

霜田光一先生 特別講演会

「メーザー・レーザーの原理」

～連成振り子による誘導放出、自然放出と量子コヒーレンス～



日時：2016年11月22日（火）17:00～19:00

場所：電気通信大学 東5号館241室

主催：電気通信大学

JST, ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト
量子科学研究センター

美濃島 それでは皆さん、こんばんは。

私は、S 専攻の美濃島と申します。今回は、霜田光一先生の特別講演の企画をさせていただきました。こんな遅い時間、5時になってしまいましたけれども、このように学生さんも、外部からもたくさんいらしていただいているとお聞きしています。ありがとうございます。

霜田光一先生は、ご存じのように大変著名な先生で、



言ってみれば日本のレーザーの草分け、量子エレクトロニクス分野の草分けという先生です。本日は「メーザー・レーザーの原理」というタイトルでお話しいただきますけれども、メーザーというのはレーザーの前段階ですね。レーザーは皆さんよくご存じだと思いますけれども、レーザーは特別な性質のそろった光を出すもので、そのマイクロ波のものはメーザーですね。

霜田光一先生は、メーザーの時代から世界の最先端の研究をされて、この分野を引っ張ってこられました。いま御年 96 歳で、申年で年男でいらっしゃいます。現役で、あちこちでご講演はもとより、今日はこのような形で実験のセットアップがされていますけれども、研究だけではなくて、物理教育の分野でも長年力を入れてこられています。

特に物理の面白さを一般の人や子供たちも含めてみんなに知ってもらおうという実験を考案されて、いろいろなところで実演されて、アクティブに活動されています。電通大の皆さんのために、今日はお越しいただいてご講演をしていただくという大変貴重な機会に恵まれたということです。

簡単に霜田光一先生のご紹介をさせていただきます。1943 年に東京帝国大学理学部物理学科をご卒業され、大学院特別研究生になられました。1948 年には東京大学理学部助教授、1959 年に教授、1981 年に名誉教授になられました。その後 1960 年に理化学研究所主任研究員を兼任されて、1981 年には名誉研究員、1981 年からは慶應義塾大学工学部客員教授、1993 年には、東京都立科学技術大学客員教授と歴任をされています。

数々の受賞もされています。1974 年には東レ科学技術賞、1979 年には米国光学会の Mees Medal、1980 年には日本学士院賞、1990 年には勲二等瑞宝章、2008 年には文化功労者を受賞されています。

たぶん皆さんに有名なのは教科書ですね。授業でも使っている方が多いと思いますけれども、「エレクトロニクスの基礎」、「レーザー物理入門」、「歴史を変えた物理実験」という数々の教科書も書かれています。

今日は「メーザー・レーザーの原理」というタイトルで、「連成振り子による誘導放出、自然放出と量子コヒーレンス」という副題が付いています。このような貴重なご講演と実験の実演という機会を、皆さん、ぜひ楽しんで活かしてください。

それでは先生、よろしく願いいたします。



霜田 どうも美濃島先生、丁寧な紹介をありがとうございました。今の紹介の中にはありませんでしたけれども、殊にこの2~3年、目も耳も不自由になりまして、特に目が昨年から非常に具合が悪くなって、従って十分なことができないのを申し訳ないと思うのですけれども、そんな私の話のために皆さん、お集まりいただいてありがとうございます。

今日は、講演と言っても話よりも実験が主でありまして、古典的な実験を使って、それによって量子現象を理解するというか、説明します。それは単に説明の道具というかアナロジーじゃなくて、実は物理現象として共通な原理がそこにあるということまでが分かっていたらと思います。

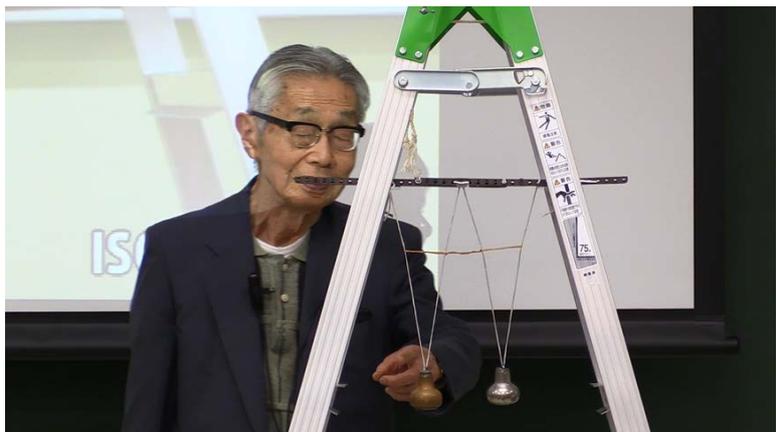
今、美濃島先生からも紹介がありましたように、主題は「メーザー・レーザーの原理」で、その原理が古典的な振り子で説明ができるということです。アインシュタインが光量子の仮説を1905年に出して、1916年から1917年にかけてだったと思いますけれども、誘導放出、自然放出という理論を提出しました。そのアインシュタインの誘導放出の原理を応用して、メーザーやレーザーができたと言われていています。なぜそれから実際にレーザーができるまで40年、50年という時間がかかったかということも、これからできれば触れてお話をしようと思います。

「メーザー・レーザーの原理」と言いましても、副題に書きましたように、実験を使って説明をしますので、講演と言いましても、実際には実験を皆さまに見ていただくというわけです。時間が割合あるようですから、実験がよく見えない方は、後からそばへ来て実験をしていただいても差し支えありません。

それから、講演の途中で私が言い間違えるということもあると思いますし、聞き取れないというような時には、どうぞ質問なさっていただいて結構です。内容についての質問も後からでも途中で結構ですので、その点よろしく願いいたします。

最初に、連成振り子の実験から話を始めます。連成振り子というのは、長さの等しい2つの振り子をスプリングでカップルさせたもので、それがここに作って置いてあります。スプリングと言っても、実際ここには輪ゴムを使っていますが、原理は同じです。2つの同じ長さの振り子が結合した連成振り子、皆さんも話に聞いたことがある、あるいは実験したこともあると思いますけれども、詳しく実験を見たことはないかと思しますので、実験しながら説明します。

最初に片方の振り子は止めておいて、片方の振り子だけを振れさせますと、初めに止まっていた振り子、こちら側の色が銀色のものが、だんだん振幅が大きくなります。初めに振らしていた振り子はだんだん止まりまして、それがもうちょっと止まると、ほとんど完全に止まります。まだちょっと動いてますが、ほとんど完全に止まっています、それから今度はこちらも動き出します。それからこちらが振幅が大きくなった時に、今度は初めに止まっていた振り子がまたほとんど完全に止まるわけです。こういうふうに止まります。今度はこちらがだんだん振幅が大きくなってくるといふふうに、右側の振幅が大きくなったり左側の振幅が大きくなったりするというのが連成振り子の現象です。



これまでのことは、皆さん、実験を見たこともあるし、知っていると思いますけれども、このような連成振り子の振動というのは、この振り子の、つまりカップルした振動系の固有振動ではないのです。固有振動がどんなものかということあまり知られていないというか、少なくとも実験をしてみた人は少ないと思います。

1つはごく当たり前だと思いますけど、両方を同じにします。こうしますと両方の振幅が同じままで、いつまでも振動するのが固有振動です。つまり空間的な振動の分布、振幅というよりエネルギーと言った方がいいのですが、その空間的分布が変わらないで振動を続けます。実際には少し実験誤差がありますから、多少食い違ってきますけれども、いつまでも同じように振動します。もちろん減衰もありますので、振幅がだんだん小さくなっていくことがあります。

こういう同位相で振動するものに対して、もう 1 つの固有振動は、両方を逆向きにスタートさせますと、ちょうど歩く時の手や足の運動みたいなもので、右左が代わり番こに振動しています。さっきの連成振動では、右が大きくなって、それが小さくなって左が大きくなってというふうに空間的な分布は変わりましたが、これでは左右の振幅の分布は同じまいつまでも続いています。いつまでもというのは理想的な場合で、実際には少し減衰するということになります。

この固有振動についてその振動数を考えます。さっきの固有振動に比べまして、2 回目の振動はいわば反対称に振動しています。反対称に振動する時には、このカップルしているスプリング、今はゴムひもですけど、このゴムの弾性で戻ります。重力に加えて弾性で戻す力が働きますから、これの方が振動数が高いということになります。

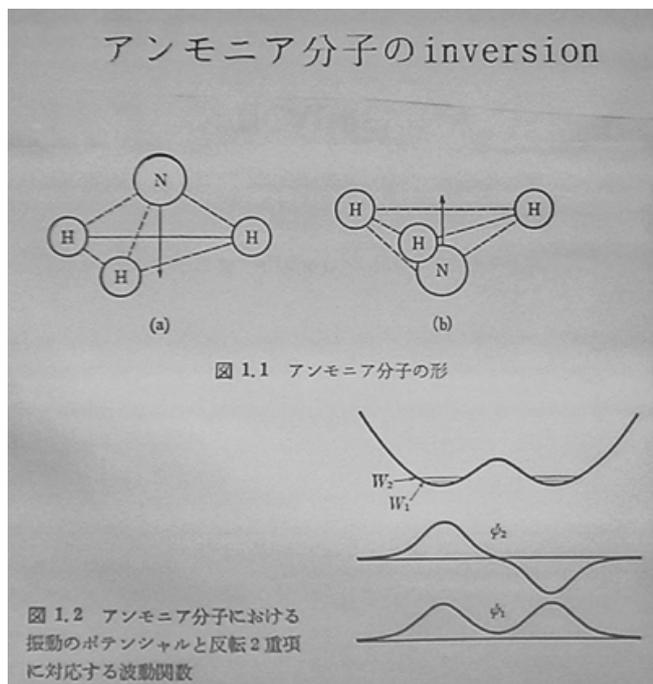
ですから、この反対称振動と対称振動の 2 つの振動、その 2 つの固有振動のビートとして、初めのこういう連成振動が起こっています。右側が大きくなると、左側が小さくなり、それが左右で入れ替わるのがうなりの周波数で、いわばビートになるわけです。

量子力学的には、皆さん、ご承知のように、反対称状態の固有エネルギーと対称状態の固有エネルギーの差で振動しているわけです。

初めに申し上げた方がよかったのかもしれませんが、今日の話の筋書きをここに書いておきました。特にこれにはこだわりませんが、このようなモデルを使ってアンモニアのスペクトルや誘導放出を説明します。

このようなモデルを描きましたのは、メーザーの原理を説明するためで、国際会議でも使ったものです。初めに作られましたメーザーは、アンモニア分子のマイクロ波スペクトルを使いました。ここに書きましたように、アンモニア分子では水素原子が正三角形に並んでいて、それに対して 1 つの窒素原子があるわけですが、これが平べったいピラミッド形をしています。

普通はピラミッドはこのような格好をしていますけれども、アンモニア分子ではこの正三角形に対して窒素原子は正四面体の頂点よりはずっと低い、実際のピラミッドよりも平べったい形をしています。そうしますと、この窒素原子が水素原子の間を通り抜けて下側に抜けるという運動が可能になってくるわけです。



しかし、途中のポテンシャルが高くて、窒素原子が水素原子の片側にある時と反対側にある時とで、対称的なミニマムがあるというダブル・ミニマムなこういうポテンシャルになるわけです。このポテンシャルの深さに対して、エネルギーの小さい振動状態ですと、ポテンシャルの下の方がだいたい調和振動子と同じようになるわけですから、このところで波動関数が大きくなります。

それから、窒素原子が反対側にある時には、そのところで波動関数が大きくなるわけです。量子力学的には、そのエネルギーがダブル・ミニマム・ポテンシャルの中央の山よりも小さくても、いわばトンネル効果で通り抜けます。あるいは、波動関数で言いますと、波動関数がエクスポネンシャルに減衰していくわけで、その重なり方が両方が同じ位相になる時と逆位相になる時があるわけですね。

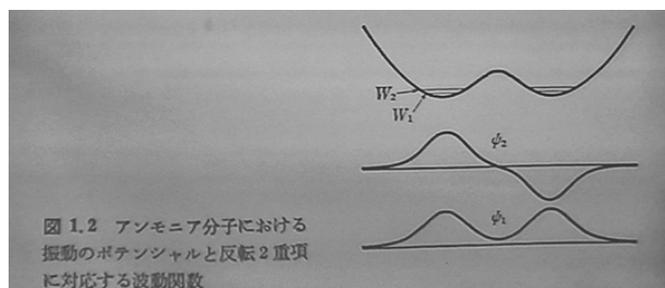
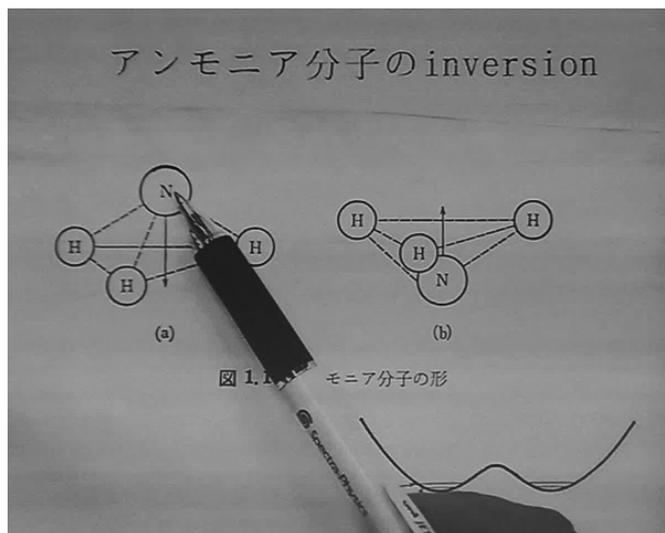
同じ位相になる時には、ここでの波動関数の空間的な変化ですね、空間周波数と言っているものですが、それが低い。反対向きにカップルする時には、少しこのところが急になるわけですから、こちらの方がエネルギーが高い。つまりこういう反対称の振動のエネルギーの方が少し高く、対称的なモードで振動する時の方がエネルギーが低いわけで、これがいわゆるインバージョン・ダブルットを作っているわけです。

量子力学的には、インバージョン・ダブルット (inversion doublet) の間のエネルギー差はボーアの振動数条件に応じて、つまりエネルギー差を h で割ったものがインバージョン (inversion) の周波数になります。アンモニアの場合には、これがだいたい 24 GHz のところにあるというわけです。

実際のアンモニアは静止状態ではなく、分子の振動、回転があるわけで、回転状態によってポテンシャルの形が少し違ってまいりますから、回転状態によって少しずつ周波数が違う、いくつものスペクトルがマイクロ波で 24 GHz 近傍、低い方は十数 GHz から 30 GHz 以上のところまで観測されます。

その中で一番強いものがだいたい 24 GHz、詳しく言うと 23.87 GHz という周波数になるわけで、これを使ってレーザーが作られたのです。

レーザーが初めて発振したのは 1954 年でありますけれども、タウンズは 1951 年にアンモニアの分子で反対称ポテンシャル状態の分子の方を対称的なモードで下のエネルギー準位にある分子数より多い、いわゆる反転分布の状態にしますと、誘導放出によってレーザーが作れると考えて実験して成功したというわけです。



しかし、このような反対称波動関数と対称波動関数の間の遷移によってスペクトルが決まるといのは、アンモニアのインバージョン・ダブルットというようなポテンシャルでなくて、量子力学ではおなじみのハーモニック・ポテンシャルにおいても起こるわけです。

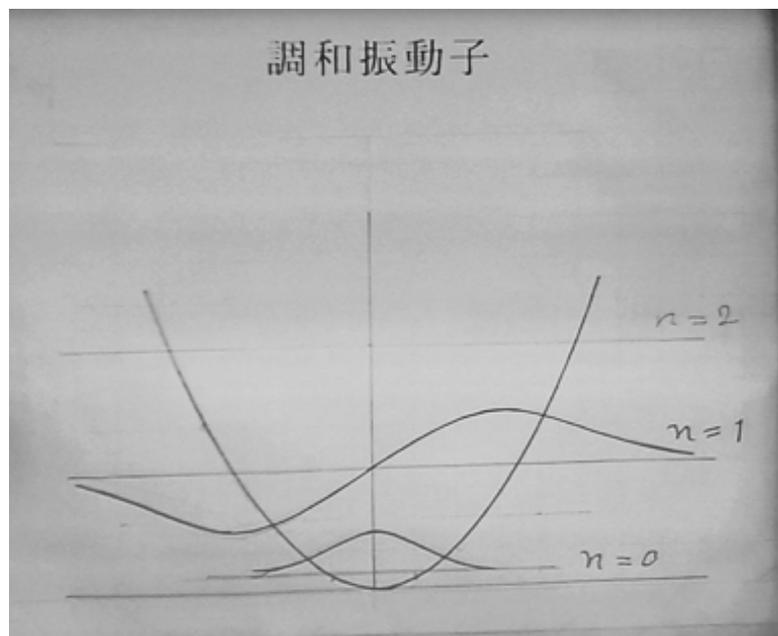
一般にここに書いてありますように、ポテンシャルの中心に座標軸を決めた時に、左右対称の形でないといけないわけで、右側のポテンシャルと左側のポテンシャルの形が違うという場合は別であります。対称

左右対称ポテンシャルの粒子の量子力学

固有関数を $\psi = \psi(\text{左}) + \psi(\text{右})$ と表して
 空間積分すれば $|\psi(\text{左})|^2 = |\psi(\text{右})|^2$ であるから
 2つの定常状態は $\psi(\text{左}) = \psi(\text{右}) \quad \dots$ 対称
 $\psi(\text{左}) = -\psi(\text{右}) \quad \dots$ 反対称

的なポテンシャルの場合には、最低のエネルギーの固有状態というのは対称的で、それから励起状態の方は反対称になるということが波動関数の規格化条件から出てきます。そのことをこの図では説明したわけですが、これは皆さんすぐ分かることだと思います。

対称的なポテンシャルで、たぶん量子力学の教科書で一番初めに出てくるのは、ハーモニック・ポテンシャルです。先ほどもアンモニアのスペクトルの時に、窒素が片側にある時の小さい範囲では、ハーモニック・ポテンシャルに近いということを行いました。ハーモニック・ポテンシャルの場合には、普通、量子数 n が 0、1、2 というふうに言うと思いますけれども、基底状態で $n=0$ の時には対称的な波動関数になりま



すし、 $n=1$ の励起状態、つまりこれより上の固有状態の時には反対称の波動関数になるわけです。

さらに $n=2$ になりますと、これもまた対称的な波動関数になり、 $n=3$ だとまた反対称になるというわけですが、今は下の方の 2 つの準位だけ考えますと、波動関数が対称になる時の固有エネルギーと反対称になる時のエネルギーの差がハーモニック・ポテンシャルの中の原子であつてもなんでもいいわけですけど、その量子系の振動エネルギーになっているということが当然です。

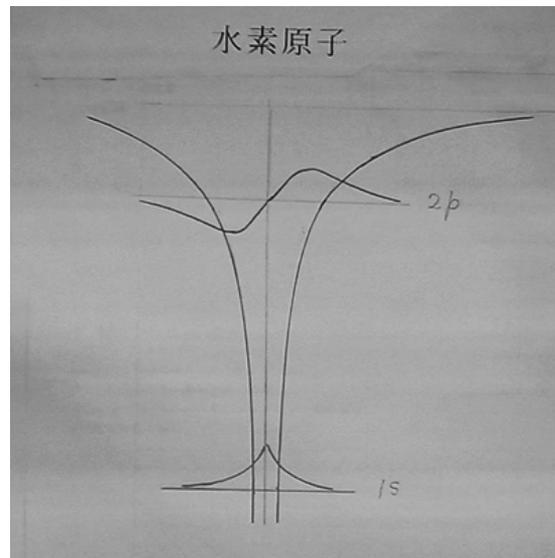
その次に、ボーア・モデルとしては水素原子がよく説明に出てくるとは思いますけど、水素原子には、陽子の原子核の周りにマイナスの電子を持っているわけで、電子と陽子の間、つまりプラスの電気とマイナスの電気の間にはクーロン力が働くわけです。クーロン・ポテンシャルというのは間の距離を r としますと、ポテンシャルでは r 分の 1、力と言えば r^2 乗分の 1 のクーロン力が働いています。 r 分の 1 ですから、中心が非常に深いという形のポテンシャルになります。

しかし、水素原子の波動関数も基底状態の波動関数が対称的で、励起状態の波動関数が反対称的になるということもご承知のことだと思います。

一番初めに言いましたアンモニアの場合には、インバージョン・ダブルットの間隔が非常に小さい。エネルギーで言いますと、1,000 分の 1 電子ボルトよりも小さい。つまりマイクロ波の範囲になります。

水素原子では、この絵でもすぐ分かるように、ポテンシャルが非常に深いために、基底状態のエネルギーが非常に低いところにあるので、この基底状態と励起状態の間のエネルギー差が 10 eV ぐらいある。というわけで、この間の遷移は、紫外線と言いましても波長は大変短い 120 nm、1,200 Å (オングストローム) ぐらいのところにはスペクトルが来るということになります。

通常の教科書とか、戦前の量子力学で考えていることは、水素原子にはいろんな定常状態があって、そして基底状態、それから励起状態があって、ボーアのモデルで励起状態から基底状態



に遷移する時に光が出るというわけです。しかし、励起状態の定常状態では、波動関数は左右反対称でありますけれども電子の存在確率は左右同じですから、この時には双極子モーメントは無いわけです。定常状態という言葉があるように、これは定常であって、それは光を出さないと考えるのが当然です。

ボーアの理論では、古典的には光は出さないのですけれども、それがスポンテニアスと言いますか、クオラム・ジャンプ (quantum jump) で下に落ちると言うことが起こる。アインシュタインもそういう考えですね。自然放出というものが自然に起こって、それが光になると言っていたわけで、それは古典的な電磁気学では起こらない現象であると。

なぜスポンテニアスな放出ができるかというメカニズムについては、全然触れていないわけです。定常状態であると言っても、定常ではないと言ったわけですがけれども、量子エレクトロニクス概念がはっきりしてから、この定常状態からなぜ下へ落ちるかということが、この連成振子の実験によって理解できるわけです。

なぜかと言いますと、先ほどの連成振子で示しましたように、下の 1s 状態の上の状態は p 状態で反対称です。純粹に 2p 状態だけであると、それはアンモニアの時にも説明したように、双極子モーメントが無いので、やはり電磁波を出したり吸収したりということはないわけです。

ところが、量子論的には、基底状態が本当に静止しているのではなく、あるいは、これはハイゼンベルクの不確定性原理ですね。アンサータンティアー・プリンシプル (uncertainty principle) で考えてもよろしいように、ここでは位置や運動量が不確定に振動しています。

簡単な言い方をしますと、いわゆる量子ゆらぎ、零点振動があると言ってもいいわけです。1s 状態に零点振動がありますので、零点振動と 2p 状態の励起状態と両方ありますと、先ほどの連成振子の実験のように、エネルギーの差に相当する振動数のビート、その振動数で双極子モーメントが現れるわけです。ですから、それによって励起状態の原子は光を出して基底状態に落ちると言うことが起こるわけです。

この零点振動がどのくらいあるか考えましょう。零点振動が1次元だと、1次元の単位長さ当たりに対して言いますと、その中に波がいくつ入るかということで決まるわけですから、波長に反比例するわけです。波長が2分の1になれば、この中にあります波の数は2倍になるわけですね。ですから、波長に反比例するということは、周波数に比例するわけです。



単位長さ当たりの振動のモードの数が周波数に比例します。1次元ではそうですが、3次元空間の中の水素原子で考えますと、周波数の3乗に比例して零点振動があるわけです。周波数の3乗に比例して連成振動が起こる。振動が起こった時に放出される光のエネルギーがその振動数に比例しますから、そのようにして放出されるエネルギーで言いますと、周波数の4乗に比例して放出エネルギーが増えるということになります。

従って自然放出が周波数の4乗に比例するというので、こういう水素原子だと励起状態の寿命が非常に短いわけです。この間隔がさっき申しましたように、10 eV あるという時には、この遷移が、はっきりした数字を覚えていませんが、10のマイナス10乗秒ぐらいでしょう。ナノ秒より短いはずで、10のマイナス10乗秒ぐらいになっています。それに比べて波長が長い、可視光と比べてもいいのですけれども、さっきのマイクロ波に比べますと、こちらが120 nmで、マイクロ波の方が1.2 cm, 12 mmとしますと、5桁違います。そうすると5桁の4乗違うということになりますので、20桁遷移確率が小さい。自然放出がそのぐらい小さいということになります。

こんな違いを言いましたけれども、途中の可視光のところはその中間ぐらいになります。先ほどのようにソフト X 線のところで、10のマイナス10乗秒としましても、マイクロ波では10の5乗秒ぐらいと長い。10の5乗秒というと、だいたい1日ですね。1日が8万6千4百秒ですから、1日ぐらい長いというわけです。励起状態のアンモニア分子は1日ぐらい励起状態のままにいますということですね。

実際には実験装置が限られた大きさでありますと、真空中にアンモニアの分子を置いておいても熱運動で通りすぎてしまっ、そのためにライフタイムが決まるということになります。可視光はその中間ということになりますが、マイクロ波では実験中に自然放出はほとんど無視できるという状態になります。従って、誘導放出だけを考えていけばよろしいということになります。

誘導放出のメカニズムはあまり詳しく言いませんけれども、お分かりのように、連成振子は外力によって連成振動を始めるので、外からの振動に同期して同じ振動数で、それとある位相差の振動が励起されるというふうになるわけで、それが誘導吸収、あるいは誘導放出を起こしているということになるわけです。

アンモニアの場合ですと、アンモニア・レーザーの構造は今日は説明しませんが、励起状態の分子だけを用意してやりますと、この場合には実際には先ほどの水素の場合と違って、サ

ーマル・ノイズ (thermal noise, 熱雑音) が問題になるわけです。低周波ですとサーマル・ノイズによって励起状態の原子が連成振動状態になって、オシレーティング・ダイポール (oscillating dipole) を作ってマイクロ波を出します。

マイクロ波がいくら出ますと、それをマイクロ波の共振器の中に置いて、マイクロ波が共振器の中であまり減衰しないうちに、別のアンモニアの励起分子を送り込んでやりますと、自励発振が起こるわけです。それがアンモニアのレーザーで、1954年に実現されたわけです。

そのアンモニアのレーザーをタウンズが作った時の1つの理由は、今でもそうですけれども、当時、真空管でマイクロ波を出すのは大変困難でした。波長の長い方、デシメートル波、センチメートル波はできますけれども、ミリ波になりますと、今日でも真空管で発生するのは非常に困難です。波長の長い5 mm か 6 mm ならできますけれども、波長が1 mm か 2 mm を発振する真空管は今でも作られていないのではないかと思います。

そういう短い波長の電磁波を使って、分光実験、その他の物理実験をやりたいということで、タウンズは分子発振器とも言えるレーザーを考案したわけです。というのは、現在でもそうありますけれども、マイクロ波と赤外線との間には、技術的にも科学的にもギャップ、いわゆる谷間があります。

赤外線技術も波長の短い1 μm 、10 μm 、いわゆる近赤外、中赤外と呼ばれているところは分光実験もありますし、いろいろな応用も進んでいました。波長が100 μm より長いところ、いわゆる遠赤外部分、今日ではテラヘルツ領域と言っているようなサブミリ波、あるいは、遠赤外に相当するところは非常に開発が遅れていて、その辺をレーザーによって実現したいと考えていたわけです。

ところが、実際にはレーザーを作ってみますと、アンモニア・レーザーはインバージョン・ダブルットを利用したということで非常にうまくいったのですけれども、波長の短いレーザーを作るのはなかなか困難がありました。波長が4 mm、5 mm、3 mm から2.6 mm か 2.7 mm ぐらいのレーザーまでは分子を使って作ることができたのですけれども、それも非常に困難でした。

それより短い、波長が1 mm、あるいは1 mm 以下のレーザーを作るのは非常に困難であるために、1954年にレーザーができて2~3年後に、ミリ波、あるいはサブミリ波のレーザーを作ろうという研究をやった人は少なくなかったです。今日の常識から言えば少なかったと言った方がいいかもしれませんが、せいぜい数カ所ぐらいでそういう研究が行われましたが、なかなかうまくいかない。

アンモニアのレーザーができてから数年後の1958年に、タウンズは、今日で言うところのテラヘルツ領域はだいぶ難しいけど、もっと短いいわゆる赤外や可視光になりますと、いろいろな技術があると考えました。つまりサブミリ波領域ですと、例えばレンズやプリズムも無いわけです。波長が10 μm とか1 μm というような赤外線の技術は、可視光に比べると少ないかもしれませんが、かなりの技術があるし、その辺の物理もよく知られていました。

光については、なおさらいろいろなこれまでの技術の蓄積があります。これまでは、マイクロ波からセンチ波、ミリ波、サブミリ波と順々に波長を短くしていくという技術の進歩が普通だったわけです。ラジオ技術などもそうですし、他の技術、例えば半導体技術についても同じですけれども、そういうふうにステップ・バイ・ステップで順々に進むのではなくて、途中を飛び越えて可視光や赤外の発振器、レーザーを作る方がよかろうというのです。

当時は、インフラレッド・メーザー (infrared maser)、あるいは、オプティカル・メーザー (optical maser) と呼んだわけですが、その方が可能性があることを 1958 年に考えました。同じようなことを当時ベル研にいたアーサー・ショーロウも考えておりました、タウンズがアドバイザーとしてベル研に週に 1~2 回行っていたそうで、その時にいろいろディスカッションを重ねました。

それで「Infrared and Optical Masers」という題の、A.L.Schawlow and C.H.Townes の論文が Physical Review の 1958 年の 12 月号に発表されました。

アイディアは 1958 年の春に出て、8 月にプレプリント (preprint) をディストリビュート (distribute) したわけです。今日のようなインターネットはありませんで、その頃はプレプリントを郵便で送るのが普通でした。雑誌も郵便もエアメールはほとんど使えなくて、船便で送るという状況でした。とにかくそういう論文が発表されて、これによって今日で言うレーザー、当時はオプティカル・メーザー (optical maser) と言っていたものの研究が大いに加速されました。

1960 年にメイマンが最初にその発振に成功したというわけです。メイマンの最初の発振も本当にそれがレーザーであるかどうかということは、だいぶ疑わしいものでした。数カ月後になって、それはやはりオプティカル・メーザーと言っているものであるということが分かって、メイマンが最初のレーザーを作ったということになるわけです。

当時はオプティカル・メーザーという言い方をしておりましたが、2 語になっておきますと、それだけの時にはいいのですけれども、応用分野が広がってまいりますと使いにくいということで、レーザーの方が便利だということで、レーザーという言葉がよく使われるようになりました。

レーザーができる少し前には、可視光のメーザーのことをレーザーと呼んで、赤外のメーザーは iraser、紫外は uraser と呼びました。それからラジオ波 (radio-wave) のものは、日本人には L と R の区別がやりにくいのですが、Raser で、光は Laser という言い方が大学院生などの間で言われていましたが、その中でレーザーが一般に使われるようになりました。

その前にはメーザーがいわゆるマイクロ波でなくて、それより波長が長い方でも短い方でも使われました。英語のライト (Light) というのは、元々可視光のことを言うのですね。ライトハウスとかフットライトという時には見える光なのです。日本では光という言葉を用いる意味に使用します。光電効果などにも使うのですけれども、英語ではライトと言ったら可視光をイメージします。

例えば、光電効果なんかは X 線の時でもフォトエレクトリック・エフェクトというわけで、オプト (opt-)、あるいはフォト (photo-) という言葉は可視光以外にも使います。ライトというのは元々可視光だけの意味なのですけれども、今日では可視光でない時にもレーザーを使っているのは、皆さんご承知の通りです。余談になりましたけれども、そんなことを申し上げました。

初めにもちょっと言いましたが、アインシュタインが誘導放出を考えてからメーザーができる、あるいはレーザーができるまでに 50 年近い半世紀の時間がかかったのはなぜかと言いますと、レーザーができる前というか、日本においても戦前の教科書に出ております量子力学、あるいはアインシュタインの誘導放出は、励起原子が光の粒子を出すと考えていたからです。アインシュタインは最初にはドイツ語でリヒト・クワンテン (Licht quanten)、英語で言うとライト・クオ

ンタム (light quantum) に相当する、粒子を放出すると考えていたわけです。誘導放出や自然放出というのは、フォトン (photon) を出すことであるというわけです。

ですから誘導放出が続いて起こりますと、いわゆる連鎖反応です。1940年代には原子炉ができて、ウランの連鎖反応がよく知られていました。フォトンの連鎖反応が起こって1つの原子から出たフォトンによって他の原子から誘導放出でフォトンを出せば、それによってフォトンが増えます。もちろん途中でフォトンが吸収されても、それ以上にフォトンが出れば、フォトンがどんどん増えていくということを考えて人



は少なくありませんでした。1930年代から1940年代にかけて3つか4つ論文が出ております。あるいは、有名なフォン・ノイマンもそういう提案をしております。

それらは、いわゆるフォトンの増幅ではなく増倍と言った方がいいのでしょうか。いわゆる雪崩ですね。フォトン・アバランシ (photon avalanche) と言った方がいいでしょう。雪崩現象でフォトンの数がどんどん増えていくということが励起状態の原子を十分多くすれば起こり得るということです。それがレーザーだと考えた人はいて、そのような実験を試みて、ある程度その兆候をつかんだという論文もあります。

それらはフォトンの数が増えていくことだけを考えていたわけで、光の波としての性質は考えていなかった。その頃までの量子力学は、外国で有名なのはディラックの量子力学その他がありますし、日本では、湯川さんの『量子力学序説』、朝永さんの『量子力学』の1と2が出ております。それらでは、光の誘導放出や自然放出は、フォトンの形で放出すると決めていました。

光に限らず、量子力学では物質に粒子性と波動性があることは、ハイゼンベルクなどがかなり詳しく論じていました。その頃の考え方は、原子なり電子なりが粒子性を示す時には波動性は失われる。波動性を示す時には粒子性が失われる。どちらができるかはその時の条件、観測の仕方によると考えていました。

誘導放出はフォトンの粒子性の現象であるということで、波動性、つまりコヒーレンス、放出される光波の位相は全然考えていませんでした。別な言い方をしますと、1940年ぐらいまでの標準的な量子力学では、波動関数の位相というものは観測にはかからない。観測されるものは、波動関数の絶対数の2乗であって、波動関数を複素数を使って理論計算するのは結論を出すためであって、途中に出てくる位相は観測できないと、ディラックが確立したわけです。

多数の原子がある時の統計的な話は別にして、1個の原子がある時を考えると、その原子については位相は観測できないと言ったわけで、観測の時にはすべて絶対値の2乗が観測されると考えられていたのです。

ところが波動関数の位相、つまり2つの量子状態の間の波動関数の位相差が連成振子の実験で示すビートとして双極子モーメントの位相を決めるというふうになります。アンモニアの場合で言いますと、その他の水素でも同じでありますけれども、量子遷移をする2つの量子状態の波動関数の重ね合わせの状態が常に存在する。反対称の波動関数から対称の状態に不連続的に変わるというクオラム・ジャンプ (quantum jump) でなくて、励起状態の波動関数と基底状態の波

動関数の重ね合わせの状態が存在して、それが実際に時間発展をしていくことを考える。それが古典的な連成振り子の振動に相当しています。それと同じようなことが波動関数でも起こっているわけです。

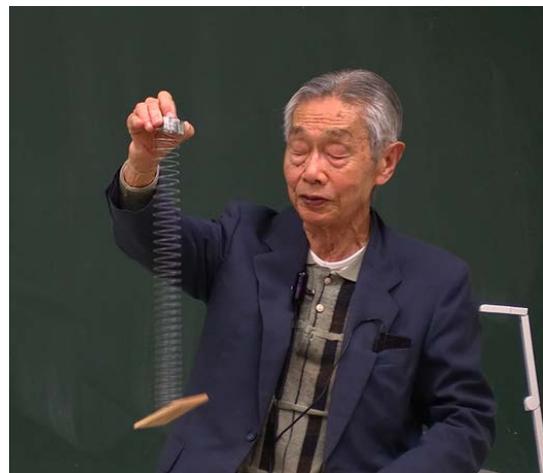
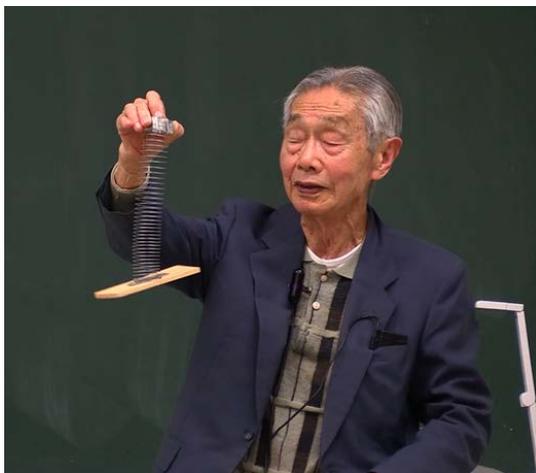
その重ね合わせの状態が存在することで、双極子モーメントができる。そんな状態はないという議論が、一番有名なのはシュレーディンガーの猫とされています。観察するまでは猫が生きている状態と死んでいる状態という 2 つの状態が存在する場合、神様から見れば猫は生きているか死んでいるかどっちかのわけですけれども、箱の中に閉じこめておいて放射性物質かなんかで猫が死ぬといった時に、いつ死んだのかは箱の外にいる人間には分からない。箱を開けて初めて生きているか死んでいるか分かるわけで、生きているか死んでいるか分からない半端な状態、重ね合わせた状態は存在しないというわけです。

存在しないというのは、理論的にはそう考えるわけですけれども、観測にかかる状態ではないということです。実はそれが観測にかかりメーザーの原理として使われることがメーザーの実験、あるいは量子遷移の理解によってはっきりしてきたわけです。

そういうシュレーディンガーの猫状態がないといった事実があるということは、皆さんはよくご承知のように、今ではいわゆる量子情報処理でキュービット (8-bit) と呼ばれている状態です。2 つの量子状態の重ね合わせ、もちろんそれは決まった位相で重ね合わされた状態は、数式の上だけで実在には存在しないという概念ではなくて、現在は実際にそのような重ね合わせ状態が実験できて、それはキュービットとして使えることがよく知られるようになりました。その起源はメーザーのデバイスにあるわけです。そんなことを言っておりますと、だいたい 1 時間になりました。

最後に、連成振り子の実験というのは、2 つの長さの等しい振り子がカップルしているという場合でありましたけれども、同じ振り子でなくて違う振動子であっても起こります。結論を言いますと、伸縮振動とねじれ振動でもそれがカップルしている時には、連成振動が起こるということをマイクロ波のホルムアルデヒドという多原子分子のスペクトルの解析の中で見つけました。

そういうねじれ振動と伸縮振動というタイプの違う振動でも、振動数が等しくなれば連成振動が起こるというモデルがこれです。これは、はじめには上下伸縮振動しています。それがしだいに上下振動が止まって回転振動が起こります。そして回転振動がだんだん小さくなって、上下振



動だけになります。上下振動が小さくなって、今度はねじれ振動ですね。連成振動がこういう場合にも起こるのです。

バネの伸び縮みの方は、質量と弾性係数で決まるということは皆さんご承知の通りです。ねじれ振動は、ねじれの剛性率、それからこれの慣性モーメントでねじれ振動の振動数が決まるわけです。ですからこれの形を変えて細長くすれば、同じ質量でも慣性モーメントが大きくなるわけですから、それを変えて両方が共鳴するように調整するわけです。それがちょうど等しくなるように作ってやりますと、こういう振動ができるというわけです。

その次に、それよりもうちちょっと変わったものを考えましたのが振り子と伸縮振動との連成振動です。この場合には、伸縮振動の周期の2倍が振り子の周期に等しくなると、連成振動が起こります。

これはご覧のように、ヘリカルバネの下に重りが下げているわけですね。そしてバネの弾性係数と振り子の長さを調節して、伸縮振動の周期の2倍が振り子の周期に等しいように作ったわけです。振り子の周期は長さで決まるわけですね、今は重力加速度が一定ですから、振り子の長さによって変わるわけですね。



伸縮振動の方は、もちろんこのバネの弾性係数と質量で決まるわけですね、振り子の周期は質量には依らないのですけれども、実験では振り子の重りを重くすれば、それによってバネが伸びますから、長さも変わることになります。重さを変えて調整するのは非常にやりにくいので、重さの方は一定にしてバネの伸びを一定にします。

それから伸縮振動の方は、言うまでもなく質量とバネの弾性で決まるわけですね。共鳴に近いようにしてから、精密に合わせるために、ヘリカルバネにひもを付けてあります。重さは一定ですから、このひもの長さを変えてもバネの伸縮振動の周期、振動数は変わりません。ところが振り子の方は、長さを変えれば周期が変わりますよね。だから、このひもの長さを微妙に変えてやりますと、振り子の周期を微妙に変えられます。

後からも言いますように、これは1,000分の1ぐらいまで周期の一致がいかないとうまくいかないのです。なぜそうかということは、やってみるとお分かりになると思います。振り子が低くて下の方は見にくいならば、後からの時間でそばへ来てご覧になったり、実験してみてくださいよろしいです。

まずこれで実験します。先ほどの振り子の実験と同じように、初めに片方の振動から始めるので、振り子から始めるということも可能なのですけれども、それをバネが伸縮しないようにやるのは大変難しいです。一番いいのは、止めておいて真下にして始めます。こうしますと、初めは上下だけの振動をしているのですけれども、だんだん振り子振動を始めます。こういうふうには振り子振動しています。



振り子が最大になった時には、伸縮はほとんど止まって、次にはまた伸縮が始まります。伸縮振動になって、振り子はほとんど止まって伸縮だけになります。それから今度はまただんだん振り子が始まります。振り子が揺れて、揺れが最大になると伸縮はほとんど止まっていますね。それからまただんだん伸縮振動が始まって、振り子はだんだん振幅が小さくなって、そしてここではまた上下の伸縮振動だけになります。

それからまた今度は、振り子振動を始めるということになるわけです。これは2つの振り子を振らした時の右の振り子と左の振り子の振動が変わるのと同じように、様式は違いますが、片方は伸縮振動で片方は振り子の運動であるというのに対しても、こういう連成振動が起こることが分かります。

この時に非常に特徴的で、実は私も作って初めの時には気が付かなかったんですけど、少し後になって気が付いたことがあります。このようにしてスタートしてやった時に……あっと、ちょっと今初めに動いてしまいました。なるべく理想的な状態でやる方がいいですから、伸縮だけで始めて、そして振り子振動が始まった時に、振り子はどういう振動面で振れるか観察します。振動面には180度の自由度がありますね。今はこんな方向に振り子は振動しています。遠くから見にくいと思うので、この棒で示します。

今伸縮だけになりました。振り子が始まりますと、今度はまだちょっとはっきりしないかな。こんな方向でしょうか。先ほどと違うこんな方向に振り子が振れています。それからだんだんそれが止まって伸縮振動だけになります。もういっぺん観察していると、この次にはどっちに振れるでしょうか。こんな方向に振れる感じですね。このような振動面になっています。さっきも言いましたように、そばで見たい方は、また終わりに質問やその他の時間を残しますので、ご覧になっていただきたいです。

そうすると、これはまた伸縮振動だけになっています。今度は振り子がどうなるか見ていますと、このくらいかな。もう少し見てからにしましょうか。だいたいこんな方向ですね。もうちょっと、これくらいかな。

というわけで、これはアブストラクトにも書き、最初にも申しあげましたように、自発的な対称性の破れ、スポンテニアス・シンメトリー・ブレイキング (spontaneous symmetry breaking) と呼ばれる現象です。スポンテニアス・シンメトリー・ブレイキングは、南部さんが素粒子論について言いだしたのが最初です。あるいは、皆さんは超伝導や強磁性がやはりスポンテニアス・シンメトリー・ブレイキング、対称性の破れであることはご存じだと思います。

それに比べて、こういうマクロな古典的な実験でも、そういうスポンテニアスなシンメトリー・ブレイキングのデモンストレーションができる、それが起こるといことであります。

この実験をしますと、皆さんの中から質問が出るかと思うのですが、ブランコと同じじゃないかと言った人がいます。ブランコの場合には、スポンテニアスなシンメトリー・ブレイキングはありません。この実験では、最初に振れが全然ない。この状態からスタートして何回か振動しますと、10回か20回か数えていませんけれども、振り子運動に変わります。それからそれがまた伸縮になってというのですが、ブランコの場合には、ブランコに乗って上下振動させても、普通はなかなか振り出さないとはいえ、ブランコの場合には強制振動であって、連成振動でないわけです。

もし非常にうまくやれるならば、対称性の破れをデモンストレーションする実験があります。こういう棒を立てておいて、完全にまっすぐ立てれば理論的にはいつまでも立っています。実際には風が吹いてくるとか少し床が揺れるとか、あるいは、これがまっすぐと思ったらちょっと違うためにどちらかに倒れます。どっちに倒れるかは、それは確かにシンメトリーのブレイキングですが、スポンテニアスではなく、初期条件が悪いと言いますか、初期条件がまっすぐだと思ったらちょっと左に傾いている時に左に倒れるのです。

ですから倒れるまでの時間が、初めに非常によく立てれば長い時間をかけて倒れるし、初めが悪かったり少し揺れれば早く倒れるというわけで違うのですが、このバネ振り子の実験はそうではないわけです。

実際にはこの場合にも、今ちょっと初めに少し揺れていたかもしれませんが、何回振れ出すかということは決まっているわけで、それがだんだん止まってその次にまた振れ出すというのも、この時にどのようなパータベーション (perturbation) が入ったということで決まるわけではありません。この場合には10回ごとに変わるとしますとパータベーションがありますと、その10回が10.1回ぐらいに変わるというだけで、初めの振り子の実験でやったように、決まった繰り返しの周波数で2つの状態の間を繰り返すので、まさにスポンテニアスなシンメトリー・ブレイキングになっているわけです。



初めの振り子の実験で説明したように、これは連成振動であって固有振動でないわけです。このような振り子と伸縮振動の振動数が2倍になっている連成振動状態でも、固有状態があります。

目分量ですけれども、こういうふうにしてやりますと、真ん中で伸びて両脇で縮むという振動状態になります。伸縮もしています。伸びて縮む。伸びて縮む。それから振り子振動もしています。

これは見ていて分かるように、空間的な分布は同じままで一定の振動数で変動しているわけです。これが固有状態です。これは確かに固有状態ですが、実験誤差があるのはもちろんです。

もう1つの固有状態は、こちらを初めに伸ばして始めても、両脇で縮んで真ん中が伸びるというモードになっています。これも少し不正確かもしれませんが、こういうモードのままで空間的にはそういう分布が続いています。これがもう1つの固有状態であって、その2つの固有状態の間の振動数の違いで、先ほど最初にやった伸縮状態が振り子の状態に変わっていくという連成振動が起こっているというわけです。

先ほど言ったように、この共鳴条件が0.1パーセントぐらい厳しいのはなぜかと言いますと、今ご覧になっているように、ちょっと数えていませんけれども、10回ぐらい振動して、振り子が5回振動します。それからまた変わるということになりますから、いっぺん伸縮状態から振り子になって、また伸縮状態になって、振り子の状態にまた戻るというまでに、数十回振動しているわけですね。

ですから、振動する面がどういう面になるか観測するのに、さっき私が棒で示しましたけど、これを1回観測するのに、振り子が数十回振動しなければいけない。1回目はこうなった、2回目はこうなった、3回目はこうなったということをやりますと、200回ぐらいは振動していないといけません。こういう実験をやるためには、減衰が非常に小さい、数百回は十分、振動を見ていられるというような振動子にしないとイケないわけです。そのような振り子とか、バネを作って用意することが必要です。

数百回振動しても、2つのモードの間の位相がずれてしまうと意味ないわけで、その間位相がずれない必要があります。数百回位相がずれないためには、1,000分の1の誤差が必要です。周波数が1,000分の1違いますと、1,000回振動すると180度位相が違うわけです。0.1パーセント違うと、500回で位相が逆になってしまうのですね。ですから250回ぐらいで位相が90度違ってしまいます。

ちょっと乱暴な言い方で、ファクター2か3ぐらいは違うのですけれども、0.1パーセントのオーダー、少なくとも0.2パーセントぐらい以下にはしないと、見事に実験を見せることができないわけです。

その点で、このひもの長さの調節は大変デリケートです。実は私はこの2つ目の振動子を作ったのですが、それがこのバネの位置をちょっと変えたもので、調整するのに2~3時間かかりました。ある人が同じようなことをやってみて、その人は2~3日かかったと言っていました。うまくいくことが分かっているのにそのくらいかかるということで、大変デリケートなものです。

実はそれがかなり効くことに気が付いたのは偶然でした。初めにつり下げるところの位置をここでは3mmぐらいのネジのところにかけているのですけれども、ある場所で天井からフックがありまして、8mmぐらいの鉄の棒のフックにかけて実験したのです。フックにかけてやりますと、少しエフェクティブな振り子の長さが短くなって、3mmぐらいの振り子に比べて、長さが2~3mm短くなったことに相当するので、ちょっとうまくいきませんでした。それで、調整の誤差もそのくらいだということに気が付きました。

以上で、だいたい私が話そうと思っていたことは終わりです。6時半までと聞いておりましたので、これから質問があれば伺いますし、実験をそばでご覧になりたい方はどうぞ来てやってみていただいて結構です。それでは質問がありましたらどうぞ。

美濃島 霜田先生、歴史的なことから物理の原理に至るまで、そして実験のご苦労話も含めて、ご講演をありがとうございました。皆さんまず拍手で……。 (拍手)



今、先生もおっしゃられたように、せっかくの機会ですので、会場の皆さんからご質問をお受けしたいと思います。非常に貴重な機会ですので、ぜひ学生さん、どうですか。

小林 今日は大変おもしろいお話をありがとうございました。2つか3つほどお伺いします。1つは、先ほど非常に微妙な調整をされてうまくいかないということで、デモ実験用には向いてないかもしれないのですけれども、例えば、ダンピングを入れて共鳴幅を広げてやると、アローワンス (allowance) が増えて共鳴しやすくなります。ただ、もちろんダンピングしてしまうので、いろいろなカップリングによる行き来なんかを防ぐのには向いてないのですけれども、合わせるとい意味で言ったら、スポットというか何かのロスを入れてやれば、共鳴条件は緩むのではないかと。



霜田 しかし、その前に連成効果が、非常に見えなくなります。ましてスポンテニアス・シンメトリー・ブレイキング (spontaneous symmetry breaking) にはとてもいかないわけで、減衰を少なくすることの方が第一条件として考えたわけですね。

小林 おっしゃる通りだと思います。もう1つは、先ほど最初の例でアンモニア、シンメトリック、アシンメトリックで、今のこの場合に、シンメトリーかアシンメトリーという分離をするならば、先ほどは両端で縮む、あるいは両端で伸びるということでしたが、こういうのはないのでしょうか。右端で縮む、左端で伸びるというものはアシンメトリックで、1往復で今度はこっちが伸びてこっちが縮むというのをアシンメトリーとして、両方一緒にこうなるのをシンメトリックと呼ぶような、その間の……。

霜田 エネルギーがこれをこうしている時には、弾性エネルギーとポテンシャル・エネルギーの方はこれの上下の差で決まりますから、ここで縮んでいて真ん中で伸びる方がエネルギーが大きいことはわかりますよね。こちらの方がエネルギーが高い方だと私は思うのですよね。振動数で測ってみたことはないですけどね。

目分量でこのくらいならいいというのでだいたい覚えて、1対2ぐらいの角度でこの辺でやったのがいいというのを覚えていて、それでトライ・アンド・エラーで私やっているだけです。



小林 見た目ではシメトリック、アシンメトリックと理解しやすいのは、右で伸びて左で縮んで、次の回の時に……。

霜田 いや、左で縮んでではなく、右左は同じです。振り子の場合には、1対2の共鳴になっているので……。

小林 分かりました。もう1つお伺いしたいのは、こういう実験はものすごく難しいと思うのですが、これを周期を非常に長くしてやった時に、緯度によって、北極とかに行くと、コリオリ力によって振動面が回転しますよね。

霜田 フーコーの振り子の原理ですね。

小林 フーコー振り子のようなものにこれをしたらどうなるかなと思ったのですが……。

霜田 それはあり得るわけですね。

小林 実験はかなり難しいと思いますけど……。

霜田 それは長い振り子を使ってやりますから、長時間観測ができるわけです。原理的にはここでももちろん起こりますけれども、フーコーの振り子で観測するためには、少なくとも1時間ぐらい観測しないと行けないわけです。フーコーの振り子が振動面が回転するのに、東京辺りだと41時間かかるのですよね。

小林 東京だと41時間かかりますので、それはちょっと難しい。

霜田 北極で実験して24時間ですね。

小林 北極で24時間なので、北極に行って頑張ってくるような気持ちで……。

霜田 ええ、そういうカップリングもあるわけです。

小林 どうもありがとうございました。

美濃島 ぜひ、現役の学生さんもうどうですか。遠慮せずに、せっかくの機会ですから。

学生 今日は大変貴重なお話をありがとうございました。1つ疑問がありまして、その系というのは、先ほど振動面が回転していくのをデモンストレーションされたのですが、毎回同じ方向に回転されるんですか。

霜田 そうではないわけですね。それはランダムだということで、スポンテニアスになるわけですね。それが実はさっきちょっと言いかけたのですが、このバネの位置を、上に移したのをやったのです。上をバネにして、下をひもにしても、それでもこの原理については同じになるでしょう。



学生 そうですね。

霜田 だけどその時には、振り子の振動面がスポンテイニアスに変わってくれなかった。

学生 それはバネの巻き方によって決まっているとか……。

霜田 というのもそうですけど、上のひもが短いと、そのねじれが効いて、360度の対称性がなくなってしまうのです。今ここなんか2本で吊られていますけど、ここだところら方向には振動するけど、こちらの方には振動しにくいという形になってしまうわけですね。

これ短く1本で吊っても、1本の糸のねじれが、糸とかひもですからね、細い糸ならそれも少ないでしょうけど、とにかくここが効いてきてしまって、そうすると上にやってしまうと本当にシンメトリー・ブレーキングではなくて、振動面がわりと決まってしまうんです。バネを上にした時も、ここを長くしないと。これを5 cmか10 cmのひもにすれば、バネはここにあってもどこにあってもいきます。今日は時間の関係もありますし、原理的にはどうということはないので、持ってこなかったんですけどね。

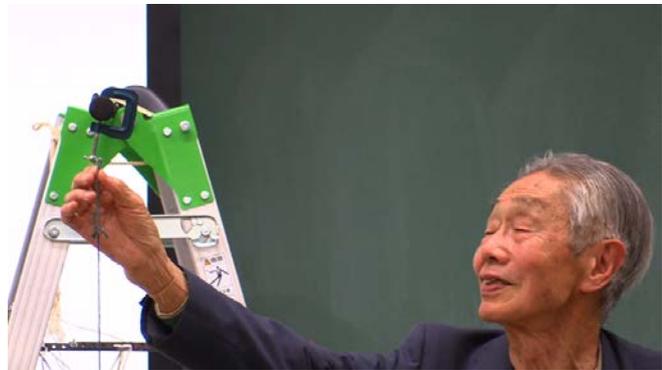
学生 つまり、どっちの回転面も見られるという……。

霜田 見えるのです。

学生 そうですか。分かりました。

霜田 どっちも起こり得るといって、スポンテイニアスなシンメトリー・ブレーキングですね。

学生 ありがとうございます。



美濃島 大変いい質問ありがとうございます。他にどうですか。せっかくの機会ですので。よろしいですか。学生でなくても結構ですけど、よろしいでしょうか。

浅原 大変おもしろいお話をありがとうございました。これは質問というよりは、お願いなんですけど。霜田先生が「レーザー物理入門」など書かれて、われわれレーザーや光物理を志している者にとっては憧れのような存在なのですが、われわれ若い世代に対して何か普段思っていることとか、もしくはこういうふうに関心してほしいなというメッセージみたいなものがもしありましたら、聞かせていただけないでしょうか。



霜田 一言二言で言えるかどうか分かりませんが、私なんかメーザーやレーザーの研究をやっていた頃には、あるいはタウンズもそうなのですが、メーザーのアイデアを持っ

た時に、そんな原理ではいくはずがないと、量子力学で考えてそんな現象は起こせるはずがないと、無駄だからやめろということを言われたりしたわけです。

タウンズは、コロンビア大学でメーザーの研究を始めました。コロンビア大学でラボラトリーのヘッドがノーベル賞をもらった有名な I. I. ラービという先生で、日本にも仁科財団の招きで来て講演をしたことがありまして、それを私もまだ大学院生の頃に聞いたことがあります。

ラービ先生も、そういう実験をやってもうまくいかないに決まっているからやめろと言われたりしました。先ほどフォン・ノイマンの話をしましたけれども、タウンズが何かの会の時に歩きながら座談でボーアに話をしたら、ボーアも 100 パーセント反対ではなかったらしいけど、だいぶ疑問視していたという話です。

そういう中でも、こういう原理でやはりメーザーができるのじゃないかということを考え出したわけで、周りの流行のテーマでなくて、その頃は不可能と思われることでも、自分のアイデアで考えて自分自身が納得して研究しようと思うことには大いにチャレンジしてやっていただきたいと思うわけです。

また、そういう研究をサポートすることが昔に比べるとこの頃はだんだん険しくなっているのですけれども、今年のノーベル賞受賞者なども言っているように、オリジナリティのある基礎研究を育てることが将来の科学技術のために非常に大事だと。それが別にたくさんある必要はないわけですが、科学の研究の中には常にそういう面を持っていないと、将来行き詰まるというか萎縮してしまうことにもなりかねないわけで、アイデアのある人はいろいろ試していただきたいと思うわけです。

それは若い研究者の特権でもあると思うわけで、ある程度決められた研究をやりながら、その脇で考えるということでも結構です。私がこういう振り子を考えるのでも、こんな振り子を考えた人は今までないわけです。

連成振り子は、教科書にも出ているような普通の振り子なのですが、それについて少し考えてみますと、今まで誰もやったことのないようなこんな振り子もできるのじゃないかというので、これを作る場合もこれはデモンストレーション用にこのような大きなものを作ったのですが、初めはもっと簡単なものを作りまして……持ってこなかったかな……ああ、これです。



実際そういう振り子でも、連成振動がうまくいくだろうというので、初めにはとにかくこういうものを作りました。これはピアノ線を巻いて、下には重りとしてナットを使っているのですよね。ピアノ線でヘリカルバネを作りましたが、重さを変えるのは、さっきも言ったように非常に大変で、重さは適当なナットを使いました。ピアノ線ですと、弾性を強くするのでしたら、ヘリカルの直径を小さくするようにします。別に一樣にしなくてもいいので、どこか変形させてやる。ピアノ線は強く曲げれば変形しますから、そうします。少し緩くしたいのでしたら、これを広くしてやればいい。

糸の長さは、もちろんさっき言ったように変えられます。糸の長さや弾性はそういうふうに連続的に変えられるわけで、だいたいうまくいくところを見つけてやると、こういう振動が起こります。伸縮振動が連成振動になる、振り子振動に変わるということがこれで確かめられます。これですと、たぶん後ろの方からでは、なかなか細かくは見えません。

それから手製のものと、あまり長い間振動しないで減衰してしまうので、長い間振動させるためには、この質量が大きい、つまりエネルギーがわりと大きい方がいいです。また、空気の抵抗も少ないように考えます。

それから、振動数は観測するのに適当な振動数の方がよろしい。この振動数が例えば 10 Hz ぐらいですと、ビーッと振動しているだけで、それは上に行ったり下に行ったりというのは見えなわけです。振動の周期が 0.何秒ぐらいからというのがちょうどいいということで、そうなるようなバネを設計して作ってもらったら、それこそ何万円もかかってしまうだろうと思うし、その設計もなかなか簡単にはできません。

探し求めて秋葉原というか御徒町に近い辺りのところですね、この頃は古道具屋みたいのところはなくなってしまったのですが、昔はジャンクで軍の放出品なんかもありました。いろいろな道具類を売っているようなところで、こういうバネをほとんどただみたいな値で 2 つ買ってきて、それを使って作ったということでございます。



初めから完成品を作ろうと考えてはいけません。それはできないのが当たり前なわけで、新しいアイデアであることで、初めにいろいろ自分でテストして納得して、これならうまくいく、やれるはずだと考えて、やれるはずだと分かれば、それを精密に作るということも、戦術的にはどうすればいいかということを考えることになっていくわけです。研究をするのは、みんな多かれ少なかれそういうことがあるのだと思います。ご参考になればと思うことで、紹介いたしました。どうもご清聴ありがとうございました。

(拍手)

美濃島 他にぜひという方いたら。よろしいですかね。せっかくの機会ですので、霜田先生もおっしゃっているように、この後、ぜひ前に来て実験装置を身近に見ていただけたらと思います。では霜田先生、本当に現場の現役の学生に対してエンカレッジをしていただくと同時に、私たちのような昔の学生にとっても、基礎研究を頑張るってやるというような形のエンカレッジをしていただいて、ご参加の皆さんにとって大変有意義なご講演を本当にありがとうございました。それでは皆さん最後にもう1回盛大な拍手を……。

(拍手)

