

論文の内容の要旨

論文題目 \mathcal{V} Structure and State of Particle Systems
with Long-Range Interaction \mathcal{V}
(長距離相互作用粒子系の統計力学的研究)

氏名 鈴木 将

中・長距離相互作用する粒子系におけるダイナミクス熱平衡相図等について、計算機シミュレーション及び解析的手法を用いた研究を行った。特にクーロン力・重力といった長距離極限の相互作用系においては、熱平衡状態が存在せずさらにさらに熱力学的緩和が起こらないといった状況が存在しうるために、天体・プラズマ系において定常状態の構造や線形特性などの基本的性質に関する未解決の問題が残されている。また、熱力学的な取り扱いが可能な場合においても、荷電コロイド系・electro rheological 流体・双極子相互作用系等のように多成分系であることまたは2体ポテンシャルが異方的であることが問題になる場合、その熱力学相図・相転移は単純粒子系に比べて格段に複雑になり興味深い。

そのような問題点のうち主に二つのテーマについて研究を進めてきた。一つには重力系の一例としてディスク銀河状の天体の上での重力密度波によるパターン形成に関して。もう一つは双極子相互作用系の一例として Ising 型双極子粒子系の凝集ダイナミクス及び相転移に関してである。

1 回転ディスク銀河上のパターン形成

所謂回転ディスク銀河は回転の遠心力と自己重力によりほぼ定常状態にある天体であり、主に重力多体粒子（恒星）および星間ガスから成る。多くの銀河に観測されている渦巻状の構造は、それらの重力相互作用による密度の疎密波の伝搬として広く理解されてきた。しかしながら、とくに重力多体粒子に関しては粒子数の大きな極限で無衝突に漸近して局所熱平衡が全く成り立たないために、Vlasov 方程式による記述は可能であるが、通常の気体のような流体方程式におとして扱うことが出来ない。このため解析的には線形近似の範囲でも、銀河上を伝搬する波の分散関係の導出にも困難が伴い、さらに非線形ダイナミクスに関してはほぼ未解明な現状がある。

一方計算機シミュレーションにおいても典型的な銀河は $N \sim 10^9 - 10^{10}$ の粒子数から構成されるために単純な粒子動力学シミュレーションでは膨大なコストを要する。そこで、各粒子の運動方程式の構造は壊さないまま波の伝搬できる方向の自由度のみを一次元方向に限定することを意図して棒状の粒子モデルを考案し、このシミュレーションを行った。これは注目される渦巻状パターンが径の十分大きな領域ではほぼ一次元的な波面と見なせることを想定しての取り扱いである。このモデルにおいて各モードの安定・不安定条件等解析的に厳密解の存在する問題点に関して、通常の重力多体系としての特性を再現したことはもちろんのこと、精度の高い分散関係曲線を直接に評価することにも成功した。また、ある限定された条件下において解析的に予想されていた包絡ソリトン解で記述される非線形構造についても、その存在が検証された。

ここでは先行する理論的研究との相互評価のしやすい問題について主に取り扱ってきたが、上記のようなモデル化によって通常の粒子ダイナミクスに比べて非常に効率のよいシミュレーションが可能になり、長距離相互作用多体系の非線形構造形成を解明するための先駆的な方法になりうると考える。

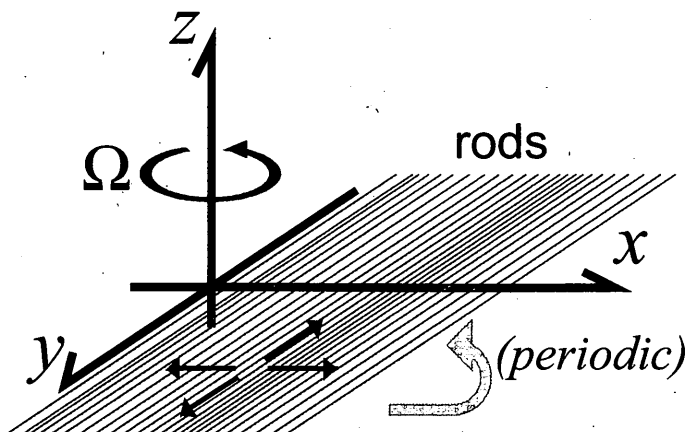


図 1: 棒状粒子による計算機シミュレーション

2 Ising 型二成分双極子相互作用粒子系

Ising 型の大極子粒子系は、その二体間ポテンシャルが

$$\Phi(r_{ij}) = \Phi_{\text{core}}(r_{ij}) + \frac{\mu_i \mu_j}{r^3} \quad (1)$$

と書ける Ising 型の大極子系（二次元、以下 IDP と呼ぶ。Φ_{core} はコアポテンシャル、μ_i, μ_j = μ₀ or -μ₀）であり、通常の大極子系で問題となる、モーメント方向の自由度に起因したポテンシャルの異方性を排除し、2 体間では等方的であるものの、2 成分間のフラストレーションにより、複雑多様な構造形成をみせることは、特に零度での凝集にかんしてはすでに実験・シミュレーション双方から明らかにされてきた。そこで本研究ではこの系の有限温度での振る舞いの解明を目指した。まず、低温で小さな熱揺動を受ける状況下での凝集過程に関して、その構造とダイナミクスを明らかにした。温度に依存して形成過程のクラスターのフラクタル次元、またこれに伴いダイナミクス（動的臨界指数）が段階的に変化する。これらは Smoluchowski 方程式の時間発展との対応も評価することで引力律則凝集・拡散律則凝集・hetero-aggregation 等クラスの異なる凝集過程を段階的に遷移することが示された。これは二成分系であるために、有限サイズクラスターに多様な準安定構造が存在することに起因していた。

次に相転移に関して、IDP のシミュレーションに対する臨界スケーリングにより気液臨界点は評価しうるものの、その温度が凝固点よりも僅かに低温側にあるり、したがって純粋な液相が存在

しないことを見出した。この点は解析的手法によっても解釈を試みた。通常の Mayer-Mayer 展開によるビリアル係数の評価ではそのような相転移は容易には再現しなかったものの、シミュレーションにおいて臨界クラスター内部に局所的には 4 回対称の特徴的な構造が成長していることを見出し、それを考慮した四量体の存在を仮定した上での改良型の Mayer-Mayer 展開を提案することでこの相転移を再現することに成功した。つまり、臨界点近傍での局所構造と固体秩序の間に類似性を持つために臨界温度・凝固温度双方が異常に近接していることを示唆していた。

上で示したように、単純なポテンシャルモデルでありながら二成分系であるために局所的に特徴的なクラスター構造が形成されやすく、それらのクラスター間で構造型分子にも類似した相互作用が起こり得る。さらに本文中では、二者のモーメント比等のパラメータの設定によりその構造を連続的に変化させることが出来、それに伴って相転移現象が制御されることも示した。

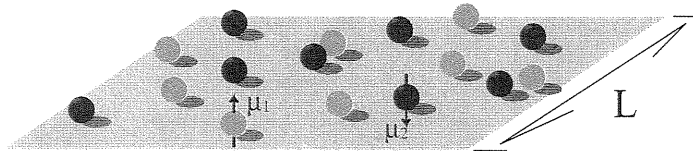


図 2: Ising 型二成分双極子粒子モデル