

強く集光したベクトルビームによる電子レンズ作用の検討

Study of electron lens action created by a tightly focused vector beam

東北大¹, JST さきがけ², ○上杉 祐貴^{1,2}, 小澤 祐市¹, 佐藤 俊一¹

Tohoku Univ.¹, PRESTO, JST², ○Yuuki Uesugi^{1,2}, Yuichi Kozawa¹, Shinichi Sato¹

E-mail: uesugi@tohoku.ac.jp

光定在波中に電子を入射すると誘導効果による散乱断面積の増幅が生じ、ペタワット級のレーザー光源を使用せずとも1電子と2光子の非線形散乱が生じる。この現象を Kapitza-Dirac (KD) 効果という。KD 効果では数 10 keV の電子に対して数 10 GW/cm² の光強度で有意なビーム変調作用を実現することが可能であり、近年これを利用してレーザー定在波を電子位相差顕微鏡の位相版として利用する研究や、縦方向に変調してエネルギー変調を生じさせアト秒バンチング化する手法などが相次いで報告されている。

本研究では、ビーム軸に直交する面内に回転対称な光定在波を用いることで、電子ビームを発散または収束させる電子ラウンドレンズ（その形状が回転対称なレンズ）として機能することを数値計算により見出した [1]。計算では光定在波による誘導コンプトン散乱の効果を最大化するために、収束コーン角の大きな Bessel-Gauss (BG) ビームを用いることを想定した。また、誘導コンプトン散乱に起因する力の発生は、古典的には光定在波中の電子に対する磁場の作用 ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) で記述される。そのため、円筒座標系 $\mathbf{r} = (\rho, \phi, z)$ において、 r 成分の力を発生するには電場または磁場のどちらかが縦方向 (z 成分) の場を有さなければならない。これを実現するレーザー場の候補として、高 NA の対物レンズで集光したベクトルビームの利用を思いついた。

シミュレーションではまず、大角度で集光した径偏光および方位偏光 BG ビームの強度分布をベクトル回折積分の手法で計算した。KD 効果はプラズマ物理の分野でよく知られるポンドロモータティブ力と同じく、ベクトルポテンシャルの二乗の勾配に比例した力として導かれる。そこで、求めた集光レーザー場の光強度分布から勾配を求め電子に働く力の場を求めた。（ここで、KD 効果の寄与とポンドロモータティブ力による寄与を区別することは本質的に意味をなさない。）この力の場は、径偏光の場合には電子に対して発散作用を、方位偏光の場合には収束作用を与えるラウンドレンズとして作用することがわかった。また、実現したレンズ作用の特性を詳細に評価するために、光学における光線追跡に相当する電子軌道計算を行った。その結果、方位偏光 BG ビームによる凸レンズ作用は同時に負の球面収差を有することが判明した。

従来の電極板や磁束コイルを用いる電子ラウンドレンズでは、原理的に正の球面収差しか生じ得ないことが知られている。レーザーを用いた電子ラウンドレンズはこの常識を覆す特性を有しており、特に電子顕微鏡法の収差補正技術に革新的な貢献が期待される。また、KD 効果は電子を含む荷電粒子全般のほか中性な分子ビームにも適応される現象であり、物質波科学やイオンビーム技術などへの展開も期待される。講演では上記シミュレーションの内容および結果についてまとめ、今後の研究方針につて述べる。

[1] Y. Uesugi, Y. Kozawa, and S. Sato, arXiv:2103.16406 (2021).

謝辞：本研究の遂行にあたり、ファインセラミックスセンターナノ構造研究所の川崎 忠寛 主任研究員に有益な助言をいただきました。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP20H02629, JST さきがけ JPMJPR2004, および光科学技術研究振興財団の助成金交付により遂行されたものです。