

連成振動の実験

—量子光学、自発的対称性の破れ—

東京大学名誉教授 霜田光一

1. 連成振動と固有振動

長さの等しい2つの振り子を結合した連成振り子の固有振動は、連成振動とは異なる。

連成振動では、一方の振り子の振動が大きくなったり小さくなったり、他方の振り子の振動が小さくなったり大きくなったりする。

固有振動の振幅は $A(x,y,z,t) = \psi(x,y,z) \cdot \exp(i\omega t)$ と表され、空間分布は不変で、固有関数は $\psi(x,y,z)$ 、時間的には角周波数 ω で振動する。

固有エネルギーは $E = h\omega/2\pi$ で、固有関数には対称モードと反対称モードがある。

2. 量子遷移の物理

まずアンモニア分子のマイクロ波スペクトル (inversion spectrum) を考える。

対称性の異なる固有状態の間の遷移で双極子モーメントが誘起され、それによって電磁波 (光) が放出される。これが自然放出と誘導放出の物理的過程である。

調和振動子、水素原子、量子井戸などの量子遷移も同様である。

自然放出確率が周波数の3乗に比例すること、誘導放出によるメーザー・レーザーのコヒーレンスもこれによって理解される。

3. 振れ振動と伸縮振動の連成振動の実験

異種の振動の結合でも、共鳴すれば連成振動が起こることが、バネに重りをつけた振動子で実験できる。このような振れ振動と伸縮振動の連成振動は、多原子分子 (CH_2O) の振動スペクトルで観測された。

4. 弾性振り子の連成振動と固有振動の実験

振り子の長さがバネで伸縮する弾性振り子の伸縮振動の周期の2倍が、振り子振動の周期に等しいとき、連成振動が生じる。最初に伸縮振動を始めると、やがて伸縮振動は減衰して振り子振動が始まり、次には振り子振動が減衰して伸縮振動になり、これを繰り返す。

このとき、振り子の振動面は毎回、異なる。伸縮振動が最大になったとき、振り子運動が止まっているので、次に起こる振り子運動の振動面は不確定である。これは“対称性の自発的破れ”であり、自発的であることが実験的に確認される。

弾性振り子の固有振動は、振り子の傾きとバネの伸縮の大きさを整合させた初期条件で実現される。そして固有振動の振動面は不変であることが分かる。

重りにバネと紐を直列につないだ振り子では、紐の長さを変えると伸縮振動の周期は変わらないで、振り子の周期が変わるので、紐の長さを調節して共鳴条件を実現することができる。この実験では、0.1%程度まで精密に共鳴させる必要がある。

最初は輪ゴムに重りをつけて実験し、振り子と伸縮の連成振動が起こることを確認した。しかしゴムでは減衰が大きいので、次にピアノ線でいろいろのばねを作り、試行錯誤により最終的に、適当な振動数で減衰の小さい弾性振り子を製作した。

付記：ブランコもパラメトロンもパラメトリック振動であるが、これらは強制振動であって連成振動ではなく、この実験とは異なる。 (2016.05.21 SSISS 立教)