

量子力学における時間の矢

Arrow of Time in Quantum Mechanics

東京大学 羽田野直道

「時間の矢」とは、時間が進むにときのみ起こる現象を言います。ある現象を撮影したビデオを見て、それが逆回しで再生されているときに逆回しであると言い当てられるなら、その現象には時間の矢が存在します。例えばコーヒーにクリームが広がっていく様子を撮影したビデオを逆回しにすれば、それが逆回しであることが直ちにわかります。このとき、クリームの拡散には時間の矢が存在すると言います。

時間の矢は我々の身の回りに満ち溢れているので、ともすればそれが当然のように思いがちです。しかし物理学の立場からは基本的な大問題です。物理の基本法則は時間の矢が存在しない形で書かれているからです。例えばニュートンの運動方程式には時間反転対称性があります。そのため、振り子の振動を撮影したビデオを逆回しにしても逆回しであるとは言い当てられません。ただし、振り子の糸の摩擦力や空気の抵抗力によって振り子の振動が減衰すれば、時間の矢が現れます。このことから、時間の矢は多くの自由度がからんだときに初めて起こる現象であることが推測されます。それを物理学的に一般法則として扱うのは容易ではないのです。

時間の矢は幾つかの種類に分類できます。本講演では、力学的な時間の矢に限定してお話しをします。量子力学の基本法則であるシュレーディンガー方程式は時間反転対称性のある微分方程式です。ところが励起状態は常に減衰する傾向にあります。それが力学的な時間の矢です。

その他に熱力学的な時間の矢があり、エントロピー増大の法則を指します。熱力学系はリウビル・フォンノイマン方程式という運動方程式に支配されますが、これも時間反転対称性があります。それなのになぜ時間と共にエントロピーが増大するかは統計力学の大問題です。

また、心理学的な時間の矢があり、これは我々が日頃感じる時間の流れを指します。具体的には、過去の記憶はあるのに未来の記憶がないことを指します。さらに、宇宙論的な時間の矢があり、これは現在の宇宙が膨張していることを指します。逆に宇宙が収縮していると我々の身の回りの何が変わるのかは、実はよくわかっていません。我々が歳をとるのは熱力学的な時間の矢のためなのか、宇宙論的な時間の矢のためなのかも、議論の余地があるところです。

上述のように、ここでは力学的な時間の矢に限定してお話しします。まず初めに、無限の自由度がある系では、微分方程式に時間判定対称性があっても時間反転対称性を破る解が存在することを示します。具体的には、励起状態が減衰してエネルギーが出て行く解と、エネルギーが入射して励起状態が成長する解が存在します。この2種類の解は必ずペアで現れます。そのため解の集合全体としては時間反転対称性が保たれ、矛盾はありません。

次に、どちらの解が選ばれるかは微分方程式の境界条件によって決まることを示します。シュレーディンガー方程式は時間に関して一階の微分方程式なので、境界条件を一つ設定しなければいけません。時間に関する境界条件として初期条件を設定し、そこからの時間発展を観察すると、励起状態が減衰する解が自動的に選ばれることを示します。逆に、境界条件として終末条件を設定し、そこに向かう時間発展を観察すると成長する解が自動的に選ばれます。

ところで、初期条件を設定する方が終末条件を設定するより自然であると我々は感じます。そのため、減衰する解がより自然であると感じがちです。ではなぜ、初期条件の方が自然であると我々は感じるのでしょうか。それは心理学的な時間の矢のためではないでしょうか。もし宇宙のどこかに、過去の記憶がなく未来の記憶がある生命体が存在したら、終末条件を設定する方が自然だと感じるのではないのでしょうか。