

相対論的パラメトリック不安定性の流体近似による定式化

二階 辰彦 [1]; 天野 孝伸 [1]; 星野 真弘 [1]
[1] 東大・理

Formularization of relativistic parametric instability by fluid approximation

Tatsuhiko Nikai[1]; Takanobu Amano[1]; Masahiro Hoshino[1]
[1] University of Tokyo

The parametric instability in plasmas is a nonlinear phenomenon where normal waves of the system are coupled with a large-amplitude pump wave. If the wave is electromagnetic one, another electromagnetic, Langmuir or sound waves satisfying energy and momentum conservation laws may be excited as a result. The instability transfers the energy from transverse to longitudinal waves, which are subject to various dissipative processes.

Such a dissipation mechanism may be applicable to the so-called sigma problem of the Crab pulsar wind and its nebula.

Kennel & Coroniti (1984) constructed a magnetohydrodynamic (MHD) model assuming spherical symmetry, which indicates that there must be an efficient dissipation mechanism in the wind zone converting the dominant Poynting flux into particle kinetic energy flux. The dissipation may be explained by a parametric instability of a low-frequency electromagnetic wave driven by an obliquely rotating pulsar.

Motivated by this, numerical analysis of the parametric instability of a large-amplitude circularly polarized electromagnetic wave is conducted. The instability is analyzed assuming relativistic multi-fluid equations including a we allow finite temperature, a constant longitudinal magnetic field, and are valid for arbitrary amplitude of pump wave and number of particle species. For simplicity, we use relativistic fluid equations.

Basically, the pump electromagnetic wave decays into another electromagnetic and Langmuir or sound waves. In particular, we find a finite temperature correction reduces the growth rate of the instability due to an increased inertia of the particles.

If there exists a uniform and constant magnetic field, various decay processes appear which depends whether branch the pump wave is either on the light mode or Alfvén mode. We analyze these processes in detail and categorize them according to the decay type. We find that, in many cases, the maximum growth rate of the instability is of the same order of the frequency of the pump wave. Therefore, the dissipation through the parametric instability may be efficient enough to explain the required dissipation rate.

プラズマ中における「パラメトリック不安定性」は、系の基本波が外的な「励起波」により非線形に結合、発展してゆく現象である。例えばこの励起波が電磁波であるならば、エネルギー・運動量保存を満たしながら、異なる周波数/波数の電磁波に加えて Langmuir 波や音波が新たに励起されることになる。従ってパラメトリック不安定性は横波から縦波への変換過程とも見なせる。これは高エネルギー天体現象、また実験室におけるレーザー・プラズマ相互作用において、しばしば重要なエネルギー散逸過程となり得る。

特に天体物理学的応用例のひとつとして、超新星残骸の代表例である、かに星雲の「問題」が挙げられる。星雲の構造としては、Kennel&Coroniti(1984)らにより確立された標準モデルにより、中心星であるパルサーの斜め高速回転で電子-陽電子プラズマが生成され、これが波を伴い相対論的な流れ、パルサー風として吹き出し、ある地点で衝撃波を形成して下流側に星雲領域を作るものとして理解される。しかしながらパルサー風の伝播過程において、電磁場からプラズマ粒子への、高効率のエネルギー散逸が必要であることが分かっており、その具体的機構に関しては合意に至っていない。ここにおいて、パルサーの斜め回転により励起される何らかの低周波電磁波の存在を仮定し、これを励起波と考えれば、パラメトリック不安定性がエネルギー散逸を担う可能性がある。

以上のような動機に基づき、パラメトリック不安定性の数値解析を行う。多くの先行研究においては、冷たいプラズマの場合、イオンが無限に重い場合、一様定常磁場のない場合、励起波の振幅が小さい(相対論性が小さい)場合、等、様々な仮定が置かれているが、今回は 1. 流体温度を陽に扱い、2. 一様定常磁場の存在を許し、3. 励起波の振幅は任意、4. プラズマ粒子種の構成も任意である、として、出来る限り一般的に現象を扱うことが目標である。理論的解析にあたり、今回は簡単のため相対論的流体方程式系を用いるが、これには厳密な平衡解として円偏波電磁波が存在し、不安定を励起する。

基本的には先述のように、励起波としての電磁波は別の電磁波と Langmuir 波/音波とに崩壊するのであるが、最大の拡張である相対論的温度の導入の効果により慣性増大が起こり、不安定成長率は減少し、波数空間内の不安定領域も狭まる。また一様定常磁場が存在すれば、励起波が光波/Alfvén 波のいずれに属するかにも依存して様々な崩壊過程が現れる。これら崩壊過程を正確に分類した上で議論する。いずれにせよ多くの場合、不安定成長率の最大値は励起波の周波数と同程度の大きさであり、高効率で横波から縦波への変換が起こることが期待される。

現状では励起波に対する平行伝播モードの解析に留まっているが、斜め伝播モードへの拡張も視野に入れながら、粒子シミュレーション結果とも比較して議論したい。