

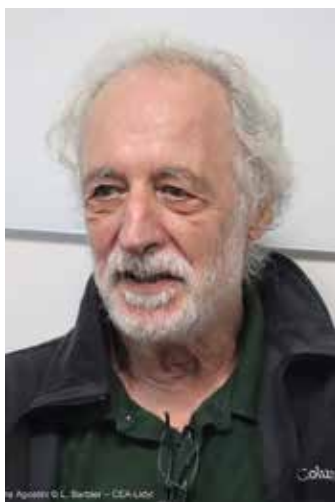
Ustvarjanje atosekundnih sunkov svetlobe za preučevanje dinamike elektronov

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2023

Mojca Vilfan, Igor Vaskivskyi

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2023 je bila podeljena trem eksperimentalnim fizikom za ustvarjanje izredno kratkih sunkov svetlobe. V enakovrednih deležih so jo prejeli Pierre Agostini z Državne univerze Ohio v Združenih državah Amerike, Ferenc Krausz z Inštituta Maxa Plancka za kvan-

tno optiko v Garchingu v Nemčiji in Anne L'Huillier z Univerze v Lundu na Švedskem. Obrazložitev ob prejemu nagrade je zelo kratka: »za eksperimentalne metode, ki ustvarjajo atosekundne sunke svetlobe za preučevanje dinamike elektronov v snovi«.



Pierre Agostini je francoski fizik, rojen leta 1941 v današnji Tuniziji. Doštudiral in doktoriral je na Univerzi Aix-Marseille v Franciji, po doktoratu leta 1968 pa se je zaposlil na CEA Saclay blizu Pariza, kjer je ostal vse do leta 2002. V tem času je opravil raziskave, ki so mu prinesle Nobelovo nagrado. Leta 2005 se je pridružil Državni univerzi Ohio v Združenih državah Amerike, od leta 2018 ima mesto zaslužnega profesorja.



Ferenc Krausz je bil rojen leta 1962 na Madžarskem. Tam je doštudiral teoretično fiziko in elektrotehniko, doktoriral pa leta 1991 na Dunaju. Na Tehnični univerzi na Dunaju je ostal do leta 2003, ko je prevzel vodenje Inštituta Maxa Plancka za kvantno optiko v Garchingu blizu Münchna. Leto pozneje je postal tudi vodja skupine za eksperimentalno lasersko fiziko na Univerzi Ludwiga Maximilliana v Münchnu. Delo, ki je vodilo do Nobelove nagrade, je opravil na Dunaju.



Anne L'Huillier se je rodila leta 1958 v Parizu, kjer je tudi študirala teoretično fiziko in matematiko ter doktorirala leta 1986 iz eksperimentalne fizike. Po doktoratu se je zaposlila na CEA Saclay blizu Pariza, kjer je začela preučevati kratke sunke svetlobe, delo pa nadaljevala na Univerzi v Lundu na Švedskem, kamor se je preselila leta 1995. Še vedno je aktivna profesorica za atomsko fiziko na tamkajšnji univerzi.

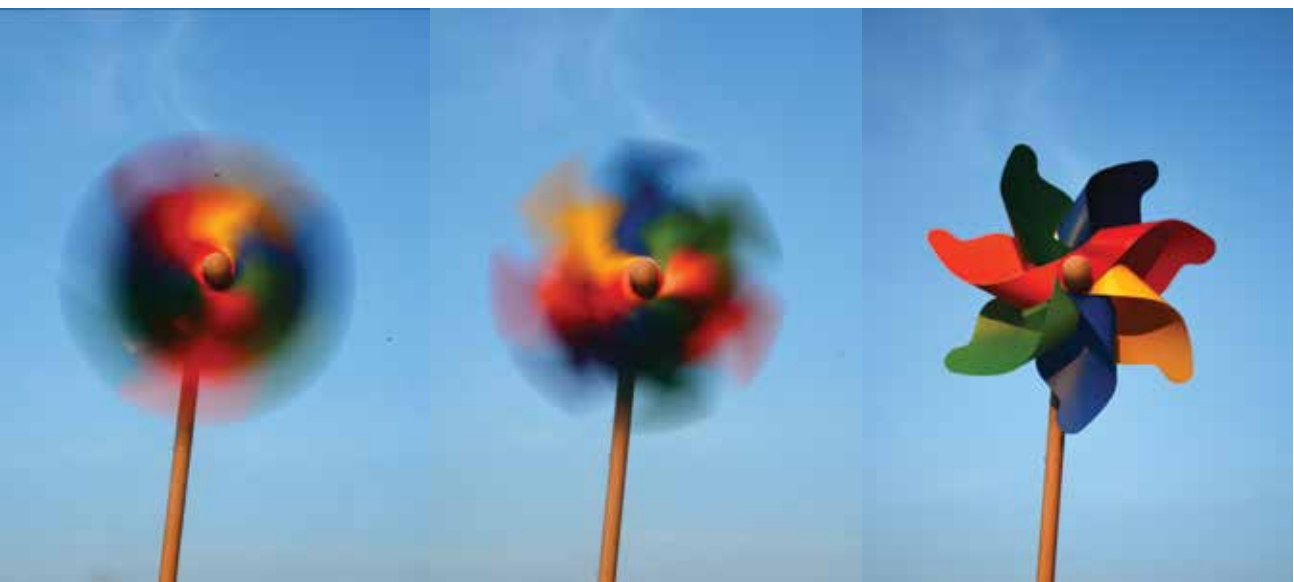
Zakaj kratki sunki svetlobe?

Marsikdo od nas že ima izkušnje s fotografiranjem premikajočih se stvari, pa naj gre za tekajoče otroke, leteče ptice, padajoči slap ali drveči avto. Ključen pri fotografiji premikajočih se predmetov je čas zajemanja slike oziroma čas osvetlitve. Če je čas zajemanja slike dolg, je sprememba lege predmeta v tem času velika in nastala slika je povsem razmazana. Po drugi strani je slika, posneta z zelo kratkim osvetlitvenim časom, kljub premikanju ostra, saj se v času osvetlitve predmet skoraj nič ne premakne. Hitreje kot se giblje predmet, krajši osvetlitveni čas je potreben za ostro sliko. Za fotografiranje hitrih dogodkov pogosto uporabimo stroboskopski način, pri katerem premikajoči se predmet, ki je sicer v temi, osvetlimo s kratkim sunkom svetlobe. Tudi v tem primeru je ostrina slike povezana z dolžino osvetljevanja – krajši kot je sunek svetlobe, hitrejša dogodka lahko razločimo.

Dolgo je veljalo, da so najkrajši možni sunki svetlobe, ki jih lahko ustvarimo, dolgi nekaj femtosekund, to je milijonink milijardinke sekunde. Laserji, ki oddajajo femtosekundne sunke svetlobe, omogočajo spremljanje dinamike atomov v snovi. Za preučevanje premikanja atomov med kemijskimi reakcijami in odkritje nastanka prehodnih stanj je bila že leta 1999 podeljena Nobelova nagrada za kemijo Ahmedu Zewailu, za ustvarjanje močnih femtosekundnih sunkov svetlobe pa sta Nobelovo nagrado za fiziko leta 2018 prejela Donna Strickland in Gérard Mourou, o čemer je poročal tudi *Proteus*.

Ko govorimo o dinamiki atomov, govorimo o premikanju njihovih jeder, saj je prispevek jeder k skupni masi atoma daleč največji. Elektroni so več kot tisočkrat lažji od jeder, njihova dinamika pa je približno tisočkrat hitrejša. Za opazovanje dinamike elektronov zato femtosekundni sunki svetlobe ne zadoščajo, potrebujemo še krajše, atose-

Fotografije vrteče se vetrnice, posnete z različnimi časi osvetlitve. Kadar je čas osvetlitve dolg v primerjavi s časom, ki ga vetrnica potrebuje za en obrat, je slika povsem razmazana (levo). Pri krajšem času osvetlitve razločimo posamezna krila (sredina), ostro sliko pa kljub hitremu vrtenju dobimo pri zelo kratkem času osvetlitve (desno). Časi osvetlitve: 1/25 sekunde, 1/60 sekunde in 1/800 sekunde.



kundne sunke svetlobe. Ena atosekunda je ena tisočinka femtosekunde, torej ena milijardinka milijardinke sekunde. Prvi, ki so uspeli ustvariti tako kratke sunke svetlobe, so letošnji Nobelovi nagrajenci.

Višji harmoniki

Svetloba je elektromagnetno valovanje, ki se širi po prostoru. Njeno barvo določa valovna dolžina valovanja, ki je približno 700 nanometrov (milijardink metra) za rdečo svetlobo in približno 400 nanometrov za vijolično. Valovanje z daljšimi valovnimi dolžinami oziroma nižjimi frekvencami (infrardeče valovanje) človeku ni vidno, prav tako ne vidimo valovanja s krajšimi valovnimi dolžinami in višjimi frekvencami (ultravijolično valovanje). Še krajše valovne dolžine in višje frekvence ima rentgenska svetloba.

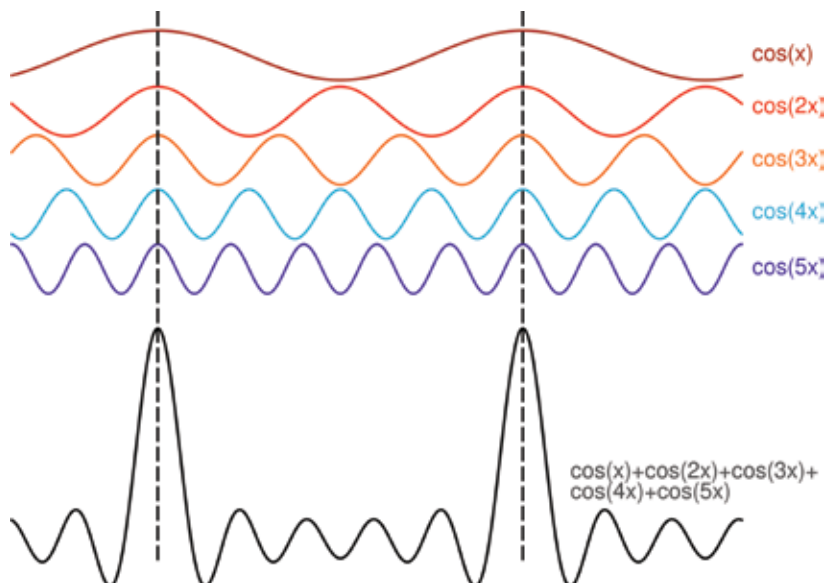
Svetloba je navadno sestavljena iz več valovanj z različnimi frekvencami, ki jih seštejemo v skupno valovanje. Vsota je seveda odvisna od frekvenc posameznih prispevkov, njihove amplitude in tudi faznega zamika med posameznimi delnimi valovanji. Posebej zanimiva so valovanja, katerih frekvence so enake večkratnikom frekvence

nekega osnovnega valovanja. Imenujemo jih višji harmoniki in jih poznamo predvsem iz glasbe, saj so višji harmoniki tisti, ki pri isti zaigrani noti dodajo barvo zvoka. Tako nam omogočijo, da ločimo isto noto, zaigrano na klavirju, flavti ali kitari.

Poglejmo primer, ko valovanje poleg osnovnega valovanja sestavlja več višjih harmonikov, amplitude in faze vseh delnih valovanj pa naj bodo enake (slika spodaj). Vsota osnovnega valovanja in višjih harmonikov ni enakomerno valovanje, temveč se delna valovanja seštevajo v zaporedje močnih kratkih sunkov. Več kot je delnih valovanj v vsoti, krajši in višji so sunki v skupnem valovanju. Če torej nekako uspemo pridobiti veliko število višjih harmonikov, ki imajo približno enako fazo in frekvenco, znamo ustvariti zelo kratke sunke svetlobe.

Prvi korak v tej smeri je leta 1988 naredila Anne L'Huillier s sodelavci, ko je z infrardečim laserjem posvetila na atome žlahtnih plinov (argona, kriptona in ksenona). Odkrila je, da omenjeni plini, osvetljeni z zelo močnim laserskim snopom, oddajajo svetlobo pri večkratnikih frekvence vpadne svetlobe, torej višjih harmonikih. Za razliko od

Valovanja, katerih frekvenca je večkratnik frekvence osnovnega valovanja, imenujemo višji harmoniki. Na vrhu slike je osnovno valovanje, pod njim štirje višji harmoniki z enako amplitudo in fazo, spodaj pa vsota vseh petih delnih valovanj v obliki zaporedja močnih kratkih sunkov.



ostalnih raziskovalcev, ki so visoke frekvence poskušali doseči z visoko osnovno frekvenco, je Anne L'Huillier uporabila infrardeči laser z razmeroma nizko osnovno frekvenco. Z nekajkrat šibkejšim vpadnim snopom je uspela vzbuditi veliko število višjih harmonikov – vse do 33. harmonika. Tako visoki harmonik uvrščamo v ekstremno ultravijolično svetlobo, saj je njegova valovna dolžina le približno 32 nanometrov. Iz simetrijskih razlogov so bili vzbujeni le lihi harmoniki. Proti pričakovanjem je bila jakost izsevanih harmonikov v širokem območju frekvenc skoraj stalna. Ključno vprašanje je bilo, zakaj lahko z infrardečo svetlobo vzbudimo tako veliko število harmonikov s približno enako jakostjo.

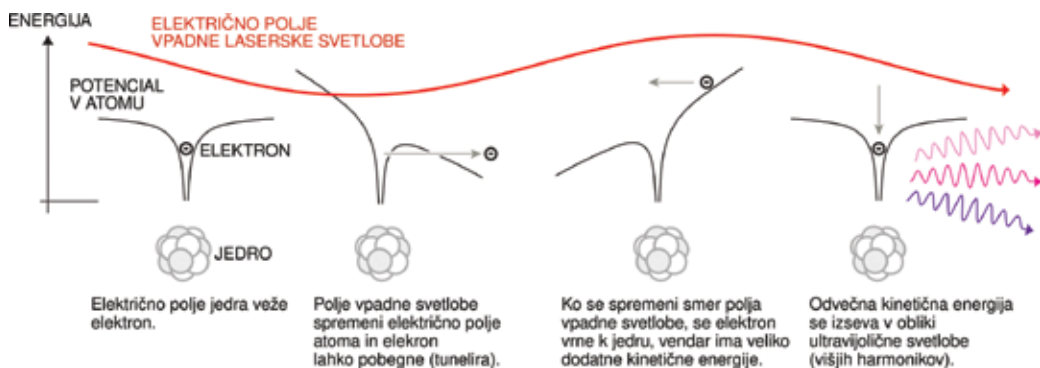
Skoraj pobegli elektroni

Teoretični model, sprva semiklasični in leta 1994 tudi kvantni, je podal razlago opazene pojava. Vemo, da električno polje drži negativno nabite elektrone vezane na pozitivno nabito jedro atomov. Svetloba kot elektromagnetno valovanje ob vpadu na atom to električno polje spremeni. Kadar je vpadna svetloba razmeroma šibka, je motnja majhna. Pri velikih jakostih vpadne svetlobe, ki jih dosežemo z močnimi laserji, pa je jakost električnega polja svetlobe pri-

merljiva z jakostjo električnega polja znotraj atoma. Močno vpadno polje elektron tako pospeši, da elektron zapusti atom. Vendar je električno polje vpadne svetlobe oscilirajoče: pol periode polje elektron potiska stran od jedra in pol periode nazaj k jedru. Elektron, ki znotraj prve pol periode pobegne jedru, se znotraj druge pol periode vrne k istemu jedru. Ob ponovni vezavi mora oddati vso kinetično energijo, ki jo je pridobil od električnega polja vpadne svetlobe. Odvečno energijo izseva v obliki višjih harmonikov vpadne svetlobe (slika spodaj).

Pri tem je pomembno, koliko kinetične energije pridobi elektron med svojim »izletom«. Daljši kot je izlet, več energije lahko elektron pridobi in višje harmonike izseva ob povratku. Tukaj vidimo pomembnost uporabe vpadne infrardeče svetlobe: valovanje z nižjo frekvenco počasneje preklaplja med privlačnim in odbojnim delom periode, zato lahko elektron pobegne dlje in ob povratku pridobi več kinetične energije, ki jo nato izseva v obliki višjih harmonikov. Če so višji harmoniki v fazi, je skupno izsevano valovanje, ki nastane kot vsota velikega števila višjih harmonikov, v obliki zelo kratkih – atosekundnih – sunkov svetlobe.

Shema atoma in električnega potenciala v njem ter vpliv električnega polja močne vpadne svetlobe. Slika prirejena po izvirniku iz obrazložitve Nobelovega odbora za fiziko © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences. https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/fig4_fy_en_23.pdf.



Fotoni in fotoelektroni

Čeprav je bilo znano in tudi s teoretičnim modelom opisano, da atomi zlahtnega plina, na katere posvetimo z zelo močnim infrardečim snopom svetlobe, oddajajo atosekundne sunke svetlobe, je ostalo odprto praktično vprašanje, kako izmeriti njihovo dolžino. Za nadaljnjo obravnavo in razlago moramo stopiti v svet kvantne fizike in spoznati dualni opis svetlobe. V klasični sliki svetlobo obravnavamo kot elektromagnetno valovanje, kar odlično opiše pojave, kakršni so interferenca, uklon, odboj ali lom. Primer pojava, ki ga valovni pristop ne more pravilno pojasniti, je fotoefekt.

Fotoefekt je pojav, pri katerem vpadna svetloba iz snovi, navadno iz kovine, izbi-je elektrone. Ključni parameter, ki določa, ali svetloba izbi-je elektrone ali ne, je njena valovna dolžina. Zgolj valovanja z dovolj kratko valovno dolžino in ustrezno visoko frekvenco lahko izbi-jejo elektrone iz snovi. Če je valovna dolžina predolga, elektronov ne izbi-je še tako močna vpadna svetloba. Skrivnost izbitih elektronov, ki jih imenujemo tudi fotoelektroni, je torej v valovni dolžini in ne, kot bi mogoče pričakovali, v moči vpadne svetlobe.

Razlago pojava je leta 1905 predlagal Albert Einstein in bil zato leta 1921 nagrajen z Nobelovo nagrado. Zanimivo, da za teorijo relativnosti, po kateri je danes najbolj znan, Nobelove nagrade ni nikoli prejel. Einstein je fotoefekt pojasnil s preprostim, a revolucionarnim dualnim modelom: svetloba je elektromagnetno valovanje, hkrati pa jo lahko opišemo kot sestavljeno iz diskretnih paketkov energije – fotonov. Pri tem je energija posameznega fotona sorazmerna s frekvenco pripadajočega elektromagnetnega valovanja. Fotoni, ki ustrezajo rdeči svetlobi, tako nosijo manj energije kot fotoni vijolične svetlobe. Še več energije nosijo fotoni ultravijoličnega ali rentgenskega valovanja. Le kadar je energija posameznega fotona vpadne svetlobe dovolj velika in večja od vezavne energije elektrona v snovi, lahko foton

elektron izbi-je iz snovi. Če je energija fotona premajhna, elektrona ne izbi-je, če pa je energija fotona večja od vezavne energije, se ostala energija spremeni v kinetično energijo izbitega elektrona. Podoben pojav opazimo tudi pri elektronih, ki so izbiti iz posameznih atomov v plinu, vendar takrat navadno govorimo o fotoionizaciji.

Atosekundni sunki svetlobe

Prav na fotoionizaciji temeljijo meritve dolžine atosekundnih sunkov svetlobe. Prve take meritve je opravil Pierre Agostini s sodelavci leta 2001, pri čemer je uporabil metodo, ki jo danes imenujemo RABBIT (reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions – rekonstrukcija atosekundnega utripanja z interferenco dvofotonskih prehodov). Za osnovno svetlobo je izbral infrardečo svetlobo, ki je iz laserja izhajala v obliki 40 femtosekund dolgih sunkov, in z njo posvetil na argon. Izhodna svetloba je vključevala veliko število višjih harmonikov, ki so se združili v zaporedje atosekundnih sunkov svetlobe. Nastalo zaporedje sunkov je ponovno usmeril na argon, hkrati pa je na isto mesto posvetil tudi z osnovnim infrardečim laserjem. Z dodatnimi zrcali je lahko spreminjal časovno zakasnitev infrardeče svetlobe.

Princip meritve je sledeč: ko na atome argona vpada močna svetloba ustrezne valovne dolžine, iz atomov izbi-je fotoelektrone. Pri tem je energija fotonov osnovne infrardeče svetlobe prenizka, da bi izbijala elektrone, energije fotonov visokih harmonikov pa zadostajo za fotoionizacijo. Energijo izbitih elektronov lahko natančno merimo in iz nje določimo energijo fotonov, ki so elektrone izbili. Po pričakovanju energije fotoelektronov zavzemajo diskretne vrednosti – vsaka vrednost ustreza fotonom enega vpadnega harmonika. Kadar je zakasnitev med osnovno infrardečo svetlobo in atosekundnim sunkom tako majhna, da na atom hkrati vpadajo tako fotoni infrardečega valovanja kot tudi fotoni visokih harmonikov, pa

lahko dva fotona »združita moči« in skupaj ionizirata atom. Na detektorju tako poleg elektronov, ki so jih izbili posamezni visoki harmoniki, zaradi teh dvofotonskih pojavov opazimo tudi elektrone z vmesnimi vrednostmi energij. Njihova energija je enaka vsoti ali razliki energij fotona visokega harmonika in osnovne infrardeče svetlobe.

Na ta način je Agostini s soavtorji pokazal, da so višji harmoniki večinoma v fazi in iz podatkov o fazi določil obliko sunkov svetlobe. Sunki, ki jih je izmeril, so bili dolgi 250 atosekund, razmik med dvema zaporednima sunkoma pa je znašal približno petkrat toliko, 1,35 femtosekunde. Čeprav so bili sunki izredno kratki in jasno ločeni med seboj, je bilo njihovo ponavljanje prehitro in čas med njimi prekratek, da bi lahko opazovali dinamiko elektronov.

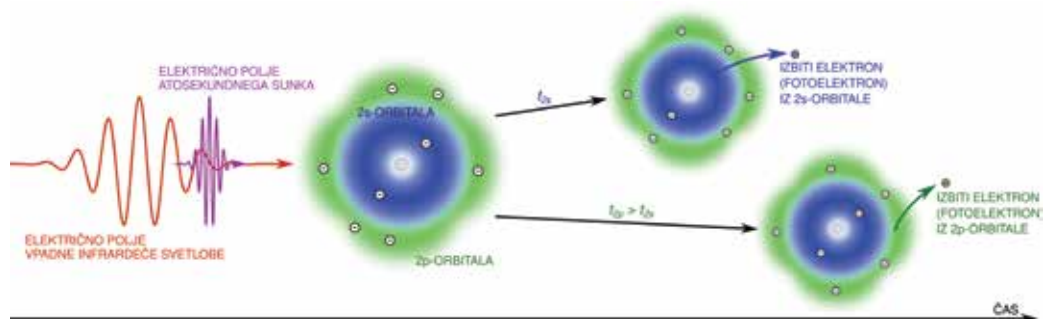
Prvi, ki je uspel ustvariti posamezni atosekundni sunek svetlobe, je bil Ferenc Krausz. Za razliko od Agostinija je višje harmonike, ki so nastali ob osvetljevanju kriptona s femtosekundnimi sunki infrardeče svetlobe, dodatno filtriral in obdržal le tistega z najvišjo energijo. Namesto gostega zaporedja sunkov je tako na vsak vpadni sunek infrardeče svetlobe dobil en sam atosekundni sunek v ekstremni ultravijolični oziroma že mehki rentgenski svetlobi. S spreminjanjem faznega zamika med osnovnim infrardečim sunkom in višjim harmonikom je z opazo-

vanjem energije izbitih fotoelektronov določil dolžino teh posameznih sunkov: 650 +/- 150 atosekund.

Meritve dinamike elektronov

Z natančno analizo in karakterizacijo nastalih atosekundnih sunkov je bila omogočena njihova uporaba za raziskovalne namene. Krausz s sodelavci je kot prvi uporabil atosekundne sunke in opazoval časovni potek procesa fotoionizacije – izbitja elektrona iz prostega atoma. Proces fotoionizacije in fotoefekta sta bila do tedaj vedno obravnavana kot neskončno hitra. Izdelava atosekundnih sunkov je omogočila spremljanje fotoionizacije tudi na časovni lestvici (slika spodaj). Krausz je uporabil atosekundne sunke svetlobe za merjenje časovnih zamikov med elektroni, izbitimi iz različnih orbital atomov neona. Izmeril je, da je časovni zamik med elektroni, izbitimi iz 2s-orbitale, in tistimi, ki so izbiti iz 2p-orbitale, 21 atosekund, pri čemer je 2p-elektron počasnejši. Vendar se izmerjene vrednosti niso povsem ujemale s teoretičnimi napovedmi, ki so napovedovale približno dvakrat krajši čas. Preučevanja časovnega zamika med fotoelektroni se je zato lotila tudi Anne L'Huillier. Z večjo ločljivostjo detekcije je opazovala prehode v neonu in namesto dveh zaznala tri različne procese: izbitje 2s-elektronov, izbitje 2p-elektronov in prehod iz

Atosekundni sunki omogočajo spremljanje časovnega procesa fotoionizacije, to je izbitja elektrona iz atoma. Meritve kažejo, da je izbitje elektrona iz 2p-orbitale za 21 atosekund počasnejše od izbitja elektrona iz 2s-orbitale.



2p- v 3p-orbitalo. Z upoštevanjem tretjega procesa je pravilno določila časovne zamike med izbitjema elektronov iz različnih orbital in dosegla ujemanje s teoretično napovedjo. Drugi primer uporabe atosekundnih sunkov je preučevanje dinamike nastanka vezi med atomi v molekulah. Molekule so sestavljene iz atomov, vez pa tvorijo elektroni, ki si jih atomi delijo. Če je do nedavnega veljalo, da je nastanek kemijske vezi takojšnji proces, je opazovanje z atosekundnimi sunki svetlobe pokazalo, da izmenjava elektronov, ki vodi do nastanka molekule, ni neskončno hitra. Začetne meritve so bile opravljene na preprostih molekulah, kot so N_2 , O_2 in CO_2 , raziskave pa se nadaljujejo na vedno bolj zapletenih molekulah, na primer aminokisljinah.

Metoda, ki omogoča spremljanje dogajanja znotraj atomov med tvorbo molekule, je zelo podobna načinu pridobivanja atosekundnih sunkov svetlobe v žlahtnih plinih. Najprej z zelo močno lasersko svetlobo iz atoma ali molekule izbijemo elektron. V času, ko se elektron oddaljuje od atoma ali molekule, se drugi elektroni začnejo preurejati ali molekula preoblikovati, lahko se celo prekrine vez med atomi (disociacija). Ko oscilirajoče električno polje vpadne svetlobe potisne prosti elektron nazaj proti atomu, je lahko njegovo mesto že zasedeno ali molekula spremenjena na način, ki ne omogoča več vezave dodatnega elektrona. Take dogodke lahko zaznamo in iz meritev določimo vrsto in hitrost spremembe v molekuli.

Višji harmoniki za spektroskopijo

Odkritje metode za ustvarjanje visokih harmonikov ni prineslo le vpogleda v najhitrejša elektronske procese na atosekundni lestvici, temveč odpira številne nove možnosti tudi na počasnejši, femtosekundni lestvici. Že skoraj tri desetletja sodijo femtosekundni laserji v standardno opremo optičnih laboratorijev. So komercialno dostopni, robustni in enostavni za uporabo. Nekateri sodobni femtosekundni laserji so že tako majhni,

da jih lahko spravimo v šolsko peresnico. Njihova pomembnost se kaže v zelo široki uporabnosti v raziskavah, saj omogočajo razmeroma preprosto spremljanje procesov, ki so prehitri za katero koli kamero ali elektronski detektor. Z njimi lahko tako opazujemo gibanje elektronov v snovi in preučujemo njihove lastnosti. V realnem času je na primer mogoče spremljati prehode med cis in trans konfiguracijo molekul beljakovin ali preučevati premikanje elektronov v preprostejših snoveh, kakršne so kovine in nekateri polprevodniki, in razumeti, zakaj nastopijo edinstveni pojavi, kakršna je superprevodnost. Z uporabo femtosekundne spektroskopije že več desetletij preučujemo trdne snovi tudi v Sloveniji, na Institutu »Jožef Stefan« v skupini prof. dr. Dragana Mihailovića. Posebej odmevno je bilo odkritje skritih topoloških kvantnih stanj v elektronskem kristalu TaS_2 v neravnovesnih razmerah, ki vodi do rekordno hitrih spominskih elementov.

Vendar imajo femtosekundni laserji ključno pomanjkljivost: vsi delujejo v infrardečem delu spektra. Vse eksperimentalne tehnike, ki uporabljajo femtosekundne laserje, zato temeljijo na merjenju absorpcije, prepustnosti ali odbojnosti snovi v precej ozkem spektralnem območju infrardeče svetlobe. To je podobno, kot bi skušali preučiti strukturo neke kompleksne snovi zgolj z opazovanjem njene barve – precej zapletena ali celo nemogoča naloga! Raziskovalci so dolgo iskali selektivnejšo metodo, s katero bi lahko ločeno vzbujali in preučevali različne dele snovi ter na podlagi odziva pridobili informacijo o strukturi snovi in o procesih, ki potekajo znotraj nje.

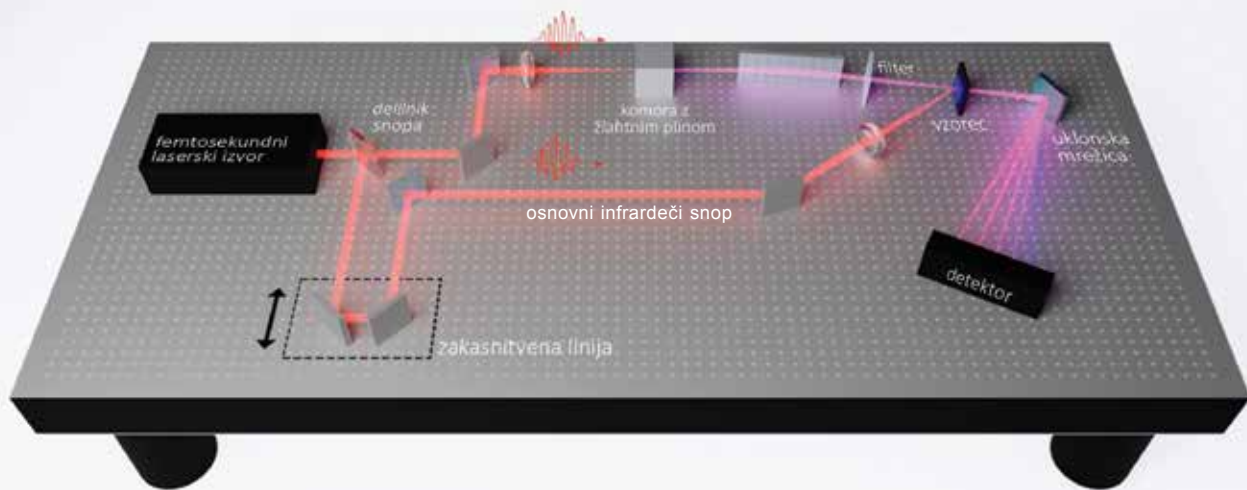
Rešitev je prineslo odkritje Anne L'Huillier, da ob vpadu infrardeče svetlobe na žlahtni plin nastanejo višji harmoniki. Z uporabo razmeroma kompaktnega femtosekundnega laserja tako dosežemo različna izhodna valovanja z dovolj visoko frekvenco oziroma izhodne fotone z dovolj visoko energijo za selektivne ali resonančne raziskave. Zaradi

potrebe po zelo močnem femtosekundnem laserskem viru svetlobe za vzbujanje žlahtnega plina je ta metoda postala splošno uveljavljena šele v zadnjih dveh desetletjih, odkar so postali femtosekundni laserji dostopnejši.

Za razliko od ustvarjanja atosekundnih sunkov, ki jih dosežemo s superpozicijo višjih harmonikov, za resonančno femtosekundno spektroskopijo višje harmonike med seboj ločimo s spektrometrom ali uklonsko mrežico. Podobno kot se vidna bela svetloba na uklonski mrežici razkloni v mavrico, se posamezni višji harmoniki razklonijo in ustvarijo rentgensko ali ultravijolično »mavrico«. Valovanja z različnimi valovnimi dolžinami tako ne interferirajo več med seboj in iz širokega spektra valovnih dolžin lahko izberemo tisto valovanje, ki selektivno vzbuja le določene elektrone v snovi.

Opisana resonančna metoda je uporabna

za razvoj številnih novih magnetnih snovi. Na Institutu »Jožef Stefan« tako preučujemo zlitino kobalta in platine, ki jo uporabljamo v nekaterih spominskih trdih diskih. Zanimivo je, da je čista platina nemagnetna, čisti kobalt pa je tudi neprimeren za sodobni magnetni spomin, saj bi moral biti posamezen spominski element (bit) bistveno večji od obstoječih. Presenetljivo ima njuna zlitina edinstvene lastnosti, s katerimi lahko znatno povečamo gostoto podatkov pri shranjevanju na magnetnem disku. Z resonančno femtosekundno spektroskopijo ločeno vzbujamo elektrone v bližini kobalta in elektrone v bližini platine ter tako raziskujemo, zakaj in kako vsaka od komponent prispeva k magnetnim lastnostim zlitine. Raziskovalci iščemo izvor magnetnih lastnosti, mikroskopsko razlago pojava in morebitne spremembe snovi, ki bi njeno uporabnost še povečale.



Shema postavitve resonančne femtosekundne spektroskopije. Snop, ki izhaja iz femtosekundnega laserskega izvora, razdelimo v dva dela. Prvi del snopa z ogledali vodimo in zberemo v komori z žlahtnim plinom, kjer nastajajo višji harmoniki. Harmonike na poti proti vzorcu dodatno filtriramo. Drugi del infrardečega laserskega snopa potuje skozi optično zakasnitveno linijo in ga zberemo na istem mestu vzorca. Z merjenjem spektra prepuščene svetlobe lahko prepoznamo procese, ki se dogajajo v vzorcu.

In kako naprej?

Ustvarjanje atosekundnih sunkov in merjenje njihove dolžine sta bili prvi korak na področju atosekundne fizike, kmalu so mu sledili prvi primeri uporabe. Vendar je atosekundna fizika šele v povojih. Čeprav ne vemo, kam nas bo pot pripeljala, je že zdaj jasno, da bodo metode, ki so jih odkrili letošnji Nobelovi nagrajenci, pripomogle k boljšemu razumevanju sveta na subnanometrski lestvici. Ko bomo enkrat razumeli procese na časovni lestvici dinamike elektronov, bomo lahko naredili naslednji korak, to je uporabili pridobljeno znanje, na primer v elektroniki za manipulacijo in nadzorovanje gibanja elektronov v snovi ter ultrahitrega preklapljanja med lastnostmi snovi ali v medicinski diagnostiki za prepoznavanje različnih molekul.

Literatura:

Ferray, M., L'Huillier, A., Li, X. F., Lompré, L. A., Mainfray, G., Manus, C., 1988: *Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases. The Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 21: L31-L35.

Hentschel M., Kienberger, R., Spielmann, Cb., Reider, G. A., Milosevic, N., Brabec, T., Corkum, P., Heinzmann, U., Drescher, M., Krausz, F., 2001: *Attosecond metrology. Nature*, 414: 509-513.

Lewenstein, M., Balcou, Ph., Ivanov, M. Yu., L'Huillier, A., Corkum, P. B., 1994: *Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields. Physical Review A*, 49: 2117-2132.

Paul, P. M., Toma, E. S., Breger, P., Mullot, G., Augé, F., Balcou, Ph., Müller, H. G., Agostini, P., 2001: *Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation. Science*, 292: 1689-1692.

Stojchevska, L., Vaskivskiy, I., Mertelj, T., Kušar, P., Svetin, D., Brazovskii, S., Mibailović, D., 2014: *Ultrafast switching to a stable hidden quantum state in an electronic crystal. Science*, 344: 177-180.

Press release: *The Nobel Prize in Physics 2023*: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/press-release/>.



Mojca Vilfan je raziskovalka na Institutu »Jožef Stefan« in docentka na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z eksperimentalno fiziko mehke snovi s poudarkom na tekočokristalnih, mikrofluidičnih, aktivnih in biomimetičnih koloidnih sistemih. V zadnjem času preučuje obnašanje feromagnetnih nematkov. Je soavtorica dveh obširnih knjig *Optika in Fotonika* ter dveh osnovnošolskih učbenikov.



Igor Vaskivskiy je raziskovalec na Institutu »Jožef Stefan« in Centru odličnosti Nanocenter. Ukvarja se z eksperimentalno fiziko trdne snovi, pri čemer se osredotoča na raziskave fotoinduciranih faznih prehodov v elektronsko in spinsko urejenih sistemih. Razvija nove metode za resonančno časovno ločljivo spektroskopijo. Trenutno največjo pozornost namenja preučevanju metastabilnih skritih stanj v snoveh z valovi gostote naboja in nadzorovanju ultrahitre dinamike v kompozitnih feromagnetih.