

宇宙物理入門

講義資料

第15章：宇宙線とフェルミ加速

Ver. 0

鶴 剛 (tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

2 次のフェルミ加速

分子雲との衝突による 2 次のフェルミ加速

星間ガス中の密度の高い領域である星間雲は、10km/s 程度の速度でランダムに運動している。星間雲では磁場が貫かれており、周囲に比べ磁場が強い。この星間雲に (相対論的速度を持つ) 宇宙線が近付くと強い磁場により反射される。磁場によるこの反射は完全弾性衝突となるので、星間雲が静止している場合には、同じ速さで反射される。

もしも星間雲が動いており宇宙線が正面衝突すると、宇宙線の速さは星間雲の 2 倍の速さを新たにもらうので、加速されることになる。しかし、宇宙線が星間雲に追突する形でぶつかると、今度は減速されることとなる。加速減速量は同じなので、これだけでは加速されない。

しかし、正面衝突と追突ではわずかに正面衝突する確率の方が高い。よって、何度も衝突を繰り返すうちに、統計的に加速が行なわれることになる。

実はこの素過程は、質量の違う 2 つの粒子の熱化の過程と同じである。つまり、(1) 同じ速度で走っていた陽子と電子の熱化、(2) 重い星 (銀河) と軽い星 (銀河) の間で働くダイナミカルフリクション、など。粒子加速は質量差が無限に大きく過程のタイムスケールが非常に長いので、「加速」と呼ばれるだけで、基礎的な物理は「熱化」と同じである。

衝撃波による1次のフェルミ加速 (1)

流体中を走る衝撃波での加速を考える (図 16.1)。粒子が衝撃波面上流 (u) と下流 (d) を往復する。上流と下流はそれぞれ流体と一緒に移動する反射体—例えば流体に固定され流体と一緒に流れている磁場—が存在する。

流体の速度を、上流と下流をそれぞれ V_1 、 V_2 とし、それぞれの流れの系から見た粒子のエネルギーなどは、添字 u と d をつける。添字のないものは、衝撃波面に乗った系とする。

上流で反射され運動量 p 、エネルギー E 、速度 $v = pc^2/E$ を持つ粒子が衝撃波面に対して θ^+ で横切る場合、上流と下流からはそれぞれ E^u 、 E^d のエネルギーを持つ粒子として見えるとすると、

$$E^u = \gamma_1(E - V_1 p \cos \theta^+) \quad E^d = \gamma_2(E - V_2 p \cos \theta^+)$$

$V_1, V_2 \ll c$ とし (V_1/c)、(V_2/c) の1次のみを取りだし近似する。 $\gamma_1, \gamma_2 \rightarrow 1$ なので、

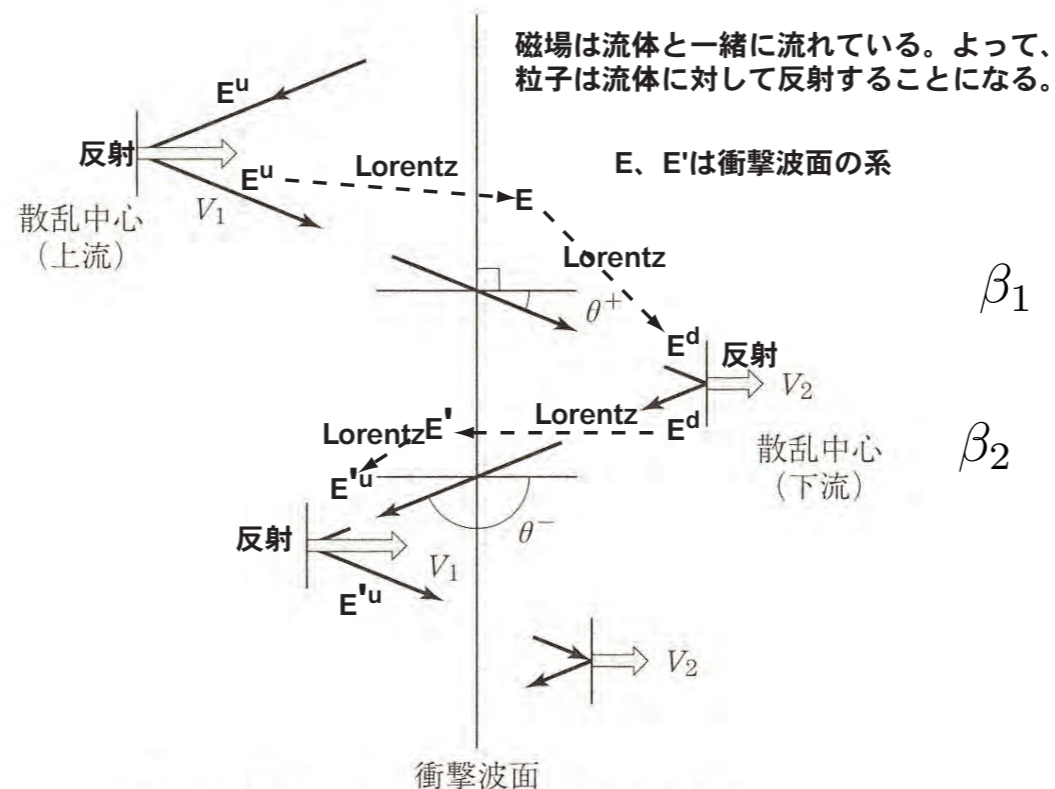
$$E^u = (E - V_1 p \cos \theta^+) \quad E^d = (E - V_2 p \cos \theta^+)$$

となる。 E^d を持つ粒子は次に下流で反射され、衝撃波に対して θ^- の方向で横切る。その際、下流では完全弾性衝突するので、下流から見るとエネルギーは E^d のままで、進行方向のみ変わったように見える。しかし、衝撃波系から見るとローレンツ変換がかかるので、エネルギーが E から変わってしまう。それを E' とする。

反射する角度はランダムであることに注意すると、一周した場合のエネルギー変化は、粒子が相対論的な場合には、

$$\frac{E'}{E} = 1 + \frac{4}{3} \frac{V_1 - V_2}{c}$$

と書ける。



$$\beta_1 \equiv V_1/c, \quad \gamma_1 \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_1^2}}$$

$$\beta_2 \equiv V_2/c, \quad \gamma_2 \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_2^2}}$$

衝撃波による1次のフェルミ加速 (2)

エネルギースペクトルは

$$N(E) \propto E^{-(\gamma+1)}, \quad \gamma = \frac{P_{\text{esc}}}{\eta} = \frac{3}{(V_1/V_2) - 1} = 1 + \frac{4}{M_1^2 - 1}$$

と示される。強い衝撃波 $M_1 \gg 1$ の場合は、

$$N(E) \propto E^{-(\gamma+1)} \quad \gamma \simeq 1$$

実際に観測されている宇宙線のうち、銀河系内起源である knee 以下では

$$N(E) \propto E^{-(2.0 \sim 2.2)}$$

である。よって、衝撃波による宇宙線加速から予測されるスペクトルは、実際に観測されている宇宙線のスペクトルに非常に近い。