

プラズマ位相空間ホールのダイナミクス

Dynamics of Plasma Phase-Space Hole

佐伯 紘一 [1]
Koichi Saeki[1]

[1] 静岡大・理・物理
[1] Physics, Shizuoka Univ.

<http://www.jpgu.org/meeting/>

宇宙プラズマは、プラズマ密度が比較的低いため、無衝突プラズマとして扱える場合が多い。このためにエントロピーは保存され、位相空間（速度と位置）上の密度は保存される。したがって、常にマックスウェルの熱平衡分布が成立すると仮定した通常の電磁流体方程式からでは導くことの出来ないプラズマ現象が存在する。線形な現象における典型的な例がランダウ現象である。一方、非線形現象の典型的な例のひとつが位相空間ホール（位相空間渦）である。つまり、無衝突ゆえに位相空間において位相流体として振舞うことのできる自由度が与えられたために生じる現象である。ここでは、位相空間ホールの意義と、そのダイナミクスについて報告する。

中性流体が乱流を形成する時、中心的なユニットは渦である。渦は典型的な非線形現象であり複雑な振る舞いをする。多様なプラズマでは、その基本ユニットをひとつに決めるのは困難である。たとえば、プラズマの $E \times B$ 回転に伴う渦がある。この $E \times B$ 回転渦は中性流体中の渦と似ている。一方、無衝突プラズマにおいては、電位に捕捉された電荷が位相空間上を回転する、位相空間における渦が存在する。この時、その位相空間上の中心の密度は周りより低くなければならない。実空間上でも中心の密度は低く、位相空間ホールとも呼ばれる。この現象はソリトンのように非線形な波と捉えることは出来ない。したがって、静電孤立波（ESW）と呼ぶことは適当でないと思われる。

位相空間ホールは、まず、計算機実験によって示された。実験的には、我々が電子ホールを実験室で見出し、ついでジオテイル衛星により磁気圏尾部のプラズマ境界層で電子ホールが発見された。イオンホールも実験的に確認されている。

位相空間ホールのダイナミクスは、ファラデーカップを用いてイオン速度分布関数を測定することを通じてイオンホールの振る舞いを観測することにより理解できる。位相空間ホールは、イオンを局所的に電場を与えて加速することにより励起できる。加速された粒子の速度は、イオン音波速度より速くなければならない。遅い場合はイオン音波を励起することになる。粒子の速度が波の速度より速いために波として分散してしまうまでに、位相空間上の渦が形成される。また、位相空間ホールは、電子ビームやイオンビームによる二流体不安定性の非線形発展、衝撃波のプラズマ中へのパルス注入、不均一密度プラズマ中における電流導入の結果としても励起される。

たとえば、電子ビームが引き起こす乱流現象に着目すると、二流体不安定性を介して励起された大振幅の電子波動は、電子を捕捉する事により非線形的に成長し、デバイ長程度の長さを持つ電子位相空間ホール列を形成する。これは、BGK（Bernstein-Greene-Kruskal）モードと呼ばれる非線形解であり、位相空間ホール列の小振幅の極限が Van Kampen モードである。しかし、位相空間ホール列は、安定ではなく隣り合ったホールは次々に融合し、長時間安定な孤立した電子位相空間ホールを形成する。この融合現象より、位相空間ホールは、負の質量を持つ荷電粒子と見做すことができる。また、プラズマ中に電流を流せば、密度の不均一部分から孤立したイオン位相空間ホールが成長し、電子の流れを食い止める役目をする。これが、現在、最も信頼できるプラズマ異常抵抗のメカニズムであると考えられる。

位相空間ホールは、同様にデバイ長程度の長さを持ち、互いに衝突した後も個性を維持するソリトンとは全く逆に、互いに衝突することにより融合する特異な性質を持っている。しかしながら、ソリトンは多少、衝突があっても存在するため、実験的に観測しやすく注目を集めた。一方、位相空間ホールは、十分に無衝突である必要があるため、実験が難しい。しかし、近年、磁気圏尾部やオーロラ領域等の地球近傍の無衝突宇宙プラズマ中で、位相空間ホールが正負の電場パルス対として、多数観測されるようになった。さらに、宇宙プラズマの至るところ存在することが明らかになりつつあるため、位相空間ホールは、無衝突プラズマ乱流における基本ユニットとして再認識されつつある。

最後に、我々が考案した、波数-位相空間ダイアグラムを用いて、位相空間ホール、イオン音波ソリトン、シース等の存在領域を示す。線形の分散式よりダイアグラムを求めると、波数が実数の領域以外に、虚数の領域が存在する。実数は、波動伝播領域を示す。一方は、虚数は、位相速度で伝播する非線形局所構造解が存在する可能性のある領域を示す。実際にこの領域では上記の非線形解が存在する。同時に虚の波数は、非線形解の特徴的な長さをも示す。