

Neskončno majhno postaja vidno

Nobelovci Pierre Agostini, Ferenc Krausz in Anne L'Huillier so s svojimi eksperimenti omogočili povsem nove dimenzije raziskovanja najmanjših doslej znanih svetov – Drobec časa, znotraj katerega še lahko opazujemo naravo, so skrajšali še za tisočkrat glede na dosedanja opazovanja

Tekst: **Brane Maselj**

Kdaj in za koliko se lahko droben elektron premakne znotraj komaj kaj večje molekule? Na to vprašanje fizika še nima jasnega odgovora, a tudi po zaslugi treh letošnjih Nobelovih nagajencev za fiziko bo kmalu vse bolj jasno. Nobelovci Pierre Agostini, Ferenc Krausz in Anne L'Huillier so s svojimi eksperimenti omogočili povsem nove dimenzije raziskovanja najmanjših doslej znanih svetov s tem, da so drobec časa, znotraj katerega še lahko opazujemo naravo, skrajšali še za tisočkrat glede na dosedanja opazovanja. Raziskave s podobno metodologijo pa že več let potekajo tudi na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani (IJS).

Eksperimenti letošnjih nobelovcev so odprli pot ustvarjanju izjemno kratkih sunkov laserske svetlobe, s katerimi bo mogoče meriti procese znotraj atomov in molekul. S tem so, če malo pretiravamo, prestavili mejnik v raziskovanju majhnosti skoraj na področje metafizike. Pri švedski kraljevi akademiji znanosti so v obrazložitvi pojasnili, da so nagajenci – francoski znanstvenik Pierre Agostini, madžarsko-avstrijski znanstvenik Ferenc Krausz in francosko-švedska znanstvenica Anne L'Huillier – nagrado prejeli za »eksperimentalne metode, ki ustvarjajo atosekundne svetlobne pulze za proučevanje dinamike elektronov v snovi«.

Ob tej objavi so pri akademiji uporabili malce spektakularno prispodobo atosekunde kot tako ekstremno kratkega časa, da jih lahko v eno samo sekundo spravimo toliko, kolikor je bilo vseh sekund od nastanka vesolja pa do danes, to pa je, če bi zapisali po matematično,

10 na 18. potenco. Zato se ena enota atosekunde matematično zapiše kot decimalno število 0,000 000 000 000 000 001 sekunde oziroma 10 na minus 18. potenco sekunde, kar je dejansko tako nepredstavljivo kratek čas, kot je dolg čas od nastanka vesolja pa do danes.

Nagajenci so torej odprli pot tehnologiji, ki bo omogočila opazovanje ali merjenje resnično zelo, zelo kratkotrajnih dogodkov, ki se dogajajo celo samo v desetinkah atosekunde. Uspelo jim je demonstrirati način ustvarjanja izjemno kratkih svetlobnih pulzov, primernih za merjenje procesov, ki so tako hitri, da jih je bilo v preteklosti nemogoče spremljati, kot je denimo gibanje elektronov znotraj molekul ali celo atomov.

Trojici znanstvenikov odkritje seveda ni uspelo čez noč. Tlakovano je bilo z večdesetletnimi raziskavami mikrokozmosa. Že leta 1987 je **Anne L'Huillier** odkrila, da je nastalo veliko različnih odtenkov svetlobe, ko je prenašala infrardečo lasersko svetlobo skozi žlahtni plin. Vsak odtenek je predstavljal en svetlobni val z danim številom ciklov, ki jih je povzročila laserska svetloba. Ta deluje na atome v plinu, tako da nekaterim elektronom daje dodatno energijo, ki se nato odda kot svetloba. Anne L'Huillier je nadaljevala raziskovanje tega pojava in postavila temelje za poznejša odkritja.

Leta 2001 je **Pierru Agostiniju** uspelo izdelati in raziskati serijo zaporednih svetlobnih impulzov, pri čemer je vsak impulz trajal le 250 atosekund. Istočasno je **Ferenc Krausz** opravljal drugo vrsto poskusov, s katerimi je bilo mogoče izolirati en sam svetlobni impulz, ki je trajal 650 atosekund. Eksperimenti nagajencev so tako



omogočili raziskovanje procesov, ki so tako hitri, da jim prej ni bilo mogoče slediti.

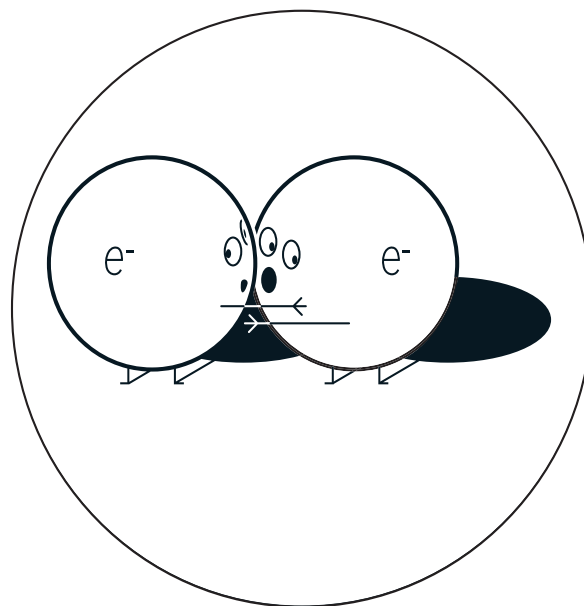
»Zdaj lahko odpremo vrata v svet elektronov. Atosekundna fizika nam daje priložnost razumeti mehanizme, ki jih vodijo elektroni, negativno nabiti subatomske delci, ki jih najdemo v vsakem atomu. Naslednji korak bo njihova uporaba,« pravi **Eva Olsson**, predsednica Nobelovega odbora za fiziko. Možna je uporaba na številnih različnih področjih. V elektroniki je na primer pomembno razumeti in nadzorovati, kako se elektroni obnašajo v materialu. Atosekundne impulze je mogoče uporabiti tudi za identifikacijo različnih molekul, na primer v medicinski diagnostiki.

Pred tem mejnikom je bila prav izjemna hitrost elektronov velik izziv za preučevanje in skoraj nemogoče je bilo identificirati obnašanje subatomske delcev v enem samem trenutku. »Ta novi način merjenja vidim kot zadnje poglavje v dolgi in izjemni sagi o človeških bitjih, ki poskušajo razviti načine časovnega razporejanja dogodkov na vse krajše in krajše časovne lestvice,« je dejal **Peter Armitage**, profesor fizike in astronomije na univerzi Johns Hopkins, ki sicer ni bil vključen v raziskavo. »To je tista časovna lestvica, na kateri želite opazovati pojave, da bi razumeli, kako atomi tvorijo molekule, kako se elektroni vrtijo okoli atomov in kakšni fizikalni procesi se dogajajo v katerikoli kemični reakciji,« je dodal.

Razkosavanje časa z laserskimi sunki

Pojem atosekunde sam po sebi sicer ni nov, fiziki in matematiki že dolgo uporabljajo za ekstremno majhne količine oznake, kot so mikro, nano, piko, femto in ato. Prav tako ni novo raziskovanje elektronov z laserskimi sunki. Gre za metode »slikanja« dinamike elektronov v realnem času. Pri nas je temu še najbližja skupina prof. dr. **Dragana Mihailovića**, vodje Odseka za kompleksne snovi na IJS, ki za tovrstno slikanje uporablja metode femtosekundne spektroskopije.

Čeprav se sliči zelo zapleteno, je potekal razvoj tovrstne metodologije nekako linearno, pripoveduje raziskovalec dr. **Igor Vaskivskyi** z Odseka za kompleksne snovi na IJS: »Nekoč so imeli fotoaparate in



Z opazovanjem gibanja elektronov med atomi ali celo znotraj enega atoma, kar se dogaja v času, ki ga merimo v atosekundah, lahko dobimo vpogled v to, kako takšna eksotična stanja nastanejo, in s tem znanjem bi lahko nekoč v prihodnosti dizajnirali nove materiale z natančno določenimi lastnostmi.

so z njimi merili, kaj se dogaja v petstotinki ali tisočinki sekunde z neko snovjo ali materialom, ki je spremenil neko svojo lastnost, kot denimo barvo. Znanstvenike zanima, v kolikšnem času je do te spremembe prišlo, ker težko ocenimo, kaj se je zgodilo prej in kaj kasneje, da lahko odgovorijo tudi na vprašanje zakaj. Številni pojavi iz narave še vedno niso ustrezno pojasnjeni; še vedno denimo ne vemo točno, kako iz vode nastane led, in če želimo poznati naravo teh sprememb, jih moramo beležiti v časovnem zaporedju. Veliko lažje je slediti temu procesu s sliko, še lažje s filmom in specialne kamere lahko dandanes posnamejo že do 10.000 kadrov na sekundo, a tudi to je še vedno premalo.«

Vir: © Švedska kraljeva akademija znanosti, ilustracija Niklas Elmehed

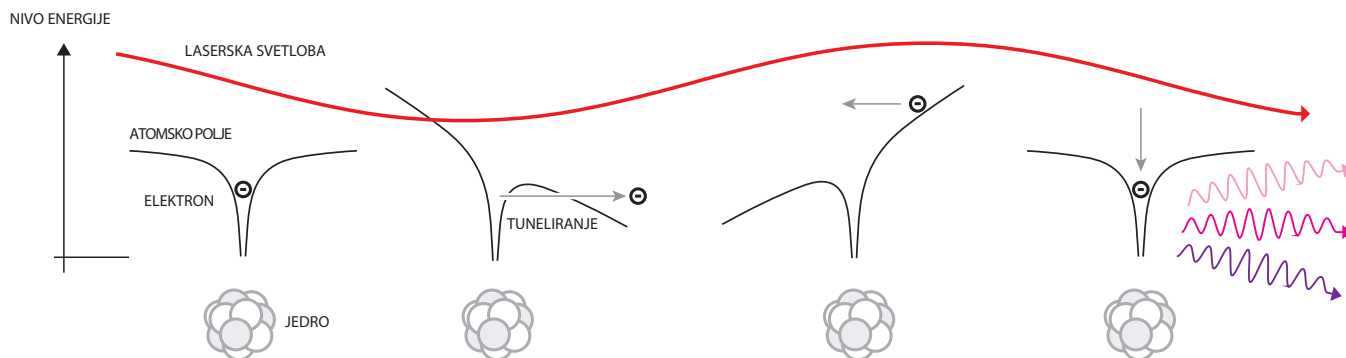


Francoski znanstvenik Pierre Agostini, madžarsko-avstrijski znanstvenik Ferenc Krausz in francosko-švedska znanstvenica Anne L'Huillier so nagrado prejeli za »eksperimentalne metode, ki ustvarjajo atosekundne svetlobne pulze za proučevanje dinamike elektronov v snovi«.

Eksperimenti letošnjih nobelovcev so odprli pot ustvarjanju izjemno kratkih sunkov laserske svetlobe, s katerimi bo mogoče meriti procese znotraj atomov in molekul.

Laserska svetloba interaktira z atomi v plinu

Mehanizem, ki ustvari odtenke v laserju, so odkrili z eksperimenti. Kako deluje?



- 1 Elektron, ki je vezan na atomsko jedro, običajno ne more zapustiti svojega atoma, ker nima dovolj energije, da se dvigne iz vdolbine, ki jo ustvari atomovo električno polje.
- 2 Atomsko polje se ukrivi, ko nanj vpliva laserski pulz. Ko elektron veže le še ozka pregrada, kvantna mehanika to omogoča, lahko izskoči iz vdolbine.
- 3 Prosti elektron je še vedno pod vplivom laserskega polja in pridobi nekaj dodatne energije. Ko se polje obrne in spremeni smer, potegne elektron nazaj v smer, iz katere je prišel.
- 4 Za ponovno pritrditev na atomsko jedro se mora elektron znebiti dodatne energije, ki jo je pridobil med svojim potovanjem. Ta se odda kot ultravijolični blisk, kot valovna dolžina, ki je povezana z laserskim poljem, in se razlikuje glede na to, kako daleč se je premaknil elektron.

»Od tod naprej si pomagamo z elektroniko, ki meri upore električnega toka, in gledamo, kako se ti spreminjajo s časom, natančneje, v delčku sekunde, imenovanem pikosekunda, kar je tisočmilijardinka sekunde oziroma v matematičnem jeziku 10 na minus 12. potenco sekunde. A tudi ta čas je še predolg – predstavljajte si samo, koliko metrov ali centimetrov lahko v tem času prepotuje svetloba, če je njena konstantna hitrost 300 000 kilometrov na sekundo. In v tem času lahko vpliva na milijon stvari. In če preučuješ, kako nastane magnet ali superprevodnik, potrebuješ še veliko krajše čase, tisočkrat krajše, kakršna je femtosekunda, ki je 0,000 000 000 000 001 sekunde oziroma 10 na minus 15. potenco sekunde.«

Dobesedna privlačnost elektrona

To je resda tisočkrat daljši čas kot atosekunda, a tudi tisočkrat krajši kot pikosekunda in milijonkrat krajši kot bolj znana nanosekunda. Pri tako majhnih izsekih dogajanja v sekundi pa znanstveniki že lahko ugotavljajo, kako se spreminja kristalna mrežica v materialih, po navadi pod vplivom fotonov ali električnega polja, ko skozi superprevodnik spustijo električni tok, pravi fizik Igor Vaskivskyi, a doda: »Ker pa je tako rekoč vse v naravi povezano z gibanjem elektronov oziroma s tem, kako se gibljejo znotraj materialov in kako se povezujejo v neki spojini v drugo kristalno mrežo, je tudi femtosekunda še veliko prevelik časovni okvir za tovrstna opazovanja. Zdaj smo z možnostjo merjenja v atosekundah dobili možnost, da podrobno raziskujemo te zadeve na subatomski ali submolekularni ravni.«

Elektron, ki ga bo nov način merjenja gotovo postavil v ospredje zanimanja fizike delcev, je ob preučevanju tako imenovanih katodnih žarkov leta 1897 odkril Joseph Thompson z univerze v Cambridgeu. Bolj natančno pa je določil naboj elektrona Robert Millikan s kolumbijske univerze leta 1909. Od takrat naprej veljajo elektroni za najbolj elementarne izmed osnovnih delcev. V temeljni fiziki se pojavljajo kot osnovni delci z maso, električnim nabojem in lastno vrtilno količino ali spinom. Na podlagi tega skromnega opisa stroga pravila kvantne mehanike in relativnosti ustvarijo čudovit gradnik, ki prevladuje v kemiji in – seveda – v elektroniki. A še pred kratkim se je zdela zamisel, da bi elektroni, če jih vbrizgamo v pravo vrsto materiala, vdrli v druge predmete, nezaslišana. Večini pravilno mislečih fizikov se je zdela tako nemogoča, kot se je zamisel, da se Zemlja vrti okrog Sonca, zdela treznim naravoslovnim filozofom Kopernikovega časa. Vendar se Zemlja vrti – in elektroni vdirajo in se spreminjajo v kvazielektrone.

Hallov učinek

Ta šokantna možnost se je pojavila že v času, ko je Anne L'Huillier odkrila, kaj se zgodi, ko z laserjem pomeri na žlahtni plin. V osemdesetih letih prejšnjega stoletja so znanstveniki odkrili nove, precej eksotične pojave, kot je tudi delni kvantni Hallov učinek. Ta učinek, imenovan po fiziku iz 19. stoletja Edwinu Hallu, se pojavi, ko so izjemno čiste, tanke plasti pravih polprevodnikov, vdelenih v prave izolatorje, izpostavljene izjemno visokim magnetnim poljem pri

izjemno nizkih temperaturah. Prvotni Hallov učinek se nanaša na pojav stranskega električnega toka, ki nastane kot odziv na uporabljen napetost v tovrstni nastavitvi. Ta tok zagotavlja priročen način za prevajanje med električnimi in magnetnimi učinki in je v središču delovanja številnih uporabnih naprav, vključno z merilniki hitrosti in protiblokirnimi zavorami. Pri delnem kvantnem Hallovem učinku so tokovi nenavadno majhni in nenavadno stabilni. To pa kaže, da imajo delci, ki povzročajo presenetljivo urejen tok, vsak zase zelo malo naboja. V najpreprostejšem primeru je navidezni naboj ena tretjina elektrona, kar je videti, kot da so se elektroni, vbrizgani v plast materiala, navidezno razdrobili na tri enake dele.

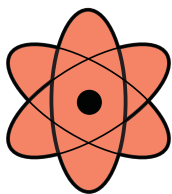
Atosekundna fizika, quo vadis

Še do nedavne je bila drobitev elektronov le domena znanstvene radovednosti. Ker je uspešno izpodbijala tradicionalno modrost, so poklicni fiziki temu začeli namenjati veliko pozornosti. Praktična uporabnost tega pojava pa je še zelo oddaljena, saj je bil njegov učinek viden le pri zelo zapletenih poskusih. Vendar je v zadnjem času zanimanje za frakcionirane elektrone »eksploziralo«, ker se je izkazalo, da imajo nekakšen kolektivni spomin. Povedano bolj konkretno: ko jih premaknejo drugega okoli drugega, njihovo nadalj-

infrardečega laserskega žarka tako imenovane višje harmonike: to se zgodi, ko s takšnim žarkom posvetijo na žlahtni plin in v procesu izbijanja elektronov nastanejo skoraj rentgenski žarki, ki vsebujejo več atosekundnih sunkov. Nobelovca Agostini in Krausz sta s podobnim procesom ustvarila zelo visoke harmonike in pokazala, kako izmeriti atosekundne sunke. To je gotovo velik dosežek, saj je v fiziki vedno problem z merjenjem izjemno hitrega dogajanja ali premikanja. Ustvarila sta metodo, kako to narediti in kako s tem žarkom delati naprej.«

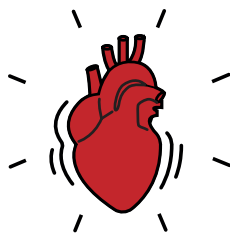
Mogoče pospešiti delovanje naših računalnikov

Kakšne uporabne vrednosti bo mogoče zasnovati na podlagi opazovanja na elektronski ravni v atosekundi, je za zdaj še težko reči. Dragan Mihailović je s sodelavci s pomočjo femtosekundnih laserjev že leta 2014 odkril skrito topološko kvantno stanje v elektronskem kristalu in rekordno hiter spominski element, hitrejši od vseh trenutnih, ki ga zdaj razvijajo naprej. Zagotovo bo s tem in drugimi odkritji mogoče še krepko pospešiti delovanje naših računalnikov in povečati njihovo moč. Predvsem bodo pri atosekundnih meritvah preučevali druge pojave kot pri femtosekundnih, ker te že poznajo, dodaja fizik.



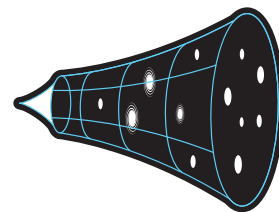
ATOSEKUNDA

1/1,000,000,000,000,000 sekunde



SRČNI UTRIP

1 sekunda



STAROST VESOLJA

1,000,000,000,000,000,000 sekund

nje vedenje zanesljivo odraža, kako so z njimi ravnali. Zaradi tega »spomina« so delni elektroni – znani kot anyoni – obetavne sestavine za gradnjo in shranjevanje kvantnih informacij in na koncu za izdelavo kvantnih računalnikov, piše *Wall Street Journal*.

Ta veja fizike se je sicer že doslej ukvarjala z vprašanjem, koliko časa je potrebno, da zbudimo elektron znotraj molekule, in atosekunda, ki so jo definirali že pred dvema desetletjema, se zdi pravi časovni okvir za njegovo reševanje. Odpirajo se nove možnosti za preučevanje, a s tem ne bo tako preprosto začeti. Laserji na IJS oddajajo femtosekundne žarke, ki so tanjši od lasu, a kar za milijardkrat močnejši od žarka navadne žarnice, zato je delo s to tehnologijo zahtevno, saj je takšen žarek, s katerim bi lahko rezali kovino, lahko človeku zelo nevaren. Raziskovalci morajo uporabljati zaščitno opremo in varnostne protokole.

Igor Vaskivskiy: »Zelo nevarno očem je tudi sipanje žarka, do katerega pride, če mu pot prekriza droban delec prahu. Žarek vodijo čez različna zrcala v posebnih neprodušno zaprtih komorah in ga s posebnimi procesi tako stanjšajo in s tem okrepijo, da dobijo iz

»Lahko bomo raziskovali zlitine materialov, v katerih se elektroni povežejo z drugimi atomskimi jedri in zaradi teh interakcij nastajajo zanimive prevodne ali magnetne lastnosti teh zlitin. V vsaki snovi se atomi držijo skupaj samo zaradi elektronov, ki jih povezujejo. Ta funkcija pripada tistim elektronom, ki niso trdno vezani na atomsko jedro in prehajajo med atomi. Ti elektroni definirajo lastnosti snovi, bodisi da gre za prevodnik, izolator ali poseben magnet. Zaradi teh elektronov lahko dobimo tudi bolj eksotične lastnosti, denimo superprevodnost ali že omenjene anyone. Zato je pomembno, da opazujemo gibanje elektronov med atomi ali celo znotraj enega atoma, in to se dogaja v času, ki ga merimo v atosekundah. Tako lahko dobimo vpogled v to, kako takšna eksotična stanja nastanejo, in s tem znanjem bi lahko nekoč v prihodnosti dizajnirali nove materiale z natančno določenimi lastnostmi za rabo v kakšni elektronski napravi ali v novih superračunalnikih, kvantnih računalnikih itd. Če razumemo, kako nastanejo te lastnosti in kako jih lahko oblikujemo, na zahtevo, potem lahko dejansko izdelamo karkoli.«

Svet elektronov raziskujejo z najkrajšimi svetlobnimi impulzi

Ko lasersko svetlobo usmerijo skozi plin, nastanejo iz atomov v plinu ultravijolični odtenki. V pravih razmerah, ko njihovi cikli sovpadajo, se lahko ti odtenki prekrijejo in okrepijo, drugje se razredčijo, in tako nastanejo koncentrirani atosekundni impulzi.

PREKRIVANJE
ODTENKOV



OKREPITEV ALI ODPOKLIC
ODTENKOV



ATOSEKUNDNI PULZI



Primer nastavitve eksperimenta

