

研究計画A01レビュー スパコン「富岳」で解き明かす 宇宙線原子核の加速と伝搬過程

研究体制

代表: 大平 豊(東京大学)

分担: 松清修一(九州大学)、松本洋介(千葉大学)、木坂将太(広島大学)
長瀧重博(理化学研究所)、井上進(理化学研究所)、榊直人(理化学研究所)

協力者: その他9名(若手PDや学生)の協力者

A01班のやること

$$\frac{\partial N_i(\mathbf{E}, \vec{\mathbf{x}})}{\partial t} + \boxed{\vec{\mathbf{V}} \cdot \nabla N_i(\mathbf{E}, \vec{\mathbf{x}}) - \nabla \cdot [\mathbf{D}(\mathbf{r}) \nabla N_i(\mathbf{E}, \vec{\mathbf{x}})]}$$

場合によっては、電磁場を与えて、ジャイロ運動を直接解く。

$$= Q_i(\mathbf{E}, \vec{\mathbf{x}}, t) - \left(\frac{v\rho\sigma_i}{m_p} + \frac{1}{\gamma\tau_i} \right) N_i(\mathbf{E}, \vec{\mathbf{x}}) + \frac{v\rho}{m_p} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(\mathbf{E}, \mathbf{E}')}{d\mathbf{E}} N_k(\mathbf{E}', \vec{\mathbf{x}}) d\mathbf{E}'$$

富岳を使って、様々な天体の Q_i を明らかにする。(大平, 松清, 木坂)

C01班のガンマ線観測結果から、その天体の Q_i を明らかにする。(大平, 長瀧, 井上)

A02, B01-B03班で得た断面積 σ を用いて、この式を解き(長瀧, 井上, 榊, 大平, 松清)、C02班などの宇宙線観測の結果と N_i を比較することで、

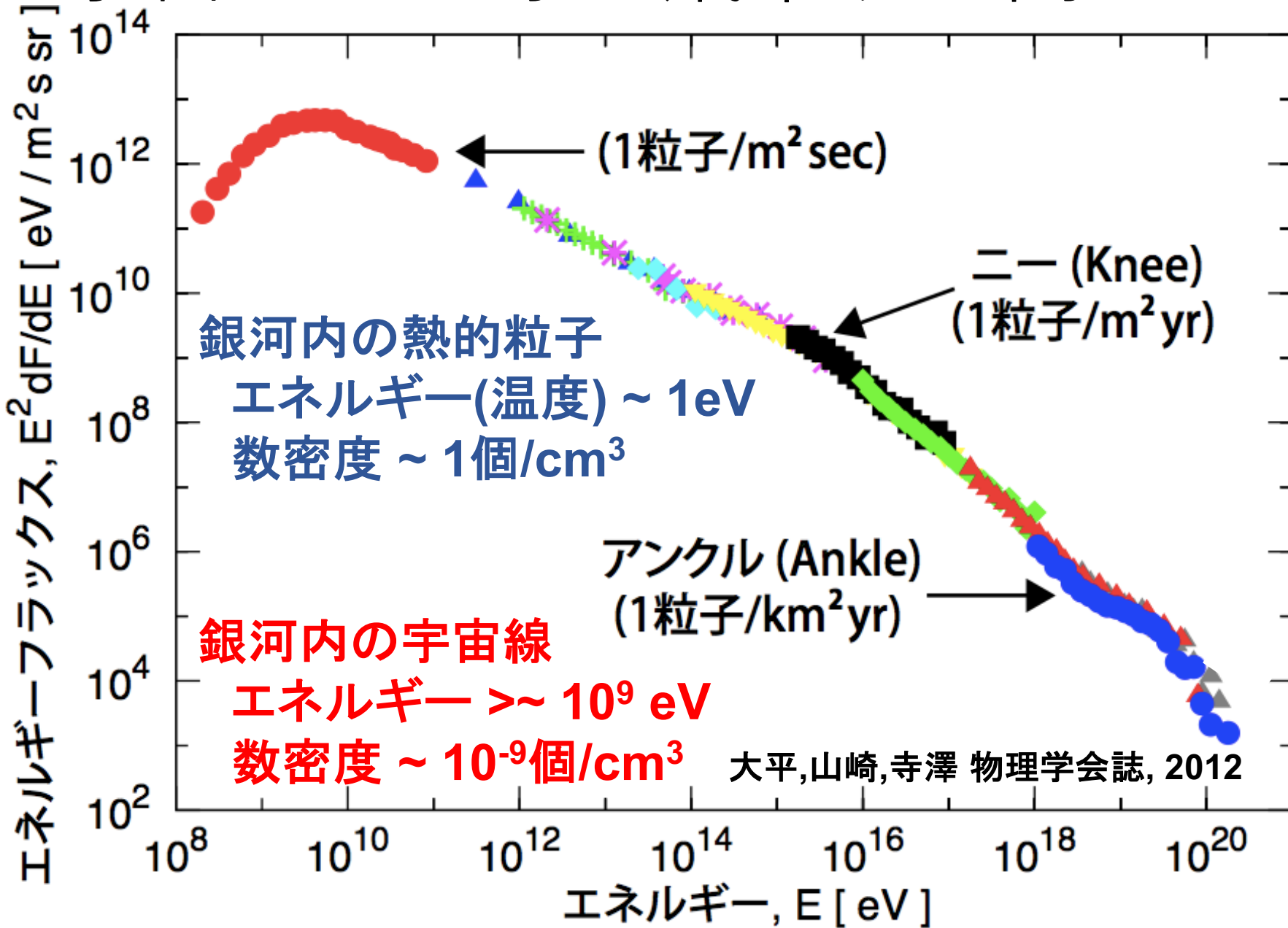
1) どの天体の Q_i が観測を説明できるか明らかにする。

→宇宙線源を解明する

2) V, D, ρ などを明らかにする。

→磁場構造を解明する

宇宙から地球に飛来する高エネルギー宇宙線



宇宙線とは、宇宙から飛来する高エネルギーの荷電粒子(e^- , p , \dots , Fe , e^+ , \bar{p})

ベキ型のエネルギースペクトル

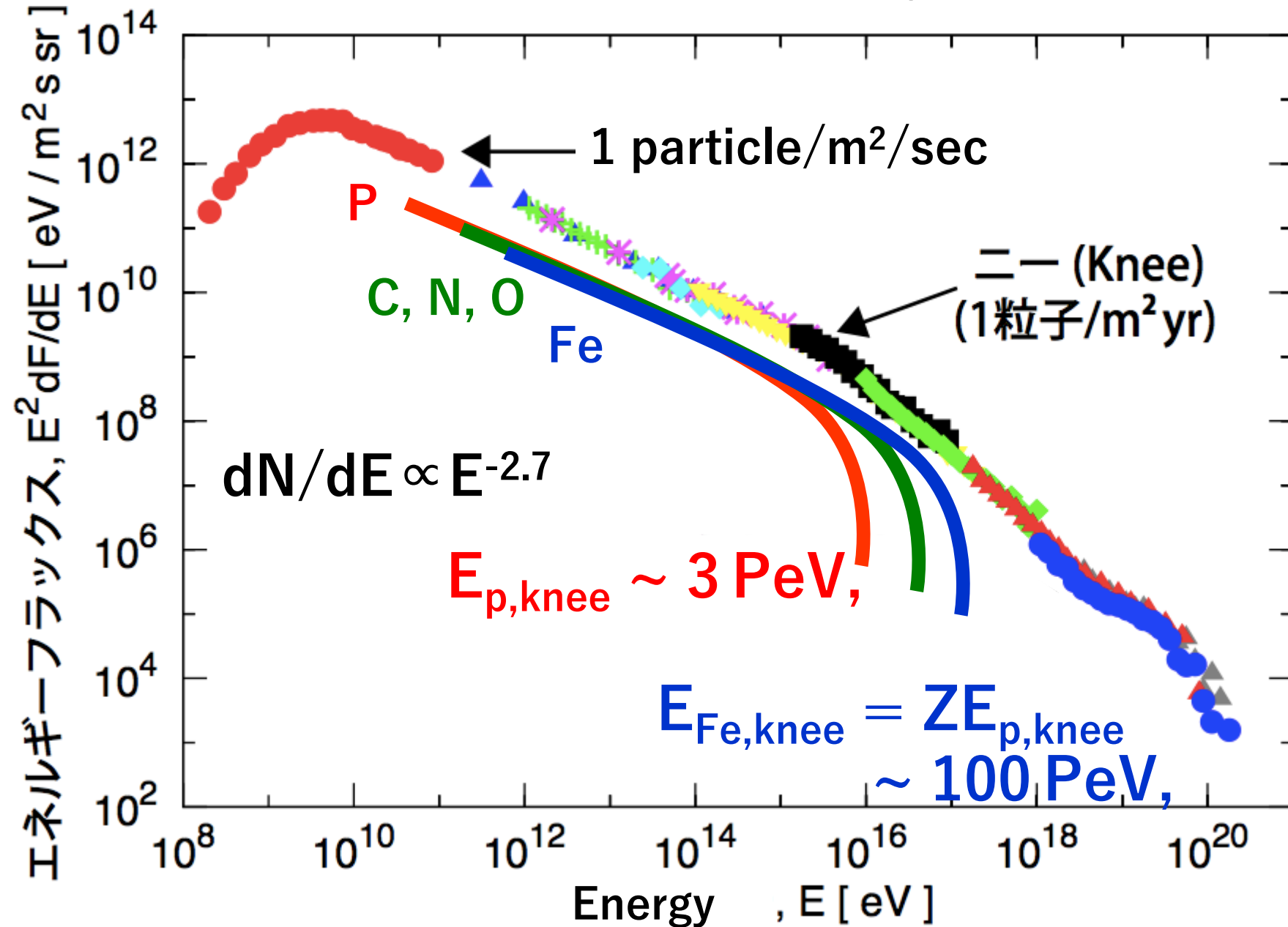
V. Hess が100年以上前に発見し、ノーベル賞を受賞。

未だに宇宙線の起源と加速機構は謎のまま。

宇宙物理学最大の謎の1つ。

人類が加速できる1粒子のエネルギーは、LHC加速器で $7 \times 10^{12}\text{ eV}$ 。天然の加速器では、 $\sim 10^{20}\text{ eV}$ 。

宇宙線の標準モデル



$10^{17} \text{ eV} = 100 \text{ PeV}$ までの宇宙線は、銀河系内の超新星残骸で加速されていると思われる。

$$E_{\text{max},p} = 10^{15.5} \text{ eV}$$

$$E_{\text{max},Z} = Z \times 10^{15.5} \text{ eV}$$

$$\sim 10^{17} (Z/26) \text{ eV}$$

$E > 10^{18.5} \text{ eV}$ の宇宙線は銀河系外起源と思われる。どの天体が起源か謎。

$10^{17} \text{ eV} < E < 10^{18.5} \text{ eV}$ の宇宙線は銀河系内か系外か謎。どの天体が起源か謎。

宇宙線の宇宙における役割(軽元素の起源)

ビッグバンの時の元素合成や星の中で起きる元素合成では、 ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ は作られない。

Tatischeff and Gabici, 2018

宇宙線陽子(炭素)と炭素(陽子)が衝突することで ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ の軽元素が作られる。

ホウ素が使われる例

ゴキブリ退治に必要なホウ酸団子

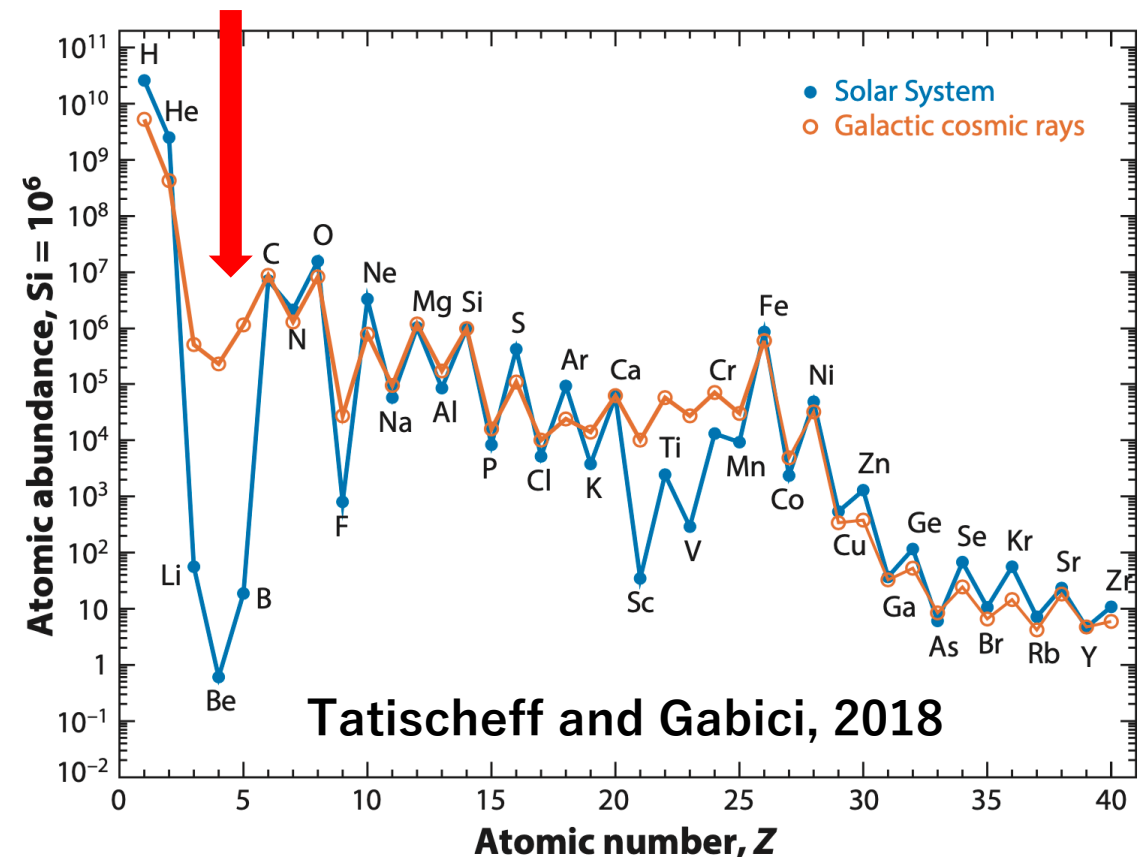
原子炉から発生する中性子を吸収する制御棒

最強永久磁石 ネオジウム磁石

スライム (ホウ砂+洗濯糊)

ベリリウムが使われる例

軽量の鏡(JWST, Spitzer赤外線望遠鏡)



宇宙線による被害(被ばく)

地上では、年間2ミリシーベルト。

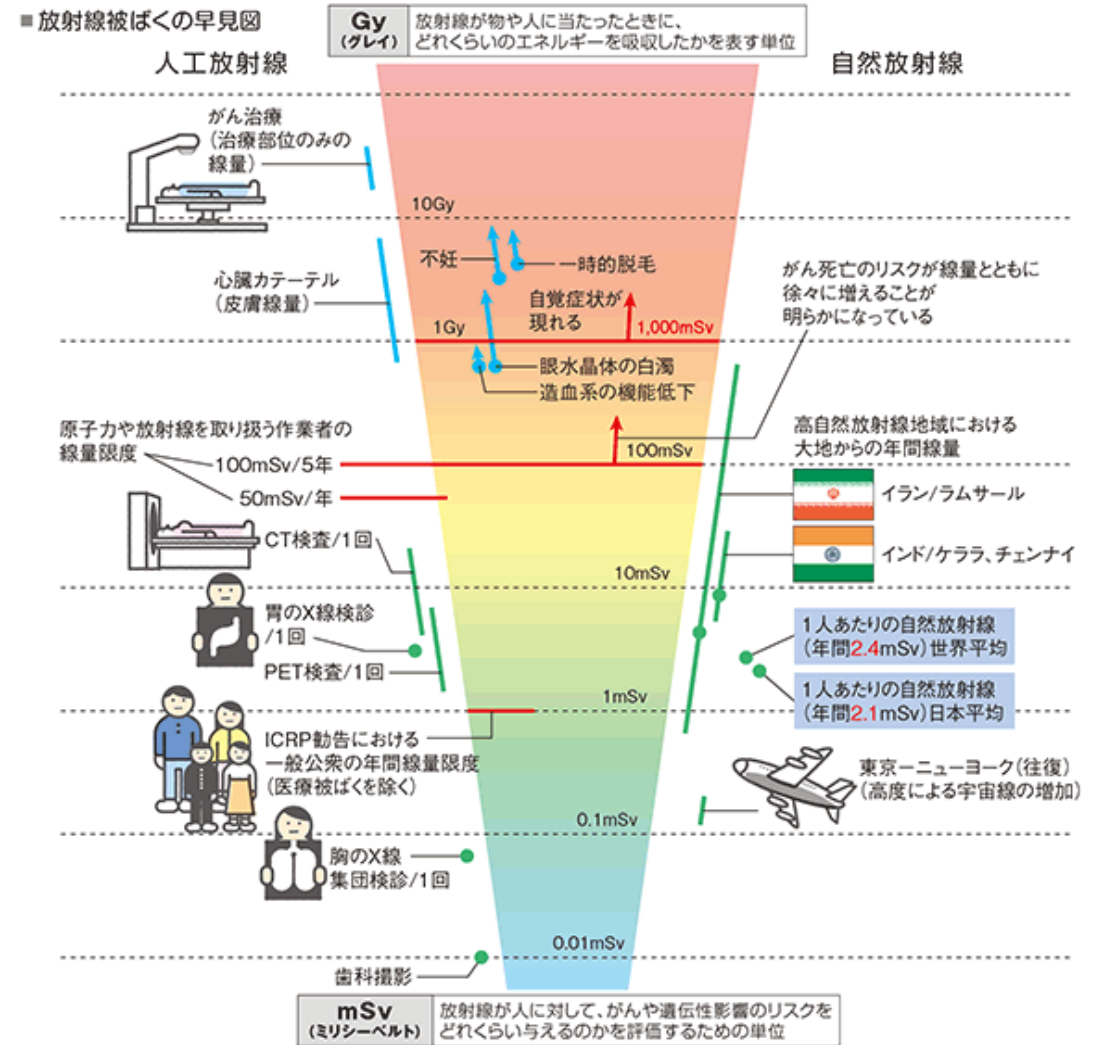
ISSでは、年間300ミリシーベルト。

JAXAでは、27-30歳で初めて宇宙に行った女性の場合、生涯で500ミリシーベルトが上限。
46歳以上の男性で1000ミリシーベルトが上限。

ISS, 月, 火星といった今後の長期滞在では深刻な問題。月はISSの2.6倍。

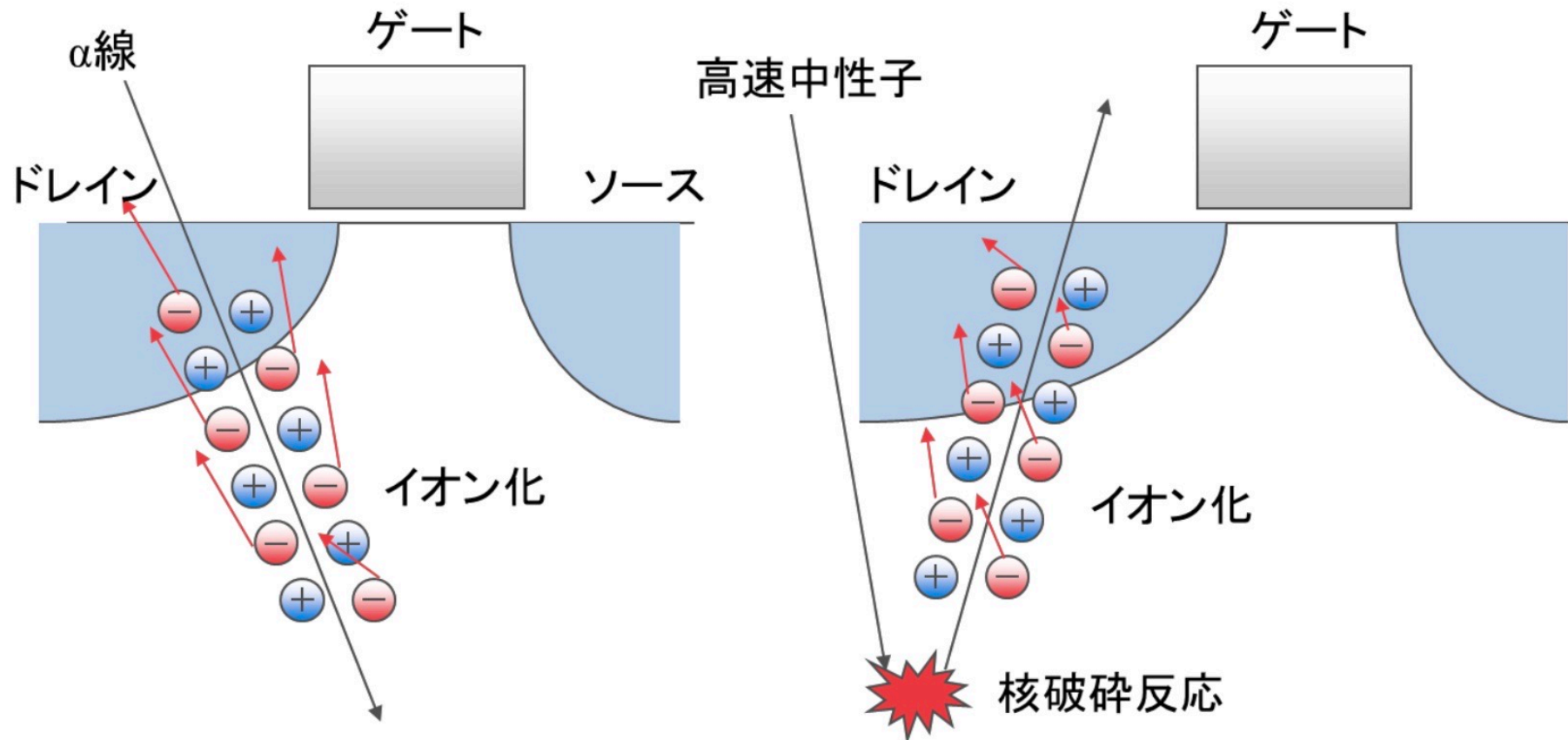
経験豊富なベテランが宇宙に行けない。

銀河を旅するのは不可能?



*数値は有効数字などを考慮した概数です。
*目盛(点線)は対数表示になっています。目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
(国研)放射線医学総合研究所「放射線被ばくの早見図」などを参考に作成

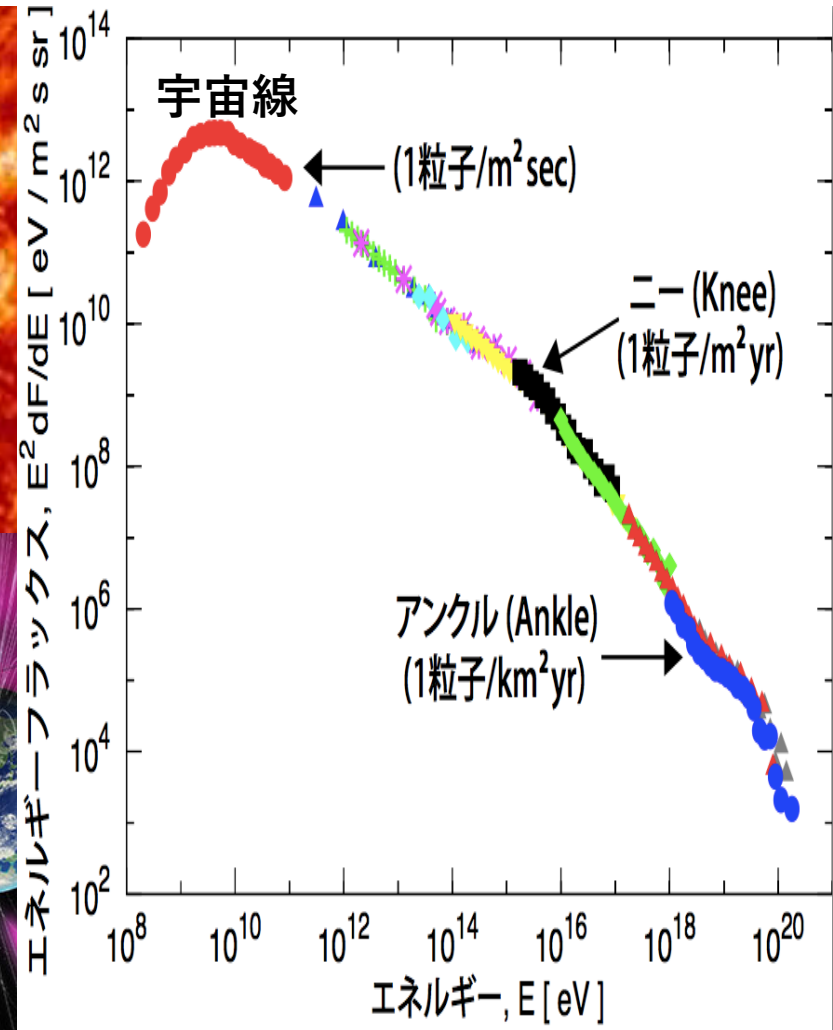
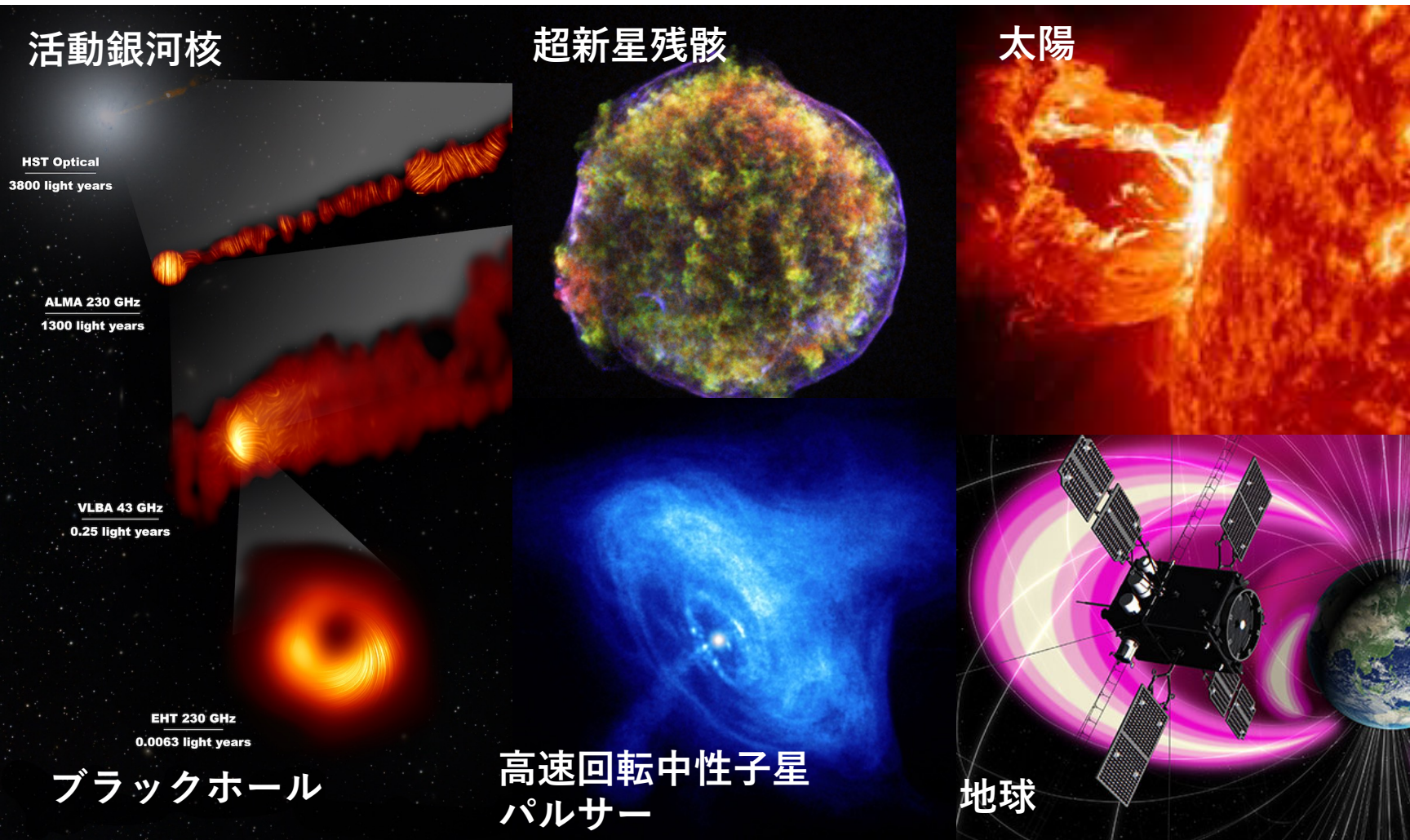
宇宙線による被害(ソフトウェア)



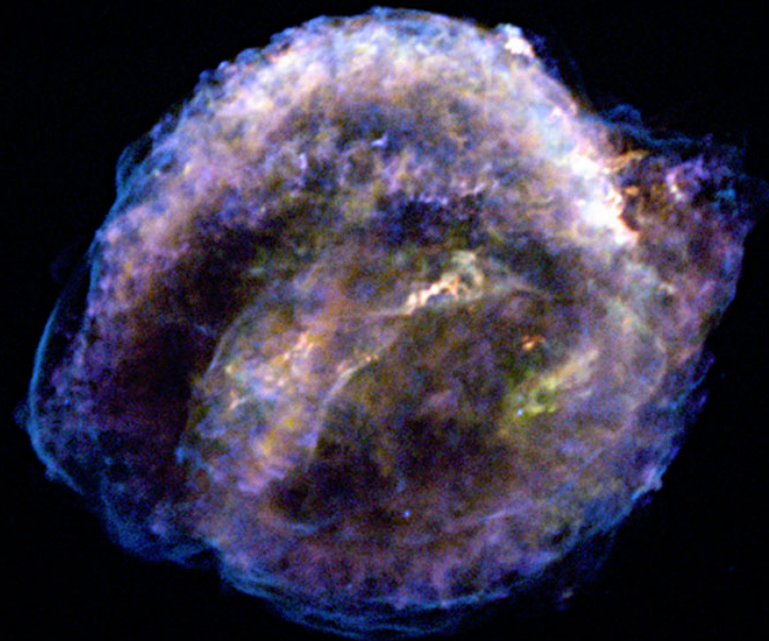
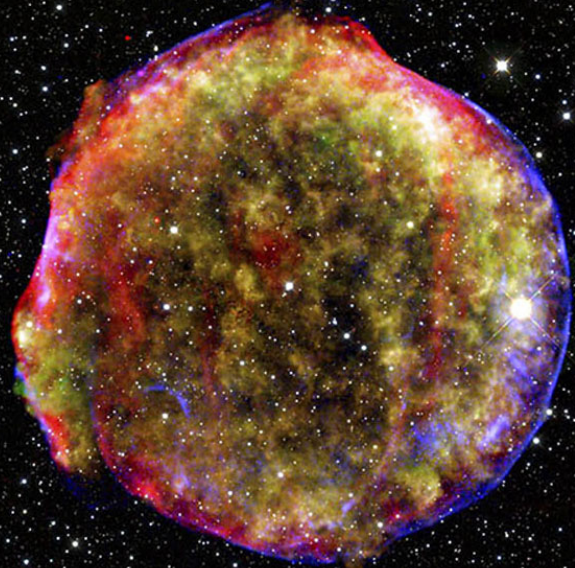
Uemura, D論(2015)

半導体メモリーのビット(情報)が反転してしまう。Intelが1978に発見。
最近ではミュオンによるソフトウェアも指摘されている。
近年の半導体微細化と集積化により、より深刻な問題となってきた。スパコンなど。

宇宙の至る所に存在する高エネルギー粒子



どのように、宇宙線や天体の高エネルギー粒子は加速されたのか？
どの天体現象で宇宙線は加速されているのか？

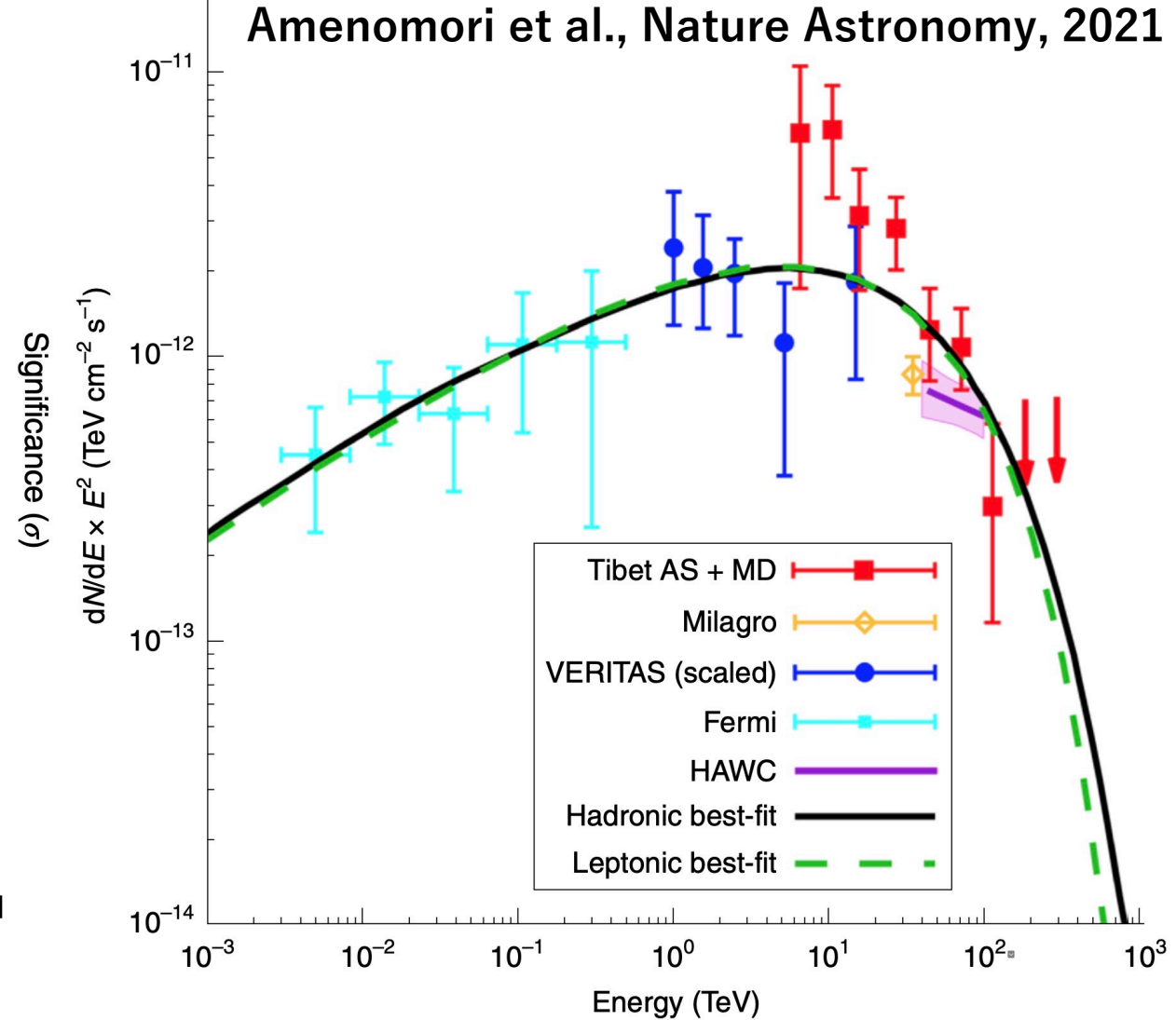
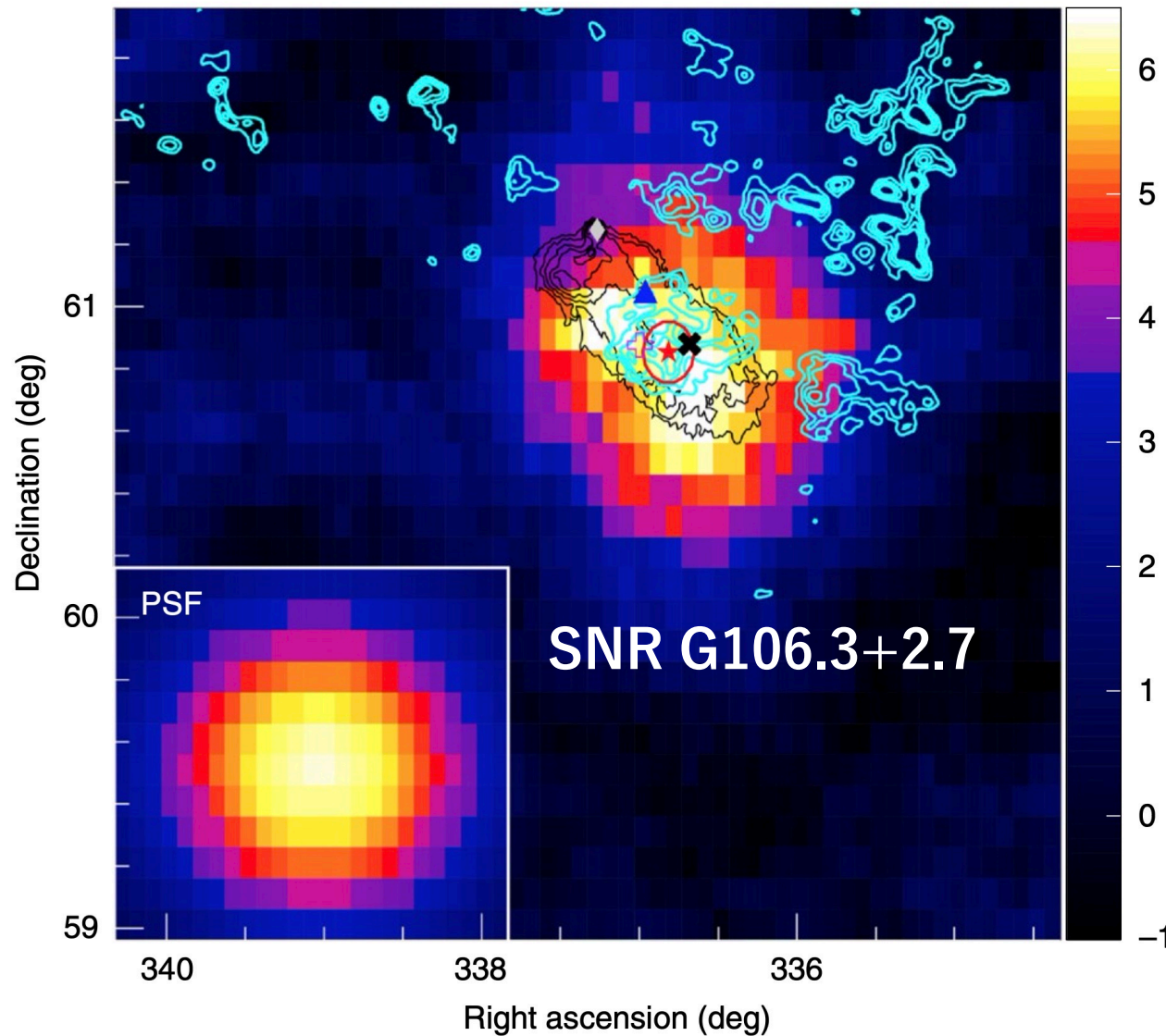


NASAのHPより

超新星残骸

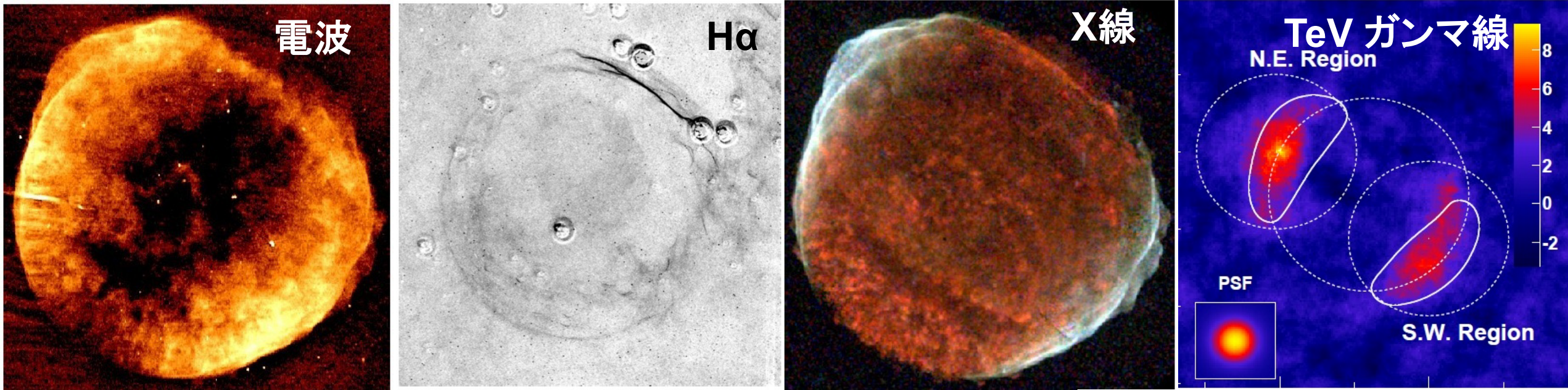


超新星残骸からの $\sim 100\text{TeV}$ ガンマ線の観測



SNRで陽子またはイオンが $0.5(A/1)\text{PeV}$ まで加速されている証拠! ?

超新星残骸 (星の大爆発によって形成された衝撃波)



Winkler et al. ApJ 2003

Cassam-Chenai et al. 2008

Acero et al. 2010

大きさ: $10^{18} - 10^{20}$ cm (太陽と地球の距離が $\sim 10^{13}$ cm)

速度: $10^7 - 10^9$ cm/s

質量: $10^{33} - 10^{34}$ g

爆発エネルギー: 10^{51} erg = 10^{44} J

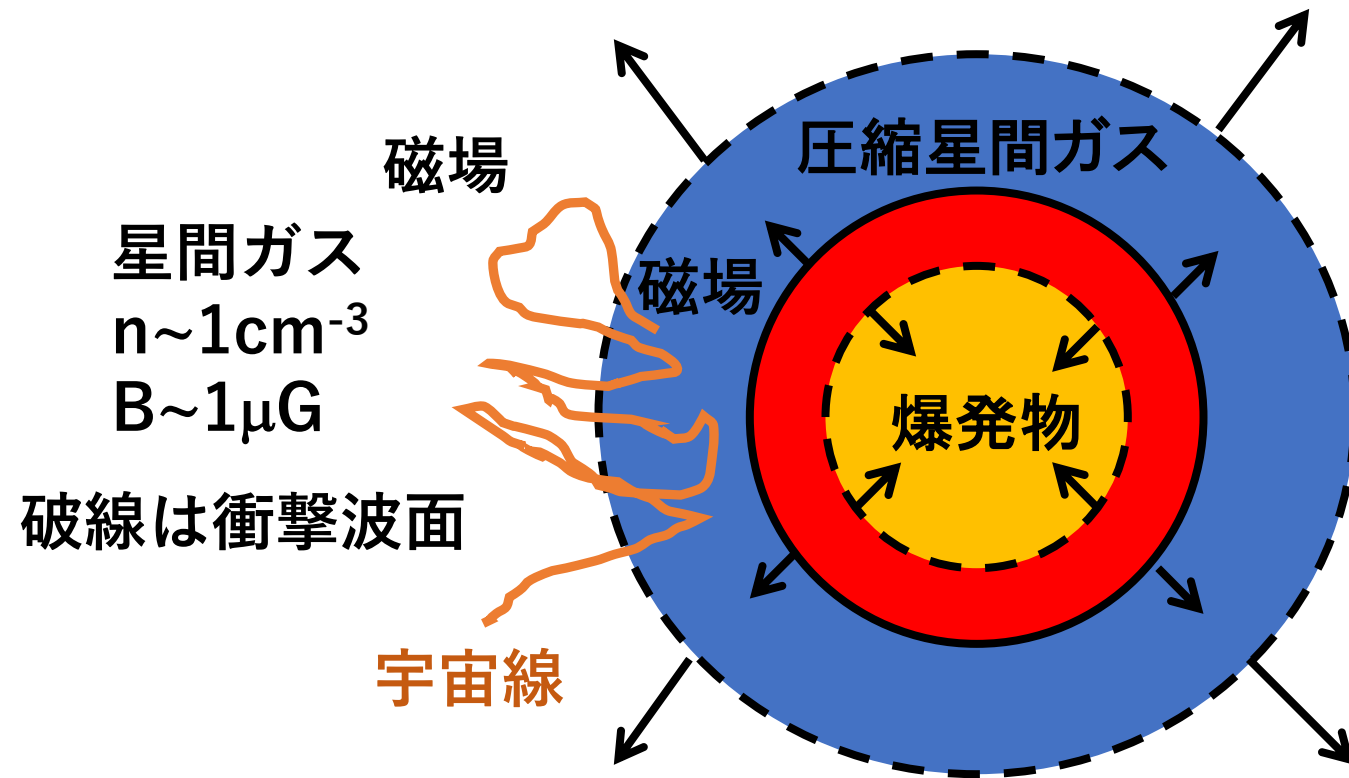
発生率: 1/30yr/galaxy

$E \sim 10^{14}$ eVのガンマ線が観測されている。

粒子は少なくとも、 $E > 10^{14}$ eVまで加速されている。

爆発エネルギーの 10% が 10^9 eVの宇宙線に渡れば、
観測されている宇宙線フラックスを説明できる。
ほとんどの粒子のエネルギーは $\sim 10^4$ eV。

衝撃波統計加速(Diffusive Shock Acceleration)



星間ガスの磁場は静止している。

衝撃波圧縮領域の磁場は外向きに動いている ($V \sim 3000 \text{ km/s}$)。

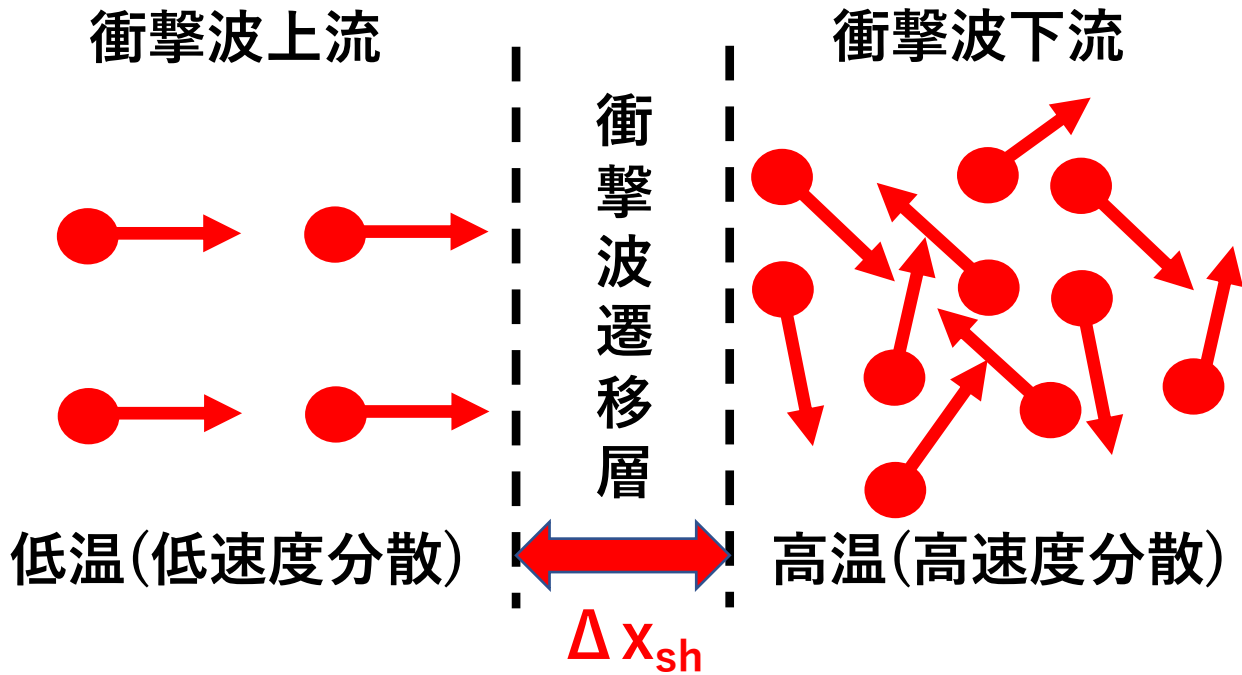
衝撃波を何度も往復すると、宇宙線は動いている磁場に何度も叩かれて加速する。

$$dN/dE \propto E^{-2}$$

仮定 1 衝撃波

仮定 2 拡散運動する粒子(荷電粒子の軌道を変える電磁場)

無衝突衝撃波



プラズマ系の2体相互作用はクーロン散乱

$$e^2/r \sim mv^2/2$$

$$\rightarrow \sigma \sim r^2 \sim r_e^2 (v/c)^{-4} \\ \sim 10^{-19} \text{ cm}^2 (T/10^7 \text{ K})^2$$

星間ガスの数密度 $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$

$$\rightarrow l_{mfp} = 1/n\sigma \sim 10^{19} \text{ cm} \gg \Delta x_{sh}$$

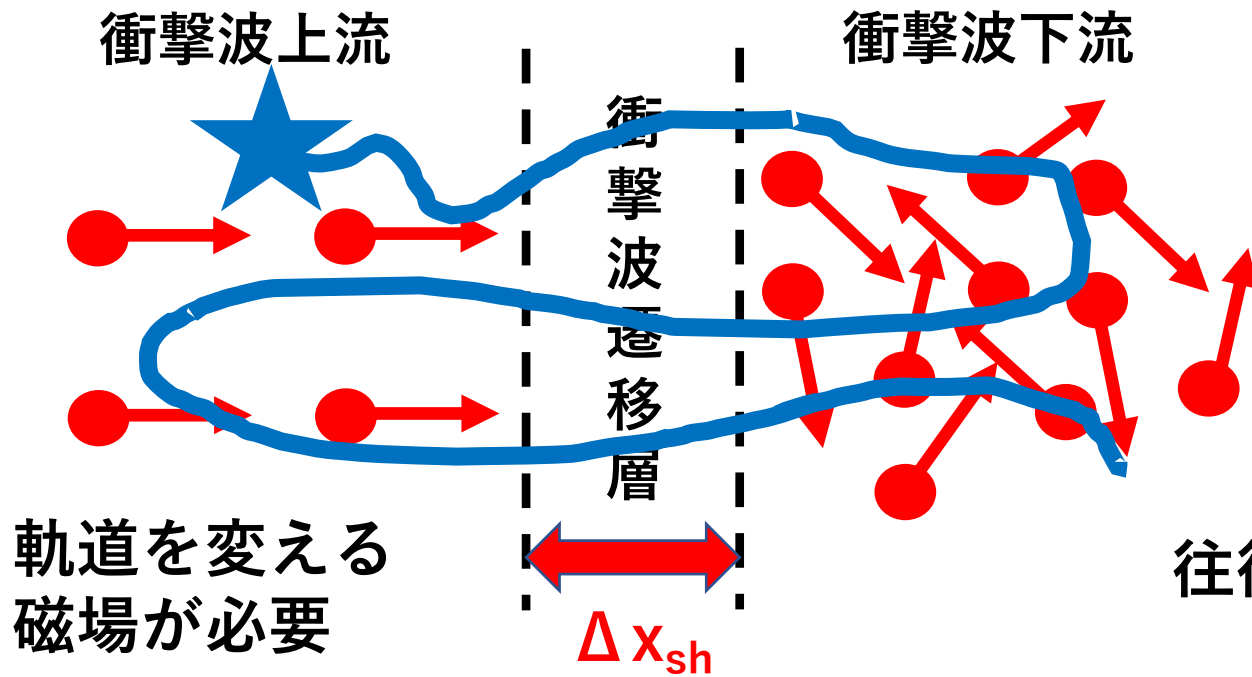
衝撃波遷移層内のクーロン散乱による荷電粒子の軌道変化は無視できる。

プラズマ自身の集団運動によって、自発的に電流を生成し、乱れた電磁場を作る。

その乱れた電磁場で、荷電粒子の軌道を複雑にする。

未解決問題① 衝撃波遷移層内での電磁場生成機構は未解明。

衝撃波を往復する粒子



荷電粒子が衝撃波を往復するためには、
上流と下流に乱れた磁場が必要

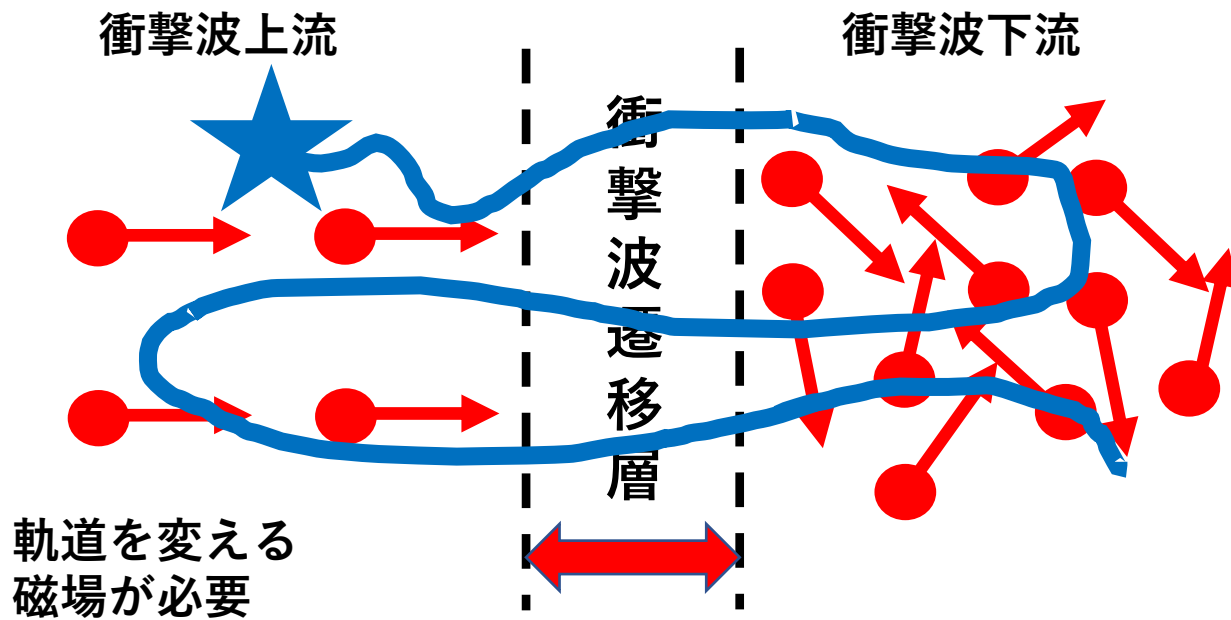
未解決問題② 衝撃波上流と下流での
磁場生成機構は未解明。

往復運動する荷電粒子の電流が重要と思われる。

未解決問題③ ほとんどの粒子は、衝撃波面を1回だけ通過し、Maxwell分布になる。
0.01%程度の粒子が衝撃波を往復運動し、 $dN/dE \propto E^{-2}$ の分布になる。
何が原因？加速される粒子の割合は何が決めている？

電子はイオンに比べジャイロ半径(mcv/eB)が小さいため、衝撃波遷移層を自由に通過できない。ジャイロ半径を大きくするための別の加速機構が必要だが未解明。加速される粒子の割合は何が決めている？

様々な種類の無衝突衝撃波と未解決問題



無衝突衝撃波は、様々な種類がある。

衝撃波速度： $10^{-3} c \sim c$ ($\Gamma \gg 1$)

プラズマの組成： e^-/e^+ , e^-/ion , $e^-/e^+/\text{ion}$, $e^-/\text{ion}/H$

磁場の大きさ： $\omega_{pe} / \Omega_{ce} = 10^3 - 10^{-1}$

磁場の向き： $B // V_{sh}$, $B \perp V_{sh}$

他にも、放射冷却、宇宙線の反作用、輻射場の影響によって、様々なタイプの無衝突衝撃波に分類される。

無衝突衝撃波に関する未解決問題は、そのタイプごとに答えは違うはずだが、まだまだ未解明。

未解決問題① 衝撃波遷移層内での電磁場生成機構は未解明。

未解決問題② 衝撃波上流と下流での磁場生成機構は未解明。

未解決問題③ 各粒子種ごとに、加速される粒子の割合は未解明。

プラズマ粒子シミュレーション

$$\frac{d\vec{r}_n}{dt} = \vec{v}_n$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

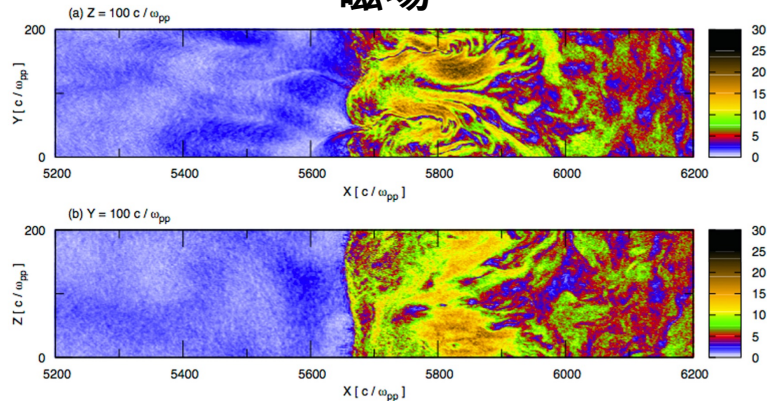
$$\frac{d\vec{v}_n}{dt} = \frac{q_n}{m_n} (\vec{E} + \vec{v}_n \times \vec{B})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

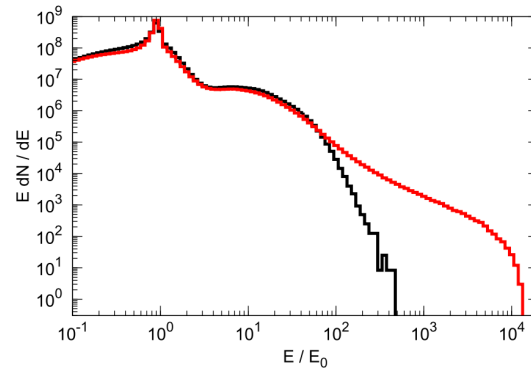
10¹² – 10¹⁴ 個の荷電粒子の運動方程式を解く → 電流 → マクスウェル方程式を解く

必要に応じて方程式系を近似したり、原子反応や電子陽電子対生成などの粒子生成や消滅を解く。

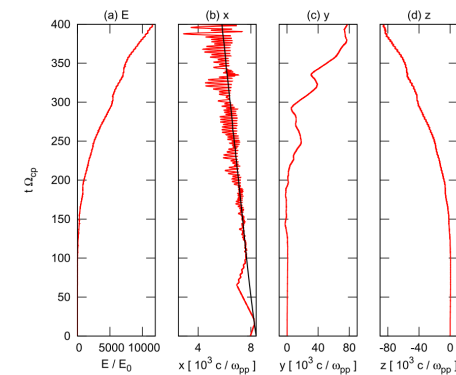
磁場



エネルギースペクトル



被加速粒子の軌跡



Ohira 2016

弱点は、計算できる空間時間スケールが、天体加速器に比べて桁違いに小さい。

$\Delta t \sim 10^{-5} - 10^1 \text{ sec}$, $\Delta x \sim 10^2 - 10^9 \text{ cm}$

世界一のスパコン富岳によるプラズマ粒子シミュレーション



富岳（京の~100倍の性能。A01分担者協力者は全員、富岳が使える）
スパコンの性能を最大限に活かす計算コード（松本洋介さんが提供）
世界最高性能の計算機の利用経験者(これまで松本さん1人 → ~10人)

京の100倍の計算機パワーと10倍のマンパワー

現象論でパラメーター化される物理量を、第一原理計算によって明らかにする。

加速される電子やイオンの量、冪指数、磁場、電場(プラズマ流の速度場)、宇宙線の拡散係数

これまでの現象論的モデルは、沢山あるパラメーターを調整することで、**観測から排除されなかった。**

これまでの第一原理計算は、**計算機資源不足**で現象論が必要とするパラメーターの値を決められなかった。

これからの第一原理計算は、空間1次元 → 空間3次元、 $m_p/m_e \sim 10 \rightarrow m_p/m_e \sim 100-1000$, e-p → e-p-He-C

$E_{\max}/E_0 \sim 10 \rightarrow E_{\max}/E_0 > 10^4 \rightarrow$ **第一原理計算とガンマ線や宇宙線直接観測の直接比較**

超新星残骸衝撃波、ブラックホールから吹き出す相対論的衝撃波 (大平豊)

太陽風終端衝撃波、惑星間衝撃波、銀河団衝撃波 (松清修一)

中性子星やブラックホールの磁気圏中 (木坂将太)

まとめ

宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子($E > 10^9$ eV)が存在する。
発見以来100年以上経つが、その起源と加速機構は謎のまま。
宇宙スケールから人間の生活レベルまで、宇宙線は様々な形で影響を及ぼしている。

天体現象に伴う無衝突衝撃波で宇宙線が加速されると期待されている。
無衝突衝撃波とは、クーロン相互作用による2体散乱の空間(時間)スケールよりも小さいスケールで、
プラズマ自身によって電磁場を作り出し、それによって粒子軌道を複雑にする散逸過程が働く衝撃波。

無衝突衝撃波に関する未解決問題

未解決問題① 衝撃波遷移層内での電磁場生成機構は未解明。

未解決問題② 宇宙線加速に必要な衝撃波上流と下流の磁場生成機構は未解明。

未解決問題③ 各粒子種ごとに、加速される粒子の割合は未解明。

「富岳」(京の100倍)の計算機パワーと、これまでの10倍のマンパワーを使って、
複数の荷電粒子の運動方程式とMaxwell方程式を同時に数値計算する
プラズマ粒子シミュレーションを行い、上記未解決問題を解明する。