



## ATOMI IN PERRINOVA MERJENJA

“Katera izjava bi vsebovala največ podatkov v najmanj besedah, če bi katastrofa uničila vse, kar vemo o naravi, in bi samo en stavek predali naslednjemu rodu? Mislim, da je to spoznanje o atomih [...]: Vse stvari sestavljajo atomi, ki se nenehno gibljejo, se privlačijo, če so v majhni razdalji, in odbijajo, če jih tiščimo skupaj. [...] Stavek vsebuje neznansko veliko podatkov, če le uporabimo malo domišljije in razmišljanja.” Izjavo Richarda Feynmana v znamenitih *Feynmanovih predavanjih iz fizike* je najti v marsikaterem učbeniku fizike.

*Predzgodovina.* Meglene misli o atomih so se pojavile že v antiki, ko so razmišljali o deljenju snovi na vse manjše delce. Te predhodnike današnjih atomov pogosto imenujejo *praatomi*. Demokrit iz poznega 5. stoletja pr.n.št. je zagotavljal, da so atomi najmanjši in nedeljivi gradniki snovi. Tedaj so mislili, da sestavljajo snov štirje *praelementi*: ogenj, zrak, voda in zemlja. Njihovi atomi naj bi se združevali in razdruževali zaradi dveh sil, ljubezni in sovraštva. Epikur je v 4. in 3. stoletju pr.n.št. mislil, da imajo atomi sicer notranjo zgradbo, a da jih ni mogoče deliti. Rimski pesnik Lukrecij je v 1. stoletju pr.n.št. zapel, da so “atomi – omejeni po vrstah, a neomejeni po številu – in prazen prostor edine večne in nespremenljive sestavine sveta”. Anaksagora v 5. stoletju pr.n.št. in njegovi somišljeniki so nasprotovali obstoju atomov in trdili, da je snov neomejeno deljiva. To je mislil tudi Aristotel v 4. stoletju pr.n.št. in odklonil obstoj atomov. Njegovo stališče je prevladalo za dolgo.

Slika 1. Demokrit si je predstavljal, da lastnosti praelementov odražajo lastnosti praatomov. Te lastnosti so se mu zdele bistvene, ne pa velikost atomov. Tako naj bi bili npr. praatomi vode okrogli (na sliki), ker nas voda gladko obliva, praatomi ognja pa naj bi imeli trne, ker nas ogenj opeče.

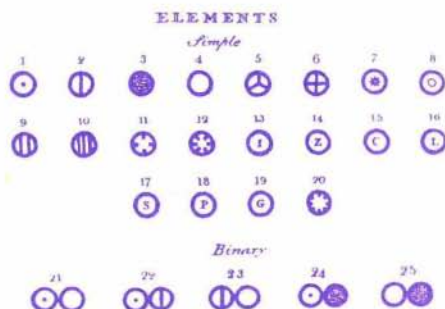


Okoli leta 1661 je Robert Boyle na novo vpeljal *element* kot snov, ki je ni mogoče razstaviti na preprostejše snovi. Antoine Laurent Lavoisier se je okoli leta 1783 s skrbnim tehtanjem prepričal, da se pri kemijskih reakcijah ohrani skupna masa udeleženih snovi. *Atome* je na novo vpeljal

John Dalton v letih od 1808 do 1810. Z njimi je bilo mogoče pojasniti zakon o stalnih masnih razmerjih in zakon o večkratnih masnih razmerjih. Po prvem se dva elementa spojita v dano spojino v natanko določenem razmerju mas, npr. vodik s kisikom v vodo v razmerju 1 : 8. Po drugem so mase elementa, ki se z določeno maso drugega elementa spoji v različne spojine, v razmerju majhnih celih števil, npr. mase kisika v didušikovem oksidu  $N_2O$ , dušikovem oksidu  $NO$  in dušikovem dioksidu  $NO_2$  so v razmerju 1 : 2 : 4.

Dalton je razmišljal tudi o sestavljenih atomih, o današnjih molekulah (slika 2). Prav negotovosti pri razločevanju atomov in molekul so povzročale težave in zavirale širjenje zamisli o atomih med kemiki.

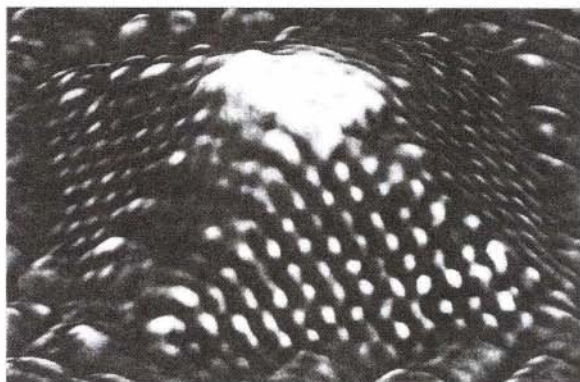
Slika 2. Daltonovi simboli za elemente iz njegovega Novega sistema kemijske filozofije iz leta 1808. Atomu vodiku sledijo atomi dušika, ogljika, kisika, fosfora, žvepla. Na desetem in devetem mestu sta "atoma" sode in pepelike, čeprav je Dalton vedel, da gre za spojini ("kovinska oksida"). V četrti vrsti so "sestavljene atome" vode, amoniaka, dušikovega oksida, metana, dušikovega dioksida. Dalton je za sestavljeni atom vode navedel  $HO$ .



O njej še leta 1860 na prvem velikem mednarodnem kongresu kemikov v Karlsruheju niso dosegli soglasja. Nekateri so predlagali, da naj bi kemijsko rabo obeh pojmov ločili od fizikalne. Še tedaj vsi kemiki niso sprejeli zakona, ki ga je že leta 1811 izrekel Amedeo Avogadro: V enakih prostorninah plinov je pri danem tlaku in dani temperaturi enako število molekul. Še dolgo časa so atome in molekule imeli le za pripravna pojma pri računanju mase snovi pri kemijskih reakcijah in so dvomili v obstoj atomov in molekul kot delcev.

Pri fizikah so atomi in molekule na splošno naleteli na manj pomislekov. Prvi je z gibanjem molekul in z njihovimi trki s steno posode pojasnil tlak plina že leta 1738 Daniel Bernoulli. Pred tem so navadno trdili, da tlak plina na steno posode nastane zaradi odbojnih sil med molekulami v posodi. Leta 1816 je Thomas Young ocenil, da je "premer delca vode ali razdalja sosednjih delcev vode v kapljevini dve tisočini do deset tisočin milijonine cole", to je od 0,05 nm do 0,25 nm (nanometer je milijardina metra ali milijonina milimetra). Youngove ocene niso upoštevali in jo še danes pogosto preskočijo. Leta 1865 je Joseph Loschmidt določil premer

molekule kisika in sklepal, da je “na področju atomov in molekul pripravna neta za dolžino milijonina milimetra”. Loschmidtova ocena je naletela na boljši odziv kot Youngova. Lord Kelvin “je imel za sprejeto dejstvo, da plin sestoji iz gibajočih se molekul”. V letih 1870 in 1871 je zagotovil, da je polmer molekule vode večji kot 0,025 nm, in Jožef Stefan leta 1872, da meri 0,03 nm. James Clerk Maxwell je leta 1873 za polmer molekul vodika in kisika navedel 0,29 nm in 0,38 nm. Primerjajte to z današnjima vrednostma 0,124 nm in 0,181 nm. K uveljavitvi atomov in molekul v fiziki so potem prispevali uspehi kinetične teorije plinov. Okoli leta 1890 so se razne ocene premera molekule vodika stekle na pas od 0,1 do 0,2 nm.



Slika 3. Atomi germanija – kroglice na sliki – so se uredili v piramido z osnovnim robom 10 nm, ko se je germanij izločil na siliciju. V nekaj sekundah se je oblikovala milijarda takih piramid na 0,1 cm<sup>2</sup> veliki mejni ploskvi silicijevega kristala. Fotografijo so naredili v laboratoriju družbe Hewlet-Packard.

S podatki za premer molekule in privzetkom, da se molekule v kapljevini dotikajo, ali po kakšni drugi poti, so nekateri fiziki izračunali *Avogadrovo število*, to je število molekul v kilomolu. Loschmidt je navedel zanj  $0,5 \cdot 10^{26}$ , Maxwell pa osemkrat več. Na splošno so pred koncem 19. stoletja zanj dobili vrednosti med  $10^{25}$  in  $10^{27}$ . To je bil sprejemljiv rezultat, če ga primerjamo z današnjo vrednostjo  $6,02 \cdot 10^{26}$  in upoštevamo tedanje možnosti za merjenje. Že pred koncem 19. stoletja je večina fizikov sprejela obstoj atomov. Le izjemoma mu je kdo nasprotoval. Ena od večjih in dokaj vplivnih skupin, ki je nasprotovala obstoju atomov, se je okoli leta 1895 zbrala okoli fizika Ernsta Macha, fizikalnega kemika Wilhelma Ostwalda in matematika Georga Helma.

Za obstoj atomov se je zavzel Ludwig Boltzmann, nekdanji študent Jožefa Stefana, in pridružili so se mu mlajši fiziki. Prišlo je do spora, o katerem je Max Planck zapisal: “Razumljivo, da je bil boj, v katerem sta

si stala nasproti Boltzmann in Ostwald, dokaj živahen in da je pripeljal do marsikatere ostroti, saj sta bila zagovornika po ostroti in duhovitosti vredna drug drugega." Kljub sporu sta Boltzmann in Ostwald ostala prijatelja in je Boltzmann med bivanjem v Leipzigu veliko časa prebil pri Ostwaldovih. Pisma kažejo, da se tudi Boltzmann in Mach nista sovražila, čeprav Mach kot edini svojih pomislekov ni preklical.

Perrinova merjenja sedimentacijskega ravnovesja in Brownovega gibanja po letu 1911 so nazadnje ovrгла pomisleke kemikov. Z današnjega vidika se zdi nasprotovanje atomom na koncu 19. in začetku 20. stoletja precej neutemeljeno. Perrinova merjenja niso postregla s presenetljivimi novimi ali natančnejšimi rezultati. Tedaj pa so bila zelo pomembna, ker so, kot kaže, predvsem s svojo preprostostjo in nazornostjo prepričala še zadnje dvomljivce. Perrin je navdušeno zapisal: "Atomska teorija je zmagala. Do nedavnega še številni nasprotniki, nazadnje premagani, zdaj drug za drugim preklicujejo svoje pomisleke, ki so tako dolgo bili upravičeni in – tega ni mogoče zanikati – koristni." Danes si je spoznanje o atomih utrla pot v sprejeto sliko o naravi in ga učenci usvojijo v zadnjih razredih osnovne šole. O njem tudi zunaj šole precej slišimo in beremo.

*Youngova ocena.* Vzemimo, da je molekula vode kocka z robom  $a$ , prostornino  $a^3$ , površino  $6a^2$  in se v kapljevini molekule dotikajo.  $N$  molekul ima prostornino  $V = Na^3$  in maso  $m = \rho Na^3$ , če je  $\rho$  gostota vode. Kapljevinsko vodo spremenimo v paro, ki jo sestavljajo proste molekule, po dveh poteh. Vodo izparimo pri vrelišču pri navadnem zračnem tlaku, ko ji dovedemo toploto  $q_i m = q_i \rho Na^3$ . Pri tem je  $q_i$  izparilna toplota. Ob razprševanju vode proti površinski napetosti  $\gamma$  opravimo delo  $\gamma S$ , ko povečamo površino za  $S = 6Na^2$ . Oboje izenačimo in dobimo

$$a = \frac{6\gamma}{\rho q_i} = \frac{6 \cdot 0,07 \text{ Jm}^{-2}}{10^3 \text{ kgm}^{-3} \cdot 2,26 \cdot 10^6 \text{ Jkg}^{-1}} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,2 \text{ nm}.$$

To je le ocena, saj s površinsko napetostjo ne bi smeli računati, ko gre za molekule. Molekule tudi niso kocke. Dvakrat manj bi dobili, če bi računali s kroglicami, ki pa ne bi izpolnile prostora. (Nismo upoštevali tudi dela  $p(V - V_k) \approx pV = 0,17 \cdot 10^6 \text{ J}$ , ki ga vodna para ob izparevanju vode opravi proti zunanjemu zračnemu tlaku in za katerega je sprememba energije manjša od dovedene toplote.)

*Loschmidtov račun.* Za povprečno prosto pot molekule v plinu, to je za povprečno razdaljo, ki jo molekula prepotuje med zaporednima trkoma, je Rudolf Clausius navedel enačbo  $\bar{l} = 1/(\frac{4}{3}\pi \cdot (2r_1)^2 n)$ , v kateri je  $n$  število molekul v prostorninski enoti. Loschmidt je enačbo pomnožil z imenovalcem in še s polmerom  $r_1$  ter dobil  $r_1 = \frac{2}{3}\pi\bar{l}(2r_1)^3 n$ . Število molekul, pomnoženo s prostornino ene molekule v obliki kocke  $N(2r_1)^3$ , je izenačil s prostornino kapljevine ob vrelišču in povprečno prosto pot  $\bar{l} = 3\eta/\rho\bar{v}$  izračunal iz enačbe za viskoznost plina  $\eta = \frac{1}{3}\rho\bar{l}\bar{v}$ . Povprečno velikost hitrosti  $\bar{v}$  je še nadomestil s korenom iz povprečja kvadrata hitrosti  $(3RT/M)^{1/2}$ . Nazadnje je dobil

$$r_1 = \frac{2\pi\eta}{\rho_k} \left( \frac{M}{3RT} \right)^{1/2}$$

Loschmidt je računal za kisik, ki ga dotlej še niso utekočinili, zato je le ocenil gostoto kapljevinskega kisika ob vrelišču. Nazadnje je za polmer navedel preveliko vrednost.

Vstavimo za viskoznost vodne pare  $\eta = 1,2 \cdot 10^{-5}$  kg/ms pri vrelišču vode  $T = 373$  K, gostoto kapljevinske vode  $\rho_k = 10^3$  kg/m<sup>3</sup> ter maso kilomola vode  $M = 18$  kg in splošno plinsko konstanto  $R = 8313$  J/K pa dobimo oceno za polmer molekule vode 0,1 nm.

Učenci petega, šestega, sedmega in osmega razreda Osnovne šole Mirana Jarca v Ljubljani so odgovarjali na vprašanje, kaj so atomi. Odgovori na mimogrede zastavljeno vprašanje povedo marsikaj zanimivega. Pri tem ne moti, da se je kak učenec odločil za podoben odgovor kot sosod.

V petem razredu je odgovorilo 48 učencev. Slaba polovica je atome povezala z "atomsko" bombo ali z eksplozijami. Približno petina je zapisala, da ne ve, kaj so atomi. Osmina je atome povezala s kemijo in desetina s plini, tudi strupenimi. Šestnajstina je vedela, da gre za drobne delce snovi. Šestnajstina je omenila "močno silo", kar je morda povezano z eksplozijami. Štiriindvajsetina je podobno omenila "velike stvari". Enak delež je atome povezal s topicami, z mikroorganizmi, s prahom, s katastrofo in celo z Afganistanom. Skoraj tretjino je beseda atom spomnila na števila, znake, računske operacije, račune, matematiko, fiziko in podobne neotipljive zadeve. (Ker je večina dala več odgovorov, je vsota večja kot 1.)

“Atomi so bombe, velike, strašne, ki te usmrtijo v minuti. To je atomska bomba ali pa neki računi v zvezi z matematiko. Ali pa nek naslov. Nekaj v zvezi s fiziko. Neki deli pištole ali bombe.”

V šestem razredu je odgovorilo 52 učencev. Tretjina je atome povežala z “atomsko” bombo. Petina je vedela, da gre za “najmanjše” delce snovi. Šestina je zapisala, da ne ve, kaj so atomi. Trinajstina je menila, da gre za sevanje ali žarke, šestnajstina, da gre za “delce mikroorganizmov”, in prav toliko, da gre za “delce energije”. Posamezniki so napisali, da so atomi “sestavni deli molekul”, “jedrski zračni prostor”, “v vesolju plavajoči predmeti”, “oblike”.

“Atomi so majhne pikice, ki jih dajo v atomsko bombo, da lahko eksplodira. Zelo so močne, ker lahko ubijejo celo mesto”.

V sedmem razredu je odgovorilo 31 učencev. Tri četrtine so navedle, da so atomi drobni delci snovi, tretjina od teh je navedla podrobnejšo sestavo: “elektroni, protoni, nevtroni”. Samo desetina je povežala atome z “bombo” in prav tolikšen delež je menil, da gre “za mikroskopsko majhne stvari”. Le petnajstina je zapisala, da ne ve, kaj so atomi.

“Atom je nek mikroskopsko majhen stvar. V kemiji, ne vem, kaj pomeni. Spominja pa me na drevec od zajca ali na neko rožo, ker ima raznobarvne pikice.”

V osmem razredu je odgovarilo 64 učencev. Štiri petine so vedele, kaj so atomi in od teh je četrtnina navedla, da atome sestavljajo elektroni ali elektronske ovojnice ter protoni in nevtroni ali jedra. Četrtnina je poudarila, da sestavljajo atomi neživo in “živo” naravo, nekateri pa so omenili samo neživo ali samo živo naravo. Dvajsetina je zapisala, da je “v jedrih nakopičena energija”, in dvaintridesetina je povežala atome z energijo. Samo eden je zapisal, da ne ve, kaj je atom, in samo enega je atom spomnil na bombo. Eden je pripomnil, da atome vidimo z “dobrim” mikroskopom.

“Mislim, da so atomi najmanjši del v prostoru. So povsod v večih stvareh. Lahko se uporabljajo za različne stvari.”

Lepo se zahvaljujem učitelju Andreju Nardinu, ki je prijazno izvedel anketo med učenci.