

# 衝突熱緩和により形成されるラジカル軽原子の非熱的速度分布関数 Velocity Distribution of Light Radical Atoms Developed through Collisional Thermalization

藤井恵介、今野淳、Arseniy Kuzmin、四竈泰一、蓮尾昌裕

Keisuke Fujii, Jun Imano, Arseniy Kuzmin, Taiichi Shikama, Masahiro Hasuo

京都大学 工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

高エネルギー粒子が流入し、そのエネルギーが衝突により他の粒子に分配されながら散逸していく系は様々な領域に存在する。例えばプラズマ中のラジカル原子には、Frank-Condon 過程による高エネルギー粒子の流入過程と、壁面や他粒子との衝突によるエネルギー散逸過程があり、それらのバランスにより定常状態のエネルギー分布が決まっている。統計物理分野の粉体のダイナミクスについても類似の系が議論されてきた [1]。しかし、この非平衡な系に関する統計的な性質はほとんど明らかにされていない。本研究では衝突による熱化を、確率変数に対する帰納式としてモデル化することで、エネルギー散逸のある衝突熱緩和過程における定常エネルギー分布の近似解を求めた。

簡単のため、一様・等方的に分布する粒子の衝突を考える。衝突する2つ粒子のエネルギー  $E_1, E_2$  は、エネルギー分布関数  $f(E)$  からのサンプルと見ることができであろう。衝突後は、この合計エネルギー  $E_1 + E_2$  が2つの粒子に分配される。分配割合を  $u \in [0, 1]$  とすると、衝突後の粒子のエネルギー  $E'$  は

$$E' = (E_1 + E_2)u \quad (1)$$

とモデル化できる。ここで、 $u$  は  $p(u)$  に従う確率変数である。定常状態では、 $E'$  も  $f(E)$  に従うことになる。

エネルギー散逸のない系では、 $u$  と  $(1-u)$  は同じ確率分布に従うため、 $p(u)$  は  $u = 1/2$  に対して対称的な形状になる。一方でエネルギー散逸がある場合、 $p(u)$  は  $u = 0$  の方向に歪んだ形状となるであろう。具体的には、エネルギー損失が小さい場合

$$p(u) = \frac{\alpha}{B(\nu, \nu)} u^{\alpha\nu-1} (1-u^\alpha)^{\nu-1}, \quad (2)$$

で近似できる。ここで、 $\alpha \leq 1$  は分布の歪みを表す安定性パラメータである。式 (1), (2) を満たす分布関数は一般化 Mittag-Leffler 分布であり、そのラプラス変換は  $\mathcal{L}_f(s) = \int_0^\infty f(E) e^{-sE} dE = [1 + (\epsilon_0 s)^\alpha]^{-\nu}$  で

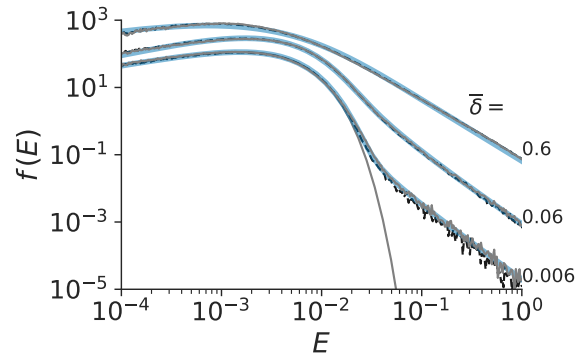


Fig. 1: 衝突熱緩和により形成されるプラズマ中ラジカル原子の定常エネルギー分布のシミュレーション結果。太線は一般化 Mittag-Leffler 分布による最良近似を示す。

ある。なお、 $\alpha, \nu$  は、同粒子との衝突1回あたりに起こるエネルギー損失割合  $\bar{\delta}$  を用いて以下のように表すことができる。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \bar{\delta}/\log 2}, \quad \nu = \frac{5/3}{\alpha^2 + (1-\alpha)^2(5/3)}. \quad (3)$$

我々は Monte-Carlo シミュレーションにより、高エネルギー原子流入とエネルギー散逸がある下でのプラズマ中ラジカル原子の定常エネルギー分布を求めた。複数のエネルギー散逸割合  $\bar{\delta}$  の下で計算した結果を図に示す。エネルギー散逸が小さいときは、Maxwell 分布 (図中細線) に近いエネルギー分布になり、べき乗の高エネルギー裾を持つ。一方でエネルギー散逸が大きい時は、低エネルギー領域も Maxwell 分布から解離することがわかる。図中太線に、一般化 Mittag-Leffler 分布による最良近似を示すが、定常エネルギー分布を非常によく表している。

なお講演では、実験観測で得られたプラズマ中水素原子の速度分布との比較についても述べる。

[1] E. Ben-Naim and J. Machta, *Phys. Rev. Lett* **13**, 138001 (2005).