

覆水を盆に返す：位相共役光の発生とその応用

志村 努（東京大学生産技術研究所 物質・生命部門 助教授）

ただいまご紹介にあずかりました志村でございます。

きょうは、あまり役に立ちそうにない題名で、「覆水を盆に返す」という題をつけてしまったのですが、そもそもの始まりは、おもしろいところなんです。ただ、本当に役に立つ応用がなかなか出てこないのですが、最後のほうに少し可能性みたいなものもご紹介させていただきたいと思います。

（スライド 1）

とりあえず、「覆水を盆に返す」ということなので、それを絵にしてみたのですが、コップに水が入っている。これがこぼれるわけです。こぼれてしまったものは、熱力学の法則で、力学的には元には戻らない。だけれども、例えばビデオテープを逆回しすると、こういうふうになる。要は、こういうことを起こそうというわけです。

（スライド 2）

現実の世界では、時間を逆回転させることはありえないわけです。ところが光の世界では時間の逆回し、物理的にはありえないのですが、時間の逆回しに相当するものは起こしうる。それは位相共役波、あるいは位相共役光というものです。どういうものかまずは具体的に例を見ていただくと思います。

（スライド 3）

普通の鏡があったとします。点光源があつて、こういうふうに普通は球面波が広がっていくわけですが、当然これはここに鏡の面があれば、反射の法則に従ってこちら側へ反射していく、これはごくあたりまえの現象です。

一方、位相共役鏡、先ほど言いました位相共役波を返す鏡というのがありまして、この場合は何が起きるかというと、点光源から出ていった光が逆向きに戻ってくる、こういうことが起きるのです。もちろんからくりがありまして、種明かしはこれから順次していくわけですが、こういうものが光では出せる。

実は、波ならいろんなもので出まして、音波でもできるんです。実際に生研の中で、よその研究室ですが、音波で位相共役波を出すという研究をやっている研究室もあります。

（スライド 4）

実際どういうふうに使えるかという一例だけまずお見せしますと、波がやってきましたと。こういう位相を乱すようなもの、ぐにゃぐにゃのガラスとか、そういうものがあつたとする。そうすると波面がまわるわけです。普通の平面鏡で返しますと、表裏が裏返って返ってきますから、同じぐにゃぐにゃのガラスをもう一度通せば、波面の曲がりには2倍になるわけです。行きの曲がりの2倍の曲がりが生じて返ってきてしまうというわけです。これを位相共役鏡でやるとどうなるかというと、まったく同じ波面を、反射波も入射波とまったく同じ波面を持っているわけです。ですから表裏が同じ波面ですと逆向きに進んでいきますので、まったく同じものをもう一度逆向きに通れば元に戻る。これがみそなわけです。同じ経路を逆向きにたどれば完全に元に戻る。平面波だったものが平面波に戻るというのが位相共役波の特徴です。

（スライド 5）

具体的なデモンストレーションをお見せしますと、こういう普通のレンズの結像系があつたとします。ここに画像があつて、レンズを通すわけですが、途中に先ほどのぐにゃぐにゃのガラスを入れてあります。これで返します。普通の鏡を置いた場合と位相共役鏡を置いた場合と2通りお見せします。

（スライド 6）

そうすると、先ほどぐにゃぐにゃのガラスのアベレータがない場合は、普通の鏡で返そうが位相共役鏡で返そうがこれは同じなわけです。

(スライド7)

ところがアベレーターを入れたときには、普通の鏡を返すと、もう字が見えない。それらしいものがちょっと残っていますが、もうぐにゃぐにゃになっている。それに対して位相共役鏡を通してやると、普通の鏡ではぐにゃぐにゃになるようなものでもきちんと読める。こういう絵が返ってくる。実は、今、下の3階のCE-302室で、まさしくこの実験をやっておりますので、ご興味があれば、終わった後に実物をご覧になっていただきたいと思いますが、こういうことができるわけです。

(スライド8)

いま言ったような、覆水を盆に返すということで、時間の逆戻しをする位相共役波ですが、名前がわかりにくい。もともとは、英語では Phase Conjugate Wave といいまして、位相、波の位相が元の波の「複素共役」になっている、そういう意味です。これだけ言ってもまだわからないのですが、ここで算数のおさらいをいたしまして、複素共役とはなんであったかということをもう一回復習させていただきます。

普通は、複素共役というのは、複素数の実部と虚部があって、虚部をマイナスつける。これが複素共役なんです。これとは同じことなんです。見かけがちょっと違う。光の世界ではこっちの表現を使います。イクスポネンシャルの肩に虚数、実数はこういう書き方。これでコサインとサインなんです。ここが対応している。ここをひっくり返すということは、イクスポネンシャルでいうと、この肩、これがちょうど波の位相の部分に相当するのですが、これにマイナスがつく。算数のセンスではそういう感じになるわけです。これを物理的に実現しないといけないわけです。

(スライド9)

算数の次に国語ですが、「きょうやく」。これは私がこだわっているところで、「きょうやく」というのはもともとは「共軛」と書く。馬車の馬を押さえつけるくびき。共役なんです。両方対があって、二つで一つになって働くというようなこと。広辞苑には、Conjugate の和訳だと書いてある、味も素っ気もない解説しか載ってないのですが、読みは、これを「きょうえき」と読む方がいらっしゃるのですが、これはぜひやめていただきたい。役（えき）は「人民に労働を課すること」（笑い）、あるいは戦争の意味。西南の役とか、苦役とか、服役とか。「きょうえき」とはぜひ読まないでいただきたい。「きょうやく」でございます。この字（役）には、「えき」という読みはありません。「やく」としか読めない。

(スライド10)

脱線に戻しますと、波の複素表示をします。本当は物理的に意味があるのは、コサインで書くのが意味があるのですが、光屋さんとか波屋さんはちょっと違う書き方をします。この意味をいうと、 ωt の部分が時間的にブルブルと振動する成分で、これが波の波面を表します。 r というのは場所です。場所ごとにどういう波面の格好をしているかというのはこれが表現します。これをコサインで書かずに、光さんはイクスポネンシャルで書きます。これはイコールですからまったく同じことなんです。このほうがいろいろ便利なんです。

これから注目していただきたいのはこの部分です。これは波面を表すのですが、この辺が位相共役波とあとでかわりが出てきます。

なぜこういう書き方をするかというと、単純に便利なんです。どう便利かというと、計算が楽になる。コサイン、サインの公式を覚えなくてよくなったということです。

(スライド11)

これで波を書いてやります。そうすると普通の波をこういうふうに書いてやるとします。それに対して位相共役波はどう書けるかというと、時間の項は変化していないで、空間の項だけが符号を反転させる。こういうものが位相共役波。位相共役という名前の由来はここからきています。ここは位相光です。位相光の中の空間部分が共役であるということになります。

なぜこれが波の波面を表すのかという細かいことはここでは説明する暇がないので省略させていただきます。

またコサインの書き方に戻しますと、こうなる。コサインで書いてもやはりこの部分がプラスとマイナスが反転するわけです。ただ、コサインで書いてしまうと複素共役にはなっていないので、位相共役という言葉とは直結できないというわけです。

(スライド12)

いまコサインの話が出ましたが、ここでこういうコサインの形で書けるわけですが、コサインはこういう性質があります。これも昔習ったと思いますが、カッコの中にマイナスをつけても変わらない。ですからこれが元の波、これが位相共役波、ここにこの位相部分を反転させるというわけですが、この中をプラス・マイナスひっくり返しても同じになります。これもイコールなわけです。そうすると、これとこれを見比べていただくと、今度は波面の項は同じになっている。時間のほうにマイナスがついている。これだだいぶ意味がはっきりしてくる。要するに、時間の項は、時間がマイナスがついてる、だから元々のこの波とは時間の進行が逆の波であるというのが位相共役なわけ

す。結局、話としては、位相共役波は時間反転波と同じことですよというふうにみなす。ただし、時間反転というと誤解を招く表現なので、実際に時間は反転してませんので、一応言葉としては世の中では位相共役波という言葉を使います。プラス・マイナス反転しているのは、赤で棒を引いたところです。結局、位相共役波というのは、元の波とまったく同じ波面をもって逆方向に進行する波ということになります。

(スライド 13)

もう一回先ほどの位相共役鏡を出しますが、いま数式で書いたようなものを絵でかくとこういうふうになる。白いほうが進んでいった波で、それに対して位相共役波は黄色い線で書いてあるもので、点光源をかけたものは元に戻るというわけです。

(スライド 14)

次に、どうやってこの位相共役波をつくるかというわけですが、これは一言でいってしまうと、ホログラフィーを裏から読むということになります。

普通のホログラフィーは、ここに記録されたホログラムがあって、それを参照光で再生すると、こちら側に回折して、ここに虚像ができる。それを裏側から読んでいる。反対側から読むと、これと反対に波が進む。まるっきり逆方向から同じもので証明していますので反対に進む。ということをもう一回説明します。

(スライド 15)

物体があって、物体から波が出てきました。これに対してホログラフィー、まず記録するときは参照波というのを入れます。そうすると干渉縞ができます。黄色で書いた干渉縞ができて、これが記録媒体に記録する。これがまずはホログラフィーの記録なんです。

(スライド 16)

それを再生します。普通の再生は、先ほどの参照波と同じものを入れると、この回折格子から出てきて、ここに像が見える。この場合虚像になります。これが普通のホログラフィーです。

(スライド 17)

それに対して位相共役再生というのは逆向きから、先ほど左から再生しましたが、今度は右から再生すると、まったく同じ波面だけ逆向きに進んでいく。で、再生像がここにできた。今度は実像になりますけれども、このときの赤い波、これは先ほど書き込んだときの波とまったく同じ波面をもって逆向きに進む波、つまり位相共役波になって

いるわけです。

(スライド 18)

いまのはホログラフィーを裏から再生するというお話だったわけですが、普通のホログラフィーというのは写真乾板を使うことが多くて、これは現像・定着が必要なわけです。今言いましたように書き込んだときと読み出すときは時間が違うわけです。これはけっこう大変なわけです。実際には、やろうとすると乾板を吊るしておいて真っ暗な中で現像液を箱に入れて、下からずぼっと入れて現像してとか、そういうことをしなければいけないわけです。あと、濡れたり乾いたりすると、収縮したり膨張したりもしますから、いろいろ面倒くさい。そこで実時間ホログラフィーというものがあってほしい。光を当てたらその場でどんどんホログラムが書ける、現像も要らないホログラフィーであってほしい。そういうものがあれば、先ほどの位相共役再生がその場でできる。その場で書き込みが起こって、かつ読み出せる。そして書き込みも可能。そういうものがあれば（実際にあるわけですが）位相共役波がその場で発生させることができるわけです。裏側からの読み出しを書き込みと同時に進行。定着の問題はあるのですが、ほっとくと消えてしまうという、（そこはちょっと問題なんです）とりあえず実時間ホログラフィーというものがあれば位相共役波は発生できる。

(スライド 19)

では実時間ホログラフィーをどうやって実現するかという問題です。ホログラム、回折格子を書き込みながら同時に再生する。物体光、参照光、ここまです書き込みです。書き込みプロセス+再生プロセスを同時にやってしまう。そして3本光を入れる。そうすると位相共役波が出てきます。三つの入射光から第四の光波をつくる。そういう意味でこれは四光波混合といわれています。

これをまた先ほどと同じ絵でやりますと、物体から光が出て参照波もくる。そうすると干渉縞ができて書き込みが起こる。すかさずその場で同時に再生してしまうと、ここで位相共役波が発生して、実は物体の元あった場所に完全に戻ってきてしまうのです。本当に戻ってきてしまうと、ここに物が置いてありますので使いづらい面はあるのですが、とにかく同じ波面をもって元に戻ってきます。これが四光波混合による位相共役波の発生の一歩基本的な原理です。

例えば物体がぱっと動いたとします。動いたとしたら、動いた状態で波面が変わりますけれども、実時間ホログラフィーだから、干渉縞が変わった状態に応じてどんどん書き換わりますので、ちゃんと追従する。常に位相共役波が出つづけるということになります。

(スライド 20)

名前の問題ですが、いまいった書き込み波とか参照波とかいう名前をホログラフィーの場合は使うのですが、四光波混合の場合は独特な言い方がありまして、入射光に対してホログラフィーでいう参照波はポンプ光と呼びます。こちらの再生光もポンプ光で、裏側から読むので、完全に対抗する二つの光をそれぞれ二つのポンプ光というふうにあります。番号はどちらをつけてもいいのですが、それから入射光があって位相共役光、そういう言い方をします。

実は、今はこれとこれが書き込み干渉縞を書くといいましたが、いろいろな組み合わせが、ちょっと考えるとあり得るわけで、これとこれも実は干渉してもいいわけです。

(スライド 21)

ひとたび位相共役光が出始めると、入射光と位相共役光の間でも干渉しますので、実際は3種類の干渉縞が中にできます。

(スライド 22)

もう一つ、いまの話からすると、実は先ほどから位相共役鏡、鏡という言葉を使っていますが、これは本当は鏡ではない。

どういうことかといいますと、例えばポンプ光1と入射光のこの二つで書いた干渉縞、あるいはそれによってつくられた回折格子を、こちら側から読んでいますので、エネルギー的には、位相共役光のエネルギーはポンプ光2から供給されている。ですから入射光がそのまま返ってきているわけではないようです。ここが大事なところですよ。

ポンプ光1が戻ってくる場合もあるのですが、その場合もやはりエネルギーの供給源は別です。波の流れとしても別なので、本当のことを言うと鏡ではない。さっき、コップから水をじゃっと戻して、その水がコップにじゃっと戻る。それはないと言ったわけですが、それと同じことなわけです。実際に本当に光が戻っているのではなくて、あたかも戻っているかのように見えると最初に言ったのはこのことなわけです。

(スライド 23)

そこで、実時間ホログラフィーが世の中にあれば位相共役波は出せるということで、実は私の研究は、どちらかというといまの研究は材料を探すというほうをやっています。きょうの講演は、わかりやすいお話と思って位相共役波の話だったのですが、実際には材料のほうの研究を中心にやっています。

どういう材料が必要かという、先ほど言ったように、干渉縞を屈折率、または吸収率の縞（これはホログラフィーです）とし記録するものが必要である。光の強度に応じて

屈折率が変化する材料、あるいは光の強度に応じて吸収率（黒くなるケース）、要は写真はこれなわけです。銀塩写真というのは、光の強度に応じて吸収率が変化しているわけです。そういうもの。その他もあるのですが、そういうものが要ります。

(スライド 24)

例を挙げますと、光の強度に応じて屈折率の変化する材料というのがあります。これは一番古く、位相共役波の初めの頃使われていたのは3次の非線形光学効果をもった材料、 x^3 というやつですが、これがどういうものであるかは省略させていただきますが、これはわりと屈折率変化が小さい。それから効果が小さくて、非常に強い光が必要です。 MW/cm^2 とか、かなり強い。要は、材料が壊れるか壊れないかぎりぎりのところで使う、そういうものが要るわけです。

次がフォトリフラクティブ効果。実はこれが私の今やっている専門の研究の一つでして、これは屈折率変化が非常に大きい、かつ非常に微弱光でいける。 mW/cm^2 ぐらいで、もっと弱くてもいけます。ただし、やはりいいことづくめではなくて、これは実は非常に遅い。上と比べると遅い。光が弱い分時間がかかる。写真でいう露光量みたいなものだと思っていただくとわかりやすいと思います。微弱光でOK なかわりに若干時間がかかる。

(スライド 25)

一方、光の強度に応じて吸収率が変化してもいいわけです。一つはフォトクロミック材料。日なたに出ると色が変わるメガネ。あれはフォトクロミック材料の代表的な例ですが、光が当たると黒くなる。逆に、光が当たると透明になる。これは過飽和吸収材料ですが、ある程度光を吸うという満腹状態になってもう吸えなくなる。ただしこの二つとも回折効率が小さい。どうして小さいかというと、吸収ですから、もうエネルギーはその分損しているわけですから、もうエネルギーはその分損しているわけですから、くわれてしまっていますから損している。

実はこれを解決するのがレーザー増幅媒質を使った飽和増幅。飽和吸収の逆なんです。これは負の吸収です。吸収をプラス・マイナス逆にした。負の吸収ですから、エネルギー的には増幅してくれますから回折効率は非常に大きい。

(スライド 26)

そのほか誘導ブリュアン散乱とか。実はこれは実用されている。位相共役波が商品として売られているものは、この誘導ブリュアンを使っているのですが、これを使ったものもあります。ただ、これも液体を使うとかいろいろ問題はあります。

(スライド 27)

ここで、フォトリフラクティブ効果をどういうものであるか、少し解説させていただきます。これで実時間ホログラフィーを書くわけです。

フォトリフラクティブ材料というのは、電荷を動かします。電子あるいはホールが適当にある。それをトラップする。これは元素。鉄なんかよく使いますが、トラップする元素があります。それと、トラップはするのだけれども、まだ電子がきてない、あるいはホールがきてないものもある。これは鉄でいうと二価・三価の鉄というのがよく使われるトラップです。こういう状態で材料がある。

(スライド 28)

まず光を消します。暗い状態からスタートします。ここに干渉縞を当てます。縞模様をつくるわけです。明るいところ、暗いところをこの結晶の中につくってやると明るいところで自由電子、あるいは自由ホール、自由キャリアができます。トラップから光のエネルギーを吸って解き放たれる。で、こいつらはうようよ勝手に動き回れるわけです。

ところが暗いところは実は動き回れるようになっていない。明るいところだけ動き回れるようになっていいる。

(スライド 29)

そうこうしているうちにまたトラップにつかまってしまう。ここで光を切る。どうなっているかというと、光を当てたままでもかまわないのですが、先ほど明るかったところは抜け殻だらけになっている、暗いところはトラップされて、電子が入ったものばかりになっている。ということで、先ほどの干渉縞の明るい暗いが電荷の縞模様転写されるわけです。そうすると電荷の分布ができる。電荷の分布が電場をつくるわけです。マクスウェルの方程式によってかわるように電荷の分布があると電場ができて、その電場がかかって、それで屈折率を変える。そういう現象が起きて、結局実時間ホログラフィーがかける。

(スライド 30)

ここで、少しだけ私の今やっている研究の紹介をさせていただきますと、新しいフォトリフラクティブ材料をつくるということをやっています。

一つが、半導体量子井戸材料を使う。あるいは量子ドット材料を使うということで、これは生研の荒川研、染谷研と共同でやっています。

あとは、リラクサー型強誘電体。これは圧電材料で電場をかけてシワをつくる。縮んだり伸びたりする。それによって屈折率を変えるというものです。これは小田先生の研究室と一緒にやっています。

あとは、有機のポリマー材料。これは電荷が動いた後、細長い分子をまわしてやる。これは非常に屈折率変化が大きくて、例えば横向きに電場がかかると細長い分子、分極があるとぎゅーっとまわる。それを使って屈折率を変える。これは化学系の荒木先生と一緒にやっています。

小田先生は材料・マテリアル系の先生、荒川先生、染谷先生は半導体・電気系の先生です。

もう一つ、定着可能な材料。先ほど、一度書いたものがまた消えてしまうと書いてたのですが、それを消えなくする。書きたいときにはすぐ書けるが、一度書いてしまったら消えない。ただし、また消したいときには消す方法がある、そういうものです。

(スライド 31)

研究のキーワードとしては、「応答が速くてかつ屈折率変化が大きい」。新しいというのはこの辺を狙っています。

普通は、応答が速いというのと屈折率変化が大きいというのは二律背反で、どちらを立てればもう一方は立たないとか、こちら立てればあちら立たずという関係なんです、それを両立させようということです。

(スライド 32)

いまのが実時間ホログラフィーを実現する一つの方法であるフォトリフラクティブ効果でした。

もう一つが、レーザーの飽和増幅による実時間ホログラフィー。結局やることは四光波混合で同じなんです、レーザー媒質の中で先ほどのポンプ波二つと入射光を入れてやる。

これは実際にうちでやっているわけではなくて、研究員もやっていたっている千葉大の尾松先生を中心にこういうことをやられています。これは回折効率が非常に高い。この場合は光の強いところは増幅率が下がる。これはエネルギーをくっちゃって財布が空になっている状態になるわけです。そうすると光の精度から増幅率は下がって、結局利得のグレーティングができる。

(スライド 33)

特長は、応答が非常に速い。反射率が高い。大きいといっても、回折効率が大きいわけではなくてレーザーだから増幅してくれるというわけです。反射率は、簡単に100%を超えることができます。

問題はノイズの問題で、これはレーザーですので、微弱な散乱光がどんどん増幅されてしまうというのがあって、これがノイズになる。ASE といっていますが、この問題は若干あるということです。

以上で、位相共役波とは何であるか、それをいかにして出すか。位相共役波を出すためには四光波混合が必要で、

四光波混合をするために実時間ホログラフィーとなるような材料が必要であるという話をしてきました。

ここからは、それを使って何ができるかというお話に変えたいと思います。応用です。

(スライド 34)

一つが、波面の乱れの補正。同じものを二度通せば元に戻るということで波面の乱れの補正の応用。

それから自動アライメント。これは同じものを通れば元に戻るということですが、これを使って自動アライメントというのができます。これで光ファイバーの非常に小さい入り口、そこにぴったりアライメントさせてやるとか、そういう自動で行う。

あるいは半導体レーザー。これも出口が非常に小さい。 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ぐらいの四角いところにスポットを集光してやらなければいけないのですが、それを自動でアライメントするというようなものについてお話しします。

それから暗号化ホログラフィックメモリ。これはどうやって暗号化するか。これも位相共役波を使うのですが、これはあとで詳しく説明します。

最後に、光ファイバー通信での群速度分散補償。言葉は難しいのですが、実はこれは最近ちょっと世の中に流行っている話です。実際にはきょう同時に公開する先端研の菊地先生なんかもやられています。

(スライド 35)

まず、波面の乱れの補正の説明からします。

ハイパワーレーザーというのは、普通、特に増幅器の場合ですが、増幅器は光を通しますと、元々平面波であったものも、出てくるときにはかなり波面が乱れている。中の屈折率の分布、あるいは温度の分布とか、いろいろ分布があって、レーザー増幅器というのは中はそんなに様ではない。そうすると波面が曲がってしまう。曲がるとどうなるか。レンズを使っても絞れなくなる。レーザー加工などの場合は、ハイパワーレーザーをレンズで絞っても、ちっともスポットが小さくならないという問題があります。それを解決するために位相共役鏡を使って、同じ媒質を二度通してやる。元へ戻してやる。そうすると位相共役鏡が戻ってきていれば、ここでまた平面波はきれいな波になって出てくる。出力のとり方がほんのちょっと問題になる。先ほど、同じところへ戻ってしまうのは実用上ちょっとまずいといったのはこれで、まったく同じところへ戻ってしまったら使えないわけです。何らかの方法で分けて取り出してやらなければいけない。

一番簡単なのが偏光を使う方法で、90度、行きで45度、帰りで45度まわして、ここで90度にして、直交させて出してやるというのが一番簡単な方法ですが、こういう

使い方があります。

これは実はコヒーレントという会社から、このレーザーは「インフィニティ」という名前で売られていました。そこに誘導ブリュアン媒質を使って出す。ただ、今現在のカタログからは消えてしまったので、どうなったか、その辺はよくわかりませんが、これでかなりきれいなビームはできます。やはりどちらかというと加工関係のレーザーで、この辺の位相共役共振器というのは使われています。

それから、原子力研究所の鄭さんという方が、同じようなことをやられていて、それもハイパワーレーザーです。最終的な目標は、原研ですから、レーザー核融合ではないかと思いますが、とにかくハイパワーレーザーで波面をきれいにするというにに使われています。この話は省略します。

(スライド 36)

もう一つは、これは、今はなくなりましたが、計量研の方がやられた一つの応用例で測距に使う。今はよく使われている、町でも土木工事現場では非常によく使われている測距計ですが、レーザーからパルスを飛ばして、行って帰ってくるまでの時間を測って距離を測る。これは非常に一般的な距離の測り方です。月の上にも、アポロ十何号だかが置いてきたコーナーキューブが、今でも月の上にあるはずなんです。地球と月の距離もこれで測っているわけです。

ところが途中で空気があります。真空ならいいのですが、空気があるとビームが揺らぐんです。見てみると、スポットが、目で見てもユラユラ動いているのが見えます。空気の乱れがあって、ちゃんと戻ってこない場合がある。位相共役鏡を使えば必ず同じ道筋に戻ってきますので、ちゃんと元に戻る。月に置いてあるコーナーキューブというのは必ず逆向きに反射するというものですが、あの場合では、反射した当初はきちんと逆向きにきているわけですが、途中の空気の揺らぎでどこかへいっちゃうことがある。これを解決しようというので位相共役鏡を使ったというわけです。筑波に行くと200mの地下トンネルがあって、その中でストーブを焚いて、わざと空気をユラユラ揺らがせて、それでもきちんとスポットは止まっていますという実験をやられていました。

(スライド 37)

次の応用。自動アライメントということをお話しします。

(スライド 38)

自動アライメントに使いますのは、二重位相共役鏡というものでして、いままでのとはちょっと違うというか、少し発展系のものを使います。

どういうものかということ、これがフォトリフレクティブ

結晶なんです、こちらと向こうと両方から別々の光を入れてやります。違う波面を持った光を入れてやって、ここで四光波混合を起こしてやります。

どうやって四光波混合が起きるかという話は、この場合は話が面倒臭いのでここでは省略させていただきます。これはブラッグ条件を表すダイヤグラムなんです、これが端数ベクトルで、こっちからきたやつと、逆向きに進む波。こっちから来たものと逆向きに進む波が、この回折格子を共有するということになります。中はとりあえずはブラックボックスだと考えていただいて、二重位相共役鏡に両方からインプットを入れてやりますと、お互いに相手の波面を持った波になって出てくる。例えばこちら側の黄色い波は、ここで回折して、赤い波とまったく同じ波面をもって逆向きに進行する波になります。ただし、これはまったく鏡ではなくて抜けているわけです。エネルギーとしては黄色い波が向こう側へ抜けてきているわけです。

だけでも波面は、元々の赤い波面と同じになっている。同様のことがこちらでも起きていて、赤い波は抜けてくると、もともと黄色の波面と同じ波面をもって逆向きに進む波になる。要するに波面をエクスチェンジしているということになります。お互いに相手の波面をもった位相共役波、お互いに相手の位相共役波になってそれぞれ出て行く。そういうもの。これが二重位相共役鏡です。

(スライド 39)

これを使うといろいろおもしろいことができるわけです。まずはファイバーどうしのカップリング。これはロックウェルの方がやった実験とかデモンストレーションですが、マルチモードファイバーとシングルモードファイバーがあって、これをカップルする。レンズをここに置いて——これは絞るためです。ファイバーから出てきた光は広がってしまいますから、それを絞って、二重位相共役鏡の中に入れてやります。入れると、しばらくすると、さっき遅いと言ったのはこのへんで表してるのですが、しばらくすると、ここで中にホログラムが書き込まれるわけです。そうすると回折が起きて、相手の位相共役波になって出ていく。位相共役波ですから、黄色い波はこっちから出てきて、完全に赤いファイバーから出てきた光と同じ波面をもって逆向きに進みますから時間反転。ですからキューツと絞られてこの一点に完全に入っていきます。要するに、先ほどの水をこぼしたりすると、ぱっと水がコップに戻っていく状態です。黄色いほうから出てきた波がここに入っていく。

光ファイバーを扱ったことのある方はおわかりになるとと思いますが、マルチモードファイバーから出た光というのは非常に発散していて、シングルモードファイバーには入れにくい。というのは、こちらが径は太いですが、こちら

は非常に細い。これは実際には非常に難しいのですが、これでやるときちゃんと絞れる。ただし問題は、この回折効率、これが実はさほど上がらないというのは問題ではあるのですが、少なくとも自動ではアライメントができています。

もしこの状態で赤いほうのファイバーが、なにかの拍子にぱっと動いたとしても、ホログラフィーは実時間ホログラフィーに自動で書き換わるので、ちゃんと追従してくれます。一瞬外れるのですが、またぱっと戻ります。こういうことができます。この辺が自動アライメントあるいは変動に強いということになります。

(スライド 40)

それをファイバーのアレイに、これは1次元としか書いてませんが、2次元アレイだと思って見ていただくと、こういうふうにはファイバーをたくさん並べておくわけです。そのうち1本をぱっと光らせます。そうすると先ほどの話とまったく同じことで、ここから出た光がこっちに入ってきます。もちろんこっちから出た光はこっちに入ってきて、お互い入れ替わるわけですが、こういうことが起きます。

ここで、違うファイバーから光を出します。切り替えます。そうすると今度も、ここにホログラフィーが書かれて、自動でこっちからこっち、あるいはこっちから向こうに行きます。要するに、こちらで光らせる。どれを光らせるかで、こっちから進んでいく光の行く先を決めてやることができるわけです。呼び水みたいな感じです。で、2本同時に光らせると分かれて二つに入っていく。こういうことが原理的にはできます。しかしこれも問題はある。実用できれば非常にいいのですが、問題は回折効率があまり高くない。がんばって十何パーセント、20%の回折効率はちょっと難しい。

(スライド 41)

同じようなことを今度は半導体レーザーでやりました。これは実は私がやった話なんです、ハイパワー半導体レーザーというのがありまして、ハイパワーの半導体レーザーというのは、パワーが端面の損傷で決まっている。光を強くしすぎると半導体での端面が熱で破壊されてしまう。それでこのパワーが決まっているわけです。どうするかというと、光のエネルギーの密度を上げないように、面積を大きくしてダメージを逃げるわけです。1ワット以上の、今は何十ワットって半導体レーザーが出ていますが、1ワット以上の半導体レーザーは、ここの面積がかなり大きい。横に幅広い。縦方向は、電流注入の都合であまり厚くできないので、非常に変な横広の形をしているわけです。ところが横広のせいで、スペクトルはむちゃくちゃ広い。縦軸、ログスケールでして、数ナノメートルのスペクトル幅は非常にブロードです。とてもレーザーとはいえないような単

色性なんて全然ない、そういうものです。実際今、固体レーザーが励起に使われているようなのはこういうこういうレーザーです。それをシングルモード化することは可能ではある。それは何を使うかというところ種レーザーを使う。小出力だけれども、ビームクオリティはよくてコヒーレンスの高いレーザーを使って、小さいスポットから出てきたのを横広の面に一様に入れてやろうというわけです。これは実はそう簡単なことではないわけで、きれいにいっていかないわけです。まるいビームを横広のところに入れてやるわけですから。シリンドリカルレンズとかいろいろ使わなきゃいけない。

(スライド 42)

それを二重位相共役鏡でやってやる。そうすると、これまた位相共役波が出ますので、こちら側から出た光が相手の位相共役波になって入ってきます。そうすると自動で、元へ戻るわけですから、まったく同じ場所へ戻るというわけですから、先ほどの横の細長いところにきれいにいっていきます。ちゃんとシングルモード化しました。注入すると、こういうふうになりましたというお話です。

(スライド 43)

500 ミリワットの出力で、ほぼシングルモードといっていいと思いますが、こういうスペクトルが得られました。

(スライド 44)

次に暗号化ホログラフィックメモリのお話に移ります。これが先ほど全然説明しなくて、どういうものであったかというのはまだお話ししてないのですが、

(スライド 45)

要は、まったく同じ経路をたどれば元に戻る。それを逆手にとるというわけです。まったく同じ経路を通れば元に戻るのが位相共役波なわけですから、逆にいうと、同じ経路を戻らなければ元には戻らないというわけです。要するに相手に同じ経路というのを知らせなければいいわけです。

こういうふうにならざる経路の途中に位相を乱す、しかもランダムな位相を乱す物体を入れます。この実験はすりガラスでもできます。すりガラスを1個、ぽっと入れるわけです。あとはカメラのマット、一眼レフカメラのマットみたいなのを置いてもいいのですが、それを置きます。そうするとこのランダム位相板を、まったく同じ場所に同じランダム位相板を置けば絵は元に戻るわけです。ということは、これを持っていない人はこの絵は元に戻せないというわけです。ランダム位相板をキーに使う暗号化をしようという話です。

(スライド 46)

これはホログラフィックメモリというのを使います。結局、ホログラフィーなんですけど、ある絵をかいて、絵をホログラフィーとして中に記録します。それを読むときは左側は抜きにして、こちらのリファレンスビームだけ入れて、結局ホログラフィーを再生している。ホログラフィーを再生して絵を出す。ただしアナログの絵ではなくてデジタルの絵ですから、市松模様なんですけど、

(スライド 47)

こういうデジタルコードを記録して再生します。

ただし、記録するときに、フェーズ・ディストータを入れてやるのがみそです。そうすると、この絵が記録された絵としてはまったくランダムな、ホワイトノイズとなんら変わりのないような絵になって記録されます。

(スライド 48)

それを、先ほどと同じように位相共役再生するわけです。位相共役波として戻してやります。まったく同じ波面をもって逆向きに進む波として戻してやるのですが、ここで、まったく先ほどと同じディストータが入っていないと、まだら模様は、ホワイトノイズ的な画像はホワイトノイズのまままで再生されてしまう。読めないわけです。

それに対して位相共役再生をしてやると、位相共役波ですから、同じものが逆向きに二度通ればちゃんと元に戻るというわけです。

(スライド 49)

これはデモンストレーションで、正しい鍵を使って市松模様を再生するところになりました。正しい鍵を使ってないと市松模様にはなりません。これはまったく同じ場所に同じものを入れなければいけませんので、ちょっとでも位置がずれる、あるいは回るとかずれる、前後するとか、それだけでこういうふうになってしまいます。

実は、解読する方法というのがありまして、キーが1個だけでは、可能性として解読される可能性がある。2枚使うと組み合わせが天文学的な数字になって有限時間では解けないということで、2枚鍵を入れる方法がかなり完全に近い方法だと思います。

(スライド 50)

応用の最後ですが、光ファイバー通信、群速度分散補償というお話をします。

(スライド 51)

いままでの空間領域での位相共役、波面の反転の話だった。今度は時間の反転、本当に時間の反転のお話をしま

す。ただしパルスの話ですが、時間領域での位相共役波を使った応用例です。

光ファイバーの長距離伝送で当初から問題になっていたのは、パルスが短くなってくると、長い距離を進むと、群速度分散というのがありまして、パルスの速度が波長によって違う。一般に赤いほうが速い。普通のガラスのファイバーですと波長が長いほうが速い、短いほうが遅い。だんだん差がついてしまっていて、短いパルスが広がってしまう。この先頭が一個前のパルスに追いついてしまうとまずいわけです。これを解消する方法は、時間反転をしてやればいい。

(スライド 52)

先ほどのパルス、これは左側が青いのですが、右を青く、左を赤く、左右ひっくり返してやる。こういうことができれば、これをもう一回同じファイバー、もちろんまったく同じファイバーを通して元へ戻したら、これは通信ではなくないので意味がないのですが、まったく同じ特性を持った別のファイバーを使って同じ距離だけもう一回進めてやる。そうすると長波長側は、これはもともとスピード速いですから、だんだん追いついてくるわけです。これも時間の逆回しが起きて元へ戻るというわけです。

(スライド 53)

やり方はまったく同じです。四光波混合をやります。一見見かけが違ふのは、いまは斜めに書いてますが、ほとんど同軸で入れます。同軸に入れるとポンプ光と入力光の区別がつかなくなってしまうので、ちょっとだけ周波数をずらすというのがよくやられます。とにかくこういうふうに先頭が赤くて後ろが青い。長波長から短波長にだんだん周波数がシフトしていったようなパルスにこれに入れてやりますと、逆に青いほうが先頭になって、赤いほうが後ろになって出てくる。そういうことが四光波混合を使うと起こすことができます。

(スライド 54)

要は、四光波混合するときに、少し周波数をずらしておいて、横軸が周波数なんですけど、これは先ほどのパルスの周波数、さっきは横軸時間、今度は横軸周波数です。例えばこの辺のスペクトルをもっていた光の成分はどうなるかというのと、 $\omega + \Delta\omega$ だったものが、 $\omega - \Delta\omega$ になる。そうしないとエネルギー保存則が成り立たないので、トータルで辻褃が合うためには、ここにあった光は位相共役光になったらこの辺に出てくる。全体で見ると、ここにあった光は、この周波数は、中心周波数から比べると、これは周波数の低いほうにいたわけです。ところが裏返って位相共役波になると中心周波数に比べて高いほうに寄ってるわけです。中心はここからここへ来る。こっちの端っこのほうは、逆

にこっち側へ来る。常に、 $+\Delta\omega$ と $-\Delta\omega$ 、この $\Delta\omega$ をイコールになってないといけないので、全体がここを中心にはたっと折り返されたような形になるということで、実は中心周波数がシフトしてしまう。

この問題はあるのですが、それを除くと、例えば周波数の小さい側が先に入ったとすると、先頭に出てくるのは周波数の高い側になっているというわけです。で反転が起きるということです。

(スライド 55)

いまのが群速度分散の補償だけだったのですが、実は位相共役を使うともう一歩進んだ補償も自動的できます。

というのは、あるところから一定距離 L だけ進んだところで、この進む間に、周波数ごとに変なゴミの位相がついてくる。たくさん蓄積されてくるという現象がおきてしまう。位相共役光を出すと、これは反転しますから符号がマイナスになる。同じ特性を持ったファイバーをもう一回同じ距離だけ進めば、 L だけ進んで、 $+\Delta$ ついたとすれば、もう L だけ進んでもやっぱり $+\Delta$ だけおまけの位相がくっついている。これは周波数ごとに違っている。けども、ここで位相共役でいうと $-\Delta$ にしてやるので、これがマイナスとプラスでキャンセルして、これもやはり消える。一石二鳥というわけです。

(スライド 56)

実はこの話は最近、どうも通信の世界では流行り始めているようです。通信のほうは、私は専門ではないのですが、最近の論文の出方を見ていると、こういう話がポツポツ出ている。

(スライド 57)

ということで、本日の私の話は、位相共役波の発生原理と、それを実現するための材料の話、それから応用として、ここに挙げたような四つのお話をお見せしました。ただし位相共役波は、これ以外にもいろいろ使いみちはあると思います。ただ、いまのところ、楽しい使いみちはあるのですが、役に立つ使いみちはいまひとつ、あと一歩だなというところまではあるのですが、商品という観点からすると、まだそこまでは至っていないということで、皆様のお知恵を拝借して、何かおもしろい話ができればいいかなと思っています。

いまだいぶはしった部分があるのですが、個別にご興味をお持ちの方は、C 棟の 3 階の東側 C 302 でデモとあわせて展示をやっておりますので、そこでうちの学生、職員お待ちしておりますので、どうぞ質問をお願いいたします。

どうもありがとうございました。

(了)