

超高エネルギー宇宙線 分野理論レビュー

第2回CRCタウンミーティング

2012年6月30日

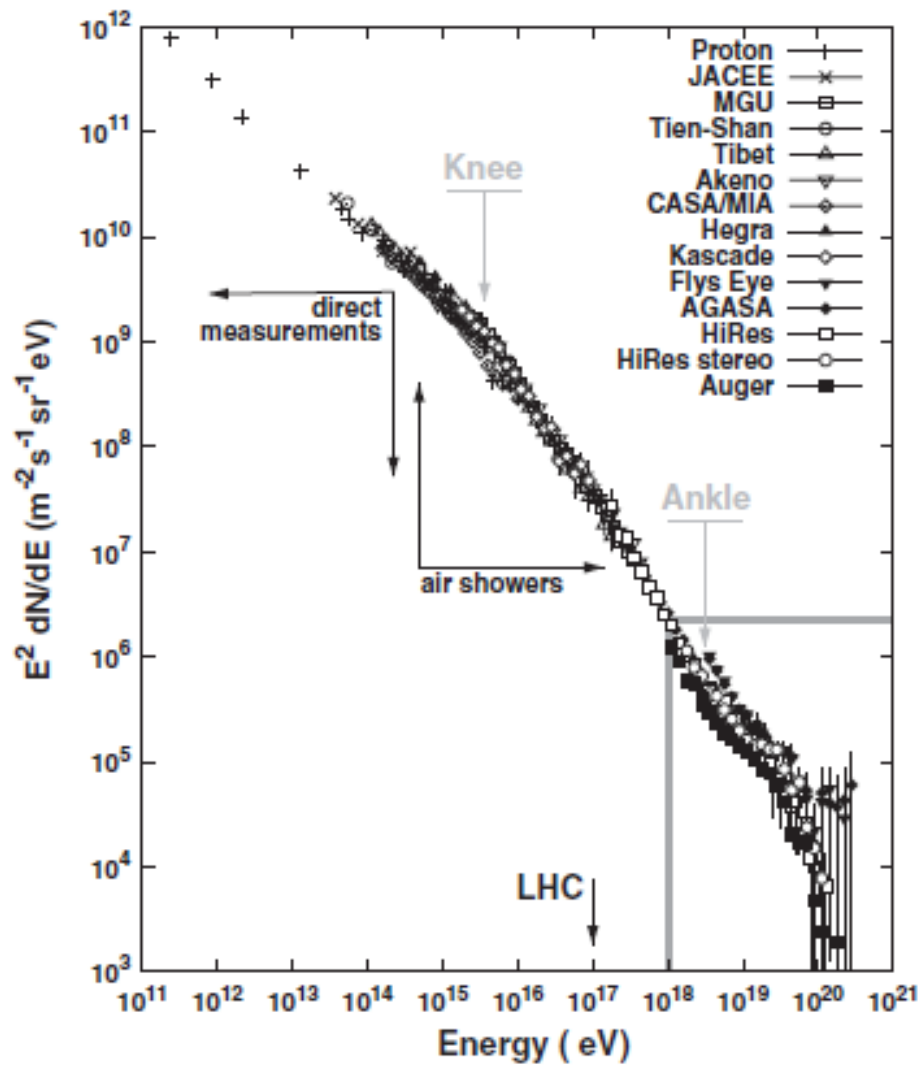
高原文郎(阪大理宇宙地球)

- Kotera & Olinto, A.R.A.A. 49, 119 (2012)
- Letessier-Selvon & Stanev, RMP, 83, 907 (2011)
- AIP Conf.Proc. No.1367 (2011)

1. 観測事実
2. 基本的制約
3. 源と伝播
4. 加速機構
5. 展望

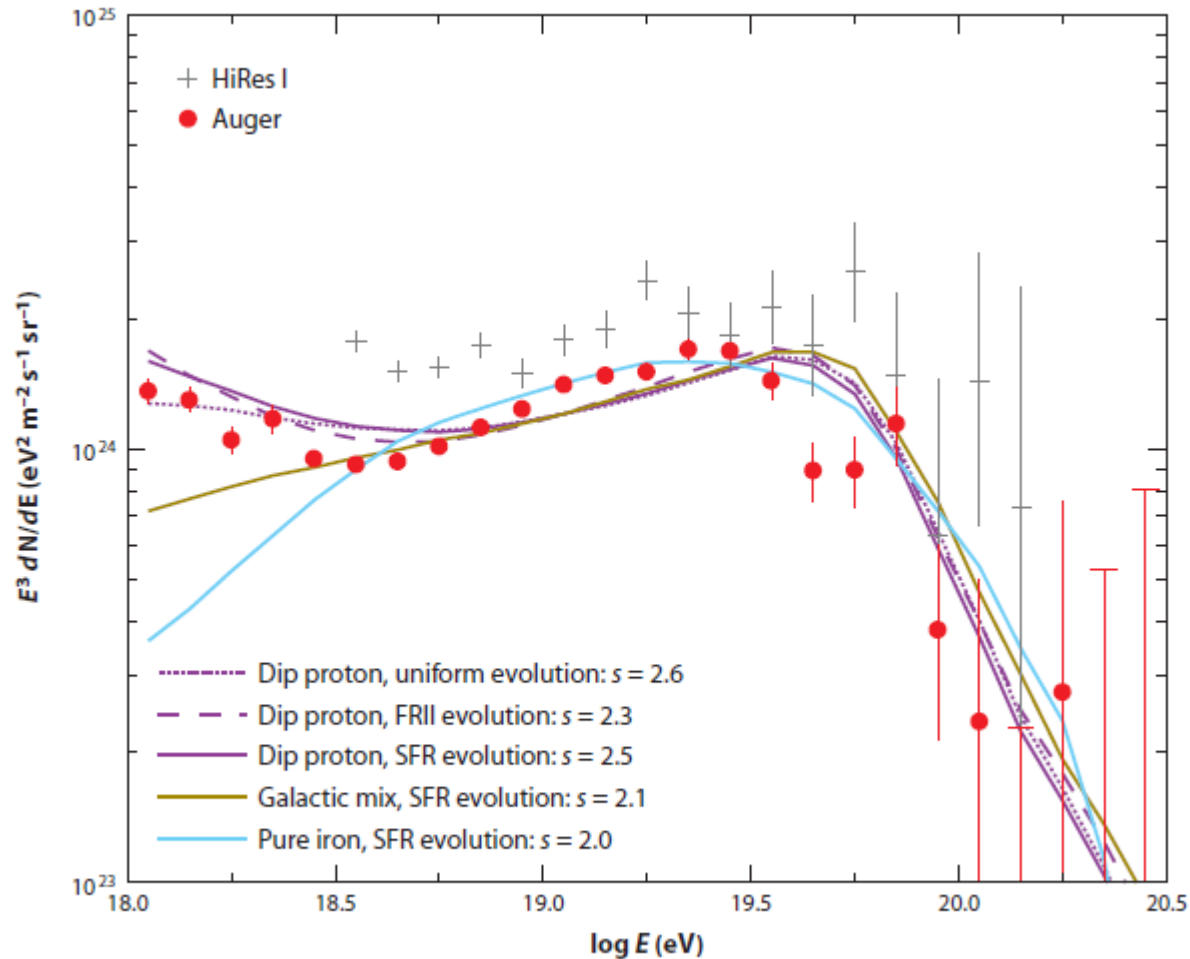
観測事実

- 60's ⇨ 80-90's FLY's Eye, Yakutsk, AGASA
⇨ 00-10's Hires, Auger, TA
- スペクトル
 - 加速器の到達エネルギーを超える領域
 - GZK cutoff / acceleration limit
- 組成
 - p / Fe
- 非等方性
 - large scale / small scale



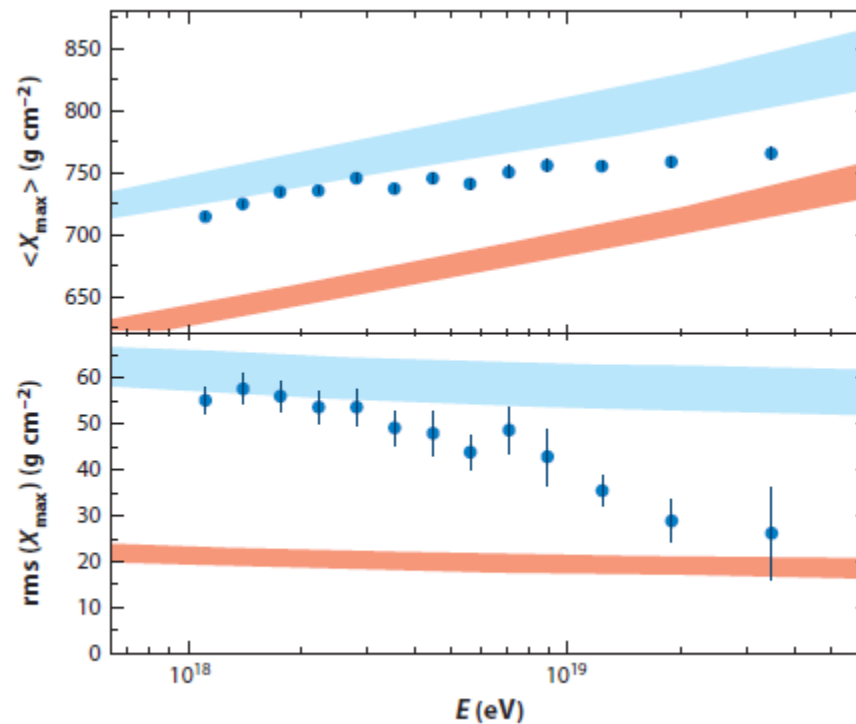
From Letessier-Sevon & Stanev 2011

cutoff seen (GZK or acceleration limit)



From Kotera & Olinto 2011

Auger data of $X_{\max}$ conflict with HiRes



From Kotera & Olinto 2011

(an)isotropy of arrival directions

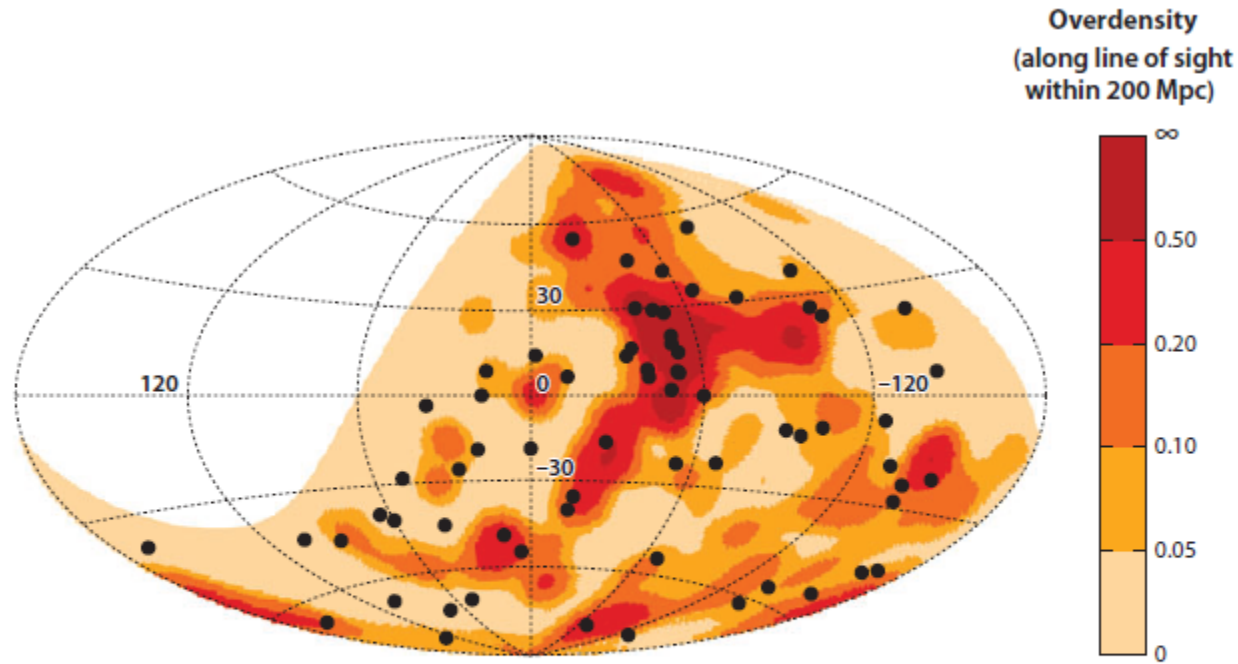


Figure 4

Arrival directions of cosmic rays with energy $E \geq 55$ EeV detected by the Pierre Auger Observatory (*black dots*) in an Aitoff-Hammer projection of the sky in Galactic coordinates restricted to $|b| > 10^\circ$. Shaded areas represent a smoothed density map of the 2MRS galaxies within 200 Mpc over the Auger Observatory field of view (Abreu et al. 2010). The angular smoothing scale is 5° .

基本的制約

- interaction length
- Hillas diagram
- local production rate
- stationary vs transient
- Galactic vs extragalactic

super-GZK sources are local

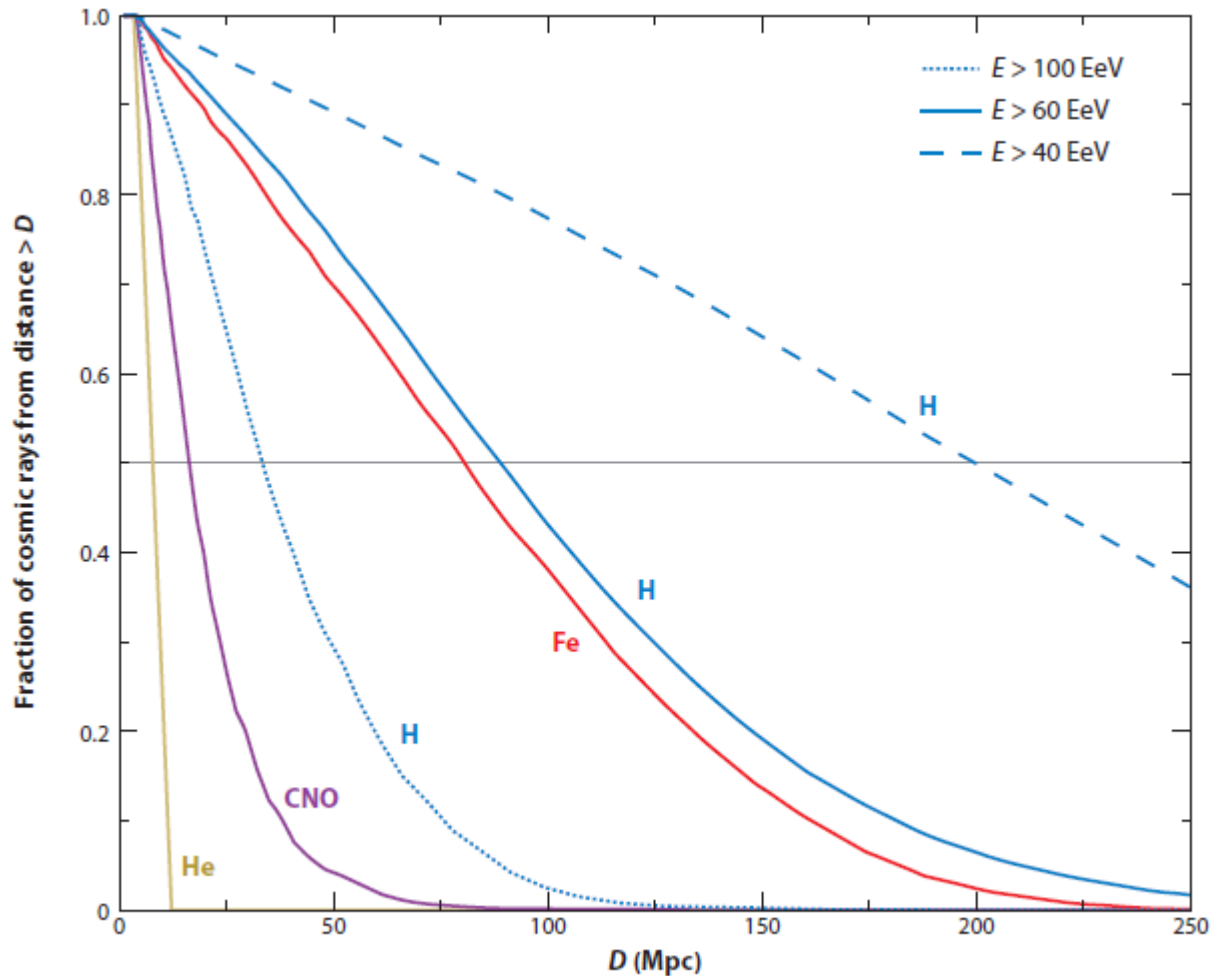
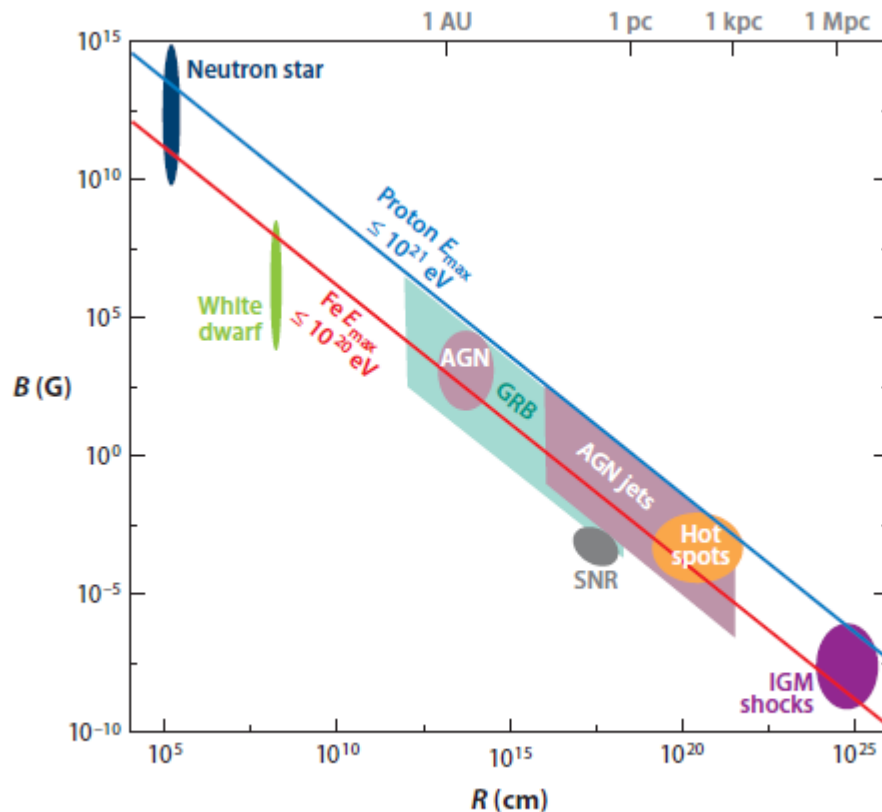


photo pion production
Bethe-Heitler
photo-disintegration

Hillas diagram

super-GZK sources are extragalactic



$$R \gtrsim r_{\text{L}} = E / eB = 100 E / Z / 10^{20} \text{ eV} \cdot 1 \text{ mG} / B \text{ pc}$$

From Kotera & Olinto 2011

源

- 天体 vs 素粒子
 - 光子成分の上限から天体起源が有力
- AGN
 - radio galaxies : lobes, jets, nuclei
- GRB
 - transient
- clusters of galaxies
- normal galaxies
- birth of magnetars

エネルギー密度と生成率

- GZK region
 - $u_{\downarrow GZK} \approx 10^{-21} \text{ erg cm}^{-3}$
 - $\epsilon_{\downarrow GZK} \approx 10^{-37} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
寿命が短い＝近傍の源のみ寄与
- sub-GZK region
 - $u_{\downarrow sub} \approx 10^{-19} \text{ erg cm}^{-3}$
 - $\epsilon_{\downarrow sub} \approx 3 \times 10^{-37} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
寿命が長い＝遠方の源も寄与
- ankleの解釈 Galactic-extragalactic transition
vs Bethe-Heitler dip

比較

– $\epsilon_{\downarrow star} \approx 10^{1-32} \text{ erg cm}^{1-3} \text{ s}^{1-1}$

stellar light (IR & optical background)

– $\epsilon_{\downarrow SN} \approx 10^{1-35} \text{ erg cm}^{1-3} \text{ s}^{1-1}$ cosmic rays

– $\epsilon_{\downarrow BH} \approx 10^{1-34} \text{ erg cm}^{1-3} \text{ s}^{1-1}$

Seyfert galaxies (X-ray background)

– $\epsilon_{\downarrow RG} \approx 10^{1-36} \text{ erg cm}^{1-3} \text{ s}^{1-1}$ Radio galaxies

– $\epsilon_{\downarrow GRB} \approx 10^{1-38} \text{ erg cm}^{1-3} \text{ s}^{1-1}$

Gamma-Ray Bursts

(赤方偏移分布に依存: 多くの場合過大評価している)

GRB

- 生成率は不足
- 1回のGRBが平均10万年間のUHECRを担う
- 定常等方的分布にするためには銀河間磁場が必須
- $r_{\downarrow L} = E/eB = 100 E/Z/10^{12} \text{ eV } 1\text{nG}/B \text{ Mpc}$
- 0.1nG以下だと直進性が優勢となって非等方性、間歇性が出てくる

galaxies

- normal galaxies
 - 数は多い
 - 100 μ G程度の強い磁場があれば捕捉可能
 - our Galaxyでも閉じ込め限界近くまで加速している
- clusters of galaxies
 - 深い重力ポテンシャルに捕捉された高温ガスと磁場が存在し、UHECRを閉じ込められる。
 - これまでのところハドロン加速の証拠なし
 - 近傍の源の数がわずか

active galaxies

- Seyfert galaxies
 - 数は結構多い
 - エネルギー的にはOK (効率が低くてもよい)
 - 準相対論的なアウトフローは普遍的にある
 - 非熱的活動性は弱い
- Radio Galaxies
 - 顕著な非熱的活動性
 - 数が少なく、非等方性にGRBと同様の問題あり
 - これまでのところCen A, M87への集中度は予想以下

Birth of Magnetars

- 誕生時に高速回転ならば強磁場によって加速可能
- 超新星爆発の1%が高速回転Magnetarになれば、エネルギー的には可能
- これまでのところ、Magnetarに誕生時の痕跡を表す明るいNebulaが付随している証拠はない

一つの注意

- RBの下限から

$$L \downarrow Poy = \pi R^2 B^2 c$$

の下限が出るという主張はポインティング流束が動径方向に向いていることを仮定している。

- ポインティング流束が方位角方向を向いていれば(あるいは系内で閉じていれば)この制限はつかない

加速機構

- DSA
- 2nd order Fermi acceleration

$$\tau_{\text{acc}} \approx \xi (c/V)^2 r L / c$$

- direct acceleration
 - magnetic reconnection
 - black hole/accretion disk magnetosphere: magnetar

$$E_{\text{max}} \approx e/c (\Delta R)^2 \Omega B$$

$$= 10^{20} (\Delta R / 10^{15} \text{ cm})^2 (\Omega / 10^3 \text{ s}^{-1}) (B / 10^{15} \text{ G}) \text{ eV}$$

Diffusive shock acc. (Fermi acc.)

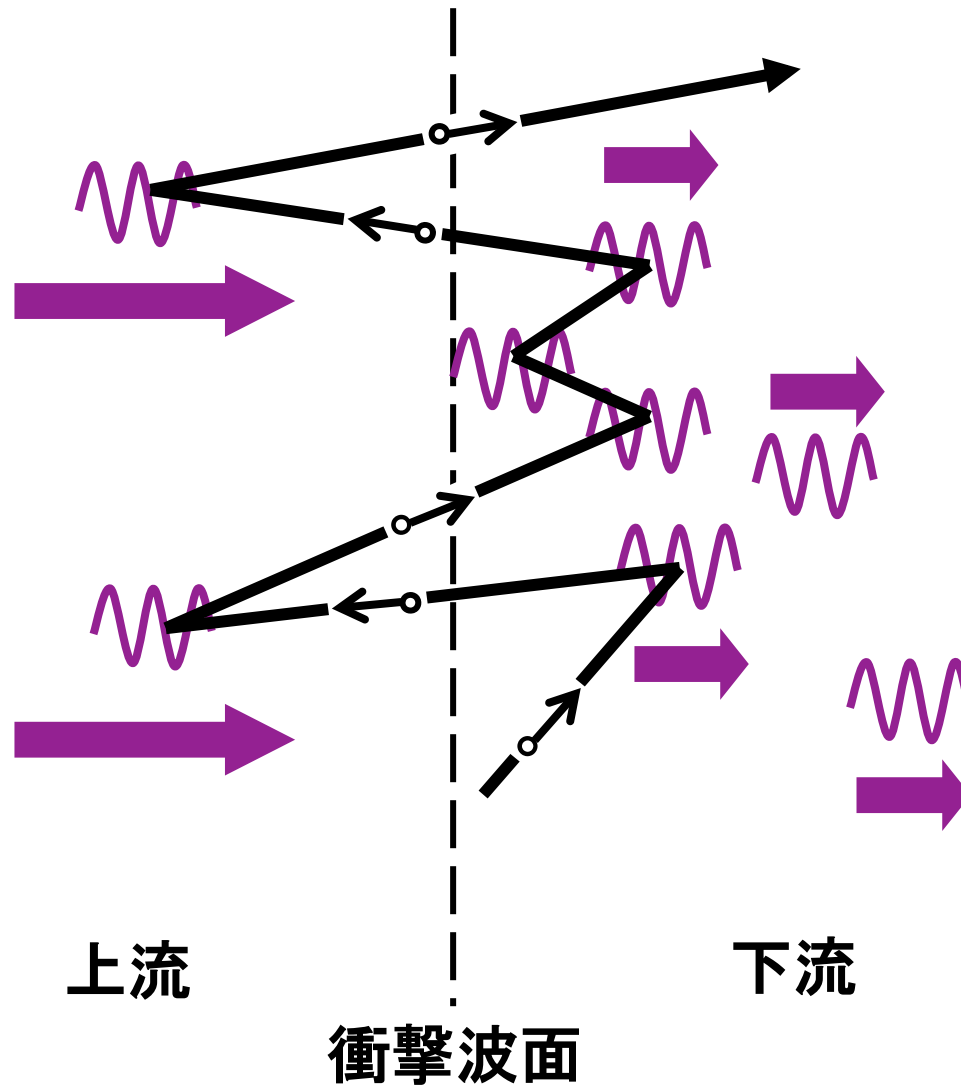
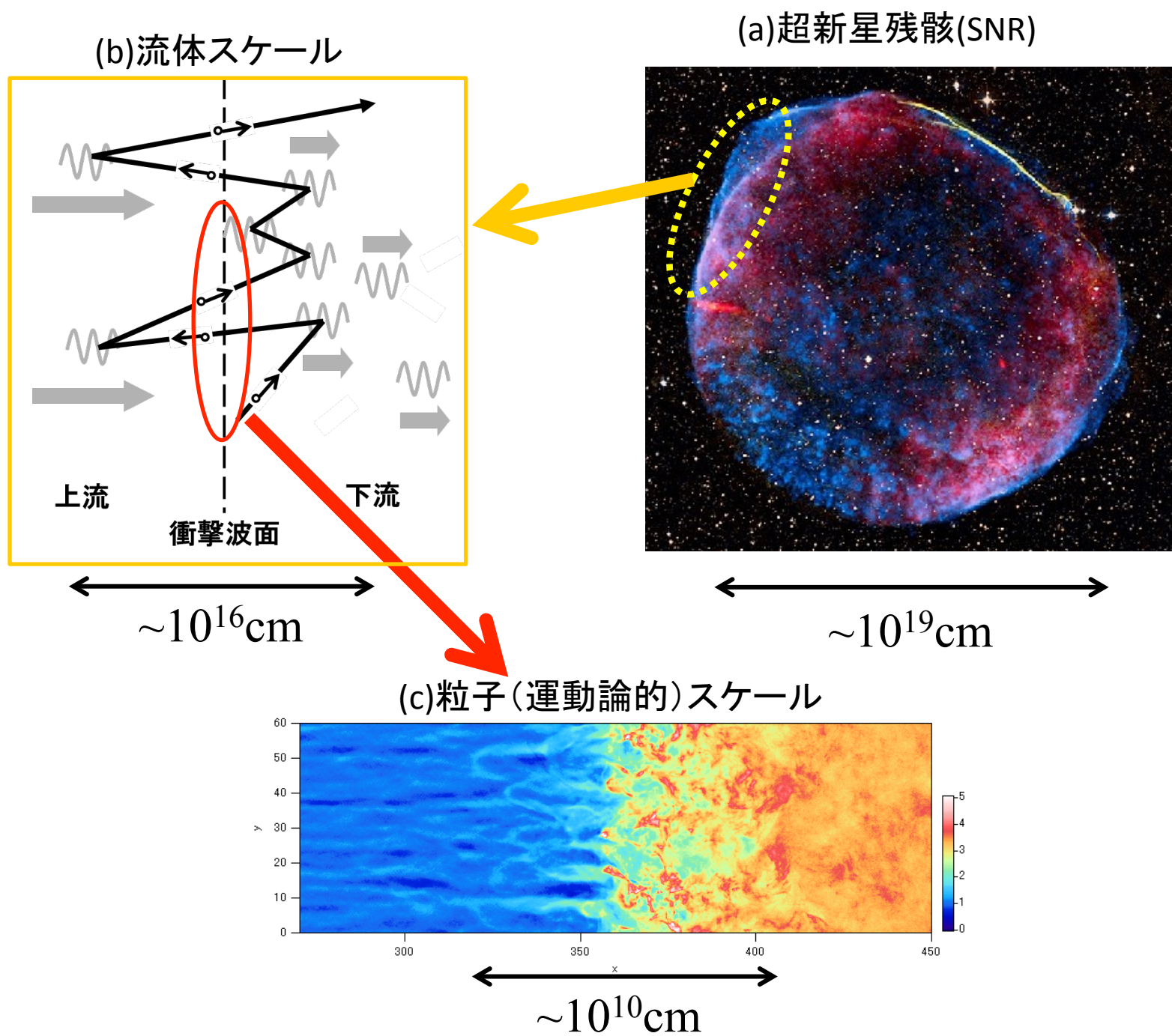
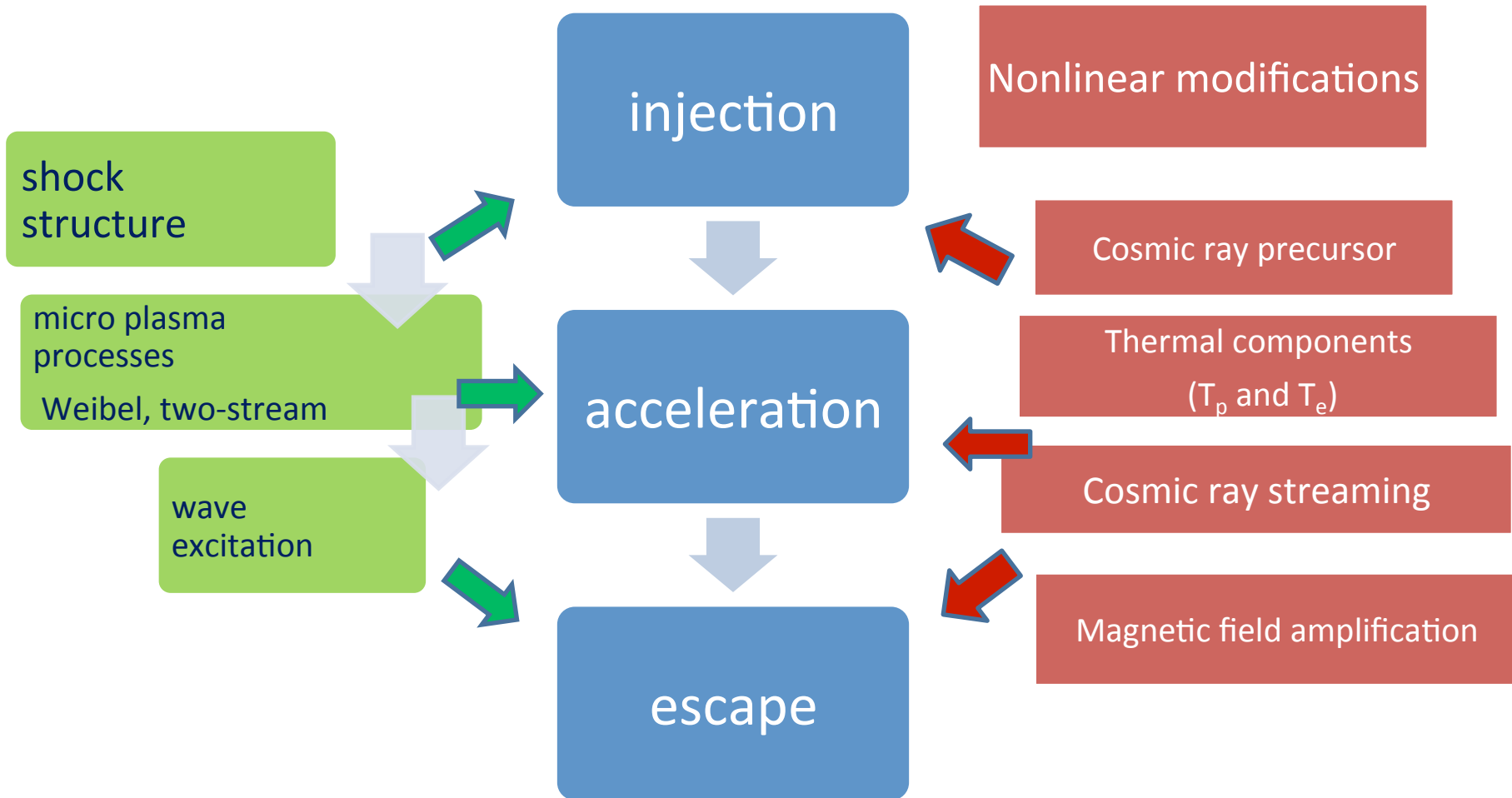
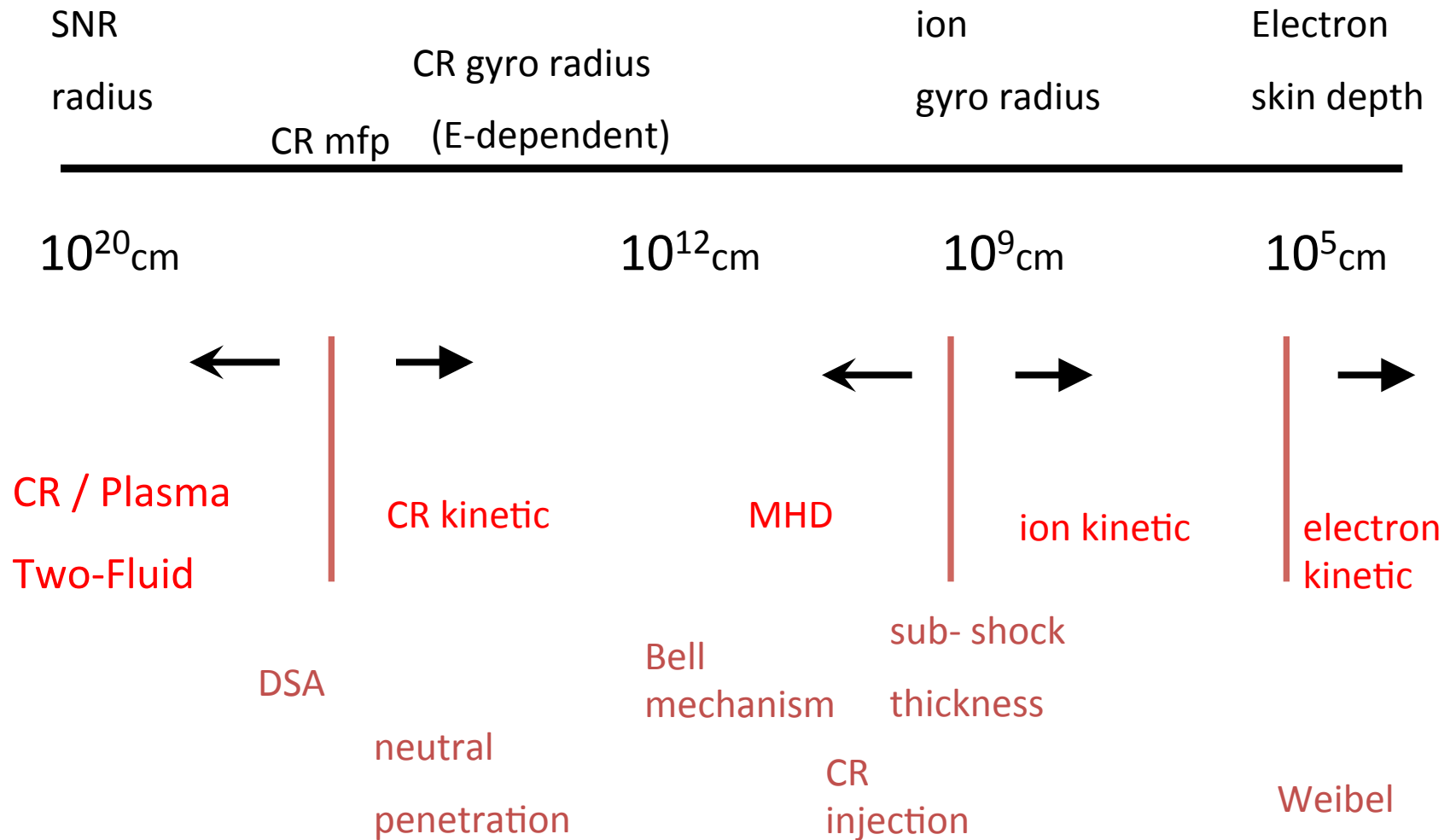


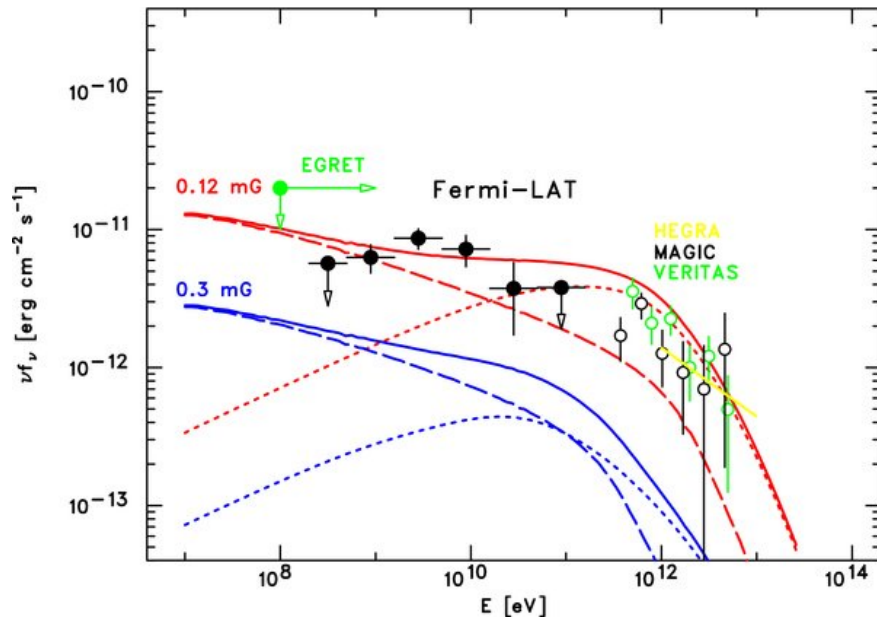
図 1



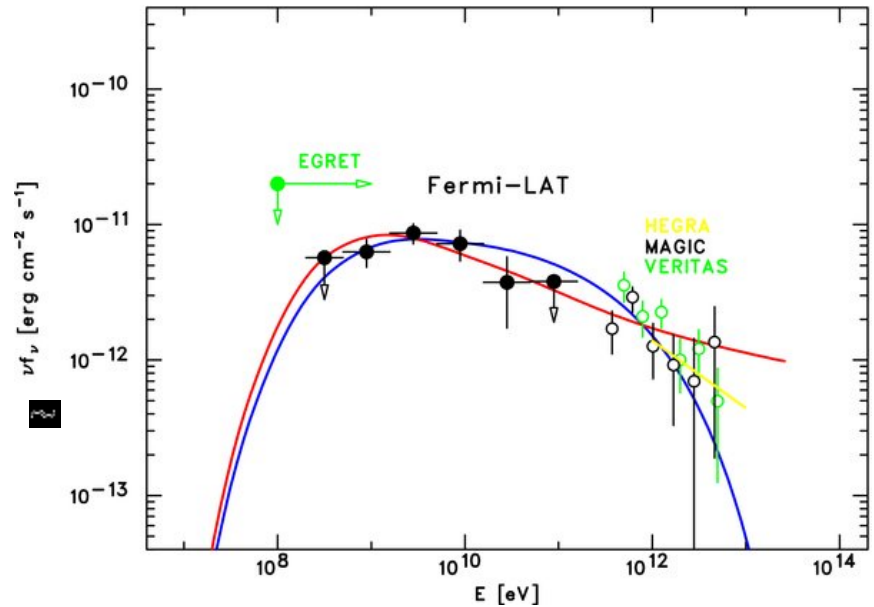




Cas A (Abdo et al. 2010)



Energy spectrum of Cas A in a leptonic emission model. Shown is the *Fermi*-LAT detected emission (filled circles) in comparison to the energy spectra detected by MAGIC (black open circles; Albert et al. 2007) and VERITAS green open circles; Humensky 2008). The red curves show a leptonic model calculated for $B = 0.12$ mG while the blue curves show one for $B = 0.3$ mG. Dashed lines show the bremsstrahlung components with $n_{\text{eff}} = 26$ cm⁻³, and dotted lines show the IC component.



Same as Figure 3 but in a hadronic emission model. Shown are π^0 decay spectra for two possible proton spectra. The blue line shows a harder proton index of 2.1 with a cutoff energy of 10 TeV ($W_p = 3.2 \times 10^{49}$ erg for $n_H = 10$ cm⁻³). The red line shows a softer proton index of 2.3 without a cutoff.

IC443 (Abdo et al. 2010)

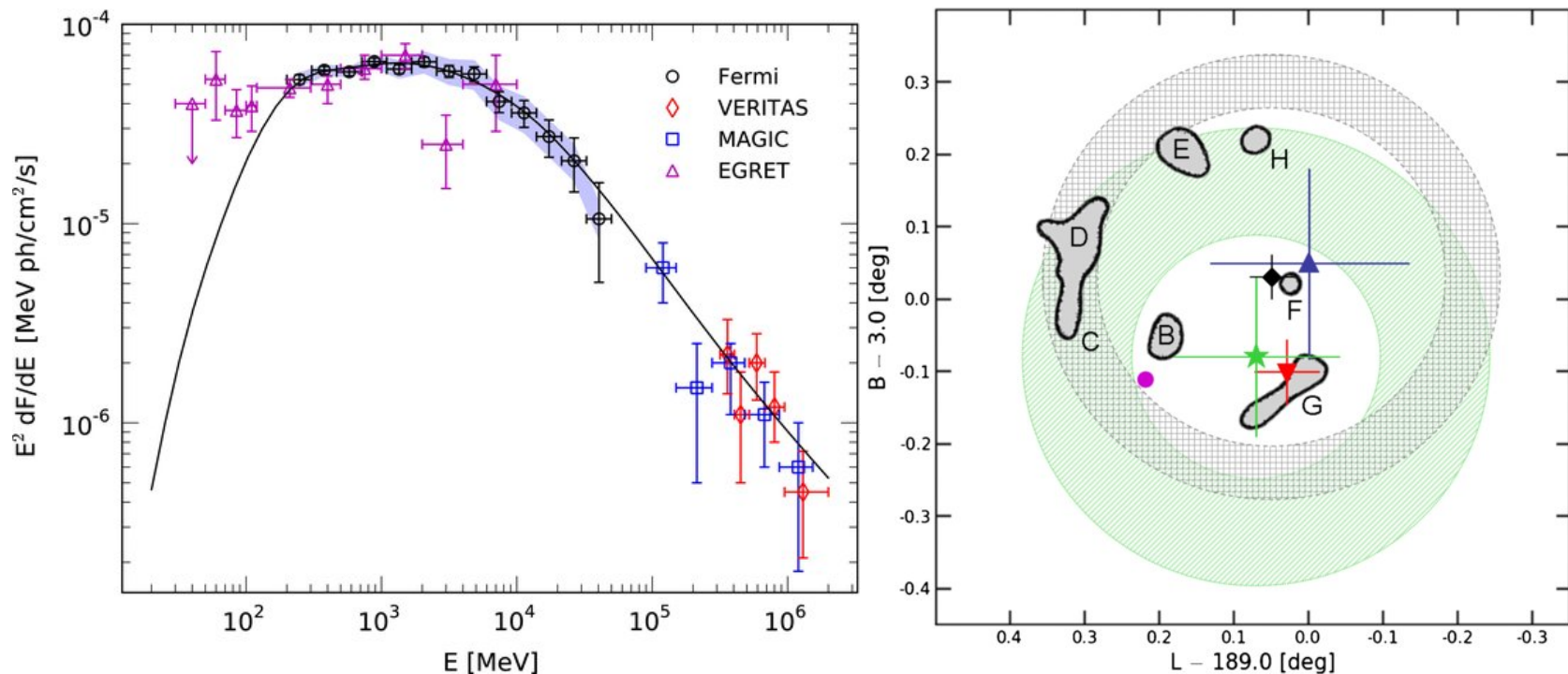


Figure 5. Locations and extensions of the four gamma-ray sources: *EGRET* centroid (Δ), *MAGIC* centroid (∇), *VERITAS* centroid (star), and *Fermi* LAT centroid ($\diamond$). The respective localization errors as tabulated in Table 5 are shown as crosses. Best-fit spatial extensions of the *Fermi* (cross-hatched band) and *VERITAS* (striped green band) sources are drawn as rings with radii of θ_{68}^{ext} and widths of $\pm 1\sigma$ error. The PWN location is shown as a dot. Contours are the locations and shapes of the local shocked molecular clouds taken from Huang et al. (1986).

2nd order Fermi acceleration and others

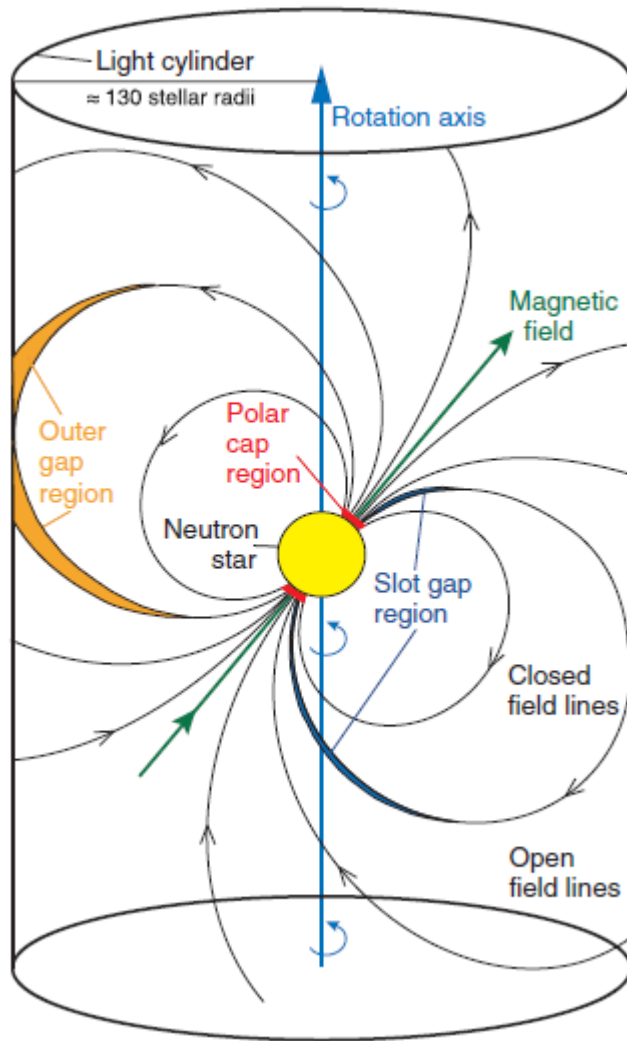
- 2nd order Fermi in extended sources
 - Radio Lobes, cluster hot plasma
 - high Alfven velocity
 - helical turbulence enhances acceleration through field aligned electric field
- shear acceleration
 - jet boundary layer
- reconnection

BH/AD magnetosphere birth of magnetars

- 単極誘導で発生するポテンシャル差は十分大きい
- 問題は沿磁力線電場がどれだけ存在できるかにある

Magic collaboration: Science 322, 1221 (2008)

Chandra HP



展望

- 候補源・加速機構ともに決定的なものはない
- より低エネルギーの物理に学ぶところが多い
- between knee and ankle
 - Galactic vs extragalactic
 - Galactic acceleration mechanism
- cosmic rays in other galaxies
 - source characteristics
 - multi-messenger astrophysics

(しかし、宇宙線観測そのものが点源から来なくてもよい。
「天文学」でなくてよい)

- below the knee
 - SNRs
 - Fermi, HESS, Magic等の観測で大きな進展
 - 理論的にも加速と閉じ込め、逃げ出しとの相互関係の理解が進んだ
- 例えば、宇宙線加速と磁場増幅の協力現象、ピックアップイオンの果たす役割等はUHECR源でも重要かもしれない