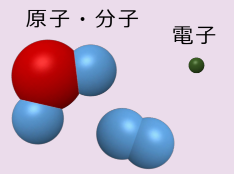
はじめに ―― 量子力学と量子情報

P. Lab.

量子力学とは

ミクロなものの振る舞いは、マクロなものの振る舞いとは大きく違っています。そんなミクロな世界の法則を記述するのが、**量子力学**という学問です。
20世紀前半に建設され、現在では物理学・化学・工学を広く支える理論的基盤になっています。

マクロなもの
（日常的な大きさのもの）



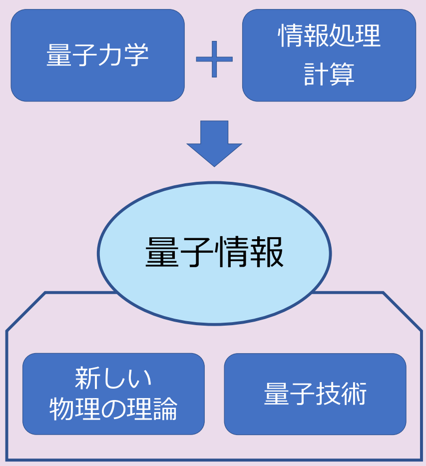
ミクロなもの
（きわめて小さなもの）

ミクロの世界には「測定による対象の乱れ」「量子ゆらぎ」「状態の重ね合わせ」「エンタングルメント」などの**不思議な性質**があります。これらには一見不合理な部分もあり、初期にはいろいろな論争がありました。
→ ポスター「量子力学の基礎」「エンタングルメント」「量子測定」「不確定性関係」

量子力学はこうした不思議な性質を取り入れて作られました。ところがあまりに良くできていたので、不思議な性質を意識しないで使えてしまうのです。そのため応用が進んで成果を挙げても、不思議な性質については**よくわからない部分が残ったまま**でした。

量子力学と量子情報

こうした不思議な性質に正面から取り組んで、**情報処理**や**計算**に応用したら何ができるだろうか――こんな試みが20世紀後半に誕生しました。**量子情報科学**（または**量子情報**）と呼ばれる分野です。



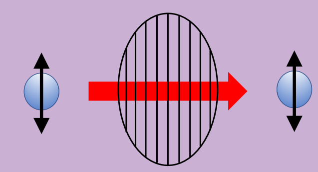
この試みが発展するにつれて、不思議な性質の**理解が深まって**きました。今ではそこに大きな不合理がないこともわかっています。
こうした理解は**新しい物理の理論**を生み出し、日々発展が続いています。
→ ポスター「デコヒーレンス」「熱力学と量子力学」
「因果順序と量子情報処理」

また情報処理や計算への応用も花開き、「量子コンピューター」「量子暗号」「量子通信」といった**量子技術**の理論が生まれました。現在では部分的に実現も始まっています。
→ ポスター「量子コンピューター」

量子力学の基礎

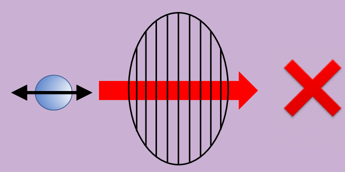
光子の偏光

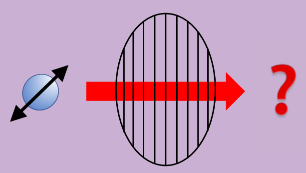
振動面が特定の方向に偏った光を偏光と言います。偏光を偏光板に通すと、互いのなす角度によって偏光板を通り抜ける光の強度は変化します。



同様に、光の粒子である光子も偏光します。偏光した1つの光子を、縦偏光の光を通過させる偏光板に通すことを考えてみましょう[1]。

まず、縦方向に偏光した光子は、その偏光板を必ず通過します。また、横方向に偏光した光は、偏光板を通過することはありません。では、斜め45°に偏光した光は偏光板を通過することができるのでしょうか。





実は、それはやってみるまでわからないのです。斜め45°偏光の光子を縦偏光の偏光板に当てると、光子は50%の確率で偏光板を通過します。しかし、その光子が偏光板を通過できるかは、事前には一切決まっておらず、実際にやってみるまでわからないのです。

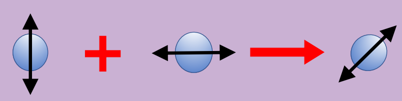
このように、やってみるまでわからない、言い方を変えると、測定してみるまで測定結果がわからない物理量が存在するということに、古典物理学の世界観とは異なった、量子力学の本質があります。

量子力学の枠組み

斜め偏光の光子が縦偏光の偏光板を通過できるかはやってみないとわからないように、一般に量子力学においては、すべての物理量(e.g.偏光の向き)が定まった値を持つことはありません。これは、すべての物理量が測定に独立して確定した値をもつとする古典物理学の世界観とは大きく異なります。量子力学の世界では、物理量の値は測定をすることによって初めて決まり、事前に予言できるのは、物理量の測定結果の確率分布だけなのです。

そこで、量子力学では、その系の状態を、物理量の確率分布の一覧を表すものとします[2]。そして、通常それは状態ベクトルというベクトルで表されます。光子の偏光の例で言うと、縦偏光の光子の状態は$|0\rangle$、横偏光の光子の状態は$|1\rangle$と表すことができます。ここで、$|0\rangle$と$|1\rangle$は互いに直交する二次元の単位ベクトルです。

また、このとき、斜め45°に偏光した光子の状態は$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)$と表されます。これは、ちょうど縦偏光$|0\rangle$と横偏光$|1\rangle$の中間の状態であり、そのような状態を作れることを重ね合わせの原理と言います。



量子状態から、物理量の測定結果の確率分布が分かります。例えば、偏光した光子が縦偏光の偏光板を通り抜ける確率は、状態ベクトルと$|0\rangle$との内積の絶対値の二乗で表されます。具体的に計算してみましょう。縦偏光の光子$|0\rangle$、横偏光の光子$|1\rangle$、斜め45°偏光の光子$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)$と$|0\rangle$との内積の絶対値の二乗はそれぞれ1、0、$\frac{1}{2}$となります。これらの確率は、実験で確認された透過確率と一致します。

参考文献
[1]沙川貴大「物理学班論」(東京大学前期課程の講義, 2018)
[2]清水明,「量子論の基礎」(サイエンス社, 2004)

エンタングルメント

エンタングルメントとは

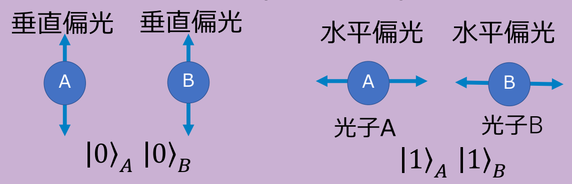
エンタングルメントとは量子多体系の古典では説明することのできない相関のことです。

系Aの状態$|\psi\rangle_A$と系Bの状態$|\phi\rangle_B$があったときに、系A,系Bを一つの系とみなした全体系ABの状態を

$$|\psi\rangle_A \otimes |\phi\rangle_B = |\psi\rangle_A|\phi\rangle_B = |\psi\phi\rangle_{AB}$$

と表せることが知られています。(積状態)

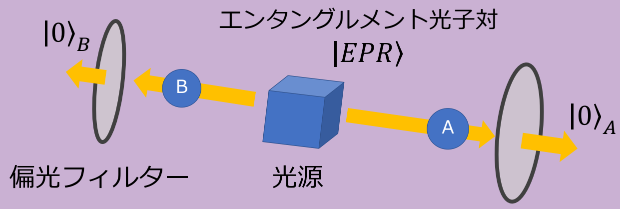
例. 2つの量子ビット（光子の偏光）



量子力学の重ね合わせの原理により全体系ABに次のような状態があり得ます。

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle_A\,|0\rangle_B + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle_A\,|1\rangle_B$$

この状態は積状態で記述することができず、このような積状態で記述不可能な状態をエンタングル状態と呼んでいます。



光子Aの偏光を測定し、$|0\rangle_A$（水平偏光)が観測されたとすると、量子状態は$|0\rangle_A\,|0\rangle_B$に収縮され、光子Bの偏光が分かります。観測される偏光の方向によらずこのような関係は成り立ちます。この例のように、エンタングル状態では部分系A,Bで相関があるのです。

エンタングル状態で実現される相関は、局所実在論（遠方で起こった現象の影響が直ちに伝わることはなく、また、全ての物理量は観測に依らずどの瞬間でも定まっていること）を仮定していた古典物理学における相関の上限を超えることができます(ベルの不等式の破れ)。実際にそのような強い相関は実験的に検証されており、これを記述できるのが量子力学の特長です。

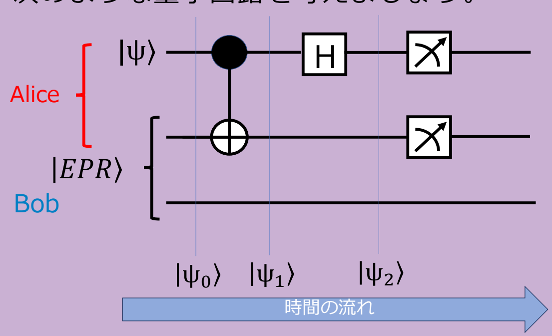
量子テレポーテーション

AliceとBobの二者を考えます。二人は次の2量子状態(EPR pair)を持って離れます。

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

この状況下でAliceはある1量子状態$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$を古典通信のみを用いてBobに伝えることができます。これを量子テレポーテーションと言います。

次のような量子回路を考えましょう。



このとき各場面での量子状態は次のようになります。

$$|\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + b|1\rangle(|00\rangle + |11\rangle))$$

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + b|1\rangle(|10\rangle + |01\rangle))$$

$$|\psi_2\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle(a|0\rangle + b|1\rangle) + |01\rangle(a|1\rangle + b|0\rangle) + |10\rangle(a|0\rangle - b|1\rangle) + |11\rangle(a|1\rangle - b|0\rangle))$$

もしAliceが測定によって00という結果を得たならこの時Bobの状態は$a|0\rangle + b|1\rangle$と決まります。これはまさに伝達しようとした状態$|\psi\rangle$そのものです。またもしAliceの結果が01のとき、Bobの状態は$a|1\rangle + b|0\rangle$となりますが、X gate（$|0\rangle$を$|1\rangle$に、$|1\rangle$を$|0\rangle$に変換するゲート。詳しくは解説記事参照。）を通すことで目的の状態$|\psi\rangle$を得ます。同様にしてAliceの結果が10、11のときも適切な操作によりBobは目的の状態$|\psi\rangle$を得ることができます。AliceはBobに目的の量子状態を確実に伝えることができるのです。ここで注目したいのは連絡手段があくまで古典通信であることです。超光速の情報伝達はやはり許されないのです。

参考文献 Michael A. Nielsen and Issac L. Chuang (2010), *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition"*, Cambridge: Cambridge University Press

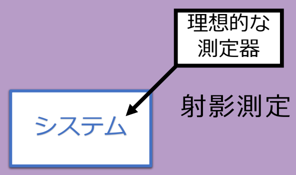
量子測定

P. Lab.

射影測定

量子論における測定は、古典論の測定と根本的に異なっています。古典論では、すべての物理量は定まった値を持っており、測定とは、観測者が**その定まった物理量の値を知ること**であると考えることができます。しかし、量子論において、すべての物理量が定まった値を持つことはありません。量子論における測定は、観測者が**測定値をひとつ得る行為**とされています[1]。全く同じ状態に対して同じ物理量の測定を行ったとしても、測定結果は一般に毎回異なったものになり、測定結果はある確率分布に従います。

量子測定の一つの定式化の仕方として、**射影測定**と呼ばれるものがあります[2]。これは、理想的な測定器が被測定系(システム)を観測するときに用いられる定式化です。通常の量子力学の講義や教科書で扱う測定の大部分がこの射影測定になります。



この測定の数学的表現は次のようになります。状態$|\psi\rangle$に物理量$\hat{Q} = \sum q \widehat{P_q}$(右辺は$\hat{Q}$の固有値分解)の射影測定を行ったとき、

$$\text{測定結果が}q\text{になる確率}:\langle\psi|\widehat{P_q}|\psi\rangle$$

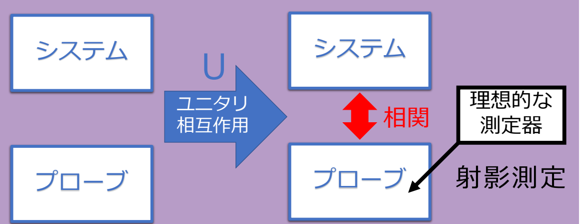
$$\text{そのときの測定後の状態}: \frac{1}{\sqrt{\langle\psi|\widehat{P_q}|\psi\rangle}}\widehat{P_q}\ |\psi\rangle$$

になります。これより、全く同じ測定を続けて行えば、測定結果は必ず同じになることがわかります(**射影仮説**)[3]。射影仮説を満たすという意味で、射影測定は理想的な測定であり、射影測定は**理想測定**とも呼ばれています。

間接測定

実際の実験室で行われている量子測定の多くは、実は射影仮説の成り立たない非理想的な測定です(e.g.光子数測定)[4]。このような測定も含めたより一般的な測定は**一般化測定**と呼ばれており、数学的には**測定演算子**と呼ばれる演算子の組で定式化されています[2]。

一般化測定を実行することを考えてみましょう。ここでは、システムの他に、**プローブ系**を導入します。まず、システムとプローブをユニタリ相互作用させ、理想的な測定器によってプローブを射影測定します。システムとプローブは、ユニタリ相互作用によって相関が生じています。そのため、プローブの射影測定によって、間接的にですがシステムの情報を読み出すことができます。



このような測定方法を、**間接測定**といいます。

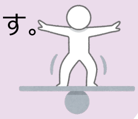
間接測定モデルは、実はすべての一般化測定を表現できることが数学的に示されます[5]。つまり、間接測定は、物理的に可能なすべての測定を表現できるのです！例えば、理想的でない測定器による測定は、測定器自体をプローブ系と理想的な測定器に分割して考えると、間接測定に帰着できます。

参考文献
[1] 清水明,「量子論の基礎」(サイエンス社, 2004)
[2] 沙川貴大,上田正仁「量子測定と量子制御」(サイエンス社、2016)
[3] 小澤正直,「量子と情報」(青土社, 2018)
[4] M. A. Nielsen and I. L. Chuang,Quantum Computation and Quantum Information 10th Anniversary Edition(Cambridge University Press, 2010)
[5]石坂智,小川朋宏,河内亮周,木村元,林正人「量子情報科学入門」(共立出版, 2012)

不確定性関係

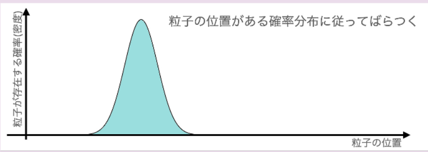
P. Lab.

何かを良くしようとすると別の何かが上手くいかなくなる……こんなことってよくありますよね？実は物理の世界にもこんなことがあります。これからご紹介する不確定性関係とは、シーソーのような、「あちらを立てればこちらが立たず」といった、トレードオフの関係性のことです。

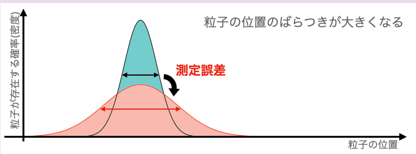


量子ゆらぎ・誤差・擾乱

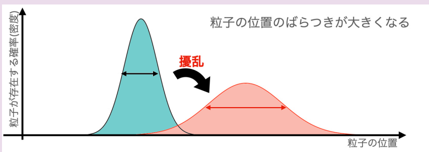
量子ゆらぎ：全く同じようにして作ったミクロなものを何個か用意し、それらをどんなにうまく測定をしても、測定するたびにその結果の値は異なります。この自然にある本質的な不確定性を**量子ゆらぎ**と呼びます。



測定誤差：一方で人間が測定を行うとき、技術的な問題であったり、他に制約があったりということを考えると、いつも上手い測定ができるとは限りません。つまり、量子ゆらぎよりも余計に大きな誤差が付いてしまいます。この人間が行う測定に伴う誤差を**測定誤差**と呼びます。



擾乱：話は変わって、電子のようなミクロなものに光を当てて位置を測定すると、電子の運動の向きや速さがランダムに変わってしまいます。このようにして、ある一つの量についての測定によって別の量のゆらぎが大きくなってしまいます。これを測定による**擾乱(じょうらん)**と言います。



様々な不確定性関係

ある量について、量子ゆらぎや測定誤差を小さくすると、必ず別の量の量子ゆらぎ、測定誤差、擾乱が大きくなってしまいます。これを「不確定性関係」と呼びます。

以下では様々な不確定性関係の中から、筆者が思う重要なものをいくつかを選んで紹介していきます。

それぞれの詳細は解説PDFをご覧ください!

ハイゼンベルグ[1]
測定誤差と擾乱の不確定性関係。

ケナード・ロバートソン(KR)[2,3]
二つの量の量子ゆらぎについての不確定性関係。
不確定性原理とも呼ばれる。

シュレーディンガー [4]
二つの量の量子ゆらぎについての不確定性関係、KRの一般化。

アーサーズ・グッドマン(AG)[5]
二つの量の測定誤差についての不確定性関係。

小澤①[6]
二つの量の測定誤差についての不確定性関係。
AG不等式を拡張した。

小澤②[7]
測定誤差と擾乱の不確定性関係。①,②共に、測定に物理的な意味がないような場合も含んでしまっているという批判もある。

渡辺・沙川・上田[9,10,11,12]
測定誤差同士、測定誤差と擾乱 の不確定性関係。
量子推定理論を用いて測定誤差、擾乱を定義し、AG不等式よりも強いものを得た。上の小澤の不等式についての批判を解決している。

李・筒井[13,14]
幾何学的な定式化によりKR, AG, 小澤の不等式すべてを含む、さらに強い不等式を得た。小澤の不等式を含んでいることから、物理的な意味については今後議論がなされるのではないか(筆者の個人的な予想です)。

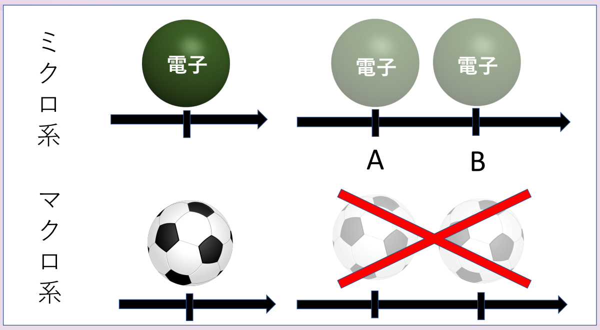
参考文献
[1] W. Heisenberg, Zeitschrift fr Physik A Hadrons and Nuclei 43, 172 (1927)
[2] E.H. Kennard, Zeitschrift fr Physik A Hadrons and Nuclei 44, 326 (1927)
[3] H.P. Robertson, Phys. Rev. 34, 163 (1929)
[4] E. Schrödinger, Proc. Prussian Acad. Sci. Phys. Math. Sect. XIX, 293 (1930)
[5] E. Arthurs, M.S. Goodman, Phys. Rev. Lett. 60, 2447 (1988)
[6] M. Ozawa, Phys. Rev. A 67, 042105 (2003)
[7] M. Ozawa, Phys. Lett. A 320, 367 (2004)
[8] M. Ozawa, Ann. Phys. 311, 350 (2004)
[9] Y. Watanabe, T. Sagawa, M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 104, 020401 (2010)
[10] Y. Watanabe, T. Sagawa, M. Ueda, Phys. Rev. A 84, 042121 (2011)
[11] Y. Watanabe, M. Ueda, arXiv:1106.2526 (2011)
[12] Y. Watanabe, "Formulation of Uncertainty Relation Between Error and Disturbance in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory" Springer Science & Business Media (2013).
[13] J. Lee and I. Tsutsui, arXiv:2002.04008 (2020).
[14] J. Lee and I. Tsutsui, arXiv:2004.06099 (2020).

デコヒーレンス

P. Lab.

開放系

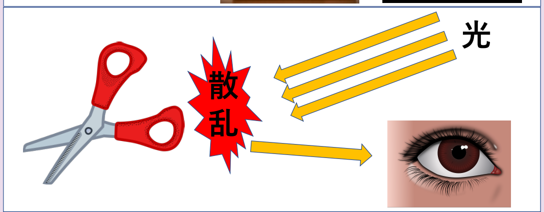
ミクロな系では状態が重ね合わさったような状態が存在します。（「量子力学の基礎」ポスター参照）例えば電子がAの位置にいる状態とBの位置にいる状態の重ね合わせを表したのが右の図です。



しかし、私たちは日常の中で、このような「状態が重ね合わさった状態」を見たことがありません。

これはどうしてでしょうか。

注目系（液体）と外部（外気）が影響を及ぼしあい、等温になる例



この問題を解決するには、**注目する系が外部と影響を及ぼしあうこと**を考慮する必要があります。

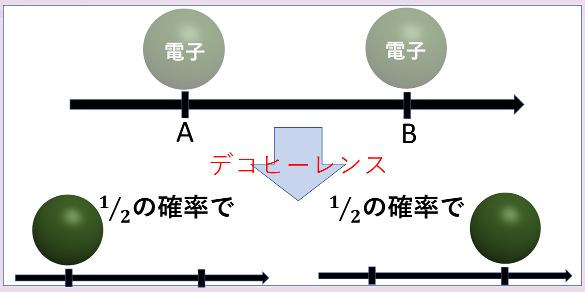
例えば、私たちは「物を見る」とき、物に当たって散乱された光を見ています。これを言い換えると、私たちが「見ている物」は全て、光（＝外部）と互いに影響を及ぼしあっていると言えます。このように、私たちの身の回りにある系のほとんどは、実はその外部とお互いに影響を及ぼしあっているのです。

このような外部と影響を及ぼしあう系を**開放系**と呼びます。

「重ね合わせ」の消失

私たちの身の回りのほとんどの系では、この外部からの影響によって、**重ね合わせの状態がすぐに重ね合わせのない状態に変化**してしまいます。

（変化後の状態は、古典混合状態という、重ね合わせの状態とは全く異なった状態と見ることができます。）



このように状態の重ね合わせの性質が失われることを**デコヒーレンス**と言います。デコヒーレンスは注目する系や外部からの影響の違いにかかわらず、様々な系で起こります。状態の重ね合わせによる不思議な性質を日常生活の中であまり見られないのは、そのせいなのです。

デコヒーレンスは、ミクロな世界特有の性質を使って計算を行う量子コンピュータにとっては、大きな困難になります。量子コンピュータをはじめとする量子技術の開発には、デコヒーレンスが起こりにくいような特別な系を使う必要があるのです。

現在、様々な「デコヒーレンスが起こりにくい系」を使った量子コンピュータの開発が進められていますが、今のところ完全に理想的な量子コンピュータはできていません。この困難さは「デコヒーレンスが起こりにくい系」がどれほど稀であるかを示しているとも言えます。

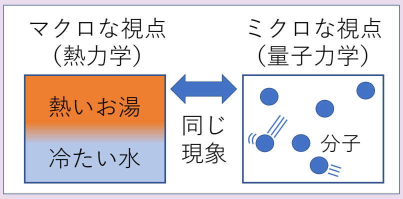
参考文献:H.-P.Breuer and F.Petruccione, The Theory of open quantum system chap.3 & 4, Oxford University Press (2006).
T.D.Ladd et.al Quantum Computers, Nature 464, 45–53 (2010)

熱力学と量子力学 —— ミクロとマクロ

P. Lab.

熱力学——マクロな視点の物理

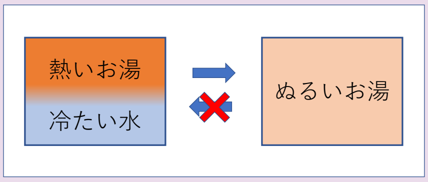
[1] 田崎晴明, 統計力学 I, 培風館 (2008).



ミクロな視点で現象を扱う量子力学に対して、マクロな視点で扱う物理学が**熱力学**です。

マクロな現象はミクロなものたちが集まってできているので、同じ現象を量子力学と熱力学の両方から眺めることができます。しかし2つの視点はしばしば一見矛盾しており、長い間問題となっていました[1]。

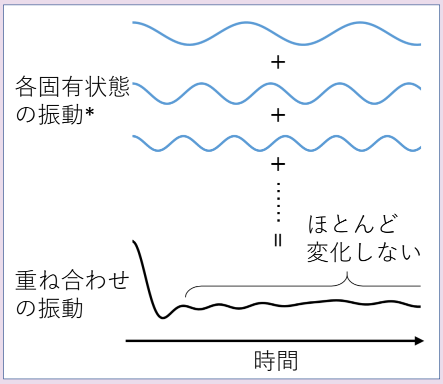
マクロな現象の最大の特徴は、孤立した系をしばらく放っておくとマクロに見て全く変化しない状態（**平衡状態**）に落ち着くこと、そして**逆戻りできない**ことです。こうした特徴は、ミクロの量子力学からみるとどうつながるでしょうか？



ミクロとマクロの矛盾？

[2] P. Bocchieri, A. Loinger. Quantum recurrence theorem. Physical Review, 107(2), 337 (1957).
[3] P. Reimann. Foundation of statistical mechanics under experimentally realistic conditions. Physical review letters, 101(19), 190403 (2008).

量子力学によればすべての現象は逆戻り可能（**時間反転対称**）であり、さらにいつかは**最初の状態に戻ってくる**（**量子回帰**）ことが知られています[2]。これは先述の熱力学の特徴と矛盾しているのでしょうか？ そうではありません。そのカギは、マクロな現象はあまりに複雑だということです。



*正確には各固有状態のペアの振動

量子力学によれば、基本となる状態（**固有状態**）はすべてそれぞれの周期で振動しています。マクロな現象はとても複雑なため、必ずきわめて多数の固有状態の重ね合わせ・混合になっています。それら（正確にはそれらのペア）がばらばらな周期で振動するので、全体としてはある意味で**平均化され、ほとんど変化しない**ように見えるのです[3]。

たまたま振動が揃ったときには、たしかに再び元へ戻ってきます。しかし、マクロな系は非常に多数の重ね合わせであるため、揃うのは（宇宙年齢をも超えた）**はるか未来**のことです。そのため、現実的な時間の中では熱力学と整合するのです。

開放系の状態遷移

[4] G.Gour et. al The resource theory of informational nonequilibrium in thermodynamics Physics Reports 583 1-58 (2015).

熱力学ではさらに、外部と相互作用のある系（**開放系**）を扱うことができます。外部との相互作用には無数の可能性があり、仕方次第で様々な状態遷移を起こし得ます。しかし、外部環境の温度Tと、相互作用によって外部から系に移る熱Q（相互作用に関する情報）が決まれば、あり得る状態遷移に次のように制限をつけることができます（**熱力学第二法則**）。

$$S(\text{終状態}) - S(\text{初期状態}) \geq \frac{1}{k_B T} Q$$

Sは、**エントロピー**という状態の関数。k_Bは定数。

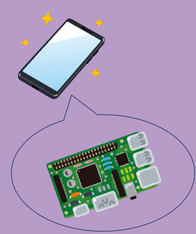
マクロ系の平衡状態間の遷移は熱力学のメインテーマであり、昔から研究されてきました。近年では、量子力学の観点からミクロ系の非平衡状態間の遷移についての制限の研究が進められています[4]。

因果順序と量子情報処理

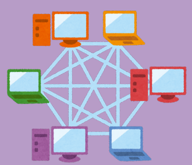
P. Lab.

情報処理における因果順序

「困難は分割せよ」



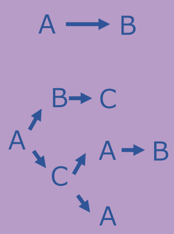
これはデカルトの有名な言葉ですが、私たちの身の回りにある情報端末は、これを巧みに使って複雑な処理を行なっています。情報端末の内部には色々な回路が入っていますが、それを極限まで分解していくと、スイッチなどの非常に単純な部品から構成されていることが分かります。それらの小さな計算をつなぎ合わせることで様々な計算を行っています。ある意味では、その繋げ方が計算の本質と言えます。



また、別の例として、分散システムというものについて説明します。これは、複数台のコンピュータをネットワークで接続し、それぞれのコンピュータが計算した結果を順番に通信し合うことで巨大な計算を行うシステムです。この例では、通信を繋げることで巨大な計算を行っています。

上の二つの例のような、計算や通信の繋げ方のことを**因果順序**といいます。普通の因果順序はグラフを使うことで表現できます。例えば、「計算Aをした後、計算Bをする」という因果順序は右図のように書けます。

因果順序を解析することで、計算に必要な時間や通信回数がわかります。例えば、右図の因果順序を持つ回路は、1ステップにかかる時間が1秒だとすると4秒で計算できることが分かります。そのため、因果順序についての理解は応用上重要です。

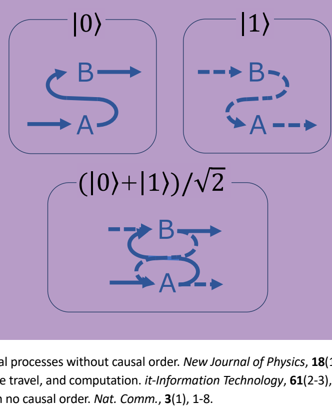


因果律の破れ

仮想的に、タイムスリップをするとどのような因果順序が可能かについて考えてみましょう。例えば、計算Aをした後に計算Bをし、タイムスリップして計算Bの結果を計算Aをする前の人に伝えて、それに基づいて計算Aを行うとします。その因果順序は、右図のようになり、ループができることが分かります。原因と結果が決まらなくなっているので、このことを**因果律の破れ**といいます。[1,2] 論理的な矛盾（タイムパラドックス）が起こらないようにすることも可能で、理論的に研究されています。

量子スイッチ

因果順序の量子的重ね合わせについて理論的には考えることができます。例えば、A→BとB→Aという二つの因果順序を量子的に重ね合わせることができます。これを**量子スイッチ**と呼びます。[3] 量子スイッチを用いることで計算に必要な時間や通信回数を減らせることがあるため、将来的な応用が期待されます。[4,5] また、状態の量子重ね合わせは今までよく研究されてきましたが、因果順序の量子重ね合わせについては最近研究され始めたばかりで、まだ分かっていないことが多いです。それを理解することで量子性の深い理解につながると考えられます。



[1] Baumeler, Ä., & Wolf, S. (2016). The space of logically consistent classical processes without causal order. *New Journal of Physics*, **18**(1), 013036.
[2] Baumeler, Ä. (2019). Causal loops: Logically consistent correlations, time travel, and computation. *it-Information Technology*, **61**(2-3), 135-141.
[3] Oreshkov, O., Costa, F., & Brukner, Č. (2012). Quantum correlations with no causal order. *Nat. Comm.*, **3**(1), 1-8.
[4] Araújo, M., Costa, F., & Brukner, Č. (2014). Computational advantage from quantum-controlled ordering of gates. *Phys. Rev. Lett.*, **113**(25), 250402.
[5] Guérin, P. A., Feix, A., Araújo, M., & Brukner, Č. (2016). Exponential communication complexity advantage from quantum superposition of the direction of communication. *Phys. Rev. Lett.*, **117**(10), 100502.

量子情報班

量子コンピューター

P. Lab.

量子コンピューターとは？

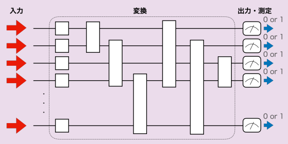
量子コンピューターとは、簡単にまとめると、量子力学を使って計算をする機械のことです。今私たちが普段使っているコンピューターは、量子的な性質は使っていません。
では、もし量子力学で許される全てを使って計算することができたら…すごいことになるとは思いませんか？

量子力学の全てを用いることができる計算機をユニバーサル量子計算機と呼びます。私たちは、まだユニバーサル量子計算機と言えるものを実用化することはできていません。

いろいろな量子コンピューター

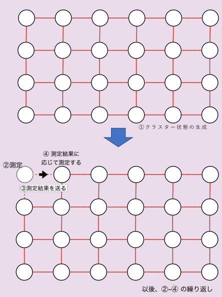
量子力学を使って計算していれば何でも量子コンピューターと呼べるので、ひとくちに量子コンピューターといってもいろいろなものを考えることができます。全部とはいきませんが、いくつかご紹介しましょう。

・回路型[1]



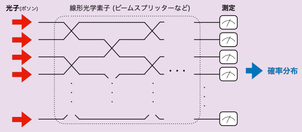
決まった複数量子ビットの入力に対して変換を繰り返し、最後にその出力に対して測定を行い、計算結果を出す。
最も基本的な型で、ユニバーサル量子計算機になる。

・測定型[2,3]



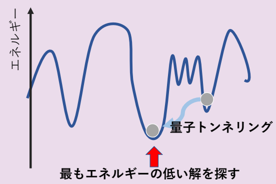
まず、クラスター状態と呼ばれるたくさんの量子ビットからなる量子状態を作る。次に１つ１つの量子ビットに対してうまく測定を行うことで計算を実行し、ユニバーサル量子計算機になる。
クラスター状態の生成以外は一個づつの量子ビットのみの操作だけで良いのが強み(複数個をまとめて操作するのは難しい)。

・ボソンサンプリング[4]



単一光子に対して限られた変換(線形変換)のみを行い、最後に測定を行い測定結果の確率分布を得ることで計算を行う。ユニバーサルではないが古典よりは強力とされる[5]。

・量子アニーリング[6]



最適化問題と呼ばれる種類の問題を解くのに特化しているが、ユニバーサル量子計算機になる[7]。
史上初めて商用化された量子計算機である D-Wave©D-Wave Systems Inc. は量子アニーリングを実装しているとされている。

量子コンピューターは本当にすごいのか？

冒頭で、量子力学のルールを存分に使えば高い計算能力を持った計算機を作ることができるのではないか？という導入をしました。実際、ほとんどの専門家は量子コンピュータが古典コンピュータよりも高い計算能力を持っているだろうと信じています。しかし、本当に量子コンピュータが今の計算機よりも高い計算能力を持っているかどうかは、厳密には示されていません。
現在盛んにされている研究として、量子コンピューターで、現在知られている古典の計算方法よりも良い計算方法を開発する、そして実現するというものがあります。すなわち、量子コンピュータが優れていることの証拠集めをしているのです。最近ニュースにもなった Google の量子スプレマシー[8]もその１つです。

量子力学を計算に使う強みの１つは、本質的に確率的であるということです。古典コンピューターでは確率分布を計算してから乱数を発生させる必要がありますが、量子力学は確率分布を知ることなく量子状態を作り出し、測定を行うことで確率分布からサンプリングを行うことができます。このようなサンプリングを用いた量子アルゴリズムは近い将来実現するであろう中規模な量子コンピューターでも計算可能と考えられており、量子物理の解析や機械学習への応用も提案されています。

参考文献

[1] Nielsen, M. A., & Chuang, I. (2002). Quantum computation and quantum information.
[2] Raussendorf, R., Browne, D. E., & Briegel, H. J. (2003). Measurement-based quantum computation on cluster states. *Physical review A*, *68*(2), 022312.
[3] Briegel, H. J., Browne, D. E., Dür, W., Raussendorf, R., & Van den Nest, M. (2009). Measurement-based quantum computation. *Nature Physics*, *5*(1), 19-26.
[4] Aaronson, S., & Arkhipov, A. (2013). Bosonsampling is far from uniform. *arXiv preprint arXiv:1309.7460*.
[5] Aaronson, S., & Arkhipov, A. (2011, June). The computational complexity of linear optics. In *Proceedings of the forty-third annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 333-342).
[6] Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. *Physical Review E*, *58*(5), 5355.
[7] Aharonov, D., Van Dam, W., Kempe, J., Landau, Z., Lloyd, S., & Regev, O. (2008). Adiabatic quantum computation is equivalent to standard quantum computation. *SIAM review*, *50*(4), 755-787.
[8] Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Burkett, B. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, *574*(7779), 505-510.