

光のホール効果を解明

光通信、量子コンピュータ分野における新たな技術へ

産総研 強相関電子技術研究センターでは、東京大学と共同で、光波束の伝播における偏光（スピン）の効果を取り入れた新たな幾何光学の基礎方程式を導出し、屈折率の変化と垂直方向に光線がずれるという現象を解明した。これはよく知られた「境界面における反射・屈折の法則」が補正を受けることを意味し、物理学的に大変興味深い効果である。また、フォトニック結晶を用いてこの効果を大幅に増大し、制御する方法についても提案した。

研究の背景と経緯

幾何光学と波動光学の関係は、古典力学と量子力学の関係と対応しており、物理学の根幹に位置する問題であるが、同時に既に解かれてしまった過去の問題と考えている物理学者も多い。光の挙動は電磁気学のマクスウェル方程式を解くことで原理的には予測できるが、その解析は通常たいへん複雑な問題となる。幾何光学は、光の波長が短い極限でその軌跡をあたかも粒子の場合のように取り扱うことができることを示し、多くの光学器機的设计、開発を可能にした。幾何光学からの補正は、通常、回折理論が扱う問題であるが、そこでは光の偏光（スピン）がしばしば考慮されていなかった。これを取り入れた、幾何光学の新しい方程式を導くことに成功し、それをを用いて屈折率の変化と垂直方向に光線がずれる、または曲がる現象（これを光のホール効果と名づけた）を解明したのが今回の成果である。これは、異なる屈折率を持つ媒質の境界で起こる光の反射・屈折の法則が補正を受けることを意味し、物理学的にはきわめて重要な効果である。

また、波長程度のスケールで屈折率が変化する場合、例えば、誘電率（したがって屈折率）が周期的に変調した人工結晶であるフォトニック結晶においては、幾何光学からの補正がさらに重要となり、その場合にも使える「拡張された幾何光学」が必要となる。先の反射・屈折における効果は、興味深い現象ではあるが、ずれの大きさは波長の数分の1であり、可視光に対しては極めて小さい。しかし、フォトニック結晶を用いることにより、この効果を大幅に増大できることが理論的に示され、微細加工を用いた光デバイス開発を進める上で重要かつ有用となると期待される。

反射・屈折における例

光の偏光（スピン）を考慮した場合と、従来の幾何光学との違いを如実に表す例として「屈折率の異なる二種類の媒質の境界面における反射・屈折」の問題を考えてみる。一方の媒質（上の媒質）からある角度で入射した光線は、図1のように境界面で屈折してもう一方の媒質（下の媒質）に抜けていく（図1には反射した光線も描いてある）。図1の方向からみた屈折角は、光が偏光（スピン）の自由度を持つ場合も持たない場合も同じ角度となり、スネルの法則によって決まる角度と一致する。また従来の幾何光学によれば、入射光、反射光、屈折光はすべて同じ平面内を進む。一方、実際の光は偏光（スピン）の自由度をもっており、たとえば円偏光（スピンの進行方向またはその逆方向を向いた光）を入射した場合、屈折による進行方向の変化にとともにスピンの角運動量も変化する。しかし、二つの

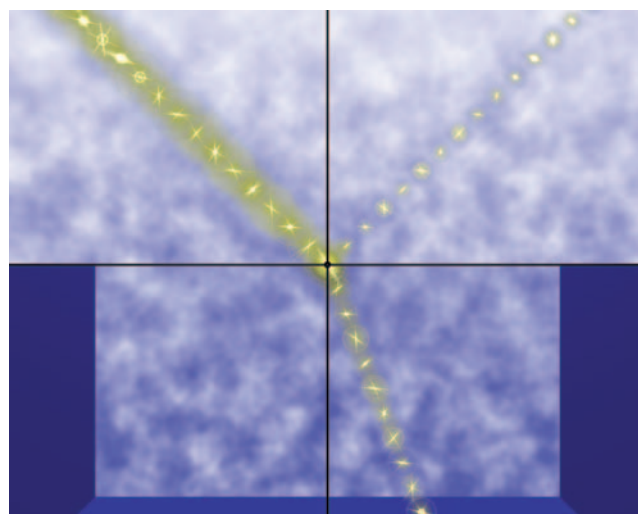


図1 異なる屈折率をもつ媒質の境界面における反射・屈折

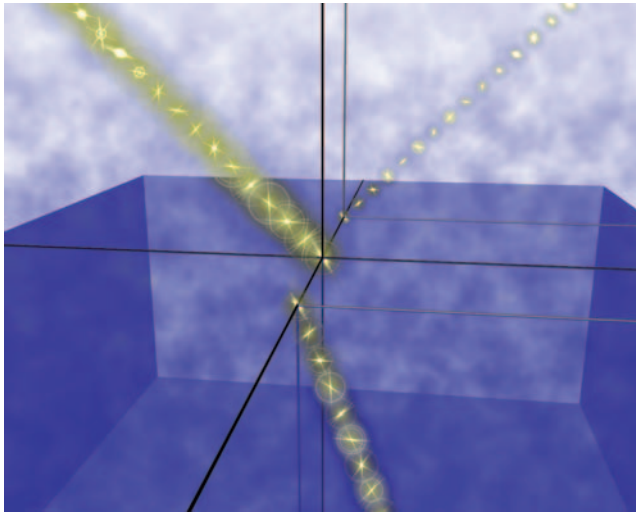


図2 円偏光波束を入射した場合の反射・屈折

図1を斜めから眺めたもの。全角運動量（軌道角運動量とスピン角運動量の和）の保存則により、反射・屈折した光波束の中心は入射面からずれる。

媒質が光線の太さに比べて十分大きい場合、全角運動量の境界面と垂直方向の成分は保存しなければならない。上記の屈折の理論とこの全角運動量保存の法則を矛盾無く成り立たせるためには、光の偏光（スピン）の自由度を考慮した新たな幾何光学の基礎理論を構築する必要がある。本研究によって解明されたのは、この偏光（スピン）の自由度が、内部角運動量を持った波に必然的に付随する幾何学的な位相（ベリー位相）として、光波束の運動方程式に取り入れることができるということである。上記の問題に関して言えば、従来の幾何光学の教える光線の軌跡との違いは図2のように表される。

図2は図1を斜めから見たものであり、偏光（スピン）の自由度を考慮した場合の軌跡である。従来の幾何光学による予測と異なり、反射・屈折光は入射光の平面からずれている。さらに詳しく言うと、屈折率の変化の方向（境界面と垂直な方向）と入射光の進行方向のどちらにも垂直に光線がずれており、光のホール効果とでも言うべきものであることがわかる。上記の現象は非常にシンプルであるにもかかわらず、なぜいまだに決定的な実験事実がないのかという疑問がある。その答えは上記のずれが非常に小さいためである。それはせいぜい波長程度であり、一般的には光線の太さよりもずっと小さい。（図2は説明の都合上、誇張して描いてある。）そこで思いつくのは、何とかしてこの効果を大きくしてやることはできないか、ということである。

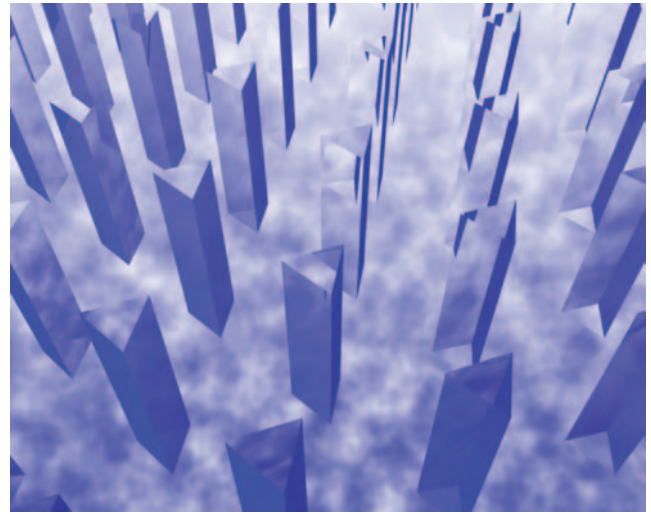


図3 空間反転対称性を持たない2次元フォトニック結晶の例

フォトニック結晶中の光波束

今回のもうひとつの重要な成果は、フォトニック結晶を用いてこの効果が大幅に増大できるという知見を得たことである。前述したように、光のホール効果は幾何学的な位相であるベリー位相と密接に関係している。このベリー位相はスピンなどの元々ある内部角運動量を起源とするだけでなく、固体中電子のように、波が周期的なポテンシャル変調を受けた場合にも現れることが知られている（ただし、周期的なポテンシャル変調だけでなく、その他いくつかの条件が必要となる）。つまり固体中電子の例にならば、フォトニック結晶中の光を想定すると、誘電率の周期的変調に由来するベリー位相をもつ可能性がある。

実際、空間反転対称性（原点を中心として反転する対称性）を持たない2次元結晶（周期性が2次元的であり厚み方向には一様、図3参照）を用いてシミュレーションすると、ベリー位相が現れることがわかった。そこで今回導出した基礎方程式をこの場合にも適用し、フォトニック結晶中の光波束の軌跡を計算した結果を図4に示す。フォトニック結晶中の光は、固体中電子と同様にバンド構造をもつが、2次元フォトニック結晶において厚み方向の運動量がゼロの場合は、2種類のモードに分類できる。図中の記号はそのモードの違いとバンドの指標を表している。また、エネルギー密度で重みをつけた座標を光波束の中心とした。相対性理論によれば質量とエネルギーは等価なので、この定義における中心は重心に対応している。

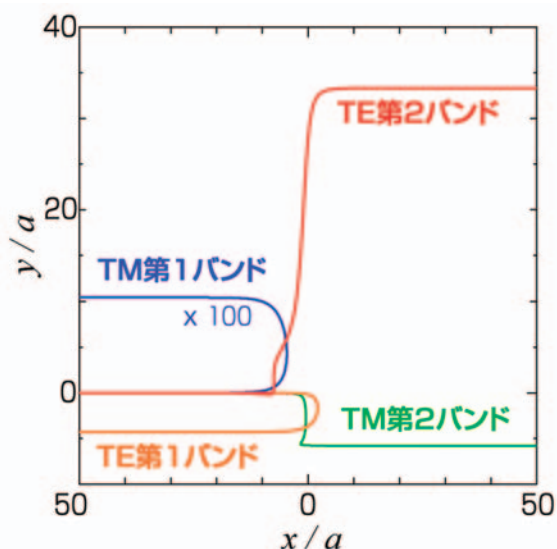


図4 フォトニック結晶中の光波束の軌跡

光波束は左から入射。図中の記号はバンドの種類を表す指標。反射・屈折の例における境界面の代わりに、緩やかな屈折率の変調 ($x=0$ 近傍 10 格子程度の幅) を周期構造に上乗せした状況を考えている。

反射・屈折の問題における境界面の代わりに、ここでは、有限の幅をもった緩やかな屈折率の変調を周期的な変調に上乗せした状況を考えた。縦軸横軸の単位は格子定数であり、光の波長も格子定数程度であるとすると、TEモード第2バンドの波束の場合には、実に波長の数十倍のずれを示している。ところで、ずれの大きさはベリー位相の強さ（ベリー曲率）に依存している。フォトニック結晶中の光の場合、ベリー曲率はおおよそ隣り合うバンド間隔の2乗に反比例しているため、結晶構造つまりバンド構造を変えることにより、原理的にはこの効果を制御することができる。

終わりに

産総研 強相関電子技術研究センター 強相関理論チームでは、エネルギー損失を伴わない固体中電子の機能開拓を研究目標にしており、電子の波動現象における幾何学的効果がその鍵になると考え研究を進めている。特に、電子波動関数の幾何学的位相（ベリー位相）を用いた新しい効果・現象の理論的開拓を重点的に行なってきた。このベリー位相を用いた新しい効果の光における対応現象を追求する過程で見出したのが、今回の成果である。

まだ理論的な予測の段階に過ぎないが、光のホール効果をフォトニック結晶により増大して使えば、導波管や光ファイバーとはまったく異なる機構による光の



強相関電子技術研究センター 強相関理論チーム
小野田 勝 研究員

伝播制御が可能になる。また、この効果は、光子の全角運動量の保存と深く関連し、偏光（スピン）の自由度をもちいた光通信や量子コンピュータ分野における基礎学理とも密接な関係があると考えられ、将来的な光デバイス開発において有用となることを期待している。さらに、反射・屈折の例における効果は、波長の数分の1程度の小さなものであったが、この小ささを利用した精密測定技術への応用も可能かもしれない。

◆関連情報

・論文発表, 平成16年8月20日, Phys. Rev. Lett. 93, 083901 (2004).
・プレス発表, 平成16年9月8日
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20040908/pr20040908.html

●問い合わせ

独立行政法人 産業技術総合研究所
強相関電子技術研究センター
強相関理論チーム 研究員 小野田 勝

E-mail : m.onoda@aist.go.jp
〒305-8562
茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 4