

共鳴過程を制御する：極低温量子気体を操る原子衝突

Keyword: フェッシュバッハ共鳴

巨視的個数の同種ボーズ粒子が基底状態にある特異な量子気体、ボーズ-アインシュタイン凝縮体 (Bose-Einstein condensate, BEC) が原子の冷却・捕獲技術の進歩により、1920年代の提案から実に70年を経て実現された。その巨視的コヒーレンスは物質波の原子レーザーを生んだ。研究は縮退フェルミ気体やボーズ-フェルミ混合系などの複数成分系へ発展している。気体の各原子対に現れる「フェッシュバッハ共鳴」は極低温量子気体の諸性質を大きく左右するとともに幅広い制御性をもち、この分野の躍進を支えている。¹⁾

一方、BECを壊す敵役の3粒子系には奇妙な物理が潜む。どの構成2粒子対にも束縛状態がなくとも3粒子系全体はときに無数の束縛状態をもつというエフィモフ効果で、それが共鳴状態に転じたものが最近観測されている。¹⁻³⁾ これは原子系だけでなく、短距離型2体相互作用で記述される原子核系にすら現れ得る³⁾長距離場効果なのである！

諸過程の起こり易さを表す物理量「断面積」は、量子論的共鳴状態を中間体として経るいわゆる共鳴過程に大きく影響されるので、物理学の諸分野で共鳴状態は活発に研究されている。ここでは原子物理学での例をいくつか取り上げる。

1. フェッシュバッハ共鳴とは

量子系には束縛状態と連続状態がある。また、一見、束縛状態のようで、波動関数のすそ野が小さな振幅で延々と振動し続ける束縛状態風連続状態、時間依存描像では長い時定数で徐々に壊れる状態があり、これを共鳴状態と言う。

例えば、光吸収などで2電子励起したヘリウム $\text{He}(2snl)$ は空間的に局在するが、そのエネルギーは電離しきい値を越え、波動方程式の正しい解 ψ_{He} には連続状態 $\text{He}^+(1s) + e(E)$ ($E > 0$) が混ざり、 $\text{He}(2snl)$ はやがて自動電離する。

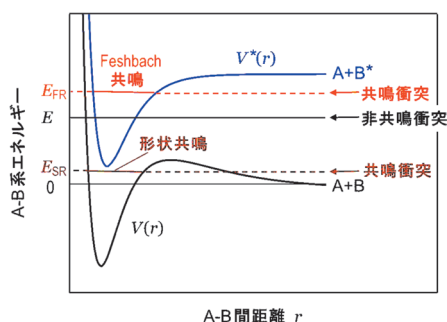


図1 弾性衝突 $A+B$ での共鳴機構の概念図。

束縛状態風連続状態 ψ_{He} は共鳴状態であり、光吸収連続スペクトルに線スペクトル風だが非対称な無数の構造をもたらす。

共鳴状態は2体衝突 $A+B$ にもよく現れる。相対距離 r での基底状態 A, B 間の相互作用 $V(r)$ と、 A か B が励起しているときの相互作用 $V^*(r)$ を考える (図1)。 $V(r)$ に障壁があればその内側に例えばエネルギー E_{SR} の束縛状態風複合系 AB が生じ得る。しかし、トンネル効果で障壁を抜けて A と B はいずれ別れるので、これは共鳴状態である。主に $V(r)$ 一つが共鳴状態の生成・崩壊を支配するこの機構を形状共鳴と呼ぶ。衝突 $A+B$ のエネルギー E が E_{SR} に一致すればこの共鳴状態が衝突断面積を急増か急減させる。

衝突中に励起が起これば相対運動は $V^*(r)$ に従う。 $V^*(r)$ がエネルギー E_{FR} の束縛状態 AB をもてば、 $E \approx E_{\text{FR}}$ の衝突ではこの複合系 AB が作られる。その励起エネルギーが再び相対運動に戻されれば AB は $V(r)$ に従い連続状態 $A+B$ へと壊れるので、これも共鳴状態で、 $E \approx E_{\text{FR}}$ 付近で断面積が急変する。このように、より高い $V^*(r)$ での束縛状態により低い $V(r)$ での連続状態が混じる共鳴機構をフェッシュバッハ共鳴 (Feshbach resonance, FR) と呼ぶ。

一般には状態 E_{FR} は多数あり、また A, B には多数の励起状態があつて図1には多数のポテンシャルが関わり、非弾性衝突や粒子組替反応にも共鳴効果が複雑に表れる。⁴⁾

2. 原子分子素過程

2電子励起 $\text{He}(2snl)$ は衝突 $e + \text{He}^+(1s)$ でも、 He^+ を $2s$ 状態に励起した入射電子が $\text{He}^+(2s)$ 周りの場 $V^*(r)$ での nl 軌道に一時捕えられて作られる。クーロン場 $-r^{-1}$ による束縛なので $\text{He}(2snl)$ は無限個でき、無限FR系列を生じる。

$\text{He}^+(2s)$ を励起水素原子 $\text{H}(n=2)$ に置き換えると、縮退副単位 $2s, 2p$ が混じる1次シュタルク効果で周りの電子にとり長距離型の場合 Cr^{-2} が生じる。そのうちある強さ以上の引力場には束縛エネルギーが等比数列をなす束縛軌道 nl が無限個でき、2電子励起 H^- の無限FR系列が現れる。⁴⁾ ただし、相対論効果で副単位はわずかに分裂し、場 Cr^{-2} がその分裂より弱くなるある大きな距離 a 以遠では Cr^{-2} の形が崩れ、無限系列は数個以下で途切れてしまう。⁴⁾

電子、陽電子、陽子、反陽子、原子、分子、イオンなど多種の粒子対の衝突素過程 $A+B$ や原子、分子の光吸収過程につき、外殻・内殻電子、分子の振動・回転運動など異質の運動自由度が絡み合った多様な共鳴効果、複数共鳴状態間の複雑な干渉など、多彩で詳細な実験・理論研究が進む。

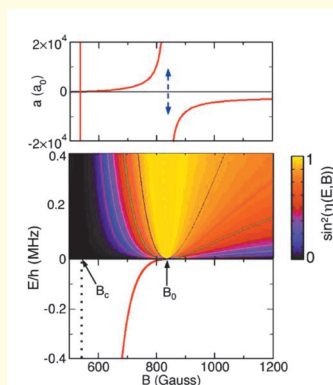


図2 ${}^6\text{Li}$ - ${}^6\text{Li}$ 系の磁場 B 依存性の例。上：散乱長 $a(B)$ 。下： $E < 0$, 束縛状態エネルギー E_b (ほぼ $\propto a^{-2}$); $E > 0$, 断面積の E 倍に比例する $\sin^2 \eta$ (大きな a^2 で大きい)。 $E_b = 0$ となる磁場 B_c , B_0 で a^{-1} が0をまたいで符号を変え、その近くで a は広範囲の値を取る。文献1より。

3. 極低温量子気体

極冷希薄気体の性質は極低速 s 波2体衝突に支配される。その相対運動の運動量 $\hbar k$ と相互作用(到達距離を r_0 とする)が起こす波の位相のずれ η を使えば、 r_0 以遠、かつ他の原子が入り込まない範囲内での s 波波動関数は $\propto \sin(kr + \eta) \propto \sin kr + \tan \eta \cos kr = k(r - a)$ と書ける。 a は極低速での $-\tan \eta/k$ の値で散乱長と言い、極冷気体の諸性質を司る重要なパラメータで、弱い斥力では正、弱い引力では負、引力が強くエネルギー $E_b \leq 0$ の束縛状態を生じれば $\eta \geq \pi/2$, $a > 0$ となる。束縛が弱ければ $E_b \approx -\hbar^2/2\mu a^2$ (μ は衝突系の換算質量)と表せ、普遍性と称する。相互作用の詳細に依らない性質が現れる。極低速衝突断面積も相互作用の詳細に依らず、 πa^2 に比例する。ただし、同一内部状態の同種フェルミ粒子同士の衝突では s 波衝突が禁止されて弱い p 波衝突が見えるなど、フェルミ系の事情は複雑である。

衝突素過程 $A + B$ の共鳴では通常FR条件 $E = E_{\text{FR}}$ 付近で断面積などの E 依存性を調べる。極冷気体内衝突では常に $E = 0$ だが、図1の $V(r)$, $V^*(r)$ を生む状態の磁気モーメントが違えば磁場を走査して $V(r)$ に対する $V^*(r)$ の、ひいては E_{FR} の相対位置をずらせる。 $E = 0$ にFRを起こせば a は巨大な負値を、 $E_b \approx 0$ の束縛状態を作れば巨大な正値を取る。その近辺で磁場を走査すればあらゆる a の値を実現して極冷量子気体の性質を制御できる(図2)。¹⁾

以上では相対運動エネルギーが $V(r)$ の連続状態を $V^*(r)$ の束縛状態に結合させているが、レーザー光で結合すれば(光学的FRと呼ぶ)周波数走査で a を制御できる。¹⁾

2体FRは3体再結合 $A + A + A \rightarrow A + A_2$ を促進する。また、図1の $V^*(r)$ が複数個あれば、FRを通じたそれらの強い結合が非弾性衝突を促進する。こうして内部エネルギーが相対運動に転換し、加速された A や A_2 が極冷気体から逃げ、FRが検出される(図3)。冷却原子が逃げず安定なBECを作るには磁場などを走査して適切な a を選ぶ。

原子間相互作用 $V^*(r)$ が作る束縛状態はフェッシュバツ

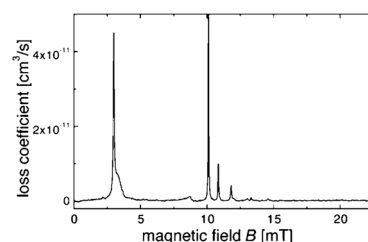


図3 原子間非弾性衝突に起因するCs ($F=3$, $M_F=-3$) 気体(温度 $5 \mu\text{K}$)からの原子損失速度定数。FRを起こす磁場の値でピークを示す。C. Chin, *et al.*: Phys. Rev. A **70** (2004) 032701より。

ハ分子(FM)と呼ばれ、多方面に亘り有用な極冷分子生成に使える。¹⁾ 磁場 B を変えつつ $E < 0$ のFMを分光して散乱長 $a(B)$ を知れば $E > 0$ でのFRに関する情報をも得る。¹⁾

4. エフィモフ効果

3体系A-A-Aの大きさを表す超球半径 $\rho (= [r_{12}^2 + r_{23}^2 + r_{31}^2]^{1/2})$, r_{ij} は各粒子間距離)で波動方程式を表すと、A-A相互作用の到達距離を r_0 として、 $r_0 < \rho < |a|$ では場 $C\rho^{-2}$ が現れる。2体系の散乱長 a が $\pm\infty$ なら3体系は $\rho \rightarrow \infty$ まで場 $\propto \rho^{-2}$ に従い、非相対論的2電子励起 H^- と同じく束縛状態の無限等比系列が見られ、これをエフィモフ効果と呼ぶ。¹⁻³⁾ $|a|$ が有限でも大きければ、相対論的 H^- の $\tilde{a}$ を $|a|$ に置き換えた形の有限系列ができる。これらの束縛状態が連続状態と結合すればFRになる。A-A間2体力が短距離型でも、束縛状態 A_2 がなくても本質は同じ(普遍性)で、中性3粒子系、¹⁻³⁾ 原子核系³⁾にもこの効果は生じ得る。 a を磁場制御されたエフィモフ効果で促進された3体再結合による極冷Cs気体からの原子損失が観測されている。異種粒子系、4体系以上へも理論は拡張されている。

*** *** ***

原子物理、核物理の共鳴には主にエネルギー依存性の特異性を論じた長い歴史がある。極冷気体内原子衝突は外場でFRを制御する新たな視点を導入した。フェルミ原子気体のFRによる超流動もBEC領域からBCS領域へ連続的に制御できる。^{1,3,5)} 狭い空間に捕えられた少数粒子系への拡張により、光格子や量子ドット内での共鳴も論じられている。^{1,6)} FR研究は諸分野で新しい展開を見せつつある。

参考文献

- 1) C. Chin, *et al.*: Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 1225.
- 2) Y. Wang, *et al.*: Adv. At. Mol. Opt. Phys. **62** (2013) 1.
- 3) N. T. Zinner and A. S. Jensen: J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **40** (2013) 053101.
- 4) I. Shimamura: Adv. Quant. Chem. **63** (2012) 165.
- 5) 大橋洋士: 日本物理学会誌 **59** (2004) 591.
- 6) D. Blume: Rep. Prog. Phys. **75** (2012) 046401.

島村 勲(理化学研究所)

(2014年2月14日原稿受付)