

ナビゲータートーク 大気検出器

石崎 渉 (東大ICRR)

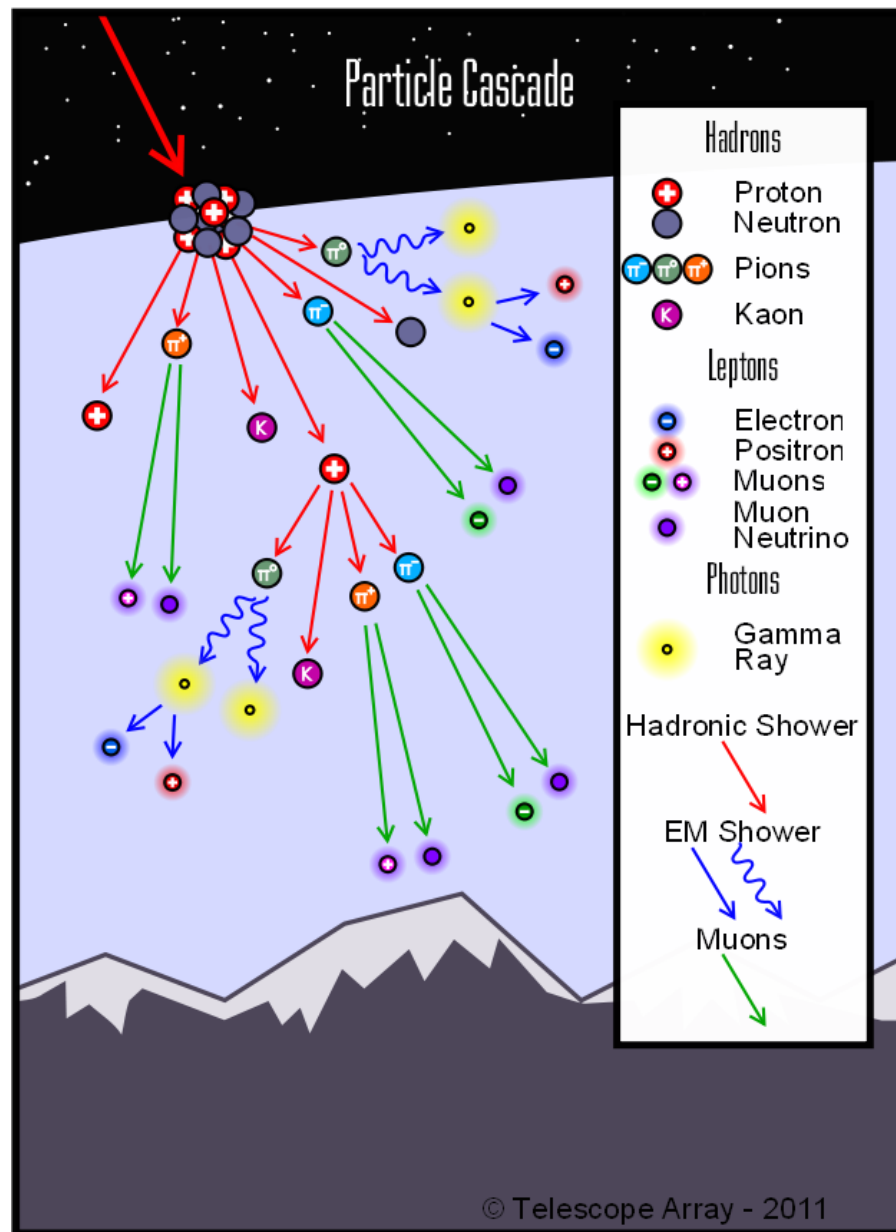
大気検出器？

- 大気検出器

- 空気シャワーを観測し、1次粒子を間接的に測定する装置
- 大気中の原子と一次粒子の反応を利用するため
「大気を検出器にする」
というスローガンが用いられる

- ターゲット

- 高エネルギー宇宙線
 - シャワー粒子を測定し、シャワーを再構成
 - エネルギー・到来方向(・粒子種)を測定する
- 高エネルギーガンマ線
 - 同様だが少しバリエーションあり



宇宙線

• 宇宙線

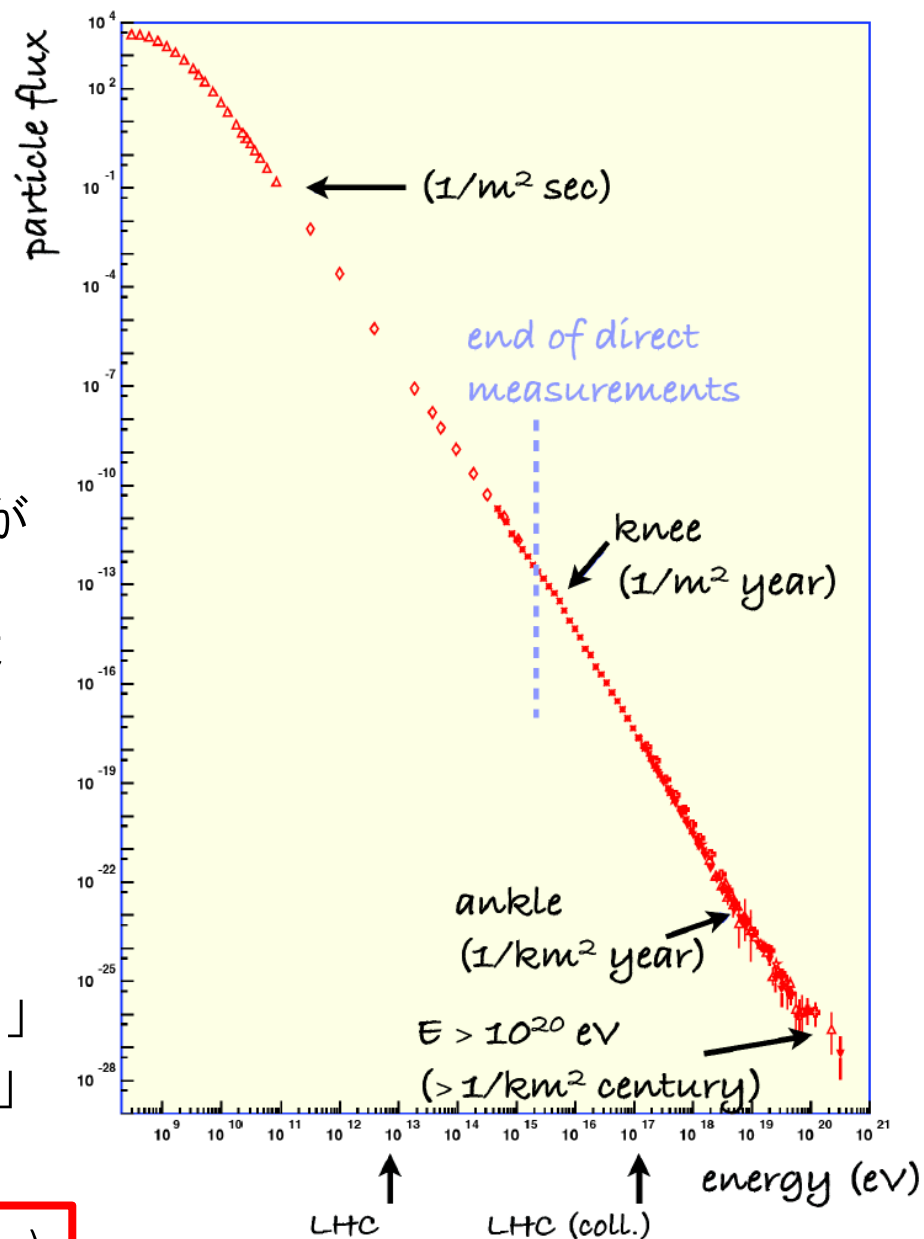
- 非常に高エネルギーな荷電粒子
- エネルギースペクトルは10桁以上にわたり単一のべき乗則に(概ね)従う
- エネルギーの1桁上がると、到来数が1/500になる
- 10^{15} eVより高エネルギーの宇宙線は有効面積を稼ぐ必要がある

⇒ 地上検出器!

• 未解決問題

- 起源 : 「どこで作られたのか？」
- 核種 : 「何が飛んできているのか？」
- 加速 : 「どうエネルギーを得たか？」
- 伝播 : 「どう飛んできたか？」

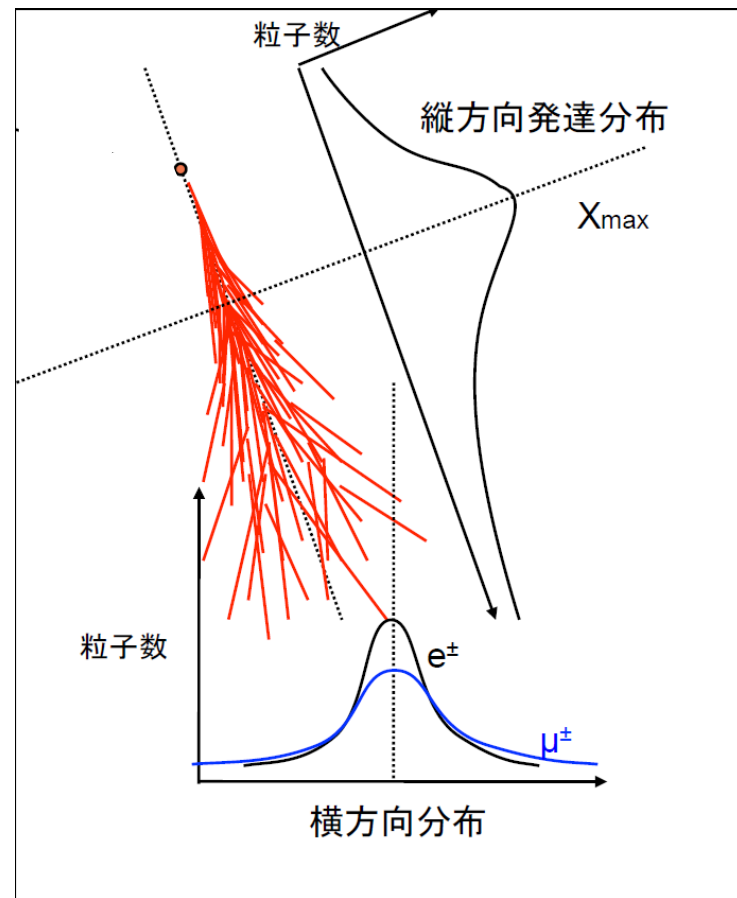
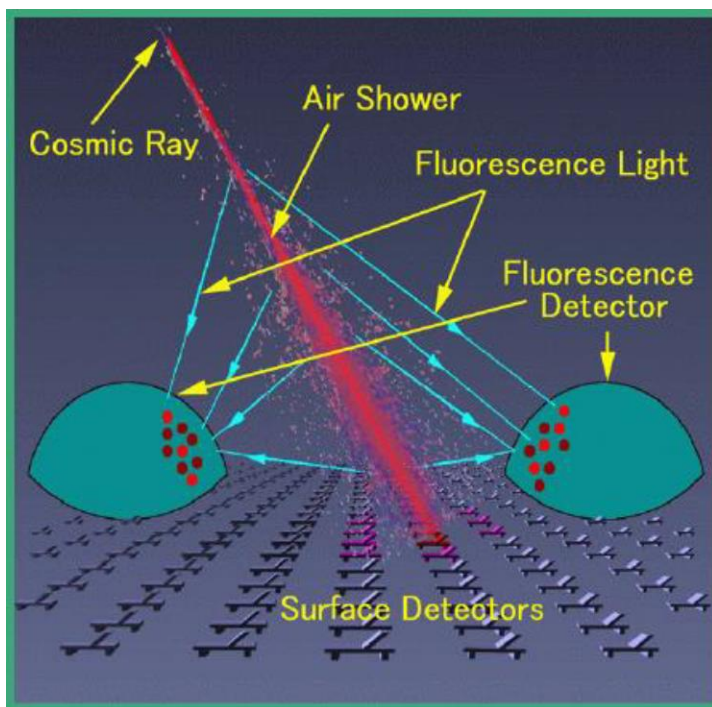
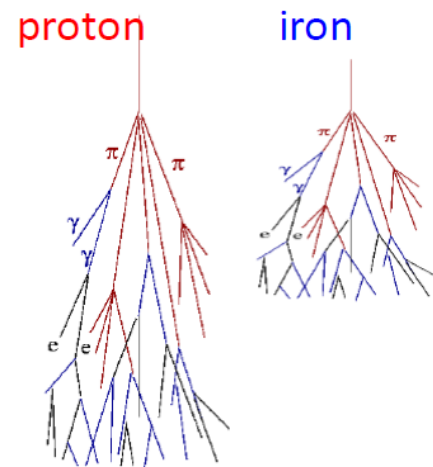
100年来の大問題 (Hess 1936 Nobel prize)



(国立天文台 大嶋さんのスライド)

宇宙線の測定

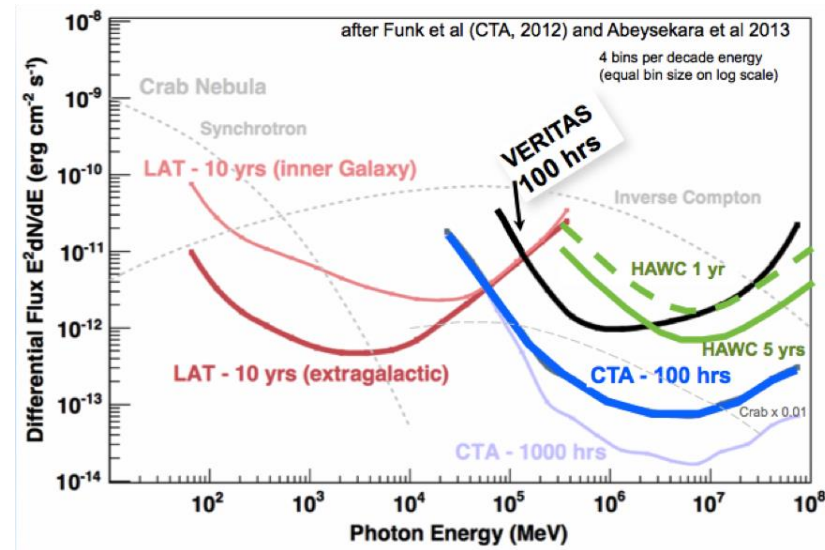
- シャワーの再構成で何が分かる？
 - 一次粒子の到来方向、エネルギーは(勿論)わかる
 - 縦方向発達を見ると核種も(ある程度)わかる
 - 軽い核種は深く大気に侵入できる
 - ⇒ 軽い核種ほど X_{max} が大きい
 - e.g. TA実験 Fluorescence Detector



高エネルギーガンマ線

ガンマ線の測定法

- 人工衛星 (e.g. Fermi-LAT, EGRET ...)
 - ~100MeV - ~100GeV
 - トラックで電子・陽電子の飛跡を追跡
 - カロリメーターでエネルギーを測定
 - 視野が**広い**、空間分解能が**悪い**、有効面積が**小さい**
 - Duty cycleが**高い** (~100%)
- 地上望遠鏡 (e.g. CTA, MAGIC, H.E.S.S., VERITAS ...)
 - ~100GeV - ~10TeV
 - 2次粒子のチェレンコフ光を観測
 - 視野が**狭い**、空間分解能が**良い**、有効面積が**大きい**
 - Duty cycleが**低い** (~10%)
 - Backgroundが多い** (主に宇宙線)
- 地上水チェレンコフ (e.g. HAWC, Milagro ...)
 - ~1TeV - ~100TeV
 - シャワー粒子を直接測定する
 - ハドロン弁別能力が低いため、地上望遠鏡より**backgroundが多い**
 - 視野が**広い**、Duty cycleが**高い**



我々は何が見たい？
“高エネルギー天体物理学”の視点から

石崎 渉 (東大ICRR)

宇宙線

• 宇宙線

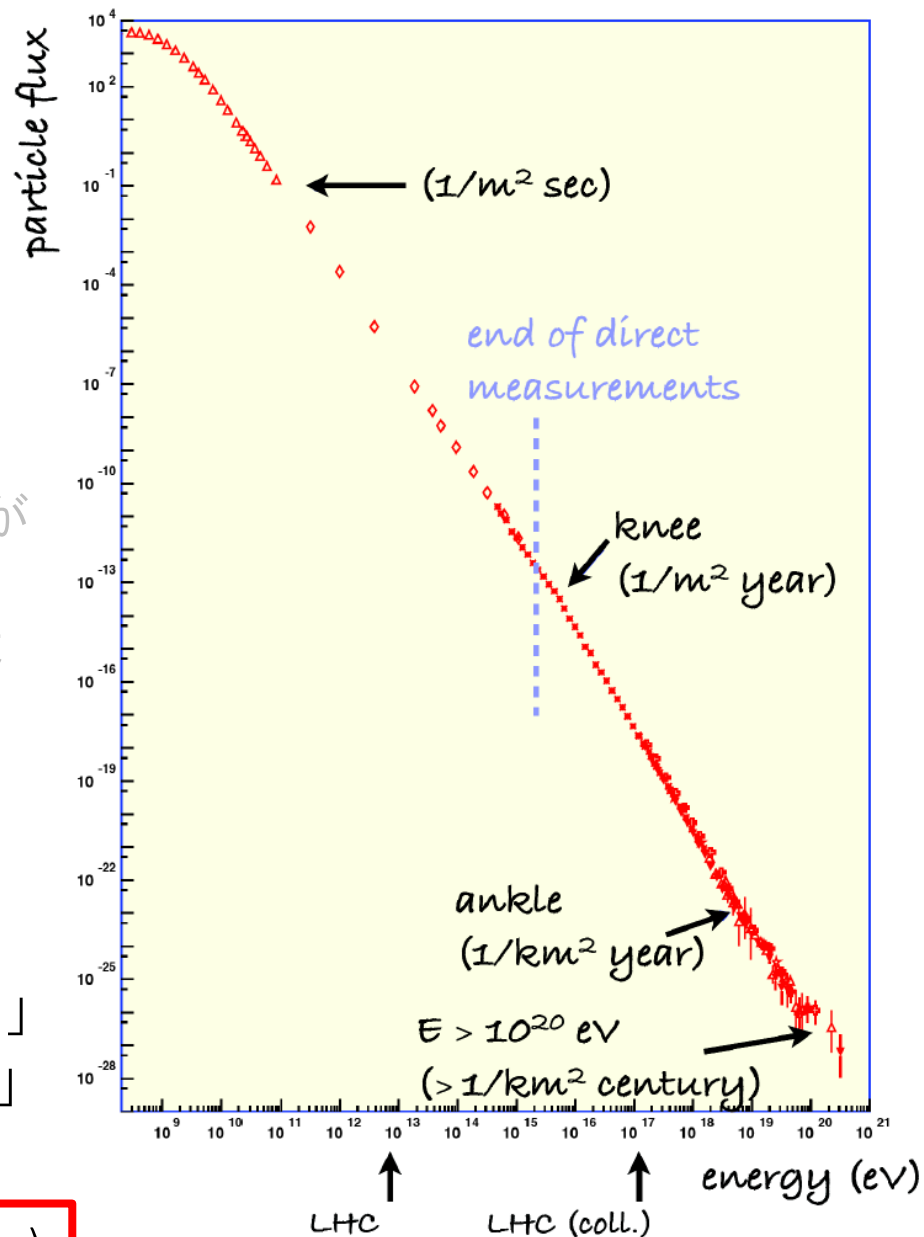
- 非常に高エネルギーな荷電粒子
- エネルギースペクトルは10桁以上にわたり単一のべき乗則に(概ね)従う
- エネルギーの1桁上がると、到来数が1/500になる
- 10^{15} eVより高エネルギーの宇宙線は有効面積を稼ぐ必要がある

⇒ 地上検出器!

• 未解決問題

- 起源 : 「どこで作られたのか？」
- 核種 : 「何が飛んできているのか？」
- 加速 : 「どうエネルギーを得たか？」
- 伝播 : 「どう飛んできたか？」

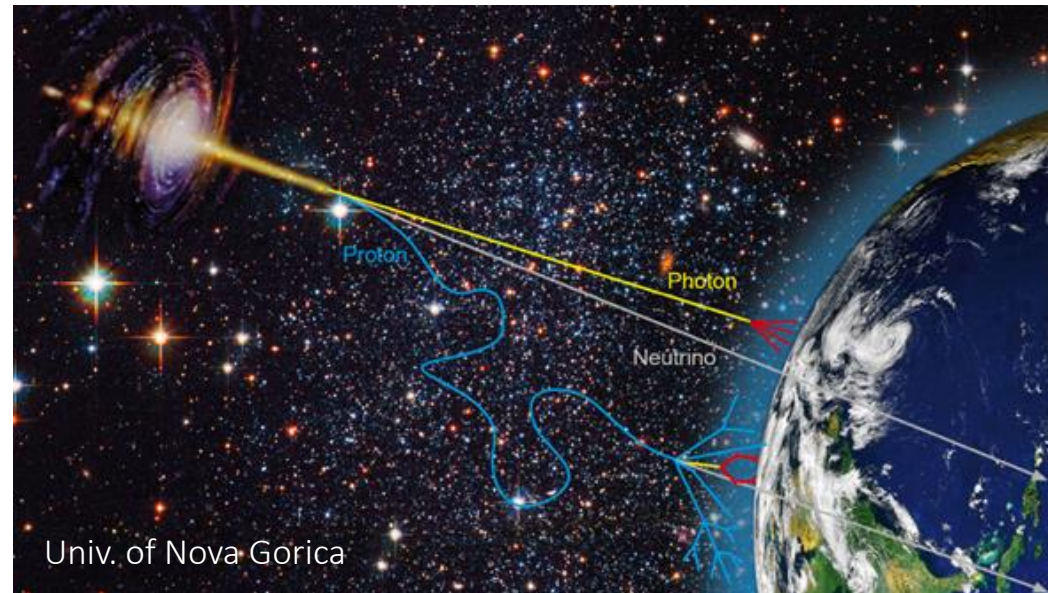
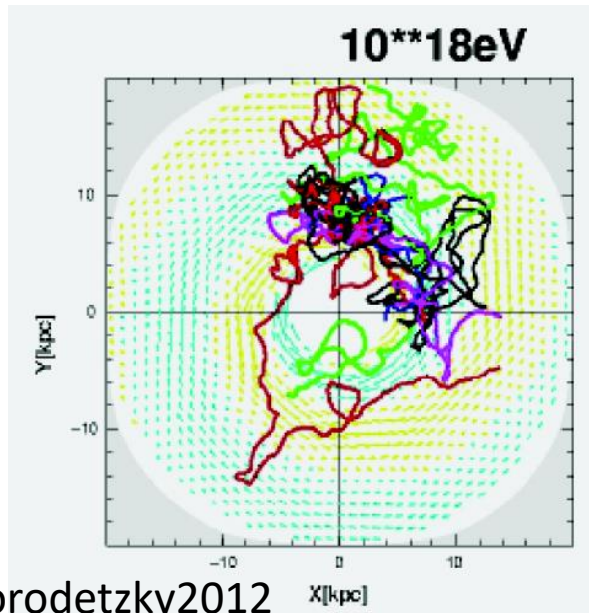
100年来の大問題 (Hess 1936 Nobel prize)



(国立天文台 大嶋さんのスライド)

宇宙線の加速現場

- 「宇宙線はどこで加速されたのか」問題
 - 宇宙線は銀河磁場に曲げられてしまう
 - ⇔ 地球に到来するまでに、加速源の方向の情報を失ってしまう
 - 宇宙線が加速源で作った γ 線は加速源からまっすぐ届く
- ⇒ 加速された宇宙線からの γ 線が見たい！

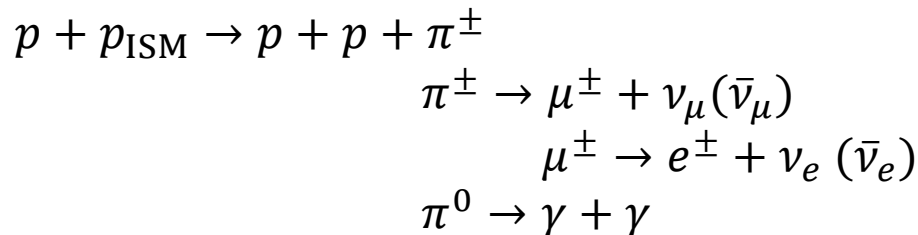


Hadronic v.s. Leptonic

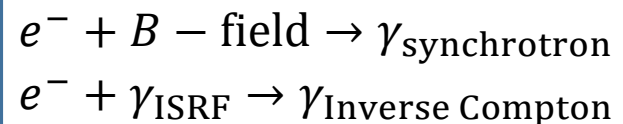
- 電子からの電磁放射
 - シンクロトロン放射 : Lorentz力の加速度を受けて放射
 - 逆コンプトン散乱 : CMBやstar lightと衝突して光子にエネルギーを渡す
- 陽子からの電磁放射はあまり期待できない
 - 電磁相互作用の反応断面積(Thomson cross section) : $\sigma_T \propto m^{-2}$
- ハドロン相互作用を経由した γ 線の生成
 - ISM中の原子核と反応することで π^0 中間子を生成
 - π^0 中間子は、速やかに γ 線に崩壊する
 - 最終的に陽子の10%程度のエネルギーが γ 線になる
 - 二次粒子の電子・陽電子からのシンクロトロン放射・逆コンプトン散乱も

宇宙線は陽子・原子核なので、Hadronicな γ 線が見えないと証拠にならない

Hadronic



Leptonic



どこに望遠鏡を向ければいい？

- 宇宙線加速天体の候補

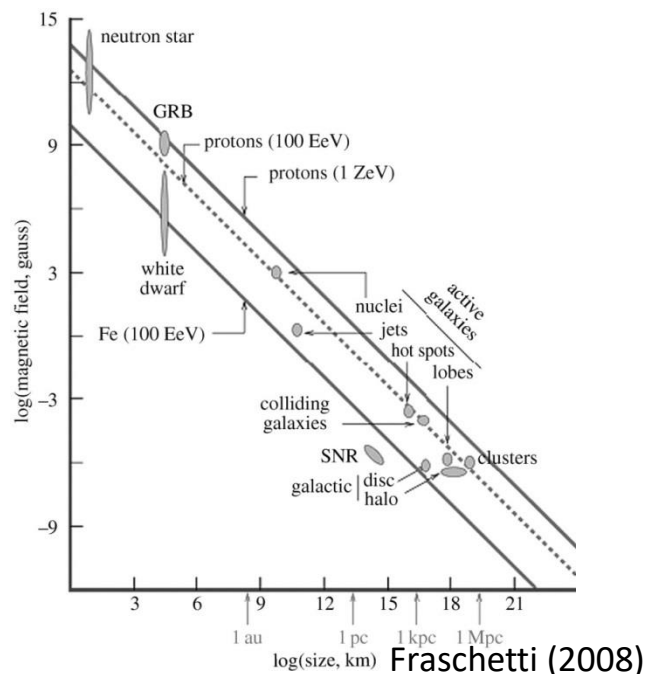
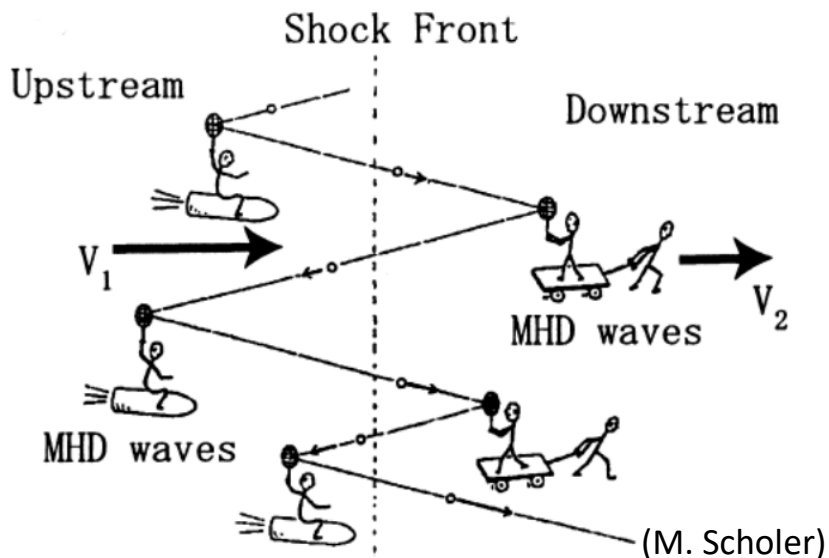
- 宇宙線加速の標準的な理論では、加速天体に衝撃波があることを要求

- 荷電粒子を加速するためには

(加速天体の大きさ) \geq (宇宙線のgyro半径) $r_L = \frac{E}{ZeB} \sim 3.4 \text{ kpc } Z^{-1} \left(\frac{E}{10^{18.5} \text{ eV}} \right) \left(\frac{B}{\mu\text{G}} \right)^{-1}$

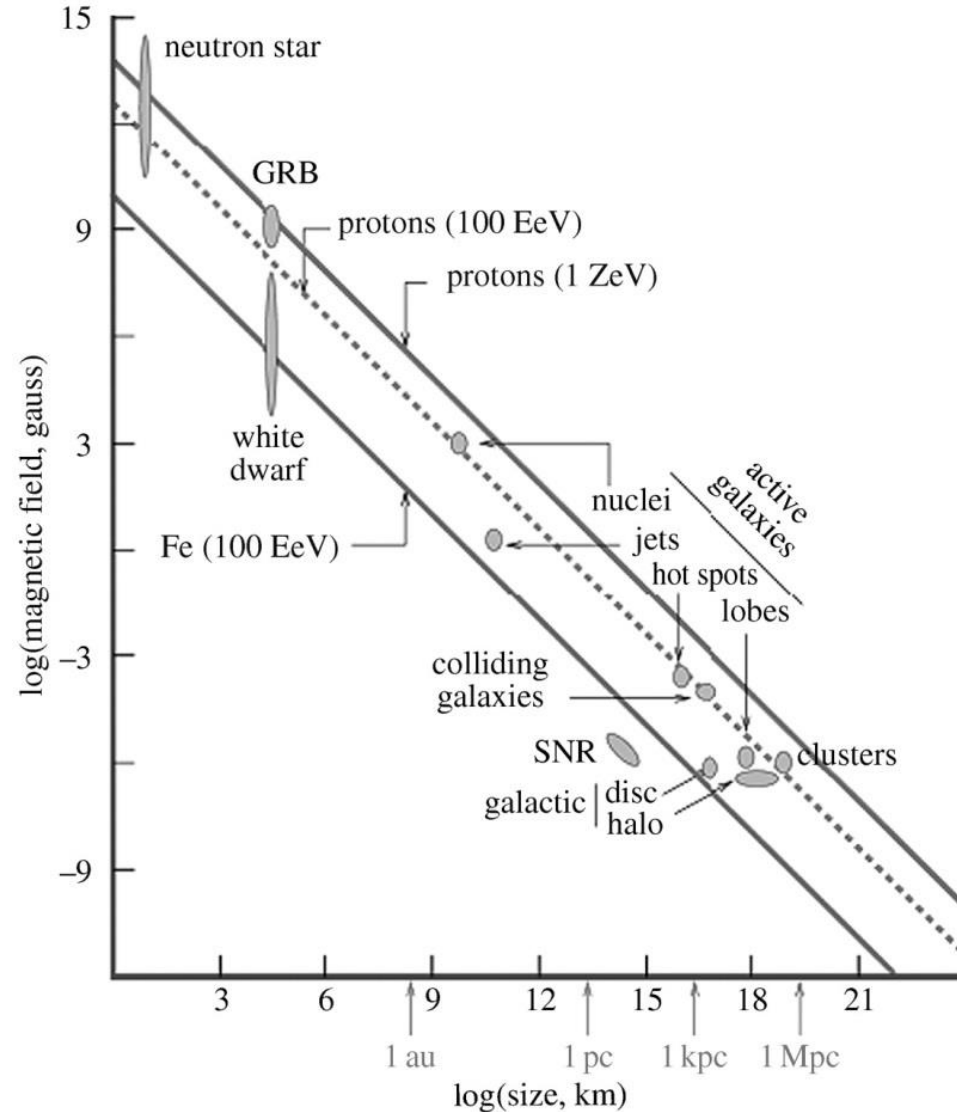
も要求される

- 宇宙線粒子のエネルギーを決めると、「加速源の磁場」と「加速源のサイズ」の間に条件がつく



じゃあ具体的に何を見る...？

- 超新星残骸
- ガンマ線バースト
- 白色矮星
- 活動銀河核
- 中性子星
- 銀河団

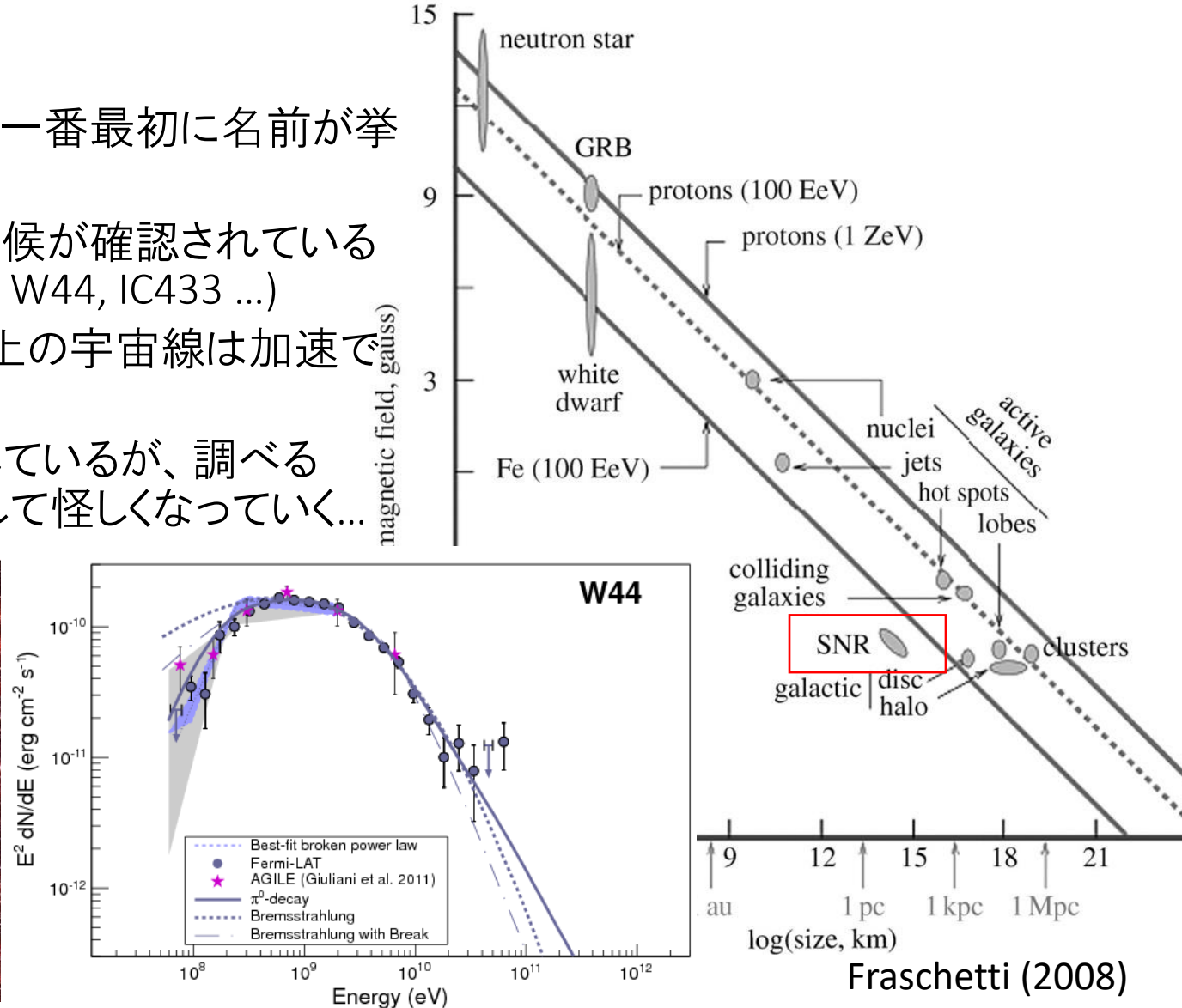
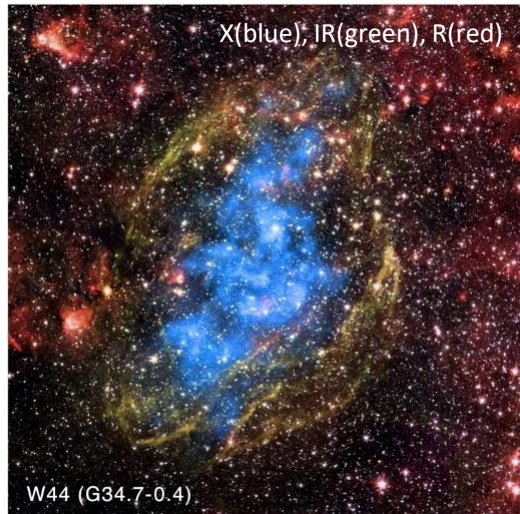


Fraschetti (2008)

じゃあ具体的に何を見る...？

• 超新星残骸

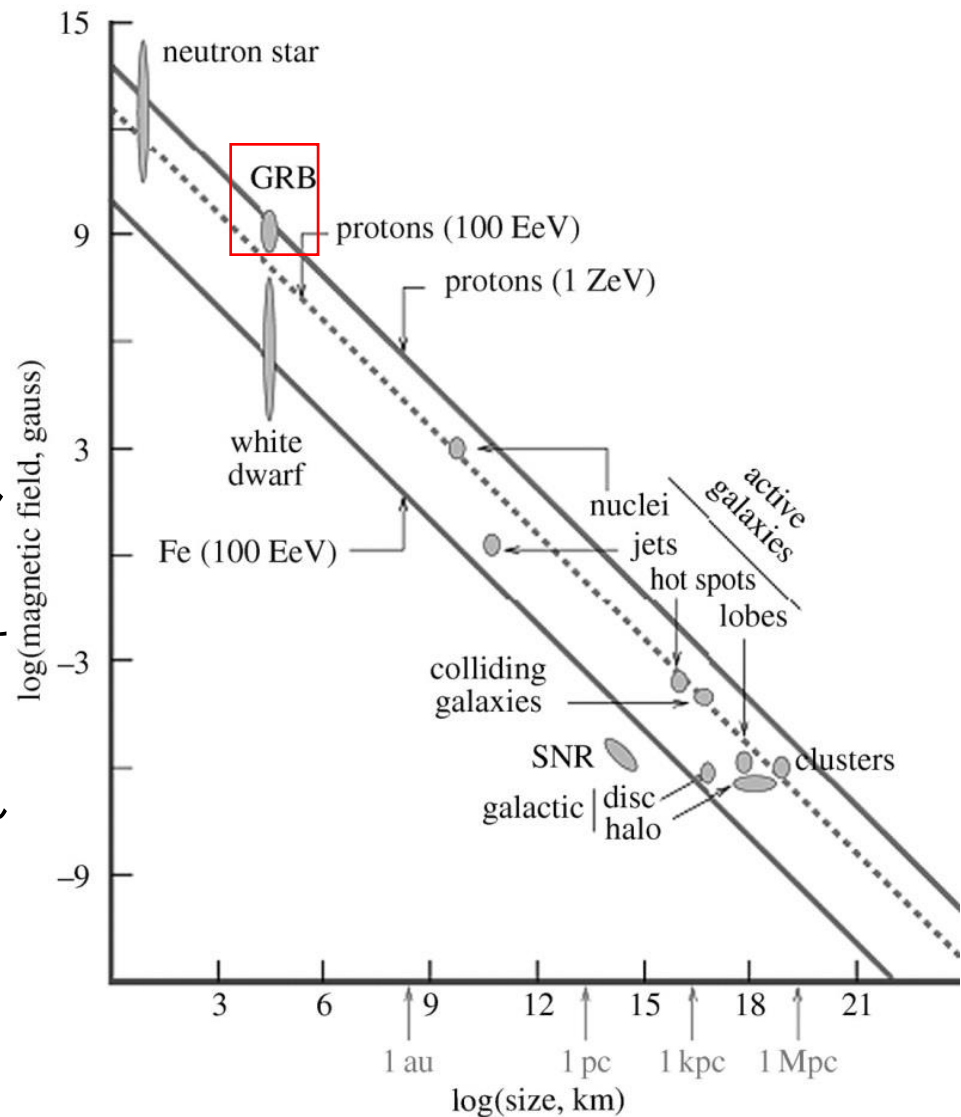
- Energeticsから一番最初に名前が挙げられた候補
- 陽子加速の兆候が確認されている唯一の例 (e.g. W44, IC433 ...)
- ただ 10^{15} eV以上の宇宙線は加速できない
- 詳しく調べられているが、調べるほど加速源として怪しくなっていく...



じゃあ具体的に何を見る...？

• ガンマ線バースト

- 宇宙論的距離から届く、 γ 線で明るい突発天体
- 全宇宙で1日1発程度起こる
- 宇宙最大の爆発現象
- 速い自転速度を持った重い星の超新星爆発に伴う現象と考えられている
- 相対論的ジェットを伴う現象と考えられている
- ISMと相互作用して衝撃波を形成し、そこで粒子加速すると考えられる
- ただし、ニュートリノの観測からくる制限がきつく、最近は怪しくなっている

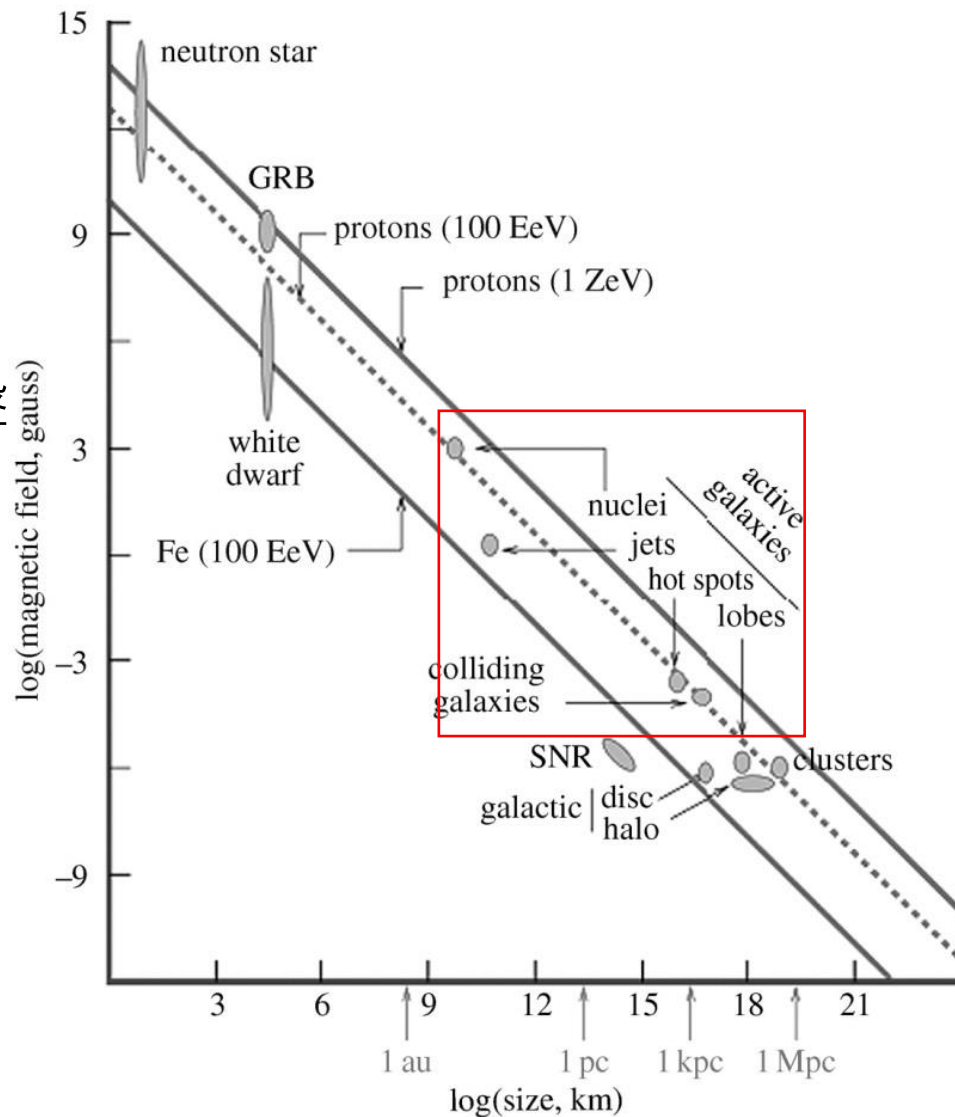


Fraschetti (2008)

じゃあ具体的に何を見る...？

- 活動銀河核

- 銀河中心に存在する大質量ブラックホールへの降着現象および相対論的ジェットに関連した高エネルギー現象
- ジェット、ジェットの根本、降着円盤中 様々な場所での粒子加速が議論されている
- (あんまり詳しくない)



Fraschetti (2008)

まとめ

- 大気検出器

- 空気中の原子核と反応することでできる空気シャワーを観測することによって1次粒子を間接的に測定する手法
- 地上実験なので(飛翔体実験に比べて)大規模化が容易
- 特に有効面積を稼ぐ必要がある、高エネルギー宇宙線・高エネルギー γ 線の観測に有利

- 高エネルギー天体物理学

- 宇宙線の加速サイトが知りたい
- 宇宙線を直接測っても、向きがまがっているので加速サイトの情報はあまり得られない
- 高エネルギー粒子は γ 線で光るので、 γ 線を見れば加速源が分かるかもしれない