

モンテカルロ法を用いた衝突輻射モデルの計算手法  
**A new calculation of CR-model based on Monte-Carlo method**

<sup>1</sup>佐々木明, <sup>2</sup>村上泉, <sup>2</sup>加藤太治, <sup>3</sup>藤井恵介, <sup>4</sup>リチャードモア  
 Akira Sasaki, Izumi Murakami, Daiji Kato, Keisuke Fujii, Richard More  
 量研, 核融合研, 京大, RMore物理研  
 QST, nifs, Kyoto Univ. RMorePhysics

プラズマの原子過程を扱う衝突輻射モデル (CR モデル) は、プラズマが放つ光や X 線の強度、スペクトルを求めるために用いられている。すなわち、プラズマ中に存在するエネルギーレベルについて、電子衝突、輻射による励起や電離の過程を考慮し、レート方程式を立てて解き、プラズマの温度、密度などの条件に対するイオンアバンドランス、レベルポピュレーションの計算が行われている。

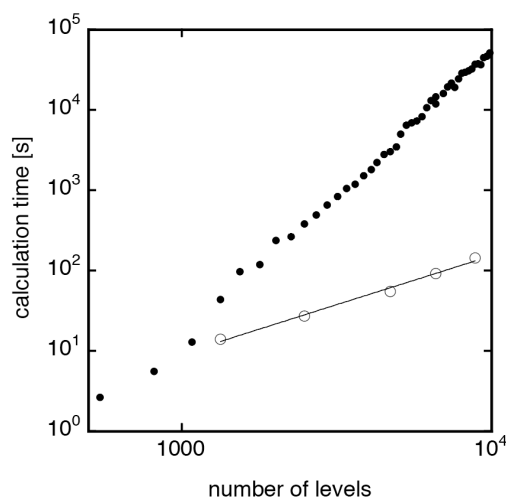
近年、シミュレーションで求めたレートのデータを用いて[1]、タングステン (W) などの高 Z 多価電離イオンの CR モデルが研究されている。これらのイオンでは多重、内殻励起状態を経た二電子性再結合が重要であり、イオン当たり 1,000 個を超えるレベルを含む大規模なモデルが用いられる[2,3]。

CR モデルの解法は連立一次方程式の解法に帰着する。安定で正確な直接法を用いると、計算に必要な時間はレベル数の三乗に比例して増えるので、高 Z 多価電離イオンの計算はこれまで困難であった。

定常状態における CR モデルを表す連立一次方程式では、ある状態から別の状態への遷移を表す係数行列の要素が全て正の実数である。すると、Peron-Frobenius の定理により、反復法で解けることが保証される[5]。そして、ポピュレーションはマルコフ連鎖で決まることに注目すると、個々の粒子の状態変化を追跡することでレート方程式を解くことができると考えられる[4]。すなわち、はじめに原子を適当な初期状態に置き、与えられた温度、密度における寿命を評価し、寿命が経過したら、次に遷移する先の状態を乱数を用いて決めるといった操作を繰り返し、経過時間に対する各状態への滞在時間からポピュレーションを求める方法を考えた。

核融合プラズマに当たる電子温度 2 keV、電子密度  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  の条件で、W イオンのポピュレーションの計算を行ったところ、結果は、従来手

法での結果と良く一致した。次に、モデルに取り入れるレベルの数を変えて計算時間の評価を行ったところ、(図1) に示す結果が得られた。提案手法による計算の時間はレベル数の 1.2 乗に比例し、レベル数が  $10^{14}$  個の場合には従来手法の 1/100 の時間で計算ができた。このように計算が高速化された理由は、W イオンには極めて多くのレベルが存在するが、そのうち大きなポピュレーションを持つレベルは、基底状態、準安定状態など、ごくわずかしかなることによる。



(図1) 従来手法(●)と提案手法(○)によるCRモデルの計算時間のレベル数に対する依存性。

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金 (16H04623, 18H01201) と核融合研共同研究の補助を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] A. Bar-Shalom, et al. JQSRT **71**, 169 (2001).
- [2] A. Sasaki, HEDP, **9**, 325 (2013).
- [3] A. Sasaki, et al. J. Phys. **B46**, 175701 (2013).
- [4] R. More, J. Phys. Conf. Ser. **454**, 012027 (2013).
- [5] 例えば田崎晴明「数学」(暫定版)2018年.