



## フェッシュバック共鳴 (Feshbach Resonances)

鈴木 徹 (首都大学東京理工学研究科)

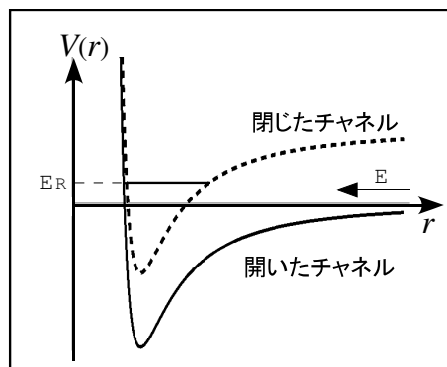
Feshbach 共鳴とは、閉じた反応チャンネルに関わる準安定状態の形成によって起こる共鳴現象を指します。この現象は、原子核・ハドロン系、原子分子系、メゾスコピックな電子系など広汎に見られますが、原子物理などの分野でとくにこの名称で呼ばれています。Feshbach 共鳴は、極低温の原子気体の原子間相互作用を操る手段として最近とりわけ注目を集め、量子力学的多体系の強力な研究手段となりつつあります。

散乱・反応の過程で寿命の長い準安定状態が形成されるとき、散乱断面積のエネルギー依存性に幅の狭いピークが生じる共鳴現象が観測されます。量子力学では通常、波動関数が空間的に局在した状態（束縛状態、絶縁状態）には離散的なエネルギースペクトル、波動関数が無限遠方まで広がった状態（散乱状態、伝導状態）には連続スペクトルが対応します。従って共鳴現象は、本来は無限の寿命をもつ束縛状態が、連続エネルギースペクトルに埋め込まれ、散乱状態の成分が混じることによって幅を獲得したものと同じと見ることができます。連続スペクトル中の束縛状態の存在は量子力学の成立当初から議論されていますが [1]、準安定な近似的束縛状態の存在は、障壁を持つポテンシャルにおける点状粒子の散乱問題などで普通に見られる現象です。

散乱に関与する粒子が内部構造をもつ場合には、新たな可能性が生じます。散乱の途中で、一方の粒子が内部励起される、あるいは組み替えがおこるためには、この反応のしきい値より入射エネルギーが高い（開いたチャンネル）ことが必要です。逆に、エネルギー保存則からこの反応が許されない場合（閉じたチャンネル）には、散乱の途中でこの反応が仮想的に起こっても、最終的にはもとの入射状態と同じ組合せ（弾性散乱）など、エネルギー的に許される過程しか起きません。閉じたチャンネルにおいて束縛状態が存在すれば（図を参照）、この状態は共鳴状態として観測される可能性があります。Feshbach は、

原子核反応の統一的記述をめざした論文 [2] において、この過程を考察し、共鳴散乱の Breit-Wigner 公式の基礎付けを行いました（彼自身はもちろんこの共鳴現象を Feshbach 共鳴と呼んだわけではありません [3]）。また彼とは独立に、原子による光吸収のスペクトルの考察 [4] において、Fano が連続状態に埋もれた標的の離散的状態による共鳴現象を研究したため、ときに Fano-Feshbach 共鳴と呼ばれることもあります。

Feshbach 共鳴に対応する現象は原子核反応では普遍的に見られ、例えば入射核子が核内の粒子と相互作用してエネルギーを失い、二粒子一空孔の離散的状態を作る場合（戸口状態）や、反応が進んで複合核状態を作る場合も Feshbach 共鳴の一種と見ることができます。連続スペクトル領域



の構造が大きく影響する不安定原子核や、高励起の分子的状态の研究では、Feshbach 共鳴現象の理解が重要であると思われます。また、ストレンジネスなど核子以外の自由度が関与するハドロン反応（例えば  $K + N \leftrightarrow \Lambda^* \leftrightarrow \Sigma + \pi$ ）やハイパー原子核の研究においても共鳴状態が大きい役割を果たします。

多数の原子を極低温でポテンシャルに閉じこめ、有限サイズの量子気体を実現する研究は1970年代から進められてきました。実際にこの系でボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現したのは1995年で、数年後にはフェルミ縮退系も実現しました。通常この系は原子間相互作用の効果が弱く、典型的な理想気体に近い量子気体と見なされます。原子気体で原子間に Feshbach 共鳴が存在する場合に大きな可能性が開けることは1993年に指摘されました [5]。極低温 ( $10^{-9} \sim 10^{-6}$ K) のために、原子の運動エネルギーはほぼゼロと見なせ、原子衝突では開いたチャネルが弾性散乱のみになります。このとき、ゼロエネルギー近傍にエネルギー  $E_R$  の Feshbach 共鳴が存在すれば、この共鳴を中間状態として経由することにより大きな散乱断面積が得られます。低エネルギー散乱の相互作用の強さは  $S$  波 (角運動量ゼロ) 散乱長  $a$  であらわされ、散乱断面積は  $a^2$  に比例します。Feshbach 共鳴の影響は、入射エネルギー  $E$  と共鳴エネルギー  $E_R$  を用いて、 $a$  に  $1/(E - E_R)$  に比例する項が加わる効果としてあらわされます。一般には都合良く  $E_R \sim E$  の Feshbach 共鳴が存在するとは限りません。しかし、外部磁場  $B$  をかけてゼーマン効果を利用することにより、反応チャネルのエネルギーを変化させることができます。すなわち、ちょうど共鳴を起こすときの磁場の値を  $B_0$  とすると、磁場の強さが  $B$  の時の有効散乱長は  $a \propto 1/(B - B_0)$  になるというわけです。この効果は閉じこめられている原子全体について共通であるため、磁場を制御することによって、強い斥力 ( $a > 0$ ) から強い引力 ( $a < 0$ ) まで原理的には任意の強さの相互作用をする量子多体系を手に入れることができることとなります。実際の系で散乱長がこのようにふるまうことは、1998年にMITの実験で確認されました [6]。その後この手法を用いて、斥力相互作用するボース原子系を引力系に転化して系の崩壊を引き起こす現象 (ボースノバ) や、二成分フェルミ原子系に対して引力を誘起してBCS超流動を実現し、さらには磁場を徐々に変化させてフェルミ粒子対の分子 (ボース粒子) からBCS型のゆるく結合した対へと BEC-BCS クロスオーバーを導く、などの実験がなされています。

- [1] J. von Neumann & E. Wigner, Phys. Z. 30, 467 (1929). この論文では、ある種のポテンシャル問題で、散乱波成分を持たない完全な束縛状態が連続スペクトル領域に存在し得ることが示されました。この現象を半導体超格子で実験的に示した最近の論文 [F. Capasso et al., Nature 358, 565(92)] には、その後の研究が略述されています。
- [2] H. Feshbach, Ann. Phys. 5, 357 (1958); 19, 287 (1962). 共鳴公式を導くいくつかの理論的手法とその関係や、Feshbach が開発した射影演算子法を含む核反応の統一のアプローチについては、例えば、河合光路、吉田思郎「原子核反応論」(朝倉書店, 2002) に詳しく解説されています。
- [3] D. Kleppner, Physics Today 57, 12 (2004, August). 著者は原子気体 BEC でノーベル賞を受けた研究者達のゴッドファーザーとも呼ばれる人で、MIT での Feshbach の同僚でした。
- [4] U. Fano, Nuovo Cimento 12, 154 (1935); Phys. Rev. A 124, 1866 (1961). Fano の研究は連続状態と離散の状態との干渉により生じる、共鳴スペクトルの形の非対称性に重点をおいています。
- [5] E. Tiesinga, B. J. Verhaar, H. T. C. Stoof, Phys. Rev. A 47, 4114 (1993).
- [6] S. Inouye et al, Nature 392, 151 (1998).