

Przepływ wsteczny (backflow) pojedynczych fotonów z orbitalnym momentem pędu

B. Ghosh¹, B. Gorzkowski¹, J. Lewandowski¹, A. Nomerotski^{2,3}, R. Łapkiewicz^{1, †}

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Ludwika Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague, 115 19, Republika Czeska

³ Department of Electrical and Computer Engineering, Florida International University, Miami FL 33199, USA

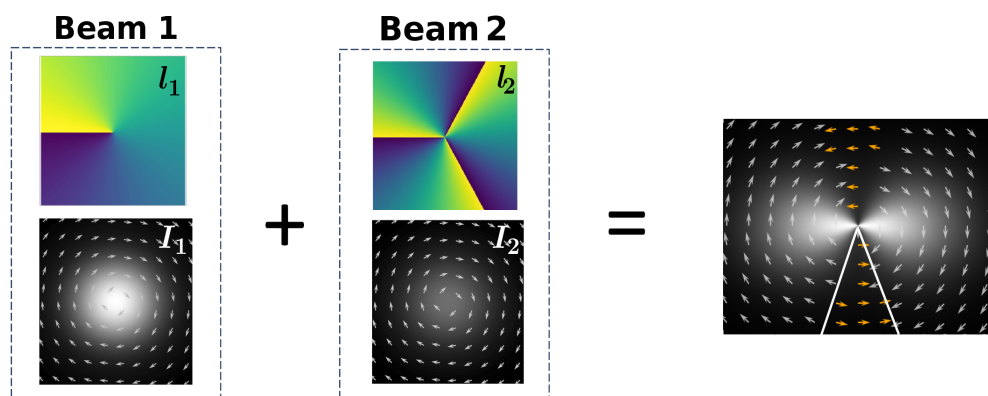
†email: radek.lapkiewicz@fuw.edu.pl

Zjawisko przepływu wstecznego (ang. backflow) było pierwotnie opisane w mechanice kwantowej: cząstka, której wszystkie składowe mają dodatni pęd, może lokalnie wykazywać przepływ w kierunku przeciwnym (tzn. prąd prawdopodobieństwa w kierunku przeciwnym do pędu)[1]. Efekt ten jest ściśle związany z tzw. superoscylacjami[2]. Są to przypadki, w których fala lokalnie oscyluje szybciej niż najwyższa częstotliwość obecna w jej widmie Fouriera. Dzięki temu powiązaniu możliwa stała się jego obserwacja również w ogólnych układach falowych, w szczególności w układach optycznych, zarówno klasycznych, jak i kwantowych.

W optyce przepływ wsteczny objawia się tym, że lokalny pęd światła, czyli nachylenie frontu falowego, może być skierowany w sposób nieintuicyjny, nawet jeśli globalnie fala ma jednoznacznie zdefiniowany kierunek. Efekty te można zaobserwować w superpozycjach wiązek światła[3], między innymi tych, które niosą orbitalny moment pędu (OAM)[4]. W takich przypadkach lokalna analiza kierunku propagacji ujawnia obszary, w których fala „cofa się” – czyli jej faza obraca się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara – mimo że wszystkie fale z których się składa mają jedynie orbitalne momenty pędu w kierunku zgodne z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.

Naszym celem jest zademonstrowanie tego efektu na poziomie pojedynczych fotonów. Korzystamy ze źródła pojedynczych fotonów opartego na procesie SPDC, modulatora fazy (SLM), który pozwala przygotować superpozycję dwóch stanów o dodatnim OAM, oraz sensora Shacka-Hartmanna, umożliwiającego precyzyjny pomiar lokalnego nachylenia frontu fali. W ten sposób można wyznaczyć kierunki lokalnej propagacji pojedynczych fotonów. Korzystamy również z kamery TimePix3, w której każdy piksel (o rozmiarze 55 μm) posiada niezależny licznik czasu, umożliwiający znakowanie czasowe z dokładnością 1.56 ns; dzięki tej architekturze możliwa jest detekcja pojedynczych fotonów przy niskim poziomie szumu.

Wstępne eksperymenty potwierdziły możliwość pomiaru lokalnego pędu dla pojedynczych fotonów w czystych stanach OAM. Następny krok polega na pomiarze dla superpozycji takich stanów, w której powinien pojawić się przepływ wsteczny. Zaobserwowanie tego efektu stanowi jednak wyzwanie, gdyż przepływ wsteczny wiąże się fundamentalnie z utratą energii w obszarach, gdzie się pojawia, co oznacza konieczność uzyskania jak najwyższego stosunku sygnału do szumu.



Rysunek 1: Schematyczne przedstawienie nałożenia dwóch wiązek z dodatnimi orbitalnymi momentami pędu. Superpozycja takich wiązek posiada obszary w których wiązka obraca się w kierunku ujemnego orbitalnego momentu pędu.

Literatura

- [1] A. J. Bracken and G. F. Mello, “Probability backflow and a new dimensionless quantum number,” *J. Phys. A* **27**, 2197 (1994).
- [2] Michael Berry et al 2019, *J. Opt.* **21**, 053002
- [3] Y. Eliezer, T. Zacharias, and A. Bahabad, “Observation of optical backflow,” *Optica* **7**, 72–76 (2020).
- [4] Bohnishikha Ghosh, Anat Daniel, Bernard Gorzkowski, and Radek Łapkiewicz, “Azimuthal backflow in light carrying orbital angular momentum,” *Optica* **10**, 1217-1222 (2023)