

## 磁気流体波中での Proton 軌道の Chaos

日大・生産工 加藤 正 人

§0. 太陽を源として惑星間空間に延びている磁場の磁力線に沿った宇宙線の輸送の問題は、今までは主として“惑星間空間磁場の乱れ”によって宇宙線粒子が random walk をさせられる、という Fokker-Planck 的な描像で説明されてきた。しかし、

①  $v_{||} = 0$  では全く散乱しない、すなわち diffusion coefficient が 0.

② 磁場の乱れは white noise 的ではなく、長距離の相関を持った pink noise である。

といった矛盾や困難を内部に抱えていた。特に①の問題は深刻で様ざまの“非線形理論”をうみださせていた。

我々は、 $v_{||} = 0$  の場合の宇宙線の散乱は chaos が主役ではないかと考え、惑星間磁場を代表する Alfvén 波中で数値計算を試みた。その結果、直線偏波した正弦波で変化する磁場中での宇宙線 (proton) の運動は、時間変動を無視した場合、入江氏の軸対称ミラー磁場中の場合と本質的な差異はなく、KAM torus を伴った 2 自由度 chaos に帰着した。しかし磁場がわずかでも時間変化を伴うや否や事態は様が変わりし、Arnold diffusion? を生じはじめた。

## §1. 磁場の形態と粒子のハミルトニアン

話を簡単にするため、 $z$  方向には constant で  $x$  方向のみ正弦波で変化するような磁場を考える。すなわち、 $B_x = aB \cos kz$ ,  $B_y = 0$ ,  $B_z = B$ 。Vector potential は  $A_x = -B$ ,  $A_y = -(aB/k) \sin kz$ ,  $A_z = 0$  で表すことができるので、このような磁場 (図1) 中での Proton の Hamiltonian は、記述を簡単にするため proton の質量と電荷を共に 1 とすると、

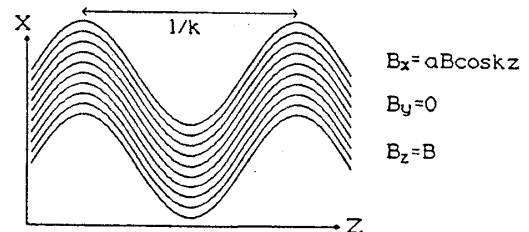


図1

$$H = \{P_z^2 + B^2 y^2 + (P_y + (aB/k) \sin kz)^2\} / 2$$

となる。ただし  $P_x (\text{const}) = 0$  と置く。今、磁力線にそった運動を考えるため正準変換を施し、新変数  $P_s = (P_z + ayB \cos kz)$ ,  $P_v = P_y + (aB/k) \sin kz$  を導入すると新たな Hamiltonian は、

$$H = \{P_v^2 + B^2 y^2 + (P_s - ayB \cos kz)^2\} / 2$$

と表される。変数は4個で、2自由度系の運動に落ち着くが、非線形であるため解析的に解くことはできない。

## §2. ポアンカレ マップ

そこで今  $P_y - z$  面を考え、 $y$  がその面を一側から+側に横切るときに '・' を打つことにする。なお、 $H$  は定数なので残りの変数  $P_y$  は独立変数とはならない。図2は、 $a=0.1$ ,  $B=0.8$  としたときの map (poincaré map) で  $H=E$  を 0.02 から 0.08 まで変えたものである。separatrix 近傍から stochastic な領域が形成されて行くが、 $E=0.04$  までは個々の separatrix 近傍にとどまっている。しかし、 $E=0.06$  を過ぎ 0.08 に達すると、個々の stochastic region は重なり合い、chaos と呼ぶにふさわしいものにまで成長する。また phase space の中ほどに形成された proton の mirror trap を引き起こす KAM torus はだんだんと小さくなって行くが、外側のものは比較的いつまでも残っている。このように、惑星間空間の磁場が乱れたものでなく単一な波数で形成された wave だとしても、その波数に対応した適当な energy を持った宇宙線(=proton)は散乱され、その結果 pitch angle も様々な値を持つようになる。なお円偏波した磁気流体波は場の強さの絶対値が不変であるため、荷電粒子の Hamiltonian は不安定平衡点を持たず当然 chaos も生じることはない。しかし磁場が時間的に変化するようになる、すなわち電場成分を持つようになると KAM torus は速やかに消失することも分かった。

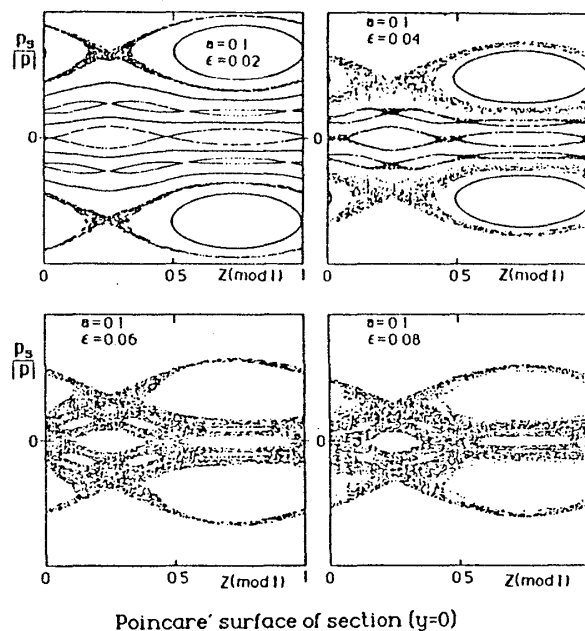


図2

## §3. Arnold Diffusion ?

現実問題としては、磁気流体波も多かれ少なかれ時間変動成分を持つ。磁場が時間変化をすれば当然電場が生じることになり、したがって proton の energy も constant というわけには行かなくなる。こうした場合、poincare map 上に描かれた chaos はどのように変化するのだろうか? Hamiltonian は、

$$H = [p_v^2 + B^2 y^2 + \{p_s - ayB \cos(Kz + Qt)\}^2] / 2$$

で、今  $K \gg Q$  として磁気 bottle のまんなか pitch 角  $90^\circ$  の proton を投入する。磁場が static な場合は、その点は安定な平衡点なので proton はそこで永久に施回運動を続ける。しかし今の場合  $K=1$  に対し  $Q$  がたとえ 0.00001 であっても proton は磁気 bottle を抜け出し、phase space 上をドットで埋めつくして行く。ただ本来 KAM torus が存在していたところは拡散的に広がって行くというよりは、いくつかの構造を持ったリングを形成していく感じである。この点の解釈に関しては、次の機会に委ねることにする。

## Reference

H. Irie: Journal of the Physical Society of Japan 54 (1985) 2883.

## マグノンにおけるカオスの実験

岡山大・理 山 寄 比登志

H. Suhl は 1957 年に大電力マイクロ波によるスピン波の不安定増大に関する論文<sup>1)</sup>の中で“この現象は Catastrophic に起こり、流体における乱流状態に類似している”と述べている。その後実験的にもマグノン数が周期的振動あるいは非周期的ノイズ状の振動を示すことが知られていたが、理論的解決をみないままになっていた。ところが最近これらの現象がスピン波間の非線形相互作用が原因で起こり、パラメトリック励起されたスピン波にカオスが発生することが理論・実験両面で明らかになって来た。

ここでは平行励起法によって強磁性体  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$  に発生したカオスの性質について報告する。強磁性共鳴では磁気モーメントに垂直方向にマイクロ波振動磁場を加えて波数が零のマグノンを励起するが、平行励起では磁気モーメントに平行方向にマイクロ波磁場を加えることによって周波数がマイクロ波の半分で、波数が  $+k$  と  $-k$  のマグノンつまり定在波を励起する。マイクロ波電力  $P$  がある threshold を越えるとマグノン数は緩和により減少するよりも励起される方が多くなり、かつある特定の波数のマグノン（以後  $k$  マグノンと呼ぶ）が増え始めるとその  $k$  マグノンのみが増え続けますエネルギーを効率よく吸収するので雪崩現象的に  $k$  マグノンのみが増え続けて熱平衡からずれて行く。その他の波数のマグノンはほぼ熱平衡状態