

1900年プランクは、古典物理学では説明できない溶鉱炉中の光エネルギーの波長分布の謎を、光量子仮説を導入して解決した。これが量子力学の誕生である。1905年この光の粒子性(光子)を用いて、アインシュタインは光電効果を説明した。光が波動と粒子の二面性を持つという非日常性は、ハイゼンベルグの不確定性原理で理解できた。しかし、青色の1光子が赤色の2光子に分割されるパラメトリック過程で発生する2光子の量子もつれ合い(強い相関)は、2つの光子を遠く離しても存在し続ける。このもう一つの非日常性を1935年アインシュタインらは指摘した。これも、量子力学特有の非局所性として理解され、最近では量子コンピューターと量子通信に使われようとしている。レーザー光の発明は光学と工学に革命をもたらした。金属加工に用いられる一方で、人類は 10^{-9} Kのオーダーの超低温まで原子系を冷却できるようになった。その結果、原子系はボーズ・アインシュタイン凝縮やフェルミ凝縮を示して、波動として振舞う。

この百年の歩みはアインシュタインに負うところが大きかったが、最近では日本からの寄与も大きくなりつつある。これらを概観する。

1. はじめに

「2005世界物理年」はアインシュタインの奇蹟の1905年から100周年を意識しての企画と推察する。この年に発表されたアインシュタインの3つの論文のうち、相対性理論と光電効果が、私に与えられた解説の題名「光量子と光物性：光学からフォトサイエンス」に深い関わりを持つ。この物理学の奔流は現在まで、絶えることのない論争と進展を繰り返し、日本も情報発信基地の一つとして寄与している。遂に、光を用いた量子情報処理—量子テレポーテーションと量子コンピューティング—の可能性が論じられるようになった。この発展の様子を、アインシュタインとの関わりに触れながら紹介する。

古典物理学では説明できない、溶鉱炉中の光エネルギーの振動数分布の謎を、1900年プランクは光量子仮説を導入して解明した。この分布をプランクの光エネルギー分布と呼ぶ。アインシュタインによる1905年の光電効果の説明では、光は粒子、すなわち光量子(光子)の流れであると主張している。そのプランクの光エネルギーの振動数分布を、アインシュタインは量子論を使わないで求めて見せた。光が物質系と熱平衡にあるためには、物質系の励起状態から基底状態への遷移は、光エネルギーに比例するB係数と光が存在しなくても自然に起こるA係数で記述できることを示した。そのときに用いたアインシュタインのB係数で記述される誘導放射を、A係数の自然放射と光吸収に打ち克つように設計したものがレーザー発振である。この輝度、単色性と指向性に優れたレーザー光は、光学とフォトサイエンスに革命をもたらした。さらに、このレーザー光を用いて原子系を冷却し、今まで人類が到達できなかった最低温度を20世紀末には記録し、遂には原子系のボーズ・アインシュタイン凝縮を実現できた。このボーズ・アインシュタイン凝縮とはボーズ統計に従う原子や粒子が一つの量子状態(モード)に集中して分布する現象であり、原子系

(粒子系)はコヒーレントな(可干渉性の高い)波動として振舞う。レーザーも光子が一つの共振器モードに多数分布し、コヒーレントで強力な電磁波として振舞う現象でもある。

このレーザー冷却した原子系は、上記の量子情報処理にもその有用性を発揮し始めている。他方、フェルミ統計に従う原子系も、同様にレーザー冷却され、フェルミ凝縮することが見つかった。電荷をもつ粒子がフェルミ凝縮すれば、超伝導を示し、中性原子であれば超流動現象を示す。中性原子のフェルミ凝縮では、超流動の臨界温度のフェルミエネルギーに対する比が、高温超伝導体の場合か、それ以上となることも見出されている。この事実は、高温超伝導の謎を解くばかりか、室温超伝導の可能性まで示すものである。

第2節では、光は波動であると同時に粒子であると説く非日常的な量子論の観念をどう理解できるのかを考えよう。第3節では、量子論のもう一つの非日常性である量子論的多粒子状態における粒子間の相関の非局所性、すなわち“もつれ合い”を理解し、第4節ではその“もつれ合い”の情報処理への応用の可能性を紹介する。第5節では、光の量子論から自然に導かれる自然放射と誘導放射について述べ、この誘導放射を最も有効に活かすデバイスであるレーザーの発展を紹介する。さらに、レーザー光のエネルギーを短時間に凝集させるパルス圧縮の発展を紹介する。第6節では、このレーザー光を用いて原子系を極低温にできることを示す。さらにレーザー冷却した原子系が示す巨視的量子状態であるボーズ・アインシュタイン凝縮とフェルミ凝縮について述べる。第7節では、原子系のレーザー冷却は量子情報処理や光周波数の安定化にも寄与する現象であることを示す。

2. 光子誕生¹⁾

溶鉱炉は産業革命の中核であったが、その炉内の放射エ

エネルギーの光の振動数に対する分布が測定されるようになった。19世紀末には、そのエネルギー分布はマックスウェルの電磁気学と古典統計力学では説明できないことが分かった。そこで、プランクは後にプランク定数と呼ばれる微小量 h を導入し、振動数 ν の光は、炉内の物質と $h\nu$ の整数倍を単位としてエネルギーをやりとりするとの仮説を立てた。その結果、実験結果と一致する放射エネルギー分布を得た。これが1900年のことで、その結果をプランクの放射エネルギー分布と呼ぶ。さらに、アインシュタインは、一歩進めて光は $h\nu$ のエネルギーを持つ粒子の流れであると考えて、1905年光電効果の説明に成功した。これが光子（フォトン）の誕生である。

ここで、波動としての光と粒子としての光子像とは、どこで折り合いがつかぬかが問題となる。これを解決するのが量子力学特有のハイゼンベルグの不確定性原理である。波動であれば位相が定義でき、粒子であればその粒子数が定義できる。しかし、ハイゼンベルグの不確定性原理では、互に共役な物理量、たとえば粒子の位置と運動量は同時に正確には決められず、それらのゆらぎの積はプランク定数 h よりも小さくはできない。位相と粒子数も同様な関係に従い、位相ゆらぎの小さいときには、光は波動として観測され、粒子数のゆらぎの小さいときには光は粒子として振舞う。一つのモードにたくさんの光子が分布するレーザー光は、位相ゆらぎはその光子数に反比例して小さくなり、前節でも述べたように輝度の高い波動となる。

逆に、粒子と思われてきた電子も原子内のような微小な空間では、波動として振舞い、シュレーディンガーの波動方程式に従う。これで、量子力学は定量的表現が可能となった。ここでは、電子の存在は確率的にしか記述できない。これに対しては、アインシュタインから「神がサイコロ遊びをするはずはない」と反発を呼び、ボーアらとの論争が続いた。アインシュタインは量子論には何か欠けている変数があり、その変数を付け加えることで量子論は完成し、変数や観測量を高い精度で決められて、ニュートンの古典力学のような決定論に変わるはずであると考えた。遂に、1935年アインシュタイン、ポドルスキーとローゼン(EPR)はいわゆる“量子力学の不完全性”を突くと思われた論文を発表した。²⁾ ここでは、量子力学特有の2つの粒子の“もつれ合い”(次節で詳述する)を日常経験する常識に反するものとして問題とした。この非日常性こそが、現在2光子の“量子もつれ”を量子テレポーテーションに使う研究の原点になった。

3. もつれ合い—2光子の強相関

1935年以来数十年にわたって物理学者たちをなやませてきた量子もつれの謎は、マンデルとアスペらの、さらに1990年代のシモニー、グリーンバガー、ホーン、ザイリンガーの努力によって、ほぐすことができた。³⁾ 半導体でその光子対の発生に成功した日本で行われた実験を例に、

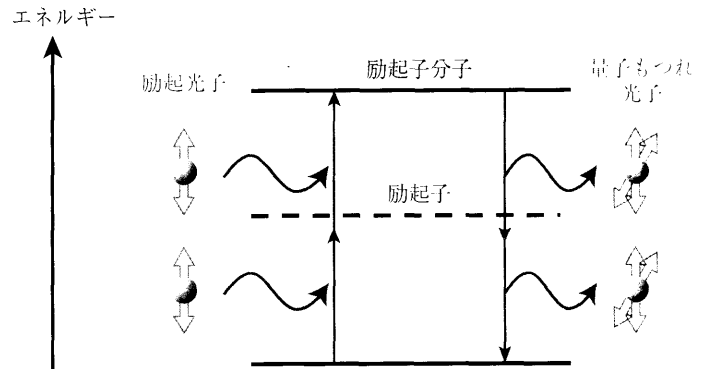


図1 励起子分子の2光子共鳴を用いた量子もつれ光子対の発生。⁵⁾ 励起子分子は2つの励起子の束縛状態であるので、2つの光子を同時に、共鳴的に吸収して励起される。その逆過程では、“もつれ合った”量子対が発生される。

2光子のもつれ合いを説明しよう。塩化第一銅という半導体単結晶にレーザー光を照射し、2つの素励起の束縛状態である励起子分子を2光子で共鳴励起する実験が日本で行われてきた。⁴⁾ 上田正康を第一世代、五神真、伊藤正らを第二世代として、第三世代の枝松圭一がこの励起子分子から放射される2光子の間に存在する“もつれ合い”を観測することに成功した。⁵⁾ 励起子分子の状態も、結晶の基底状態も図1に示すように、角運動量ゼロの状態である。したがって、励起子分子から放出される2つの光子は、例えば

$$|\Psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 + |\leftrightarrow\rangle_1 |\leftrightarrow\rangle_2), \quad (1)$$

と強い偏光相関を持つ。 $|\uparrow\rangle_i (|\leftrightarrow\rangle_i)$ は i 光子が垂直(水平)偏光状態にあることを示し、一方が垂直(水平)偏光なら、他方も垂直(水平)偏光となる相関を持つことを実験で示した。

もつれ合った2つの光子を東京とニューヨークまで送って、東京で一方の光子の偏光を測定すると、即時にニューヨークでの他方の光子の偏光を決めることができる。このような2粒子間に存在する非局所性は日常世界では考えられないものとして、アインシュタインは嫌った。1935年にEPRによって提起された疑問を解く糸口はベルとボームによって与えられた。ベルの定理を簡単化して述べると、⁶⁾ (1)「量子論における波動関数の統計的記述は完全である」か、(2)「空間的に隔った2つの粒子の現実状態は、お互いに独立している」のどちらか一方は、放棄しなければならないと主張するものである。枝松らの測定からも分かるように、(2)は否定され、(1)の量子力学に誤りがないことになる。この結論は、深遠な論理と注意深い実験の繰り返しの後に到達されたものである。

励起子分子を用いて“もつれ合った”光子対を発生する過程を、パラメトリック・ダウンコンバージョンによる過程と比較してその優劣を述べよう。前者が4光波が関与する過程であるのに比して、後者は3光波の過程である。その結果、前者は電子・光子の相互作用に関して3次摂動で

記述される過程であるのに比して、後者は2次摂動の過程であり、一般には後者の方が強い現象である。しかし、励起子分子の2光子励起には、巨大振動子強度の効果が働き、その弱点を補っている。⁷⁾ 第二の相違点は、パラメトリック・ダウンコンバージョンでは角振動数 2ω の1光子を ω の2光子に分割するのに対して、励起子分子が関与する過程では2つの無相関の角振動数 ω の光子を“もつれ合った”角振動数 ω の2光子に変換する過程である。最近は、もつれ合った3光子、4光子を発生でき、波数 λ の光子の n 個の“もつれ合った”光子は、 λ/n の空間に閉じ込められると言われている。⁸⁾ パラメトリック・ダウンコンバージョンでは励起光源に $(\lambda/2)$ の波長の光子を用いるので、この閉じ込め効果にはメリットはないが、励起子分子を経由する“もつれ合った2光子”では、 λ の光源を用いているのでそれを $(\lambda/2)$ の空間に局在できる。例えば、将来もつれ合った光子の数 n を十分大きくできたときには、可視光をナノの空間に絞り込む可能性を示すものである。

4. 量子テレポーテーション⁹⁾

量子テレポーテーションとは、一つの粒子の持つ“状態”をもつれ合ったもう一つの粒子がいる遠く離れた場所に転送して、“実質的に”最初の粒子を別の場所にテレポートすることである。これはもつれ合い現象の一つの応用で、まずザイリンガーのグループで実現されたとの報告が出た。¹⁰⁾

量子論では、ひとたび量子的状態を観測すると、量子系としての状態は破壊されてしまう。ベネットらは、送りたい量子を直接観測することなしに、量子的粒子の情報を“もつれ合い”を利用して転送する方法を提案した。¹¹⁾ 量子情報理論では、3人の登場人物をアリス、ボブ、チャーリーと呼ぶ。まず、2つのもつれ合った粒子、例えば光子の一つはアリスに、他の一つをボブに送る。アリスの光子はある偏光状態(それを Q と呼ぶ)にあるが、アリスはその偏光状態は知らないとする。アリスは、離れた位置にいるボブにアリスの光子と同じ状態にある光子を手に入れさせようとする。ここで一切の観測を行ってはならない。理由は、アリスが光子の偏光状態 Q を観測しても、 Q の持つすべての情報を知ることはできないばかりか、その光子はある一つの状態に収縮するだけである。この転送するのに必要な全情報を、光子の波動関数で表される量子的情報と観測結果である古典的情報に分け、これらの情報を量子的チャンネルと古典的チャンネルで通信する。前出のパラメトリック・ダウンコンバージョン(図2のEPR光源)で発生した2つの相関した光子対をアリスとボブに送る。この2つの光子をアリスとボブが共有する過程が量子的チャンネルである。図2の光子2と3であり、そのEPR光源から発生した光子対は2光子対の4つの偏光状態のうち、一つの“もつれ合い”状態にある。第三の人物チャーリーが、アリスにもう一つの粒子を手渡す。この粒子が図2の光子1で

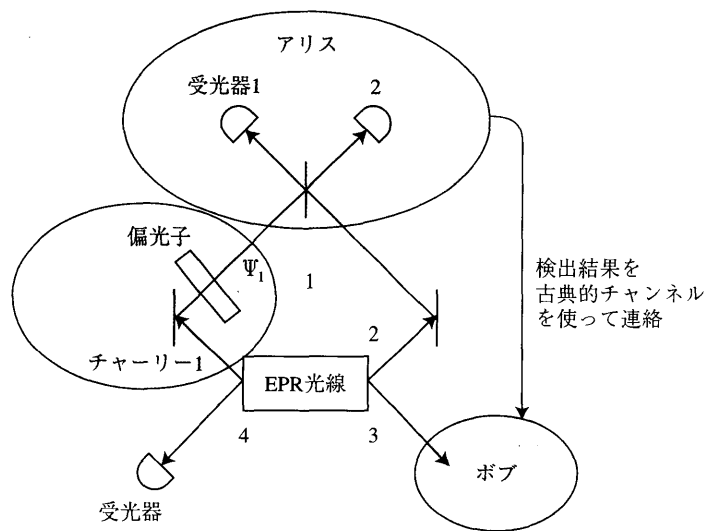


図2 ザイリンガーグループによって行われた量子テレポーテーション実験。

ある。この粒子(光子)の状態 Ψ_1 が、アリスからボブに送るメッセージ(情報)である。この量子状態が

$$|\Psi_1\rangle = \alpha|\leftrightarrow\rangle_1 + \beta|\downarrow\rangle_1, \quad (2)$$

であったとする。これが、ボブに送りたい量子状態であり、係数の α と β は複素数で、相対強度と位相の無限の自由度がある。ここで、アリスの手元にある1と2の光子の積状態は4つあるが、もしこの状態が4つの偏光状態のうちのある一つであることを観測し、それを古典的情報手段でアリスからボブに送るときには、ボブの手元にある3の光子は

$$|\Psi_3\rangle = \alpha|\leftrightarrow\rangle_3 + \beta|\downarrow\rangle_3, \quad (3)$$

の状態にあることが分かり、(2)の量子状態がボブに転送されたことになる。しかし、一つの偏光状態が観測される確率は25%であるので、転送できる効率は25%に制約される。さらに図2からも分かるようにEPR発生源から2組の光子対を用いて、チャーリーがアリスに送る光子1と対をなす光子4を観測したタイミングで、上記の量子テレポーテーションが行われている。そのとき、チャーリーとEPR源からの入力に、同時に2つ以上の光子は存在しないことが前提条件であった。しかし、その前提条件が満たされないことがこの系の致命的欠陥であった。この辺の詳細は文献9を参照されたい。

この欠陥を除去した量子テレポーテーションが古澤らによって提案された。¹²⁾ ザイリンガーらが、光子の偏光が水平か垂直かという離散的な情報を使ったのに対して、古澤らは光の電場成分の実部と虚部に対応する連続量を用いて、確率を含まない決定論的量子テレポーテーションを実現させた。この方式は、3者間での量子テレポーテーションも可能にするものである。このことは、量子テレポーテーションのネットワークの形成の可能性を意味する。彼らの3つの“もつれ合った光”の形成過程には、図3に示すように、単一のコヒーレント光源で励起された3つのスクイーズド光を用いた。¹³⁾ 図3の上段で、チタン・サファイアレーザーとその2倍高調波を発生させ、3つのビームスプリ

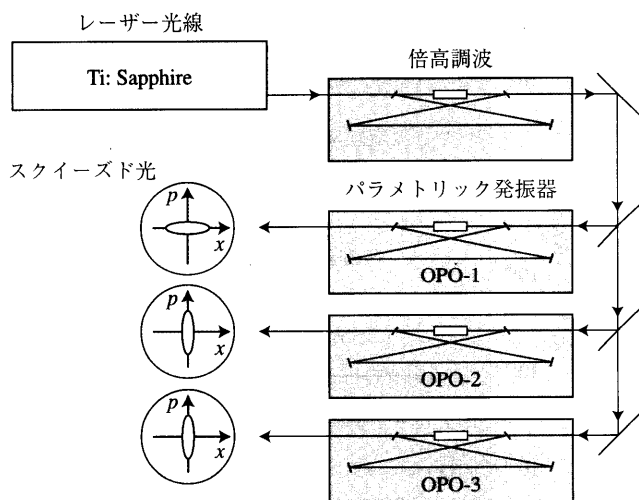


図3 3つの量子もつれ光の発生。¹³⁾

ッターで分割した光をパラメトリック発振器OPO-1に送り込み、電場成分の虚部にあたる p のゆらぎを圧縮したスクイズド光を生成してアリスに、OPO-2とOPO-3では電場の実部 x のゆらぎを圧縮したスクイズド光を生成し、その出力をそれぞれボブとチャーリーに送る。

まず、古澤らはこの3つの光が“もつれ合っている”ことを示した。したがって、3人は3者間“量子もつれ”を共有したことになる。ネットワークにおいて3人は対等で、それぞれ一人が送信者、受信者、制御者のいずれかとなる。送信者は自分に来ている3者間“量子もつれ”した光ビームと送りたい量子情報を含む光ビームを合わせ測定する。このとき、3者間“量子もつれ”した光ビームは非常に大きな雑音と考えてよく、送信者は入力情報について何も得るものではないが、測定結果を古典チャンネルを使って受信者に送る。また制御者も自分のところに来ている3者間“量子もつれ”光ビームに関して測定を行い、測定結果を受信者に送る。受信者は、送信者と制御者からの情報から、自分のところに来ている3者間“量子もつれ”光ビームを用いて雑音を消去し、送信者が入力した量子情報を受信者側で再現する。したがって、3人の情報が揃って初めて量子テレポーテーションが可能になり、無限の自由度を持つ情報を送ることができる。この3者の役割は交換できるので、3者間量子テレポーテーションが可能となる。¹⁴⁾ これらの技術は量子コンピューターに結びつくものでもある。¹⁵⁾

5. レーザーとそのエネルギーの凝縮

電磁場を量子化すると光子エネルギーの和として、そのハミルトニアンが書ける。また電子と電磁場の相互作用も、光子を一つ消滅させて原子を基底状態 $|a\rangle$ から励起状態 $|b\rangle$ への遷移

を可能にする。これが光吸収の過程で、図4(b)に示す。他方、励起状態 $|b\rangle$ にある原子も光子を一つ放出して、低エネルギー状態 $|a\rangle$ に遷移する。そのとき、放出される光子と同じ種類の光子の存在下では、誘導放射で同一のクローンが発生する(図4(c))。この誘導放射を共振器の中などで、ある共振器モードを有効に増幅する過程がレーザー発振である。共振器とは図4(d)に示すように、放射された電磁波を両面の鏡によってその間に閉じ込める仕組みである。他方、光子の存在がなくても、 4π の勝手な方向に放射するのが自然放射である(図4(a))。原子励起を共振器モードの増幅に使用できずに浪費するので、この自然放射はレーザー発振の敵である。

ここにおいてもアインシュタインの天才ぶりが発揮されている。熱平衡にある原子系とエネルギーのやりとりをする電磁場を考え、まず光吸収と誘導放射(アインシュタインの B 係数)に加えて自然放射(アインシュタインの A 係数)があって、初めて原子系の熱平衡が保証できることを示した。さらに、この A 係数と B 係数を用いて、放射エネルギーの振動数分布を導き、プランクが光量子仮説の下で導いた放射エネルギー分布を求めて見せた。注目すべきは、電磁場の量子化など一切使わないで、求められている点である。

光吸収と自然放射がレーザー発振を抑えるように働くので、まず誘導放射が光吸収に打ち勝つためには分布反転が必要である。すなわち励起状態の分布数が下の準位の分布数に勝る条件が必要となる。たとえば、水銀灯などの光源で、図4の $|a\rangle$, $|b\rangle$ 準位の低エネルギー側に存在する結晶の基底状態 $|c\rangle$ から $|b\rangle$ に原子系を励起し、 $a-b$ 準位間で分布反転させて、その放射光子の増幅を行う。また半導体レーザーでは $p-n$ 接合に電流を注入し、接合部の光活性層で伝導帯と価電子帯で分布反転を発生させている。次に、自然放射に対して誘導放射が打ち勝つためには、例えば図4(d)の共振器の中で誘導放射を行わせ、その放射された共振器モードを溜め込めばよい。 B 係数はそのモードの光子数に比例して増大するので、定数である A 係数より大きくなって、レーザー発振する。その外部からの励起条件が、レーザー発振の閾値を与える。

このレーザー発振はタウンズらによって提唱され、メイ

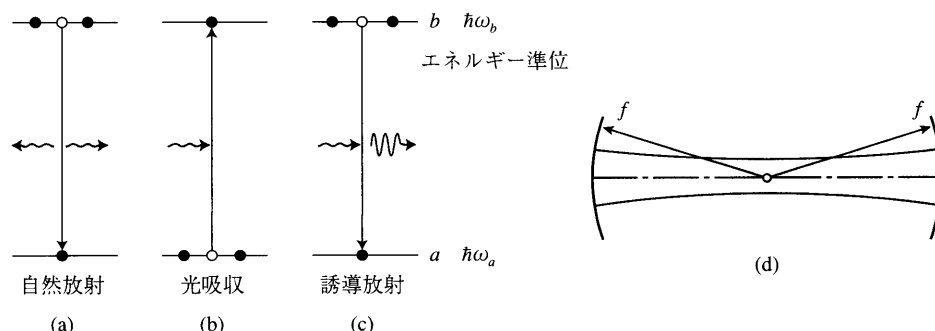


図4(a, b, c) エネルギー準位 a, b とその間の電子遷移に伴う電磁波の (a) 自然放射, (b) 光吸収, (c) 誘導放射, (d) ファブリ・ペロー型レーザー共振器, レーザー媒質を焦点付近に置く。

マンガンルビーでそれを実現させた。それは1960年のことであつた。レーザー用のルビーは、 Cr^{3+} イオンをアルミナ Al_2O_3 に 0.01~0.03 mol% 添加したピンクルビーと呼ばれる結晶である。また近年最も人気のある固体レーザーはチタンサファイア $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶を用いたもので、周波数可変、またはその特性を活かした超短パルス用レーザーとして盛んに使われている。これらのエネルギー準位と光学特性を理論的に示したのが田辺行人と菅野暁であり、上記のレーザー開発のバイブルとなつた。¹⁶⁾ これらに關与する遷移金属酸化物中における (3d) 電子系のエネルギー準位を、結晶場の大きさの関数として求めた。これらの図は田辺・菅野チャートと呼ばれ、今でもその有用性は失われていない。霜田光一と高橋秀俊がタウンズとともにレーザー発振の雑音を論じ、レーザーから得られる光のコヒーレンスの度合いを論じて、レーザー物理に寄与した。発光ダイオードやレーザーダイオード (半導体レーザー) など電気エネルギーを光エネルギーに変換する方式は、ガスレーザー等に比して極めて簡便で、工業的にはこの半導体レーザーが使われている。GaAs 系の半導体レーザーは赤色の良質な光源である。GaAs と GaAlAs のヘテロ構造を作って室温でのレーザー発振に成功したのが、当時ベル研にいた林厳雄らであつた。さらに最近では GaN 系の半導体を用いた青色発光ダイオード、さらにはレーザーダイオードの作製に成功したのが、赤崎勇や中村修二で、新聞をにぎわしている。さらに ZnO 系の半導体を用いたより安価な青色発光ダイオードが、川崎雅司らによって開発され、テレビで再三報道されている。このように、半導体レーザーは日本の独壇場となりつつある。これらの半導体レーザーでポンプしたチタンサファイアや希土類金属イオンをドープした光ファイバーのレーザーが実用化されている。

レーザー光自身輝度が高く、指向性と単色性に優れた光源であるが、これらの特性を活かして、さらにこのエネルギーを空間的および時間的に凝集する試みが行われてきた。1960年のレーザー発振の成功以来、その単位時間・単位面積あたりに集積されるエネルギーは、図5に示すように、新しい手段が開発されるたびに、急速に増大した。レーザー共振器では、両端の鏡面の反射率が高いほど共振器の Q (特性) 値が高いと呼ばれる。一方の鏡を回転させると、一瞬だけ Q 値が高くなる。それ以外の時間に外部からの励起で原子系に溜め込まれた励起エネルギーを、一気に短時間に放出する。これが Q スイッチ法である。これで、図5の1960年代の飛躍の第一歩を記した。第二歩目がモード同期法である。Ti:Al₂O₃ の発光スペクトルは、800 nm を中心に 200 nm の幅を持っており、その広帯域で光の増幅が可能である。そのとき、共振器モードが等しい周波数間隔で定在波を形成するが、その間隔にほぼ等しい周波数で鏡面を振動させると、隣接するモードが位相を揃えて発振する。これを時間軸上で見ると、これらのモードを重ね合わせた結果、その増幅帯域の逆数の超短時間光パルスが形成され

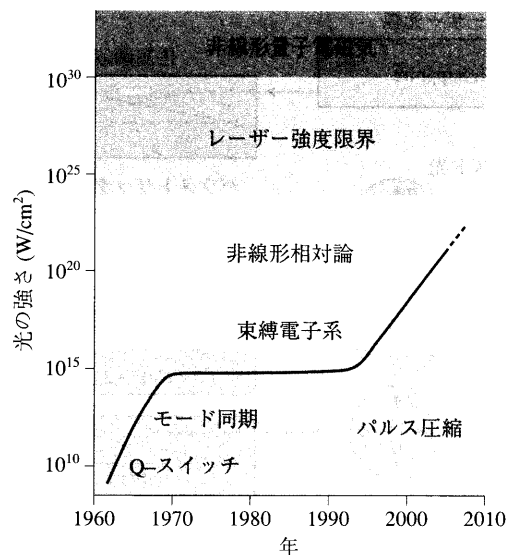


図5 単位面積・単位時間に集積できるエネルギーが、時代とともに増強されてきた。

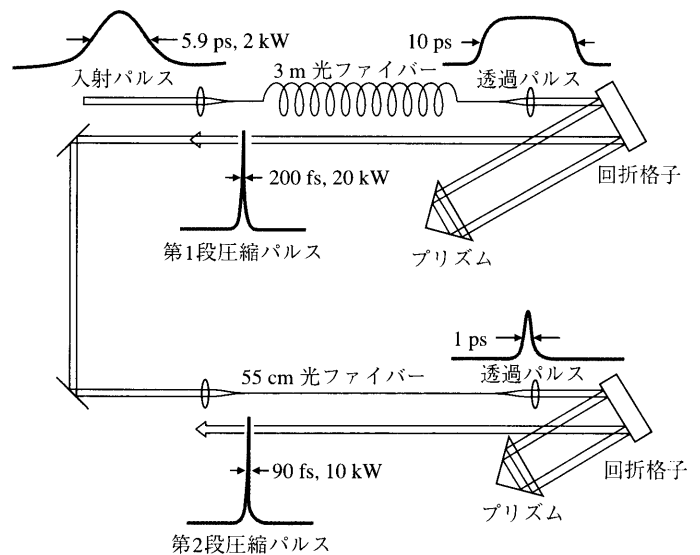


図6 2対の光ファイバーと回折格子とプリズムによる光パルスの圧縮の概念図。¹⁷⁾

る。このモード同期法の開発で、さらに電磁エネルギーの高集積化が進んだ。しかし、図5が示すようにその後四半世紀にわたる停滞が続いた。その停滞を破ったのがパルス圧縮法である。ここでは、ニコラウスとグリスコスキーによる最初の実験結果を紹介しよう。¹⁷⁾ 図6に示すように、第1段では色素レーザー系から得たピーク出力 2 kW、5.9 ps の光パルスを長さ 3 m の光ファイバーに通す。色分散の影響で 10 ps の矩形パルスに変形される。ここでは、自己位相変調によってパルスの前面では長波長側に、パルスの後面では短波長側にシフトして、前面の群速度が速く、後面が遅れるので、矩形パルスとなる。この段階で光パルスの増幅が可能である。第2段では回折格子とプリズムで、長波長の光ほど長い距離を進み、パルスの前進が遅れ、逆にパルス後面が進むように設計されているので、200 fs = 0.2 ps のパルスに圧縮される。これをもう 1 回繰り返すことで、90 fs = 0.09 ps の光パルスにまで圧縮されている。

最近では、高次の分散を補正することを工夫し、小林孝嘉と山下幹雄らは光パルス幅の最短の世界記録を競い合い、そのパルス幅は 2.8 fs にまで達している。

6. 原子のレーザー冷却とボーズ・アインシュタイン凝縮¹⁸⁾

半導体レーザーのアレイや光ファイバーに希土類金属イオンをドーブした増幅器を用いて、高出力のレーザー光源が開発され、金属加工にも用いられようとしている。鉄をも溶かすレーザーが、使い方で原子系を超低温まで冷却することも可能となる。しかも、今まで人類が到達できなかった 10^{-9} K のオーダーの極低温まで実現できたことは驚きである。ボーズ統計に従う原子系は一つの量子状態に複数の原子が分布できる。その結果、十分な濃度で十分な低温では、最低エネルギー準位に巨視的な数の原子が占拠するようになる。これが、ボーズ・アインシュタイン凝縮であり、超流動を示すようになる。原子系のレーザー冷却は、多様なインパクトを与えているので、それを次節で述べる。

a) ドップラー冷却

空間を飛びまわっている原子ガスの光吸収スペクトルは、静止している原子の 2 準位間の励起エネルギー $h\nu_0$ を中心として、ドップラー効果による不均一幅を伴っている。その不均一幅の中で、 $h\nu_0$ より低い光子エネルギーを持つ $h\nu$ のレーザー光で励起すると、自然放射で平均光子エネルギー $h\nu_0$ を放出する。その結果、1 回の光吸収-自然放射の過程で、平均として $h(\nu_0 - \nu)$ の運動エネルギーを取り去る。その停止加速度は重力の 10^4 倍もの大きさとなる。たとえば、 $T=800$ K の Sr 原子ガスは 4 cm の停止距離で、0.3 ms の間に停止できる。図 7 に示す z (上下) 軸周りの 2 つのコイルに逆向きの電流を流すと四重極磁場が働き、原子はその原点付近にトラップされる。さらにこの原子系に 6 方向からレーザー光を照射する。

b) 偏光勾配冷却法

自然放射による自然幅 Γ の原子系では $k_B T = h\Gamma/2$ まで冷却可能であり、Na 原子系では 240 μ K, Cs 原子系では

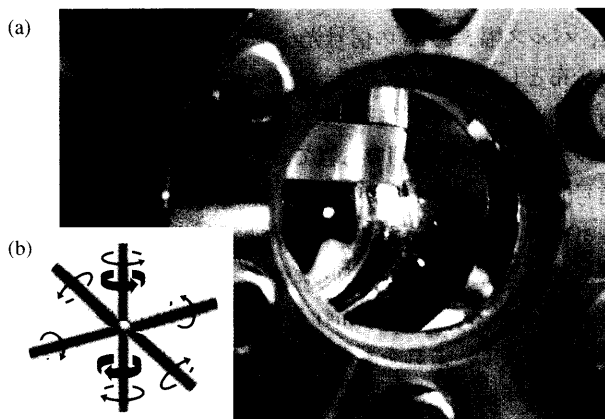


図 7 (a) 真空中で、(b) 図のようにレーザー光を 6 本原点に向けて照射し、磁気トラップされた原子系を冷却させる。(香取秀俊氏提供)

125 μ K まで冷却できる予定であった。ところが、S. チューらは、Na 原子系が限界温度よりはるかに超えて 40 μ K まで冷却されていることを観測した。その理由は、コーエン・タンノージらが指摘した偏光勾配冷却が働いていたためである。互いに逆向きの偏光ベクトルを持つレーザー光を対向させるように照射すると、電磁場の波長の半分の周期を持つ原子系に働くポテンシャルが形成される。原子系はこの周期ポテンシャルの中を運動しながら光吸収し、ポテンシャルの頂上付近で最も高い確率で自然放射するので、a) と同様に運動エネルギーを失って、原子系はより有効に冷却されていく。これを偏光勾配冷却法と呼ぶ。これらの a) と b) の原子冷却法の開発により S. チューとコーエン・タンノージはフィリップスとともに 1997 年度のノーベル物理学賞を受けている。

このように冷却された原子系のド・ブローイ波長 (原子が波動として干渉できる長さ) が数 μ m と巨視的なオーダーとなる。この原子系の波動性を実証する原子線ホログラフィーの実験が NEC と清水富士夫らの共同研究で行われた。

c) 蒸発冷却法とボーズ・アインシュタイン凝縮

原子ガスを冷却して、ド・ブローイ波長が原子間隔より大きくなると、ボーズ統計とフェルミ統計に従う原子系では異なる性質が現れる。その量子統計の顕著な効果の第一がボーズ・アインシュタイン凝縮である。前 2 項目の冷却法では、原子系のボーズ・アインシュタイン凝縮を引き起こすのに十分な低温と原子濃度が得られなかった。1995 年も後半になって、ワイマンとコーネルらは蒸発冷却法を適用し ^{87}Rb 原子ガスのボーズ・アインシュタイン凝縮に成功した。

前項の方法でレーザー冷却した ^{87}Rb 原子ガスをまず磁場トラップに集積する。この磁場トラップが形成する 3 次元放物面型ポテンシャル中で、ボーズ統計に従う ^{87}Rb 原子系は、3 次元調和振動子準位に分布する。低エネルギー準位に分布する低温原子は、原点付近に局在し、高温原子は閉じ込めポテンシャルの壁を高くはい上がる。この高温原子をラジオ波で不安定軌道に遷移させて蒸発させ、低温原子のみをトラップ中に保持する。これが蒸発冷却法で、その結果ボーズ・アインシュタインの条件を満たして凝縮した原子系の分布を観測することに成功した。この業績によりワイマンとコーネルはケトレとともに 2001 年度のノーベル物理学賞を受けた。

d) フェルミ凝縮

前項で使われた原子系 ^{87}Rb はボーズ統計に従うのに対して、本項での対象となるフェルミ統計に従う ^{40}K 原子は重心運動も含めて一つの量子状態に一つの原子しか分布できない。波数 (運動量) 空間では、エネルギーの一番低い原点から詰めていき、フェルミエネルギーまで詰まった状態が原子系の基底状態である。ところで、2 つの原子間に引力が働くときには、その 2 原子はクーパー対を形成して、

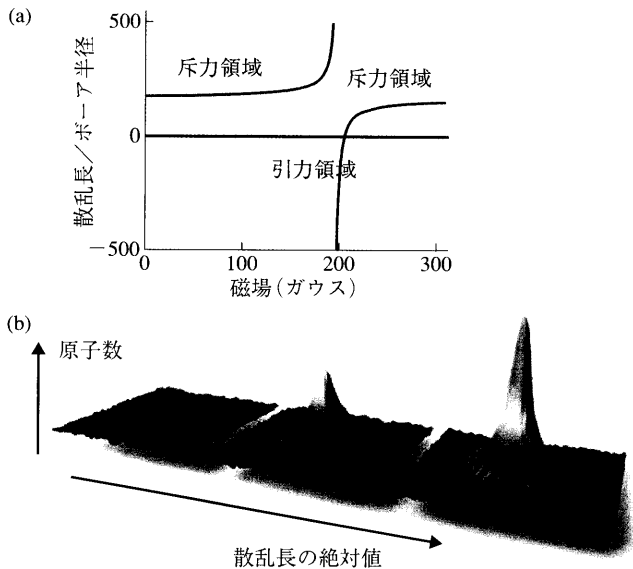


図8 (a) ^{40}K 原子間に働く力(散乱長)を印加磁場で制御し, (b) 引力の大きさを増大するとフェルミ凝縮した原子数が増大する.¹⁹⁾

フェルミエネルギー付近にエネルギーギャップができる。考えている粒子が電荷を持てば超伝導状態で、これはバーディン、クーパー、シュリーハー (BCS) 状態となる。今の場合は中性原子であるので、超流動状態である。

^{40}K 原子間には印加磁場の大きさに依存して、図8(a)に示すように、引力と斥力が働く。200 Gauss付近の磁場で、2原子間に働く力に比例する散乱長 a が発散する現象をフェシュバハ共鳴と呼ぶ。ジンは ^{40}K 原子系を前項(c)と同様に、蒸発冷却法で冷却し、さらにこのフェシュバハ共鳴を巧妙に使って、フェルミ凝縮に成功した。¹⁹⁾ このBCS凝縮状態ではクーパー対を形成する ^{40}K 原子対が重心の波数ベクトル零の状態に凝縮しているが、磁場を変動させて分子として取り出してクーパー対の重心の波数ベクトル分布を図8(b)に示すように観測し、中性原子のフェルミ凝縮の証拠を得た。

ここでの驚きは、BCS理論から予測されるよりもはるかに高い臨界温度でフェルミ凝縮が観測されたことである。 ^{40}K では臨界温度 T のフェルミ温度 T_F との比 T/T_F ($k_B T_F = E_F$) = 0.07 で、 $T_F = 0.35 \mu\text{K}$ であった。この比は、高温超伝導体の値と同程度か、それ以上である。このことは、冷却原子系でのフェルミ凝縮の研究から、高温超伝導を起こすメカニズムの謎の解明を、さらには常温超伝導体発見へのヒントを期待する向きもある。このフェルミ凝縮では分子のボーズ・アインシュタイン凝縮とBCS型凝縮のクロスオーバーを磁場で制御している。これに理論面から寄与したのが大橋洋士である。²⁰⁾

7. レーザー冷却原子と量子情報処理

前半の4節までで紹介した量子もつれとそれを用いた量子情報処理をレーザー冷却原子系で行う動きがある。それを本節で紹介する。

まず、光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ で飛来する光パルスをボーズ・

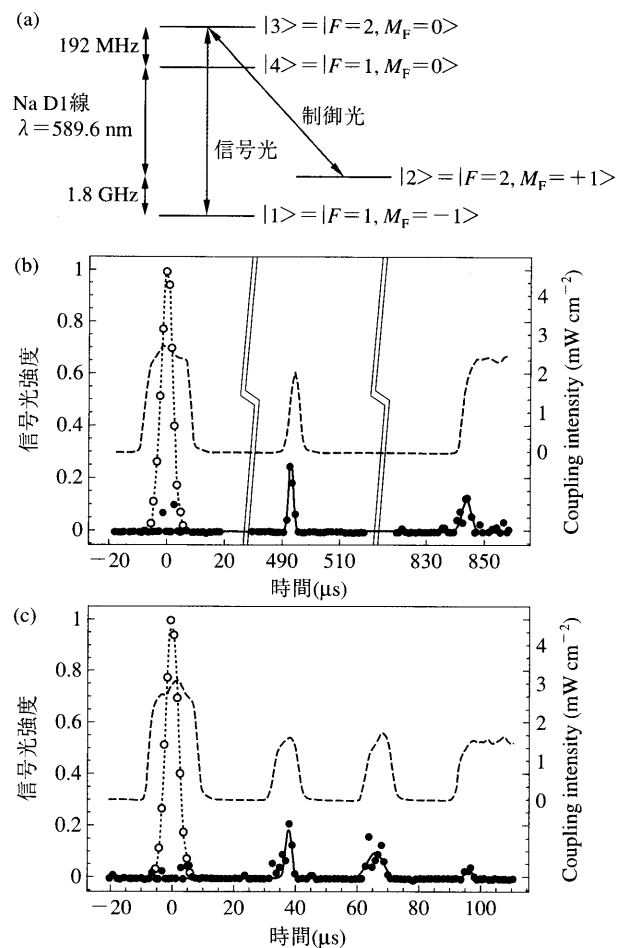


図9 (a) Na原子電子準位と信号光と制御光による電子遷移. (b, c) 時刻0で制御光と信号光を同時に照射し、制御光(点線)を当てるたびに信号光(実線)を取り出せる。²¹⁾

アインシュタイン凝縮した原子系の中で止めて、その光信号を“任意の時間”遅れて“何回でも”取り出せる魔法を紹介しよう。²¹⁾ ここで使う第一の原理は電磁誘導透過現象である。まずボーズ統計に従う ^{23}Na 原子の図9(a)における基底状態 $|1\rangle$ と励起状態 $|3\rangle$ の準位間に共鳴する波長 $\lambda = 589.6 \text{ nm}$ の信号光は吸収され、この系はこのままでは不透明である。ところが、励起準位 $|2\rangle$ と $|3\rangle$ の間の遷移に共鳴する制御光を照射すると、この原子系は信号光に対して透明になる。これが電磁誘導透過の現象である。このとき、信号光の群速度は光速の 10^7 分の1に減速される。そのとき、パルス幅 $5.70 \mu\text{s}$ の信号光パルスの情報は電子状態 $|2\rangle$ の分布として書き込まれる。この記録は制御光を切断してもmsのオーダーは持続する。その結果、その間に制御光パルスを2回でも3回でも当てるごとに図9(b, c)のように信号光を取り出すことができる。²¹⁾

ボーズ・アインシュタイン凝縮していない原子系を使っても同様の現象は観測されるが、その記録時間はマイクロ秒(μs)である。ミリ秒(ms)を長いと思うか、短いと思うかは別として、これを凝縮した原子系を使って 10^3 倍も記憶時間を伸ばすことに成功している点が重要である。

6節(c)の蒸発冷却法を用いると原子系が熱平衡に達するのに数十秒のオーダー待たねばならなかった。この弱点を

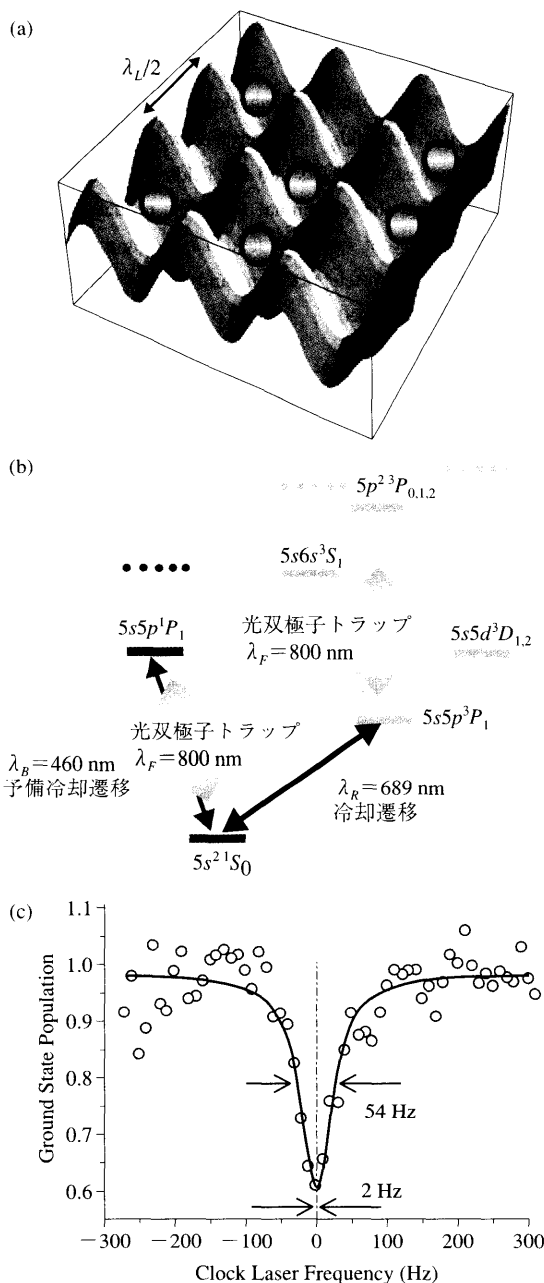


図10 (a) Ti:Al₂O₃ レーザー光の定在波(光双極子トラップ)の中に⁸⁷Sr原子を高々1個分布させる。(b) ⁸⁷Sr原子の電子準位を示す。基底状態¹S₀と励起状態¹P₁間の励起にほぼ共鳴するλ_B=460 nmの光で予備冷却し、同時にλ_R=689 nmのレーザー光で¹S₀と³P₀準位間のスピン禁制遷移を用いて本冷却させる。(c) ¹S₀と³P₀準位間で原子時計用安定周波数を得る。スペクトル幅は54 Hzであった。²³⁾

回避して、同程度の極低温原子系を得る方法を香取秀俊らが提案している。²²⁾ スロンチウム Sr 原子系の図10(b)の電気双極子遷移(5s)²1S₀↔(5s5p)¹P₁で6節a)のドップラー冷却で予備冷却し、次に別のレーザー光に共鳴するスピン禁制遷移(5s)²1S₀↔(5s5p)³P₁を用いてドップラー冷却すると400 nKまで冷却できる。冷却限界温度 $T_B \equiv \hbar\gamma_R/k_B$ は、その励起準位の寿命 $\tau_R = 1/\gamma_R$ で決まるが、この遷移は電子スピンの反転を伴うスピン禁制遷移であるので許容遷移に比して τ_R が3桁長くなり、限界温度も3桁下るためである。しかも600 Kの⁸⁷Sr原子を100 msで1,000 nKまで冷却して見せた。²²⁾ さらに香取は定在波によって原子の安定

点が格子状に配列する光格子を図10(a)のように形成し、その格子点上に冷却した⁸⁷Sr原子を各格子点に高々1個ずつ配置して¹S₀と³P₀間遷移の分光を行う光格子時計の手法を考案した。²³⁾ 現在では、この手法を用いて図10(c)に示すように $\delta\omega/\omega = 10^{-14}$ の周波数計測が実現されている。この光格子の手法は、光周波数域での原子時計実現のための有望な系と認知され、各国の標準研究所でこの手法を採用する研究が始まっている。

図10(a)の光格子に超流動状態にある原子系を移し、光格子を形成するレーザー光を強めていくと、各格子点に原子が局在した状態に相転移していく。この相転移の様子を調べる研究も始められている。

8. おわりに

光科学・技術はあまりにも横断的で、広い分野にまたがり、さらに最近の進展ぶりに目を見張るものがある。毎月届く、Physics WorldとPhysics Today²⁴⁾にも光科学・技術の記事が欠かさず掲載されており、それが届くのを心待ちにしている。本号の記事は、アインシュタインに関連する分野に限ってしまった。彼らの1935年の論文に端を発して、光を用いた量子情報処理と伝送に関する研究の進展ぶりは、ボーズ・アインシュタイン凝縮した原子系の研究とともに目を離せないほどの活況で将来が楽しみである。

参考文献

- 1) 光子の誕生を記述した教科書は多いが、例えば、花村榮一:「量子光学」(岩波書店, 2000)第1章。
- 2) A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen: Phys. Rev. **47** (1935) 777.
- 3) この辺の下りは、次の本に詳しい。アルール, D. アクセル(水谷 淳訳):「量子のからみあう宇宙」(早川書房, 2004)。
- 4) M. Ueta, H. Kanzaki, K. Kobayashi, Y. Toyozawa and E. Hanamura: *Excitonic Processes in Solids* (Springer, 1984) Chaps. 2 and 3.
- 5) K. Edamatsu, G. Oohara, R. Shimizu and T. Itoh: Nature **431** (2004) 167.
- 6) D. Greenberger, M. Horne, A. Shimony and A. Zeilinger: Am. J. Phys. **58** (1990) 1131 が参考になる。
- 7) E. Hanamura: Solid State Commun. **12** (1973) 951.
- 8) P. Walther, J.-W. Pan, M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni and A. Zeilinger: Nature **429** (2004) 158. M. W. Mitchell, J. S. Lundeen and A. M. Steinberg: Nature **429** (2004) 161.
- 9) 古澤 明:「量子光学と量子情報科学」(数理工学社, 2005)。
- 10) D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger: Nature **390** (1997) 575.
- 11) C. H. Bennett, G. Brassard and C. Crépeau: Phys. Rev. Lett. **70** (1993) 1895.
- 12) A. Furusawa, J. L. Sorensen, S. L. Braustein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble and E. S. Polzik: Science **282** (1998) 706.
- 13) T. Aoki, N. Takei and H. Yonezawa: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 080404.
- 14) H. Yonezawa, T. Aoki and A. Furusawa: Nature **431** (2004) 430.
- 15) 量子コンピューターについては、概観するには竹内繁樹:「量子コンピューター」(講談社ブルーバックス, 2005)。詳しくは、M. A. Nielsen and I. L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000)。木村達也による翻訳「量子コンピューターと量子通信 I, II, III」(オーム社, 2005)もある。
- 16) 上村 洸, 菅野 暁, 田辺行人:「配位子場理論とその応用」(裳華房, 1993)。
- 17) B. Nikolaus and D. Grischkowsky: Appl. Phys. Lett. **43** (1983) 228.

- 18) 参考文献1の補章A-2, p. 185に解説がある.
- 19) C. A. Regal, M. Greiner and D. S. Jin: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 040403.
- 20) Y. Ohashi and A. Griffin: Phys. Rev. Lett. **89** (2002); Phys. Rev. A **67** (2003) 033603 and 063612.
- 21) C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi and L. V. Hau: Nature **405** (2001) 490.
- 22) H. Katori, T. Ido, Y. Isoya and M. Kuwata-Gonokami: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1116.
- 23) H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov and V. D. Ovsiannikov: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 173005.
- 24) 例えば, D. Kleppner: Physics Today **58** (2005) 30.

著者紹介



花村榮一氏: 東京大学名誉教授, 現在は千歳科学技術大学教授. 専門は量子光学と光物性の理論的研究. 最近は, 実験にも手を出し, 悪戦苦闘している.

(2005年4月8日原稿受付)

Quantum Optics: From Optics to Photoscience

Eiichi Hanamura

abstract: A 100-year history of physics on radiation field and its interaction with materials is described with emphasis on the activities of Japanese physicists and the fields triggered by Einstein. This is celebrating the centennial of 1905 miracle by Einstein. Particle-wave duality of radiation field, laser, entanglement and its application to quantum-teleportation, and Bose-Einstein condensation of atoms are discussed.

日本物理学会誌 第60巻 第10号 (2005年10月号) 予定目次

最近のトピックス

- カムランドによるジオニュートリノの検出……………西村 純
- 2005世界物理年によせて—講演会「信越地域の中学・高校生に物理学研究の感動を」を終了して—……………久保謙一
- 交流
- 星の位置変動測定による天の川銀河の解明……………郷田直輝
- 解説
- KamLAND 実験の最近の結果と展望 ……清水 格, 井上邦雄
- 最近の研究から
- Pd 多面体超微粒子表面に発現する強磁性
- ……………篠原武尚, 佐藤徹哉
- 希土類化合物における電子四重極モーメントの変調秩序機構
- ……………鬼丸孝博, 榊原俊郎, 阿曾尚文, 鈴木博之

フロント則の起源は何か

- ……………本郷研太, 前園 涼, 川添良幸, 安原 洋
- COMPASS 実験で得た核子スピン構造に関する新たな知見
- ……………堀川直顕

話題

- 宇宙探査ミッションにおける3体問題の役割……………山川 宏
- シリーズ「物理教育は今」
- 初等中等教育の理科の問題点と解決の方向—物理系3学会提言を中心にして—……………兵頭俊夫
- 歴史の小徑
- Einstein と de Broglie の架け橋, Langevin の本音 ……小島智恵子
- 談話室
- 仁科記念財団創立50周年……………山崎敏光
- 新著紹介