



## ATOMI SO SESTAVLJENI

Ne bi bilo prav, če v vrsti prispevkov o atomih ne bi nazadnje omenili, da so atomi sestavljeni. Atomi so veljali za nedeljive in nesestavljene pred poltretjim tisočletjem, ko so le razmišljali o deljivosti snovi, in v 19. stoletju, ko so z njimi pojasnili osnovne kemijske zakone. Po tej lastnosti so dobili ime. Danes bi rekli, da so atome imeli za *osnovne delce*.

Vendar so se razmeroma zgodaj pojavila osamljena nasprotna mnenja. André Marie Ampère je že leta 1814 mislil, da atome sestavljajo manjši delci. Sledili so mu nekateri drugi francoski fiziki, ki so menili, da atoma osrednji del z maso obdajajo številni "etrski delci" brez mase. Po letu 1826 je nemški fizik in psiholog Gustav Theodor Fechner atome primerjal z vesoljskimi telesi in trdil, da oboje povezujejo enake sile. Wilhelm Eduard Weber<sup>1</sup> je leta 1871 opozoril na to, da med telesi v vesolju deluje gravitacija, med deli atomov pa električna sila.

Taka in podobna razmišljanja sprva niso imela opore v opazovanjih in so jih nekateri fiziki kot izmišljotine s poudarkom odklonili. Zaradi njih je Ernst Mach nasprotoval atomom in je prišlo do spora, ki smo ga omenili v članku Atomi in Perrinova merjenja v prejšnji številki Preseka. Pozneje pa so izidi poskusov omenjene zamisli postopno podprli. Od leta 1858 so Julius Plücker in drugi fiziki raziskovali električni tok v razredčenih plinih. Opazovali so *katodne žarke*, svetel pramen, ki je izhajal iz katode, to je negativne elektrode v stekleni cevi z razredčenim plinom. Nanj je bilo mogoče vplivati z magnetom. Večina nemških fizikov je mislila, da gre za nekakšno valovanje, večina angleških pa stavila na naelektrene delce. Leta 1897 se je Joseph John Thomson z odklanjanjem v električnem in magnetnem polju prepričal, da so katodni žarki negativno naelektreni delci s skoraj dvatisočkrat manjšo maso od vodikovega atoma. Pozneje so jih imenovali *elektroni*. K temu spoznanju, ki se je le počasi uveljavilo, je prispevalo veliko fizikov.<sup>2</sup>

Iz leta 1897 izvira tudi poskusi, ki so nakazali, da so elektroni sestavni del atomov. Pieter Zeeman je raziskoval sevanje natrijeve pare v magnetnem polju. Z močnim magnetom in odbojno uklonsko mrežico je ugotovil, da se rumena natrijeva spektralna črta v magnetnem polju

---

<sup>1</sup> Po njem ima ime enota za magnetni pretok. Bil je starejši brat fiziologa Ernsta Heinricha Webra, ki si je zamislil Weber-Fechnerjev zakon, da je odziv, npr. v očesu ali ušesu, sorazmeren z logaritmom dražljaja.

<sup>2</sup> Curek elektronov, ki ga pospeši napetost 10 tisoč voltov in več, ustvari sliko na zaslonu televizijskega sprejemnika ali računalnika.

razširi. Kadmijeva spektralna črta pa se je v močnem magnetnem polju razcepila na dve bližnji črti, če je opazoval svetlobo v smeri magnetnega polja, in na tri, če je opazoval svetlobo pravokotno na to smer. Antoon Hendrik Lorentz, kateremu je poročal o svojih opazovanjih, je pojav teoretično pojasnil.

*Lorentzov račun.* Elektron z negativnim osnovnim nabojem  $-e_0$ , ki so ga poznali od merjenj pri elektrolizi, in maso  $m$  naj v določeni smeri niha s frekvenco  $\nu$  in s to frekvenco kroži po krogu s polmerom  $r$  v ravnini, pravokotni na to smer. Elektron veže na atom centripetalna električna sila  $Ze_0^2/4\pi\epsilon_0r^2 = m(2\pi\nu)^2r$ . Pri tem je  $Z$  število pozitivnih osnovnih nabojev v atomu in  $\epsilon_0$  influenčna konstanta. Magnetno polje z gostoto  $B$  ne vpliva na elektron, ki niha v smeri polja. Z majhno dodatno silo  $e_0vB$  pa deluje na elektron, ki kroži v pravokotni ravnini s hitrostjo  $v = 2\pi\nu r$ . Smer sile je odvisna od smisla kroženja. Magnetna sila malo poveča centripetalno silo ali jo malo zmanjša in zaradi tega kroži elektron malo hitreje ali malo počasneje. Frekvenca nihajočega elektrona se v magnetnem polju ne spremeni, frekvenca krožečega elektrona pa se spremeni za  $\pm\delta\nu$ :

$$\frac{Ze_0^2}{4\pi\epsilon_0r^2} \pm 2\pi\nu e_0rB = m(2\pi)^2(\nu \pm \delta\nu)^2r = m(2\pi\nu)^2r \pm 4\pi^2mr \cdot 2\nu\delta\nu$$

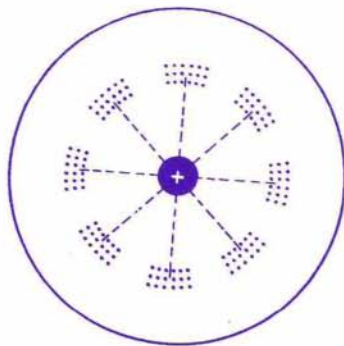
in

$$\delta\nu = \frac{B}{4\pi} \cdot \frac{e_0}{m}.$$

Člen s  $(\delta\nu)^2$  smo zanemarili. Izid računa je dobro opisal izide pri merjenju in *specifični naboj*  $e_0/m$  pri tem *Zeemanovem pojavu* se je v okviru natančnosti pri merjenju ujema s specifičnim nabojem katodnih žarkov.

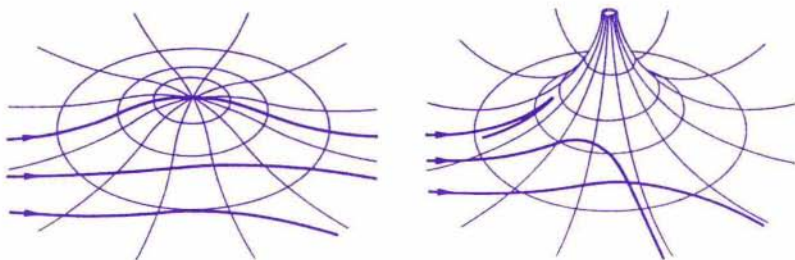
V tistem času so uspela še druga odkritja. Leta 1895 je Conrad Wilhelm Röntgen odkril rentgensko svetlobo in leto zatem Henri Becquerel radioaktivnost. Prva leta naslednjega stoletja so dala spoznanje, da so delci  $\beta$ , ki jih oddajajo radioaktivne snovi, elektroni in delci  $\alpha$  helijevi ioni. Začela se je uveljavljati misel, da so atomi sestavljeni in da jih sestavljajo elektroni. Atomi so navzven električno nevtralni, zato jih poleg negativnih elektronov sestavlja tudi pozitivni električni naboj. Ker imajo elektroni zelo majhno maso, odpade domala vsa masa atoma na pozitivni naboj. O tem tedaj ni bilo eksperimentalnih podatkov, zato so si zamislili veliko različnih *atomskih modelov*.

V letih 1903 in 1904 si je J. J. Thomson predstavljal, da je pozitivni naboj enakomerno porazdeljen po vsem atomu in elektroni v njem mirujejo "kot češplje v pudingu". V tem času je japonski fizik Hantaro Nagaoka predlagal drugačen model (slika 1). V njem se okoli majhnega osrednjega pozitivnega naboja giblje več skupin elektronov. Sevanje atomov je pojasnil z dodatnim nihanjem teh skupin s frekvenco izsevane svetlobe. Nekateri drugi fiziki so vztrajali pri pozitivnem naboju, porazdeljenem po vsem atomu, in so poskusili pojasniti sevanje atomov z motnjami v gibanju elektronov.



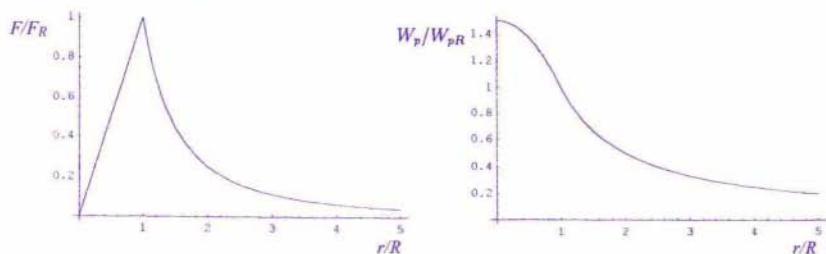
Slika 1. Model atoma, ki ga je v letih 1903 in 1904 opisal Hantaro Nagaoka. Izhajal je iz mladostne razprave James Clerka Maxwella o Saturnovih obročih, zato so ga imenovali *saturnovski model*.

Na inštitutu Ernesta Rutherforda v Manchesteru sta Hans Geiger in Ernest Marsden v letih 1908 in 1909 opazovala prehod delcev  $\alpha$  skozi zelo tanke kovinske lističe. Maloštevilni delci  $\alpha$  so se na lističih odklonili za velik kot (slika 2). Nekateri so se celo odbili. Iz tega je izhajalo, da pozitivni naboj atoma deluje na delec  $\alpha$  z veliko silo. Zato mora biti pozitivni naboj v atomu zbran v zelo majhnem prostoru (slika 3).



Slika 2. Prispodobna za gibanje delca  $\alpha$  v atomu, v katerem bi pozitivni naboj izpolnil ves atom (levo), in v atomu z jedrom (desno). Električni potencialni energiji delca  $\alpha$  priredimo težno potencialno energijo in si mislimo, da zakotalimo kroglico proti hribu. (Na desni je hrib tako visok, da ves ne pride na risbo in smo ga zato odrezali.) V prvem primeru bi se delci  $\alpha$  le neznatno odklonili o prvotne smeri, v drugem pa se nekateri močno odklonijo. Le z drugim je mogoče opisati opazovano vedenje delcev  $\alpha$  pri prehodu skozi tanek kovinski listič. Polmera atoma in jedra nista narisani v pravem razmerju.





Slika 3. Električna sila (levo) in potencialna energija (desno) naelektrenega delca v enakomernem oblaku pozitivnega naboja v odvisnosti od oddaljenosti od središča. Količini smo izračunali za točkast delec, medtem ko je delec  $\alpha$  jedro helija s polmerom  $1,7 \cdot 10^{-15}$  m. Na navpično os smo nanесли razmerji  $F/F_R$  in  $W_p/W_{pR}$ , če sta  $F_R$  sila in  $W_{pR}$  potencialna energija na robu oblaka pri  $r = R$ , na vodoravno os pa  $r/R$ .

Rutherford je leta 1911 zapisal: "Da bi pojasnili te in druge izide, moramo privzeti, da gre naelektreni delec v atomu skozi močno električno polje. Gibanje tega delca obravnavamo za vrsto atoma, ki ga sestavlja osrednji električni naboj, zbran v točki in ki ga obdaja enakomeren krogelni naboj drugega znaka enake velikosti." Tako je v fiziko stopilo *atomsko jedro*.

*Sila med naelektrenima delcema in potencialna energija.* Na točkast delec z nabojem  $Z_1 e_0$  deluje delec z nabojem  $Z_2 e_0$  in polmerom  $R$  z odbojno silo

$$F = \frac{r}{R} F_R \quad \text{pri } 0 < r < R \quad \text{in} \quad F = \frac{R^2}{r^2} F_R \quad \text{pri } r > R.$$

$F_R = Z_1 Z_2 e_0^2 / 4\pi\epsilon_0 R^2$  je sila na robu naboja pri  $r = R$ .

Električna potencialna energija je

$$W_p = \left( \frac{3}{2} - \frac{r^2}{2R^2} \right) W_{pR} \quad \text{pri } 0 < r < R \quad \text{in} \quad W_p = \frac{R}{r} W_{pR} \quad \text{pri } r > R.$$

$W_{pR} = Z_1 Z_2 e_0^2 / 4\pi\epsilon_0 R$  je potencialna energija na robu naboja pri  $r = R$ . Za delec  $\alpha$  je  $Z_1 = 2$  in za atom zlata  $Z_2 = 79$ . Atom zlata ima polmer  $1,44 \cdot 10^{-10}$  m, jedro zlata z relativno atomsko maso 197 pa  $6,40 \cdot 10^{-15}$  m. Poenostavljeno smo vzeli, da je delec  $\alpha$  točkast, medtem ko ima jedro helija polmer  $1,7 \cdot 10^{-15}$  m.

Odbojna električna sila na robu jedra je  $(1,44 \cdot 10^{-10} / 6,4 \cdot 10^{-15})^2 = 5 \cdot 10^8$ -krat večja od sile na robu atoma, ki bi ga enakomerno izpolnjeval enak pozitivni električni naboj. Električna sila na robu atoma, ki bi enakomerno izpolnjeval pozitivni električni naboj, ne more znatno odkloniti hitrega delca  $\alpha$ . Velik odklon delca pri prehodu skozi kovinska listič lahko pojasni le velika sila na veliko manjšem jedru. Potencialna energija na robu jedra je  $1,44 \cdot 10^{-10} / 6,4 \cdot 10^{-15} = 2,3 \cdot 10^4$ -krat večja od potencialne energije na robu atoma, ki bi ga enakomerno izpolnjeval pozitivni naboj. Negativnih elektronov ni treba upoštevati, ker imajo zelo majhno maso in jih delec  $\alpha$  z veliko kinetično energijo brez težave odrine iz atoma. Pri tem se samo malo zmanjša njegova kinetična energija.

Delec  $\alpha$ , za katerega je Rutherford ugotovil, da se giblje s hitrostjo  $v_0 = 2,09 \cdot 10^7$  m/s in ima maso  $M = 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}$  kg, se odbije od jedra zlata, ko se mu približa do najmanjše razdalje središč  $r_0$ . V tej razdalji je potencialna energija enaka kinetični energiji:  $Z_1 Z_2 e_0^2 / 4\pi\epsilon_0 r_0 = W_k = \frac{1}{2} M v_0^2$ . Pri tem vzamemo, da ostane jedro pri miru. Dobimo

$$r_0 = \frac{Z_1 Z_2 e_0^2}{4\pi\epsilon_0 W_k} = 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

Izid je pokazal, da je jedro veliko manjše od atoma. Z današnjim podatkom za jedro zlata bi se delec  $\alpha$  zapičil v jedro.

Spočetka niso poznali števila elektronov v atomu in so ga precenjevali. Rutherford je po prehodu delcev  $\alpha$  skozi tanek listič zlata sklepal, da je v atomu zlata sto (namesto 79) elektronov in ima jedro zlata sto (namesto 79) pozitivnih osnovnih nabojev. Nekateri so trdili, da je število elektronov v atomu enako polovici relativne atomske mase. Pozneje so uvideli, da število elektronov v atomu in število pozitivnih osnovnih nabojev v jedru določa *vrstno* ali *atomsko število*, to je zaporedno številko elementa v periodni preglednici.

Rutherford je spočetka dopustil možnost, da so elektroni razporejeni po vsem atomu in mirujejo. Z Osončjem so atom začeli primerjati pozneje. Tedaj so se zavedali pomanjkljivosti modela. Elektroni v atomu z jedrom ne morejo mirovati in njihovo gibanje je pospešeno, saj je tudi enakomerno kroženje pospešeno gibanje. Pospešeno se gibajoči naelektreni delec pa seva in s tem izgublja energijo. Zaradi sevanja bi se zmanjševala energija atoma, elektroni bi se približali jedru in nazadnje padli vanj.

Na to, da so atomi sestavljeni, bi lahko skleпали že po periodni preglednici elementov, ki jo je sestavil Dimitrij I. Mendelejev leta 1869. Če obstaja veliko različnih delcev, ki veljajo za osnovne, in jih je mogoče razvrstiti v urejeno preglednico, ti delci niso osnovni, ampak sestavljeni. Spoznanja ne moremo imeti za zakon narave, a se je doslej obneslo. Uporabili so ga pri atomskih jedrih, ki jih sestavljajo *protoni* in *nevtroni*, in pri protonih, nevtronih in sorodnih delcih, ki jih sestavljajo *kvarki*. Po izkušnjah z atomi nas ne preseneti, če nekateri fiziki že domnevajo, da so tudi kvarki sestavljeni, čeprav za to nimajo trdne eksperimentalne opore.

Fiziki so se znašli v zagati, saj so atomi obstojni. Rešitev je ponudil nov način razmišljanja. Max Planck je leta 1900 sevanje črnega telesa, to je telesa, ki absorbira vse vpadno sevanje in ki od vseh teles pri dani temperaturi najmočneje seva, pojasnil z nenavadno zamisljivo. Sevanje izmenjuje energijo s steno telesa le v obrokih, *energijskih kvantih*, ki so jih pozneje imenovali *fotoni*. Arthur Erich Haas z Dunaja leta 1910 in John William Nicholson iz Londona in Oxforda leto zatem sta med prvimi poskusila po novem pojasniti gibanje elektronov v atomu. To je uspelo leta 1913 Nielsu Bohru, ki je bil od vsega začetka prepričan, da gibanja elektronov v atomih ne bo mogoče pojasniti po starem, *klasično*. V klasični elektrodinamiki naelektreni delci sevajo elektromagnetno valovanje s frekvenco, ki se ujema s frekvenco njihovega kroženja ali nihanja. Bohr se je naslonil na Planckovo *kvantno* zamisel in privzel, da v vodikovem atomu elektron lahko kroži okoli jedra samo po krogih z določenim polmerom, ko ima določeno energijo. Seva le, ko z enega od krogov preide na manjši krog in pri tem razliko energij prevzame foton. S tem je dosegel, da se je frekvenca izsevane svetlobe razlikovala od frekvence kroženja elektronov. Bohrov podvig bi morda kazalo opisati posebej drugo leto ob devetdesetletnici. Za zdaj se zadovoljimo s spoznanjem, da atome sestavljajo elektroni, jedra in močno električno polje med njimi.

Okvirni razvoj spoznanj o zgradbi atomov je opozoril na to, da se je zamisel o osrednjem delu atoma pojavila, ko še ni imela eksperimentalne opore. V fiziki danes ne zavržemo takih zamisli, kakor je zahteval Mach, zavedamo pa se, da jih merjenja ne podpirajo. Dokončno sprejmemo samo tisto, kar podpirajo merjenja. K spoznanju, da sestavljajo atome elektroni in jedra je prispevalo veliko več fizikov, kot smo jih omenili. Njihovi koraki so šli v različne smeri in pogosto se je šele po daljšem času pokazalo, kateri so uspešni.