

## 準垂直衝撃波における電子加速効率の衝撃波角依存性

# 天野 孝伸 [1]; 星野 真弘 [2]

[1] 東大・理・地球惑星; [2] 東大・理・地球物理

## Effect of Shock Angle on the Electron Acceleration Efficiency in Quasi-Perpendicular Shocks

# Takanobu Amano[1]; Masahiro Hoshino[2]

[1] Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo; [2] Earth and Planetary Sci., Univ of Tokyo

The acceleration of electrons to high energies in various astrophysical environments (e.g. supernova remnants, active galactic nuclei, jets in active galaxies) is a problem of considerable interest in astrophysics. Recent advances of observational technique have revealed that most of high energy astrophysical objects are strong sources of X-rays and gamma-rays. Although these observations indicate the universal existence of nonthermal electrons, the physics of electron acceleration is poorly understood. Collisionless shocks are the most likely origins of these high energy particles, since diffusive shock acceleration (DSA) theory predicts a power-law energy spectrum which agrees well with observations. Therefore, collisionless shocks have attracted considerable attention for the production of energetic particles. For the DSA to work efficiently, however, the energies of accelerated particles should be much larger than the thermal plasma, since they are required to have sufficiently large velocity in order to be scattered back and forth across the shock for many times. This, the so-called injection problem, is the most serious obstacle for particle acceleration theory in collisionless shocks.

Recent computer simulation studies of collisionless high Mach number shocks have shown that energetic electrons can be generated by the electron surfing mechanism on a fairly fast time scale through the strong plasma instabilities excited in the shock transition region (e.g. Shimada and Hoshino 2000, Hoshino and Shimada 2002), although their work is restricted to purely perpendicular shocks.

Hence we have performed one dimensional electromagnetic particle-in-cell simulations of high Mach number quasi-perpendicular shock waves in order to extend their studies. The results show that energetic electrons are generated through the electron surfing process in quasi-perpendicular shocks as well as purely perpendicular cases. In addition to this, we have found energetic electrons escaping to the upstream direction with larger energies than those of surfing accelerated electrons seen in purely perpendicular shocks. Besides, their energies are larger than those of energetic electrons in the downstream. Consequently, this cannot be explained by the leakage from downstream. Thus energetic electrons are considered to be accelerated in the transition region, and preferentially reflected back to the upstream.

These results can be interpreted by the theory of drift acceleration (e.g. Wu 1984, Leroy and Mangeny 1984) combined with the surfing acceleration.

First the fraction of electrons are accelerated perpendicular to the magnetic field through the surfing acceleration at the leading edge of the transition region. Therefore their pitch angles approach to 90 degree. As a result, they are easily reflected by the mirror force around the magnetic overshoot. Since this reflection process itself is adiabatic, they are elastically scattered by the shock. Hence, they gain energy in the observers frame.

In the classical theory of drift acceleration, as the shock angle approaches to 90 degrees, the acceleration efficiency improves, whereas the number of accelerated particles is reduced. In contrast, our simulation results depict that the preacceleration perpendicular to the ambient magnetic field due to the surfing mechanism enhances the acceleration efficiency of the drift acceleration. Because of this, electron acceleration efficiency in high Mach number quasi-perpendicular shocks will be higher than expected from the theories of the surfing and drift acceleration.

宇宙空間の無衝突プラズマでは熱的分布からは大きく逸脱した非常に高エネルギーの粒子が満ちていることが古くから知られている。特に近年の観測技術の発展に伴い多くの高エネルギー天体は X 線やガンマ線などの強い放射源であることが分かってきた。これら X 線やガンマ線の観測は多くの天体において非熱的な高エネルギー粒子が普遍的に存在していることを意味する。これら高エネルギー粒子の加速源の候補として考えられているのが衝撃波である。衝撃波における粒子加速の最も有力な候補として考えられているのが Diffusive Shock Acceleration (DSA) モデルである。このメカニズムは観測されるエネルギースペクトルを自然に説明できる一方で、加速エンジンに入るためにはあらかじめ相対論的エネルギーを持っていなければならない、という欠点を持つ。これは「宇宙線の注入問題」と呼ばれ衝撃波における粒子加速理論の大きな問題となっている。

しかし近年のシミュレーション研究によって、Mach 数の大きな強い衝撃波では衝撃波遷移層において励起されるプラズマ不安定によって生じる大振幅波動によって一部の電子がサーフィン加速と呼ばれるメカニズムによって強い加速を受けることが分かってきた (e.g. Shimada and Hoshino 2000, Hoshino and Shimada 2002)。これまでの先行研究は衝撃波角が 90 度の垂直衝撃波のシミュレーションであったが、本研究では衝撃波角を 80 度にした準垂直衝撃波の 1 次元電磁粒子シミュレーションを行った。この結果、準垂直衝撃波においても 90 度の時と同様に衝撃波遷移層において電子サーフィン加速機構によって高エネルギー電子が生成されることが分かった。それに加えて準垂直衝撃波では垂直衝撃波の時には見られなかった高エネルギー電子の衝撃波上流への流出が見られ、しかもそれらのエネルギーは垂直衝撃波の場合に

サーフィン加速によって得られていたエネルギーよりも大きいことが分かった。また、これらの流出電子は下流で見られる高エネルギー電子よりもよりエネルギーが高いため下流からの洩れだしでは説明ができない。従ってこれらの電子は遷移層で加速された電子が選択的に反射したものと考えられ、次のようなプロセスで説明可能である。流出電子はまず衝撃波遷移層の先端において電子サーフィン加速によって非断熱的にエネルギーを得る。サーフィン加速によって電子は垂直方向にエネルギーを得るためこれらのピッチ角は90度に近くなる。従ってこれらの電子は磁場の圧縮比によって決まるロスコーン角の外に逃げ出し、overshoot付近でミラー効果によって反射される。この反射プロセスはほぼ断熱的であり、粒子は衝撃波によってほぼ弾性散乱を受ける。従って観測者系で見ると反射された粒子のエネルギーが増加することになる。

このミラー反射による加速はドリフト加速 (e.g. Wu 1984, Leroy and Mangeney 1984) と呼ばれ衝撃波での加速機構の一つとしてこれまでもよく議論されてきた。古典的なドリフト加速の理論では加速効率が衝撃波角が90度に近くなるほど良くなるが、同時に(ロスコーン角が広がるため)加速される粒子数も少なくなるのが問題となっていた。しかし、我々のシミュレーションは電子サーフィン加速機構によってあらかじめ電子を垂直方向に加速することで電子がロスコーンから抜け出し易くなり、古典理論よりもはるかに効率的に粒子が反射し得るということを示している。つまり高マッハ数の準垂直衝撃波においてはサーフィン加速やドリフト加速単体から予測されるよりも効率的に加速が起き、しかも加速された電子のみが選択的に上流に反射されるということが分かった。