組成の可能性→宇宙線天文学の可否は非常に不確かな宇宙磁場に依存

pp/p γ reactions: protons $\rightarrow$ pions, kaons $\rightarrow$ neutrinos, γ rays

$$p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0 + X \quad p + p \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0 + X$$

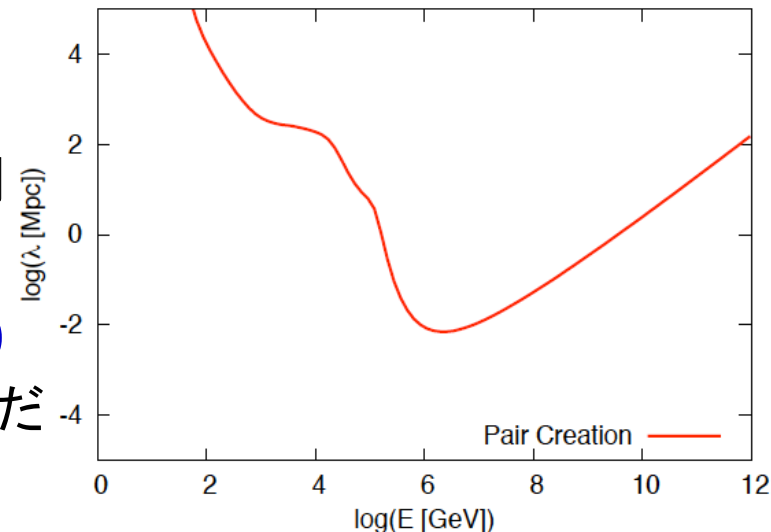
$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu}) \rightarrow e^{\pm} + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu} \quad \pi^0 \rightarrow 2 \gamma$$

Photons: Fermi衛星, 多数のCherenkov望遠鏡(MAGIC II 2010~, CTA:2014?~)

- ガンマ線天文学はほぼ確立
- $> 100 \text{ TeV}$ ではCMBやCIBと反応してしまう
- GeV-TeVでは電子も作れるので区別は非自明

Neutrinos: IceCube (2011~), KM3Net (2015?~)

- TeV以上で地球外からのニュートリノ検出はまだ
- より直接的な陽子・原子核加速の証拠



宇宙線観測、ガンマ線観測、ニュートリノ観測は一長一短



UHECRソースが非定常である場合



話すこと

1. UHECRソースが非定常なとき、UHECR観測から何がわかるのか？
2. UHECRソースから放射されるニュートリノについて
3. UHECRソースから放射されるガンマ線について
非定常ソースでのUHECR加速を証明する特徴的なシグナル＝UHEガンマ線の提案

最高エネルギー宇宙線源が満たすべき条件

2つの条件

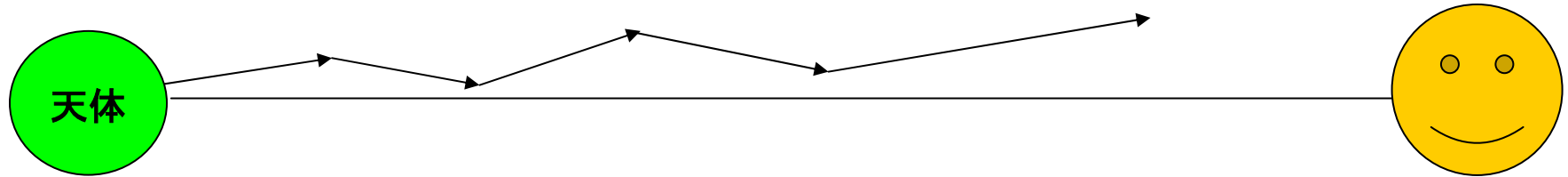
- 最高エネルギー($\sim 10^{20}$ eV)まで加速できること
少なくともHillas条件は必要条件
(実際はソースの磁場や光子密度、加速機構にも依存)
- 十分な宇宙線の量を供給できること
非定常ソースのとき、
(観測されている宇宙線の数)
=(バースト発生率) × (バースト1発が作る宇宙線の数)

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

- UHE陽子は少し曲がってやってくる

例えばnGの磁場中を100Mpc伝播→約3度曲がる



- 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

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

非定常宇宙線ソースへの制限

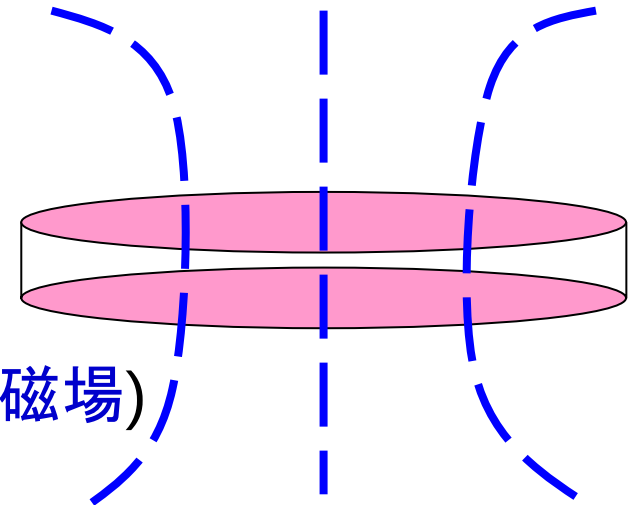
$$(\text{見かけのソース密度}) = (\text{見かけの継続時間}) \times (\text{バースト発生率})$$

体積あたり

- 見かけのソース密度は自己相関の情報から見積もられる
Auger 2007: $n_s \sim 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$ (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

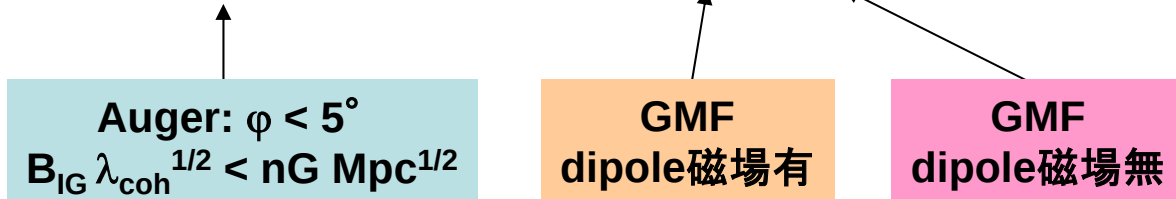
- 銀河内磁場は避けられない磁場
(**disk磁場** $B_G \sim \mu\text{G}$
+ もしかするとあるかもしれない**dipole磁場**)
- 銀河間磁場の強さはよくわかっていないが知る必要はない
銀河間磁場が強すぎるとAuger2007の結果($\varphi \sim \text{a few}^\circ$)に矛盾



- 銀河内及び銀河間磁場を考慮してUHECRの伝播を計算
($p\gamma$ 反応など考慮) (Yoshiguchi+ 03, Takami & Sato 07)

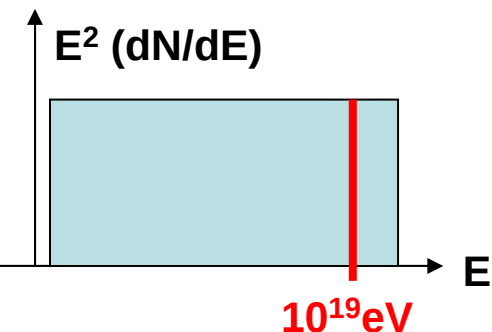
→ Augerの位置相関の結果に矛盾しないようバースト発生率を制限

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



- 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

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



- 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 $E_{\text{CR}} \sim \ln(10^{12} \text{ GeV}/\text{GeV}) E_{\text{HECR}}$

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

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

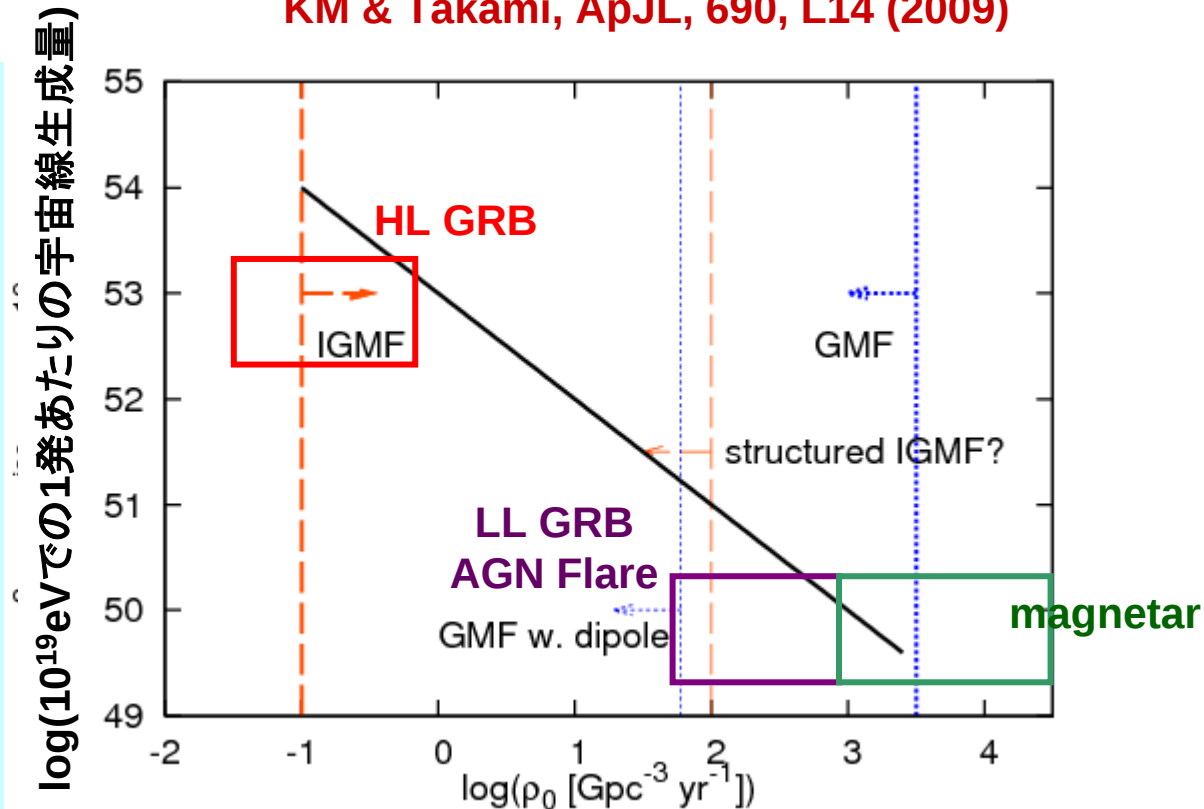
光度の暗いガンマ線バースト
(KM, Ioka, Nagataki, & Nakamura 06)

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)



観測から非定常ソースのエナジエティクスを制限できる方法を示した

Auger 2007 → バースト一発あたりのエネルギーは結構大きい

UHECRソースが非定常だったら？

- UHECR観測で一般的にわかること
→ 観測される異方性からエナジेटィクスなどを制限可能
- しかしUHECR観測のみからソースが何かを検証することは難しい
→ **UHECRは宇宙磁場で少なくとも100年から1000年は遅れる**
- 従ってソースで作られる**ニュートリノ**や**ガンマ線**がより重要

$$p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0 + X \quad p + p \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0 + X$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu}) \rightarrow e^{\pm} + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu} \quad \pi^0 \rightarrow 2 \gamma$$

話すこと

1. UHECRソースが非定常なとき、UHECR観測から何がわかるのか？
2. UHECRソースから放射されるニュートリノについて
3. UHECRソースから放射されるガンマ線について
非定常ソースでのUHECR加速を証明する特徴的なシグナル＝UHEガンマ線の提案

- ソースからのニュートリノやガンマ線の計算
ソースとモデルに依存
 1. sources (GRBs, AGNs, magnetars etc.)
 2. scenarios (int. shocks, ext. shocks etc.)
 3. model parameters (magnetic field etc.)
- ここではGRBを例にして説明する
(GRBとAGNでシナリオは似ていることが多い)

GRB: KM & Nagataki 06a PRD, 06b PRL, KM et al. 08 PRD, KM 07 PRD

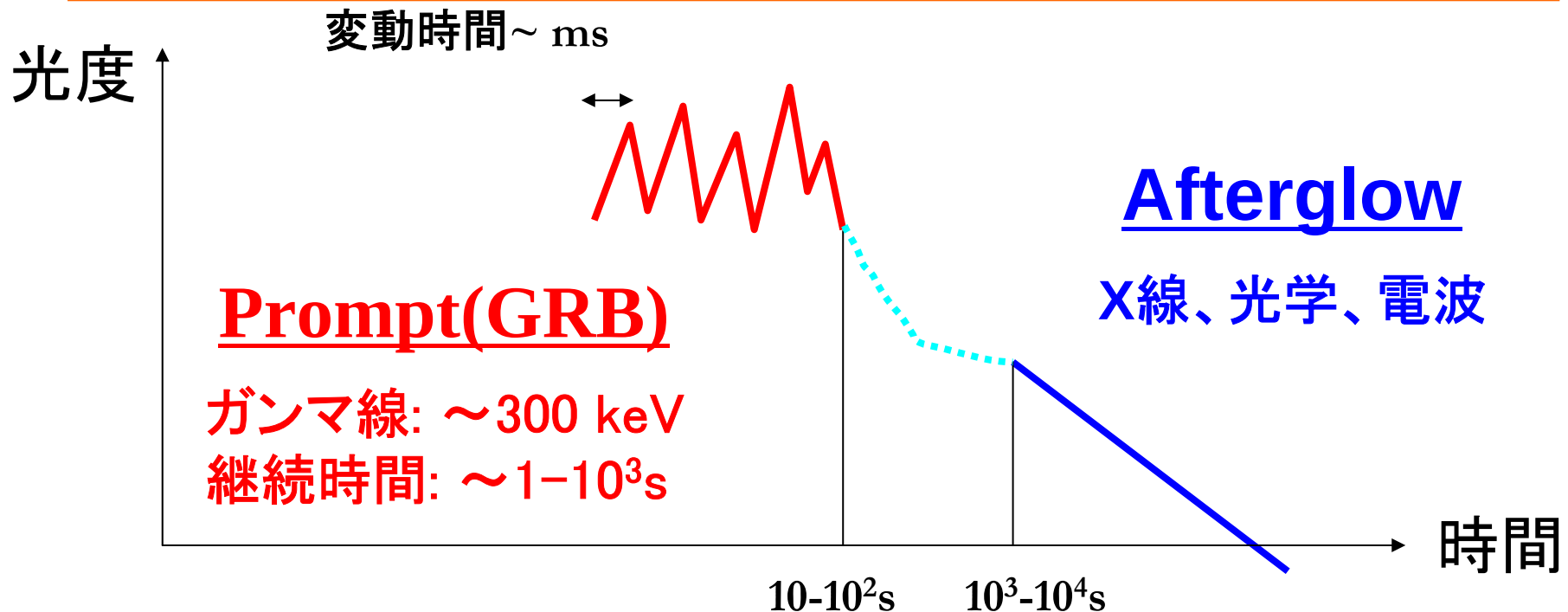
AGN: Kotera, Allard, KM et al. 09 ApJ, KM & Takami 10

Magnetar: KM, Meszaros, & Zhang 09 PRD

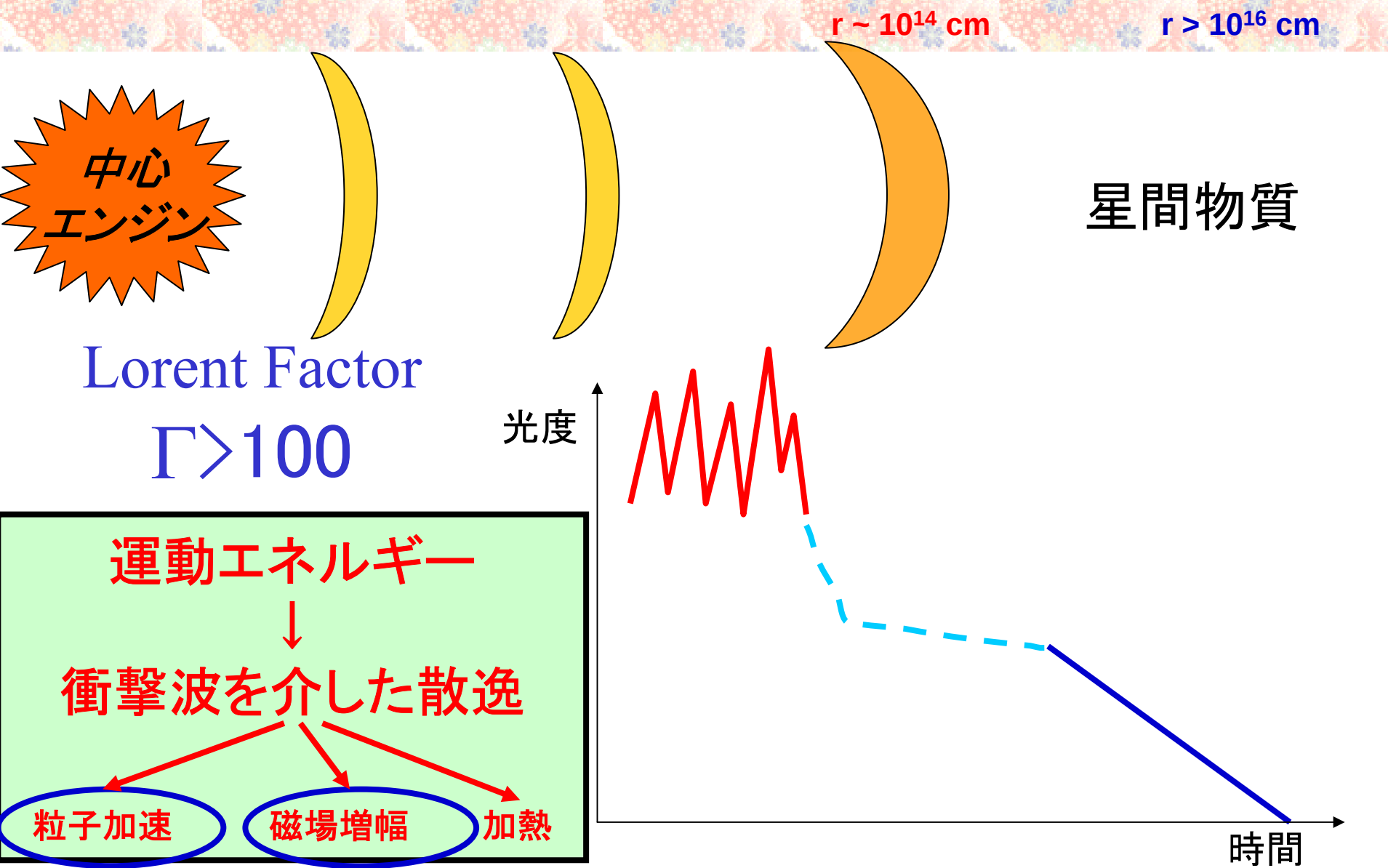
Cluster: KM, Inoue & Nagataki 08 ApJL, KM, Asano, & Inoue 09 IJMP

ガンマ線バーストとは？

- 宇宙で最も明るい爆発現象 ($L \sim 10^{51-52} \text{ ergs s}^{-1}$ 太陽の 10^{18} 倍)
- 宇宙論的距離で起こっている (~ 100 億光年程度)
- 年間 ~ 1000 発程度起きている (超新星の3千分の一程度)
- 相対論的ジェットだと考えられている (生成機構は不明)
- 大質量星の最期と関係している (一部に超新星が付随)

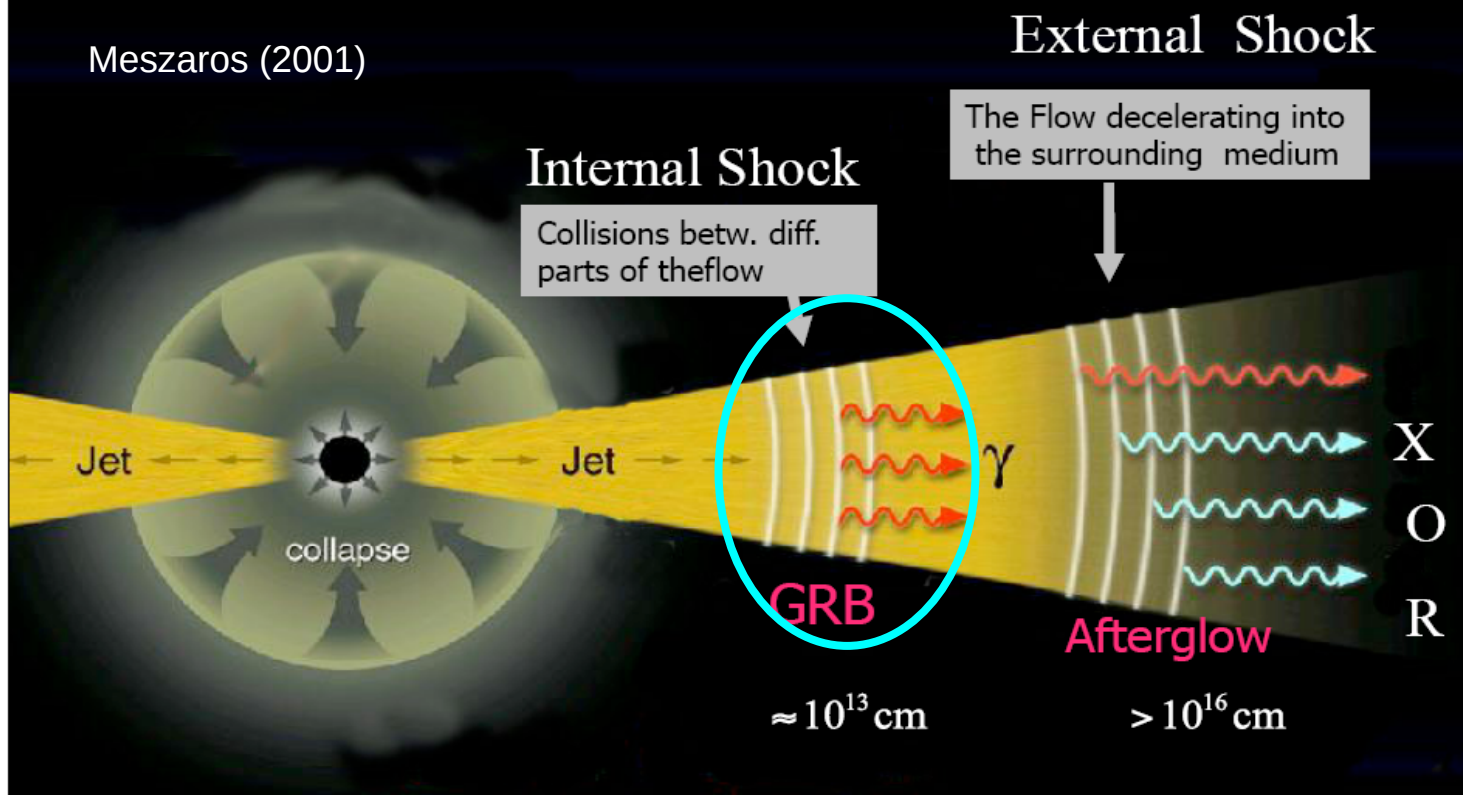


内部衝撃波・外部衝撃波モデル



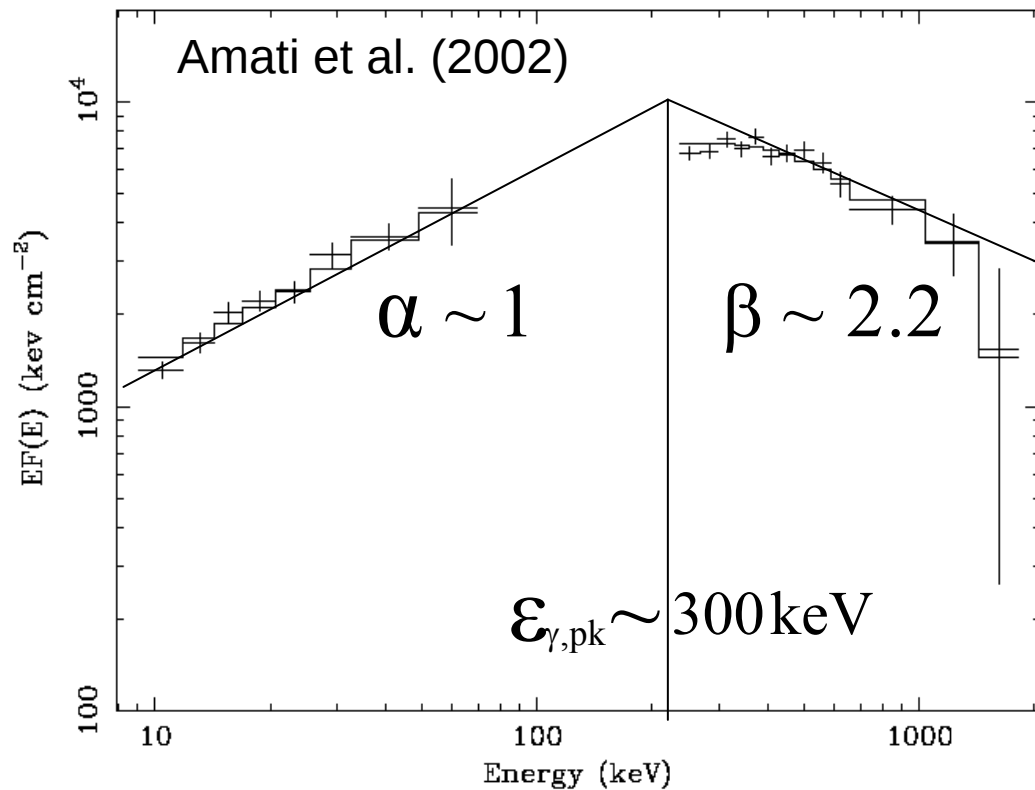
Fireball Model: long GRBs

Meszaros (2001)



Prompt Gamma-Ray Emission

GRB 990510



観測されているスペクトル

$$N(\epsilon_{\gamma}) \propto \epsilon_{\gamma}^{-\alpha} \quad (\epsilon < \epsilon_{\gamma, pk})$$

$$N(\epsilon_{\gamma}) \propto \epsilon_{\gamma}^{-\beta} \quad (\epsilon > \epsilon_{\gamma, pk})$$

ガンマ線放射 $\Leftrightarrow$ 衝撃波で加速された電子からのシンクロトン放射
衝撃波加速理論に従えば電子だけでなく陽子も加速されるべき

GRBでUHECRは作れるか？

Hillas条件(必要条件) $E_{N,ad}^{\max} \simeq 6.9 \times 10^{20} \text{ eV} Z L_{\gamma,51}^{1/2} \Gamma_{2.5}^{-1}$

考慮すべき条件: $t_{\text{acc}} < t_{\text{cool}}, t_{\text{dyn}}, t_{\text{esc}} < t_{\text{cool}}$

Acceleration time scale $t_{\text{acc}} \equiv \eta \frac{r_L}{c} = \eta \frac{\varepsilon_p}{e B c}$ UHECR生成に必要な値
 $\eta \sim (1-10)$

Cooling time scale $t_{\text{syn}} = \frac{3m_p^4 c^3}{4\sigma_T m_e^2} \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{1}{U_B}$

$$E_{N,\text{syn}}^{\max} \simeq 4.2 \times 10^{20} \text{ eV} A^2 Z^{-3/2} \eta^{-1/2} L_{\gamma,51}^{-1/4} \Gamma_{2.5}^{3/2} r_{14}^{1/2}$$

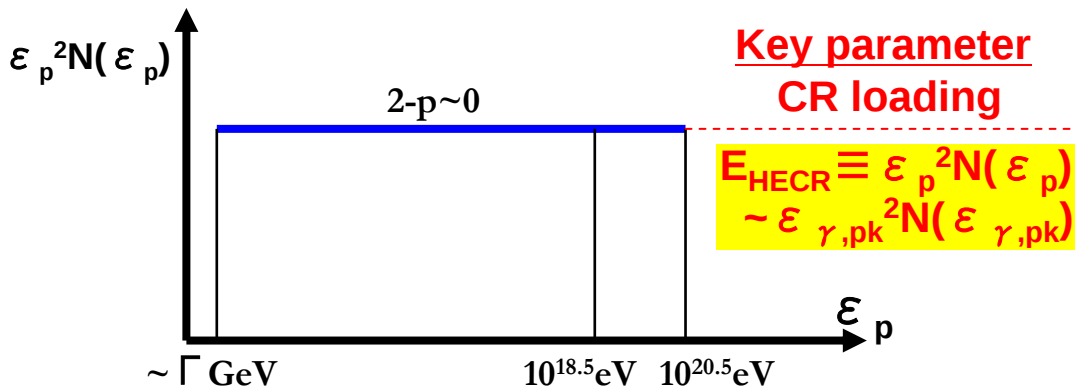
$p\gamma$ 反応、Bethe-Heitler反応、Inverse-Compton反応も起こる
→ $r \sim 10^{14-15} \text{ cm}$ であれば、UHE陽子をGRB promptで作れる

Waxman 95 PRL

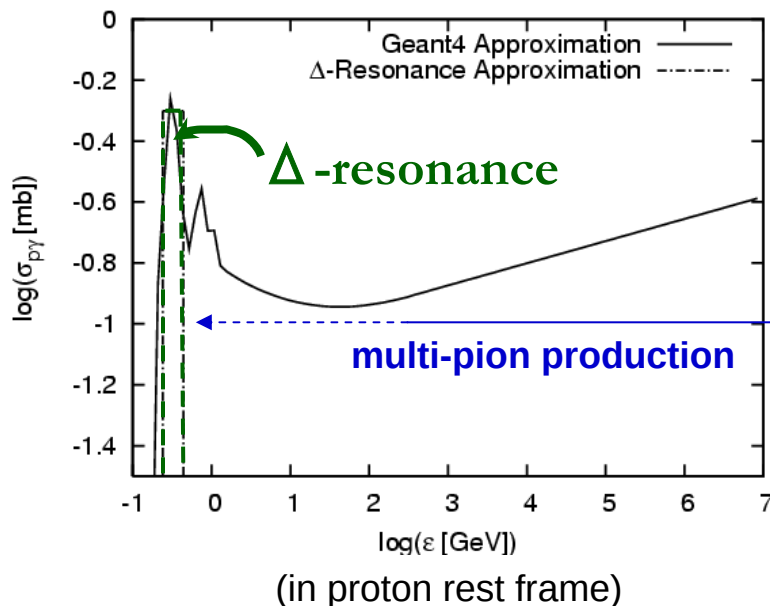
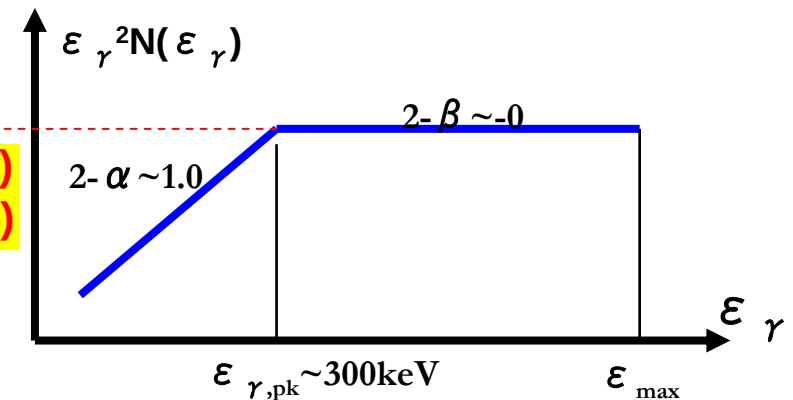
KM, Ioka, Nagataki, & Nakamura 08 PRD

スペクトルの説明

Cosmic-ray Spectrum (Fermi)



Photon Spectrum (Prompt)



Photomeson Production

$$p + \gamma \rightarrow \Delta \rightarrow n + \pi^+, p + \pi^0 \quad \kappa_p \sim 0.2$$

$$p + \gamma \rightarrow N \pi + X \quad \kappa_p \sim (0.4-0.7)$$

Δ -resonance approximation

$$\epsilon_p \epsilon_\gamma \sim 0.3 \Gamma^2 \text{ GeV}^2$$

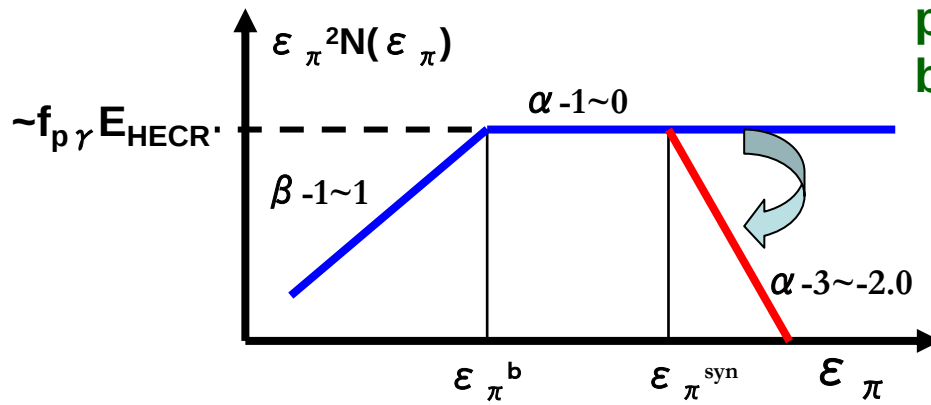
$$\epsilon_p^b \sim 0.3 \Gamma^2 / \epsilon_{\gamma, \text{pk}} \sim 50 \text{ PeV}$$

Photomeson production efficiency

$\sim$ effective optical depth for $p\gamma$ process

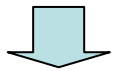
$$f_{p\gamma} \sim 0.2 n_\gamma \sigma_{p\gamma} (r/\Gamma)$$

Meson Spectrum

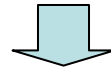


pion energy $\varepsilon_\pi \sim 0.2 \varepsilon_p$
 break energy $\varepsilon_\pi^b \sim 0.06 \Gamma^2 / \varepsilon_{\gamma, \text{pk}} \sim 10 \text{ PeV}$

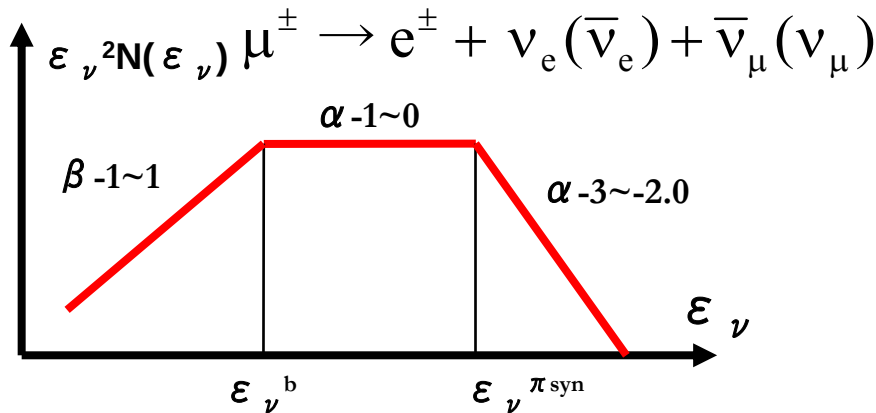
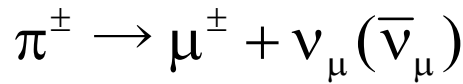
For charged mesons $\rightarrow$ sync. cooling
 (meson cooling time) $\sim$ (meson life time)
 $\rightarrow$ break energy in neutrino spectra



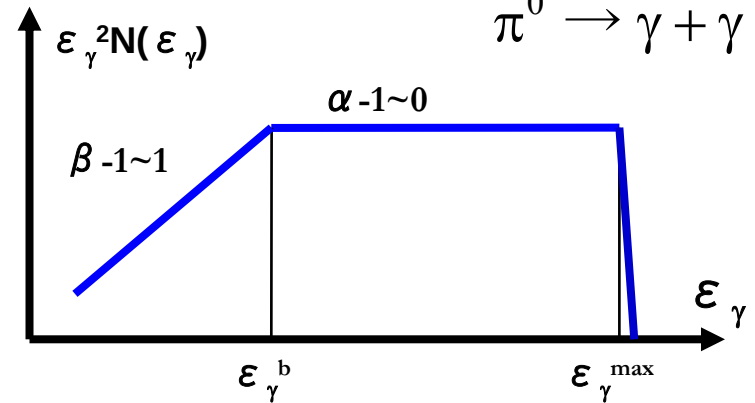
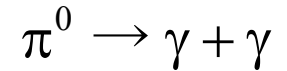
Waxman & Bahcall, PRL (1997)



Neutrino Spectrum



Gamma-Ray Spectrum



neutrino energy $\varepsilon_\nu \sim 0.25 \varepsilon_\pi \sim 0.05 \varepsilon_p$

• ν lower break energy $\varepsilon_\nu^b \sim 2.5 \text{ PeV}$

• ν higher break energy $\varepsilon_\nu^{\pi \text{ syn}} \sim 25 \text{ PeV}$

γ -ray energy $\varepsilon_\gamma \sim 0.5 \varepsilon_\pi \sim 0.1 \varepsilon_p$

• γ lower break energy $\varepsilon_\gamma^b \sim 5 \text{ PeV}$

• γ maximum energy $\varepsilon_\gamma^{\text{max}} \sim 0.1 \varepsilon_p^{\text{max}}$

Calculation of High-Energy Emission

(e.g., KM 2007, PRD, 76, 123001; 2008, PRD(R), 78, 101302)

- **Input**

加速陽子: $N(\varepsilon_p) \propto \varepsilon_p^{-p} \exp(-\varepsilon/\varepsilon_p^{\max})$, $p \sim 2$

標的光子: 観測されているスペクトル

パラメータ: 磁場 B 、サイズ r

- **Meson生成反応 ($p\gamma$ and pp)**

(experimental data, Geant4, and SIBYLL)

★非共鳴の効果も考慮

標的光子のスペクトルがハードなとき効く

- **冷却過程: syn., IC, ad., BH, $p\gamma$, pp , (photodis.)**

★最大エネルギーの決定

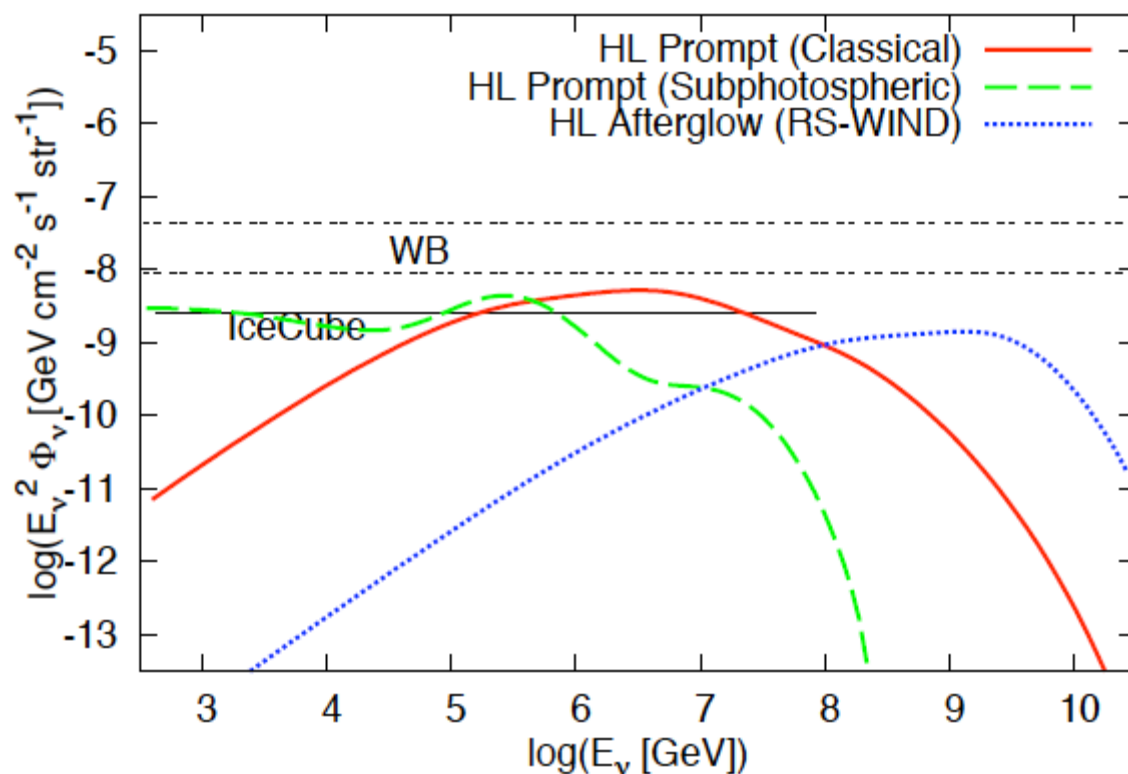
(acc. time $\sim \varepsilon_p/eBc$) < (cooling time), (dyn. time) + Hillas

★mesonの冷却も考慮

$t_{\text{cool}} < t_{\text{decay}}$ のとき重要

GRB Neutrinos

100億光年で起きるGRB1発に対し μ イベントは $\ll 1$ 個
たくさんのGRBを見る必要(宇宙でおきるGRBの足しあげ)
→ “Cumulative background” (時間空間で同期した観測)



KM & Nagataki 06 PRD

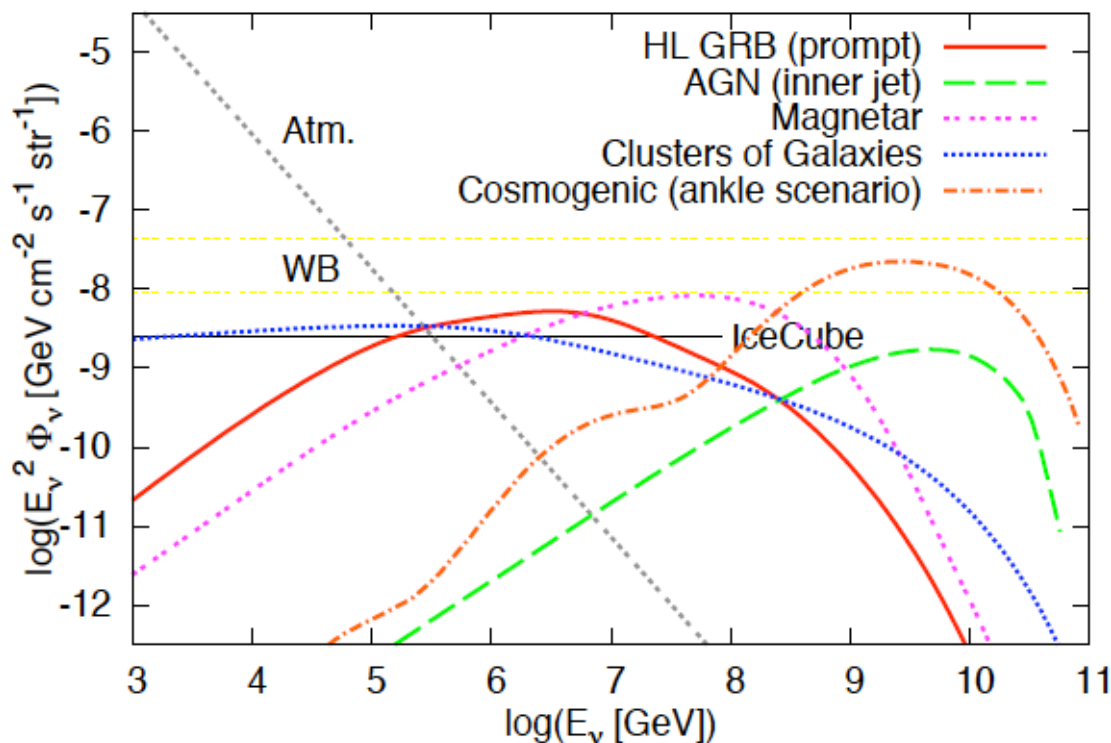
KM 08 PRDR

KM 07 PRD

Classical
~1-10 events/yr

The Cumulative Neutrino Background

GRB promptやmagnetarなどいくつかのシナリオは将来検証可能



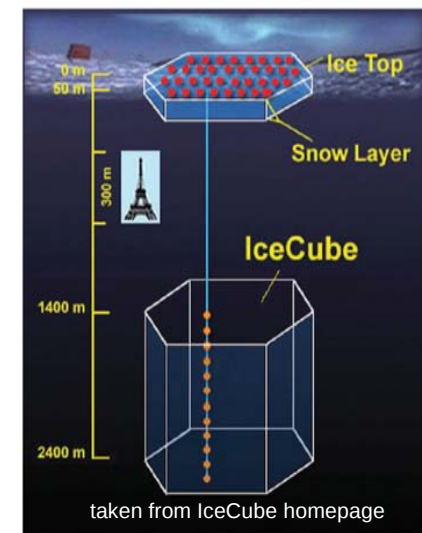
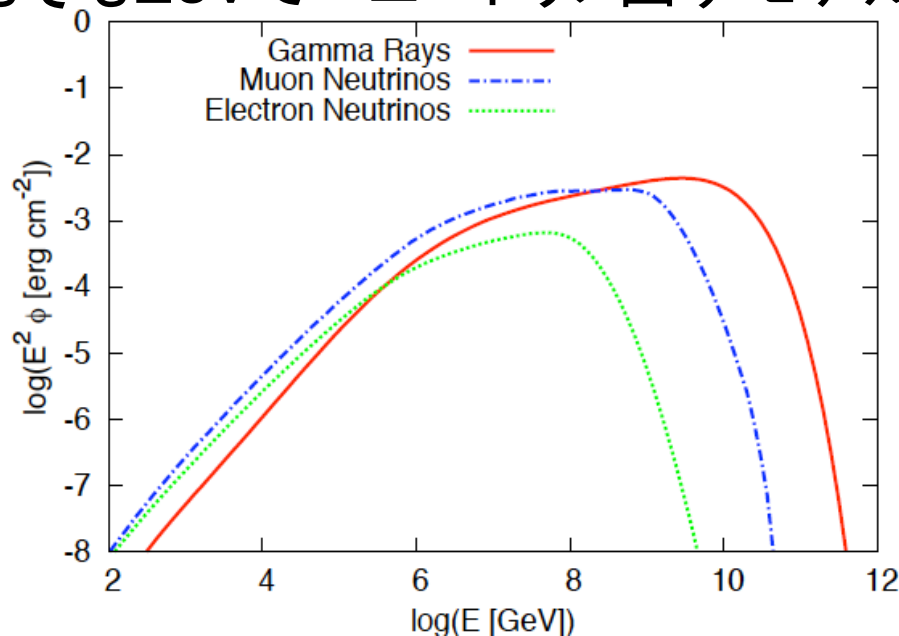
- **GRB prompt** (Waxman & Bahcall 97 PRL, KM et al. 06 ApJL)
- **AGN jet (flare/non-flare), Cluster of galaxies** (e.g., KM et al. 08ApJL)
- **Newly born fast rotating magnetar** (KM, Meszaros, & Zhang 09 PRD)

話すこと

1. UHECRソースが非定常なとき、UHECR観測から何がわかるのか？
2. UHECRソースから放射されるニュートリノについて
3. UHECRソースから放射されるガンマ線について
非定常ソースでのUHECR加速を証明する特徴的なシグナル＝UHEガンマ線の提案

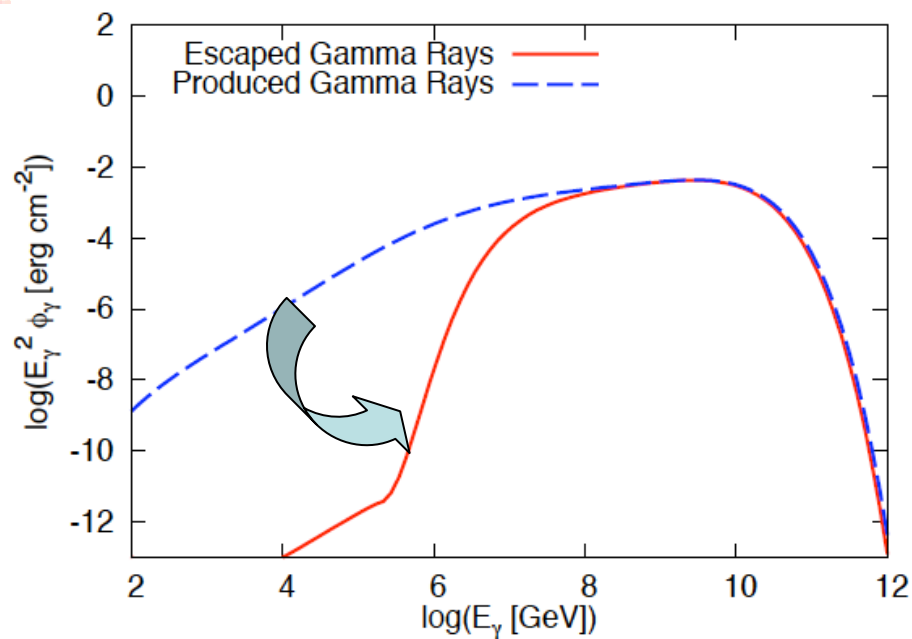
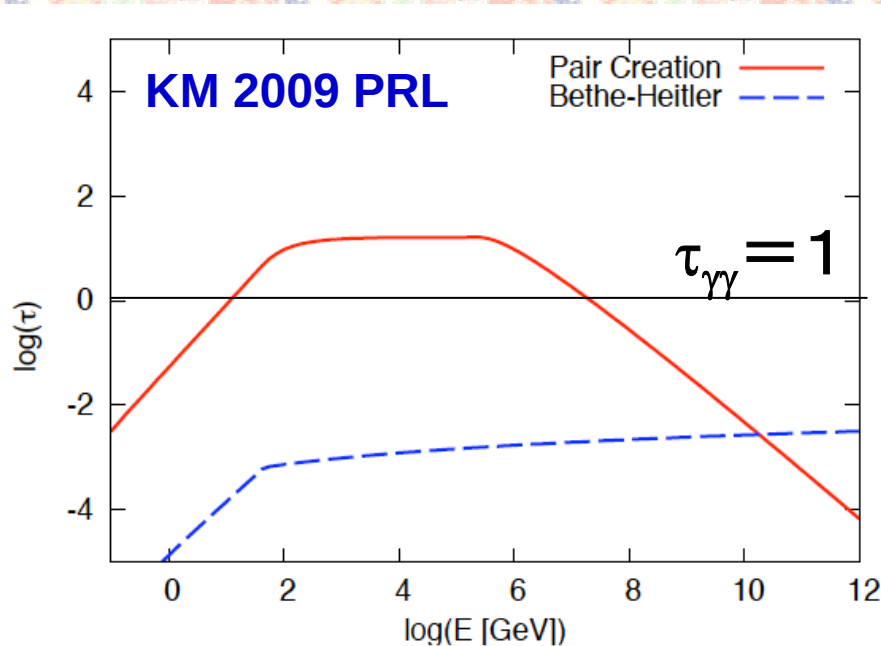
UHE ニュートリノ検出のデメリット

- UHECR加速の証明 $\Leftrightarrow E_\nu \sim 0.05E_p \sim 5 \text{ EeV}$ ($E_p/10^{20}\text{eV}$)
シンクロトロンで $\pi^\pm$ は崩壊前に冷却する
- IceCubeの得意な範囲**TeV-100 PeV** $\rightarrow >10 \text{ PeV}$ は難
そもそもEeVでニュートリノ出すモデルは検証が難しい



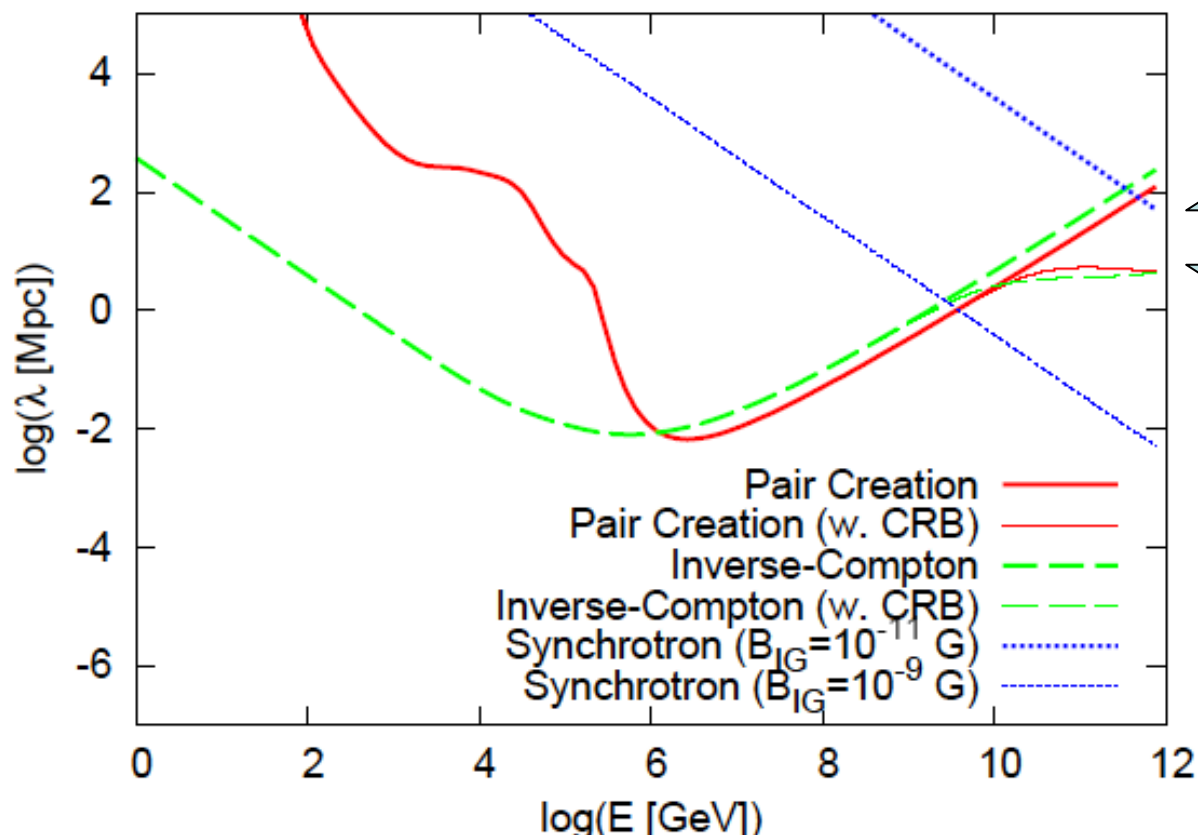
個々のバーストからの検出は相当明るくて近いものでない限り難
しかも近傍GRBは暗い傾向(GRB 060218) $\rightarrow 30\text{Mpc}$ より遠いと難

ガンマ線



- **10 GeV-10 PeVガンマ線はソースから逃げられない**
 →ソース内でカスケードしてGeV以下のガンマ線になる
 電子等でも作れる ➡ UHECR加速の強い証拠ではない
- **超高エネルギーガンマ線はソースから逃げられる**
 $E_\gamma \sim 0.1 E_p \sim 10 \text{ EeV } (E_p/10^{20} \text{ eV}) \Leftrightarrow \text{UHECR加速の証明}$

宇宙空間での平均自由行程・エネルギー損失長



電波背景放射の不定性

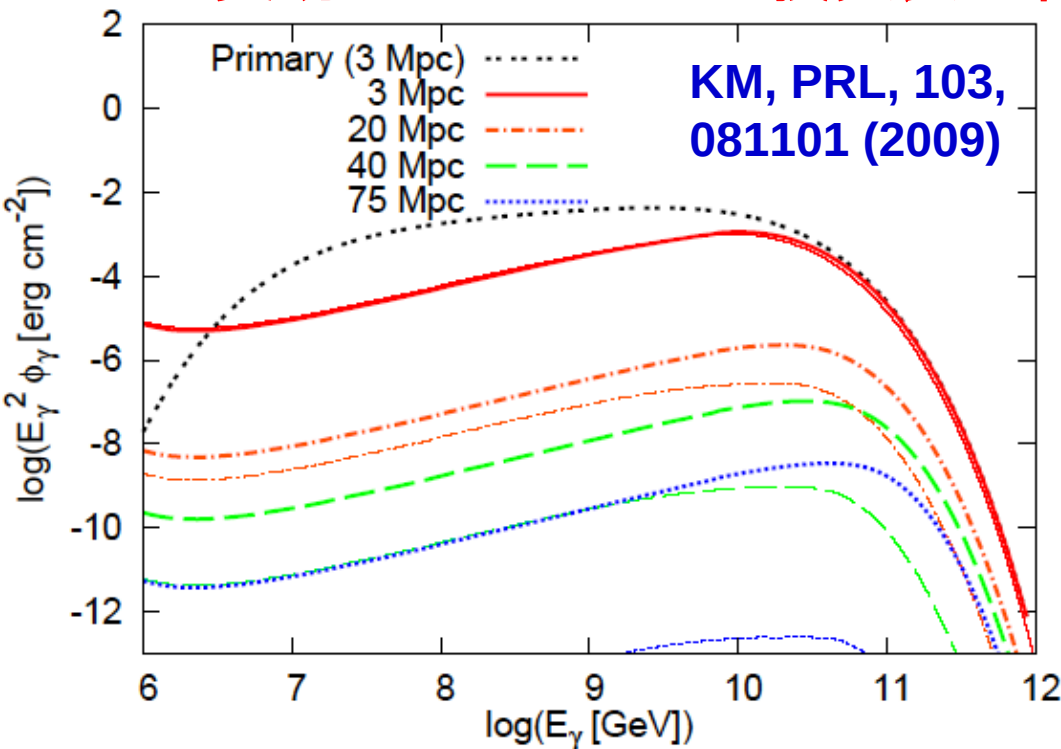
- 100TeVからEeVのガンマ線はMpcも伝播できない
- >10 EeVのUHEガンマ線なら $>$ 数Mpc伝播可能

カスケードを考慮したUHEガンマ線のスペクトル

超高エネルギーでのカスケード: Deep Klein-Nishina領域

→ エネルギーを近似的に保って $\gamma \rightarrow e \rightarrow \gamma \rightarrow \dots$ を繰り返す

→ 実効的なエネルギー損失長は約1桁長い($\sim 10\text{-}100$ Mpc)



やや暗いGRBの例

$$L_\gamma \sim 10^{48} \text{ erg/s}$$

(近傍のGRBは暗い)

$$E_p^2 (dN_{\text{CR}}/dE_p) = 10^{50.5} \text{ erg}$$

thick: 電波背景放射なし

thin: 電波背景放射最大

$\sim 10^{3.5} \text{ km}^2$ (PAO): $D < \sim 40$ Mpc; $\sim 0.3\text{-}3$ photons@20 Mpc

$\sim 10^{5.5} \text{ km}^2$ (EUSO): $D < \sim 75$ Mpc; $\sim 0.3\text{-}30$ photons@40 Mpc

非定常ソースのまとめ

- UHECR観測よりバースト1発あたりで作られる宇宙線エネルギーは 10^{50} erg以上と見積もられる
- さまざまなソースからのニュートリノ放射の計算、一部は将来のニュートリノ観測で検証可能
- もし近傍100Mpc以内でバーストが起きれば、UHEガンマ線の検出の方がニュートリノ検出よりも検出が容易
- 光速不変の検証に使える ($c' = c(E/\zeta_n E_{pl})^n$)
GRB090510による制限の約千倍強い制限が可能
(Abdo et al. 09 Science: $\zeta_1 > 1.22$, $\zeta_2 > 10^{-8.5}$)
- よくわかっていない電波背景放射や宇宙磁場への制限が可能
- 定常ソースにも応用可: Cen A-最も近傍の電波銀河(~ 3.8 Mpc)
CenAがUHE陽子源であるかを将来のUHECR観測で検証可能

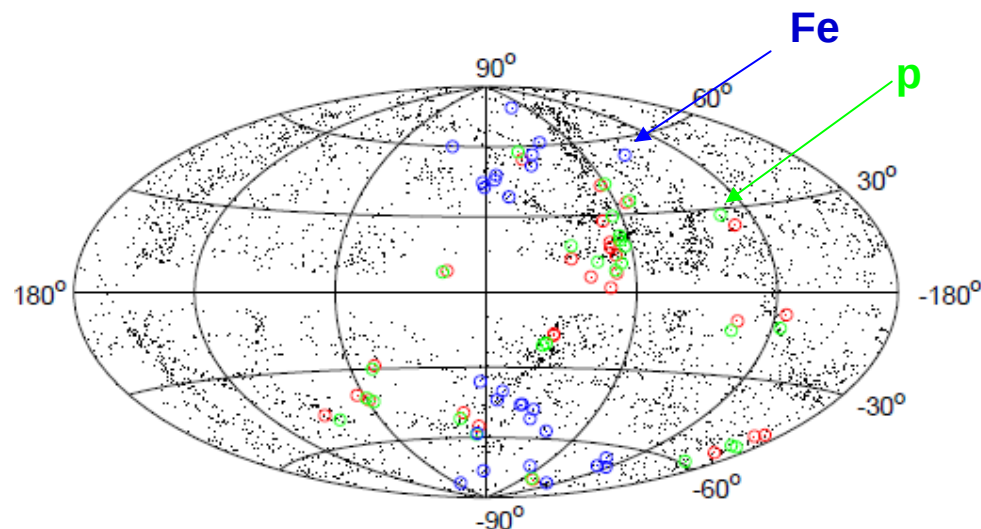
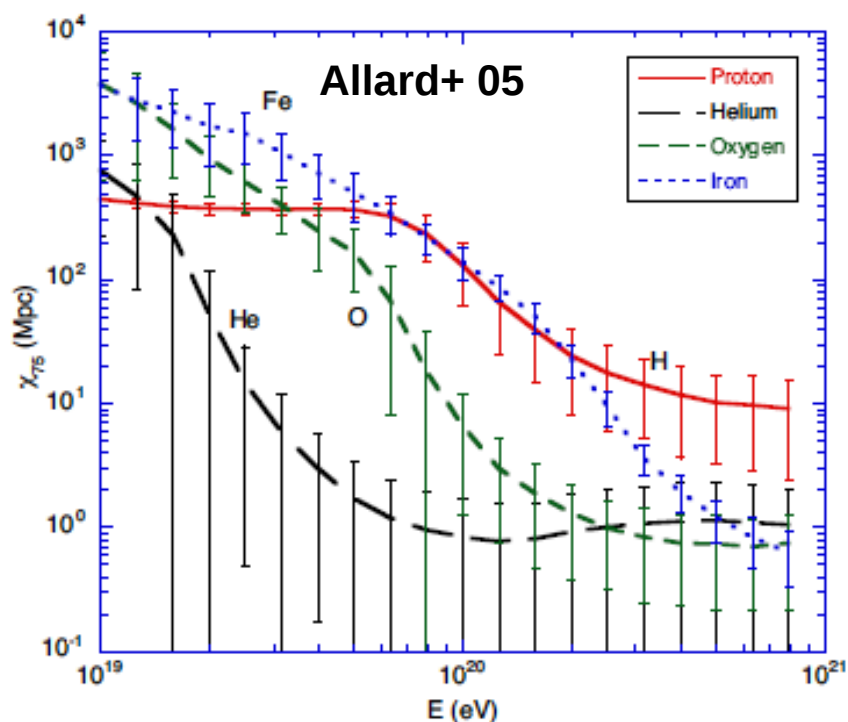


UHECRが重い原子核の場合



Importance of γ & ν Observations

- Fe: photodisintegrated at the energy of the GZK cutoff ($A+\gamma \rightarrow (A-1)+n/p$) $\rightarrow$ spectrum cannot tell us p or Fe
- Fe: deflected by $\sim 10^\circ$ due to the magnetic field $\rightarrow$ difficulty in using positional correlations



Takami & Sato 2009

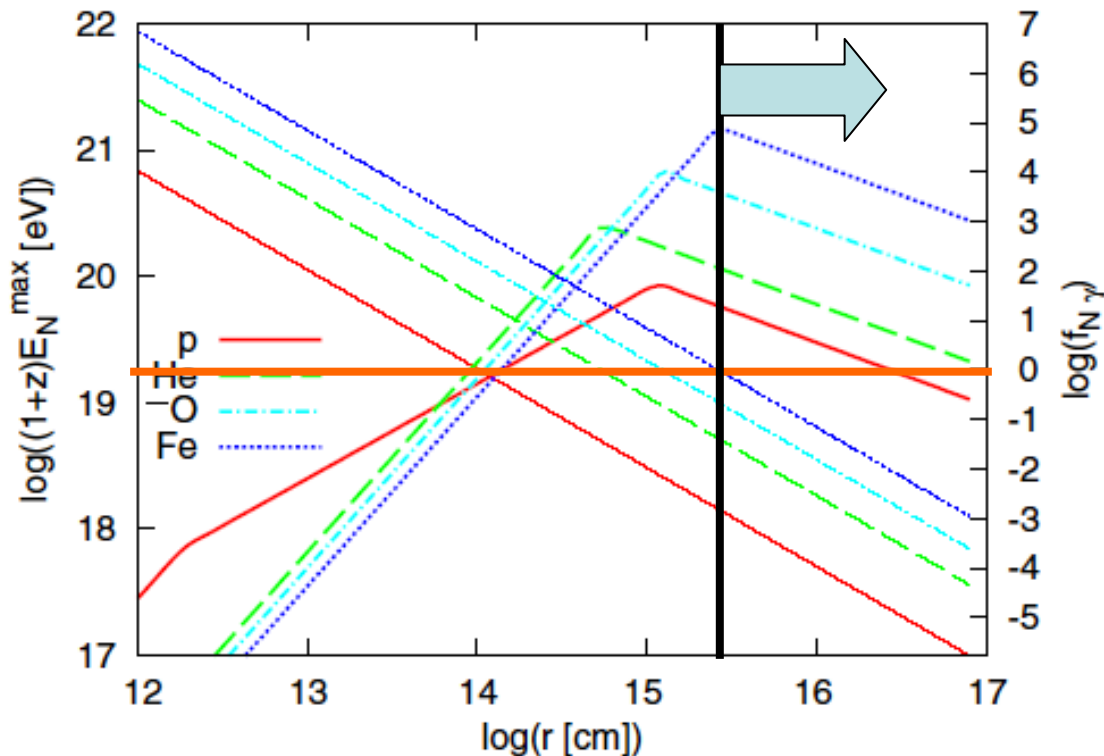
Questions

1. When UHECRs are heavy nuclei, what are the necessary conditions?
2. When UHECRs are heavy nuclei, can we expect detection of high-energy neutrinos?
3. When UHECRs are heavy nuclei, what is the smoking gun to prove nuclei acceleration?

Conditions for UHE Nuclei Sources

- Hillas condition
 $E < ZeBr\beta$
 $E=10^{20}$ eV $\rightarrow L_B \equiv \varepsilon_B L > 10^{42.5}$ erg/s $(Z/26)^{-2} \Gamma^2 \beta^{-1}$
Much dimmer sources are allowed as UHECR sources
- Survival for photodisintegration ($\tau_{A\gamma} \sim n_\gamma \sigma_{A\gamma} (r/\Gamma) < 1$)
photon and matter density should be small enough
- One can build scenarios where UHECRs can survive
GRB (KM, Ioka, Nagataki, & Nakamura 08 PRD, Wang+ 08 ApJ)
AGN (Pe'er, KM, & Meszaros 09 PRD)
clusters (Inoue+ 07, Kotera, Allard, KM et al. 09, ApJ)

Fe生存の可能性



←GRBの例
 十分外側(右の例では
 $r > 10^{15.5} \text{cm}$)でFeはUHE
 まで加速可能かつ生存
 (KM et al. 08 PRD, Wang+ 08 ApJ)

AGNの場合 (e.g., Peer, KM, Meszaros 09 PRD)

- 典型的なblazarでは $r > \text{pc}$ でないと鉄は壊れる
- kpcジェット、電波ローブでは問題なし、銀河団中だと厳しくなる

$$t_{\text{dyn}} t_{\text{dis}}^{-1} < 1 \leftrightarrow r \gtrsim 2.1 \times 10^{16} A^{1.21} L_{\text{bol},43}^{\text{ob}} \nu_{0,13}^{\text{ob}-2} \Gamma^{-4} \beta^{-2} \text{ cm.}$$

Questions

1. When UHECRs are heavy nuclei, what are the necessary conditions?
2. When UHECRs are heavy nuclei, can we expect detection of high-energy neutrinos?
3. When UHECRs are heavy nuclei, what is the smoking gun to prove nuclei acceleration?

Neutrino Limits from UHECR Sources

Waxman-Bahcall bounds (Waxman & Bahcall 98 PRD)

reasonable bounds of cumulative ν s from UHECR sources

assumption: UHECR spectrum $N(\varepsilon_p) \propto \varepsilon_p^{-2}$

meson production efficiency $f_{p\gamma} (< 1) \rightarrow 1$ “formal” limit

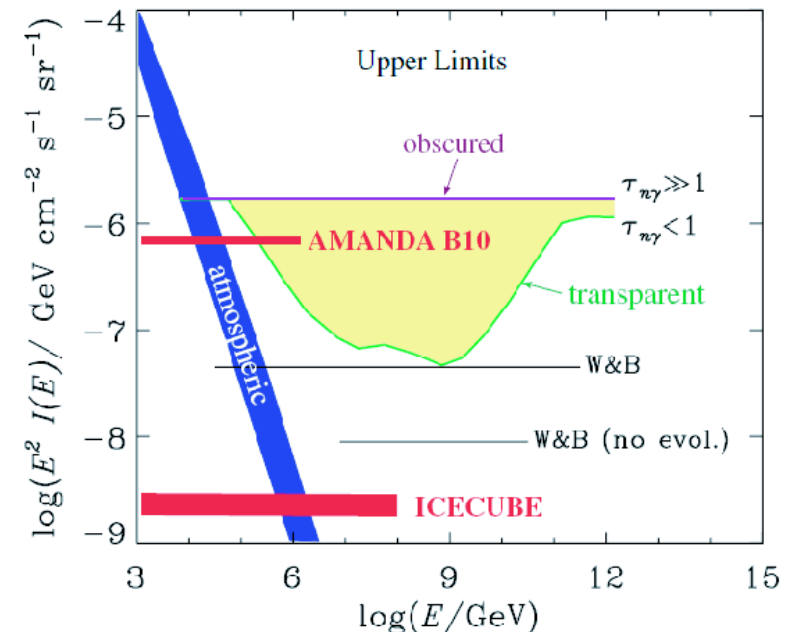
$$(f_{p\gamma} \sim 0.2 n_{\gamma} \sigma_{p\gamma} (r/\Gamma))$$

$$\nu \text{ flux } \varepsilon_{\nu}^2 N(\varepsilon_{\nu}) \sim 0.25 f_{p\gamma} \varepsilon_p^2 N(\varepsilon_p)$$

$$\rightarrow (1-4) \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

$\rightarrow \sim 100$ events/yr by IceCube

Most theoretical predictions lie under WB landmarks

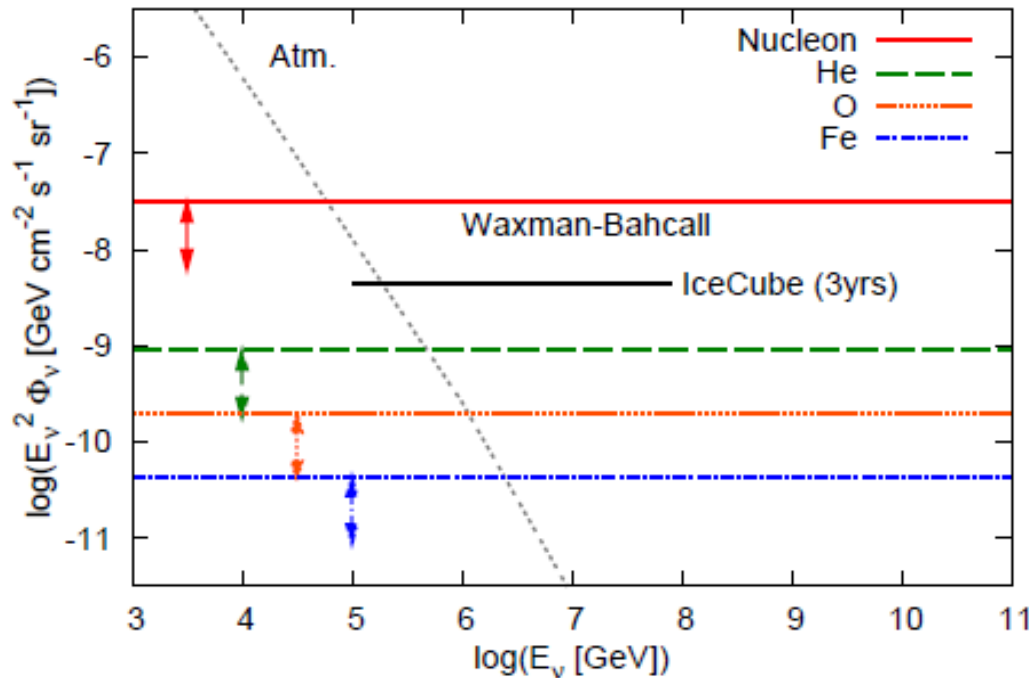


Landmarks from UHE Nuclei Sources

Nucleus-survival requirement $\tau_{A\gamma} < 1$

res. approx. $\rightarrow f_{\text{mes}} \sim (0.2/A) n_{\gamma} A \sigma_{p\gamma} (r/\Gamma) \sim \tau_{A\gamma} (0.2 \sigma_{p\gamma}/\sigma_{A\gamma}) < 10^{-3}$

KM & Beacom PRD (2010)



$\tau_{A\gamma} < 1$

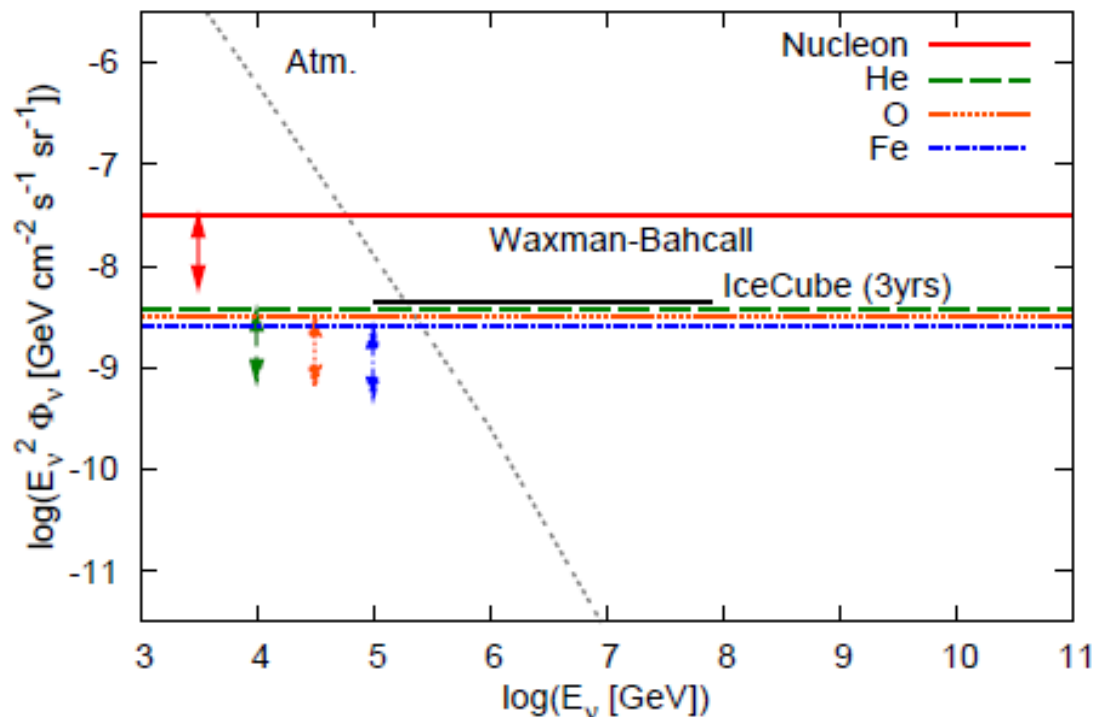
If nuclei survive in all the sources and when the res. approx. is valid, detections of photomeson vs from UHECR sources may be difficult

Landmarks from UHE Nuclei Sources

$\tau_{A\gamma} < 1$ may be too strong

$f_{A\gamma} = \kappa_{A\gamma} \tau_{A\gamma} \sim (1/A) \tau_{A\gamma} < 1$ would be more conservative

KM & Beacom PRD (2010)



$f_{A\gamma} < 1$

Not applicable to hadronuclear vs (e.g., KM+ 08 ApJL for vs from clusters)

Questions

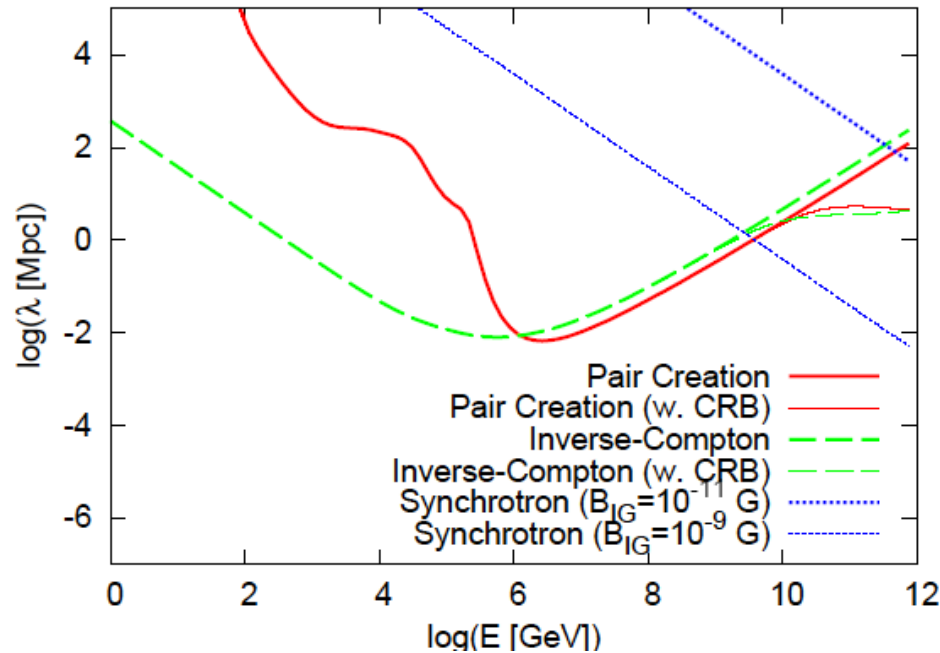
1. When UHECRs are heavy nuclei, what are the necessary conditions?
2. When UHECRs are heavy nuclei, can we expect detection of high-energy neutrinos?
3. When UHECRs are heavy nuclei, what is the smoking gun to prove nuclei acceleration?

How about γ Rays?

- When disintegration ($A + \gamma \rightarrow (A-1) + n/p$) loss is not important in the source, it is difficult to see ν s and UHE γ s from UHECR sources (KM & Beacom 2010 PRD)
- Hadronic GeV—TeV γ rays ?
merit: When UHE Fe survive, electromagnetic cascades in the source **can be neglected**
 $\sigma_{\text{Fe}\gamma} \sim 8 \times 10^{-26} \text{ cm}^2 \sim \sigma_{\gamma\gamma} \sim 0.1 \sigma_T \sim 7 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$
(KM, Ioka, Nagataki, & Nakamura 08 PRD)
 $\tau_{\gamma\gamma} \sim \tau_{\text{Fe}\gamma} \rightarrow$ **radiation processes in the source can be seen**
- Then, is it possible to observe hadronic γ rays (π^0 -decay γ rays, nucleus-synchrotron)?

But... two difficulties in detections of hadronic γ rays

1. 100TeV-EeV photons interact with the cosmic background radiation via pair creation cascades $\rightarrow$ difficulty in direct detections of π^0 photons



2. Difficulty in proving nuclei acceleration

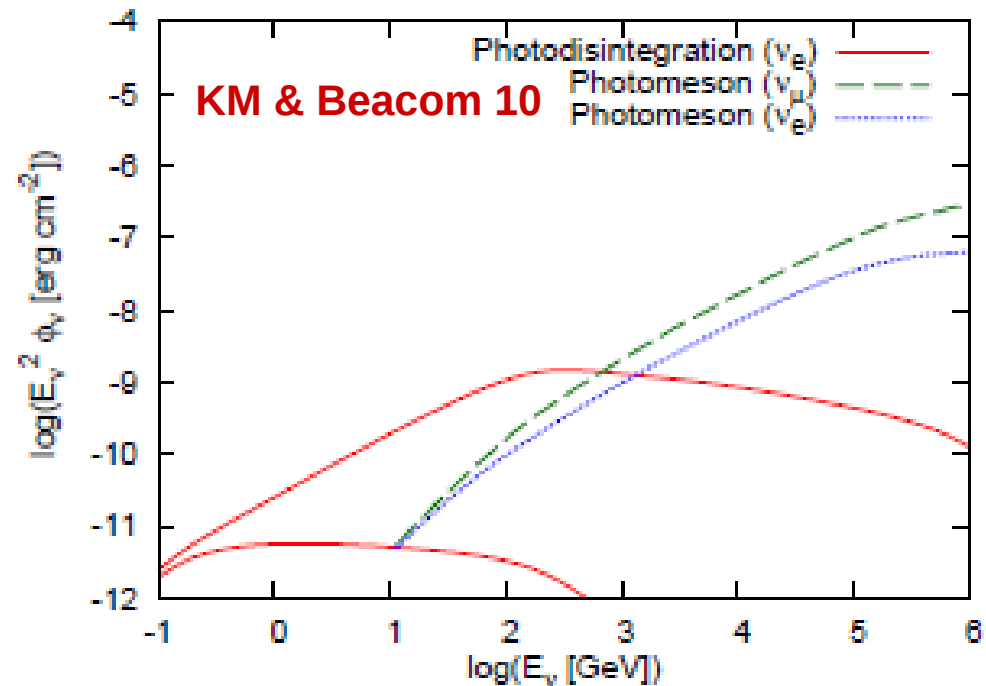
π^0 -decay γ rays are similarly generated from p

p-synchrotron easily hinders nucleus-synchrotron

We want to find UHECR sources *even if UHECRs are nuclei*

But...

- Cosmic-ray obs.
nuclei are easily deflected
by cosmic magnetic fields
- Neutrino obs.
neutrino flux is small
- Gamma-ray obs.
Escaping π^0 photons are attenuated by cosmic radiation fields
nucleus-syn. emission is easily masked by leptonic emission
Even if detected, signals are not unique for nuclei accelerators



They seem disappointing... Is it really hopeless?

→ **No!**

We found potentially critical signals, which give us hope

The 3rd Process: De-Excitation Process

- Excited at photodisintegration
→ **successive γ -ray emission at de-excitation**
New! - not considered for extragalactic sources
- around the resonance: $A + \gamma \rightarrow (A-1)^* + p/n$
 $(A-1)^* \rightarrow A-1 + \gamma$
- Many excited states → difficulty of very quantitative calculations (but **not necessary**)
- From experimental data
 $E_{\text{deex}} \sim 1-5 \text{ MeV}$, multiplicity $\sim 1-3$
- Here, $E_{\text{deex}} = 2.5 \text{ MeV}$, multiplicity=2 are adopted

Photodisintegration TeV-PeV γ Rays

- Typical Fe energy: $E_{\text{Fe,GDR}} \sim 5 \times 10^{16} \text{ eV } \Gamma_1^2 (1 \text{ keV}/\varepsilon)$
 $\rightarrow E_\gamma \sim (E_{\text{Fe,GDR}}/m_A) E_{\text{deex}} \sim 3 \text{ TeV}$

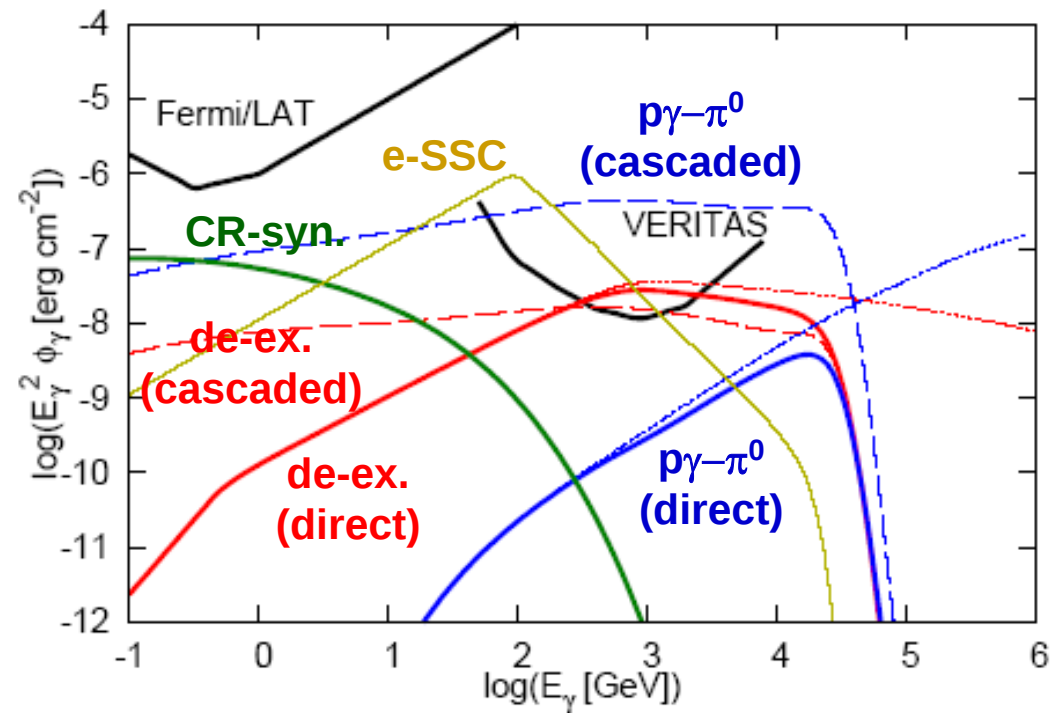
Nearby low-luminosity GRB
(like GRB 060218)

$$E_{\text{HECR}} \sim 10^{50.5} \text{ erg}$$

D=100 Mpc

p 50 % Fe 50 %

KM & Beacom arXiv:1002.3980



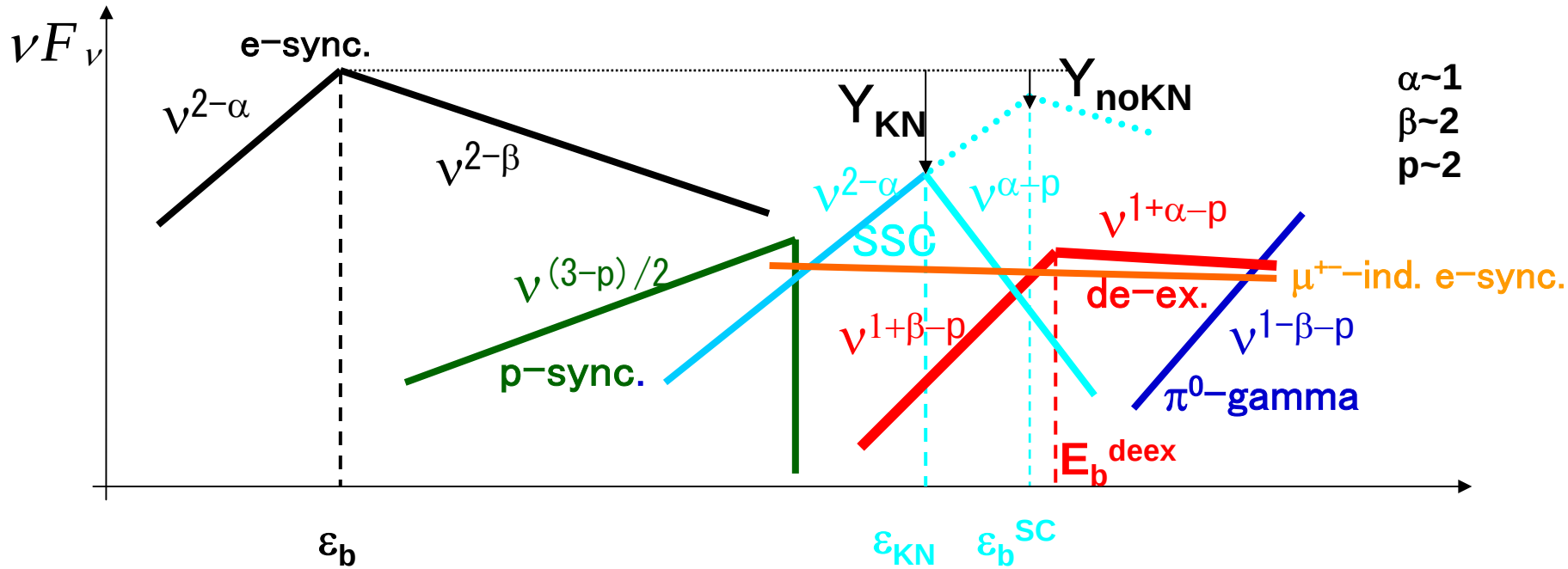
Power-law spectrum reflecting the target photon spectrum
Characteristic of UHE nuclei and important at TeV-100TeV

Can we identify de-excitation signals?



Yes, possible (but depends on source models and parameters...)

- We can discern between hadronic and leptonic signals by spectra
Internal cascade making both the signals similar are not relevant
- There is possibility that de-excitation signals dominate
In our case, Klein-Nishina is important at $\varepsilon_{KN} \sim \Gamma \gamma_m m_e c^2 \sim 50 \text{ GeV}$
(If KN is absent, the SSC peak is around $\varepsilon_b^{SC} \sim 2 \gamma_m^2 \varepsilon_b \sim \text{TeV}$)
In our case, $Y_{noKN} \sim 1$ leads to SSC fluence at TeV of $\sim 10^{-8} \text{ erg/cm}^2$



原子核ソースのまとめ

- UHECRが重い原子核だとソースとしていろいろな可能性が考えられる。宇宙磁場のせいでソースの同定も容易ではない。
- ニュートリノも検出することは難しくなるだろう
- もし近傍100Mpc以内でバーストが起きれば、**カスケードされない脱励起ガンマ線が原子核加速特有のプローブ**として使える可能性
- カスケード成分は π^0 ガンマ線起源が支配的だが、磁場が 10^{-16} G以下でない限り検出は不可能
- カスケード成分が仮に受かると、カスケードされない成分とはライトカーブから区別可能 (KM et al. 08 ApJL, KM et al. 09 MNRAS)
- Cen A-最も近傍の電波銀河(~3.8Mpc)
全てのUHECRがCenAからやってくるという極端なシナリオを将来のCTAで検証可能かも

まとめ

ソースが非定常の場合、組成が重い原子核の場合を考察

- ソースが非定常な場合

UHECR観測からエナジェティクスが制限できることを示した
GRB、AGN、マグネターからのニュートリノやガンマを計算
UHEガンマ線がプローブとして重要である可能性を示した

- 組成が重い原子核の場合

GRBやAGNでも原子核が生き残る場合があることを示した
生き残りの条件が満たされるとき、 $A\gamma$ ニュートリノは検出難
脱励起ガンマ線がプローブとして重要である可能性を示した

UHECR源解明には多波長全粒子観測の有効活用が必須
特にガンマ線観測とLHCの結果を踏まえた組成決定重要