

# 量子力学における「時間の矢」

羽田野直道 (東京大学生産技術研究所 hatano@iis.u-tokyo.ac.jp)

我々は日々「時の流れ」の中で生きています。命あるものもいつかは死に、形あるものもいつかは壊れます。日々の生活の中でこれは当然のことですが、物理学にとっては古くからの大問題であり、「時間の矢」と呼ばれています。厳密に言うと時間の矢とは、時間が正の向きに進むに従って、ある特定の現象（例えば物が壊れること）の方が、その時間反転の現象（物が形作られること）よりも頻繁に起こることを指します。ビデオを見て、それが順回しか、それとも逆回しかがわかる場合、そのビデオに映っている状況には時間の矢が存在しています。

なぜこれが物理学にとって大問題であるかという点、「弱い相互作用」を除く3つの相互作用が時間反転対称性を持っているからです。微視的なレベルで運動を記述する方程式のほとんどは、ニュートンの運動方程式、マクスウェル方程式、シュレーディンガー方程式を含めて時間反転対称な微分方程式です。したがって、それら微分方程式の解も時間反転対称であるのが当然のように思われます。実際に、理想的な調和振動子のビデオ映像は順回しか、それとも逆回しかを答えられないでしょう。しかし現実には時間反転対称性を破る現象があふれています。それを物理学はどのように説明すればよいのでしょうか。

本稿では特に微視的な量子力学に話を絞って、時間の矢が現れる仕組みを明らかにします。例えば輻射場中の二準位原子を考えましょう。励起状態にある二準位原子は光子を放出して次第に基底状態へ崩壊すると考えるのが自然です。それが実験でも観測されることです。理論的には通常は「アインシュタイン係数」を使って議論されますが、そこでも基底状態への崩壊が結論されます。しかし、この現象は明らか

に時間の矢を持っています。もとの量子電磁力学 (QED) は時間反転対称な学問体系なのに、なぜこういうことが起こるのでしょうか。

我々はこの問題を2段階に分けて解き明かします。まず第1段階で、無限体積中のシュレーディンガー方程式には、時間反転対称性を破る解が存在することを示します。元の方程式の時間反転対称性を反映して、そのような解は必ず互いに時間反転対称な、「崩壊状態」と「成長状態」のペアで現れます。(歴史的には、これらは「共鳴状態」・「反共鳴状態」と呼ばれてきました。)

実は、ここまではこれまでも多くの議論があります。しかし時間の矢が現れることを説明するためには、なぜ崩壊状態が卓越して選ばれるのかまで示す必要があります。これが、これまでの議論で欠けていた点でした。それに対して我々は、数学的に厳密な議論を経て以下のことを示しました。初期条件問題、つまり「ある状態が初期条件として与えられたときに、その後、何が起こるかを問う問題」の場合には自動的に崩壊状態が選択され、逆に終末条件問題、つまり「ある状態が終末条件として与えられたときに、その前に、何が起こったかを問う問題」の場合には自動的に成長する解が選択されるのです。(これは、遅延グリーン関数と先進グリーン関数を定義するときに付与する微少量の符号を論理的に説明したことになっています。) 輻射場中の二準位原子の問題は初期条件問題なので、崩壊状態が卓越して選択されます。

ただし、通常の二準位原子の議論では全時刻で純粋な指数関数的減衰しか得られません。それに対して我々の議論では短時間領域で指数関数的減衰ではなく、徐々に成長状態から崩壊状態に切り替わる様子も確認できました。

## —Keywords—

### 開放量子系：

興味ある量子系を中央に据え、それが無限自由度の外界と結合しているとき、その全体を開放量子系と呼びます。量子散乱問題は最も簡単な開放量子系です。量子系が熱浴と結合している場合も開放量子系であり、最近の非平衡統計物理学の進展の中で盛んに研究されています。開放量子系のハミルトニアンは一般に非エルミートで、離散固有状態として共鳴状態を持ちます。

### 非エルミート性：

通常はエルミートとされるハミルトニアンも、ヒルベルト空間 (通常の規格化ができる関数空間) の外の関数に対しては非エルミート演算子として振る舞うことがあります。実際に共鳴状態に対してはハミルトニアンは非エルミートになり、複素固有値を持ちます。開放量子系には規格化できない関数も存在できるので、開放量子系を表す有効ハミルトニアンとして、非エルミートなハミルトニアンの研究が盛んになりつつあります。

### 共鳴状態：

多くの場合、散乱問題のS行列の極として定義されますが、ハミルトニアンの特殊な境界条件下での固有状態としても定義できます。ハミルトニアンの持つ時間反転対称性を破る解であり、崩壊現象を記述するので、本文では崩壊状態と呼んでいます。時間反転な解である反共鳴状態 (本文では成長状態と呼びます) とペアで、ヒルベルト空間の外に規格化できない固有関数として現れます。

本記事の長さは通常の「最近の研究から」記事の規定を超過しておりますが、編集委員会の判断によりこのまま掲載しています。