

シリーズ

「宇宙と原子」

第四回 イオンと電子の再結合

ー宇宙には壁がない。再結合の仕方に工夫が必要ー

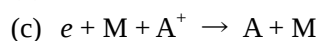
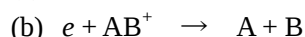
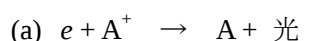
市川行和

yukitikawa@nifty.com

平成 24 年 8 月 27 日原稿受付

宇宙の大部分はプラズマ(電離気体)状態になっている。ただその電離度はさまざまで、きわめて低い(星間分子雲では 10^{-8} 程度)ところから、ほぼ 100 % になっているところまである。宇宙にあるイオンは主として二つの方法、すなわち①粒子衝突、または②光吸収で生成される。主流は光吸収(なにしろ光源は”星の数ほど“ある)だが、光はいったんイオン化を起こすと吸収されてそこから先へは届かない。ある程度密度の高い天体に外から光が当たってイオン化が起こるときには、その天体の中の方ではイオンができない。しかし宇宙には宇宙線(主として高エネルギーの陽子)が遍在しており、密度の高い星間雲などではこれによる電離が主となる。もちろん高温のプラズマでは電子衝突が電離の主流である。

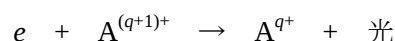
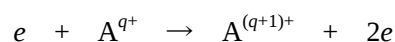
出来たイオンは自由電子と再結合して消える。その過程としては



(M は電子, 原子分子, 固体表面)

がある。地上の実験室では多くの場合、3 体衝突 (c) によりイオンは消える。しかも M は容器の壁や電極である。ただし、分子イオンの場合は解離性再結合 (b) が効率が良い。宇宙では密度が低いので 2 体衝突が主流で、(a) または (b) が起こる。特に原子イオンの場合は、光を出して再結合する放射再結合 (a) が主となる。そこで以下話を (a) に限ることにする。(b) も重要であるが文献を紹介するにとどめる [1]。

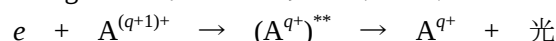
高温プラズマ中の多価イオンの生成・消滅を考える。イオンの生成は電子衝突によるとし、



をあらゆる価数のイオン A^{q+} について考え、そのつり合い(電離平衡)からイオンの価数分布を決めることができる。これによれば、プラズマの温度(正しくは電子温度)を決めると、どのような価数のイオンが最も多く存在するかがわかる。逆にどのイオンが多いかを観測で決めれば、プラズマの温度が決まる。これはプラズマの温度を知るもっとも簡便な方法である。このようにして太陽コロナの温度を決め、それが数百万度であることを初めて示したのは日本の天文学者宮本正太郎 [2] であった。第二次大戦中のことである。

1964 年 Seaton [3] は太陽コロナのスペクトルについて当時の成果をまとめた論文を書いている。その中で、鉄のイオンについて電離平衡の計算を行った。それによると、スペクトル線が観測されている Fe^{13+} の存在が最大になるのは電子温度(T_e)が $1.1 \times 10^6 \text{ K}$ であった。一方、スペクトル線のドップラー幅からそれを放出するイオンの熱運動の程度がわかり、イオンの温度(T_i)は $2.5 \times 10^6 \text{ K}$ と求められた。 T_e と T_i は必ずしも同じである必要はないが、その場合には違う理由を探さねばならない。Seaton はイオンが巨視的に運動(流れ)しているとした。それに対して Burgess は、以前から指摘されていた共鳴状態を経由する放射再結合を考慮することでこの問題を解決できると考えた。それにより再結合が増加し、つり合いをとるためには電離も増えなければならず、平衡温度は高くなければならない。

Burgess が考えたのは次のような過程である



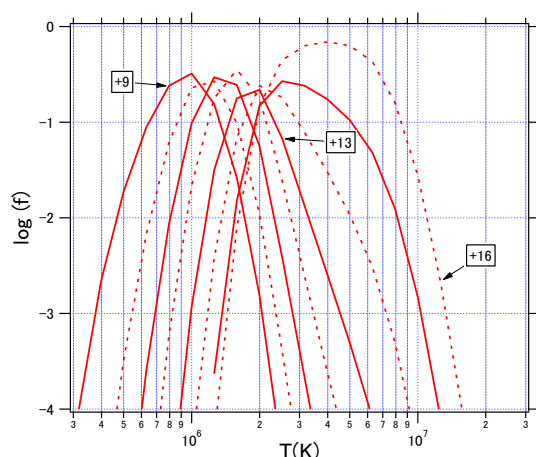


図 1: 文献 [5] で計算されている鉄イオンの分布 (対数目盛)を, 9 価から 16 価まで図にしたもの. 見やすいように実線と点線を交互に使ってある. 横軸は電子温度.

中間の状態 (A^{q+})** は, たとえば $A^{(q+1)+}$ の励起状態に電子が 1 個捕まてできる 2 電子励起状態で, エネルギー的に不安定で寿命が有限である. 入射電子のエネルギーがある特定の値のときにこのような共鳴過程が実現し, 一般に再結合が加速される. この再結合は放射再結合の一種であるが, 少なくとも 2 個の電子がその状態を変える必要があるので, 特に「2 電子性再結合 (Dielectronic Recombination, DR)」と呼ばれている. Burgess [4] は簡単な計算で Fe^{13+} について DR を見積もった. それを考慮すると Fe^{13+} が最大になる電子温度は約 2 倍に大きくなった. 図 1 は最近の電離平衡の計算結果 [5] である. これによると, Fe^{13+} の割合が最大になる電子温度は $2 \times 10^6 \text{ K}$ である, 現在ではプラズマ中の DR の寄与は確立されており, それなしでは電離平衡を議論することはできない. 宇宙プラズマにおける研究がきっかけとなって新しく見出された原子過程の一つである.

このように DR はプラズマ(特に, 高温・低密度のプラズマ)中のイオンの振る舞いを知るには不可欠である. しかし, 実験で定量的に調べることは困難であった. 1990 年に書かれたプラズマ中の原子過程についての解説 [6] でも「DR は本質的に共鳴過程であり, 入射電子のエネルギーや中間状態の性質にきわめて敏感に依存する. 物理的な興味から理論的・実験的な研究が多数

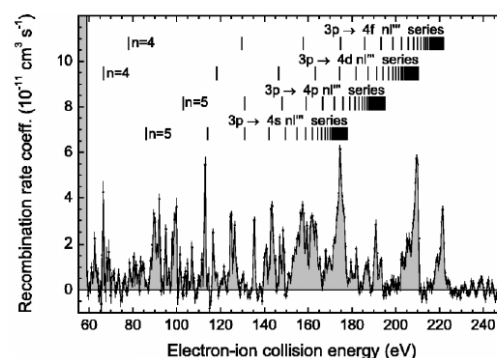
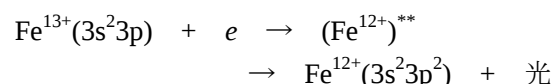


図 2: Fe^{13+} の再結合係数. イオン蓄積リング TSR による測定値, 共鳴準位の位置を縦線で示してある. 文献 [8] よりアメリカ天文学会の許可を得て転載.

行われているが, 実用に耐える信頼度の高いデータを取得するまでにはまだいたっていない」と記されている. しかしイオン蓄積リングが使えるようになって事態は大きく改善された [7]. すなわちイオン蓄積リングを使うことで高感度・高分解能の測定が可能となり, DR 速度係数の定量的なデータが手に入るようになったのである. 以下, 最近の例を紹介する.

次のような DR 過程を考える.



上記のように(図 1) Fe^{13+} の割合が最大となるのは電子温度が $2 \times 10^6 \text{ K}$ ($= 172 \text{ eV}$) のときである. そこで数百 eV の電子による衝突が重要となる. Schmidt ら [8] はハイデルベルクにあるイオン蓄積リング TSR を用いて実験を行った. 図 2 には電子エネルギーが 60 – 240 eV の場合の結果が示されている.

これらは共鳴状態 $3s^2 4lnl'$ などを経由するものである. しかし電子エネルギーが低いところにも多数の共鳴準位がある. たとえば $3s \rightarrow 3p$ 励起したイオンに電子が捕獲されてできる $3s3p^2 nl$ 状態や, 上記の $3s^2 4lnl'$ でも n が小さい場合などではエネルギーの低いところに共鳴がある. そこで Schmidt らは 0-260 eV の範囲で DR を測定した. 得られた断面積を電子のエネルギー分布で平均して, プラズマ中の再結合係数を求めたのが図 3 である. この場合には温度の低いところで DR 速度係数がきわめて大きくなる. これ

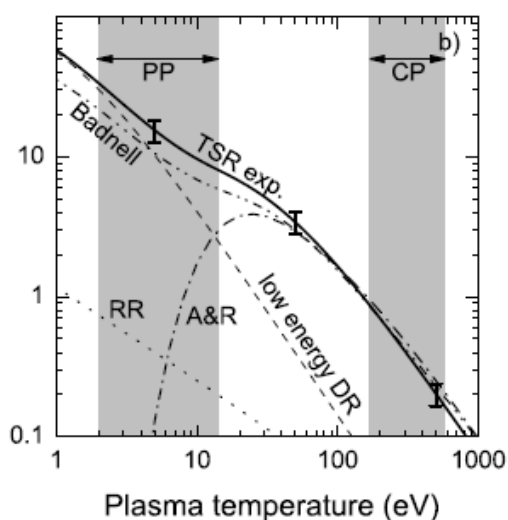


図 3: Fe^{13+} のプラズマ中での再結合係数. 縦軸の単位は $10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. 図中の RR は直接放射再結合, A&R は文献 [5] に掲載されている推奨値. Badnell は計算値である. PP, CP はそれぞれ光電離, 電子衝突電離によるプラズマの場合に Fe^{13+} が存在するおよその温度範囲を示す. 文献 [9] より転載.

はこの系では低エネルギーの共鳴準位が多いことに起因する. 従来低温では共鳴を考慮しない直接放射再結合(図の RR)が支配的だと考えられていた. しかし今の場合には低温でも DR が圧倒的に大きい.

これまで高温プラズマでの使用を目的として DR 速度係数の推奨値が作られてきた. その一つが図の A&R である. 図からわかるように, 高温では問題ないが低温ではまったく役に立たない. 一般に光電離によるプラズマは温度が低い. それへの応用のためにはここで紹介したような低エネルギーまで考慮した実験が必要である [9].

参考文献

- [1] A.I. Florescu-Mitchell and J.B.A. Mitchell, Phys. Rep. **430**, 277 (2006) .
- [2] S. Miyamoto, Pub. Astron. Soc. Jpn. **1**, 10 (1949). 1943 年に天文・宇宙物理学彙報に和文で発表したものを戦後英語にしたものの.
- [3] M.J. Seaton, Planet. Space Sci. **12**, 55 (1964).

- [4] A. Burgess and M.J. Seaton, Mon. Not. R. Astron. Soc. **127**, 355 (1964).
- [5] M. Arnaud and J. Raymond, Astrophys. J. **398**, 394 (1992).
- [6] 市川行和, 核融合研究 **64**, 496 (1990).
- [7] G. Kilgus et al., Phys. Rev. A **46**, 5730 (1992).
- [8] E.W. Schmidt et al., Astrophys. J. **641**, L157 (2006).
- [9] S. Schippers, J. Phys.: Conference Ser. **163**, 012001 (2009).

[付記] 本誌第 9 巻第 5 号の「原子衝突のキーワード」欄に「2 電子性再結合」の記事がある.