S606

分子動力学専用計算機 MDGRAPE-2 を用いた プラズマ渦のシミュレーション

Vortex dynamics traced by a special-purpose computer, MDGRAPE-2

八柳祐一
京都大学大学院人間環境学研究科
YATSUYANAGI Yuichi
Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

軸方向に強磁場がかけられている円筒導体容器内に閉じ込められた電子群の，磁場に垂直な 2 次元平面内での運動を記述する方程式は，ラーマー半径＝ 0 の極限で 2 次元非圧縮性理想流体に対するオイラー方程式に一致することが知られている [1]。すなわち，点電荷の集団である 2 次元クーロン気体は，点渦の集団と見なすことが可能であり，そのダイナミクスは渦度方程式により決定される。

今回我々は，Onsager が提唱した渦糸系の統計力学 [2] に注目し，円筒境界内に閉じ込められた等しい強さの正負の点渦群が共存する系で観測される負温度状態について研究を行った [3]。系の温度を T, エネルギーを E, 状態数を $W(E)$, エントロピーを $S = \ln W(E)$ とする。円筒境界に囲まれているため，系の全相空間体積は有限となり，$dS / dE = 0$ となるエネルギー E_c よりも大きなエネルギー領域において，

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dE} = \frac{1}{W(E)}\frac{dW(E)}{dE} < 0$$

すなわち，T ＜ 0 となる。

まず，我々は，系の (初期) エネルギーから温度を決定するために，状態数をシミュレーションにより求めた。半径 R の円筒境界内に，3362 個ずつの正負の点渦をランダムにばらまき，系のエネルギーと慣性モーメントを求める。この 1 回の試行により，1 つの状態を決定することが可能である。これを合計 1000 万回繰り返し，状態数の分布を求めた。ハミルトニアンを 1 回計算するのには，$O(n^2)$ の時間計算量を要するため，我々はこの部分に分子動力学専用計算機 MDGRAPE-2 を用いて高速化した。MDGRAPE-2 では，いわゆるグリーン関数にあたる部分をソフトウェア的に書き換えることが可能である。よって，GRAPE ファミリーの売りである $1/r^2$ の和だけでなく，$\log r$ の加算を高速に行える点が，今回非常に役に立った。

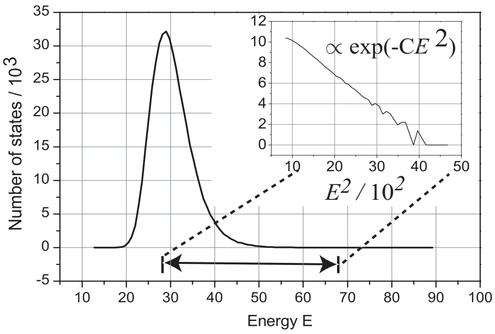

図1　慣性モーメントが0の場合の状態数

状態数を求めた結果を図 1 に示す。この図より，状態数は $E = 29 (= E_c)$ で最大となることがわかる。よって，系の初期エネルギー (粘性を無視しているので定数) が E_c よりも大きい時，系の温度は負となる。また，E_c よりも大きなエネルギーの領域について回帰分析を行い，状態数のエネルギー依存性を調べてみたところ，$E \propto T^{-1}$ であることがわかった。これは，正温度での理想気体の場合 ($E \propto T$) と全く異なる傾向があることを示している。

また，負温度状態の系の時間発展を実際に追跡した結果からは，

(1)　同符号の点渦群は凝集する傾向がある
(2)　凝集する点渦群のエネルギーは高くなる一方，凝集できず背景に散らばった点渦群のエネルギーは相対的に下がり，トータルとして系のエネルギーを保存する

ことがわかった。

なお，本研究は，際本泰士 (京大人環)，冨田博之 (京大人環)，佐野光貞 (京大人環)，吉田剛 (京大人環)，戎崎俊一 (理研) らとの共同研究として進められた。

[1] たとえば，際本泰士：プラズマ・核融合学会誌 77, 338 (2001).
[2] L. Onsager: Nuovo Cimento Suppl. 6, 747 (1949).
[3] Y. Yatsuyanagi, Y. Kiwamoto, H. Tomita, M. M. Sano, T. Yoshida and T. Ebisuzaki: Submitted to Phys. Rev. Lett.