

# 量子エンタングルメントの指標とその突然の消滅

氏名：丹尾大輔、山下悟士

現在の計算機等では”bit”と呼ばれる’0’か’1’の状態を組み合わせて処理している。この bit の概念を量子力学に取り入れたものに光子の偏光、原子のエネルギー準位などがある。これはある単体の量子系が二つの状態を取ると見做すことでそれぞれの状態を古典 bit と関連付けて  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  としたものである。またそのような系は  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  の状態を同時に含むような量子力学特有の「重ね合わせた状態」を取る。そこで、現在使われているような”bit”を「古典 bit」と呼ぶのに対して、このようにみなした量子系を「量子 bit(qubit)」と呼ぶ。

量子情報を扱う上で、複数の qubit における量子系の中に、纏れ・絡み合いを意味するエンタングルメント (entanglement) と呼ばれる状態がある。つまり、1 つ目の qubit の状態が決まると、他方の qubit の状態も同時に決まる状態である。このように測定結果が絡み合っているような qubit の量子系を A.Einstein B.Podolsky N.Rosen の思考実験より EPR Pair またはエンタングルメント状態と呼ばれている。

そこで、量子エンタングルメント状態の有用性を示すために、Super Dense Coding、量子テレパシーそして量子テレポーテーションの実験を例として上げ、エンタングルメント状態の有無によりそれぞれの実験の成功確率を比較し、量子エンタングルメント状態の有用性を検討することにした。

量子エンタングルメント状態は外界との相互作用によりエンタングルメント状態が壊れていく。そのため先の 3 つの実験の成功確率もエンタングルメント状態が壊れていくに連れ、下がっていくことになる。そこで、ある量子系にある 2qubit の状態がどの程度絡み合っているかを数値的に示すために事象の同時発生を意味する Concurrence を定義し、任意の状態  $|\Phi\rangle$  での Concurrence を求め、その変化について議論することになる。

2 準位原子を考え、励起状態を  $|1\rangle$ 、基底状態を  $|0\rangle$  で表し qubit と見做すことにする。一つの 2 準位原子の場合、励起状態にある原子はある確率  $\Gamma$  で光を放射 (自然放射) し  $e^{-\Gamma t}$  の確率で励起状態  $|1\rangle$  に留まり、 $1 - e^{-\Gamma t}$  の確率で基底状態になる。それらを踏まえて二つの 2 準位原子の自然放射を考え、純粋状態や混合状態を含めた様々な初期条件から密度演算子  $\rho(t)$  を計算し、具体的に Concurrence を求めた。

求めた Concurrence をグラフにプロットして各々の結果について検討した結果、初期条件が混合状態の時、Concurrence の値は指数関数的に 0 に収束する、または Concurrence の値は有限の  $t$  で 0 になることがわかった。(突然死) 実は「エンタングルメントの突然死」は 2006 年に J.H.Eberly と Ting Yu によって発見されている。しかし彼らの計算と同様に、私達が考えた初期条件である混合状態も結果として突然死は起きた。

また、有限温度の場合ではエンタングルした qubit はどうなるのか、Concurrence は時間的にどう変化するのかを調べるため、まず一つの 2 準位原子の場合を考える。励起状態にある原子はある確率で光を放射 (自然放射) して基底状態になり、基底状態にある原子も光の吸収を行い不変には保たれない。それらも踏まえて 2 準位原子が二つの場合を考え、純粋状態を初期条件として密度演算子  $\rho(t)$  を計算し、具体的に Concurrence を求めた。求めた Concurrence をグラフにプロットした結果、エンタングルメントは突然死した。このことは本研究を着手する上で満足する結果を得たといえる。

主な結論として、量子エンタングルメントの有用性を調べた結果、部分的エンタングルメント状態では、量子エンタングルメント状態は有用だとは言いきれない。二つ目、温度  $T = 0$  でも有限温度でも初期条件  $\rho(0)$  によって Concurrence の値は有限の  $t$  で 0 になることがあり、エンタングルメントは突然死する。今後最大の課題として、エンタングルメントが突然死するという物理的理由を解明することである。