

## はじめに

量子力学の建設直後に、アインシュタインがボーアと量子力学の基礎の解釈を巡って鋭く対立したことは良く知られる。量子力学は相補性原理に基づく新たな自然観を提供するものと考えたボーアに対して、アインシュタインは同僚のポドルスキーとローゼンとともに、1935年に論文を提出して量子力学の「不完全性」を主張した。これがEPR論文である。EPR論文はわずか4ページの短い論文であるが、簡潔な論理展開によって「量子力学的な状態とはなにか」について深い疑念が表明された。ここで用いられた思考実験は「EPRパラドックス」として有名である。EPR論文の重要性をいち早く理解したシュレーディンガーは同年、「猫のパラドックス」を考案して量子状態（波動関数）の不可解な性質を議論し、その核心となる量子力学の性質を「量子もつれ（量子エンタングルメント）」と表現した。

EPR論文は、ボーアが反論の論文を提出したこともあり、その後30年あまり忘れ去られることになる。ふたたびEPR論文が注目を集めるようになったのは、1964年にベルによって「ベル不等式」の論文が提出された後のことであった。EPR論文では、物理学の理論が持つべき性質として物理量の「実在性」と、物理的な影響は遠隔的なものではないとする「局所性」が要請された。ベルは、もし我々の世界がそのような「実在性」と「局在性」を持つ理論によって記述されているのであれば、測定値の相関はある不等式を満たさなければならないことを示したのである。一方、量子力学はこのベル不等式を破る。つまりベルは、この不等式の成否を実験で観測することで、アインシュタインとボーアの論争が実験的に検証可能であることを示したのである。その後、ベル不等式が確かに破れていることが、さまざまな実験系で検証された。これは、我々の世界ではアインシュタインの追い求めた局所実在性が成立せず、その意味で量子力学の予言が正しいことを再確認したものとなっている。

しかし、話はそれだけにとどまらない。「ベル不等式の破れ」は、素朴な古典的世界観（実在論）からの決別が必須であることを強く示唆し、その後の量子力学基礎論に大きな影響を与えた。またベル不等式論文により、量子力学には古典力学では記述できない「非局所相関」が存在することが強く示唆された。このような非局所相関は現在では「量子もつれ」と総称され、ベル不等式論文以降、特に1980年代から量子情報処理の研究においておおいに注目されることとなった。1990年代から「量子もつれ」を利用した「量子通信」「量子コンピュータ」などの量子情報処理の応用が活発に議論され、理論・実験が爆発的に進展した

ことは、読者もよくご存知のことだろう。

ここで一つ興味深いデータを示そう。図1は、EPR論文およびベル不等式論文の引用回数の推移を年度毎にプロットしたものである。EPR論文は長らく全く引用されていなかったが、ベル不等式の論文（1964年）以降、特に1970年代に入ってから急速に両者の引用数が増加することがみてとれる。2000年代に入ってもその勢いは衰えるどころか、さらに引用件数を増やしている。EPR論文・ベル不等式論文ともに、年を経るほど引用件数が増えるという稀有な論文なのである。この引用件数の推移は、上述の歴史的経緯、つまりEPR論文は出版から30年近く評価がなされなかったこと、ベル不等式論文によって着目されるようになったこと、その後の「量子もつれ」の研究の急速な進展などを、すべて物語っている。

2014年はベル不等式論文の出版から50周年の年である。この節目の年において、「量子もつれ」についての理解を深めることは意義あることであろう。「量子もつれ」は新聞報道でもお目にかかるほど有名なキーワードである一方で、専門家以外の研究者がその中身についてよく理解する機会がないのではないかと推測される。本小特集では「量子もつれ」および「ベル不等式」について、基礎概念の解説からはじめ、最新の研究動向までなるべくわかりやすい形で解説する。筒井氏にはベル不等式の初歩的な解説と最近の研究動向について、井元氏には量子もつれの理論的側面とその応用について、竹内氏には量子光学系における量子もつれ生成の現状について、それぞれご執筆いただいた。各氏には力のかもった素晴らしい原稿を脱稿していただいた。執筆者の皆様のご尽力とご協力に、会誌編集委員会を代表して深く感謝申し上げます。

（2014年10月6日原稿受付、

文責：加藤岳生）

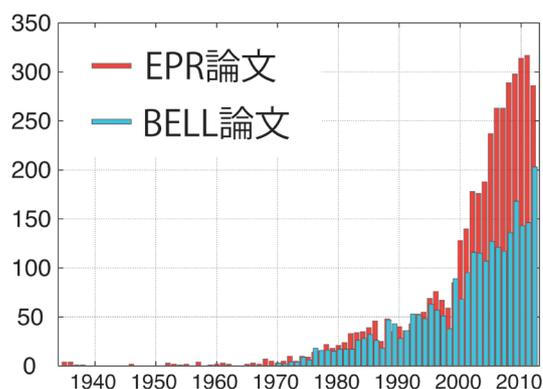


図1 EPR論文とベル不等式論文の引用回数の推移。

## 1. 「ベル不等式:その物理的意義と近年の展開」 (筒井泉著, 836 ページ～)

すでに述べたように、アインシュタインとボーアとの間には、量子力学の基礎の解釈を巡って鋭い対立が生じた。アインシュタインがボーアらのコペンハーゲン解釈に不満を抱いたのは、それが遠隔作用を禁じた局所性の破れを意味し、さらには物理量の実在性まで否定することになるとの直観からであったが、当時、これらの疑念は概念的なもので科学的な議論にはなじまないものと考えられた。1964年にこの膠着状況を打開し、その論点を実験的に検証可能であることを発見したのがベルであった。すなわち、ベルはアインシュタインが想定した実在性や局所性を持つ「完全な理論(隠れた変数の理論)」と量子相関の生み出す物理現象との矛盾を、ベル不等式という検証可能な形に表現することによって、問題を哲学的対象から科学的対象に引き戻したのである。本稿では、まずこれらの問題の背景を歴史的経緯を追って説明し、EPR論文の議論に基づいてベル不等式を導出するとともに、その物理的意義を明らかにする。さらに、1980年代以降、精力的に続けられているベル不等式の種々の検証実験の現状を報告する。量子力学の示唆する物理的実在は実験の設定などに依存する「状況依存性」を持つが、ベル不等式の検証結果は、たとえ状況変化が非局所(遠隔)的なものであっても、その依存性から通れられないことを示す。

## 2. 「量子もつれの基礎および量子情報や物理との関係」(井元信之著, 845 ページ～)

ジョセフソンをして20世紀最大の発見と言わしめたベル不等式による局所実在論の検証法提案(1964年)。それ以後ベル不等式の破れを示す実験はことごとくエンタングルメント(量子もつれ)が使われていることから、量子もつれはまずサイエンスとしての重要性にその存在意義があった。一方1980年代から研究が成長してきた量子情報処理で不可欠の要素として、量子もつれはテクノロジー上の重要性が注目されるようになった。まず量子コンピュータに必要であることは衆目の一致するところである。量子暗号については、たとえそれがユーザーにとって量子もつれを使わなくて済むタイプの量子暗号でも、量子もつれを使ったハッカーの攻撃にも耐性があることを示す必要がある。さらにユーザーが量子もつれを使うタイプの量子暗号は、提供された量子暗号装置が信頼できなくてもデータだけからプライバシーが守られているか検証ができる。このように量子情報テクノロジーにおいて量子もつれは、重要というより、ほぼその構成要素そのものとなっている。そして近年、さらにサイエンスとしての意義が追加されるようになってきた。物性や宇宙論の分野でエンタングルメン

トの言葉が飛び交うようになってきたことがそれである。

出自から80年ほど経つ量子もつれは、このように多方面の可能性が追究されているが、本稿ではその基礎的な概念について述べ、その発生のしかたや基本的な使われ方を紹介する。量子もつれは目の前から宇宙にいたるあらゆる所に存在するが、そのほとんどは制御不能の状態である。それでも何らかの指標や理論の道具として有益である。情報処理や計測応用のために量子もつれを制御するのは高度なテクノロジーが必要であり、せっかく発生しても油断すると散逸する傾向にある。そうさせないための工夫や、散逸しても、し切らないうちに濃縮し直す等の工夫も不可欠である。そういった研究の現状についても触れる。

## 3. 「多様な量子もつれの実現と新たな応用」 (竹内繁樹著, 852 ページ～)

量子もつれ状態とは、「2つ以上の系(粒子)の状態(波動関数または密度行列)が、それぞれ単独の状態の直積では表せない」ものを言う。量子もつれ状態として、スピン一重項状態が良く例に出されるが、本来はそのような状態だけに限られない、もっと幅の広い概念である。例えば、EPR論文で取り上げられているのは、「運動量」と「位置」という連続量に関する量子相関である。実際、最近の研究では、さまざまな物理量に関する量子もつれが実現されている。さらに、その発生方法についても、進展が著しい。光子の量子もつれ状態は、1990年代は、バルクの非線形光学結晶を用いたパラメトリック下方変換が用いられていたが、最近はより高い変換効率や高機能性を目ざした新しいデバイス開発や、他の物理過程の利用の研究が進められている。また、その応用についても、当初のベル不等式の検証実験から、量子暗号、量子テレポーテーション、量子計算などの量子情報通信処理、さらに最近では、高感度・高分解能な光計測などさまざまな応用が出現しつつある。

本稿では、これらのさまざまな「量子もつれ状態」の実現とその新しい応用をいくつか紹介する。まず、量子もつれ状態の新たな生成法として、量子もつれ状態を抜き出す光量子回路「量子もつれフィルター」を紹介する。つぎに、光子数に関する量子もつれ状態を利用した、標準量子限界を超えた位相測定感度の実現と、その原理を微分干渉顕微鏡に応用した「量子もつれ顕微鏡」を紹介する。三番目の例として、最先端の擬似位相整合素子技術を利用した素子を用いた、超広帯域周波数もつれ合いの実現とその光量子断層撮影への応用について紹介する。周波数相関を持つ光子対による2光子量子干渉信号は、媒質の群速度分散の影響を受けないため、これを利用することで高精度の光コヒーレンストモグラフィが可能になる。最後に、今後の展望について述べる。