

ソフトマターとしての強結合プラズマ Strongly Coupled Plasmas as Soft Matter

東辻 浩夫¹

Hiroo Totsuji

岡山大学工学部, 700-8530 岡山市津島中 3-1-1

1 序

プラズマの結合度は、平均粒子間距離 a における Coulomb 相互作用 e^2/a と熱エネルギーの比であり、古典的な場合には $k_B T$ を用いて $\Gamma = (e^2/a)/k_B T$ と定義し、縮退している場合には Fermi エネルギー E_F により $0.543r_s = (e^2/a)/E_F$ と定義する。古典と縮退を分ける線は $k_B T = E_F$ である。古典領域では $\Gamma > 1$ のとき強結合であり、180 程度を越えると固体になる。縮退領域では $r_s > 1$ のとき強結合であり、150 程度を越えると固体になる。強結合プラズマについて、これまでの研究の一部と最近の話題を提供し、ソフトマターとしての側面があることと、ソフトマター研究に役立つ可能性があることを紹介したい。

2 クーロンクラスター

古典強結合プラズマとして、最近、注目されているのは、イオントラップに閉じ込められたイオンのつくるクラスターである [1]。イオンの内部自由度を利用して mK 程度以下の冷却が可能で、強結合となる（しかし、縮退はしない）。トラップは実効的に一様密度の反対符号電荷の存在と同じ効果をもつので、イオンの電荷は一種類（同符号）でも安定に閉じ込め得る（したがって、非中性プラズマと呼ばれることもある）。一種類の電荷からなる系を一成成分プラズマ (One-Component Plasma, OCP) と呼ぶ [2]。

この系の基底状態は無限系であれば bcc 格子であるが、有限系では、粒子数がある値より小さいときには、基底状態は系の形状と妥協せざるを得ない [3]。この臨界値は 10^4 より少し大きい程度であることが分かった [4]。

3 ダストプラズマ

古典強結合プラズマの最近のもう一つの例はダストプラズマである [5]。ダストプラズマは 1eV 程度のプラズマと低温の $1\mu\text{m}$ 程度の大きさの巨視的粒子（以下、粒子）の電氣的に中性な混合物である。粒子は電子の 10^4 倍程度に負に帯電するため、粒子の密度はそれほど高くないが強結合となっている。

ダストプラズマでは、粒子の電荷は周りのプラズマによって遮蔽される。簡単な近似では Debye-Huckel 型の遮蔽を受け、粒子間には Yukawa 型の相互作用が働くとみなせる。ただし、粒子が存在するのはシースと呼ばれる領域であり、イオンの定常的な流れがある。このため、粒子間の相互作用は厳密には等方的ではない。

¹totsuji@elec.okayama-u.ac.jp

粒子の軌跡などが容易に記録できるので、古典強結合プラズマのさまざまな現象が観測されている。静的な性質では、構造の形成が一つの興味の中心である。地上では巨視的粒子に大きな重力が働くため、構造は基本的に重力の方向を法線とする面がつくる層となる。シース領域の電場と重力場のつりあいでは粒子は存在している。つりあい点付近に粒子が多数あるとき、粒子のつくる構造は粒子間の強い相関の結果生じる結合エネルギー (cohesive energy) に基づいて理解できる [6]。

粒子間に働く力を観測する実験が行われている。イオンの流れがあるために、力は流れに垂直な方向と流れに沿う方向とで異なる。流れに垂直な方向には、多くは Yukawa 型の斥力であるという結論を得ている。一方、流れに沿う方向には、非対称な引力が働く。この力は、ときには、多数の粒子を数珠のように一列に並べることもある。

微小重力の下での実験で、粒子の存在しない領域 (void) が観測され、原因が議論されている [7]。温度の不均一による力、あるいは、イオンの流れから働く力による説明と、熱力学に基づく説明がある。

4 量子系への応用

古典強結合プラズマに対しては、積分方程式に基づく理論が発展している。中でも、クラスター展開におけるブリッジ関数を例えば剛体系のものの形に仮定し、充填率を自己無撞着に決める方法 (Modified HNC, MHNC) が有力である。これを利用した量子系へのアプローチが最近提案された [8]。有限温度の量子系は、未だに数値実験が困難であり、一つの方法として有効であるように思える。具体的には、 $T = 0$ の量子系と $T = T_q > 0$ の古典系を対応させ、有限温度の場合には $T_c = (T_q^2 + T^2)^{1/2}$ の古典系に対応させるというものである。

参考文献

- [1] 広範なレビューとして, D. H. E. Dubin and T. M. O'Neil, Rev. Mod. Phys. **71**, 87(1999).
- [2] *Non-Neutral Plasma Physics IV*, eds. F. Anderegg, L. Schweikhard, C. F. Driscoll (AIP, New York, 2002).
- [3] 例えば, W. M. Itano, J. J. Bollinger, J. N. Tan et al, Science **279**, 686(1998).
- [4] H. Totsuji, T. Kishimoto, C. Totsuji, and K. Tsuruta, Phys. Rev. Lett. **88**, 125002(2002).
- [5] *Dusty Plasmas in the New Millennium; 3rd International Conference on the Physics of dusty Plasmas*, eds. R. Bharuthram, M. A. Hellberg, P. K. Shukla et al. (AIP, New York, 2002).
- [6] H. Totsuji, T. Kishimoto, and C. Totsuji, Phys. Rev. Lett. **78**, 3113(1997). H. Totsuji, C. Totsuji, and K. Tsuruta, Phys. Rev. E **64**, 066402(2001). G. A. Hebner, M. E. Riley, D. S. Johnson et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 235001(2001).
- [7] G. E. Morfill, H. M. Thomas, U. Konopka et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 1598(1999).
- [8] M. W. C. Dharma-wardana and F. Perrot, Phys. Rev. Lett. **84**, 959(2000). F. Perrot and M. W. C. Dharma-wardana, Phys. Rev. Lett. **87**, 206404(2001). M. W. C. Dharma-wardana and F. Perrot, Phys. Rev. Lett. **90**, 136601(2003).