

Bohrova dediščina



JANEZ STRNAD

→ Kvantna mehanika je najbolj uporabna in najmočnejša teorija od vseh, ki so si jih fiziki zamislili.

N. David Mermin, 2012

Preteklo stoletje je obogatilo fiziko s teorijo relativnosti in kvantno mehaniko. V Preseku sta obe bolj slabo zastopani, druga slabše kot prva. Znani fizik Richard Feynman je menil, da je kvantna mehanika „prismuknjena“ in da je „nihče ne razume.“ S tem je verjetno poskusil pritegniti pozornost in izraziti občutek, da se kvantna mehanika močno razlikuje od klasične mehanike, ki gradi na vsakdanjih izkušnjah. Max Planck je nekoč izjavil, da se nove zamisli uveljavijo, ko zastopniki starih „postopno izumrejo in je [novost] doraščajočemu rodu domača od vsega začetka.“ Zato kaže znanje o kvantni mehaniki širiti med mladimi. Dobro priliko za to ponuja stoletnica dosežka Nielsa Bohra.

Na začetku prejšnjega stoletja so fiziki sprejeli misel, da so atomi delci z velikostjo desetmilijonine milimetra. Spoznanje, da je v atomu toliko pozitivnih osnovnih nabojev, kot je vrstno število elementa, ter prav toliko elektronov z negativnim osnovnim nabojem in veliko manjšo maso, se še ni uveljavilo. Atom so si tedaj večinoma predstavljali kot potico pozitivnega naboja z elektroni v vlogi rozin. V laboratoriju Ernesta Rutherforda na univerzi v Manchestru so se zbirali fiziki z vsega sveta, podobno kot danes v CERNu v Ženevi. Rutherfordova mlajša sodelavca sta raziskovala prehod delcev α , ki jih oddajajo radioaktivne snovi, skozi zelo tanke kovinske lističe. Ugotovila sta, da se maloštevilni delci α odklonijo za velik kot. Izid je presenetil Rutherforda, ki je po njem ugotovil, da je pozitiven naboj, v katerem tiči skoraj vsa masa atoma, zbran v *atomske* jedru, stotisočkrat manjšem od atoma. Delec α je jedro helijevega atoma.



SLIKA 1.

Niels Bohr (1885–1962) je študiral v rodnem Københavnu in leta 1911 obranil doktorsko delo o elektronih v kovini. S štipendijo se je odpravil v Cambridge v Anglijo, a z okoliščinami v laboratoriju ni bil zadovoljen. Leta 1912 je prešel k Rutherfordu v Manchester. Najprej se je ukvarjal s poskusi z radioaktivnostjo, potem se je odločil za teorijo, ko je naključje

preusmerilo njegovo pozornost k zgradbi atomov. Leta 1913 je pojasnil stanja vodikovega atoma in frekvence spektralnih črt. Do leta 1922 je obvladal zgradbo drugih atomov in periodno preglednico elementov povezal s kvantno mehaniko. Pozneje se je ukvarjal z jedrsko fiziko in leta 1939 ugotovil, kako nevtroni cepijo uranova jedra. Leta 1922 je dobil Nobelovo nagrado za „raziskovanja zgradbe atomov in sevanja, ki ga odajajo“. (*Stoletnica Bohrovega rojstva*, Presek 13 (1985/86) 144–151.)

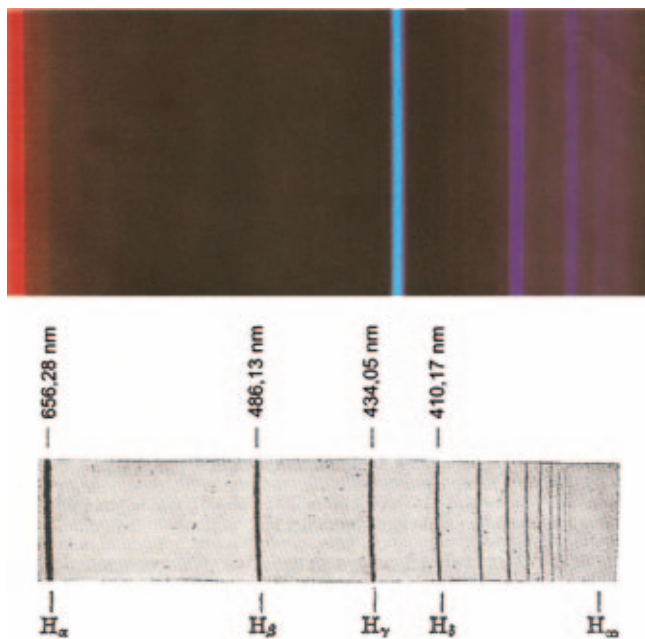
Predstava, da atom spominja na osončje in se v njem okoli jedra elektroni gibljejo kot planeti okoli Sonca, pa je imela resno pomanjkljivost. Gibanje po sklenjeni tirnici je pospešeno in pospešeni naelektroni delci sevajo elektromagnetno valovanje ter s tem izgubljajo energijo. Atomi bi tedaj nenehno sevali in naposled padli v jedro. Toda atomi so obstojni in ne sevajo, dokler jih ne zmotimo. Potem pa atomi v plinih sevajo svetlobo z določeno frekvenco ali valovno dolžino. O tem pričajo svetlobni napisi izrazitih barv.

Planck je raziskoval sevanje črnega telesa, ki od vseh teles pri dani temperaturi najmočnejše seva in vse vpadlo sevanje absorbira. Leta 1900 je pojasnil sevanje črnega telesa s privzetkom, da telo oddaja ali prejema energijo v obrokih, *kvantih*. Energija kvanta $W_1 = h\nu$ je sorazmerna s frekvenco ν , sorazmernostni koeficient je *Planckova konstanta* $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js, značilna za zamisel o kvantih. Energija sevanja je $W = nh\nu$, če je n število kvantov, ki jim danes rečemo *fotoni*, v sevanju.

Težave s predstavo atoma kot osončja so pritegnile Nielsa Bohra. Izkušnje z elektroni v kovini so ga prepričale, da pojavov v svetu atomov ni mogoče zajeti s klasičnimi zakoni. Po tem se je razlikoval od večine tedanjih fizikov, ki so se ukvarjali z atomi.



→ Lotil se je vodikovega atoma, v katerem se en sam elektron giblje okoli jedra s 1836-krat večjo maso. Vzemimo, da ima jedro veliko maso in miruje v izhodišču, elektron z majhno maso m pa se okoli njega giblje po krogu s polmerom r . Polno energijo sestavljata kinetična energija elektrona $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ s hitrostjo v in potencialna energija elektrona in jedra $W_p = -C/r$. Med delcema deluje električna privlačna sila v vlogi centripetalne sil $F = C/r^2 = mv^2/r$. Polna energija $W = W_k + W_p = -W_k = \frac{1}{2}W_p$ je tako kot potencialna energija negativna, kar je povezano s tem, da je elektron vezan na jedro. Klasično imajo lahko vse tri energije katero koli vrednost. Če se hitrost v ali polmer r zelo malo spremenita, se vsaka od njih tudi zelo malo spremeni. Če bi to obveljalo, bi atomi nenehno sevali in ne bi bili obstojni.



SLIKA 2.

Štiri spektralne črte vodika v vidnem delu spektra, ki so Johanna Jakoba Balmerja v letu Bohrovega rojstva pripeljale do osnovne enačbe. To je Johannes Robert Rydberg leta 1890 dopolnil v enačbo (3). R_y je Rydbergova konstanta (zgoraj). Valovne dolžine prvih štirih črt dobimo, če v enačbo vstavimo $n' = 2$ in po vrsti $n = 3, 4, 5 \dots$ ter upoštevamo, da je v/c enako $1/\lambda$. Z naraščajočim n se manjša razmik med sosednjima črtama (spodaj). Posnetek zgornje slike je naredil Marjan Smerke.

Konstanta $C = e_0^2/(4\pi\epsilon_0)$ vsebuje kvadrat obeh nabojev in električno konstanto ϵ_0 . Za planet, ki kroži okoli Sonca, veljajo enake enačbe, le da je $C = GmM$ z gravitacijsko konstanto G , maso planeta m in maso Sonca M .

Bohr je po Planckovem zgledu dodal zahtevo

$$\blacksquare W_k = \beta h v_{kr}, \quad (1)$$

ki je ni poskusil podrobneje utemeljiti. Njenega učinka vnaprej ni poznal, zato je dodal neznan študijski koeficient β . Z enačbo (1) je frekvenco kroženja $v_{kr} = v/(2\pi r)$ povezal s kinetično energijo. Iz enačbe $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ sledi hitrost $v = \sqrt{2W_k/m}$ in iz enačbe $W_k = C/(2r)$ polmer $r = C/(2W_k)$. To vstavimo v izraz za frekvenco kroženja in nazadnje upoštevamo Bohrov privzetek (1):

$$\blacksquare v_{kr} = \frac{v}{2\pi r} = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} \cdot \frac{2W_k}{2\pi C} = \sqrt{\frac{4W_k^3}{\pi m C^2}} = \frac{W_k}{\beta n h}.$$

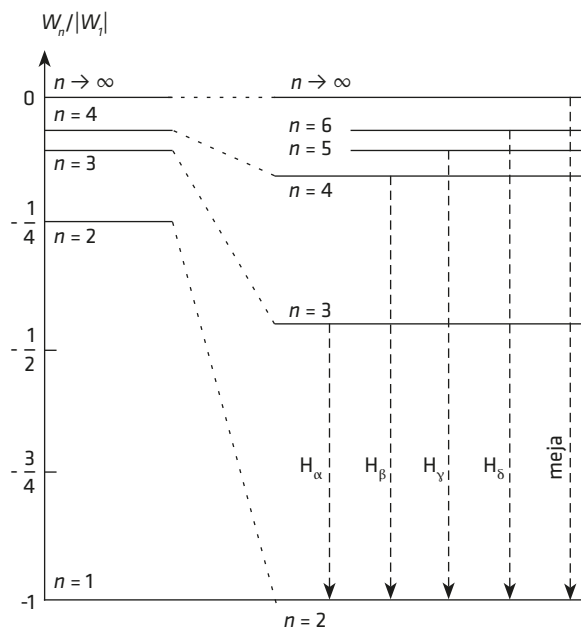
Enačbo kvadriramo in poenostavimo:

$$\blacksquare W_k = -W = \frac{\pi^2 m C^2}{2\beta^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (2)$$

Do te enačbe je Bohr prišel brez težav, potem pa se je zataknilo. Sredi leta 1912 se je vrnil iz Manchesterja v København in začel predavati na univerzi. Decembra je zaprosil za dopust in se umaknil na deželo. Februarja 1913 je odposlal dokončani članek *O zgradbi atomov in molekul*, ki je izšel v julijski številki Philosophical Magazine. Tega leta sta sledili še dve nadaljevanji. Kaj se je v kratkem času dogodilo? Februarja je srečal danskega fizika, ki je sicer v Göttingenu raziskoval spektre svetlobe. Bohr se za sevanje ni zanimal, češ da so spektralne črte preveč zapletena zadeva, da bi si bilo z njo mogoče pomagati. Znanec mu je oporekel in ga opozoril na enačbo za frekvenco črt v spektru vodikovega atoma, ki je Bohr dotlej ni poznal. Brž ko je v knjigi poiskal enačbo

$$\blacksquare v = cR_y \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

je vedel, kaj mora narediti. Najprej je ugotovil, da je v enačbi (1) $\beta = \frac{1}{2}$ in je to poskušal posebej pojasniti. Elektronu zelo daleč od jedra ustreza frekvenca 0, potem pa seva frekvenco v . Povprečna vrednost je $(0 + v)/2 = \frac{1}{2}v$ in v enačbo (1) je treba vstaviti $\beta v = \frac{1}{2}v$.



SLIKA 3.

Lestvica stanj vodikovega atoma z nakazanimi prehodi

Atom ima *stanja* z določeno energijo, ki jih zaznamuje celo *kvantno število* n . Atom ne more imeti energije, ki bi ustrezala neceleemu številu n . V *osnovnem stanju* $n = 1$ ima atom najmanjšo mogočo energijo, v vzbujenih stanjih $n > 1$ ima večjo energijo. V stanju n ima atom energijo

$$\blacksquare W_n = -W_k = -\frac{\pi^2 m C^2}{2h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

in ne seva. Ob prehodu v stanje $n' < n$ pa seva kvant z energijo $h\nu$, ki prevzame razliko energij začetnega in končnega stanja:

$$\blacksquare h\nu = W_n - W_{n'} = \frac{2\pi^2 m C^2}{h^2} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{me_0^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4)$$

Bohru te enačbe ni bilo treba preizkušati s frekvencami vodikovih spektralnih črt. Zadostovalo je, da je ugotovil, da se enačba (4) sklada s (3). Za koeficient $cR_y = 2\pi^2 m C^2 / h^3 = me_0^4 / (8\varepsilon_0^2 h^3)$ je izračunal $3,1 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$, kar se je v okviru dosegljive natančnosti ujemalo s tedanjjo izmerjeno vrednostjo $3,29 \cdot 10^{15}$

s^{-1} . Današnja vrednost je $3,2898 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$. Ne da bi se bilo treba sklicevati na sevanje, so se prepričali, da se $hcR_y = W_R = me_0^4 / (8\varepsilon_0^2 h^2) = 13,6 \text{ eV}$ ujema z *ionizacijsko energijo* vodikovega atoma (1 elektronvolt je $1,6 \cdot 10^{-19}$ joula). To je najmanjša energija, ki jo moramo dovesti vodikovemu atomu v osnovnem stanju, da odtrgamo elektron in ga spremenimo v ion. Z enačbo (4) so pojasnili frekvenco številnih spektralnih črt vodika in helijevega iona He^+ . Enačba je uporabna tudi za druge ione, ki jim je preostal en sam elektron. V razpravi s fiziki, ki so natančno merili frekvenco spektralnih črt, je Bohr spoznal, da jedro ne miruje, ampak se giblje okoli skupnega težišča jedra in elektrona.

Z zgradbo atomov so se ukvarjali tudi drugi fiziki. Že leta 1910 je eden od njih po enotah ugotovil, da je koeficient cR_y mogoče izraziti z e_0 , h in m . Drugi je prišel do enačbe (2) in še korak dlje, a je vztrajal pri klasičnem spoznanju, da atom seva svetlobo s frekvenco kroženja. Bohr ni prvi uporabil Planckove zamisli za delce snovi. Albert Einstein je z njo leta 1907 pojasnil temperaturno odvisnost specifične toplote kristalov (*Einsteinov prvi prispevek h kvantni mehaniki*, Presek 33 (2005/2006) 10-13 (3)).

Ne bi bilo prav, če bi zamolčali, da je Bohr mislil, da se v določenem stanju elektron v vodikovem atomu giblje po krožnici z določenim polmerom. *Bohrov polmer* $r_B = C / (2W_R) = \varepsilon_0 h^2 / (\pi e_0^2 m) = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ je še danes pripravna enota za merjenje velikosti atomov. Od leta 1927 pa vemo, da gibanja elektrona ni mogoče opisati s tirnico. Tudi nekatere druge Bohrove zamisli, med njimi enačba (1), niso obveljale. Ugotovitev, da imajo vezani sistemi delcev – enako kot vodikov atom in atomi drugih elementov – v kvantni mehaniki stanja z določeno energijo, pa je obveljala in bila temeljni kamen za razvoj kvantne mehanike.

Izpeljimo potencialno energijo, če deluje med telesoma privlačna sila, obratno sorazmerna s kvadratom razdalje $F = C/r^2$. Vzemimo, da telo z veliko maso miruje, majhno telo pa premaknemo iz oddaljenosti r_1 v večjo oddaljenost r . Razliko potencialne energije v končni in v začetni točki vpeljemo kot negativno delo privlačne sile. Negativni znak porabimo, ker ima sila nasprotno smer



↓ premika. Delo je sila krat pot, pri tem upoštevamo, da se sila z razdaljo spreminja:

$$\blacksquare W_p - W_{p1} = C \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} + C \frac{r_3 - r_2}{r_2 r_3} + \dots$$

$$= C \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} - \dots - \frac{1}{r} \right) = C \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right)$$

$$= -\frac{C}{r} - \left(-\frac{C}{r_1} \right).$$

Pri tem smo v imenovalcu nadomestili kvadrat r_1^2 s srednjo geometrijsko vrednostjo $1/(r_1 r_2)$, kar je smiselno, če je delni premik dovolj majhen. Potencialna energija je potemtakem $W_p = -C/r$. Če je celotni premik majhen v primerjavi z oddaljenostjo od središča telesa z veliko maso, je razlika potencialnih energij $-C/(r+h) + C/r = Ch/((r+h)r) = Ch/r^2 = (C/r^2)h$. To da znano razliko potencialnih energij Fh . Tako je, npr. na površju Zemlje razlika potencialnih energij mgh s težo mg in težnim pospeškom g . × × ×



REŠITEV BARVNI SUDOKU S STRANI 8

6	2	5	3	4	1
1	4	6	2	5	3
5	3	4	1	6	2
2	5	1	4	3	6
3	6	2	5	1	4
4	1	3	6	2	5

× × ×

Obrnjena vodna ura

ODGOVOR NALOGE



MOJCA ČEPIČ IN ANA G. BLAGOTINŠEK

→ **Z vzgonom smo se v preteklih poizkuševalnicah že igrali ob taljenju ledu v olju [1] in ob opazovanju površinske napetosti [2]. Pri tokratni poizkuševalnici smo vzgon uporabil na prav poseben način.**

Najprej povzemimo, kako je potekal poizkus. V eno plastenko smo nalili olje, v drugo vodo. Z nekaj spretnosti smo eno plastenko postavili na drugo in s trajno elastičnim kitom zatesnili stik vratov obeh plastenk tako, da iz njih ni iztekalo nič – ne olje ne voda ne oboje (slika 1). To konstrukcijo smo poimenovali obrnjena vodna ura. Zakaj vodna ura? Včasih so namreč izdelovali ure, ki so bile podobne peščenim, v njih pa se je namesto peska pretakala voda. Tako je bilo tudi pri našem poizkusu, le da smo zrak v vodni uri nadomestili z oljem.

Če smo uro postavili na mizo tako, da je bila v spodnji plastenki voda, v zgornji pa olje, se ni zgodilo nič. Če smo uro postavili tako, da je bilo v spodnji plastenki olje, v zgornji pa voda, se je olje začelo pretakati v zgornjo plastenko, voda pa v spodnjo (slika 2). Zakaj tako?

Olje ima manjšo gostoto kot voda, zato olje na vodi plava. Razlika med vzgonom, ki olje v vodi potiska navzgor, in težo olja, olje dviguje. Zato se olje po prehodu skozi vratova plastenk pretaka navzgor. Voda, nasprotno, v olju potone. Njena teža je večja od vzgona, zato se iz zgornje plastenke pretaka navzdol. Ker je vrat plastenk ozek, se pretakanje zaradi viskoznosti upočasni; proces lahko v miru opazujemo.

Pri poizkusu nam jo lahko zagode površinska napetost. Če so plastenke in voda res čiste, se včasih zgodi, da vodna ura tudi v pravem položaju ne de-