非加法的統計力学に基づく非平衡励起状態分布の示す 「温度」の再検討

赤塚 洋¹, 菊池 浩司¹

¹ 東京科学大

<https://akatsuka.zc.iir.titech.ac.jp/>

衝突輻射 (CR) モデルを適用すれば、第 i 準位の励起状態数密度 N_i ($i \geq 2$) を、電子温度 T_e 及び密度 N_e 並びに原子基底状態の数密度 N_1 を入力として計算することができる。ただし、励起状態分布は一般に Boltzmann 分布には従わない。そのような非平衡状態に対しても、統計力学的には、エントロピー S と内部エネルギー U を用いれば、

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial U} \quad (1)$$

として、励起状態分布の温度 T を定義できる可能性があると考えられ、そのような非平衡状態での適切な温度の定義を探るような理論的考察を我々は行なってきた [1-2]。すなわち、Boltzmann エントロピーの適用が許されるのであれば、状態 i の存在確率 $p_i = N_i / (\sum_i N_i)$ を用いて

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i, \quad (2)$$

および各準位の励起エネルギーを E_i としてその総和として与えられる原子系の内部 (= 励起) エネルギー

$$U = \sum_i E_i \quad (3)$$

から S, U を求め、適切な制約条件 (全原子数が一定、など) のもとで式 (1) を適用して温度が導出できる [2]。しかし、この計算においてはエントロピー最大化の原理が適用されるべきにもかかわらず、その点は考慮されていないので、理論の修正が必要である。そこで、Tsallis あるいは Rényi のエントロピーなど、定義されたエントロピーがエネルギー一定など各種の制約条件のもとで最大となることが担保されている非加法的エントロピーが有力候補となる。

我々は、水素プラズマ中の励起状態密度分布に着目して、その Tsallis エントロピーから新たに定義される各種の温度について計算し、巨視的な意味で理解される「各種温度」と、エントロピーを用いて偏微分計算から導出される「統計力学的温度」の関係を検討したので [3-5]、本研究会にて講演し紹介したい。

[謝辞] 本研究は JSPS 科研費 22K03566 の助成を受けたものである。記して謝意を表する。

[1] 田中 昌徳, 赤塚 洋, Plasma Conference 2014 オンライン予稿集, 21PA-039 (2014).

[2] H. Akatsuka and Y. Tanaka, Entropy, **25**, [2], 276 (2023).

[3] K. Kikuchi and H. Akatsuka, APS March Meeting, L60-0206 (2018).

[4] 菊池 浩司, 赤塚 洋, 日本物理学会 第 73 回年次大会 講演概要集, 23pK601-5 (2018).

[5] K. Kikuchi and H. Akatsuka, Entropy, **25**, [10], 1400 (2023).