

宇宙線の衝撃波加速における 非線形効果の考察

東京大学大学院
理学系研究科
地球惑星科学専攻
星野研究室

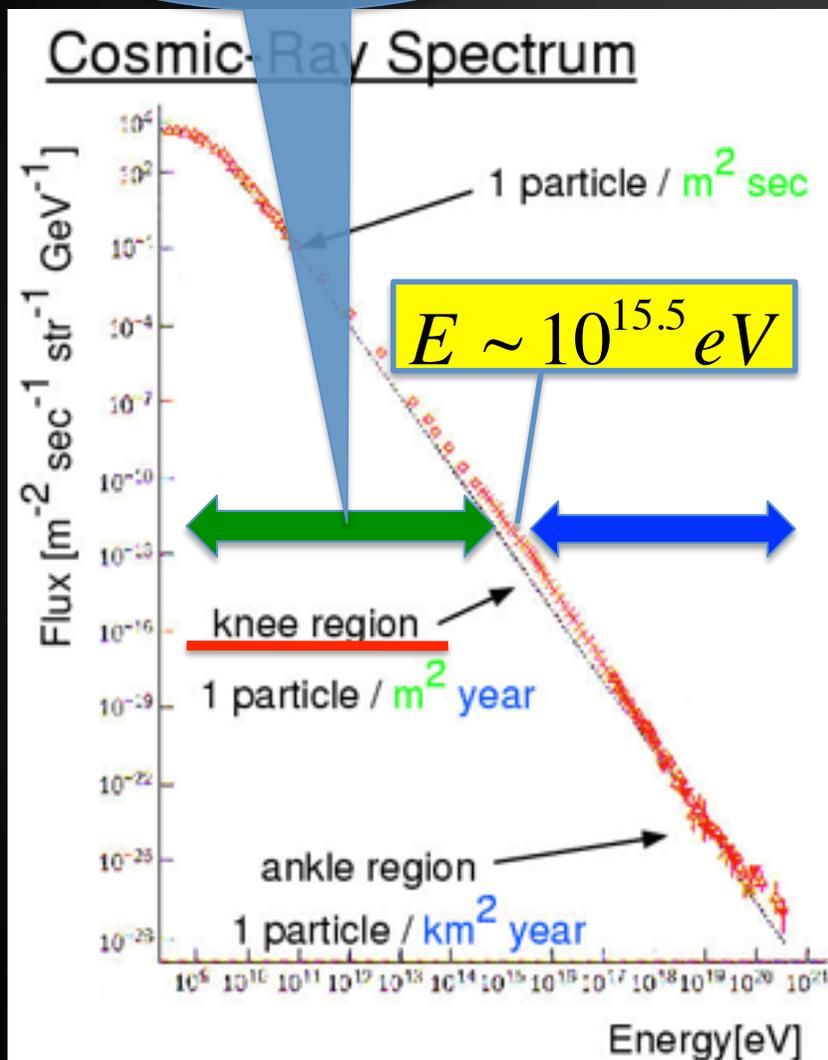
修士1年
齋藤達彦

@天文夏の学校2010

2010, 8, 2

宇宙線の起源

銀河系内起源



エネルギー $< 10^{15.5} \text{eV}$ の宇宙線はエネルギー論的に銀河系内起源であり、その加速源は超新星爆発により起こる衝撃波と考えられている。



SN 1006

宇宙線の加速メカニズム

◆ Fermi (1949)

統計的な加速機構 : 2次のFermi加速

◆ Blandford and Ostriker (1978) , Bell (1978a,b)

1次のFermi加速

→ Diffusive Shock Acceleration (DSA) 理論
エネルギースペクトルがべき乗分布 $N(E) \propto E^{-2}$
— 観測のスペクトル分布を説明

<問題点>

DSA理論による最高加速エネルギー E_{max}

$$E_{max} = 2 \times 10^{13} \left(\frac{z}{\eta} \right) \left(\frac{V_1}{3000 \text{ km/s}} \right) \left(\frac{B_1}{1 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{t}{10^3 \text{ yr}} \right) \text{ eV}$$

$$= 10^{13} - 10^{14} \text{ eV}$$

観測値 ($10^{15.5} \text{ eV}$) よりも約1桁小さい

このギャップをどう説明していくか?

非線形衝撃波

前項のDSA理論に対するアプローチ

- 磁場Bの増強
- 拡散の物理
- **非線形衝撃波**
- 粒子のinjection問題 etc...

Drury and Volk (1981) , Drury (1983)

“Nonlinear modified shock”

衝撃波でのFermi加速によって高エネルギー粒子(宇宙線)が生成されていく仮定で、高エネルギー粒子の衝撃波へのフィードバック。衝撃波の構造が変化し、圧縮率が上昇、粒子加速率も上昇。全体として衝撃波が非線形な振る舞いを見せる。

➡ 加速エネルギーの上限を押し上げる可能性

このモデル自体は1980年代初頭提唱されていたが、近年盛んに議論されている。cf. Drury and Diamond (2006)

Kang and Jones (2005)

非線形衝撃波

- 宇宙線の圧力

$$p_c = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty p^3 v f(p) dp$$

p : 粒子の運動量

v : 粒子の速度

$f = f(p, x)$: 粒子の分布関数



“宇宙線(p_c)+背景のプラズマガス(p_g)”の2流体系での取り扱いが可能。

- 1次元衝撃波問題: 上流、下流で3つのフラックスの保存

mass flux $\rho u = const$

momentum flux $\rho u^2 + p_g = const$

energy flux $\frac{1}{2} \rho u^3 + \frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1} u p_g = const$



これらに、宇宙線の効果が加わる。

非線形衝撃波

プラズマ・宇宙線系での付加項

- 宇宙線+背景プラズマでのフラックス保存(1次元)

mass flux $\rho u = const$

momentum flux $\rho u^2 + p_g + \underline{p_c} = const$

energy flux

$$\frac{1}{2}\rho u^3 + \frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1} u p_g + \frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1} u p_c - \frac{\kappa}{\gamma_c - 1} \frac{\partial p_c}{\partial x} = const$$

+ 断熱変化(エントロピー保存)

$$p_g u^{\gamma_g} = const$$

拡散率 κ (一定)での拡散項

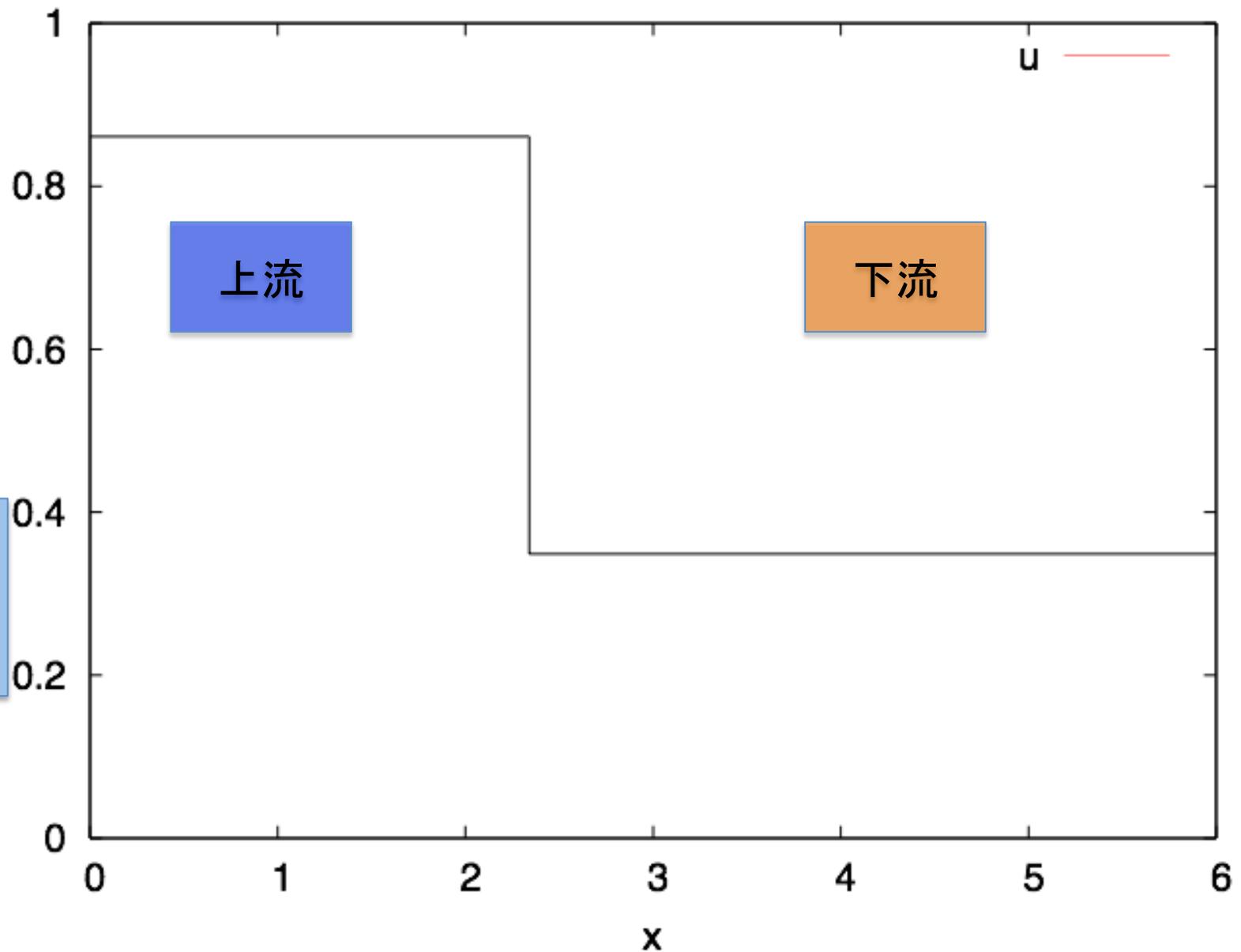
$$\gamma_g = 5/3 \quad \gamma_c = 4/3$$

➡ 未知数 (ρ, u, p_g, p_c) に対して4式で解くことができる。

※無次元パラメータ : $M = \left(\frac{\rho u^2}{\gamma_g p_g + \gamma_c p_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad N = \frac{p_c}{p_g + p_c}$

宇宙線なしの衝撃波

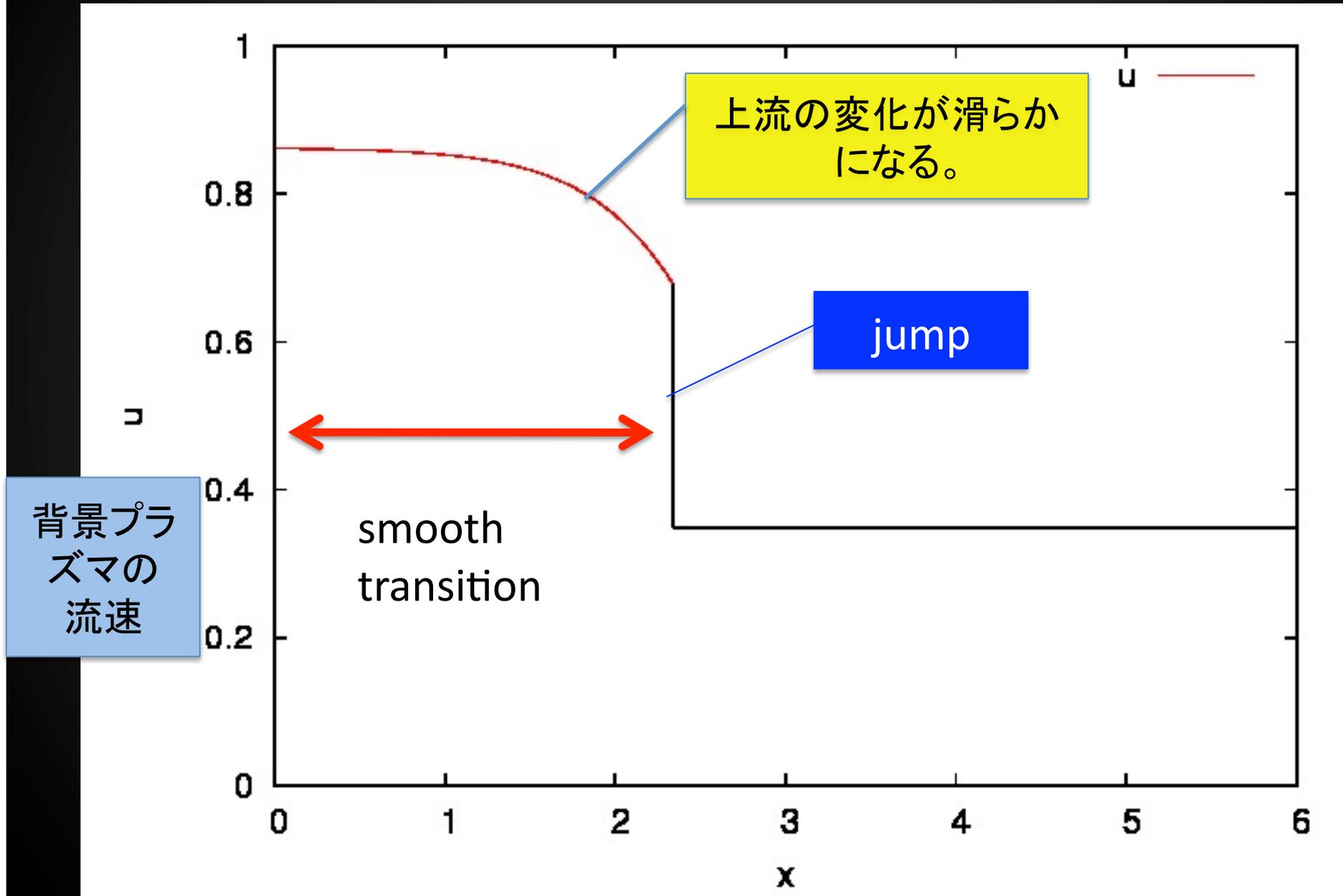
—変化は不連続になる



背景プラ
ズマの
流速

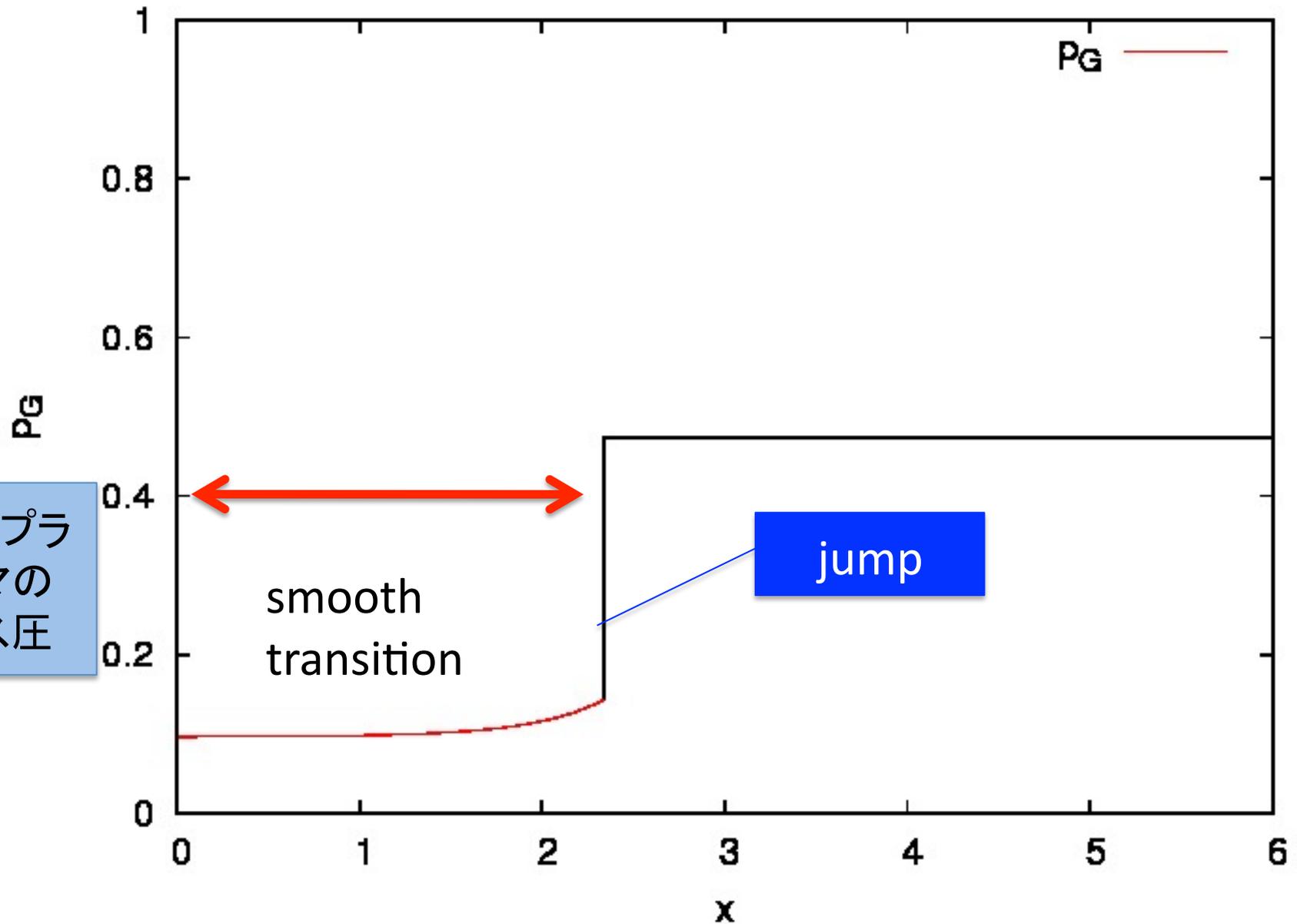
非線形衝撃波 (背景プラズマ+宇宙線)

$M = 2, N = 0.3$



非線形衝撃波

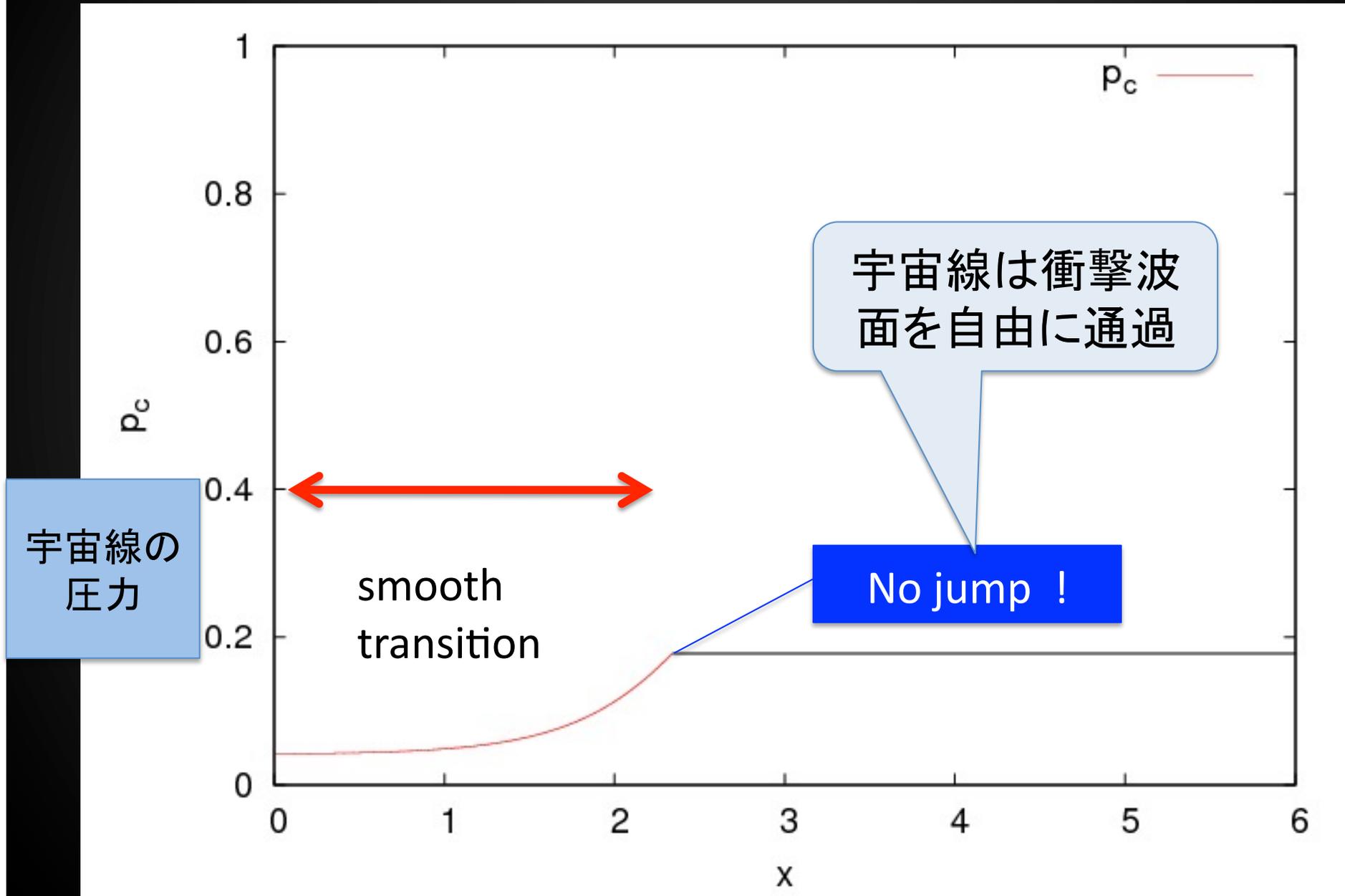
$$M = 2, N = 0.3$$



背景プラ
ズマの
ガス圧

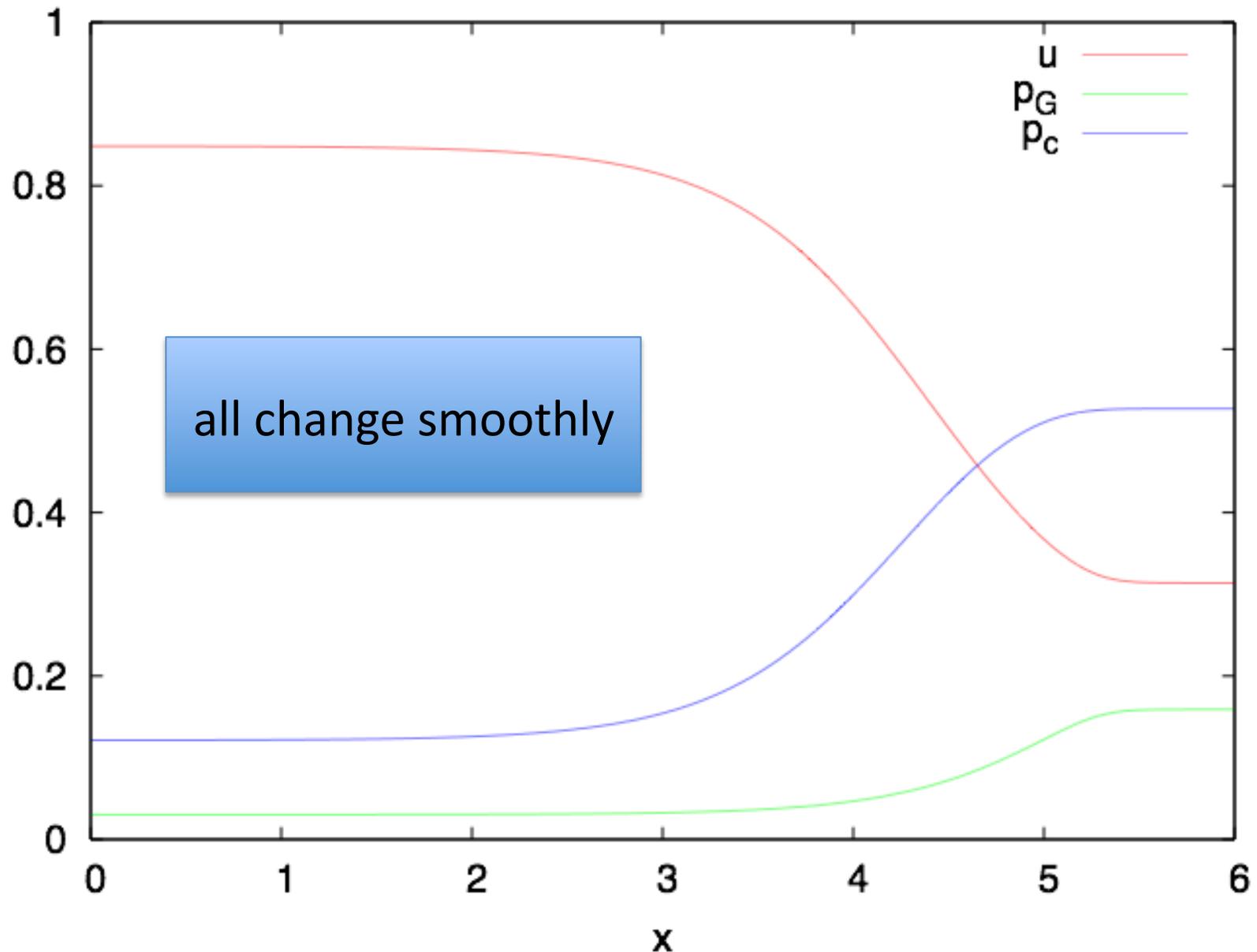
非線形衝撃波

$$M = 2, N = 0.3$$



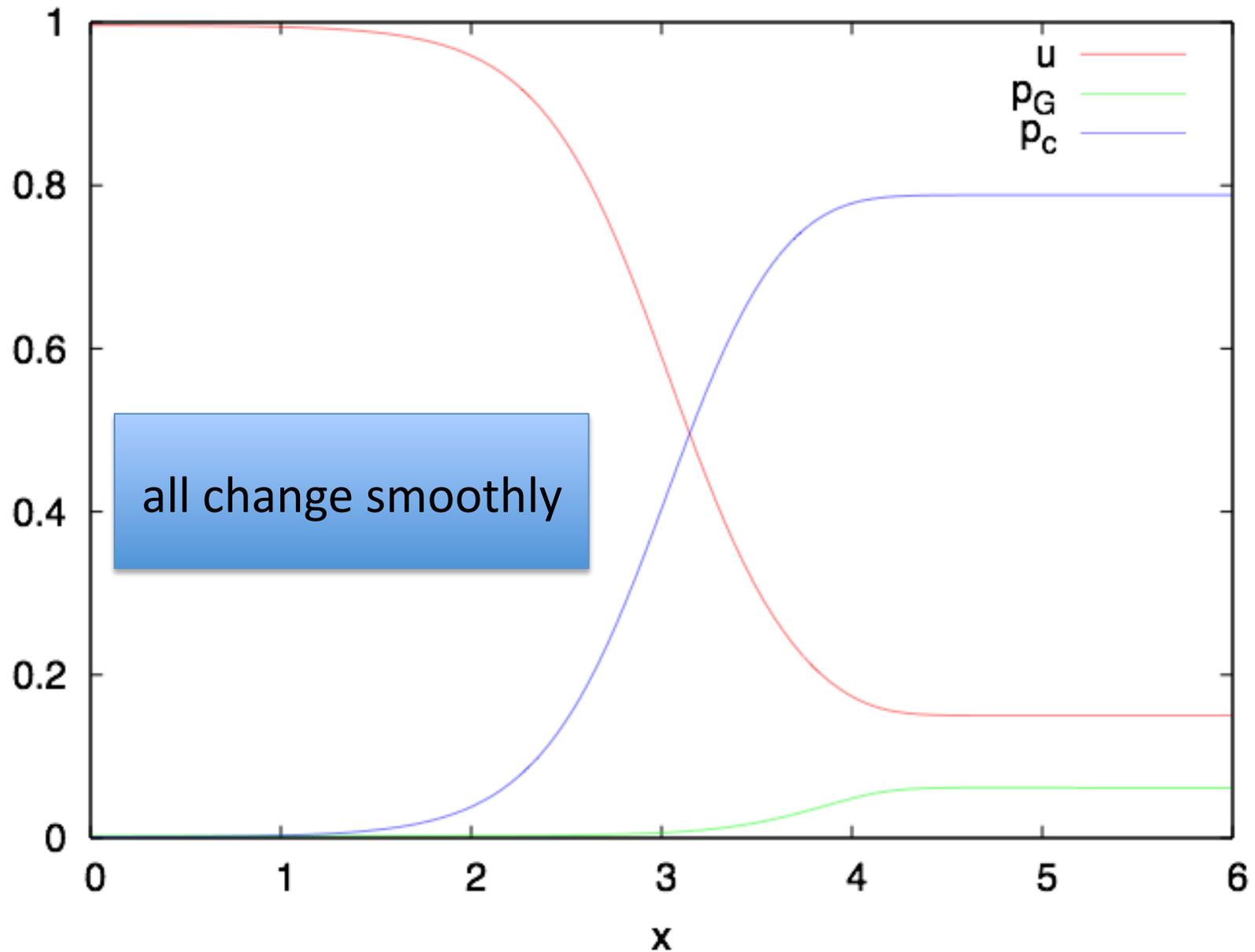
先ほどの状態からマッハ数変えずに、上流での宇宙線の圧力をあげてみると.....

$M = 2, N = 0.8$



宇宙線の圧力は変えずに、マッハ数を大きくしてみると....

$M = 13, N = 0.3$



上流でのマッハ数 M 、宇宙線の圧力の割合 N の値を設定することによって、衝撃波の形状、下流での物理量が決定できる。

次に、上流の宇宙線の割合を増やす

(\longleftrightarrow 上流の N の値を増加させる)

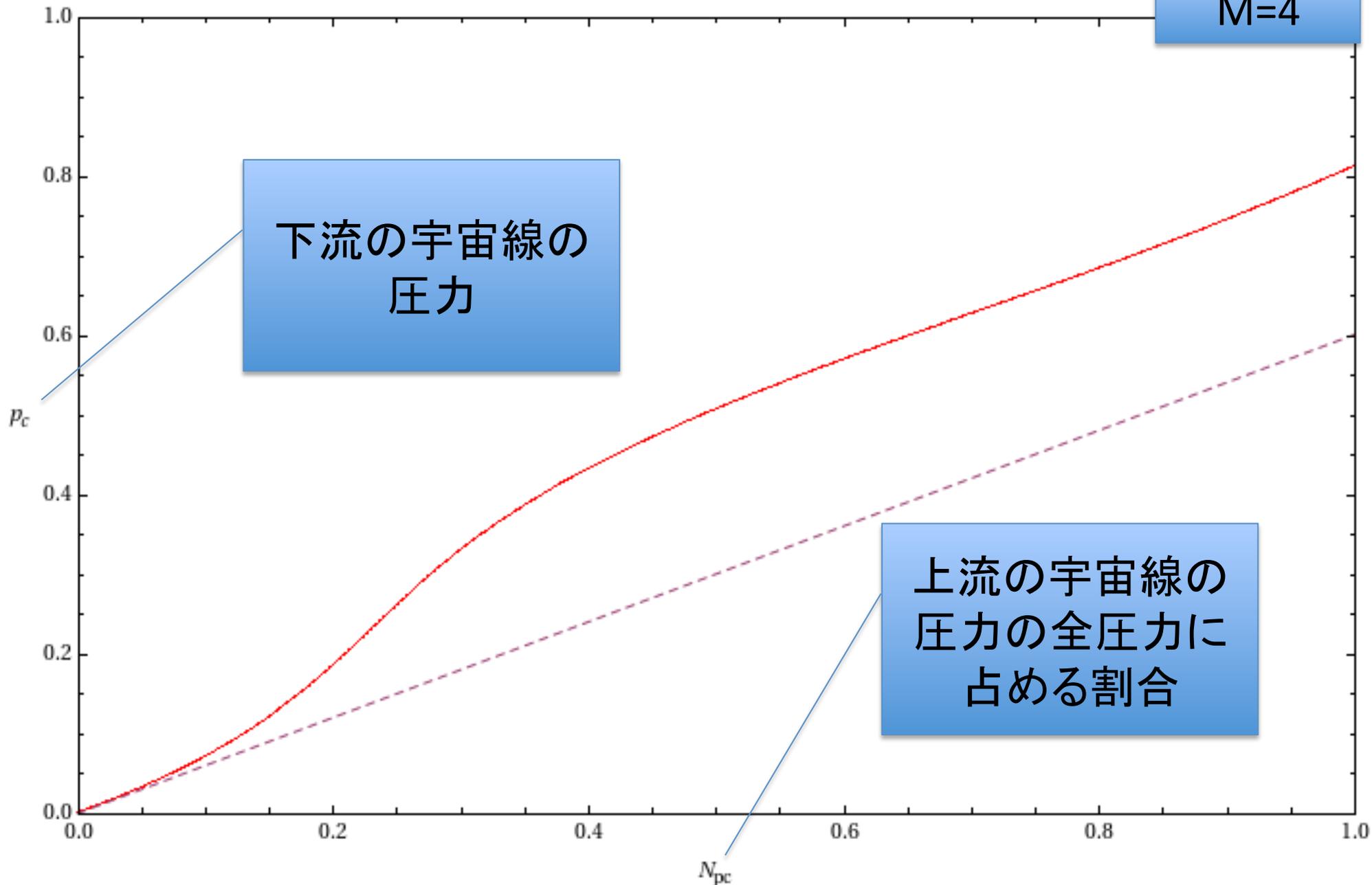
(\longleftrightarrow Fermi加速が進行して、高エネルギー粒子生成)

このときに、下流の宇宙線がどのような影響を受けるかを考える。

マッハ数固定で、上流での宇宙線の圧力の割合を変えていく。

M=4.

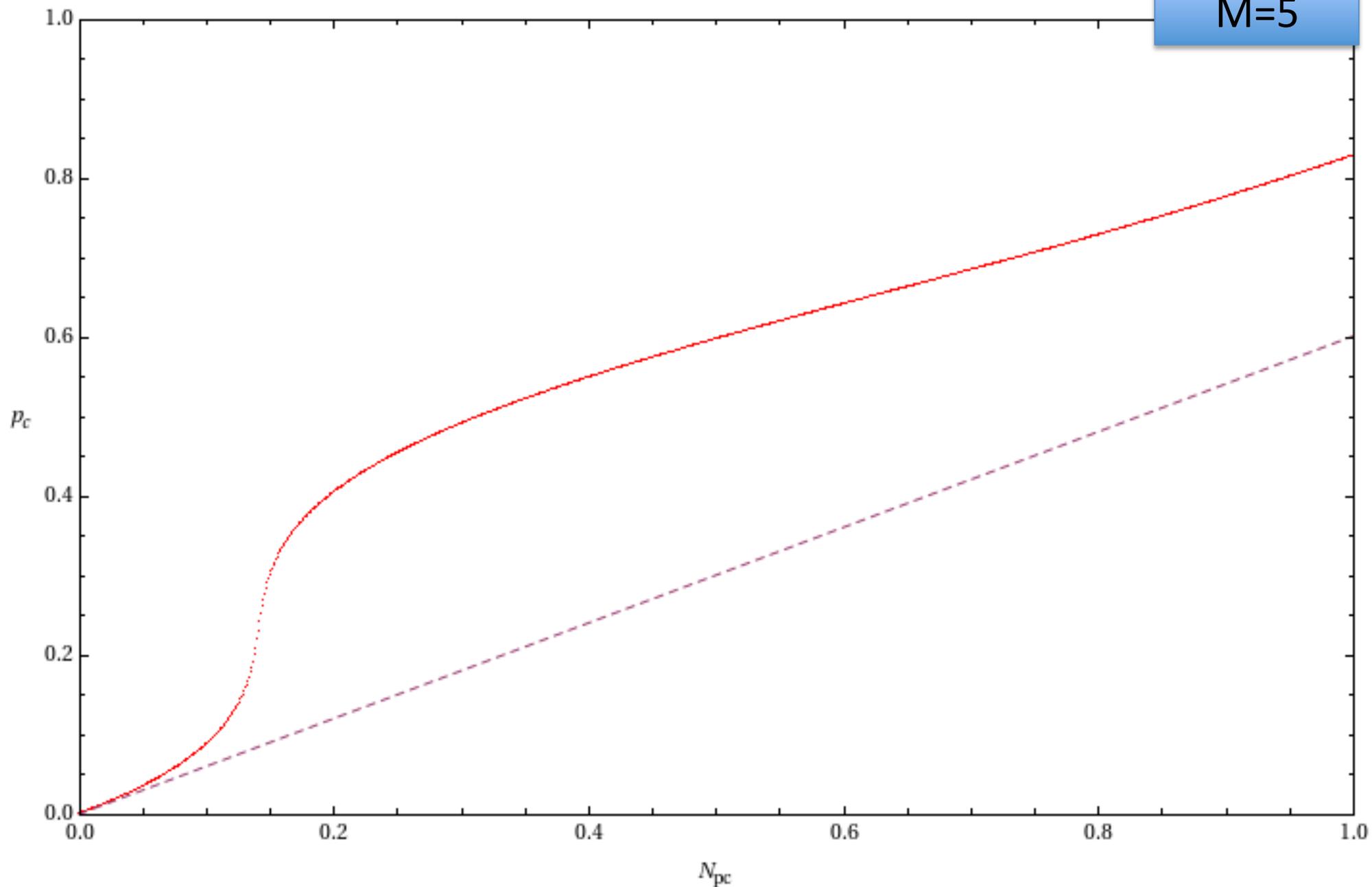
M=4



マッハ数=5の場合

M=5.

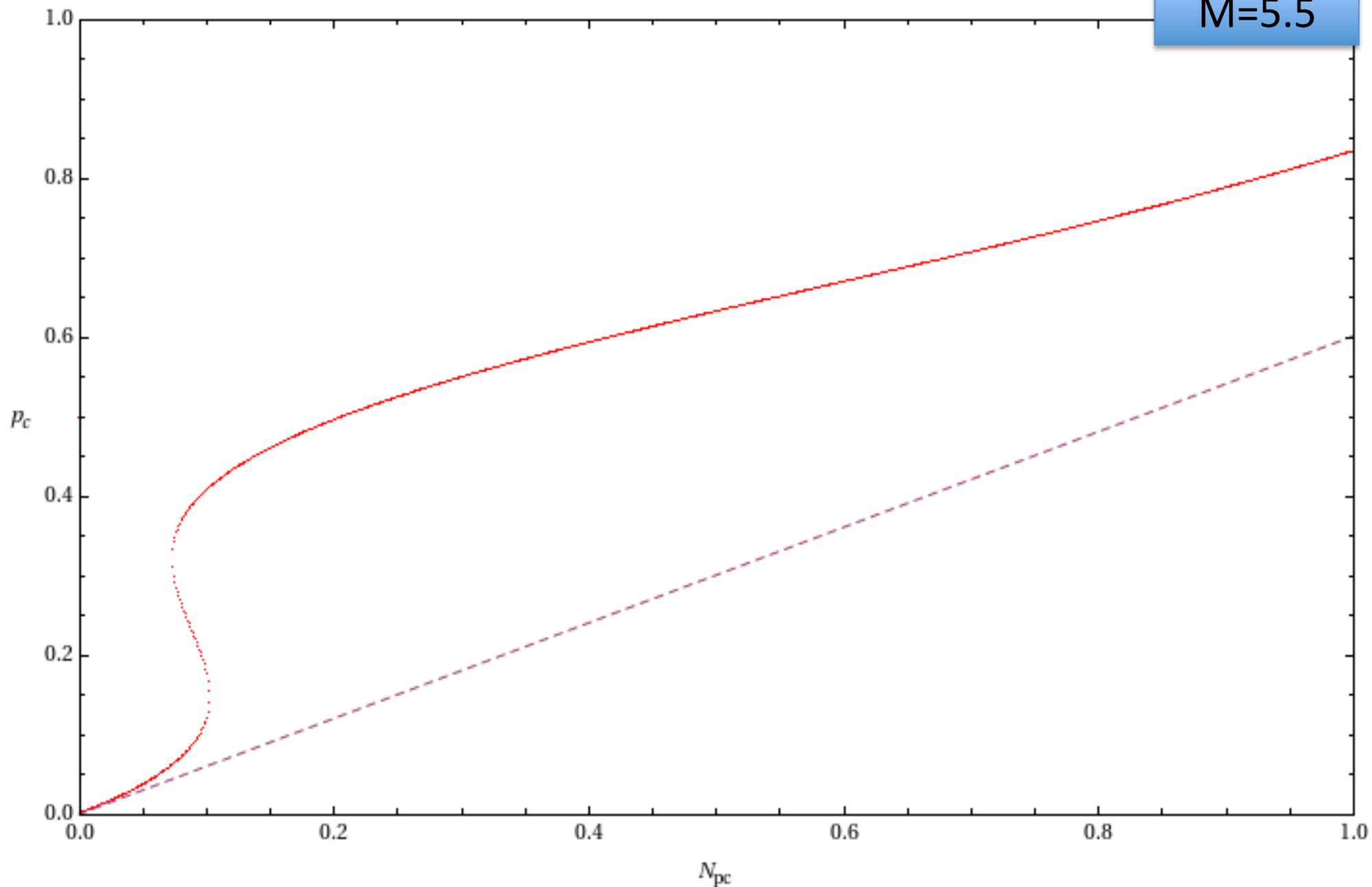
M=5



マッハ数=5.5の場合

M=5.5

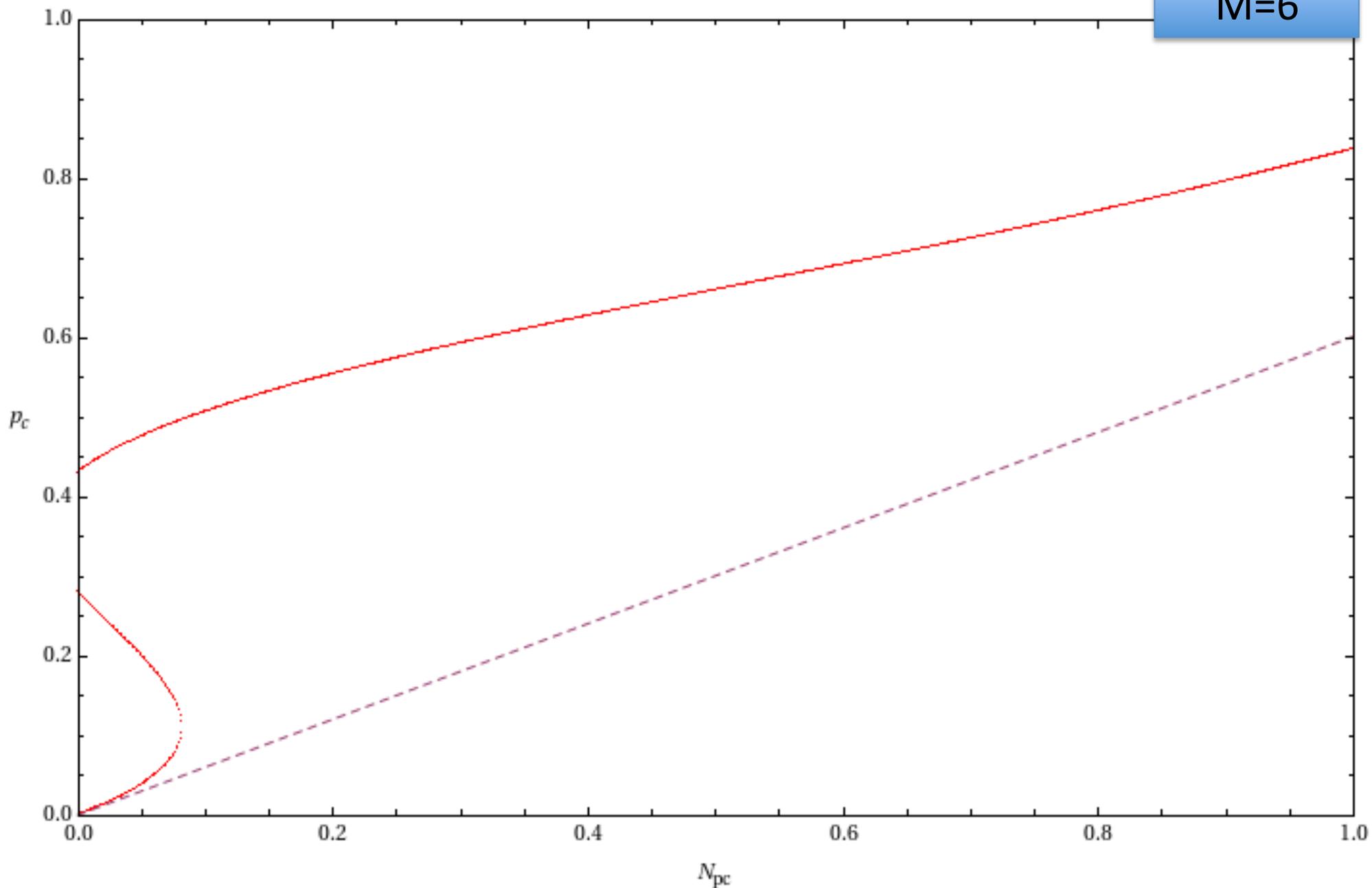
M=5.5



マッハ数=6の場合

M=6.

M=6



まとめ

- 上流のマッハ数が大きくなるほど、非線形効果は強くなる。
- 部分的に1つのNに対して可能な解が3つ現れる。
- 宇宙線のフィードバック効果は粒子加速に対して2通りに働く。
 1. 衝撃波の構造を滑らかにして、加速を弱める向き。
 2. 付加的な宇宙線の圧力によって、衝撃波の圧縮率を高めて、加速を強める向き。

→2の効果が上回り、正味粒子をより、加速させる。
(正のフィードバック)

今後の課題

- 今回の議論は単純化されたモデルでしかなく、粒子拡散や粒子の injection 問題、磁場の効果については議論が必要。
- 3つの解に関しては、時間発展を追うことで安定解への収束がみれると考えられる。
- このモデルでは宇宙線と背景プラズマとの直接の相互作用を考えているが、実際には無衝突衝撃波であり、波動場を介した相互作用が考えられる。粒子・波動相互作用を考えた系の発展を追うためにも、PICシミュレーションを用いた解析をしていきたい。