

磁気音波衝撃波による非統計的粒子加速

Nonstochastic particle acceleration by magnetosonic shock waves

大澤 幸治 [1]

Yukiharu Ohsawa[1]

[1] 名大・理・物理

[1] Department of Physics, Nagoya Univ.

<http://plab.phys.nagoya-u.ac.jp/member/ohsawa.html>

実験室および宇宙のプラズマにおける荷電粒子の加速は多くの研究者によって研究されてきている。本講演では私どものグループが粒子シミュレーションで研究してきた、磁場中の衝撃波による粒子加速について述べる。

相対論的な電磁粒子シミュレーションによって磁気音波衝撃波が様々な粒子（水素イオン、重イオン、電子、陽電子、および非熱的高エネルギー粒子など）を非統計的な機構で加速することが示されている（短いレビューとして [1]、およびその中の参考文献も参照）。衝撃波の中に形成される強い電場が少数の粒子に直接的にエネルギーを与えるのである（磁場が直接的にエネルギーを与えることは無いが、粒子の軌道に制限を与えることによって、粒子加速に強く関与する）。

衝撃波の波面では磁場と電位が急激に立ち上がり、それがイオン反射をもたらす。それらの粒子は高エネルギーとなる。外部磁場が比較的強く、電子のサイクロトロン周波数 ω_{ce} がプラズマ周波数 ω_{pe} より大きい場合、反射されたイオンは相対論的エネルギーを持つ。

プラズマ中に複数の異なる種類のイオンを含むとき、粒子加速、波動伝播、およびエネルギー輸送に様々な興味深い現象が生じる [2]。宇宙プラズマのように、水素イオンを主成分とし、重イオンをマイナーな副成分とするプラズマでは、衝撃波は水素イオンを上記の反射による機構で加速し、重イオンを横電場によって加速する。この機構では全ての重イオンが加速され、しかもそれらはほぼ同じスピードをもつ（最大速度は重イオンの種類によらない）。したがって、高エネルギー重イオンは（加速された場所の）背景プラズマと同じ組成をもつ。

磁場に対して斜めに伝播する衝撃波は電子をローレンツ因子 γ が 100 を超す様な超相対論的エネルギーに加速することができる [3]。この加速は ω_{ce} が ω_{pe} より大きいような比較的強磁場の場合に強く、特に、衝撃波速度 V_{sh} が $c \cos \theta$ に近いときに顕著である（ θ は外部磁場と伝播方向との間の角度）。

さらに、非定常的な衝撃波の中に生じた小パルスが電子を超相対論的エネルギーにまで加速し得ることが最近明らかになった [4]。この加速は ω_{ce} が ω_{pe} よりも小さいような弱磁場中でも働き、しかも、 V_{sh} が $c \cos \theta$ に近いという条件を必要としない。

これらの結果は、磁気音波衝撃波が 1 秒よりもずっと短い時間でイオンを相対論的エネルギーに、電子を超相対論的エネルギーに加速できることを示している。

非熱的な高エネルギーイオンは上記のものとは異なる別の機構によってさらに高いエネルギーへと加速される。文献 [5] に、テスト粒子が $\gamma=4$ から $\gamma=160$ に階段状に加速された例が報告されている。この機構においても V_{sh} が $c \cos \theta$ に近いという条件が満たされるときに特に強い加速が期待できる。文献 [5] での計算は、まず衝撃波の粒子シミュレーションによって電磁場の構造と強さを求め、衝撃波が定常的に伝わると仮定して、その電磁場の中のテスト粒子の軌道を追うものである。低いエネルギーならば粒子シミュレーションでもこの機構を見ることはできるが、ローレンツ因子が 100 を超えるような高エネルギーイオンの加速を見るのは現在の計算機能力では難しいので、テスト粒子の方法を用いた。

電子とイオンに加えて陽電子を含む 3 成分プラズマで、陽電子が強く加速されることも粒子シミュレーションで示された。この機構では、加速される陽電子は衝撃波の遷移領域に長く留まり、その電場からエネルギーを得るが、サーファトロン加速 [6] と異なり、粒子は磁力線とほぼ平行に動く [7]。文献 [7] では $\omega_{pe} t = 5000$ の粒子シミュレーションで陽電子が $\gamma=2000$ にまで加速されている。この加速は非常に安定で、衝撃波の波形が乱れて一時的に加速が停滞しても、波形の回復とともに、加速も回復することが観測されている。

講演ではそれぞれの機構に対する理論にも触れる。

[1] Y. Ohsawa, *Physica Scripta* T107, 32 (2004).

[2] M. Toida and Y. Ohsawa, *Solar Physics* 171, 161 (1997); M. Toida, T. Yoshiya, and Y. Ohsawa, *Phys. Plasmas* 12, 102306 (2005).

[3] N. Bessho and Y. Ohsawa, *Phys. Plasmas* 6, 3076 (1999); *ibid.* 9, 979 (2002).

[4] M. Sato, S. Miyahara, and Y. Ohsawa, *Phys. Plasmas* 12, 052308 (2005).

[5] S. Usami and Y. Ohsawa, *Phys. Plasmas* 9, 1069 (2002); *ibid.* 11, 3203 (2004).

[6] R. Z. Sagdeev and V. D. Shapiro, *JETP Lett.* 17, 279 (1973).

[7] H. Hasegawa, K. Kato, and Y. Ohsawa, *Phys. Plasmas* 12, 082306 (2005).