

# 量子エンタングルメント?!

1

## ミクロの世界を記述する物理法則：量子力学

- 光や電子、原子、物質などは「量子」として表される
- 量子は複数の状態の「重ね合わせ状態」を持つことができる。重ね合わせの係数は複素数をとる

一つの粒子が場所1と場所2にある状態の「重ね合わせ」にできる

↑  
古典力学では無理!  
(場所1と場所2に同時にいるわけでない)

or 演算子

量子：物理量が行列  $\begin{pmatrix} a & b \\ b^* & c \end{pmatrix}$  ↔ 古典：物理量は普通の実数  $r$

量子と古典では、**物理を記述する数学の「システム」が違っている**ことに注意!

シュレディンガー  
ハイゼンベルグ  
ディラック  
From The Nobel Foundation

2

## 量子力学の世界の特徴

量子力学で許されることは何でもできる場合、**非直感的なことが起こる**

- 量子測定**：量子系に作用し、状態に応じて確率的に状態が変化
- エンタングルメント (量子もつれ)**：合成系では、古典力学ではあり得ない強い相関が見れる

距離をこえた不気味な作用!  
Spooky action at a distance!

"量子状態の非局所性"

片方の状態を測定することで、遠くはなれた片方の状態を瞬時に変化させることができることで生ずる非局所的相関

アリス

ボブ

3

## 量子力学のルールの数学的記述: 公理的定式化

量子力学 (純粋状態の量子力学) の呪文: ここは分からなくて大丈夫 Von Neumann 1932年

- 量子力学的な状態は、**複素ヒルベルト空間のベクトル**と同等。→ **重ね合わせ状態**の存在
- 複数のシステムからなる量子力学的な状態は、ヒルベルト空間の**テンソル積空間**のベクトルと同等。→ **エンタングルメント**の存在
- 量子力学的な状態の決定論的な変換はすべて**完全正值変換**で表され、**補助空間とユニタリ変換**、**トレースアウト**を用いて実装できる。→ **ユニタリ変換**  
Stinespring 1955年, Jamiolkowski 1972年, Choi 1975年, Kraus 1983年
- 測定は**完全正值変換の組**で表され、測定によって量子力学的な状態は**確率的に変化**する。  
→ **量子測定**  
1970年 Davis, Lewis, 小澤 1984年

量子力学のルール

量子力学的状態の特徴

量子力学の変換の特徴

1. 重ね合わせ状態

2. エンタングルメント

3. ユニタリ変換

4. 量子測定

Einstein-Podolsky-Rosen; Schrödinger 1935年

量子ビットを例として呪文を解読し、エンタングルメントの?を!にして、量子情報や理論物理学の楽しみ方を学ぼう

4

## 量子力学のルールに従ってエンタングル状態の片方を測定すると...

量子ビットAと量子ビットBのエンタングル状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \beta^* \\ -\alpha^* \end{pmatrix} - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \beta^* \\ -\alpha^* \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- 量子ビットAを  $\left\{ \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \beta^* \\ -\alpha^* \end{pmatrix} \right\}$  の基底で射影測定する

確率1/2  $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \beta^* \\ -\alpha^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha\beta^* \\ -|\alpha|^2 \\ |\beta|^2 \\ -\beta\alpha^* \end{pmatrix}$  A

確率1/2  $\begin{pmatrix} \beta^* \\ -\alpha^* \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha\beta^* \\ -|\alpha|^2 \\ |\beta|^2 \\ -\beta\alpha^* \end{pmatrix}$  A

Bには触っていないが瞬時に変化

エンタングルメントは消滅

エンタングルメントは消滅

片方の量子ビットに測定をすると、もう片方の量子ビットが**測定方法に応じて別の状態に瞬時に変化**する! Spooky action at a distance! (Einstein)