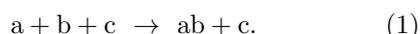


「原子衝突のキーワード」

3体衝突 (3-body collision)

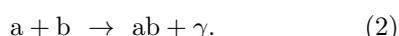
3つの自由粒子が入射して同時に相互作用する衝突を「3体衝突」と呼ぶ。本稿では、簡単のため、各粒子は内部自由度を持たないとする。

2体衝突では弾性散乱 $a + b \rightarrow a + b$ しか起こらない。ところが、そこに第3の粒子 c が加わって3体衝突になると、 a と b の束縛状態＝複合粒子 ab の生成が可能になる：



これは、粒子 c が“余分なエネルギー” (a - b 間の入射運動エネルギーと束縛エネルギーの和) を奪うためである。この過程は、束縛状態 ab が存在しさえすれば、粒子 c の種類や速度によらず原理的にはいつでも起こり得る。

複合粒子の生成は、電子などの荷電粒子が入射するとき、2体衝突の途中で余分なエネルギーを光子 γ として放出することによっても起こる：



したがって、一般には3体再結合 (1) と放射再結合 (2) の競争になるが、密度が高く温度が低いほど3体衝突が重要になる。

複合粒子の生成は、[A] 電子と原子核から原子を作る、[B] 複数の原子から分子を作る、という階層的な物質進化を支配する過程に他ならない。原子分子過程ではないが、リチウムより重い元素はビッグバンでは合成されず、星の進化の各段階における核燃焼によるものと考えられている。その鍵を握る反応も3体衝突で起こっている ($\alpha + \alpha + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$, α はアルファ粒子)。

歴史的に見ても、3体衝突の研究は、科学者が原子分子の実在性を認めその内部構造に分け入るようになった20世紀初頭に始まった。J.J. トムソンは、正負の荷電粒子間の三体再結合を説明する古典的理論を1924年に提出している。

[A] に属する3体再結合として電子と陽子から水素原子を形成する過程がある ($e^- + e^- + p^+ \rightarrow e^- + \text{H}^*$)。陽電子と反陽子からの反水素原子形成も、これと荷電共役の関係にあり等価である

($e^+ + e^+ + \bar{p} \rightarrow e^+ + \bar{\text{H}}^*$)。[B] に属する過程としては、身近な所で、上層大気における酸素分子の生成がある。酸素分子は太陽からの紫外線を受けて酸素原子に解離するが、その再結合は3体衝突で起こっている ($\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$, [M] は他の分子)。また、実験室で詳しく観測されるものとして、移動管におけるイオンの3体結合反応がある ($\text{He}^+ + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$)。近年の研究では、ボース・アインシュタイン凝縮体の崩壊を引き起こすメカニズムとして冷却原子からの分子形成が注目されている ($\text{B} + \text{B} + \text{B} \rightarrow \text{B}_2 + \text{B}$, B はボソン原子)。

3体衝突 (1) が起こる速さ r (単位時間・体積当たりの事象が起こる回数) は、各粒子の数密度 $n_{a,b,c}$ に比例し $r = k^{(3)} n_a n_b n_c$ と書かれる。この式で定義される速度定数 $k^{(3)}$ を求めることが原子衝突の研究テーマである。

3体衝突 (1) の微視的過程は、本来、入射粒子 (a, b, c) と散乱粒子 (ab, c) のそれぞれの相対速度ベクトルに依存する“微分断面積”で記述されると考えられる。しかし、それに対応するビーム実験を行うことは困難である。3体衝突の事象が1回起こるとき、ビームの交差領域において別の粒子との2体衝突が相次いで起こるからである。それでは、始状態と終状態を押さえた3体衝突の観測になり得ない。速度定数は気体の温度 T の関数として測定されている。

J.J. トムソンの理論は、粒子の無秩序な運動の平均として気体の性質を導く分子運動論に基づいていた。荷電粒子 a - b 間には引力ポテンシャル $U(R)$ が働くため、散乱の途中で運動エネルギーが一時的に増加する。その最中に a - b 間の距離 R で中性粒子 c との衝突が起こると、運動エネルギーは緩和して熱エネルギーに戻るから、内部エネルギーは $3k_B T/2 + U(R)$ に下がる。この値が負になれば束縛状態が形成され、温度に依存する“捕獲距離” $R_0(T)$ が定まる。捕獲距離の内側で c - a 間あるいは c - b 間の衝突が起こる確率は、粒子 c の平均自由行程から求まる。これらの関係から速度定数が導かれる。

(JAXA 宇宙研 市村淳)