

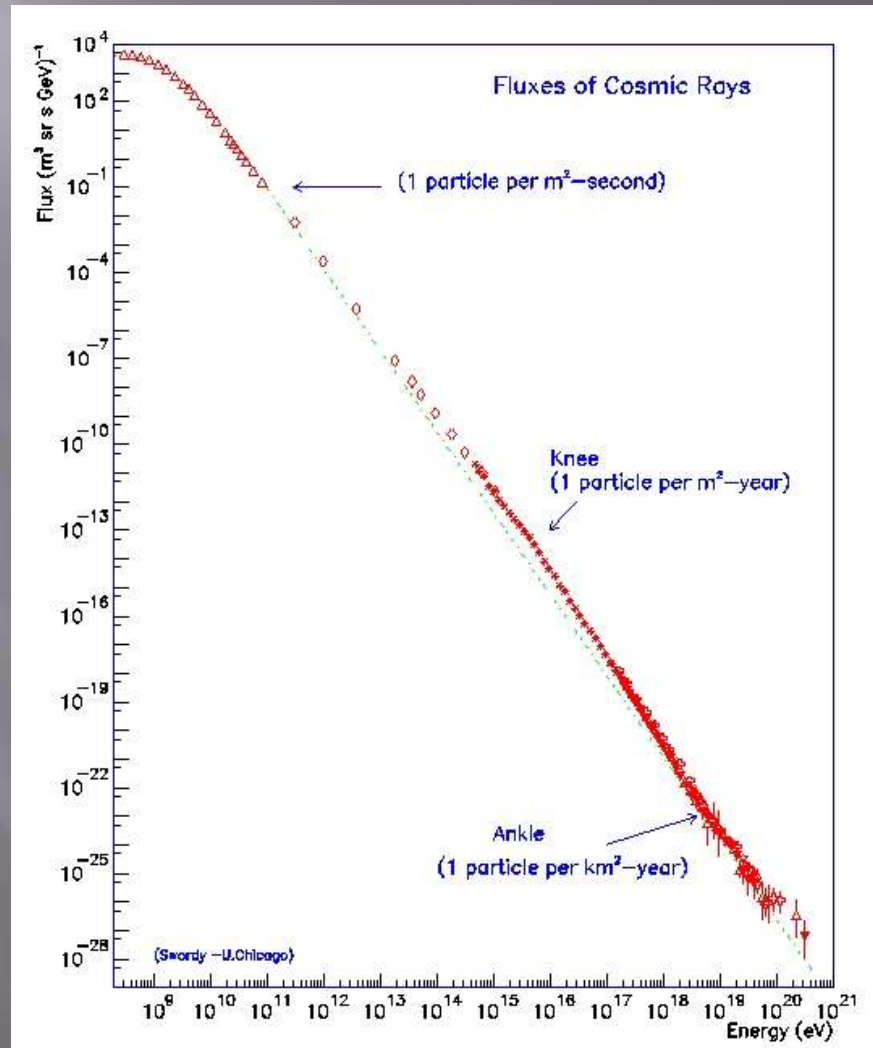
# 天体における粒子加速： 観測的側面から

森 正樹

東京大学宇宙線研究所

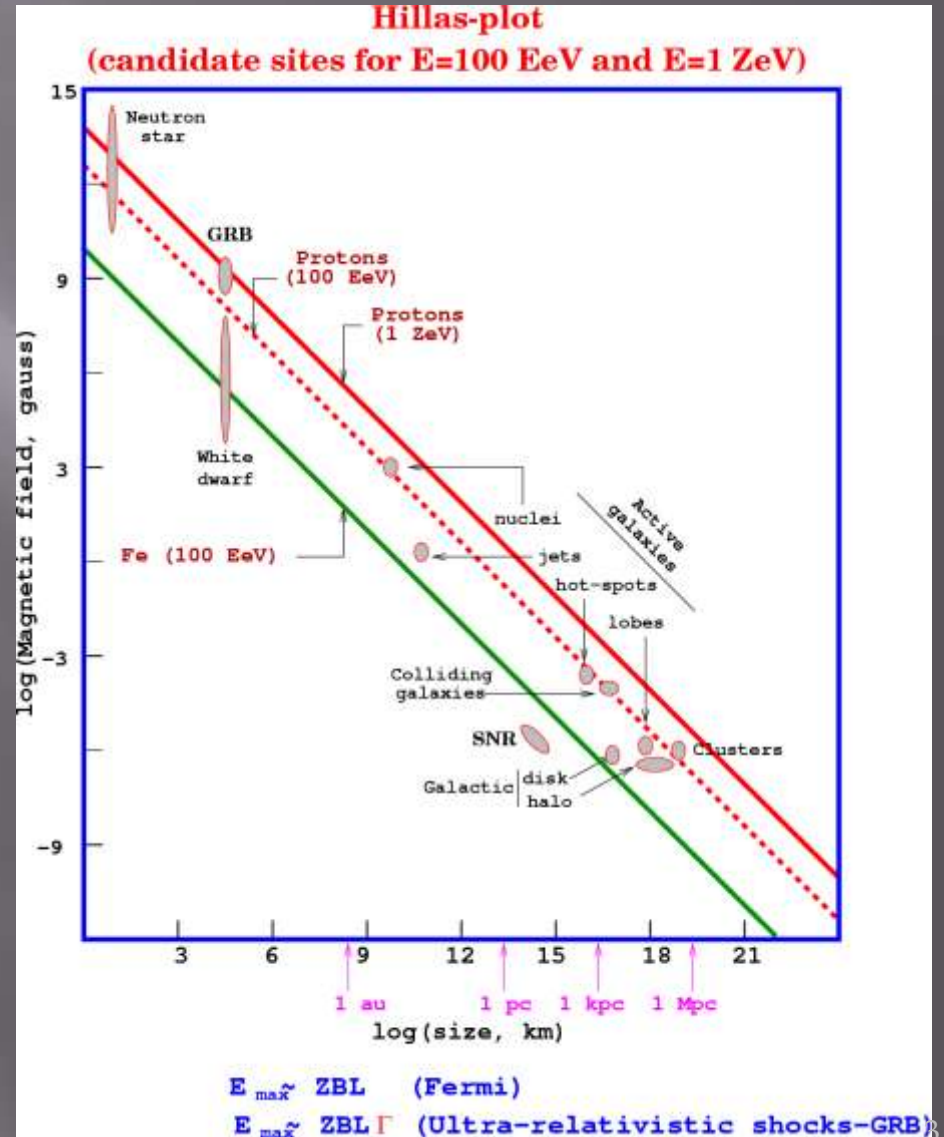
日本天文学会2007年秋季年会 企画セッション「プラズマ宇宙物理」  
サブセッション2：粒子加速・加熱 A117a 2007年9月26日 岐阜大学

# 観測事実1：12桁に及ぶ宇宙線のべき乗型エネルギースペクトル



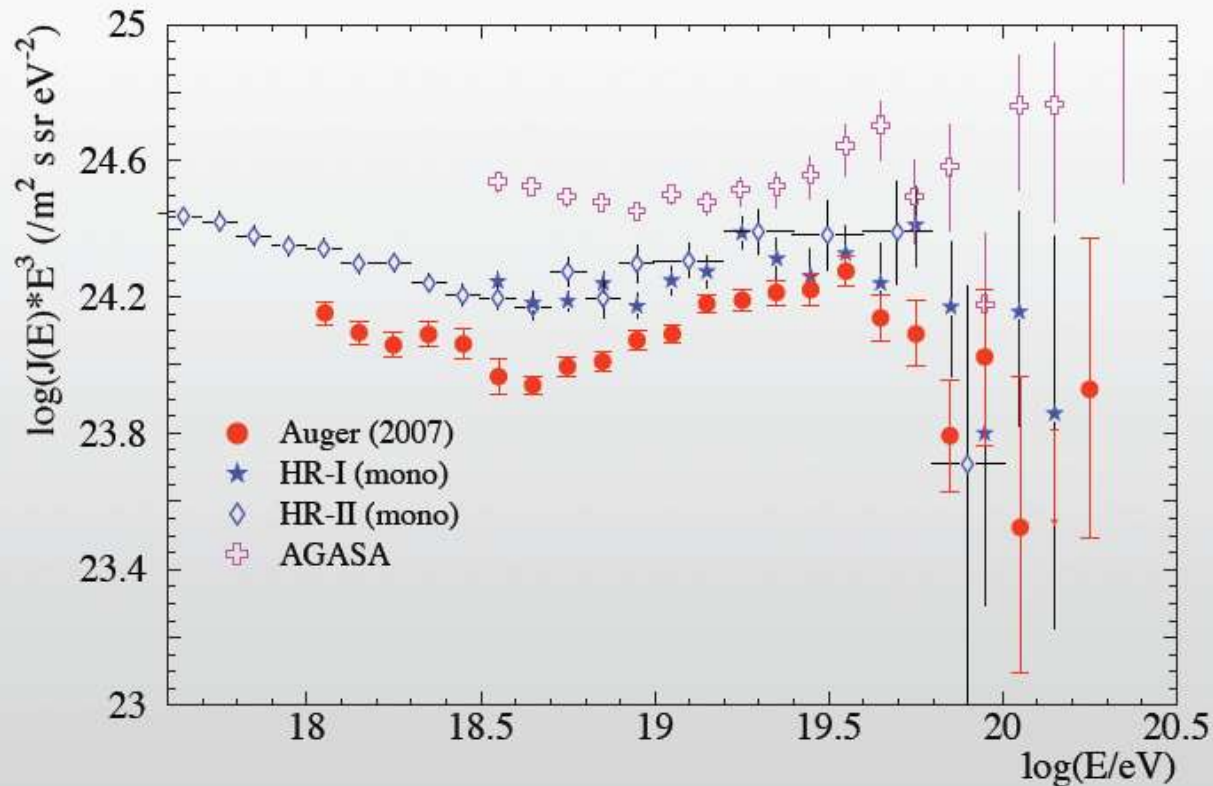
# 問題：極高エネルギーへの粒子加速

- $E_{\max} \sim Z B L$
- $10^{20}$ eVまで粒子を加速できる天体は限られている！
  - ガンマ線バースト
  - 活動銀河
  - 銀河団
  - 具体的な加速モデル？



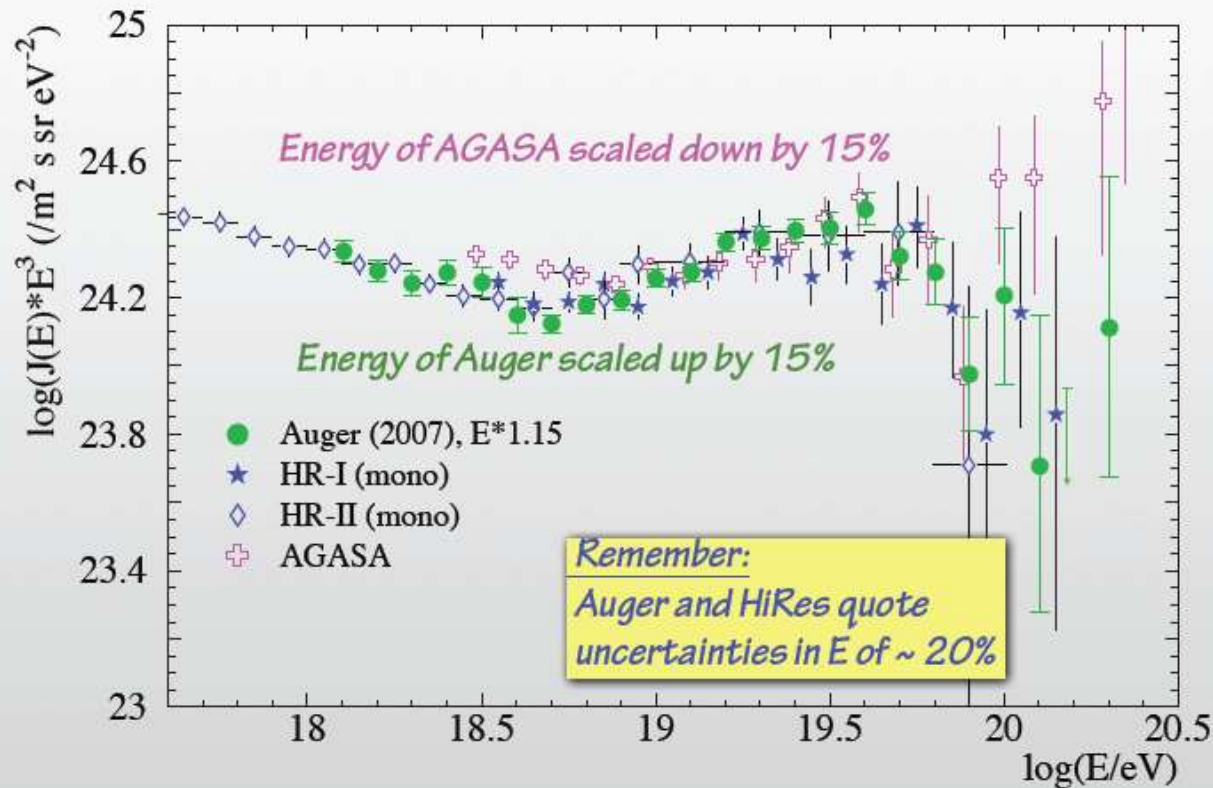
# 観測事実2：GZK限界を超える極高エネルギー宇宙線の存在

## Energy Spectra: Comparison



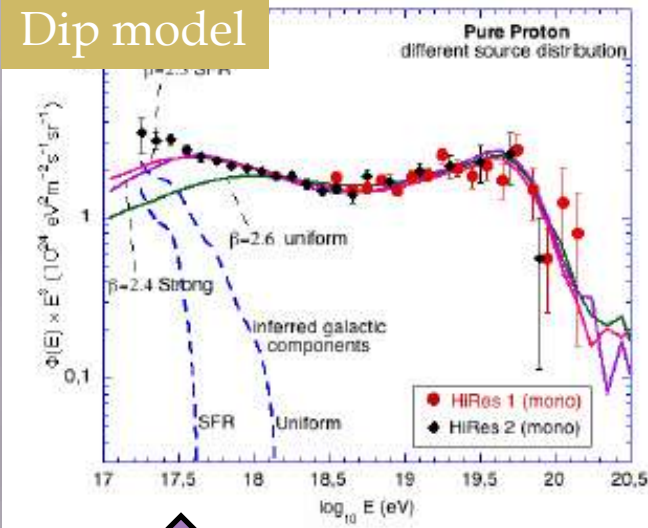
# 観測事実2：GZK限界を超える極高エネルギー宇宙線の存在

## Energy Spectra: Comparison

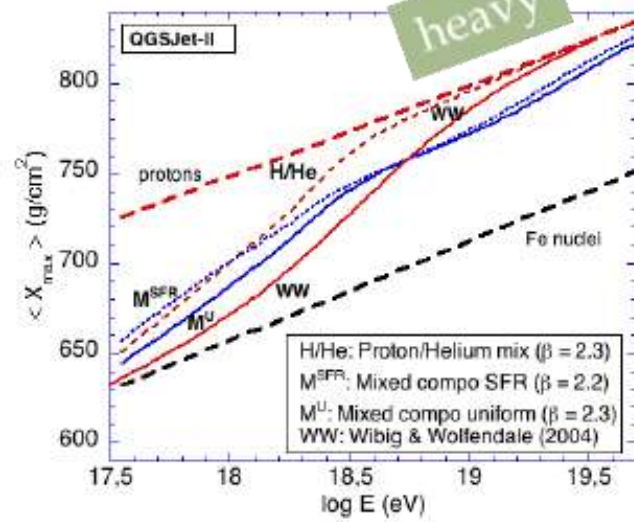
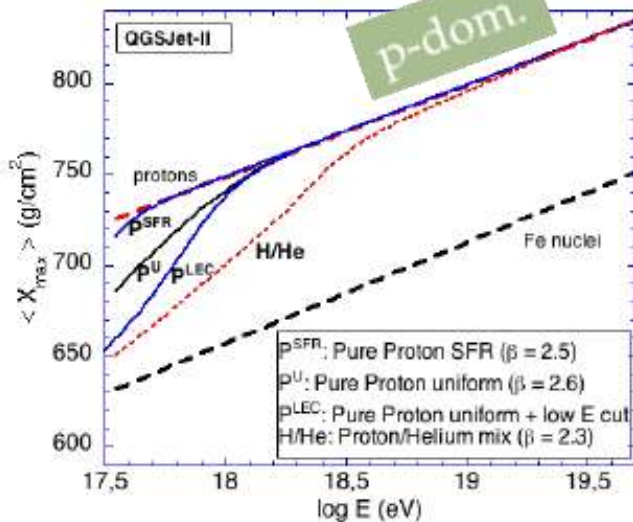
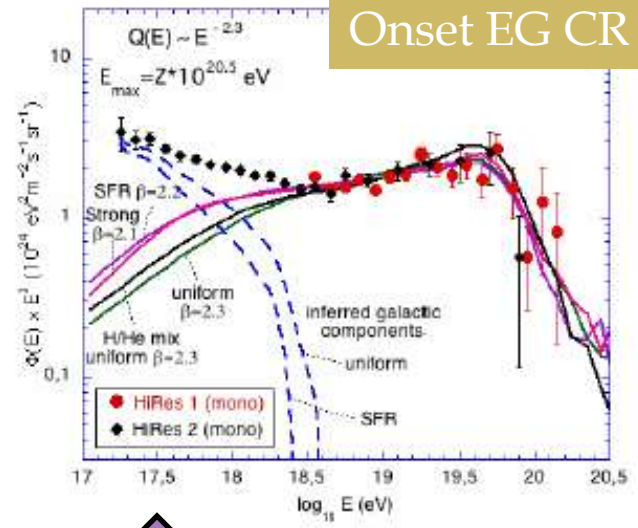


# 関連問題：宇宙線の組成

Dip model

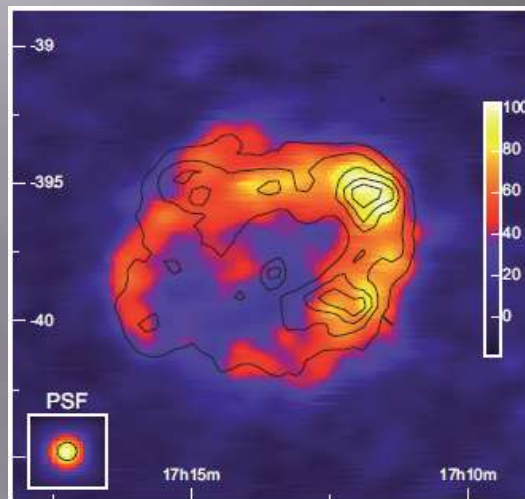


Onset EG CR

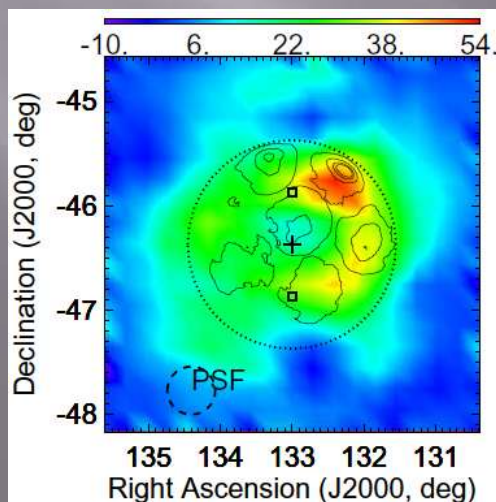
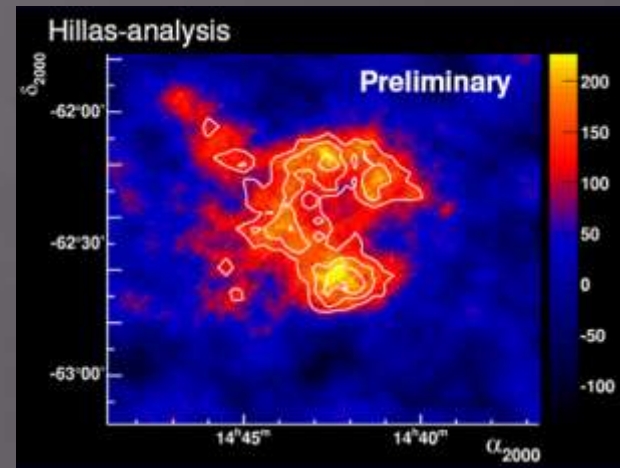


# 観測事実3：超新星残骸からの超高エネルギーガンマ線

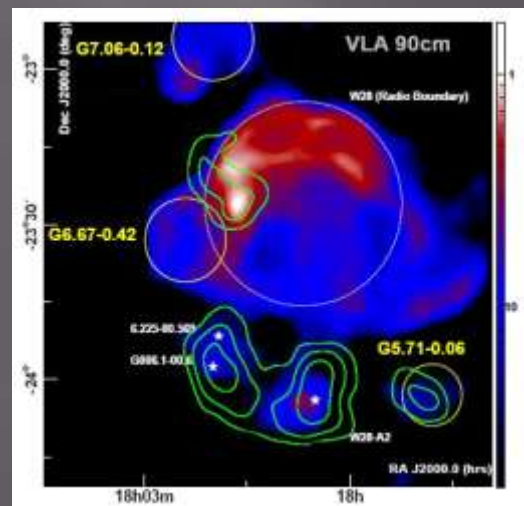
RXJ 1713.7-3946  
[H.E.S.S.,  
Aharonian et al.  
2006]



RCW86  
[H.E.S.S.,  
ICRC2007]



RXJ 0852-04622  
[CANGAROO-III,  
Enomoto et al.  
2006]



W28  
[H.E.S.S.,  
ICRC2007]

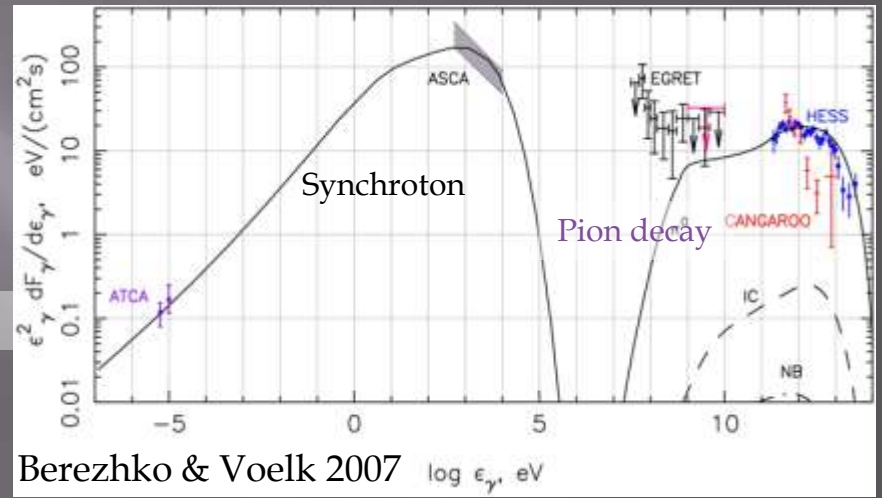
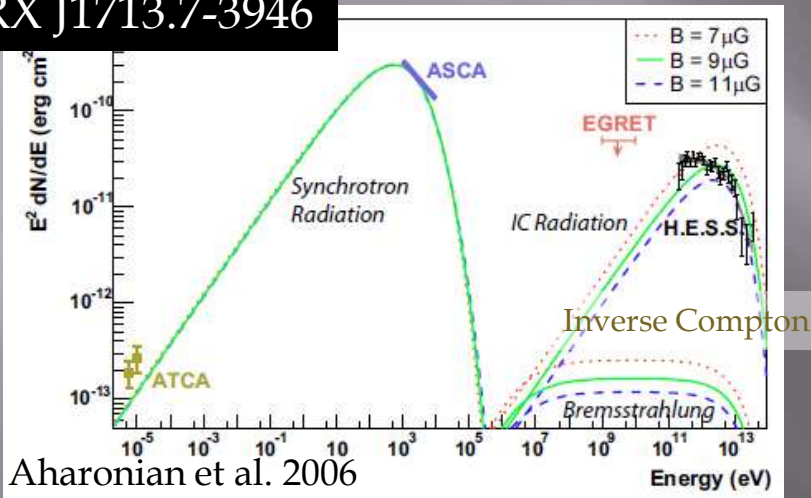
# 観測事実3：超新星残骸からの超高エネルギーガンマ線（スペクトル）

ハードなスペクトル+カットオフ： $\sim E^{-2}\exp(-E/E_{\max})$

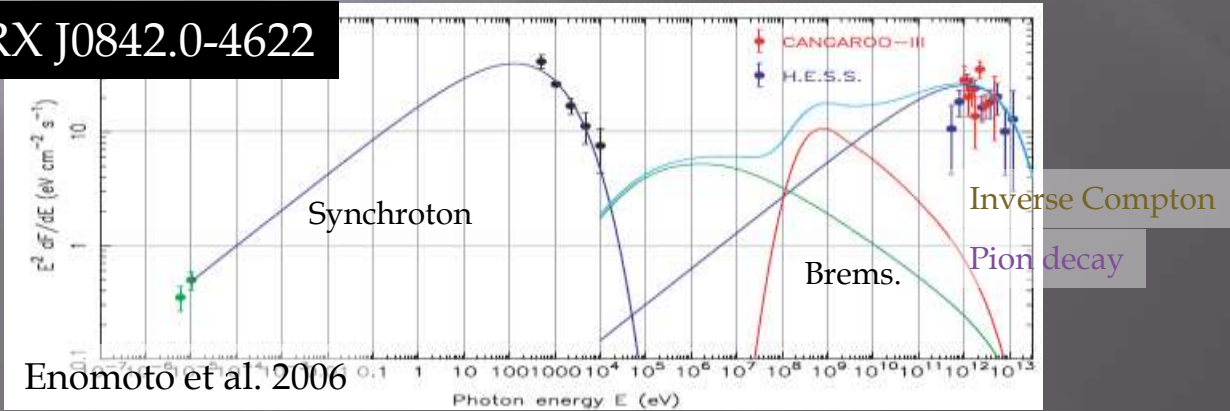
電子加速モデル

陽子加速モデル

RX J1713.7-3946

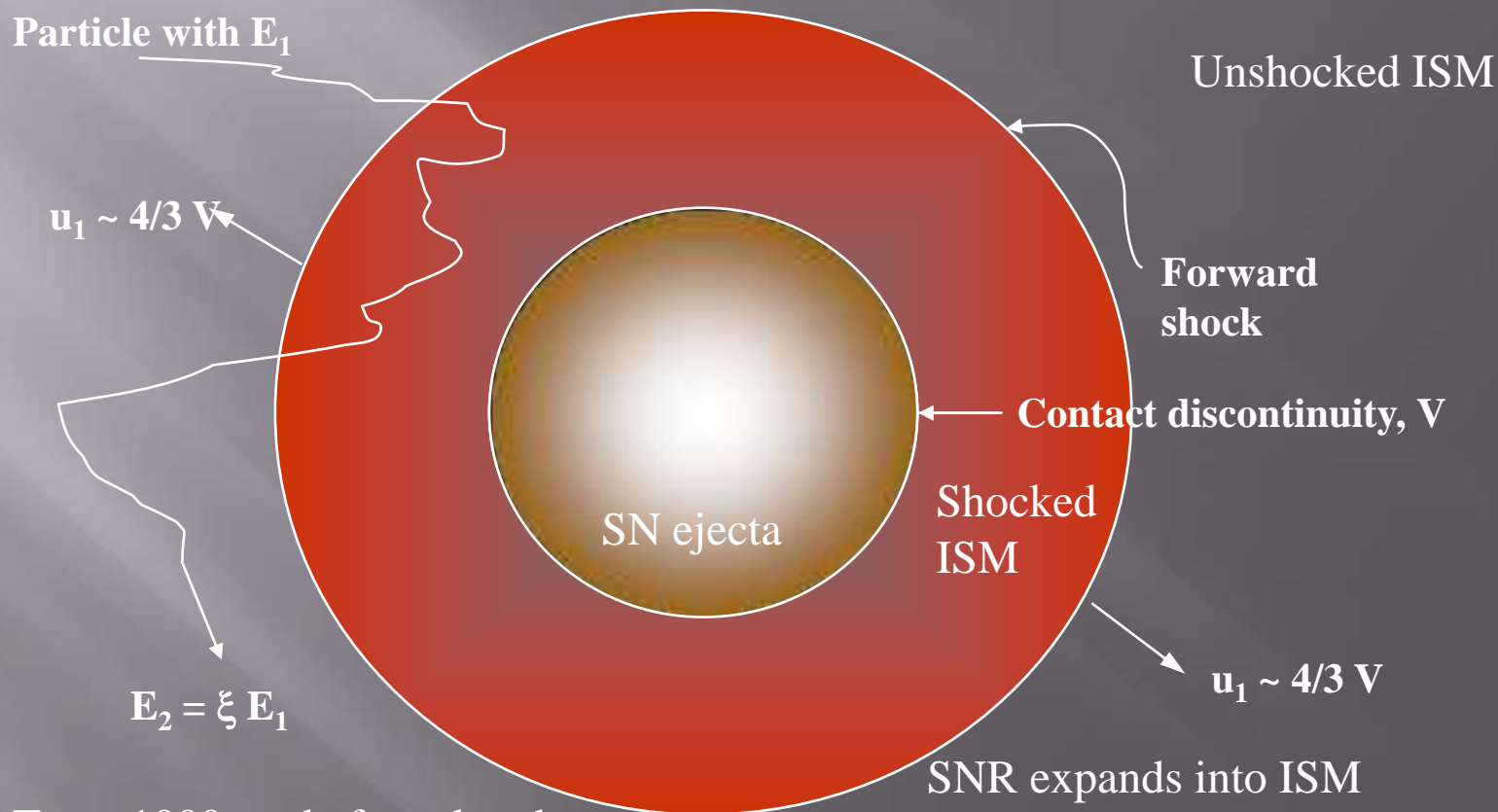


RX J0842.0-4622



加速されている粒子の種類についてはまだ決定的証拠がない！

# 問題：超新星残骸における宇宙線の衝撃波加速



$T_{\text{SN}} \sim 1000$  yrs before slowdown

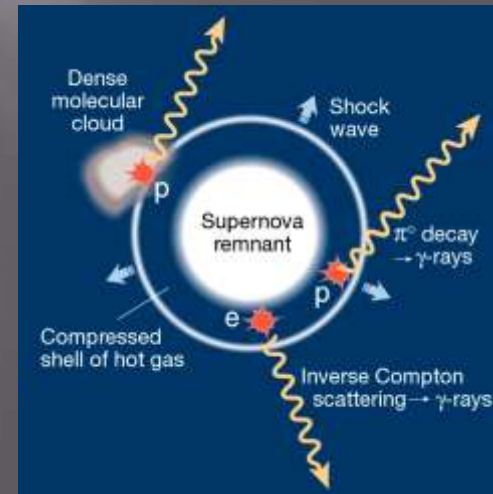
$E_{\text{max}} \sim Z \times 100$  TeV

SNR expands into ISM  
with velocity  $V \sim 10^4$  km/s.  
Drives forward shock at  $4/3 V$

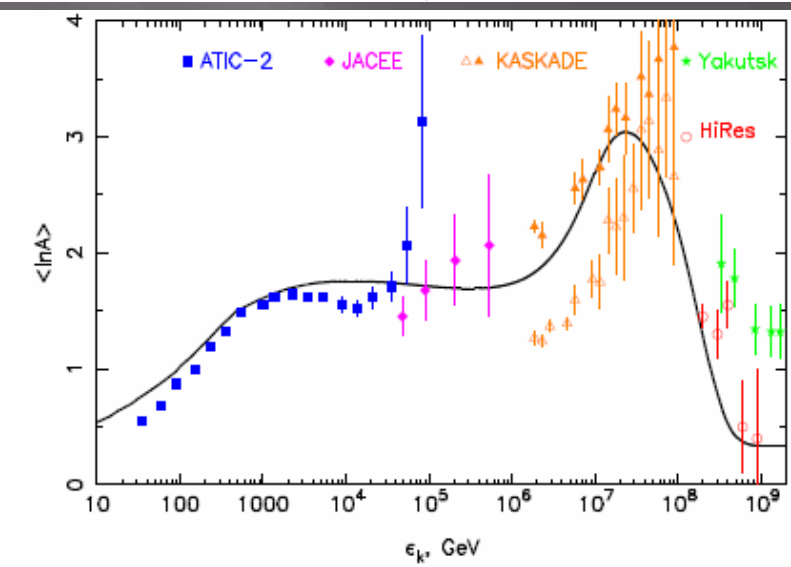
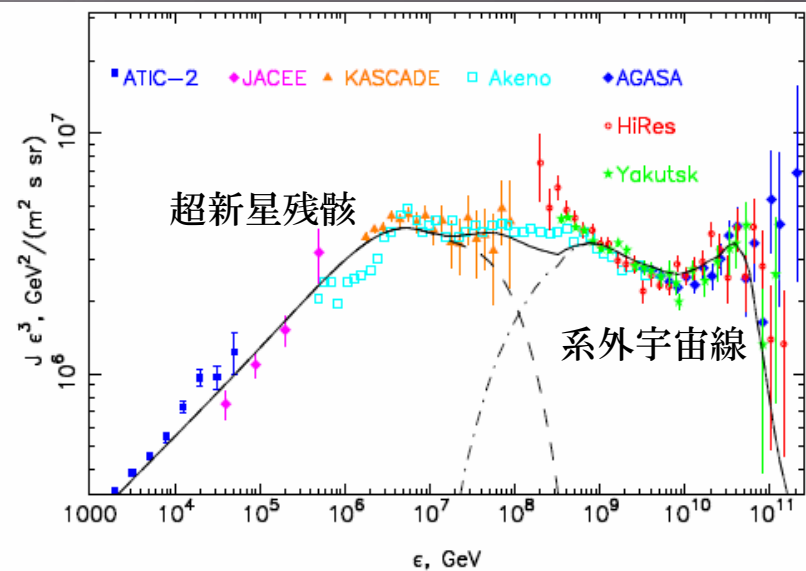
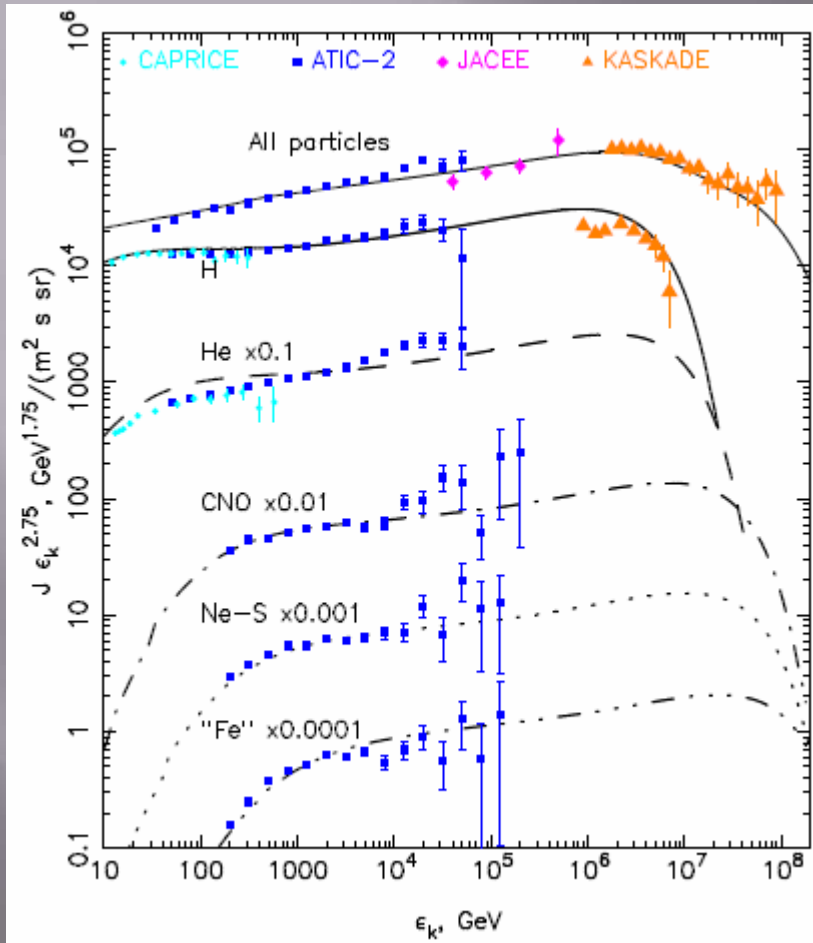
# 衝撃波加速理論の問題点

- スペクトルの形:
  - 衝撃波加速による微分スペクトルのべき  $\alpha \sim 2.1$ 
    - $\alpha_{\text{observed}} \sim 2.7; \alpha_{\text{source}} \sim 2.1; \Delta\alpha \sim 0.6 \rightarrow \tau_{\text{esc}}(E) \sim E^{-0.6}$
    - $c \tau_{\text{esc}} \rightarrow T_{\text{disk}} \sim 100 \text{ TeV}$
    - $\rightarrow$  等方性の問題
- $E_{\text{max}} \sim \beta_{\text{shock}} Z e \times B \times R_{\text{shock}}$ 
  - $\rightarrow$  それぞれの元素につき  $E_{\text{max}} \sim Z \times 100 \text{ TeV}$  & 指数関数的カットオフ
  - しかし観測されるスペクトルはさらに高エネルギーに伸びている:
    - $\rightarrow$   $E_{\text{max}}$ の問題

- ある種の超新星残骸においては  $p + \text{gas} \rightarrow \gamma (\text{TeV})$  過程が存在する
  - 近傍に「標的」が必要
  - 候補(e.g. HESS J1745-290)はあるが確実とは言えない
  - $\rightarrow$   $\pi^0$  起源  $\gamma$  線の証明の問題

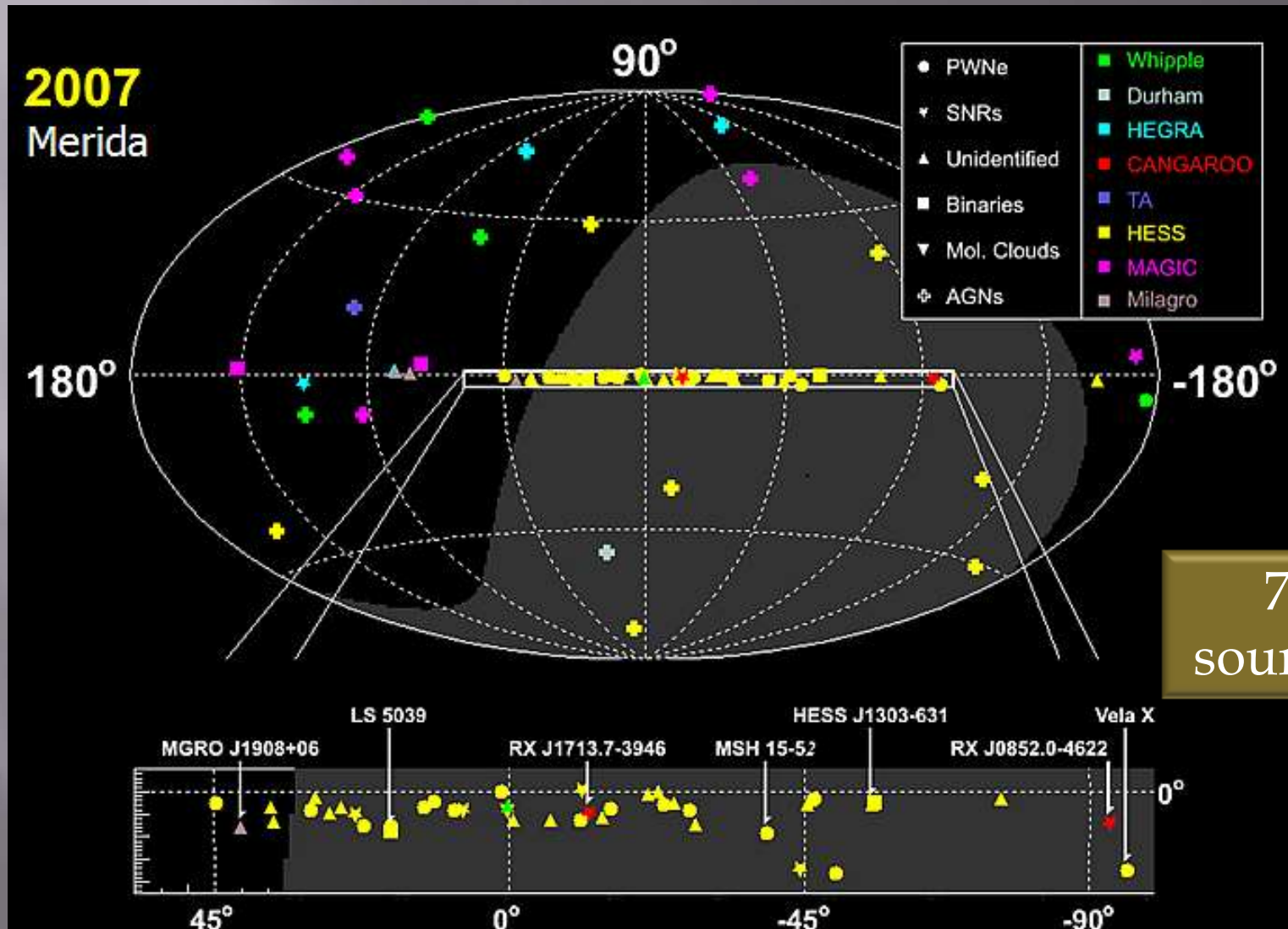


# 超新星残骸加速 + 系外宇宙線モデル



~ $10^{17}$ eVまでは超新星残骸における  
加速で説明できる(?!)

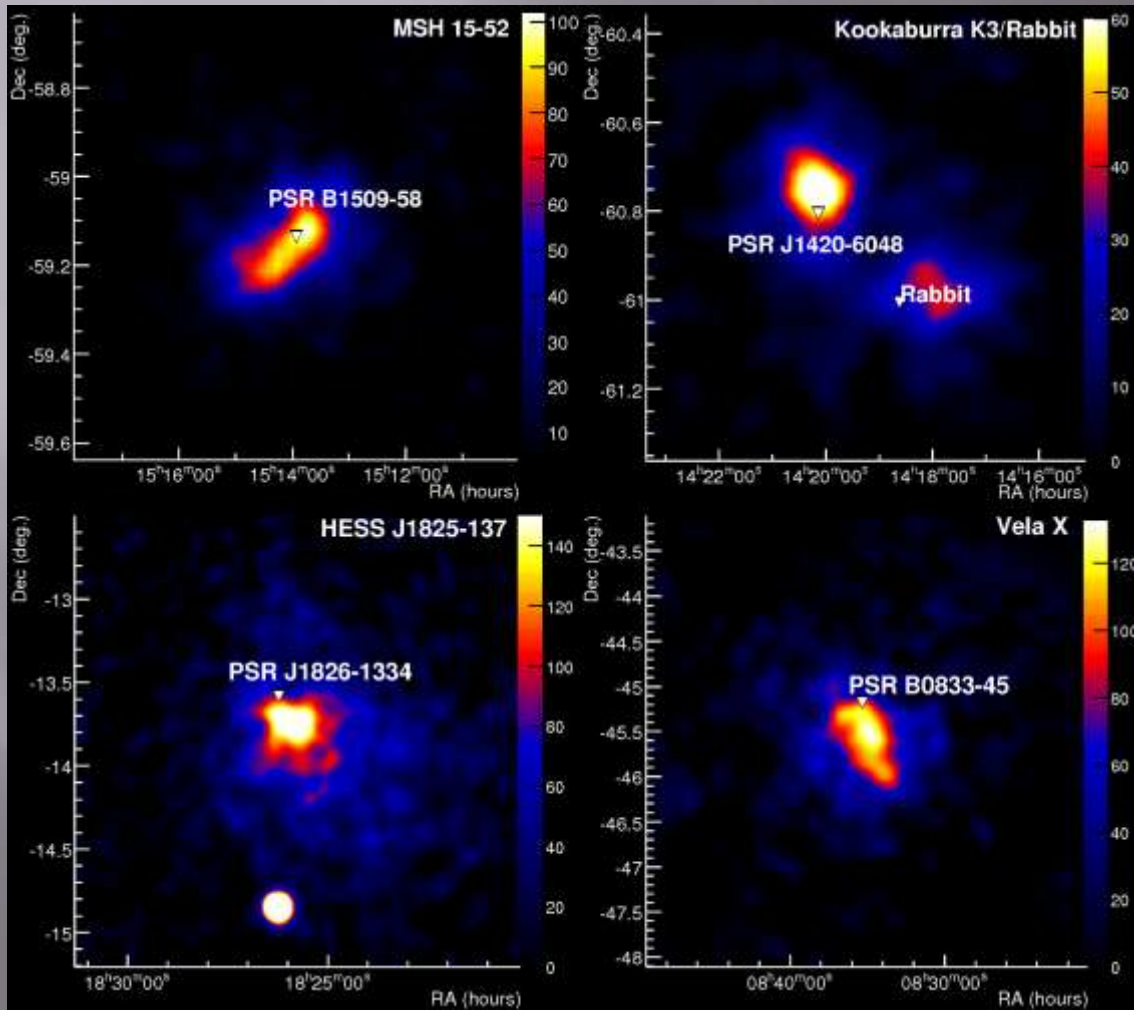
# TeVガンマ線天体 2007年



# TeVガンマ線天体の分類

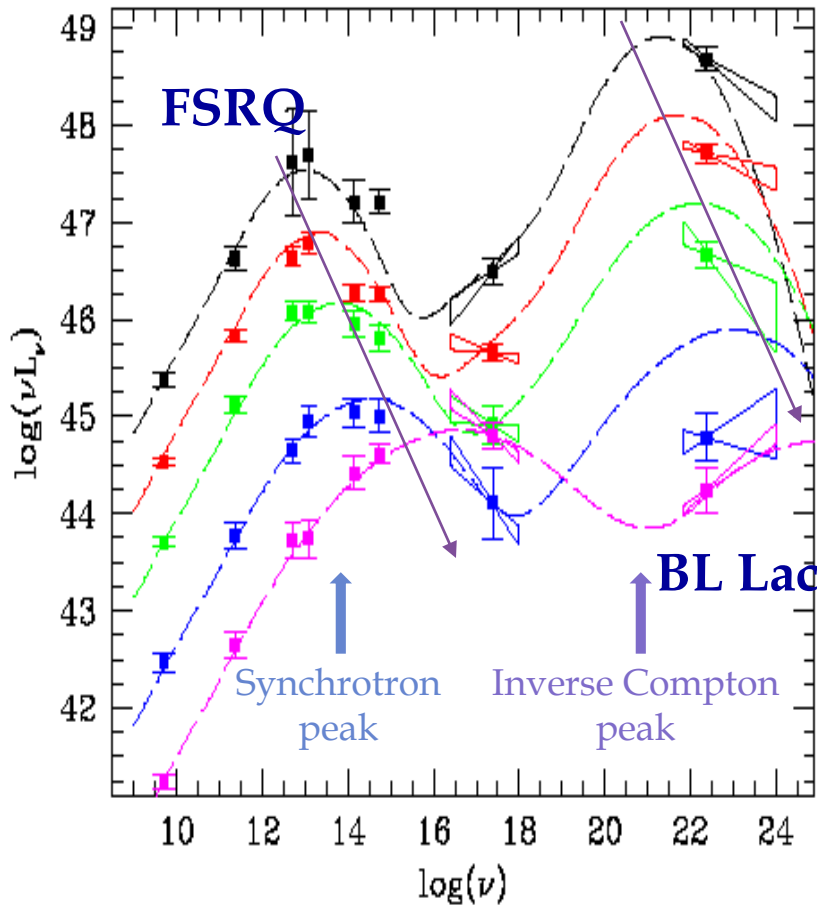
銀河系内天体	超新星残骸	7個
	パルサー星雲	18個
	連星系・マイクロクエーサー	4個
	銀河中心	1個
	diffuse成分	2個
	分子雲	未発見
銀河系外天体	活動銀河	19個
	近傍銀河	未発見
	スターバースト銀河	未発見
	銀河群・銀河団	未発見
未同定天体		21個
ガンマ線バースト		未発見
ダークマター		未発見
量子重力		未発見

# パルサー星雲



- 系内ではメジャーな TeV天体
  - Hinton (2007ICRC) によればTeV天体 71個中18個
  - 比較的若く( $<10^5$ 年)スピンドウンエネルギーの大きなパルサーに付随
- パルサー本体からずれたところに10pc程度の広がり
- 電子起源の逆コンプトン散乱による $\gamma$ 線?

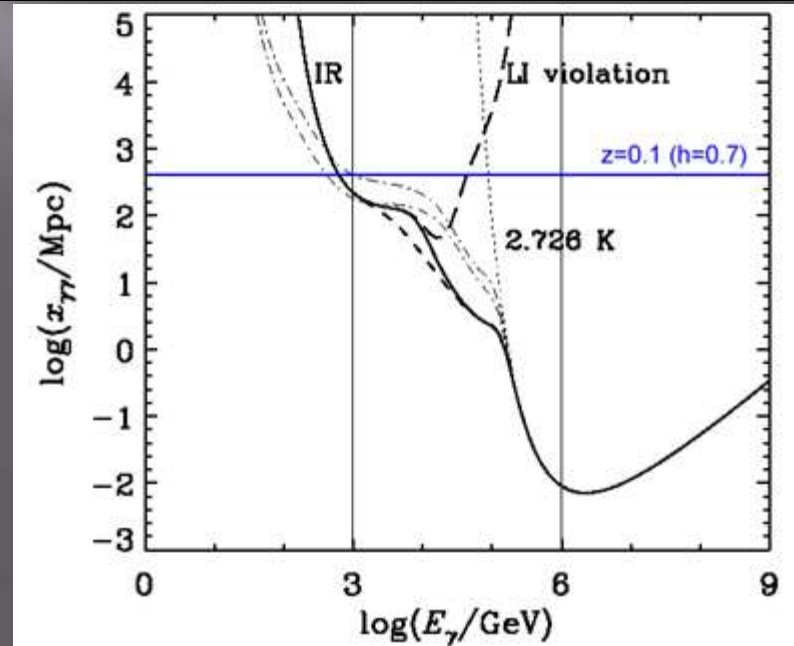
# 観測事実4：活動銀河核からの超高エネルギーガンマ線



観測されるスペクトルには銀河間空間での伝播効果がかかる！

$$\gamma_{\text{TeV}} + \gamma_{\text{IR}} \rightarrow e^+ + e^-$$

Mean free path for  $e^+e^-$  pair production

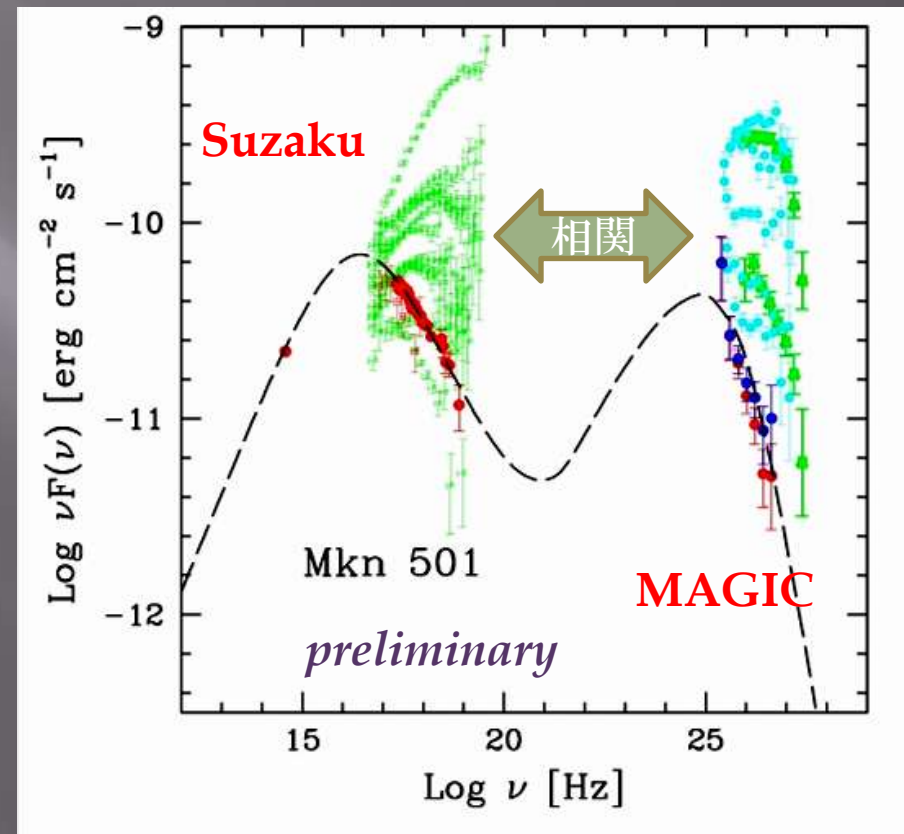
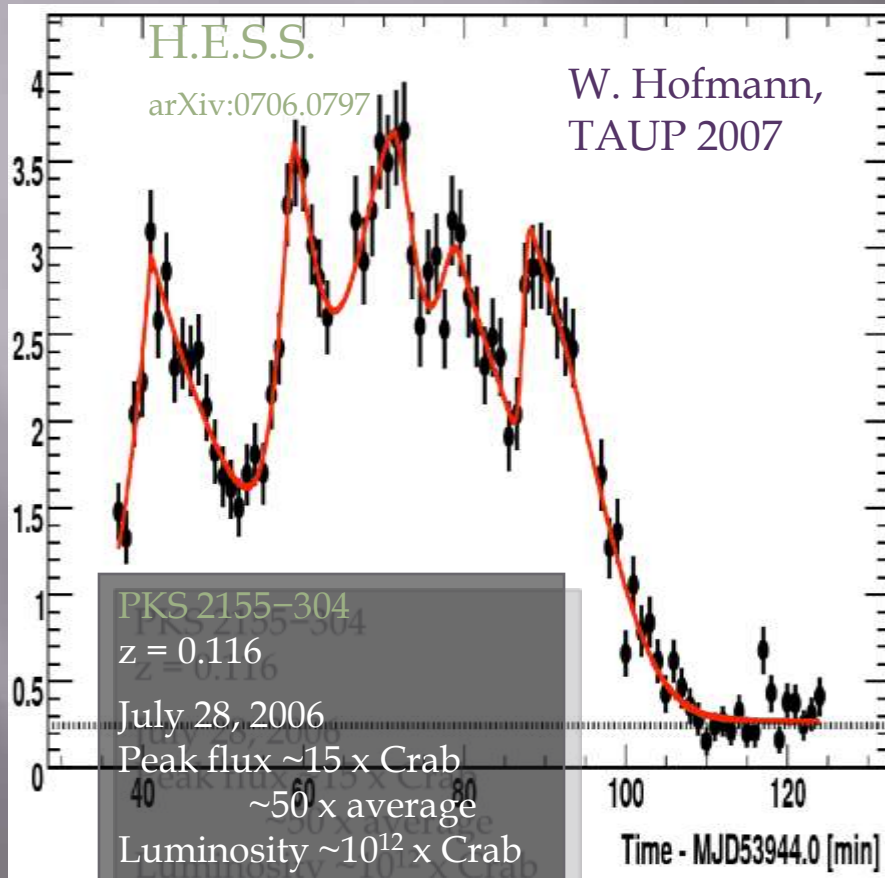


電子加速モデル

Fossati et al. 1998

Protheroe & Meyer, Phys.Lett. B493 (2000) 1

# 観測事実4：活動銀河核からの超高エネルギーガンマ線：時間変動



M. Hayashida, ICRC 2007

速い時間変動  $\Leftrightarrow$  粒子加速場所と加速機構

# Summary

- 12桁に及ぶ宇宙線のべき乗型エネルギースペクトルをどう説明したらよいか、という**宇宙線起源の謎**は、天体物理学における古いが未解明の「百年問題」。
- 最高エネルギー宇宙線（銀河系外）の加速と起源についての解明はまだまだ先が見えていない。
- 銀河系内宇宙線の起源の最有力候補である**超新星残骸**は、衝撃波加速の現場として観測的証拠が集まってきているが、宇宙線の起源とするには加速粒子の種類がまだわかっていない。
- **活動銀河核**における早い時間変動は、粒子加速場所と加速機構についてのヒントになっているはず。