

## 光物性基礎研究の一潮流へ

東京農工大学 名誉教授  
谷 俊 朗

### ◆ 経 歴 ◆

1976年：東京大学大学院博士課程修了 同物理工学科助手  
1978年：米国IBM San Jose研究所 博士研究員  
1982年：電子技術総合研究所 材料部主任研究官  
1991年：同材料科学部 光材料研究室長  
1998年：東京農工大学工学部 物理システム工学科教授  
2013年：定年退職 同先端物理工科学部門 名誉教授  
現在、芝浦工業大学工学部 非常勤講師 (～'18.3)

皆様は、“量子”や“量子力学”という言葉をごく見聞きしたことがあると思います。量子力学はミクロな世界の出来事を記述しますが、その基本ルールの大部分は、1930年代に概ね完成していました。宇宙の起源や素粒子の世界は別にしても、物質・材料で今更何があるのかと訝る向きもあるかと思いますが、存外そうでもなさそうなことを、遙か途上ですが、筆者のささやかな試みも交えて述べてみたいと思います。

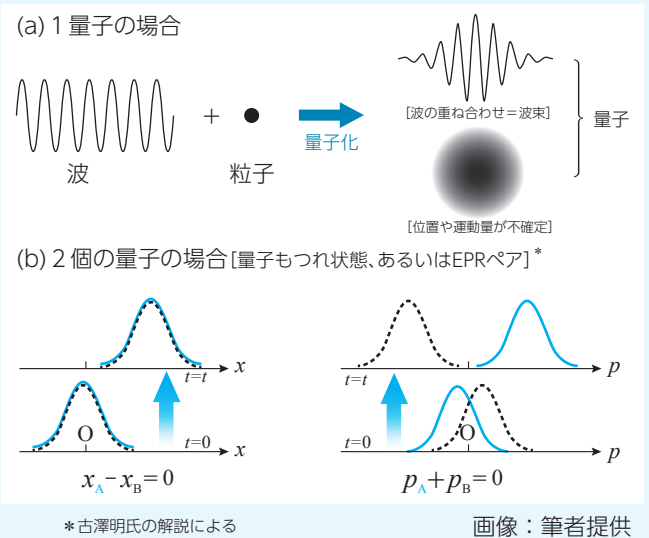
### 1. 量子とは？

最も身近な量子は、光子あるいは電子です。光合成や視覚は言うに及ばず、光通信などの世界で、光子は大きな役割を果たしていますし、PCやスマホの中にある半導体素子の多彩な機能を通じて、電子の存在もよく認識されていると思います。

しかし、どこに量子の本質が顕れているのかと問われると、存外曖昧なことに気付きます。実際、光や電子が量子でなければならない必要はほとんど無く、これらの量子性が機能として本格的に実用化されるのは、当分先になると考えられていました。

ミクロな粒子の持つ量子性とは、一言でいうと、波と粒子の二重性です。些か乱暴ですがいきなりイメージ化すると、図(a)の様になります。この左側は、古典的な描像として一先ず了解しても、それを量子化した右側は、既に受け入れ難いかもしれません。いわゆる不確定性原理をイメージ化したもので、量子力学の基本ルールの基礎になっている原理です。例えば野球のボールのような古典的な粒子では、位置 $x(t)$ と運動量 $p(t)$ は時間の関数として瞬間毎に定まり、疑問の余地はありません。しかし、これが量子になると、同時には決め

られないというのが不確定性原理の主張です(これを、 $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ と表す。ここで $\hbar$ は、プランク定数 $h$ を $2\pi$ で割ったもの)。これを認めると、古典的には常軌を逸したように見える量子の世界の現象も理解できるのですが、ここではその詳細は一切省き、図(b)に示す、量子もつれ状態あるいはEPRペアと呼ばれる状態を実現できることだけを了承頂き、先に進みます。これは、例えば2個の量子AとBが存在する場合に作り出せる、量子論的に重なり合った状態のことです。EPRは3人の著名な物理学者の名前の頭文字であり、Eはあのアインシュタインです。彼が量子論に終生懐疑的であったことはよく知られていて、EPRペアは、量子論の矛盾を主張するために導入した歴史的な仮説でした。それ程に、量子論の示す概念は理解し難い面があります。

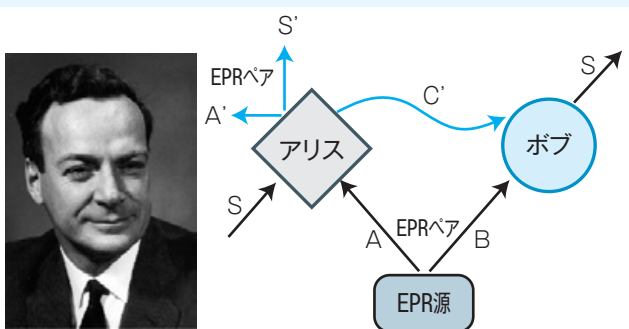


### 2. 量子コンピュータ

1940年代に登場した現在のコンピュータが、1と0の組み合わせ(ビット)による2値論理を用いるノイマン型が主流であるのに対し、重ね合わ

せで与えられる量子状態の量子並列性を動作原理に直接取り込む構想は存外古くからあり、その元祖はやはりファインマン(1959年)でした。何をもって量子コンピュータとするかは、まだ見解が分かれるようですが、上述のEPRペアを2組用いて、発信者アリスの送りたい量子Sの情報を、受信者ボブのところの量子Sとして再現する量子テレポーテーションも、量子情報を処理し操作するという意味で、原理的には最も簡単な量子コンピュータとされています。

2011年に、カナダのベンチャー企業D-Wave社から、世界初の商用量子コンピュータが発表されました。Nb系の微小超伝導閉回路を用い、128個の量子ビットを構成して数mm<sup>2</sup>のチップ1個に収め、クライオスタットと呼ばれる極低温実験装置内(~20mK)で作動します。重要なのは、従来の量子ゲート方式ではなく、東工大の西森氏らによる量子アニーリング方式(1998年)を採用し、素子動作の格段の安定性を図った点でした。物理的には、イジング模型と呼ばれる数学的なモデルの最低エネルギーを求める問題に等価であり、量子力学的には基底状態を辿って最適解を求める点です。現在では既に2,000量子ビットを超えるまでになっていて、組み合わせ最適解問題に帰着できる現代の多くの重要課題に適応可能であり、AIへの応用も議論されつつあります。



R.P.ファインマン  
1918-1988,米国  
出典: blog-imgs-12.fc2.com

量子テレポーテーション

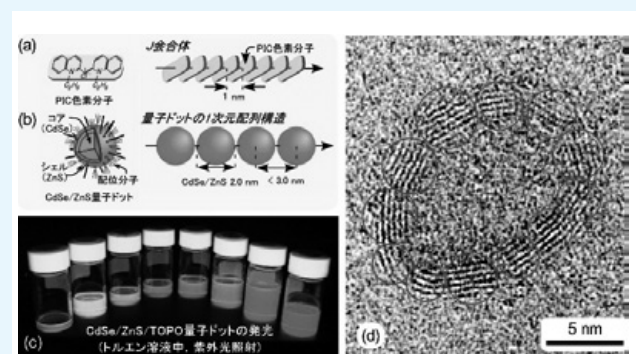
画像: 筆者提供

### 3. 温故知新: 光と物質の一例

図(a)に示す分子は、擬イソシアニンといって、シアニン系の有機色素の一種です。π電子を有する多くの仲間と同様に、1次元的な会合構造を作るのが特徴です。例えば溶液中に分散して濃度を上げていくと、ある濃度を越えたところで急峻に

そのスペクトルが変わることで、識別し生成することができます。1930年代に見つかり、発見者の名を取ってJ会合体と呼ばれています。非常に鋭く強い発光・吸収スペクトルを示すことが特徴で、元来個々の分子にその励起状態は局在していますが、その励起状態の間に相互作用が働くことで、フレンケル型励起子というJ全体に拡がった状態を生成するのが、物理的な起源です。大切なのは、この励起子は室温でも安定で、肉眼でも識別できるほどの強い発光を示すことです。

有機物は何かと弱いので、J会合体のこの特性を、無機半導体に移植する可能性を研究してきました。ここでは、II-VI族化合物半導体のCdSeを核とするコア・シェル型の量子ドットQDを用いる例を、図(b)に示します。このQDは、溶融有機溶媒中で化学反応により合成され、室温でも強く発光します(図(c))。表面に結合している有機分子を利用し、DNAオリゴマーの強い結合選択性を用いてQDの連結を試みた例を、写真(d)に示しました。この透過型電子顕微鏡の写真では、12個のQDがリング状に配列しています。喫緊の課題は、この構造物を微小共振器に入れて、ポラリトンを形成させて相互作用を増強しつつ、所期の光学特性を示すかどうかを確認することです。



画像: 筆者提供

色々と端折らざるを得ず、後半は分光データなしで光物性を説明する荒業になりました。現在の潮流とは大きく異なり、ここで取りつつある道筋は、光と物質の相互作用を利用して、EPRペアあるいは量子もつれ状態の生成を目指すことです。原理的には室温動作も可能な筈で、迂遠な基礎研究ですが、地道な積み上げが何時かはブレークスルーに通ずることを願って止みません。