

Prof. dr. sc. Hrvoje Buljan postigao je vrhunske znanstvene rezultate na temama poput plazmona u grafenu, topoloških rešetki i kvantnih sustava izvan ravnoteže. Podrobniji opis odabranih rezultata nalazi se ovdje:

### Plazmoni u grafenu

Grafen je 2D materijal načinjen od atoma ugljika organiziranih u strukturu pčelinjeg saća. Eksperimentalno je realiziran 2005. godine te je za njegovo otkriće 2010. podijeljena Nobelova nagrada. Jedno od važnih pitanja nakon otkrića tog materijala bilo je da li grafen, koji je polumetal bez energetskog procjepa, podržava plazmone: hibridna kolektivna pobuđenja elektrona i svjetlosti, te koja su svojstva tih pobuđenja u novom materijalu. **Buljan je teorijski predvidio (sa svojim doktorandom M. Jablanom i suradnikom Soljačićem) [1,2,3] kako ta pobuđenja imaju snažan potencijal za daljnji razvoj nanofotonike, budući da imaju znatno manje valne duljine od valnih duljina svjetlosti na istoj frekvenciji u vakuumu, te da u dovoljno čistim uzorcima istovremeno mogu istovremeno imati i relativno dugo vrijeme poluživota, što nije slučaj za plazmone u metalima gdje Ohmski otpori uguše plazmone u tom režimu.** Kasniji eksperimenti su nedvosmisleno potvrdili predviđanje jake lokalizacije tj. vrlo male valne duljine plazmona, a u čistim su uzorcima viđeni plazmoni sa istovremeno velikim propagacijskim duljinama (nekoliko desetaka plazmonskih valnih duljina). Rad [1] je polučio značajan odjek (preko 1700 citata prema WoS) i najcitiraniji je članak u časopisu Physical Review B (područje fizike kondenzirane tvari) u 2009. godini. Rad [2] je citiran preko 200 puta, a rad [3] preko 70 puta. U sva tri rada Buljan je dopisni autor.

### Topološke rešetke

Topologija je u fizici kondenzirane tvari od izuzetne važnosti od otkrića kvantnog Hallovog efekta. Otkrićem topoloških fotoničkih sustava 2009. godine, otkrićem umjetnih magnetskih polja u ultrahladnim atomskim sustavima te otkrićem grafena koji ima topološki singularitet u  $k$ -prostoru, utjecaj topologije na razvoj fizike je dodatno narastao, a Buljanovi znanstveni članci u posljednjih deset godina spadaju u to područje. **Buljan je napravio niz važnih doprinosa tim istraživanjima uključujući: (i) razvoj teorije za opis nelinearnih topoloških sustava [4], (ii) provedba prvog istraživanja međuigre topologije, nelinearnost i ne-Hermitičnosti sustava (zajedno sa eksperimentalnom grupom Z. Chena, Nankai University) [5], (ii) uvođenje koncepta sub-simetrije (SubSy) za opis topoloških faza koje štiti simetrija [6], (iv) prijedlog za eksperimentalnu realizaciju Weylovih fermiona u optičkim rešetkama [10] (u suradnji sa M. Soljačićem i W. Ketterleom, dobitnikom Nobelove nagrade 2001. g.), (v) prijedlog za eksperimentalnu realizaciju anyona u ne-međudjelujućim 2D sustavima [11], što je promjena paradigme za te kvazičestice, te (vi) prijedlog eksperimentalne realizacije 4D fotoničkih rešetki [12]. U svim radovima [4-12] Buljan je dopisni autor.**

Od otkrića topoloških fotoničkih sustava 2009. pa sve do 2020. godine, velika većina svih eksperimentalno i teorijski analiziranih sustava je bila linearna. Jedan od glavnih uzroka tome jest činjenica da za nelinearne topološke sustave nije postojala sustavna teorija koja bi ih opisivala. U Buljanovom znanstvenom radu [4] izvedena je teorija koja daje proceduru kako opisati nelinearne topološke fotoničke sustave, te je u istom radu objašnjena pojava vezanja svjetlosti u inače topološki zaštićeno rubno stanje korištenjem nelinearnosti. Taj je rad prema WoS citiran preko 58 puta u malo više od tri godine.

Buljan je tada otišao korak dalje te uz nelinearnost i netrivialnu topologiju istraživao i ne-Hermitičnost sustava, a taj je znanstveni rad objavljen u prestižnom časopisu Science [5]. Glavni rezultat međuigre topologije, nelinearnost i ne-Hermitičnosti sustava je da lokalnim utjecajem odnosno nelinearnošću na

lokalni defekt u sustavu možemo mijenjati globalna svojstva sustava odnosno topologiju i prostorno-vremensku simetriju. Taj je rad prema WoS citiran preko 114 puta u malo više od dvije godine.

U recentnom radu objavljenom u časopisu Nature Physics 2023. godine [6], Buljan je pokazao da u topološkim sustavima koje štiti simetrija, zaštita topoloških rubnih stanja vrijedi čak i kad je simetrija narušena, ako je zadovoljen blaži uvjet odnosno sub-simetrija (SubSy). Koncept SubSy označava situaciju kada operatorska jednadžba simetrije vrijedi samo u dijelu Hilbertovog prostora, a rezultat može biti od značaja za primjenu. Uz ova dva izdvojena rada, Buljan je objavio niz drugih radova [7,8,9] koji povezuju nelinearnost i topologiju, objavljenih u prestižnim časopisima (Physical Review Letters, Light: Science and Applications, e-Light) sa značajnim odjekom.

Weylovi fermioni su predviđeni 1929. godine, ali nisu opaženi kao elementarne čestice. U znanstvenom radu [10] Buljan je konstruirao realističan prijedlog za eksperimentalnu realizaciju Weylovih fermiona u 3D optičkim rešetkama sa laserski potpomognutim tuneliranjem. Weylove točke su u tom sustavu sintetički magnetski monopoli u k-prostoru u Brillouinovoj zoni. Taj je rad prema WoS citiran preko 138 puta.

Buljan je također imao zapažene radove u kojima je predložio eksperimentalnu realizaciju anyona [11], čestica koje žive u dvodimenzionalnim prostorima, te imaju simetriju valnih funkcija različitu od fermiona i bozona, tj. čestica koje postoje u našem svemiru. Iako anyoni ne postoje kao elementarne čestice, mogu se pojaviti kao emergentne kvazičestice u fizici kondenzirane tvari. Buljan je pokazao kako se anyoni mogu realizirati i u ne-međudjelujućim sustavima, što je svojevrsna promjena paradigme jer su do tada viđeni kod frakcionalnog kvantnog Hallovog efekta što je jako-korelirana faza.

Jedna od njegovih ideja koja je pokrenula cijelo područje istraživanja u optičkim sustavima je mogućnost realizacije četverodimenzionalnih (4D) fotoničkih rešetki [12]. Naime, mi živimo u 3D prostoru a četvrta je dimenzija vrijeme. Međutim, Buljan je uočio da diskretne 4D rešetke mogu biti uronjene u kontinuirani 3D prostor, te da se mogu eksperimentalno istraživati razni efekti u realnom 4D prostoru. Ti su eksperimenti naknadno provedeni u raznim sustavima sa tzv. sintetičkim dimenzijama.

#### Jednodimenzionalni kvantni sustavi izvan ravnoteže

Razvojem eksperimentalnih sustava kvantnih plinova, početkom ovog stoljeća postalo je moguće istraživati niskodimenzionalne kvantne sustave izvan ravnoteže u kontroliranim uvjetima. To je otvorilo put eksperimentalnoj realizaciji egzaktno rješivih višečestičnih kvantnih sustava. Budući da su takvi modeli rijetkost u kvantnoj fizici, postalo je relevantno istražiti njihovo ponašanje izvan ravnoteže odnosno vremensku dinamiku tih sustava. Dva sustava su bila od posebnog interesa zajednici: Lieb-Liniger plin i Tonks-Girardeau plin. **Buljan je (i) prvi objavio egzaktna rješenja za vremenski ovisan Lieb-Liniger plin [13], (ii) izveo algoritam za vrlo efikasno računanje jednočestične matrice gustoće za Tonks-Girardeau plin (koja sadrži sve jednočestične eksperimentalne observable za taj bozonski plin) [14], te (iii) ukazao da metoda srednjeg polja, tj. Gross-Pitaevskii teorija koju koristi većina autora za opis Bose-Einsteinovih kondenzata, može dati kvalitativno pogrešne rezultate kada su kvantne ili termalne fluktuacije nezanemarive, što je pogotovo važno u kvazi-jednodimenzionalnim sustavima [15].**

#### Djelomično koherentni valovi svjetlosti u fotoničkim materijalima

Razumijevanje prostiranja svjetlosti u materijalima je od neprocjenjivog značaja za modernu znanost i tehnološke primjene. Razvojem lasera, većina istraživanja bavi se propagacijom koherentne svjetlosti, tj. one kod koje poznavanje amplitude i fazu u jednoj točki omogućuje njihovo poznavanje u svim ostalim

točkama. Međutim, važno je razumjeti kako se prostire djelomično koherentna svjetlost (npr. ona iz žarulje) u tim materijalima, kako iz temeljnih razloga tako i za primjenu. **Buljan je ostvario niz značajnih doprinosa razumijevanju prostiranja djelomično koherentne svjetlosti u nelinearnim materijalima. Ističu se (i) razvoj prvog teorijskog modela koji opisuje propagaciju nekoherentne bijele svjetlosti u nelinearnom mediju sporig odziva [16], (ii) teorijski opis glavnih značajki nekoherentnih bijelih solitona [17], (iii) teorijsko predviđanje modulacijske nestabilnosti bijele svjetlosti, koje je kasnije eksperimentalno potvrđeno [18], (iv) teorijsko predviđanje nekoherentnih solitona u nelinearnim fotoničkim rešetkama [19], koji su kasnije eksperimentalno opaženi [20].**

Kaotične mape sa više rupa

Kaos je neizostavan element većine nelinearnih sustava, pogotovo u režimu jakih nelinearnosti. Kaotični atraktori kod tjeranih i gušenih nelinearnih sustava često imaju fraktalnu strukturu, a tipična kaotična putanja kad-tad prođe proizvoljno blizu svakog dijela atraktora. Paar i Pavin su prvi počeli proučavati mape s rupama, kod kojih nakon nekog vremena putanja upadne u rupu i kaos prestaje, tj kaos je tranzijentan. **Buljan je (u suradnji s V. Paarom) prvi analizirao mape sa puno rupa te efekte interakcije među rupama [21] i topologiju mapa s rupama. Njegovi su radovi pružili matematičke temelje za razumijevanje tranzijentnog kaosa za mapa s rupama.**

Odabrani radovi

**Na radovima označenim zvjezdicom \* Buljan je dopisni autor.**

[1] M. Jablan, **H. Buljan\***, M. Soljačić, *Plasmonics in graphene at infrared frequencies*, Phys. Rev. B 80, 245435 (2009). (>1700 citata prema WoS)

[2] M. Jablan, M. Soljačić, **H. Buljan\***, *Plasmons in graphene: Fundamental properties and potential applications*, Proceedings of the IEEE 101, 1689 (2013). (>200 citata prema WoS)

[3] M. Jablan, **H. Buljan\***, and M. Soljagic, *Transverse electric plasmons in bilayer graphene*, Optics Express 19, 11236 (2011). (>70 citata prema WoS)

[4] S. Xia, D. Jukic, N. Wang, D. Smirnova, L. Smirnov, L. Tang, D. Song, A. Szameit, D. Leykam, J. Xu, Z. Chen and **H. Buljan\***, *Nontrivial coupling of light into a defect: the interplay of nonlinearity and topology*, Light-Science & Applications 9,147 (2020). (>58 citata prema WoS)

[5] S. Xia, D. Kaltsas, D. Song, I. Komis, J. Xu, A. Szameit, **H. Buljan\***, K. G. Makris, Z. Chen, *Nonlinear tuning of PT symmetry and non-Hermitian topological states*, Science 372, 6537 (2021). (>110 citata prema WoS)

[6] Z. Wang, X. Wang, Z. Hu, D. Bongiovanni, D. Jukić, L. Tang, D. Song, R. Morandotti, Z. Chen, **H. Buljan\***, *Sub-symmetry protected topological states*, Nature Physics (2023), <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02011-9>

[7] Hu, Z., Bongiovanni, D., Jukić, ... , **H. Buljan\***, Z. Chen, *Nonlinear control of photonic higher-order topological bound states in the continuum*. Light Sci Appl 10, 164 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00607-5> (>49 citata prema WoS)

[8] D. Bongiovanni, D. Jukić, Z. Hu, F. Lunić, Y. Hu, D. Song, R. Morandotti, Z. Chen, and **H. Buljan\***, *Dynamically Emerging Topological Phase Transitions in Nonlinear Interacting Soliton Lattices*, Phys. Rev. Lett. 127, 184101 (2021). (>8 citata prema WoS)

- [9] X. Liu, S. Xia, E. Jajtić, D. Song, D. Li, L. Tang, D. Leykam, J. Xu, **H. Buljan\***, Z. Chen, *Universal momentum-to-real-space mapping of topological singularities*, Nature Communications **11**, 1586 (2020). (>17 citata prema WoS)
- [10] T. Dubček, C.J. Kennedy, L. Lu, W. Ketterle, M. Soljačić, **H. Buljan\***, *Weyl Points in Three-Dimensional Optical Lattices: Synthetic Magnetic Monopoles in Momentum Space*, Phys. Rev. Lett. **114**, 225301 (2015). (>138 citata prema WoS)
- [11] M. Todorčić, D. Jukić, D. Radić, M. Soljačić, and **H. Buljan\***, *Quantum Hall Effect with Composites of Magnetic Flux Tubes and Charged Particles*, Phys. Rev. Lett. **120**, 267201 (2018).
- [12] D. Jukić and **H. Buljan\***, *Four-dimensional photonic lattices and discrete tesseract solitons*, Phys. Rev. E **87**, 013814 (2013). (>46 citata prema WoS)
- [13] **H. Buljan\***, R. Pezer, and T. Gasenzer, *Fermi-Bose transformation for a time-dependent Lieb-Liniger gas*, Phys. Rev. Lett. **100**, 080406 (2008). (>60 citata prema WoS)
- [14] R. Pezer and **H. Buljan\***, "Momentum distribution dynamics of a Tonks-Girardeau gas: Bragg reflections of a quantum many-body wave packet" Phys. Rev. Lett. **98**, 240403 (2007). (>60 citata prema WoS)
- [15] **H. Buljan**, M. Segev, and A. Vardi, *Incoherent matter-wave solitons and pairing instability in an attractively interacting Bose-Einstein condensate*, Phys. Rev. Lett. **95**, 180401 (2005). (>50 citata prema WoS)
- [16] **H. Buljan**, A. Šiber, M. Soljačić, M. Segev, *Propagation of incoherent white light and modulation instability in noninstantaneous nonlinear media*, Phys. Rev. E **66**, (R)035601 (2002). (>49 citata prema WoS)
- [17] **H. Buljan**, A. Šiber, M. Soljačić, T. Schwartz, M. Segev, and D.N. Christodoulides, *Incoherent white light solitons in logarithmically saturable noninstantaneous nonlinear medium*, Phys. Rev. E **68**, 036607 (2003) (>100 citata prema WoS)
- [18] T. Schwartz, T. Carmon, **H. Buljan**, and M. Segev, *Spontaneous pattern formation with incoherent white light*, Phys. Rev. Lett. **93**, 223901 (2004). (>46 citata prema WoS) Rad istaknut/komentiran u rubrici Physics Update časopisa Physics Today, December, 2004.
- [19] **H. Buljan**, O. Cohen, J.W. Fleischer, T. Schwartz, M. Segev, Z.H. Musslimani, N.K. Efremidis, and D.N. Christodoulides, *Random-phase solitons in nonlinear periodic lattices*, Phys. Rev. Lett. **92**, 223901 (2004). (>45 citata prema WoS)
- [20] O. Cohen, G. Bartal, **H. Buljan**, T. Carmon, J.W. Fleischer, M. Segev, and D.N. Christodoulides, *Observation of random-phase lattice solitons*, Nature (London) **433**, 500 (2005). (>80 citata prema WoS)
- [21] H. Buljan and V. Paar, *Many hole interactions and the average lifetimes of chaotic transients that precede controlled periodic motion*, Phys. Rev. E **63**, 066205 (2001). (>80 citata prema WoS)