

量子力学の非局所相関の検証に成功

—アインシュタインの問題提起に答えて—

酒井 英行 (物理学専攻 教授), 矢向 謙太郎 (物理学専攻 助手)

量子力学の基本原理の一つである「量子の絡み合い」を陽子対で確認することに成功した。この検証実験の詳細はすべて原著論文に譲り、ここでははじめに今回の実験にいたった歴史的経緯について述べ、次に成功した実験結果を図とともに述べる。

ミクロの世界を記述する量子力学では、これまで理論的予測において、実験結果と異なる例はひとつも知られていない。しかし、その理論的予測の中には日常的な感覚からは理解することがとても困難なものがある。そのような例に、「絡み合った状態」による「非局所相関」がある。この「非局所相関」とはAとBが「絡み合った状態」にあるときには、AとBが互いに宇宙の端と端に離れていてもAへの観測の結果が瞬時にBに影響を与えるというものである。1935年にアインシュタインは「物理的実在の量子力学的記述は完全か? (Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?)」という量子力学を批判する論文を書き、ポー

アらのコペンハーゲン解釈^{注)}をすどく批判した。このアインシュタインらの論文はEPRパラドックスとして知られている。その後、この批判の対象となった量子力学の欠点を、未知のパラメータ(変数)を導入することで補おうとする試み(「隠れた変数」理論と呼ばれる)がなされた。けれども、量子力学が正しいのか、隠れた変数理論を導入する必要があるのかの議論は、哲学論争のようであり、長いあいだ決着がつかないできた。

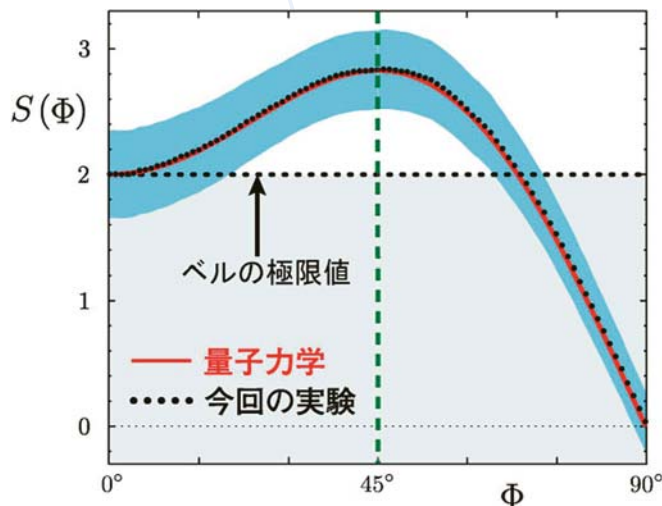
そのいっぽう、1964年になってJ.ベル(John S. Bell)が、「隠れた変数」理論の予言と量子力学の予言が完全には一致しない場合があることを発見した(ベルの不等式と呼ばれる)。これによって論争の続いたEPRパラドックスに実験的決着がつく可能性が生まれた。実験的検証には、「絡み合ったスピン状態」を用意することと「スピン相関」と呼ばれる測定を行わなければならないが、これらがひじょうに難しいため検証実験はなかなか実行されなかった。光を使った実験が数多く行われ、量子力学を支持する結果

が得られたが、光が質量を持たないことに起因する問題もあり、質量をもつ粒子によるベルの不等式の高精度な検証実験が待たれていた。

われわれは、原子核物理学で使われる核反応の技術を用い、質量をもつ陽子2つから成る絡み合ったスピン状態をほぼ100%の純度で生成し、そのスピン相関の高精度な測定に成功した。得られたスピン相関の測定値を図に示す。その結果は、45度のところで3標準偏差(99.3%の信頼度)でベルの不等式を破っていた。そのいっぽうで量子力学の予言値とはよく一致した。この結果は、アインシュタインらが量子力学の欠陥として批判した「非局所相関」が、強い相互作用をする陽子(フェルミ粒子)系においても存在することを示すものである。

絡み合い状態にある粒子対は、EPRペアと呼ばれるが、われわれの測定から、1) 陽子EPRペアが分裂して遠くに離れても、2) 多くの物質を通過しても、絡み合い状態が頑丈に維持されることも明らかになった。この絡み合い状態の頑丈さは、最先端の量子技術である、量子テレポーテーションや量子コンピュータなどへの応用に適した性質であり、将来の発展が大いに期待される。本研究は、H. Sakai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 150405, 2006に掲載されている。

(2006年10月10日プレスリリース)



■ 図：スピン相関の測定結果

注) コペンハーゲン解釈：量子力学では世界を波動関数で記述する。一般に波動関数は複数の波の重ねあわせで表現される。ボーアを中心とするコペンハーゲン学派は、波が重なった観測前の状態から、観測によって一つの波が確率的に選択されると提唱した。

世界最短の物理現象の観測

— アト秒化学の幕開け —

山内 薫 (化学専攻 教授), 沖野 友哉 (化学専攻 助手)

超短パルスレーザー光を用いれば、さまざまな高速な現象を、実時間で観測することが可能となる。しかし、単に100フェムト秒(1フェムト秒=10⁻¹⁵秒)程度のパルス幅をもつレーザー光を用いたポンププローブ法によって、分子内の原子間の距離が分子振動に伴って伸び縮みしたり、化学結合の切断に伴って広がっていく様子を観測しても、「化学反応がいかに進行するか」という物質科学の本質を解き明かすことはできない。そのためには、分子内をきわめて高速で動きまわる水素原子や、分子内の電荷分布の超高速変化を、アト秒(1アト秒=10⁻¹⁸秒)領域の時間分解能で追跡する必要がある。今回、本研究室と理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室は、アト秒領域の幅をもつ光パルスを窒素分子(N₂)に照射し、2光子クーロン爆発^{注1)}という非線形光学現象^{注2)}を観測し、この世界最短の物理現象を利用して、320アト秒のパルス幅をもつ超短パルス光の時間構造解明に成功した。

現在、多く使われている超短パルスレーザー光の波長は800nmであり、

そのパルス幅は、この光の波長の1周期である2.6フェムト秒よりも短くすることはできない。したがって、1フェムト秒を切るアト秒領域のパルス幅をもつレーザー光を発生させるためには、光の波長を真空紫外領域にまで短くする必要がある。われわれは、輝度の高いフェムト秒レーザー光をキセノン(Xe)気体中に集光して、極端紫外領域の波長をもつ高次高調波^{注3)}を発生させ、これらの光をフーリエ合成することによって、アト秒領域のパルス幅をもつ極短パルスの列を発生させた。

本研究では、2枚のSi平板を反射鏡として用いてレーザー光を2つに空間分割し、そのいっぽうのSi平板を高精度で移動させることによって、パルス間の遅延時間を変化させた。そして、この空間分割した光を集光し、窒素分子に照射したところ、空間分割した光が時間的に重なったときにはじめて、極端紫外領域の高次高調波の2光子吸収が起こることが突き止められた。すなわち、この2光子吸収という非線形現象に伴って、窒素分子からは2個の電子が放出され、窒素分子は2価のイオンとなり、クーロン爆発 $N_2^{2+} \rightarrow N^+ + N^+$ を経て2つの窒素原子イオンとなった。この窒素原子イオンを飛行時間型質量分析装置にて検出することによって、2光子クーロン爆発過程を同定した。これは、世界ではじめて観測された極端紫外光による2光子クーロン爆発過程である。

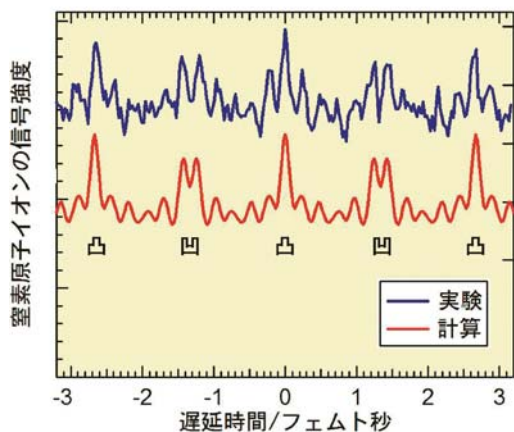
2つのアト秒パルス列の遅延時間を変化させ、窒素原子イオンの生成量を観測した結果、1.33フェムト秒の周期で増減することが明らかとなった。この観測から、アト秒パルス列の1つ1つのパルスの時間幅が320アト秒であることが

明らかとなった。この分子を用いたアト秒パルスの計測は、MEDUSA (Molecular Explosion Detector for UltraShort pulses in Attosecond) と呼ばれ (Okino *et al. Chem.Phys.Lett.*, **432**, 68, 2006), アト秒パルスの計測手法として汎用性の高いものである。

遅延時間のステップ幅をさらに短くして自己相関関数の測定を行ったところ、細かい増減の繰り返し構造があることが明らかとなった。この構造はパルス列を構成する光電場そのものを反映しており、図中の5つのパルスの内、真ん中と両端の3つは、ピーク中央が凸であるのに対して、残りの2つはピーク中央が凹になっていることが明らかとなった。すなわち、われわれはアト秒パルス列を構成する光電場の構造の直接観測に成功したことになる。そして、1.33フェムト秒ごとに並んでいる隣あうアト秒パルスの光電場の位相は π だけずれているということが世界で初めて明らかとなった。

この研究成果は、アト秒パルスの性質を明らかにしたと同時に、近い将来この光を用いて分子の超高速反応を観測および制御する「アト秒化学」への幕開けと位置づけられる。本研究は、Y. Nabekawa *et al., Phys. Rev. Lett.*, **97**, 153904, 2006 に掲載されている。

(2006年10月17日プレスリリース)



図：窒素原子イオンの信号強度を2つの高次高調波光の遅延時間を変化させ測定した結果。青線が実験値で、赤線が実測した高次高調波の分布から計算したものの。

注1) クーロン爆発：分子から2個以上の電子が剥ぎ取られると、プラス電荷間で大きなクーロン斥力が生じ、大きな運動エネルギーをもった2つ以上の原子イオンもしくは分子イオンに、分子が分裂する現象。

注2) 非線形光学現象：光の強度の増加に伴って信号強度が線形に変化しない光学現象の総称。ここでは、信号強度が光の強度の2乗に比例する現象。

注3) 高次高調波：強レーザー光を原子や分子に照射した場合に発生する波長がもとの整数分の1の短波長光の総称。

はじめて明らかにされた “メスとオス” のはじまり

— オス特異的遺伝子 “OTOKOGI” の発見 —

野崎 久義 (生物科学専攻 助教授)

人間社会の根底でもあり、煩惱の根源でもある“メスとオス”。これらのはじまりはどのようなものだったのであろうか。この基本的で重大な問題が最近、われわれの研究から解き明かされはじめた。

メスとオスは生物界で広く認められる性であり、配偶子が大きくて運動能力がない(卵)か、小さくて運動する(精子)かで決まる。単細胞生物等ではメスとオスの区別ができない性(同型配偶)も知られ、同じような配偶子が合体する。古くから同型配偶の生物からメスとオスの性をもつものが進化したと考えられていたが、これにかかわる遺伝子レベルの研究はまったくなかった。

クラミドモナスという単細胞性の緑藻類は同型配偶であり、マイナスの性(メス・オスが不明であるから便宜的にプラス・マイナスで異なる性を表す)は性特異的な *MID* 遺伝子によって決定され、マイナスはプラスに対して優性で、

プラスは *MID* 遺伝子の存在でマイナスに性が転換する。したがって、クラミドモナスのプラス (*MID* を欠く) が性の原型であり、マイナスは *MID* 遺伝子によってプラス型から派生したものと考えられていた。しかし、プラス・マイナスのどちらがメスまたはオスに相当するかは不明であった。これはクラミドモナスに近縁なメスとオスの性をもつ生物(群体性ボルボックス目のボルボックス・プレオドリナ等)で性に特異的な遺伝子が発見されていなかったことによる。

最近、神奈川県で発見したプレオドリナの新種 *Pleodorina starrii* はオス株だけで大量に精子を形成するので、オス特異的遺伝子を探索する格好の材料と思われた。独自に開発した *MID* 遺伝子の縮重プライマー^{注)}を用いて、さまざまな条件を検討した結果、精子の形成を誘導したオス株からオス特異的遺伝子 “*OTOKOGI*” (論文では *PlestMID*) を単離した。

“*OTOKOGI*” はオスだけがもつ遺伝子であり、精子形成時に強く発現し、“*OTOKOGI*” タンパクは成熟した精子の核に局在した。系統解析によると “*OTOKOGI*” はクラミドモナスの *MID* 遺伝子と共通の祖先をもち、

MID 遺伝子をもつ同型配偶のマイナスの性からオスが進化したと結論された。すなわち、性の原型はメスであり、オスは *MID* 遺伝子をもつので派生した性であると理解される。

“*OTOKOGI*” の発見は群体性ボルボックス目を用いた性の進化生物学的研究のブレークスルーでもある。今後、研究が進展し、メスとオスの起源がより具体的に遺伝子レベルで解明されることを期待する。

この研究は、H. Nozaki, T. Mori, O. Misumi, S. Matsunaga, T. Kuroiwa, *Current Biology*, **24**, 1018-1020, 2006 に掲載され、同号のハイライトとしても紹介された。論文の出版までたどり着いたのはひとえに立教大学と大阪大学の共同研究者の“俠気”によるものと感謝している。なお、材料のプレオドリナの新種は相模湖や津久井湖にて学部学生の実習の際に採集されたものである (Nozaki *et al.*, *J. Phycol.*, **42**, 1072-1080)。

(2006年12月19日プレスリリース)

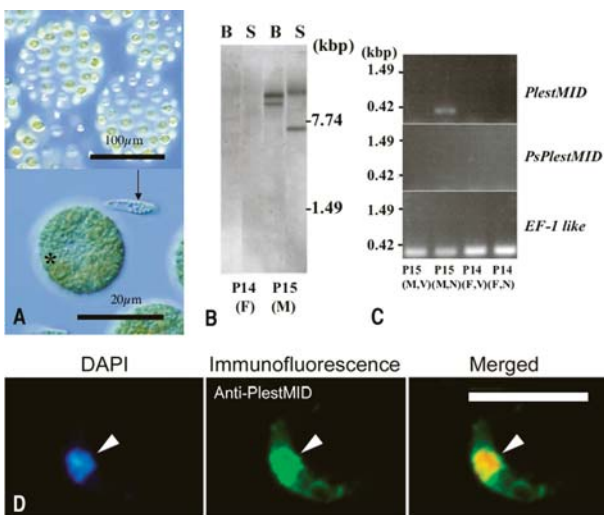


図1：群体性ボルボックス目のプレオドリナ (*Pleodorina starrii*) のオス特異的遺伝子 “*OTOKOGI*” (*PlestMID*) と偽遺伝子 (*PsPlestMID*)。 (Nozaki *et al.*, 2006, *Current Biology* 掲載の図)

A. 培養群体 (上段)、精子 (矢印) と卵 (米印)。

B. “*OTOKOGI*” はオス (M) だけがもつ遺伝子である (DNA ゲルプロット解析)。

C. “*OTOKOGI*” は精子がつくられるとき (M, N) に発現する (RT-PCR 解析)。 *EF-1 like* 遺伝子はコントロール。

D. “*OTOKOGI*” は精子の核 (矢印) で活動する (抗 *PlestMID* 抗体を用いた蛍光染色)。スケールは 5 μ m。

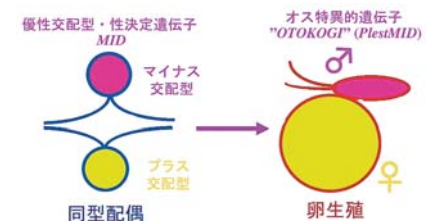


図2：本研究で明らかになったメスとオスへの配偶子の進化。今回発見されたオス特異的遺伝子 “*OTOKOGI*” はメスとオスが未分化である同型配偶の優性交配型の性を決定する “*MID*” から進化した。これは “メス” が性の原型であり、“オス” は性の派生型であることを示唆する。