

Če odvezamo kubični antimorfiji vse navpične in vodoravne ravnine simetrije (risba 18: 2A), izgubi središče inverzije, namesto štirištevnih osi pa nastanejo dvoštevne. Kristali imajo vzdolž trištevnih osi enako simetrijo kot pri trištevni hemimorfiji. Tudi pri tej simetriji se število enakih ploskev razpolovi na 24, značilni kristalni lik pa je heksakis-tetraeder. Posledica tega je razvoj kristalov, ki so omejeni s štirimi enakostraničnimi trikotniki. Kljub nižji simetriji so

kristali lahko še vedno kockaste ali oktaedrske oblike, vendar je za slednje značilno, da se ena polovica oktaedrskih ploskev razlikuje od drugih vsaj po sijaju ali vzorcu. Če se jim pridružijo še drugi liki, dobijo kristali zopet precej kroglasto obliko. Najznačilnejši minerali s to simetrijo so iz skupin svetlic in medlic, kamor prištevamo sfalerit in tetraedrit.

(Nadaljevanje prihodnjič.)

Stoletnica Franck-Hertzevega poskusa • Fizika

## Stoletnica Franck-Hertzevega poskusa

Janez Strnad

Pred sto leti sta James Franck in Gustav Hertz poročala o znamenitem poskusu. Za »odkritje zakonov, ki urejajo trk elektrona z atomom«, sta leta 1925 dobila Nobelovo nagrado iz fizike.

*Franck-Hertzev poskus* je bil pomemben za razvoj fizike. V drugi polovici 19. stoletja so poskusi in razmišljanja v različnih delih fizike podprli misel, da snov sestavljajo atomi. Proti koncu stoletja so odkrili elektron in spoznali, da je sestavni del atomov. Elektron ima negativni osnovni naboj, to je najmanjši prosti od nič različni naboj v naravi, in skoraj dvatisočkrat manjšo maso od mase najlažjega, vodikovega atoma. Spraševali so se, kako je v nevtralnem atomu razporejen pozitiven naboj z veliko maso, ki uravnovesi naboj elektronov z zelo majhno maso.

V laboratoriju Ernesta Rutherforda v Manchesteru so ugotovili, da se posamezni delci  $\alpha$  iz radioaktivnega izvira na zelo tankih kovinskih lističih odklonijo za velik kot. To je pomenilo, da pozitivni del atoma na delec  $\alpha$  deluje z veliko silo. Sila je velika le, če je pozitiven del atoma zelo majhen. Po tem

je Rutherford leta 1911 sklepal, da je pozitiven naboj v atomu zbran v *atomskem jedru*, stotisočkrat manjšem od atoma. Delec  $\alpha$  je atomsko jedro helija. Elektroni, ki se gibljejo okoli jedra podobno kot planeti okoli Sonca, pa so spravili fizike v zadrego. Nabiti delec, ki se pospešeno giblje – in kroženje je pospešeno gibanje –, seva. S sevanjem bi elektron izgubljal energijo in nazadnje padel v jedro. Atomi ne bi bili obstojni. Snov pa je obstojna in obstojni so tudi atomi.

Niels Bohr, ki je gostoval na Rutherfordovem inštitutu, se je zavedel, da za ta primer ne morejo veljati klasični zakoni, ki veljajo za velika telesa. Max Planck je pojasnil sevanje segretyh teles z zamisljijo, da svetloba izmenjuje energijo s steno sevajočega telesa v energijskih obrokkih, *kvantih*. To misel je Bohr prenesel na atome. Po nekaj zapletih je leta 1913 sestavil model najpreprostejšega, vodikovega atoma. Ta edini elektron se lahko giblje okoli jedra samo po krožnicah z določenim polmerom. Določenemu polmeru ustreza določena energija. Vrednosti med dvema dovoljenima polmeroma in energijama so izključene. Bohr je privzel, da pri



James Franck je bil rojen leta 1882 v Hamburgu v judovski družini z ameriškimi koreninami. Leta 1911 je postal profesor na univerzi v Berlinu. Sodeloval je v prvi svetovni vojni in bil odlikovan. Po vojni je vodil fizikalni del inštituta za fizikalno kemijo v Berlinu. Leta 1920 je postal profesor in ravnatelj fizikalnega inštituta na univerzi v Göttingenu. Kot udeleženca prve svetovne vojne ga nacistični zakoni sprva niso prizadeli. Iz odpora do nacizma pa je leta 1933 odšel v Združene države Amerike. Leta 1938 je postal profesor na Univerzi v Chicagu. Med drugo svetovno vojno je na njej vodil »Metalurški laboratorij«, ki je bil del načrta za izdelavo jedrske bombe. Predsedoval je odboru, ki je še junija leta 1945 svetoval, naj Japoncem najprej pokažejo učinek jedrske bombe, preden jo uporabijo. Poleg Nobelove nagrade je dobil več visokih priznanj. Umrli je leta 1964.

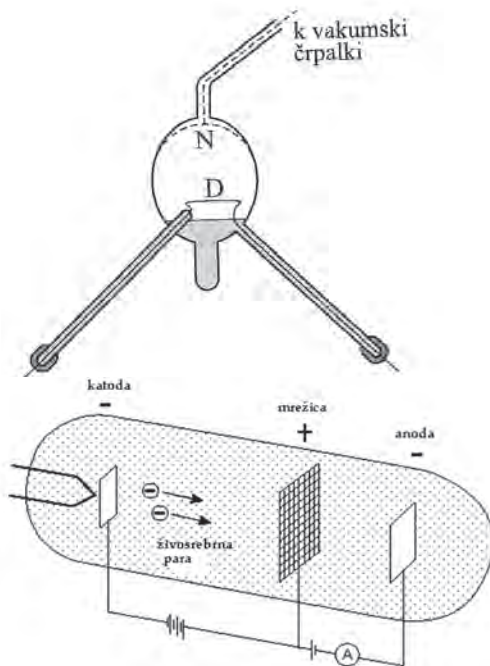
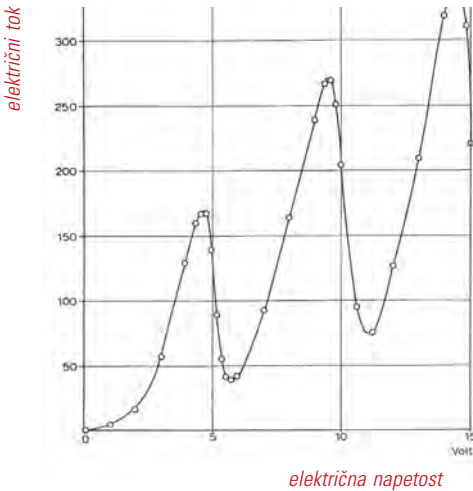
gibanju po krožnici z določenim polmerom atom, klasičnim zakonom navkljub, ne seva. To nasprotuje izkušnjam z velikimi telesi: planet se okoli zvezde giblje po krožnici s katerim koli polmerom in ima katero koli energijo.

Kroglo na klancu lahko poljubno malo dvignemo in ji s tem poljubno malo povečamo potencialno energijo. Pri energiji atomov je drugače. V tej prispodobitvi jo opišemo s stopnicami. Od najnižje stopnice z najnižjo energijo v osnovnem stanju se lahko energija poveča samo v skoku do prve naslednje sto-



Gustav Ludwig Hertz je bil rojen leta 1887 v Hamburgu v družini z judovskimi predniki. V prvi svetovni vojni je bil ranjen in se je leta 1917 vrnil na univerzo v Berlinu. Leta 1920 se je zaposlil kot raziskovalec v laboratoriju družbe Philips v Eindhovnu. Leta 1925 je postal profesor in vodja fizikalnega inštituta univerze v Halleju. Leta 1928 je prevzel enako mesto na Tehniški visoki šoli v Berlinu. Kot častnik v prvi svetovni vojni tudi Hertz sprva ni imel težav zaradi nacističnih zakonov. Leta 1935 pa je zaradi njih zapustil univerzo in postal vodja raziskovalnega laboratorija družbe Siemens. Po vojni je deloval v Rusiji. Leta 1955 je postal profesor na univerzi v Leipzigu v Nemški demokratični republiki. Tudi Hertz je dobil več visokih priznanj. Umrli je leta 1975.

pnice, do energije v prvem vzbujenem stanju. Stanj z vmesno energijo ni. Za prvo stopnico so druge stopnice, ki ustrezajo višjim vzbujenim stanjem. Pri prehodu z višje stopnice na nižjo atom izseva kvant elektromagnetnega valovanja, foton, ki prevzame razliko energij. O tem pričajo črte v spektru. Spekter nastane, ko svetlobo, ki jo sevajo atomi v plinu, razstavimo na sestavine po valovnih dolžinah. V spektru so zastopane samo črte pri določenih valovnih dolžinah. Te črte kažejo, kako se energija atoma spreminja v stopnicah.



Franck in Hertz sta v bučko iz kremenca dala kapljo živega srebra. Platinasto žičko (D) sta segrevala z električnim tokom, da so iz nje izhlapevali elektroni. Ti so na poti do mrežice (N) na pozitivni napetosti trkali z atomi živega srebra. Dokler je bila napetost manjša kot 4,9 volta, so bili trki prožni. Pri večji napetosti so trki postali neprožni in so atomi živega srebra začeli sevati (na sredini). V odvisnosti toka od napetosti pri večji napetosti od 4,9 volta tok izrazito pade. Pri še večji napetosti tok z naraščajočo napetostjo še naprej narašča in pri napetosti dvakrat 4,9 volta znova pade (zgoraj). Spodnja risba kaže sodobno napravo.

Kljub temu, da je Bohr pojasnil valovne dolžine črt v spektru vodika, številni fiziiki njegove zamisli niso sprejeli. Ali bi mogli zamisel o stanjih atomov z določenimi energijami podpreti še na strani delcev? Tak poskus se je posrečil Francku in Hertzu na univerzi v Berlinu. Za Bohrov račun iz leta 1913 nista vedela, ker »sta bila malomarna in nista brala revij«, kot je Franck izjavil v poučnem filmu o poskusu. Zanimalo ju je, kaj se dogaja z energijo atoma pri trku z elektronom. Atom ima kinetično energijo zaradi gibanja in notranjo energijo, ki izvira iz njegove notranje zgradbe.

Z vodikom je težko delati poskuse, ker sta po dva atoma vodika vezana v molekulo. Franck in Hertz sta za poskus izbrala živosrebrno paro, ki ima molekule z enim samim atomom. Izdelala sta bučko iz kremenca in jo priključila na vakuumsko črpalko, ki je iz nje izsesala zrak. V bučko sta dala kapljo živega srebra in bučko segrevala. Živo srebro je izhlapelo in bučko je napolnila živosrebrna para. Elektroni so izhajali iz platinaste žičke, ki jo je segreval električni tok, in se gibali proti kovinski mrežici na pozitivni napetosti. Občutljiv merilnik je meril tok elektronov na mrežico. Večala sta napetost, da so elektroni dobivali vse večjo hitrost in kinetično energijo, ter merila tok. Najprej je tok z naraščajočo napetostjo in naraščajočo kinetično energijo elektronov enakomerno naraščal. Večja pozitivna napetost je pač na mrežico pritegnila več elektronov. Ko je napetost dosegla 4,9 volta, pa je tok izrazito padel. Pri tej napetosti je živosrebrna para v bučki začela sevati. V spektru izsevane svetlobe se je pojavila črta z valovno dolžino 253,6 nanometra na ultravijoličnem območju (nanometer je milijonina milimetra ali milijardina metra). Ta valovna dolžina je natanko ustrezala energiji elektronov, ki so preleteli napetost 4,9 volta.

Franck in Hertz sta izid poskusa pojasnila v člankih *Trki med elektroni in molekulami živosrebrne pare in ionizacijska napetost le-te* in *O vzbujanju živosrebrne resonančne črte pri*

2536 ångströmih s trki z elektroni leta 1914 v *Razpravah nemškega fizikalnega društva* (ångström je stara enota, desetina nanometra). Izid poskusa pojasnimo takole: pri zelo majhni napetosti so trki elektronov z atomi živega srebra prožni. To pomeni, da je skupna kinetična energija elektrona in atoma po trku enaka kot pred njim. Atom ima večstokrat večjo maso od elektrona, zato si predstavljamo, da gre za trk medicinke in žogice za tenis. Žogica za tenis se na medicinki odbije, ne da bi zaznavno spremenila hitrost medicinke. Atom je po trku prav tak, kakor je bil pred njim. Tudi njegova hitrost se le neznatno spremeni. Atom pri trku ne preide na višjo stopnico, njegova notranja energija se ne spremeni. Ne preide iz osnovnega stanja v prvo vzbujeno stanje. Atomi živega srebra ne sevajo.

Pri večji napetosti od 4,9 volta pa je kinetična energija elektrona dovolj velika, da atom ob trku preide na prvo stopnico. Atomu se poveča notranja energija in iz osnovnega stanja preide v prvo vzbujeno stanje. Pri takem - neprožnem - trku je skupna kinetična energija elektrona in atoma po trku manjša, kakor je bila pred njim. Elektronu se zmanjša kinetična energija in zaradi tega ne dospe do mrežice. Poveča pa se notranja energija atoma in atom preide iz osnovnega stanja v prvo vzbujeno stanje. Iz tega stanja se atom vrne v osnovno stanje, ko izseva foton ultravijolične svetlobe. Energija izsevanega fotona se ujema z razliko notranje energije atoma in s kinetično energijo elektrona, ki preteče napetost 4,9 volta.

Kot kažeta naslova člankov, sta Franck in Hertz zmotno mislila, da se atom pri trku z elektronom ionizira in hitri elektron iz atoma izbije najšibkeje vezani elektron. Pozneje sta spoznala, da ne gre za ionizacijo, ampak za prehod v prvo vzbujeno stanje. Do ionizacije pride pri precej večji napetosti 10,4 volta. Danes pomeni »resonančna črta«, da gre za prehod iz prvega vzbujenega stanja v osnovno.

Poskus s trki elektrona z atomom prepi-

čljivo podpira Bohrov sklep, da imajo atomi stanja z določeno energijo in da se notranja energija atomov spreminja v stopnicah. Po vrsti so stopnice pri danem atomu različno visoke in se spreminjajo od elementa do elementa. Franck-Hertzev poskus je eden od tistih, ki jasno razkrijejo razliko med svetom velikih teles in svetom atomov.

Pri navadni temperaturi in še pri precej višji temperaturi so atomi danega plina vsi v osnovnem stanju z najmanjšo mogočo notranjo energijo. Tako drugega od drugega ni mogoče razločiti in so vsi popolnoma enaki. Atom ostane v osnovnem stanju tudi po trku z drugim atomom, če ni na voljo dovolj energije, da bi prešel v prvo vzbujeno stanje. Atomu se notranja energija ne more spremeniti za toliko, kolikor bi bilo energije na voljo pri trku, ker ni nobenega stanja, v katerega bi prešel pri tako majhni energiji. Atomi se tedaj vedejo, kot da se njihova notranja energija sploh ne more spremeniti. Skupna kinetična energija dveh atomov po trku je natančno enaka energiji pred trkom in trki med atomi so prožni. Zaradi trkov med molekulami plina v posodi se na zunaj nič ne spremeni. Način gibanja molekul v plinu se spremeni le, če se spremenijo zunanje okoliščine. Da bi atomi živega srebra pri trkih prešli v vzbujeno stanje in bi živosrebrna para začela sevati, jo je treba segreti do nekaj tisoč stopinj. Na podobne pojave kot pri živosrebrni pari naletimo tudi pri drugih plinih. Atomi imajo stanja z določenimi energijami. To velja za vse sestavljene delce v svetu atomov.

Atomi v plinu se vedejo drugače kot jeklene kroglice v škatli. Škatlo tresimo, da se kroglice začnejo gibati in trkati z drugimi kroglicami. Ko škatlo prenehamo tresti, se kroglice po zelo kratkem času zaustavijo. Med seboj kroglice trkajo tako, da je kinetična energija dveh kroglic po vsakem trku manjša kakor pred trkom. Trki kroglic niso prožni, ampak neprožni. Kinetična energija kroglic se zmanjša, ker se kroglici, ki trčita, neznatno segrejeta in se poveča njuna

notranja energija. Kroglica lahko sprejme katero koli notranjo energijo. Če se le za malenkost poveča temperatura, sprejme le malenkostno energijo. Atomi v plinu se pri neprevisoki temperaturi vedejo popolnoma drugače kot telesa iz velikega sveta.

Zdaj poskusi Franck-Hertzeve vrste niso več zanimivi za raziskovanje, ampak za poučevanje fizike. Poskuse, ki niso preveč zahtevni, delajo študenti pri vajah. Uporabijo bučko s tremi ali več elektrodami, izdelano prav za ta namen. Poskus se posreči tudi z običajno živosrebrno triodo, elektronko s tremi elektrodami. Treba je le imeti občutljiv merilnik električnega toka na območju od deset milijardin ampera navzgor. Podobne poskuse delajo tudi z drugimi plini, ki imajo v molekuli en atom, na primer s

helijem ali neonom. Na tržišču so bučke s helijem, s katerimi je mogoče pri trkih z elektroni zasledovati prehod atoma v prvo vzbujeno stanje in v druga vzbujena stanja vse do ionizacije.

Franck-Hertzev poskus jo je odnesel boljše kot Bohrove krožnice. V kvantni mehaniki, ki se je razvila iz Bohrove zamisli, je lega elektrona popolnoma neznana, če je natančno znana hitrost, in je hitrost popolnoma neznana, če je natančno znana lega. Elektronom ne moremo pripisati ostrih tirnic. Stanja z določenimi energijami pa so v kvantni mehaniki ostala prav takšna, kot jih je predvidel Bohr. To pomeni, da je obveljala razlaga spektralnih črt in trkov atomov z elektroni.

Rakov Škocjan in Planinsko polje 2014 • Krasoslovje

## Rakov Škocjan in Planinsko polje 2014

*Franjo Drole*

V dneh od 31. januarja do 16. marca letos je kraška dolina Rakov Škocjan v uravnavi ob severnem vznožju Javornikov, s površino približno 1,25 kvadratnih kilometrov (*Enciklopedija Slovenije*, 1996), pokazala svoj do sedaj neznan ali pa močno pozabljeni obraz. Obilne padavine v obliki snega, žleda in dežja so dobro spremenili do sedaj znano idilično dolino, kot jo poznajo obiskovalci. Člani Jamarskega društva Rakek spremljamo dogajanje v Rakovem Škocjanu že več desetletij. Letošnje dogajanje pa je bila presenečenje tudi za nas.

V začetku februarja je velik del osrednje Slovenije močno prizadel žled, in to po obdobju, ko je na območju Javornikov padla že večja količina dežja - v dobrem mesecu približno 350 litrov na kvadratni meter. Ker je bil kras v podzemlju že poln vode, so me-

teorologi in hidrologi po hitri otoplitvi opozarjali na veliko možnost poplavljanja večjih kraških polj v zaledju Ljubljani. Njihove napovedi so se uresničile predvsem v Rakovem Škocjanu in na Planinskem polju. Takoj, ko so gozdarji in ostale komunalne službe očistile dostopne poti v Rakov Škocjan, sem s Tonetom Ileršičem obiskal Rakov Škocjan. Polomljeno in izruvano drevo je kazalo, da bodo posledice žledoloma hude in dolgotrajne. Gibanje po poteh in zunaj njih je bilo zelo oteženo in podobno počasnemu teku čez ovire. Tudi pogled z Velikega naravnega mosta je dal slutiti, da je vodostaj Raka zelo blizu ali pa že čez višino, ki ga je potok Rak dosegel 26. novembra leta 2000, ko je dosegel 513,23 metrov nadmorske višine. Po pričakovanju se je najina pot zaustavila že pred kostanjevim drevoredom, na travniku z ledinskim imenom