

## Stalno strokovno spopolnjevanje

Oddelek za fiziko, Fakulteta za matematiko in fiziko

---

“Katera izjava bi vsebovala največ podatkov v najmanj besedah, če bi kaka 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.”

Richard Feynman [1]

“Od 17. do 19. stoletja so bili v fizikalni znanosti v rabi trije taki sporni pojmi [ki še niso dobili natančnega operacijskega pomena]: atom, eter, sila.”

Gerald Holton, Steven Brush [2]

## KAKO SO ATOMI STOPILI V FIZIKO

Janez Strnad

### Uvod

Že nekaj časa smo domači z *atomi* (nedeljivimi, tome, grško rez).<sup>1</sup> V dolgem razvoju tega pojma je prispevalo veliko raziskovalcev. Pri tem je razmišljanje dolgo časa prehitevalo izide poskusov, teorija eksperimente. Zato se ne moremo izogniti pogosti uporabi enačb. Mogoče je zasledovati, kako so se skladno z razvojem drugih delov naravoslovja in tehničnih možnosti zamisli pojavljale in postopno razvijale.

V razvoju lahko razločimo tri glavna obdobja. V prvem so o atomih zgolj ugibali. V drugem se je razvila kemija in so v njej z *gramatomom* pojasnili razmerje med masami elementov pri kemijskih reakcijah. V tretjem se je razvila fizika in so v njej atome sprejeli kot delce z maso in velikostjo. Proti koncu 19. stoletja so atomi prenehali biti nedeljivi. Nekako tedaj so – v času velikih uspehov naravoslovja – nekateri kemiki nasprotovali atomom kot delcem z maso in velikostjo. Šele na začetku 20. stoletja so jih splošno sprejeli. Potem jih je postalo mogoče “videti” in jih posamič prenašati. Sestave atomov se ne bomo dotaknili.

---

<sup>1</sup>Beseda “atomski” je pogosto zlorabljena. V zvezah “atomska bomba”, “atomska energija”, ... bi morali namesto nje uporabiti besedo “jedrska”.

## Začetki naravoslovja

Prve zamisli o atomih so zelo stare. V razpravljanju o tem se moramo zavedati, da razpolagamo z zelo nepopolnimi podatki. Poleg tega se današnji pogled na svet korenito razlikuje od tedanjega. Tako stare zamisli zelo verjetno razumemo drugače, kot so jih razumeli nekdam. Ker gledamo na svet z današnjimi očmi, je priporočljivo poglede na stare čase oblikovati previdno.

Na začetku naravoslovja so veliko pozornost posvečali “zgradbi snovi”. Najbrž je bila v ozadju želja, da bi preprosto pojasnili obstoj velikega števila zelo različnih snovi. Tales (642 do 546 pr. n. š.) je zagotovil, da je vse iz vode, Anaksimander (610 do 546 pr. n. š.), da je iz tajinstvenega apeirona (neomejenega, nedoločenega), Anaksimn (558 do 528 pr. n. š.) pa, da je iz zraka. Trije Milečani so najbrž izhajali iz iste šole. Empedokles iz Agrigenta na Siciliji (495 do 435 pr. n. š.) je trdil, da snov sestavljajo štirje *elementi*, boljše *praelementi*: zemlja, voda, zrak in ogenj.

Levkip, o katerem je še posebno malo podatkov, in njegov učenec Demokrit iz Abdere (460 do 370 pr. n. š.) veljata za očeta *atomov*, boljše *praatomov*. Atomi so najmanjši nedeljivi gradniki snovi. Združevali in razdruževali naj bi se zaradi delovanja dveh sil, privlačne in odbojne. Lastnosti praatomov naj bi odražale lastnosti praelementov. Tako naj bi na primer atomi vode bili okrogli in gladki, atomi ognja pa naj bi imeli ostre trne. Več starejših šol, ki so učile, da je snov sestavljena iz najmanjših nedeljivih delcev, se je razvilo v Indiji.

Zamisel o praatomih je prevzela šola Epikura s Samosa (311 do 270 pr. n. š.). Za edini trajni stvari so imeli prazen prostor in nedeljive praatome. Obstaja veliko svetov, ki jih vse sestavljajo enaki praatomi. Ti se gibljejo po praznem prostoru in za vse veljajo enaki zakoni narave. Zastopnik te šole je bil tudi Tit Lukrecij Kar (99 do 55 pr. n. š.), ki je spesnil pesnitev *O naravi stvari* ali *O naravi vesolja*. Nič ne nastane iz nič. Vesolje je skupina praatomov, ki se je po naključju znašla na tem mestu. Nima začetka, a bo prenehala obstajati, ko se bodo atomi razbežali. Je neomejeno, prav tako neomejeni sta število praatomov in število praznin.

Nekateri grški modreci so obstoju atomov ostro nasprotovali. Med njimi je bil Aristotel (384 do 322 pr. n. š.), ki je v starem veku sestavil najcelovitejšo sliko sveta. Spremenljivi “svet pod Luno” iz četverice praelementov – po Empedoklovem zgledu – je razločil od nespremenljivega “sveta za Luno” iz petega elementa, *kvintesenca* ali *etra*. Praelemente je mogoče po njihovih lastnostih urediti na mokre in suhe ter hladne in vroče. V naravi ne

more obstajati prazen prostor. Snov je neomejeno deljiva in je ne sestavljajo atomi. Spajanje praelementov si je, poenostavljeno, predstavljal kot mešanje vode in barvila. Čim večji je delež barvila, tem bolj obarvana je mešanica. Aristotelovo stališče je prevzela krščanska cerkev. Tako je Aristotelova slika sveta za dolgo časa prevladala in je zamisel o atomih zatonila v pozabo.

Aristotelova “periodna preglednica”

	hladen	vroč topel
suh	zemlja	ogenj
moker vlažen	voda	zrak

---

Antičnih modrecev ne gre podcenjevati. Upoštevati moramo tedanjo razvojno stopnjo tehnike. Premislimo, kolikšno najmanjšo razdaljo so lahko prepoznali s prostim očešom. Vzemimo, da se svetloba z valovno dolžino 550 nm uklanja na očesni zenici s premerom 8 mm. Ločljivost je v tem primeru  $\beta_0 = \lambda/(2R) \approx 7 \cdot 10^{-5} = 14''$ . Pri navadni vidni razdalji 25 cm da to  $\beta_0 \cdot a_0 \approx 0,02$  mm. Niso znali meriti drugih količin, na primer tlaka in temperature.

---

**Začetki kemije**

Do 17. stoletja v razvoju slike o zgradbi snovi ni veliko poročati. Nekateri zgodovinarji sicer opozarjajo, da se je naravoslovje tudi tedaj razvijalo, da pa je bil razvoj krajevno omejen in počasen. Maloštevilni naravoslovci namreč niso poznali dela drugih naravoslovcev. Omenjajo zdravnika Galena (129 do 199) in potem zdravnika in alkimista Paracelsusa (1493 do 1541), ki je trdil, da obstajajo trije “elementi”: živo srebro, žveplo in sol. Georg Bauer - Agricola (1494 do 1555) je razpravljajal o pridobivanju kovin. Julius Becher (1635 do 1728) in Georg Ernst Stahl (1660 do 1734) sta uvedla *flogiston*. Apno, to je kovinski oksid, naj bi se spojilo s flogistonom v kovino. Pokazalo se je, da bi moral imeti flogiston negativno maso. Po mnenju nekaterih zgodovinarjev so tudi take zamisli prispevale k razvoju.

Duhovnik Pierre Gassendi (1592 do 1648) je v knjižnici naletel na Epikurova dela. Nanj so naredila tolikšen vtis, da jih je nekaj prevedel in poskušal pogled epikurejcev, tudi atome, uskladiti s cerkvenim naukom.

Leta 1661 je Robert Boyle (1627 do 1691) izdal delo *Skeptični kemik*, ki ga imajo nekateri za temeljno delo kemije v današnjem pomenu besede. V njem je "element" postavil na eksperimentalno podlago kot snov, ki je ni mogoče razstaviti na preprostejše snovi. Odklonil je zamisel, da je snov neomejeno deljiva in da praelementi zvezno prehajajo drug v drugega. Gradnike snovi je imenoval *korpuskule*, da jih je razlikoval od antičnih praatomov. Boyle je bil prepričan, da so najboljša opora poskusi in je izvajanju poskusov posvetil veliko pozornost.

Antoine Laurent Lavoisier (1743 do 1794) se je okoli leta 1783 s skrbnim tehtanjem prepričal, da se pri kemijskih reakcijah ohrani skupna masa udeleženih snovi. Ugotovil je tudi, da se elementa spojita v spojino vselej v enakem utežnem razmerju, dandanes masnem razmerju. Benjamin Jeremias Richter (1762 do 1807) je raziskoval nevtralizacijo baz in kislin. Sestavil je preglednico, ki je kazala, kolikšna masa baze nevtralizira določeno maso kisline. Pri tem je uvedel pojma *stehiometrija* in *ekvivalent*, po naše *ekvivalentna masa*. Drugačno stališče je zagrizeno zagovarjal Claude Louis Berthollet (1748 do 1822), ki je raziskoval kovinske zlitine. V razpravo je posegel še Louis Joseph Proust (1754 do 1826). Njegov zakon o nespremenljivem masnem razmerju iz leta 1807 je zagotovil, da se elementa spojita v spojino vselej v enakem razmerju mas.

John Dalton (1766 do 1844) je leta 1808 v *Novem sistemu kemijske filozofije* ugotovitev razširil v zakon o večkratnih masnih razmerjih. V spojinah dveh elementov se z dano maso drugega elementa vežejo mase prvega elementa, ki so v razmerju majhnih celih števil. Zakon je pojasnil z atomi. Atome je vpeljal kot najmanjše nedeljive gradnike elementov. Atomi elementa so med seboj enaki. Določeno število atomov prvega elementa se spoji z določenim številom atomov drugega elementa. Pri spojinah kisika in dušika  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $N_2O_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_5$  se z enim delom dušika spojijo mase kisika, ki so v razmerju  $\frac{1}{2} : 1 : \frac{3}{2} : 2 : \frac{5}{2} = 1 : 2 : 3 : 4 : 5$ . Tedaj so poznali samo tri od teh spojin.

Dalton je mislil, da se navadno po en atom elementa veže s po enim atomom drugega elementa. Zanj je voda imela sestavo  $HO$ . Navedel je preglednico *relativnih atomskih mas* za tedaj znane elemente. Tedaj so govorili o teži in merili težo elementa, ki se je spojila z enoto teže vodika. Dalton je razmišljal tudi o sestavljenih atomih, o današnjih *molekulah*. Misлил je, da se

lahko spojita v molekulo le atoma dveh različnih elementov, češ da se atoma istega elementa zaradi enakih električnih nabojev odbijata. Take zamisli so povzročale negotovost in zavirale širjenje zamisli o atomih med tedanjimi kemiki.

---

Na začetku 17. stoletja so uporabili prve mikroskope, kmalu po prvih teleskopih. Potem so mikroskope izpopolnjevali. Postopno so ugotovili, da je z njimi mogoče doseči ločljivost  $0,61\lambda/(n \sin u)$ . Pri tem je  $\lambda$  valovna dolžina uporabljene svetlobe, navadno 550 nm in  $n$  lomni količnik imerzije, navadno olja  $n = 1,5$ , ki obdaja predmet. *Numerična odprtina*  $\sin u$  upošteva polovični kot  $u$  ob vrhu značilnega preseka svetlobnega šopa, ki ga zajame objektiv. Pri dobrih objektivih se  $u$  približa  $90^\circ$ . Tako so z mikroskopi z vidno svetlobo nazadnje dosegli ločljivost okoli 200 nm. S takimi mikroskopi ni bilo mogoče videti atomov in molekul.

---

### Zakoni za pline

O plinih so začeli razpravljati na začetku 17. stoletja. Dotlej so se misli vrtele predvsem okoli zraka. Ime *gas* je leta 1620 vpeljal zdravnik Joan Baptista van Helmont, da bi z njim zajel druge “zrake”. Menda je besedo izpeljal iz “kaosa”, češ da je plin zgled za popoln nered. Pri poskusih je ugotovil, da se je razvil plin – ogljikov dioksid, ko je apnenec polil s kislino. Ta plin je nastal tudi pri alkoholnem vrenju. Nekoliko pozneje so odkrili kisik, dušik, vodik in še nekatere druge pline ter raziskali njihove lastnosti. Zasluge za to imajo poleg Lavoisiera Henry Cavendish (1731 do 1810), Joseph Priestley (1733 do 1804) in Carl Wilhelm Scheele (1742 do 1786).

Prostornina plina se zaradi spremembe tlaka veliko bolj spremeni in spremembo je lažje opazovati in izmeriti kot spremembo prostornine kapljevine ali trdnega telesa. Pri tem se je pokazalo, da se vsi plini, ne glede na kemijsko sestavo, vedejo podobno. Tako so plini v svetu snovi pokazali urejenost in s tem omogočili, da so začeli spoznavati lastnosti snovi. Vsaj po tej strai ne zaslužijo namigovanja na kaos.

Boyle je slišal za poskuse magdeburškega župana Otta von Guerickeja. Še preden je izšlo poročilo o njih, mu je pomočnik Robert Hooke (1635 do 1703) izdelal izboljšano zračno razredčevalko. Z njo je Boyle ponovil Guerickejeve poskuse in naredil nekaj novih. Leta 1660 je poročal o “novih fiziko-mehaničnih poskusih o prožnosti zraka in njenih učinkih”. Dve leti po prvi izdaji je v drugi izdaji ostro nasprotoval zamisli, da v naravi ne more obstajati prazen prostor. Po precejšnjih zapletih so poskusi Richarda

Townleya, Henryja Powerja in drugih pripeljali do zakona, ki ga imenujemo po Boyleu: prostornina plina je obratno sorazmerna s tlakom. Tako je pri odkritju razmeroma preprostega zakona sodelovalo več mož. Boyle je prvi opozoril na to, da zakon velja tudi pri večjem tlaku od navadnega zračnega tlaka, medtem ko so drugi zakon uporabili le pri manjšem tlaku. S poskusi je leta 1676 neodvisno podprl zakon Edmé Mariotte (1620 do 1684). Pribil je, da zakon velja le pri nespremenjeni temperaturi. Omenimo še, da je bil Boyle leta 1662 med ustanovitelji Kraljeve družbe, angleške akademije znanosti.

Guillaume Amontons (1663 do 1705) je leta 1702 raziskal zvezo med tlakom plina in njegovo temperaturo pri nespremenjeni prostornini. S tem vprašanjem se je tedaj ukvarjalo več naravoslovcev. Nekateri so zagotavljali, da se vsi plini pri nespremenjenem tlaku z naraščajočo temperaturo širijo enako, drugi so trdili nasprotno. Poskuse je naredil tudi Jacques Alexandre César Charles (1740 do 1823), ne da bi kaj objavil. Raziskovanje plinov je pripeljalo do poletov z baloni. Leta 1773 sta se brata Montgolfier prvič dvignila v zrak z balonom na vroč zrak. Charles pa je leta 1783 uporabil vodik, ki so ga nedavno odkrili in ki ga ni bilo treba segreti.

### Gay-Lussacovi poskusi

Tudi Joseph-Louis Gay-Lussac (1778 do 1850) je letel z baloni. Leta 1804 se je dvignil z Jean-Baptistom Biotom s starim vojaškim balonom z Napoleonovega pohoda v Egipt. Biota so težave na poletu odvrnile od nadaljnih poletov. Tako je Gay-Lussac kmalu zatem poletel sam in se dvignil do 7000 metrov. Više so se dvignili šele pol stoletja pozneje.

Gay-Lussac je že leta 1802 po Bertholletovih nasvetih pri nespremenjenem tlaku meril prostornino plinov v odvisnosti od temperature. Pri tem je skrbno odstranil vodno paro iz plinov in poskrbel, da v napravah ni bilo vlage. Plinov, ki se topijo v vodi, ni lovil v posodi nad vodo, ampak nad živim srebrom. Ugotovil je, da se vsi plini vedejo enako in je sprememba prostornine sorazmerna s spremembo temperature. To je ugotovil že Charles, na katerega neobjavljeno gradivo je naletel Gay-Lussac, in ga objavil.

Podobne pokuse je izvajal Alessandro Volta (1745 do 1828) že devet let prej, a Gay-Lussac zanje ni vedel. Tudi Volta je spoznal, da v plinih moti vodna para. Na kongresu ob stoletnici Voltove smrti so priporočili, naj bi omenjeno spoznanje imenovali po Gay-Lussacu in Volti. Vendar se predlog ni prijel.

Iz Boylevega in Gay-Lussacovega zakona je sledila *plinska enačba*. Gay-Lussac jo je zapisal drugače, kot jo po uvedbi absolutne temperature zapišemo

danes:

$$pV = p'V'[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta')], \quad \frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'} = \frac{m}{M}R.$$

$p$  je tlak in  $V$  prostornina plina pri Celzijevi temperaturi  $\vartheta$  in zadevajo podatki s črtico temperaturo  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Za koeficient  $\alpha$  je navedel  $1/(267\text{ }^\circ\text{C})$ , namesto današnjega  $1/(273,15\text{ }^\circ\text{C})$ , neodvisno od vrste plina.  $T$  je absolutna temperatura,  $m$  masa plina,  $M$  masa mola in  $R$  splošna plinska konstanta.

Leta 1807 se je Gay-Lussac lotil drugačnih poskusov. Želel je dognati, ali je specifična toplota plina odvisna od tlaka. Opazoval je, kaj se dogodi, ko se plin razširi v prostor z zelo nizkim tlakom. Uporabil je dve enaki dvanajstlitrski toplotno izolirani posodi s staknjenima vratovoma in ju opremil z natančnima termometroma. Iz ene od njiju je izsesal zrak, v drugo pa spustil plin, ki ga je nameraval raziskati. Tudi pri tem poskusu je poskrbel, da so bili plini suhi. Posodi je spojil s cevjo in odprl pipi, da se je plin razširil v drugo posodo. Pri številnih ponovitvah poskusa je ugotovil, da sta termometra kazala enako temperaturo kot pred poskusom, ko so se spremembe izravnale. V posodi s plinom se je tlak zmanjšal na polovico začetne vrednosti, ko se je plin razširil na dvojno prostornino. Poskus so ponovili drugi, med njimi Gustave Adolphe Hirn in James Prescott Joule. Po tem *drugem Gay-Lussacovem poskusu* sklepamo, da je notranja energija plina neodvisna od tlaka in prostornine, vsaj za *idealni plin*.

#### Spojine plinov

	$m_{\text{N}}$	$m_{\text{O}}$	$V_{\text{N}}$	$V_{\text{O}}$	$V_{\text{O}}$
$\text{N}_2\text{O}$	63,30	36,70	100	49,5	50
NO	44,05	55,95	100	108,9	100
$\text{NO}_2$	29,50	70,50	100	204,7	200

Drugi in tretji stolpec vsebujeta podatke Humphreya Davyja za mase plinov, ki se spojijo. Za prostornino dušika v četrtem stolpcu je Gay-Lussac v vseh primerih privzel 100 delov. Peti stolpec kaže izmerjeno prostornino kisika, šesti pa zaokrožene vrednosti.

Gay-Lussac je že prej sodeloval s skoraj deset let starejšim Alexandrom von Humboldtom in z njim natančno določil maso vodika, ki se spoji z določeno maso kisika. Sodila sta, da je bolje kot masi primerjati prostornini plinov, ki se spojita, pri isti temperaturi in istem tlaku. Ugotovila sta, da se 100 prostorninskih delov kisika spoji s skoraj natanko 200 prostorninskimi deli vodika. Leta 1808 je Gay-Lussac nadaljeval merjenje prostornin

plinov, ki se spojita. Natančno je izmeril prostornini plinov, ki sta se spojila ali ki ju je dobil, ko je spojino razstavil. Pomagal si je tudi s podatki drugih kemikov. Nazadnje je ugotovil, da sta prostornini plinov, ki se spojita, v razmerju majhnih celih števil. Prostornini dušika in kisika, ki se spojita v dušikov oksid, sta v razmerju 1 : 1, prostornini kisika in vodika, ki se spojita v vodo, v razmerju 1 : 2, prostornini dušika in vodika, ki se spojita v amoniak, v razmerju 1 : 3. O odkritju je poročal leta 1808. V njem je videl potrditev svojega prepričanja o urejenosti v naravi.

Dalton je podvomil v natančnost Gay-Lussacovih merjenj. Mislil je, da ne gre staviti na prostornino plinov, saj nekaterih snovi ni mogoče dobiti v plinasti obliki. Vztrajal je pri misli, da se atoma istega elementa ne moreta vezati v molekulo, na primer atoma vodika v molekulo vodika. S poudarkom je oklonil možnost, da bi iz določene prostornine kisika in dvojne prostornine vodika nastala dvojna prostornina vodne pare. Zato je poskusil razvrednotiti Gay-Lussacovo delo.

### Avogadrov zakon

Amedeo Avogadro (1776 do 1856) je leta 1811 – pred dvesto leti – objavil članek *Razprava o določanju relativnih mas elementarnih molekul in razmerij, v katerih stopajo v spojine*. V njem je na podlagi Gay-Lussacovih spoznanj postavil zakon, da je v enakih prostorninah plinov pri enaki temperaturi in enakem tlaku enako število molekul. S tem je pobral plodove Gay-Lussacovega dela. Vendar je treba upoštevati, da so Gay-Lussac, Dalton, Berthollet in nekateri drugi znani kemiki iz tistega časa Avogadrov zakon odklonili. Še celo na prvem velikem mednarodnem kemijskem kongresu v Karlsruheju leta 1860 niso dosegli soglasja. Razpravljali so celo o predlogu, da bi kemijsko rabo “atomov” in “molekul” ločili od fizikalne. Italijanski kemiki so se zavzeli za Avogadrovo delo, češ da je mogoče z njegovim zakonom ugotavljati relativne mase molekul in posredno tudi relativne mase atomov. Tedaj so bili Avogadro, Berthollet in Dalton že mrtvi.

Kljub zatikanju so, potem ko so razjasnili, kako je s številom atomov v molekuli plina, ki je element, in dobro razločevali atome od molekul, v kemiji sprejeli atomsko zgradbo snovi. Pri tem so atom in molekulo razumeli kot okrajšavo za enoto mase elementa ali spojine, ki sodeluje v kemijski reakciji, za današnji mol.

### Nizke temperature

Temperatura	leto	eksperimentator	kaj je dosegel in na kakšen način
234 K	1860	Kirk	ohladil pod tališče živega srebra
90,2	1877	Cailletet	dobil meglo tekočega kisika pri razpenjanju iz tlačne posode
77,3	1884	Wroblewski in Olszewski	dobila majhne mase tekočega kisika in dušika in izmerila lastnosti
20,4	1898	Dewar	utekočinil vodik, Joule-Kelvinov pojav in protitočni izmenjevalnik toplote
4,2	1908	Kamerlingh-Onnes	utekočinil helij na enak način kot Dewar, kmalu nato z odčrpavanjem dosegal 1 K

### Majhni tlaki

tlak	leto	eksperimentator	kaj je dosegel in na kakšen način
$\sim 10$ mbar	1654	von Guericke	batna črpalka izboljšal Hooke
0,1	1855	Geissler	tesnenje z živim srebrom
	1865	Sprengel	
$10^{-3}$	1874	Barnes	rotacijska črpalka
$10^{-5}$	1915	Gaede	difuzijska črpalka na živo srebro, izboljšal Langmuir
	1928	Burch	difuzijska črpalka na silikonsko olje

### Zgrešeni poti

V fiziki so tlak plina na steno posode najprej pojasnili z odbojno silo med molekulami. V *Principih* je Isaac Newton omenil “prožne tekočine” –

pline. Med njihovimi delci naj bi delovale odbojne sile, obratno sorazmerne z razdaljo, tako da je gostota sorazmerna s tlakom. Pierre Simon de Laplace je še leta 1816 sledil tej zamisli. Privzel je, da *kalorik* – nekakšna zelo rahla toplotna snov – kot oblak obdaja delca plina, ki delujeta drug na drugega in povzročata odbojno silo med njima. To silo je za delca v razdalji  $r$  nastavil kot  $F \propto \rho'^2 f(r)$  z gostoto kalorika  $\rho'$ . Funkcija  $f(r)$  z naraščajočo razdaljo  $r$  zelo hitro pojema. Tlak plina na steno posode  $p \propto \rho'^2 \rho^2$  je dobil, ko je upošteval odbojno silo med vsemi delci v posodi. Pri tem je vpeljal gostoto plina  $\rho$ . Nato je zahteval, da je produkt  $\rho'^2 \rho$  neodvisen od tlaka. Tako je “izpeljal” Boylov zakon. Če bi privzel še, da je produkt  $\rho'^2 \rho$  sorazmeren s temperaturo, bi “izpeljal” celo plinsko enačbo.

Zanimivo je razmišljal o molekulah Thomas Young (1773 do 1829), ko je v prvih letih 19. stoletja ocenjeval njihovo velikost. Začetna dolžina  $l_0$  stebrička kapljevine v cevki se zaradi povečanega tlaka  $\Delta p$  zmanjša na  $l$ . Relativno zmanjšanje dolžine je sorazmerno s spremembo tlaka, sorazmernostni koeficient je stisljivost  $\chi$ :  $(l_0 - l)/l_0 = \chi \Delta p$ . Vpeljal je še površinsko napetost  $\gamma$  in privzel, da je doseg sil med molekulama sorazmeren s produktom površinske napetosti in stisljivosti:  $d = \frac{1}{3} \gamma \chi$ . Za doseg je dobil približno 0,1 nm, kar je smiselna ocena. V nadaljevanju pa je privzel, da je premer molekule štiridesetkrat manjši. S tem ga je močno podcenil.

Danes pogosto naletimo na premislek, ki ga povezujejo z Youngom. Dano maso vode spremenimo v paro, tako da jo izparimo. To bi dosegli tudi, če bi vodo razpršili do molekul. V prvem primeru bi morali dovesti izparilno toploto, v drugem pa opraviti delo proti površinski napetosti. Za maso vode, v kateri je  $N$  molekul, velja:

$$mq_i = N \cdot \frac{4}{3} \pi r_1^3 \rho q_i = N \cdot 4 \pi r_1^2 \gamma.$$

Z enačbo ocenimo polmer molekule vode, če upoštevamo površinsko napetost 0,07 N/m, gostoto  $10^3$  kg/m<sup>3</sup> in izparilno toploto 2 MJ/kg:

$$r_1 = \frac{3\gamma}{\rho q_i} \approx 0,1 \text{ nm}.$$

Z oceno bi bili lahko zadovoljni, če bi bila pot neoporečna [3]. Površinske napetosti v mikroskopski sliki ni mogoče preprosto pojasniti [4].

## Kinetična teorija plinov

Pozneje so fiziki izhajali iz gibanja molekul in razvili *kinetično teorijo plinov*. Pri tem so se sprva oprli na golo razmišljanje. Šele s časom so postale napovedi kvantitativne in jih je bilo mogoče preizkusiti pri merjenjih. S časom se je kinetična teorija razvila v *statistično mehaniko*, ki iz lastnosti atomov izpelje lastnosti vseh snovi.

Z gibanjem molekul je prvi pojasnil tlak plina na steno posode Daniel Bernoulli (1700 do 1782). Leta 1738 je naredil račun, ki ga pogosto še danes ponovimo v sodobni preobleki. Privzamemo, da imajo vse molekule enako veliko hitrost  $v$  in se jih šestina giblje v smeri pozitivne osi  $x$ , šestina v smeri negativne osi  $x \dots$  V posodi s prostornino  $V$  naj bo  $N$  molekul, tako da je njihova gostota  $n = N/V$ . Pri prožnem trku s steno posode se pri pravokotnem vpadu molekuli z maso  $m_1$  spremeni gibalna količina za  $2m_1v$  zaradi sunka sile stene. V času  $t$  na del stene s površino  $S$  prileti  $\frac{1}{6}nvtS$  molekul. S površino in časom deljeni sunek stene na vse molekule, ki z njo trčijo, je nasprotno enak tlaku:

$$p = \frac{1}{3}m_1n\overline{v^2} = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}. \quad (1)$$

V zadnji enačbi smo opustili privzetek, da je hitrost vseh molekul enako velika in upoštevali povprečje kvadrata hitrosti. Tlak izrazimo tudi s plinsko enačbo  $p = (m/V)(R/M)T = nkT$  in upoštevamo  $m/V = m_1N/V = m_1n$ ,  $R/M = kN_A/m_1N_A = k/m_1$ . Pri tem je  $N_A = 6,0221411178(30) \cdot 10^{23}/\text{mol}$  Avogadrova konstanta, to je število delcev v molu, in  $k = R/N_A$  Boltzmannova konstanta. Za kinetično energijo molekule dobimo v povprečju:

$$\overline{W_{k1}} = \frac{1}{2}m_1\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT.$$

S tem smo posegli v poznejši čas. Bernoullijevega računa svoj čas niso upoštevali.

Tudi nekateri poznejši fiziki so se morali boriti s precejšnjim odporom. John Herapath (1790 do 1868) je tričetrt stoletja po Bernoulliju povzel njegovo zamisel. Nasprotoval je Laplaceovim odbojnim silam med molekulami. Leta 1816 je poslal Kraljevi družbi sestavek, v katerem je privzel, da se molekule plina med trki gibljejo premo, in prišel do podobnih sklepov kot Bernoulli. Vendar tudi tem sklepom niso verjeli. Podobno se je godilo Johnu Jamesu Waterstonu (1811 do 1883). Leta 1845 je poslal Kraljevi družbi prispevek, v katerem je šel korak dlje. Privzel je, da sta gostoti molekul v dveh

plinih v ravnovesju enaki in sklepal, da je kinetična energija obojih molekul enaka.

Po letu 1856 pa se je kinetična teorija plinov začela hitro razvijati. August Karl Krönig (1822 do 1879) je tedaj objavil kratek članek, v katerem je povzel privzetke. Plin sestavljajo molekule, ki jih je mogoče obravnavati kot točkasta telesa ali trde prožne kroglice. Gibljejo se tako, da v povprečju nobena smer in noben del plina nista odlikovana. Prostornina vseh molekul je zanemarljivo majhna proti prostornini plina.

Joule je s Herapathovo enačbo (1) že leta 1851 ocenil hitrost molekul v vodiku:  $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{3p/\rho} \approx 2 \text{ km/s}$ . Za notranjo energijo plina je postavil  $W = N\overline{W_{k1}}$  in izračunal specifično toploto plina pri konstantni prostornini  $c_V = m^{-1}\partial W/\partial T = \frac{3}{2}k/m_1 = \frac{3}{2}R/M$ . Tako je v okviru kinetične teorije prišel do prve napovedi, ki jo je bilo mogoče preprosto preizkusiti z merjenji. Pokazalo se je, da imajo vsi tedaj znani plini pri konstantni prostornini večjo specifično toploto  $\frac{5}{2}R/M$ . Žlahtne pline, za katere je zares  $c_V = \frac{3}{2}R/M$ , so odkrili pozneje.

Leta 1857 je Rudolf Clausius v znamenitem članku *Vrsta gibanja, ki jo imenujemo toplota* v doslednejšem računu upošteval, da imajo molekule vse mogoče velikosti hitrosti in se gibljejo v vseh mogočih smereh:

$$dF \cdot t = N \cdot 2m_1v \cos \varphi = nSv \cos \varphi \cdot 2m_1v \cos \varphi d\Omega/(4\pi).$$

Z  $d\Omega/(4\pi) = 2\pi \sin \varphi d\varphi/(4\pi) = -\frac{1}{2}d \cos \varphi$  je dobil znani rezultat (1):

$$p = F/S = - \int_0^{\pi/2} m_1 n \overline{v^2} \cos \varphi d \cos \varphi = \frac{1}{3} n m_1 \overline{v^2}.$$

Za hitrost  $\sqrt{\overline{v^2}}$  molekule vodika in kisika je izračunal 1800 m/s in 500 m/s.

Christophorus Buys-Ballot je leta 1858 izrazil pomislek. Tolikšna hitrost pri premem gibanju molekul naj bi nasprotovala na primer počasnemu širjenju vonjev po zraku in obstojnosti plasti cigaretne dima v zraku. Naslednje leto je Clausius izpodbil pomislek. Molekule se ne gibljejo premo, ampak nenehno trkajo z drugimi molekulami. Izračunal je *povprečno prsto pot molekule* med zaporednima trkoma:

$$\bar{l} = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi(2r_1)^2n} \quad (2).$$

V navadnih okoliščinah je premer molekule majhen v primerjavi s povprečno razdaljo med sosednjima molekulama, povprečna razdalja med sosednjima

molekulama majhna v primerjavi s povprečno prosto potjo in povprečna prosta pot majhna v primerjavi z razsežnostmi posode. *Loschmidtova konstanta*, to je število molekul v plinu pri tlaku 1 bar in temperaturi 0°C, je  $N_L = 2,6867774(47) \cdot 10^{25} / \text{m}^3$ . Z njo dobimo za povprečno razdaljo molekul v trenutni sliki  $\bar{r} = 1/n^{1/3} = 3,3 \text{ nm}$ . Za molekulo s premerom 0,3 nm je povprečna prosta pot v teh okoliščinah  $\bar{l} = 93 \text{ nm}$ .

### Hitrostna porazdelitev molekul

Clausius je privzel, da imajo molekule različno velike hitrosti, a ni povedal nič o tem. Naloge se je lotil James Clerk Maxwell potem, ko je prebral prevod Clausiusovega članka leta 1859. Mimogrede je popravil Clausiusovo enačbo (2):

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi(2r_1)^2n}. \quad (3)$$

V predavanju leta 1859 in v članku naslednje leto je dognal, da so "hitrosti porazdeljene po enaki enačbi kot napake v teoriji najmanjših kvadratov." Naj bo  $N$  celotno število delcev in naj jih  $Nw(v_x)dv_x$  ima komponento hitrosti med  $v_x$  in  $v_x + dv_x$ ,  $Nw(v_y)dv_y$  komponento hitrosti med  $v_y$  in  $v_y + dv_y$  in  $Nw(v_z)dv_z$  komponento hitrosti med  $v_z$  in  $v_z + dv_z$ . Komponente hitrosti so med seboj neodvisne, zato je število molekul s komponentami hitrosti na navedenih pasovih enako  $Nw(v_x)w(v_y)w(v_z)dv_xdv_ydv_z$ . Če odleti iz izhodišča  $N$  delcev sočasno, je njihova gostota  $Nw(v_x)w(v_y)w(v_z)$ . Ker so koordinatne osi usmerjene poljubno in je pomembna le razdalja od izhodišča, mora veljati:

$$w(v_x)w(v_y)w(v_z) = f(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = f(v^2).$$

Funkcionalna enačba ima rešitev  $w(v_x) = Ce^{-v_x^2/\alpha^2}$ ,  $f(v^2) = C^3e^{-v^2/\alpha^2}$ . Izbrali smo negativni eksponent, ker bi rešitev s pozitivnim eksponentom lahko narasla čez vsako mejo. Iz tega izhaja  $w(v_x) = (N/\alpha\sqrt{\pi})e^{-v_x^2/\alpha^2}$ . Velikost hitrosti med  $v$  in  $v + dv$  ima del molekul  $(Ndv/\alpha^3\sqrt{\pi^3})e^{-v^2/\alpha^2}$ . Povprečna velikost hitrosti je  $\bar{v} = 2\alpha/\sqrt{\pi}$ . Povprečni kvadrat hitrosti  $\overline{v^2} = \frac{3}{2}\alpha^2$  je po pričakovanju večji kot kvadrat povprečne velikosti hitrosti. Iz zadnje zveze sklepamo, da je  $\alpha^2 = 2kT/m_1$ .

Pozneje z izpeljavo ni bil zadovoljen. Leta 1866 je našel boljšo. Molekuli imata pred trkom hitrosti  $v'_1$  in  $v'_2$  in po trku hitrosti  $v_1$  in  $v_2$ . Njun trk je prožen in pri njem se ohrani skupna kinetična energija obeh molekul:  $v'^2_1 + v'^2_2 = v^2_1 + v^2_2$ . Porazdelitev molekul po hitrosti se v povprečju zaradi

trkov ne sme spremeniti:  $w(v_1'^2)w(v_2'^2) = w(v_1^2)w(v_2^2)$ . Zahteva pripelje do prejšnje enačbe.

Maxwell je obdelal še *transportne pojave* difuzijo, viskoznost in prevajanje toplote in je za *difuzijsko konstanto*, *viskoznost* in *toplotno prevodnost* dobil:

$$D = \frac{1}{3}\bar{l}\bar{v}, \quad \eta = \rho D, \quad \lambda = \rho c_V D.$$

Povprečna prosta pot je obratno sorazmerna z gostoto plina, tako da je njen produkt z gostoto neodvisen od tlaka in temperature. Zato sta viskoznost in toplotna prevodnost plinov neodvisni od tlaka. Odvisni sta le od temperature, ker je povprečna hitrost odvisna od temperature, specifična toplota pa je približno konstantna. Za viskoznost se je o tem prepričal z merjenjem in iz izmerjenih podatkov izračunal povprečno prosto pot 56 nm. Za toplotno prevodnost je to naredil Jožef Stefan v letih 1872 in 1875.

### Loschmidtov račun

Prvo oceno velikosti molekul, ki so ji zaupali, je naredil leta 1865 Joseph Loschmidt (1821 do 1895). Clausiusovo enačbo za povprečno prosto pot je pomnožil z  $r_1$  in z imenovalcem in dobil za polmer molekule:  $r_1 = 4 \cdot \frac{4}{3}\pi r_1^3 n l$ . Gostota kapljevine  $\rho_k$  in gostota plina  $\rho$  ob vrelišču sta v obratnem razmerju prostornine kapljevine  $V_k$  in prostornine plina  $V$ . Vzemimo, da se molekule v kapljevini dotikajo in je prostornina kapljevine  $V_k = (2r_1)^3 N$ , če je v njej  $N$  molekul. Razmerje  $N/V = n$  pa je enako gostoti molekul v plinu s prostornino  $V$ . Tako je razmerje gostot  $\rho_k/\rho = 1/\frac{6}{\pi} \cdot \frac{4}{3}\pi r_1^3 n = 2\pi l/3r_1$ . Povprečno prosto pot izračunamo iz enačbe za viskoznost  $\eta = \frac{1}{3}\rho l \bar{v}$  in namesto povprečne hitrosti  $\bar{v}$  upoštevamo kvadratni koren iz povprečja kvadrata  $\sqrt{v^2}$  iz enačbe za tlak plina  $p = \frac{1}{3}\rho \overline{v^2}$ . Tako dobimo za polmer molekule:

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

Z današnjima podatkom za viskonost plinastega vodika  $\eta = 6,67 \cdot 10^{-6}$  kg/(m·s) in gostoto tekočega vodika 1,14 kg/dm<sup>3</sup> pri vrelišču 90,2 K sledi za polmer vodikove molekule 0,15 nm. Loschmidt je navedel prevelik polmer "molekule zraka" 0,6 nm. Gostoto tekočega zraka je ocenil, ker dotlej zraka še niso utekočinili.

V letih 1870 in 1871 se je ocene po podobni poti lotil tudi lord Kelvin. Sklenil je, da je polmer molekule vode vsekakor večji kot 0,025 nm. Leta 1872

je Jožef Stefan zagotovil, da “pri povečanju površine kapljevine za presek ene molekule porabimo enako energijo, kot da bi spremenili v paro eno molekulo”. Za polmer molekule vode je prav tako navedel premajhen polmer 0,3 nm.

### Spor

Fizikalni kemik Wilhelm Friedrich Ostwald (1853 do 1932), matematik Georg Helm (1851 do 1923) in nekateri drugi “energetiki” so v energiji videli osrednjo fizikalno količino in v energijskem zakonu osrednji zakon narave. Odklonili so misel na atome kot delce z maso in velikostjo. Glavno vodilo jim je bila Helмова knjiga *Nauk o energiji* iz leta 1887, v kateri je pisec zapisal: “Energija je resnični element sveta, ker vse, kar vemo, vemo preko energije.” Energetiki so bili prepričani, da kemijske izkušnje popolnoma izčrpa pojem mola. Iz ozadja jih je pri tem podpiral Ernst Mach. Leta 1895 so se zapletli v srdit spor z mlajšimi fiziki, ki jih je vodil Ludwig Boltzmann.

Nekateri vidijo vzrok za spor v številnih prejšnjih nepremišljenih in neutemeljenih izjavah fizikov o atomih. Toda po letu 1865 in posebno po letu 1870 so se množili poskusi, pri katerih so z različnimi prijemi dobili podatke za polmer atomov, ki so se bolj in bolj ujemali. Leta 1895 so lahko dvomili v obstoj atomov le tisti, ki niso spremljali razvoja.

### Brownovo gibanje

H koncu spora je prispevalo *Brownovo gibanje*. Škotski zdravnik in botanik Robert Brown (1773 do 1858) je leta 1827 z mikroskopom opazoval, kako so se delci cvetnega prahu v kapljici vode neurejeno gibali sem in tja. Podobno je ugotovil za delce steklenega in kamnitega prahu. Pojava sprva niso znali pojasniti. Potem je Albert Einstein (1879 do 1955) leta 1905 objavil članek, v katerem je ponudil razlago z možnostjo za merjenje Avogadrove konstante. Leto prej je Maryan von Smoluchowski (1872 do 1917) podal manj izdelano razlago.

Do razlage pripeljejo štirje koraki. V prvem koraku si mislimo, da mikroskop z navpično optično osjo na vodoravnem zaslonu naredi sliko, na kateri zaznamujemo lego delca na začetku pri  $t = 0$  in v enakomernih časovnih razmikih po  $\Delta t$ . Tako dobimo množico točk, katerih zveznice projiciramo na os  $x$ . V vodoravni ravnini so vse smeri enakopravne, zato to os lahko izberemo poljubno. Če se delec znatno premakne navzgor ali navzdol, uide iz vidnega polja.

Zaznamujmo lego delca v času 0, v času  $\Delta t$ , v času  $2\Delta t$  in tako dalje. Projekcija prvega premika na os  $x$  meri  $x_1$ , projekcija drugega  $x_2$  in tako

dalje. Premiki na eno stran so enako verjetni kot premiki na drugo, tako da je povprečni premik, ki ga dobimo, ko seštejemo premike v času  $\Delta t$  za veliko število delcev in delimo s številom premikov, enak 0. Kvadrirajmo premik in izračunajmo povprečje kvadrata premika  $\overline{x_1^2}$ ,  $\overline{x_2^2}$ , ... Vsi so enaki:  $\overline{x_1^2} = \overline{x_2^2} = \overline{x^2}$ . Na gibanje v kakem časovnem razmiku prejšnje gibanje tega delca ne vpliva. Delec "pozabi", kaj se je z njim dogajalo prej. Seštejmo premika v zaporednih časovnih razmikih. Za skupni povprečni kvadratni premik dobimo  $\overline{(x_1 + x_2)^2} = \overline{x_1^2} + \overline{x_2^2} = 2\overline{x^2}$ . V povprečju namreč mešani člen  $2\overline{x_1 \cdot x_2}$  nič ne prispeva, ker naletimo na pozitivni produkt enako pogosto kot na negativnega. Za povprečni kvadratni premik po  $\mathcal{N}$  korakih, to je po času  $t = \mathcal{N}\Delta t$ , dobimo  $\mathcal{N}\overline{x^2}$ . Po tem sklepamo, da je povprečni kvadratni premik sorazmeren s časom in je količnik  $\overline{x^2}/t$  za delec z danim polmerom in dano gostoto v določeni kapljevini konstanten.

V drugem koraku uporabimo plinsko enačbo  $p = nkT$  za osmozni tlak v raztopini, če vstavimo za  $n$  gostoto molekul raztopljenе snovi, to je število molekul  $N$  raztopljenе snovi v prostornini kapljevine  $V$ . Privzemimo, da enačba velja tudi za vidne delce v kapljevini, če je  $n$  gostota števila delcev ali kratko gostota delcev.

Vzmemimo, da gostota delcev enakomerno narašča v smeri osi  $x$ . Brownovo gibanje nosi delce v smeri osi  $x$  in v nasprotni smeri. Delci, ki se gibljejo v smeri negativne osi  $x$ , prihajajo z območja z večjo gostoto delcev  $n + \Delta n$ , delci, ki se gibljejo v smeri osi  $x$ , pa z območja z manjšo gostoto  $n$ . Zato je prvih delcev več kot drugih in se v smeri negativne osi  $x$  pojavi tok delcev. Gostota tega toka  $j$ , to je število presežnih delcev, deljeno s presekom  $S$  in časom  $t$ , je tem večje, čim večja je razlika gostot  $\Delta n$  in čim manjša je razdalja  $\Delta x$ ; sorazmerna je  $\Delta n/\Delta x$ . Iz tega izhaja *difuzijski zakon* z *difuzijsko konstanto*  $D$ :

$$j = -D \frac{\Delta n}{\Delta x}.$$

Minus opozori na to, da se presežek delcev giblje v nasprotni smeri kot narašča gostota. Enako obliko imata zakona za prevajanje toplote in elektrike.

V tretjem koraku opazujemo prehod delcev skozi presek na sredi prizme. Vzemimo, da je dolžina  $\Delta x$  enaka  $\sqrt{x^2}$ . Tedaj je skozi presek na sredi prizme v levo polovico prizme z desne prešlo  $S \cdot \frac{1}{2}\Delta x \cdot (n + \Delta n)$  delcev in v desno polovico prizme z leve  $S \cdot \frac{1}{2}\Delta x \cdot n$  delcev. Razlika obeh prispevkov se mora ujemati s številom delcev, ki po difuzijskem zakonu v času  $t$  preidejo skozi

srednji presek  $S$ . Iz enačbe  $\frac{1}{2}S\Delta x \cdot \Delta n = StD\Delta n/\Delta x$  izhaja:

$$D = \frac{1}{2} \frac{(\Delta x)^2}{t} = \frac{1}{2} \frac{\overline{x^2}}{t}.$$

Izpeljava ni neoporečna, a jo podpre računanje s porazdelitvijo delcev po kapljevini v odvisnosti od časa.

V četrtem koraku upoštevamo, da gibanju delcev raztopini nasprotuje upor kapljevine. Za upor kroglice s polmerom  $r_1$ , ki se s hitrostjo  $v$  giblje po kapljevini z viskoznostjo  $\eta$ , uporabimo Stokesov linearni zakon  $F_1 = 6\pi r_1 \eta v$ . Na levi osnovni ploskvi prizme ustreza delcem tlak  $p$ , na desni v oddaljenosti  $\Delta x$  pa  $p + \Delta p$ . Razliko sil  $S(p + \Delta p) - Sp = S\Delta p$  uravnovesi skupni upor vseh delcev v kapljevini:  $n(S\Delta x)F_1$ . Tako dobimo  $nF_1 = \Delta p/\Delta x$ . Izraza izenačimo ter upoštevamo  $D$  in  $F_1$  ter plinsko enačbo in dobimo za gostoto toka delcev, če se ne menimo za predznak:

$$j = nv = \frac{nF_1}{6\pi r_1 \eta} = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{1}{6\pi r_1 \eta} = \frac{kT}{6\pi \eta r_1} \frac{\Delta n}{\Delta x}.$$

Z difuzijskim zakonom nazadnje dobimo za Avogadrovo konstanto:

$$N_A = \frac{R}{k} = \frac{RT}{3\pi \eta r_1 (\overline{x^2}/t)}.$$

Napovedi so čez nekaj časa sprožile obsežna merjenja.

### Perrinova merjenja

Najobsežnejšo vrsto merjenj je opravil Jean-Baptiste Perrin (1870 do 1942) s sodelavci. Med letoma 1908 in 1911 je izmeril količnik  $\overline{x^2}/t$  za nekaj skupin delcev. Leta 1912 pa je opazoval še *sedimentacijsko ravnovesje*. Za makroskopske delce, ki lebdijo v plinu ali v kapljevini, je uporabil barometriško enačbo. Po njej pri konstantni temperaturi tlak v plinu in gostota plina pojemata eksponentno z višino  $\rho(z) = \rho' e^{-z/z'}$ , če je  $z' = p'/\rho g$ . Gostoto plina  $\rho$  nadomestimo pri makroskopskih delcih z gostoto števila delcev  $n(z)$  in izrazimo konstanto kot  $z' = kT/m_B g$ . Pri tem je  $m_B$  efektivna masa delcev, to je razlika teže in vzgona:

$$m_B = V(\rho - \rho') = \frac{4}{3} \pi r_B^3 (\rho - \rho_k).$$

V njej je  $r_B$  polmer delca,  $\rho$  njegova gostota in  $\rho_k$  gostota kapljevine ali plina. Tako je dobil za Avogadrovo konstanto:

$$N_A = \frac{R}{k} = \frac{RT}{m_B z' g} = \frac{3RT}{4\pi r_B^3 g (\rho - \rho') z'}.$$

Konstanta  $z'$  je merila okoli  $10 \mu\text{m}$  in ni bilo težko z mikroskopom zasledovati porazdelitve delcev po višini. Mikroskop je naravnaval tako, da je ostro videl delce v določeni globini.

Perrin in sodelavci so uporabili delce smol gumi-gut in mastiks. Delce ene skupine z enakim polmerom so dobili tako, da so alkoholni raztopini smole primešali vodo. Delci so imeli polmer od  $0,1 \mu\text{m}$  do  $1 \mu\text{m}$ . Merili so v vodi, v kateri so včasih raztopili kako sol, da so povečali gostoto, in z delci dima v zraku. Tako so v dokaj širokem obsegu spreminjali polmer kroglic, gostoto kapljevine in njeno viskoznost. Iz dobljenih podatkov so izračunali Avogadrovo konstanto, ki je bila za 6 % do 30 % prevelika. Za povprečje vseh merjenj so navedli  $6,9 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Pozneje so drugi raziskovalci pri takih merjenjih dobili manjšo Avogadrovo konstanto, a še vedno večjo od današnje vrednosti. Merjenje Perrina in sodelavcev s preprosto fizikalno zasnovano je naposled prepričalo zadnje dvomljivce, da so sprejeli zamisel o atomih in molekulah kot delcih z maso in velikostjo.

---

Ločljivost elektronskega mikroskopa izračunamo z enačbo  $0,61\lambda/\sin u$ . Vstavimo de Broglievo valovno dolžino  $\lambda_B = h/\sqrt{2me_0U}$ . Pri veliki pospeševalni napetosti  $U$  moramo upoštevati še relativistični popravek. Pri napetosti milijon voltov nanese to 1,43 v imenovalcu. Elektronski mikroskop lahko zajame le zelo ozek curek elektronov. Zato numerična odprtina ne preseže 0,001. Pri napetosti milijon voltov tako dosežemo ločljivost 0,4 nm. Vendar z običajnimi presevnimi elektronskimi mikroskopi ni bilo mogoče “videti” atomov in molekul. Atome z veliko maso, na primer torija ali urana, je uspelo “videti” s tipalnimi elektronskimi mikroskopi. Pri tem zelo ozek curek elektronov, denimo s premerom mikrometra, otipa vzorec. Merilniki zaznavajo tok sipanih in odbitih elektronov in s kombinacijo obeh tokov preko računalnika napajajo katodni oscilograf, katerega zaslon elektronski curek otipa enako, kot curek elektronov otipa vzorec. Z elektronskim tunelskim tipalnim mikroskopom, ki izkorišča tunelski pojav med kovinsko ostjo in kovinsko podlago, pa je mogoče “videti” posamične atome. S sunki napetosti med konico in podlago jih je mogoče tudi prenašati. Izdelali so tudi *mikroskop na atomsko silo*. Preko površja vzorca drsi drobna igla. Poskrbijo, da se sila na iglo in s tem razmik med konico igle in površjem vzorca ne spremninja.

Ernst Ruska je leta 1986 dobil polovico Nobelove nagrade za fiziko za temeljno delo v elektronski optiki in izdelavo prvega elektronskega mikroskopa leta 1931. Drugo polovico nagrade sta si razdelila Gerd Binnig in Heinrich Rohrer za izdelavo tunelskega tipalnega mikroskopa. Binnig je pozneje razvil

tudi mikroskop na atomsko silo.

---

#### LITERATURA

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures in Physics*, Vol. I, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1963, str. 1-2.
- [2] Gerald Holton, Stephen Brush, *Concepts and Theories in Physical Science*, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1973, str.188.
- [3] J. Strnad, *Prve ocene velikosti molekul*, Obzornik mat. fiz. **52** (2005) 2-6; V. F. Weisskopf, *Search for simplicity*, Am. J. Phys. **53** (1985) 19; *Search for simplicity: The size of molecules revisited*, Am. J. Phys. **53** (1985) 618.
- [4] A. Marchand, J. H. Weijs, J. H. Snoeijer, B. Andreotti, *Why is surface tension a force parallel to the surface?*, Am. J. Phys. **79** (2011) 998.