

Title	コヒーレンス ニ ツイテ キョクテイオン ト レー ザ ー ト セイタイ
Author(s)	櫛田, 孝司
Citation	大阪大学低温センターだより. 24 p4-p.6
Issue Date	1978-10
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11178
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

コヒーレンスについて

— 極低温とレーザーと生体 —

理学部 榎 田 孝 司 (豊中 2466)

極低温に特徴的な現象の中で最も劇的なものは超流動と超伝導であろう。これらの現象はマクロなスケールで出現する量子力学的な効果として理解される。つまり量子力学によれば物質を構成するミクロな粒子は波動性をもつ訳であるが、マクロな物質は莫大な数の原子からできており、通常の温度ではこれらはランダムな熱運動をしているために平均化されてこの波動性はマクロな所では現われてこない。ところが極低温ではエネルギー的な要請のために注目する粒子、すなわち ^4He とかクーパーペアなどのボース粒子がエネルギー最低の状態に落ち込み、マクロな数の粒子が同一の量子力学的な運動をすると云う状態(ボース凝縮状態)が出現しう。その場合には物質波の位相はランダムではなくマクロな距離にわたって規則性をもつことになり、この位相の長距離秩序のために物質の波動性がマクロなスケールであらわに姿を見せる。これが超流動、超伝導の現象である。これらは多くの粒子が協同してマクロな結果を生むもので協同現象と呼ばれるものの中に含まれる。

波の位相に秩序性が有るか無いかと云うことは波を重ねた場合に干渉効果が観測されるか否かと云うことと同じであり、その度合いをコヒーレンスと呼ぶ。ところで良く知られているようにレーザーの光は指向性がよくまた単色性が優れている。これらはそれぞれ空間的ならびに時間的な干渉性が高いことを意味し、レーザー光のコヒーレンスが優れていることを示している。実はこの場合にもボース粒子である光子は殆どが或る限られた状態(自由度)にあり、一つの状態にはマクロな数の光子が存在する。このような場合に光子の集団が古典的な波動として振舞うことは、量子の不連続性が無視できるほど光子数が大きい極限では量子論は古典論に一致すると云う対応原理からも容易にうなづけよう。この場合には光子の間には強い相関がある訳で、この事はレーザー光について光子集団の統計的な振舞いを例えば光子を直接に数えて分布を求めると云ったやり方で調べることにより実際に確かめることができる。

ところで位相のそろったコヒーレントな光はエネルギーや運動量は運ぶがエントロピーは運ばない。したがってこれを物質に当てた場合、吸った光が熱に変換されるとすると物質の温度は極めて高温に上がりうることになる。これがレーザーがダイヤモンドの孔あけや鋼鉄の切断などの加工、さらには核融合などにも使うことができる理由である。一方、このような光を吸った物質がこれを熱に変えるのではなく再び光として放出する場合を考え、放出光が螢光のようにコヒーレンスが悪くエントロピーを運ぶとすると、差し引きとして光のエントロピーは増えることになる。したがってその分だけ物質のエントロピーが減少し温度が下がったとしても熱力学の第二法則に矛盾しない。このような原理によって物質の温度を下げることを光冷却と呼ぶが、この方法で極低温を得ることも原理的には可能である。光冷却の丁度逆になっているのが光励起型のレーザーである。つまりエントロピーの大きなインコヒーレントな光を当てて、エントロピーが殆ど零のコヒーレントな光が取り出される。これが可能であるためには物質中に負温度状態と呼ばれる熱平衡からずれた状態を実現しなければならないが、それには分布を反転させるべき二準位間のエネルギー差よりも平均として大きな光子エネルギーをもつ光を励起に用いる必要がある。この余分のエネルギーは物質系のエントロピーを増大させ、これが光のエントロピーの減少

分を補償する訳である。

ところでレーザーの場合、かなりの高温にあり、原子はランダムな熱運動をしているにもかかわらず、なぜコヒーレンスが現われてくるのであろうか。これは一言で言えば、誘導放出により放出される光が入射光と振動数、進行方向、偏光方向、位相とも全く同じで、光の増幅がコヒーレントに起こると言うことによる。つまり誘導放出は誘起双極子から生ずるが、この双極子の振動はこれを誘起する振動電場によって決まり、個々の原子の状態を表わす波動関数の位相には関係しない。したがってレーザー中の全ての原子によって作られた平均振動電場を考えると、全ての双極子がこれによって誘起され、さらにその誘起双極子によって全体の電場が作り出されると言う風にして、双極子間に或いは振動電場に位相の秩序が確立されることになる。これもまた協同現象の一種である。このように平均的な場を通して集団中の各要素が互にかかわり合うと云う考え方は強磁性体や超伝導体などでも有効であり、レーザーに加えるエネルギーが或るしきい値を越した際に発振が起こる現象と相転移点付近の系の協同的振舞いや、単一モード（自由度）のレーザー発振とラムダ点以下の⁴Heのボース凝縮などは互いに密接に関連している。

話は跳ぶが、生き物について考えると、生体は室温のような高温でも高い秩序を保つばかりでなく、例えば受精卵が一人前に成長すると云った具合に新たに秩序を作り出して行く。これは物理的には非常に不思議に見える訳であるが、波動力学で有名なシュレディンガーはこの説明として、生物は負のエントロピーを食べて生きていると述べて物議をかもした。彼の云わんとする所は、生体は孤立した系ではなく、外界から色々のものを取り入れ、また外部に排泄すると云うことを行なっているのであって、出し入れの差し引きとしてエントロピーを外に捨てることにより高い秩序を維持したり新たに作り出すことが可能になる、と云うことであろう。こう考えると物質代謝の本質が光冷却の原理と非常に似かよったものであることが分かる。

ところで生体の示す驚くべき秩序性の裏には何か超流動や超伝導と類似のメカニズムがひそんでいるのではないかと考えるのはあながち突飛な発想とは云えないであろう。シュレディンガーも「生命とは何か」と云う本の中で、生体はマクロな系でその一部の自由度に関してはあたかも0 Kであるかのような秩序性を示すと述べている。誘電体と云う著書や超伝導の理論などで知られるフレイリッヒはこの10年ほどそのような観点からの研究を数多く発表している。例えば細胞において準備がととのうと細胞内の多くの分子があたかもそれを知っているかのように整然と細胞分裂が起こると云う風に、生体には各種の協同的な振舞いが見られるが、フレイリッヒによるとこれはコヒーレントな電気振動がそれを支配しているからであると云う。ではどうしてそのようなコヒーレンスが生ずるかと云うことになるが、彼はレーザーと似たようなメカニズムを提案している。つまり細胞などの生体系には電気振動のブランチがあるが、これには代謝によってエネルギーが供給されており、それが或るしきい値を越すとボース凝縮的な転移が起こって単一モードが強く励起されたコヒーレントな振動状態が実現すると云う訳である。彼はエネルギーの供給を受けて電気振動する系が熱溜と非線型な結合をしていると云うモデルによって室温でもこのようなことが可能であることを実際に示したほか、さらにこのような振動が起こると系は種々の弾性変形を起こしてコヒーレントな振動は安定化され、強誘電体と同様の強い電気分極を示す準安定状態が実現されること、またこのようなコヒーレントな振動の励起に伴い、近い共鳴振動数をもつ

系を強く引きつける長距離の相互作用が生じることなどを示した。系の変形は系の大きさに依存する張力を生むから、このようなコヒーレントな振動が細胞分裂をトリガーしている可能性が考えられることになり、また強い電気分極や選択性をもつ長距離相互作用は酵素の働きやその驚異的な効率の良さなどの説明を可能とする。さらに光合成や脳波との関係やがんの機構の問題なども議論されており、近い将来、多くの生命現象の謎がこのような観点から解明されることになるかもしれない。

ここではコヒーレンスに関係していくつかの問題について述べた。極低温の物性に関するこの方面の話題として励起子系のボース凝縮の問題もあるが、これについてはまた別の機会に述べることにする。なお、コヒーレンスの概念は量子論の基本とも密接に関係して極めて重要であることを付け加えておく。

応用物理学会関西支部セミナー “ 低温物理とその応用 ”

昭和53年度も標記のセミナーが開催されることになった。

○第1回（低温工学協会関西支部と共催）

6月2日 帝国酸素播磨工場

我が国最大規模の水素液化機（730ℓ/h）の組立て過程の見学会とそれに関連する講演・見学会を開催した。参加者は61名で講演内容は次の通り。

液体水素の現状と将来

帝国酸素機器事業本部 花田卓爾氏

○第2回（低温工学協会関西支部および阪大低温研究会（第24回）と共催）

10月12日 大阪大学工学部

今夏ヨーロッパで開かれた低温関係国際会議の報告を中心とする外国における低温研究に関する講演会が開かれた。参加者は54名で阪大工学部の山田朝治教授の司会で会は進められた。

I、ICEC7（第7回国際低温工学会議）に関して

1. 概要報告 神戸商船大学 佐治吉郎氏
2. 主たる発表の紹介 大阪大学 山本純也氏

II、LT-15（第15回低温物理国際会議）に関して

1. 概要報告 大阪市立大学 信貴豊一郎氏
2. 研究所見学雑感 大阪市立大学 藤井佳子氏