

Pogled v notranjost vodikovega atoma

Janez Strnad

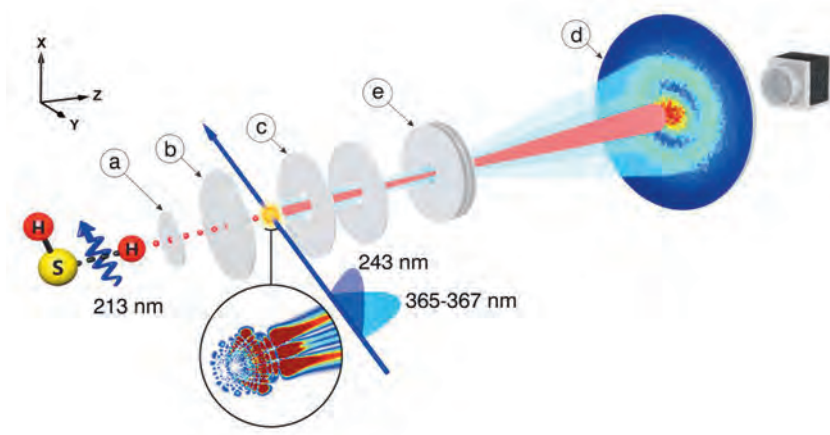
Na koncu 19. stoletja Ernst Mach ni verjel v obstoj atomov, češ »da še nihče nikoli ni nobenega videl«. Kmalu se je pokazalo, da nima prav. Vendar, ali lahko rečemo, da atome »vidimo«? Ali smo »videli« vesoljce na Luni? Videli smo njihovo sliko na zaslonu televizijskega sprejemnika, ki jo je na poti predelalo več naprav. Podobno atome »vidimo« le, če sliko predela več zapletenih naprav. V svetu atomov velja kvantna mehanika, ki se razlikuje od klasične mehanike v velikem svetu in pogosto nasprotuje vsakdanjim izkušnjam. Atome »vidimo« le, če prestopimo mejo med svetom atomov in velikim svetom.

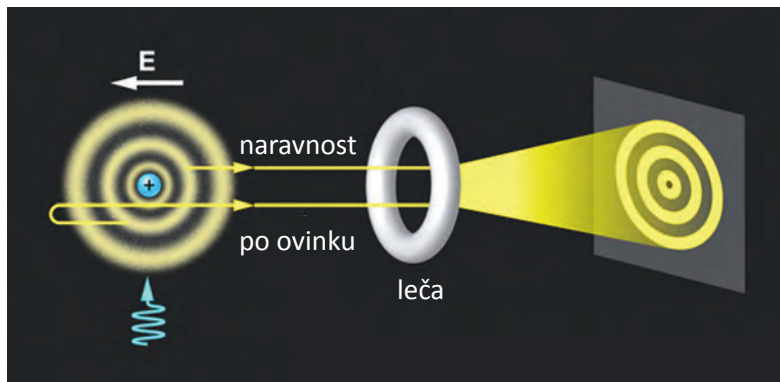
S časom so si zamislili in izvedli poskuse, pri katerih je bilo mogoče opazovati atome in molekule ter razne njihove lastnosti. V verigi poskusov te vrste je uspel nov korak, ki je zbudil precej pozornosti. O njem so 24. maja v reviji *Physical Review Letters*

poročali Aneta Stodolna in njeni sodelavci z inštituta za fiziko atomov in molekul AMOLF nizozemske ustanove za osnovno raziskovanje snovi v Amsterdamu ter sodelavci z inštituta Max Born v Berlinu in univerz v Lyonu, Ioannini v Grčiji in Auburnu v ameriški zvezni državi Alabama.

V kvantni mehaniki atom ali kak drug vezan sistem delcev opiše valovna funkcija, ki je ne moremo neposredno opazovati. Navadno se funkcija pri opazovanju korenito spremeni. Za redke sisteme jo je mogoče izračunati brez približkov. Vodikov atom je nekaj posebnega, ker poleg jedra, protona, za katerega lahko vzamemo, da se ne udeležuje gibanja, vsebuje en sam elektron. Valovno funkcijo za elektron v prostem vodikovem atomu je mogoče dobiti brez približkov. To velja tudi za vodikov atom v homogenem električnem polju (homogeno pomeni, da je v vseh točkah enako in ima enako smer). Kvadrat absolutne vrednosti

Risba naprave, ki so jo A. Stodolna in sodelavci uporabili pri poskusu: od molekul H_2S so s sunkom laserske svetlobe odcepili vodikov atom (skrajno levo). Atomi so morali skozi majhno odprtino v zaslonki (a). Atome v osnovnem stanju so vzbudili z dvema sunkoma laserske svetlobe v zeleno vzbujeno stanje in nato s tretjim sunkom od njih odtrgali elektron. Napetost med elektrodama (c) in (e) je elektrone pospešila proti zaslonu (d) skozi tridelno elektrostatično lečo in polprevodniški slikovni napravi (skrajno desno) (po A. Stodolni in sodelavcih).





Poenostavljena nazorna slika poskusa: \vec{E} je jakost homogenega električnega polja. Sunki laserske svetlobe (modro) vzbudijo vodikov atom v vzbujeno stanje. V Rydbergovem atomu elektronu priredimo kvadrat velikosti valovne funkcije z vozelnimi ploskvami. Fotoni iz atomov izbijajo elektrone, ki se gibljejo proti zaslonu po različnih poteh (narisani sta dve). Na zaslonu delna valovanja, ki ustrezajo različnim poteh, interferirajo in dajo interferenčno sliko. Na njej vozelnice ploskve ustrezajo vozelnim ploskvam kvadrata velikosti valovne funkcije v atomu (po Ch. T. L. Smenku).

valovne funkcije podaja verjetnost, da na elektron naletimo v majhnem delu prostora okoli izbrane točke. Ta kvadrat lahko neposredno opazujemo. Elektron nosi naboj, s katerim pomnožimo kvadrat absolutne vrednosti valovne funkcije in dobimo gostoto naboja.

Pred tridesetimi leti so raziskovalci Ju. N. Demkov, V. D. Kondratovič in V. N. Ostrovskij iz Sankt Peterburga predlagali, kako bi bilo mogoče opazovati elektron v atomu v homogenem električnem polju. Predlog so pospremili z računi, ki so pokazali, da je izvedljiv *fotoionizacijski mikroskop*. Najprej so izhajali iz klasičnega približka. Pozneje sta Kondratovič in Ostrovskij predlog podrobneje izdelala, med drugim v članku v dveh delih v angleški reviji *Journal of Physics B* leta 1984. Izračunala sta verjetnost, da foton iz atoma izbije elektron in s kolikšno energijo in pod kakšnim kotom elektron odleti.

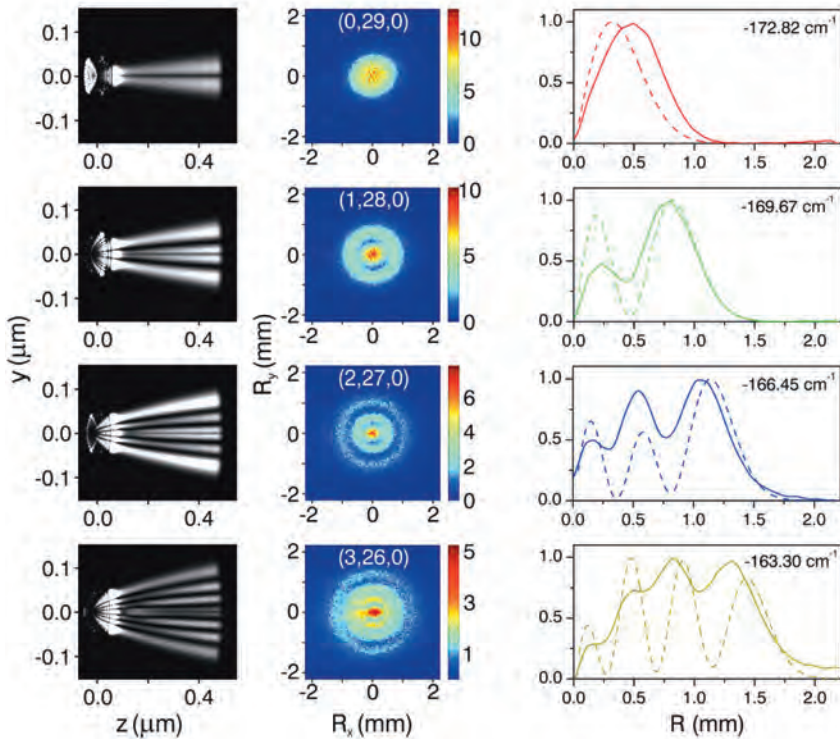
Pri fotoionizaciji v homogenem električnem polju se tirnice elektronov, ki izhajajo iz atoma v raznih smereh, lahko znova sekajo na večjih razdaljah od atoma, kar pripelje do interferenčne slike. V ugodnih okolišči-

nah jo je mogoče opazovati v neposrednem poskusu.

Ju. N. Demkov, V. D. Kondratovič,
V. N. Ostrovskij (povzetek članka).

Zdaj je mednarodna raziskovalna skupina predlog uresničila. Medtem so razvili laserje, katerih valovno dolžino je mogoče po volji spreminjati in z njimi atom spraviti v želeno vzbujeno stanje z veliko energijo. Taki *Rydbergovi atomi* se v nekaterih pogledih obnašajo približno tako, kot da bi zanje veljala klasična fizika. Serge Haroche je lani polovico Nobelove nagrade dobil za poskuse s takimi atomi (Proteus 75 (2011/2012): 117). V Rydbergovem atomu se elektron z veliko verjetnostjo giblje v svitku z obliko avtomobilske zračnice. Tak atom je tisočkrat večji kot v osnovnem stanju z najmanjšo energijo in občutljiv za majhne zunanje vplive.

Pri poskusu so molekule vodikovega sulfida H_2S obsevali z lasersko svetlobo in tako pridobili proste vodikove atome. Te so s kratkotrajnima bliskoma laserske svetlobe spravili v želeno vzbujeno stanje. V električ-



Opazovali so zgradbo vozelnih ploskev pri štirih vzbujenih stanjih vodikovega atoma v homogenem električnem polju. Leva vrsta slik nakazuje potujoča delna valovanja v nasprotni smeri električnega polja. Na vodoravno os je nanescena razdalja v mikrometrih ($1 \mu\text{m}$ je milijonina metra ali tisočina milimetra). Srednja vrsta kaže opazovane interferenčne slike. Slike so močno povečane. Na vodoravno (in navpično) os je nanescena razdalja v milimetrih. Desna vrsta slik izmerjene (sklenjeno) kvadrate absolutnih vrednosti valovnih funkcij na sliki primerja z izračunanimi (črtkasto) (po A. Stodolni in sodelavcih).

nem polju so z laserjem z izbrano valovno dolžino elektron odtrgali od jedra. Odtrgane elektrone so pospešili in sliko s trodelno elektrostatično lečo povečali na svetlečem zaslonu. Tega je opazovala polprevodniška slikovna naprava, podobna napravam v digitalnih fotografskih aparatih, in dala povečano »sliko«.

Valovno funkcijo dobimo kot rešitev Schrödingerjeve enačbe. Za prost vodikov atom brez približkov valovno funkci-

jo za osnovno stanje z najmanjšo mogočo energijo in za vzbujena stanja z večjo energijo izrazimo s spremenljivkami (r , ϑ , φ). Pri tem ne upoštevamo, da ima elektron spin, da se - po domače - vrti. Pri tem je r razdalja od jedra v izhodišču, ϑ polarni kot in φ azimut. Energija stanja je $W_n = -W_B/n^2$, če je glavno kvantno število n v osnovnem stanju z najmanjšo mogočo energijo enako 1 in v vzbujenih stanjih enako 2, 3, ... Ničlo energije postavimo k stanju, v katerem razvezana jedro in elektron mirujeta. Energija v osnovnem stanju je $W_n = -W_B = -13,6$ eV. 13,6 elektronvolta je io-

nizacijska energija, ki jo je treba dovesti atomu vodika v osnovnem stanju, da od njega odtrgamo elektron (elektron pridobi energijo 1 elektronvolt, ko v praznem prostoru preleti napetost 1 volt). Atom v vzbujenem stanju ima manjšo ionizacijsko energijo. V homogenem električnem polju moramo energiji, ki jo ima elektron v električnem polju jedra, dodati še energijo v homogenem električnem polju. Hans A. Bethe in Edwin E. Salpeter sta leta 1957 ugotovila, da je v tem primeru tudi mogoče rešiti Schrödingerjevo enačbo brez približkov, če uporabimo *parabolične koordinate* (ξ , η , φ). Pri tem je $\xi=r+z$ in $\eta=t=z$ ter ima r navedeni pomen in ima koordinatna os z nasprotno smer homogenega električnega polja. Spremenljivka φ kot prej podaja zasak okoli osi z . Pri opisanem poskusu valovna funkcija ni odvisna od φ .

Ploskve enakega ξ so rotacijski paraboloidi, odprti proti pozitivni osi z , in ploskve enakega η rotacijski paraboloidi, odprti proti negativni osi z . Oboji imajo gorišče v jedru v izhodišču. Parabola je krivulja, katere točke so enako oddaljene od premice - *vodnice* - in od točke - *gorišča*. Rotacijski paraboloid nastane, ko parabolo zavrtimo okoli simetrijske osi z . V smeri ξ je elektron vezan, v smeri η pa se lahko oddalji od jedra, če ima dovolj energije. V tem primeru pride do izraza *tunelski pojav*. V kvantni mehaniki obstaja verjetnost, da se šibko vezani elektron oddalji od jedra, četudi je njegova energija malo manjša od energije, s katero je vezan. Valovna funkcija vezanega elektrona ustreza stoječemu valovanju, ki ga določajo vozalne ploskve, to je ploskve, na katerih je valovna funkcija enaka nič. Valovna funkcija odtrganega gibajočega se elektrona na poti do zaslona ustreza potujočemu valovanju. Pri tem mislimo na valovanje, ki ga v kvantni mehaniki priredimo delcem. Elektronom, ki potujejo po različnih poteh, ustrezajo

različna delna valovanja. Delna valovanja na zaslonu interferirajo in dajo interferenčno sliko. Vozelne ploskve na tej povečani sliki ustrezajo vozelnim ploskvam valovne funkcije v atomu in te ustrezajo vozelnim ploskvam kvadrata velikosti valovne funkcije atoma. To valovno funkcijo opredelita kvantni števili n_ξ in n_η , ki sestavljata glavno kvantno število $n=n_\xi+n_\eta+1$. Število vozelnih ploskev je enako n_ξ . Opazovali so zgradbo vozelnih ploskev na interferenčnih slikah stanj ($n_\xi=0$, $n_\eta=29$, $m=0$), (1, 28, 0), (2, 27, 0) in (3, 26,0), ki jim vsem ustreza glavno kvantno število 30. *Magnetno kvantno število* m je pri opisanih stanjih enako nič, saj valovna funkcija ni odvisna od φ .

Na povečani sliki opazujemo »vozelo zgradbo Starkovih stanj«. Johannes Stark je leta 1919 dobil Nobelovo nagrado za »odkritje Dopplerjevega pojava pri kanalskih žarkih in razcepitve spektralnih črt v električnih poljih«. »Kanalski žarki« so pozitivni ioni, razcepitev spektralnih črt v električnem polju je *Starkov pojav*. Zares je na sliki število vozelnih ploskev enako n_ξ . Opisani poskus je pomemben korak v vrsti poskusov, ki razkrivajo značilnosti kvantne mehanike. Hkrati je izziv za nove poskuse. Tako že razmišljajo o poskusu, pri katerem bi s fotoionizacijskim mikroskopom opazovali vodikov atom v električnem in magnetnem polju.

Literatura:

- Demkov, Ju. N., Kondratovič, V. D., Ostrovskij, V. N., 1981: *Interferencija elektronov pri fotoionizaciji atoma v električnem polju. Pis'ma v Žurnal eksperimentalnoj i teoretičeskoj fiziki*, 34: 403.
- Smenk, Ch. T. L., 2013: *Viewpoint: A new look at the hydrogen wave function*. <http://physics.aps.org/articles/v6/58>.
- Stodolna, A. S., Rouzeé, A., Lépine, F., Cohen, S., Robicheaux, F., Gijsbertsen, A., Jungmann, J. H., Bordas, C., Vrakking, M. J. J., 2013: *Hydrogen atoms under magnification: direct observation of the nodal structure of Stark states*. *Physical Review Letters*, 110: 2113001-1.