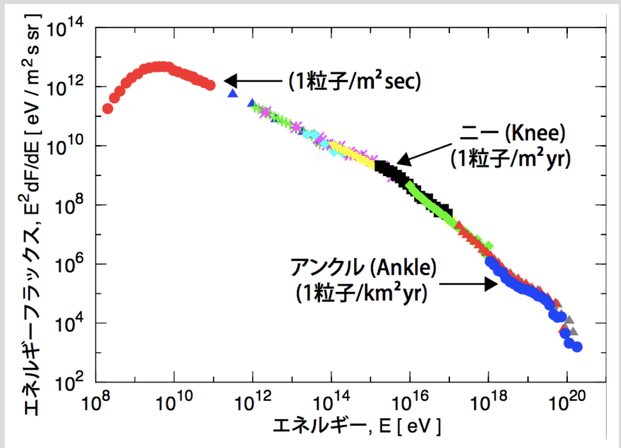
非一様媒質中を伝播する衝撃波と粒子加速

東京大学　横山 将汰　大平 豊

1. イントロダクション

- 宇宙線の冪関数型のエネルギースペクトルを説明する粒子加速機構として、衝撃波統計加速（Diffusive Shock Acceleration）が広く受け入れられている。
- 特に $10^{15.5} eV$ (knee) 以下の銀河宇宙線は、超新星残骸における衝撃波統計加速によって生成されているとされている。
- 超新星残骸における衝撃波統計加速という描像にはいくつかの問題点が指摘されている。（粒子の注入問題、最高到達エネルギーの問題、スペクトルの冪指数の問題、etc.）
- 本研究では、標準的な衝撃波統計加速で考慮されていなかった媒質の非一様性の効果を調べる。

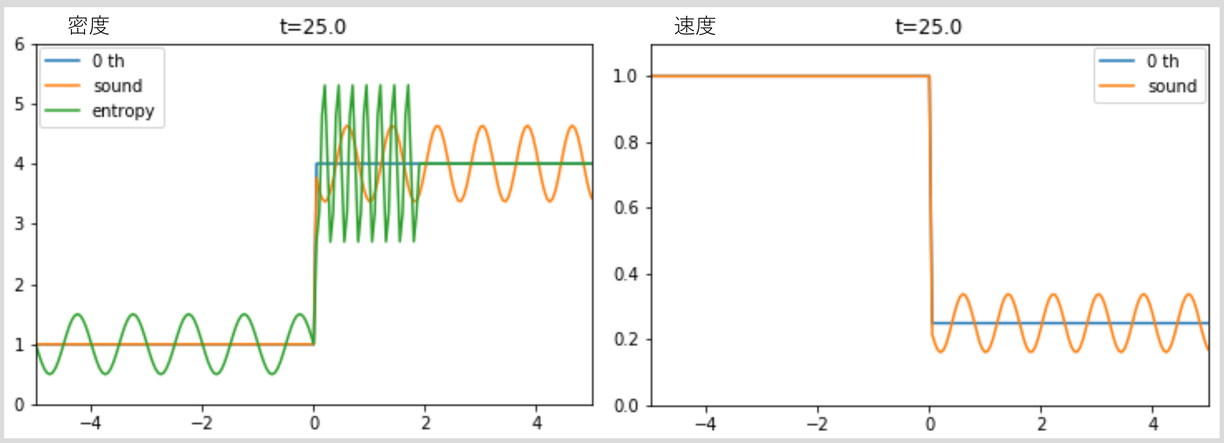


Ohira et al. (2012)

2. 非一様媒質中の衝撃波と粒子加速

- 密度揺らぎが存在する空間に衝撃波が伝播すると、下流に音波が発生。
- 線形解析（McKenzie & Westphal, 1968）によると、下流の音波の振幅、波長は上流の揺らぎと以下の関係にある。(M: Mach数, $r = u_1/u_2$)

$$\frac{\delta u}{u_1} = \frac{M_2}{1 + 2M_2 + M_1^{-1}} \cdot \frac{r-1}{r} \cdot \frac{\delta \rho_1}{\rho_1}, \qquad \lambda_{\mathrm{sound}} = \frac{1 + M_2^{-1}}{r} \lambda_1$$



3. 粒子加速機構

【衝撃波統計加速】

- 粒子は乱流磁場により散乱されることで衝撃波面を往復可能に。
- 粒子の分布は背景プラズマの静止系で等方になるので、衝撃波面を往復する度に上流と下流の速度差に応じた運動量を獲得する。

$$\Delta p/p \propto (u_1 - u_2)/v$$

【音波による加速】

- 長波長の音波が存在すると、粒子の分布は音波による速度揺らぎ δu をもつ背景プラズマの静止系で等方になる。
- 粒子は音波中を拡散運動することで、背景プラズマの局所的な速度差を感じて平均として加速される。

$$\Delta p/p \propto (\delta u/v)^2$$

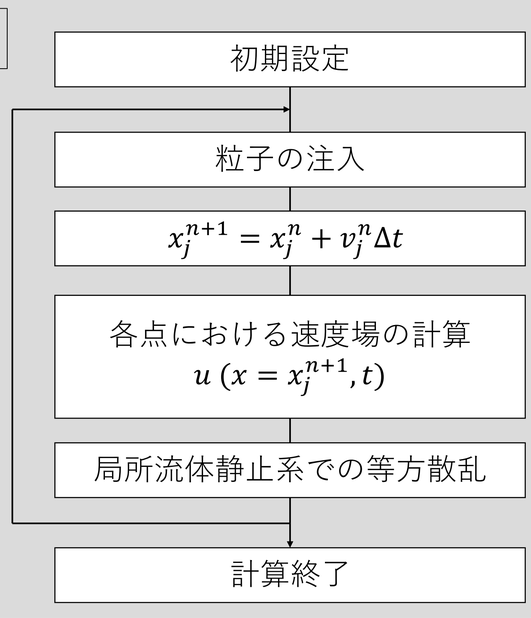
：二次加速

- 音波による二次加速は運動量空間における拡散として記述できる。(Ptuskin, 1988)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} \left(p^2 D_{pp} \frac{\partial f}{\partial p} \right), \qquad D_{pp} = \frac{1}{9} p^2 \langle \delta u^2 \rangle \frac{\kappa k^2}{v_s^2 + (\kappa k)^2}$$

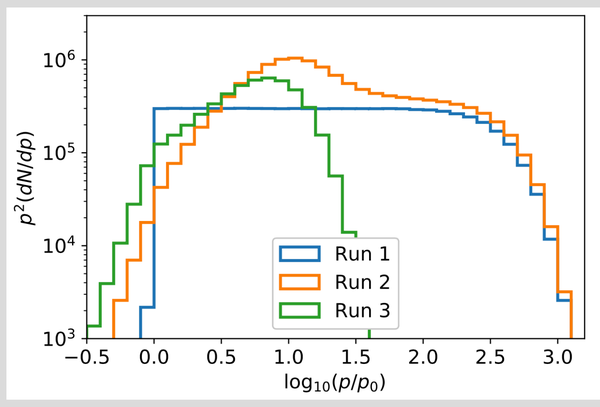
4. Monte Carlo シミュレーション

- 背景プラズマは流体、宇宙線はテスト粒子として扱う。
- 粒子の拡散運動は、流体静止系における等方散乱として確率的に記述。
- 流体成分は McKenzie & Westphal (1968) の線形解を用いて時間更新。



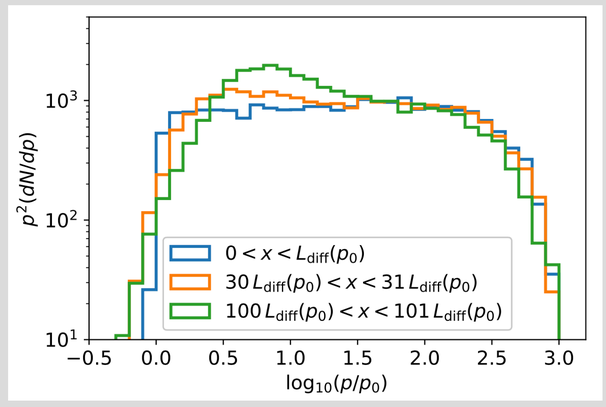
5. シミュレーション結果

- 非一様媒質中衝撃波による加速では、衝撃波面の往復による加速と衝撃波下流の音波による二次加速の両方が寄与する。



$u_{\mathrm{sh}} = 0.01\,c$
$\delta\rho_1 = 0.5\,\rho_1$
$\lambda_{\delta u_2} = 200\,\lambda_{\mathrm{mfp}}(p_0)$

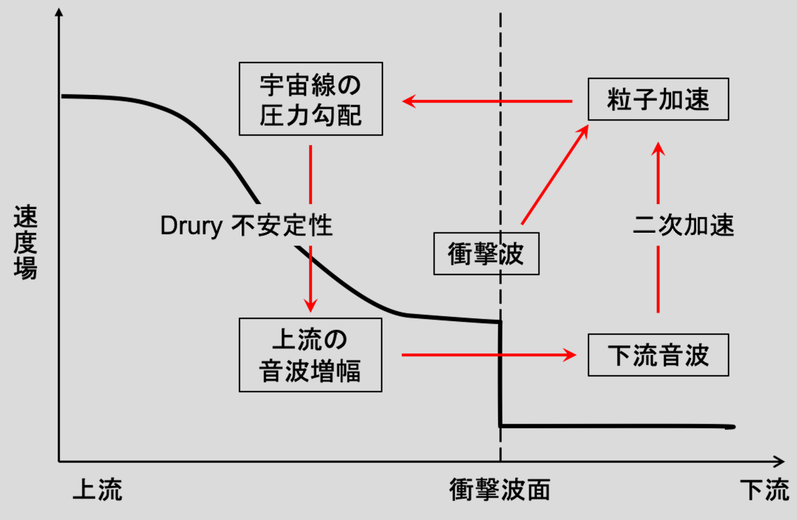
- 音波による二次加速の寄与は衝撃波面から離れるほど大きくなる（下図水 → 橙 → 緑）。



(Yokoyama & Ohira, 2020)

6. 今後の展望

1. 流体方程式も数値的に解くシミュレーション（コード開発済）
   これまでのシミュレーションで取り入れられていなかった、音波の減衰や steepening などの非線形効果を取り入れる。
2. 粒子の反作用の導入
   - 上流にしみ出した宇宙線の反作用により衝撃波構造が変調。
   - 変調衝撃波の precursor 領域では、宇宙線の圧力勾配 ∇P_{CR} が音波を増幅するDrury不安定性（Drury & Falle, 1986）が起こる。
   - 加速された宇宙線が、Drury不安定性を介して音波を増幅し、さらに粒子加速が促進されるというフィードバック機構が期待される。



宇宙線変調衝撃波とフィードバック機構