

ろいろな波長のレーザーによって安定化された周波数コムが光ファイバーで伝送されています。

ここで重要なことは、高い精度で周波数コムをレーザーのスペクトル線に合わせても、フェムト秒パルス中の光の位相が δ だけずれていると、 n 番目のモードの周波数は、 $n\Delta$ でなく、 $f_n = n\Delta - \delta$ となることです。したがって、正確な周波数のメモリを設定するためには、この位相差 δ を 0 にする方法を見つけなければなりません。

そのような条件は、モード同期発振器の共振器の長さと同期同期の周期を調節することによって達成することができます。10 フェムト秒程度の鋭いパルス幅の場合、周波数の広がり(時間軸のパルス波形のフーリエ変換で決まる)は非常に広がるので、非線形結晶を使って第2高調波を発生すると、その周波数は基本波の領域と重なって、差周波数は

$$(2n\Delta - \delta) - 2 \times (n\Delta - \delta) = \delta,$$

すなわち

$$f_{2n} - 2 \times f_n = \delta$$

となります。すなわち、第2高調波と基本波のビートが0になるようにレーザーを制御することによって求める条件が実現できます。

われわれは、自動的に δ を 0 に自動制御するレーザーを開発し、ドイツの T. W. Hänsch 教授のグループとほぼ同時(2000年)に、『サイエンス』誌に発表することができました。

一緒にノーベル賞を受賞した Hänsch の研究室とは、常にきわめて親しい協力関係を保ちながらも研究成果を競い合ってきましたが、科学の第一線で研究生生活を続けることの素晴らしさの一つは、世界中の多くの第一線の研究者たちと親しく知り合い、協力し合うことができることです。これらの研究者の努力の下に、この領域がますます発展することを期待して本稿を締めくくりたいと思います。

量子物理学の新時代の幕開け

上田正仁 うえだ まさひと

(東京工業大学大学院理工学研究所)

URL: <http://millennium.ap.titech.ac.jp/%7Eueda/index.html>

量子論はトランジスタ、レーザー、GPS(衛星利用測位システム)など現代文明を支えるハイテク技術の根幹をなす基礎理論であり、その論理構造はシンプルでかつ美しい。その上、ミクロからマクロな世界に及ぶ自然の普遍性と多様性が量子論によって統一的に理解できることには深い感動を覚えずにはいられない。

量子論は、アインシュタイン-ド・プロイの関係式により粒子性と波動性を統一する学問で

ある。アインシュタイン-ド・プロイの関係式とは、エネルギー E と波の振動数 ν が $E = h\nu$ 、運動量 p と波数 k が $p = hk/2\pi$ という等式で結ばれていることをいう。ここで、 h はプランク定数とよばれる普遍定数である。これらの式の左辺は粒子性、右辺が波動性を特徴づける量であり、一方がわかれば他方がわかる。量子論が誕生する以前は、粒子の状態を特徴づける物理量の組 (E, p) と波の状態を特徴づける物理量の組 (ν, k) はお互いに無関係な量であったが、アインシュタインとド・プロイは両者がコインの表裏のように本質的に同じ情報をもっていることを喝破した。これが、粒子-波動二重性の意味である。

アインシュタイン-ド・プロイの関係式から運動量が位置に関する微分演算子で与えられることや、エネルギーが時間の微分で与えられることが導かれ、そこからハイゼンベルグの不確定性関係やシュレーディンガー方程式が導かれる⁽¹⁾。

粒子-波動二重性の重要な帰結として、古典的には波であった光も、また古典的には粒子であった電子や原子も、ヤングの干渉実験を行うと、まったく同じ干渉パターンが得られる。すなわち、二重スリットの後方のスクリーン上には粒子としての輝点が1個1個ランダムな場所に観測されるが、それらを積算すると輝点の集合として波としての干渉縞が現れる。このことから、波動関数はランダムに現れる事象の確率分布に関連する量であることがわかる。

われわれが量子力学から得ることのできるすべての情報は波動関数で記述されるので、測定結果は確率的にしかわからない。古典的(ニュートン力学的)世界では確率現象はわれわれが原理的には知りうる情報を不完全にしかもっていないために生じるものであるが、量子論では、粒子性と波動性を統一した代償として未来が確率的にしか予言できない。

このように、量子論はわれわれの存在哲学に根本的な転換を強いる。量子計算や量子暗号は量子論特有の確率的性質を巧みに利用している。たとえば、量子暗号では、送信者の送った情報を盗聴者が観測すると波束の収縮がおこり状態が不可避に変化してしまうので、送信者と受信者はその差をチェックすることで盗聴の有無をチェックできる⁽¹⁾。

ヤングの実験では、光子も電子も原子も同じような干渉パターンが現れ区別がつかないが、それでは、自然の多様性はどこから現れるのだろうか。それは、粒子が2個以上同時に存在する場合に現れる相互作用と量子統計性の結果である。これらのうち、粒子間に働く相互作用は古典論の世界でも存在するので、ここでは後者について述べる。

量子統計を支配する原理は、同種粒子の識別不可能性の原理である。いま、同種粒子を2個考え、それらの波動関数を $\psi(x, y)$ と書こう。ここで、 x, y は粒子の状態を表す変数で位置と考えてもよいし運動量と考えてもよい。粒子を入れ替えた波動関数は $\psi(y, x)$ と書ける。両

者が識別不可能な同じ状態を記述している条件は、 c を絶対値の大きさが1の定数として $\psi(x, y) = c\psi(y, x)$ が成立することである。再び粒子を入れ替えると、 $\psi(y, x) = c\psi(x, y)$ となるので、 $c = \pm 1$ でなければならない。こうして同種粒子の統計性は、 $c = 1$ の場合と $c = -1$ の場合の2種類に大別されることがわかる。前者をボーズ統計、後者をフェルミ統計という。光子はボーズ統計に従うボーズ粒子、電子、陽子、中性子はフェルミ統計に従うフェルミ粒子である。フェルミ粒子の場合は $\psi(x, y) = -\psi(y, x)$ なので、 $y = x$ とおくと、 $\psi(x, x) = 0$ が得られる。これは、フェルミ粒子は同じ状態に2個以上の粒子を詰めることはできないことを意味している。これをパウリの排他原理という。他方、ボーズ粒子の場合は、同じ状態を占有できる粒子数に関する制約はない。一般に原子は、多数の電子、陽子、中性子からなる。同種原子を入れ替えると、原子に含まれる電子、陽子、中性子などのフェルミ粒子が一度に入れ替わり、フェルミ粒子を1個入れ替えるごとに波動関数にマイナス1が掛けられるので、偶数個のフェルミ粒子を含む原子はボーズ粒子、奇数個のときはフェルミ粒子であることがわかる。

フェルミ粒子は、エネルギーの低い状態から1個ずつ粒子が入るので、粒子数がアボガドロ数のようにマクロな量になると、最もエネルギーの高い粒子の速度は桁違いに速くなる。たとえば、金属中の電子のうち最も速度の速いものは秒速1000 kmに達する。一方、ボーズ粒子は、一つの状態を占める粒子数に制限がないために、多数の粒子を同じ量子状態に詰めることで、ミクロな量子の性質をマクロなスケールに増幅することができる。これをボーズ-アインシュタイン凝縮(Bose-Einstein condensation, BEC)という。BECの典型例はレーザー光であり、莫大な数の光子を同じ振動数、波数、偏光状態に凝縮させた状態となっている。また、質量数が4の液体ヘリウムを2.17ケルビン以