

Atom – od hypotézy k jistotě

(ke 170. výročí objevu Brownova pohybu)

Aleš Lacina, Přírodovědecká fakulta MU v Brně

I když každý řadový občan "ví", že látky mají nespojitou strukturu, jen málokdo je schopen toto konstatování podpořit přesvědčivými argumenty. Většina lidí na existenci atomů prostě věří a považuje ji za nepopíratelný fakt, který žádné zdůvodnění nepotřebuje. Právě tímto způsobem je totiž jeden z nejzávažnějších přírodovědných poznatků, jichž lidstvo dosáhlo, standardně prezentován ve školním vzdělávání: jako v podstatě axiomatické tvrzení - nanejvýš okořeněné zmínkou o "starých Řecích", případně efektními, avšak pro laika nesrozumitelnými frázemi o nejmodernějších experimentálních technikách. Teprve na základě takto vštípené hotové představy o stavbě látek se přistupuje k výkladu (zpravidla značně sugestivnímu) některých jevů, z nichž by ovšem drtivou většinu bylo možné vyložit i jiným způsobem. A byla to právě možnost alternativního výkladu, která vedla ještě na počátku našeho století řadu velmi kvalifikovaných přírodovědců k pochybnostem o existenci atomu.

Článek se zabývá moderní historií atomistické koncepce. Podrobně sleduje a komentuje zejména nejdůležitějších sto let postupného vývoje této představy - od položení základů chemického atomismu na přelomu osmnáctého a devatenáctého století až po teoretickou a experimentální analýzu Brownova pohybu, provedenou v prvních letech století dvacátého, která byla všeobecně uznána za první nesporný důkaz částicové struktury látek.

Již staří Řekové ...

Vlastnosti předmětů okolního světa a jejich vzájemné souvislosti zajímaly člověka odnepaměti. Snaha o jejich pochopení přivedla záhy první vzdělance i k úvahám o možném vztahu mezi vnějšími projevy a vnitřní stavbou látek. Už čtyři sta let před naším letopočtem řecký filosof Demokritos z Abdér (asi 460 - asi 370 př. n. l.) učil, že vše existující (země, voda, vzduch, oheň, rostliny, zvířata, i lidské tělo a duše) se skládá z droboukých neměnných částic - atomů (řecky atomos = nedělitelný) - a všechny jevy a změny, probíhající ve světě, připisoval jejich pohybu. Pro správné hodnocení těchto představ - v obecné formulaci tak podobných představám dnešním - je třeba zdůraznit, že starověcí atomisté uvažovali čistě **spekulativně** a svoje vývody nespojovali s žádným pozorováním. Na otázku o dělitelnosti látek, pokud už byla položena, se dalo v zásadě odpovědět jen dvojím způsobem. A obě odpovědi se také objevily.

"Dělíme-li", píše Demokritos, "kousek látky nejostřejším nožem, jaký si lze představit, dojdeme nakonec k částicím, které již nelze dále dělit. To jsou atomy."

Vrcholným představitelem konkurenčního názoru, považujícího naopak látku za dělitelnou neomezeně, se stal Demokritův krajan Aristoteles (384 - 322 př. n. l.) a bylo to jeho učení, které - podporováno církví - ovládlo celý středověk.

Ani pozdější následovníci prvních atomistů nebyli dlouho s to postavit tuto koncepci na solidnější - přírodovědecký - základ. Vcelku lze říci, že od oživení atomistické ideje na sklonku sedmnáctého století až do začátku dvacátého století, kdy byla existence atomů prokázána přímými experimenty, vycházelo toto pojetí jen ze snahy o redukci mnohotvárnosti a proměnlivosti světa na pohyb neměnných stavebních elementů, s cílem popsat co nejvíce jevů jednotným způsobem.

První úvahy o tepelných jevech

Z přírodovědeckého hlediska stojí z pozdějších atomistických snah za zmínku první pokusy Boyleovy (1672 - 1691) a Newtonovy (1642 - 1727) interpretovat teplo jako vnitřní pohyb, které ještě nebyly ovšem ani náznakem konzistentní kinetické teorie. Skutečný pokrok v rozvíjení této koncepce znamenaly až práce Bernoulliovy a Lomonosovovy. Daniel Bernoulli (1700 - 1782) ztotožnil ve své *Hydrodynamice* (1738) vzduch s "*pružnou kapalinou*", jejíž částice se "*neobyčejně rychle pohybují v různých směrech*" a na základě tohoto **modelu** odvodil již dříve experimentálně objevený zákon Boyleův (1662) - Mariottův (1676) (pro zadané množství plynu a neměnnou teplotu je součin tlaku a objemu konstantní). Stanovil při tom i vztah mezi rychlostí pohybu částic (předpokládal, že se pohybují všechny stejně rychle) a zahřátím plynu a vysvětlil tak zvyšování jeho pružnosti při zahřívání. O několik let později (1745 - 1747) vytváří Michail Lomonosov (1711 - 1765) - na základě **hypotézy**, že teplo je formou pohybu stavebních částic těles - víceméně důsledný mikroskopický popis, z něhož vyplynula celá řada jak kvalitativních, tak kvantitativních závěrů. Přestože Lomonosov spojoval - jak dneska víme, nesprávně - teplo pouze s rotačním a vibračním pohybem částic (jejich translaci vůbec neuvažoval), byl schopen vysvětlit například pružnost plynů a předpovědět i odchylky od Boyleova - Mariottova zákona způsobené konečnou velikostí molekul. (Dnes se tato odchylka popisuje korekcí b ve Van der Waalsově rovnici.)

Po celé následující století byl při studiu tepelných jevů preferován makroskopický přístup fenomenologické termodynamiky, který (mikro)strukturu látek - ať už by byla jakákoli - nebere vůbec v úvahu. Jeho úspěšnost, prakticky demonstrována zejména řadou bezprostředních technických aplikací, vyvolala oprávněné uspokojení, které vedlo u některých badatelů až ke snaze o jeho absolutizování. Na druhé straně ovšem vědce nutila hledat případné hlubší příčiny jeho univerzálnosti. Mezi nejradikálnější, a velmi vlivné, představitele první skupiny patřili například z fyziků Ernst Mach (1838 - 1916), z chemiků pak Wilhelm Ostwald (1853 - 1932), kteří jakékoli úvahy o struktuře látek striktně odmítali jako zbytečné a nepodložené spekulace. Vůdčí ideou druhého směru byla naopak atomistická koncepce.

Geometrická krystalografie

Nezávislým podnětem k úvahám o vnitřní stavbě látek se stala geometrická pravidelnost krystalů. Jejich tvary a vlastnosti vždy přirozeně přitahovaly lidskou pozornost a byly proto i z různých hledisek studovány. Poněvadž však získané dílčí poznatky nebyly nijak systemizovány upadaly velmi rychle v zapomenutí, aby byly později znovu nezávisle objevovány jinými badateli. Tak na základě skutečnosti, že krystaly téže látky vykazují - bez ohledu na svoji velikost - tutéž symetrii, vyslovil Robert Hooke (1635 - 1703) **domněnku**, že jsou pravidelným vrstevnatým uspořádáním drobných částic, aniž by věděl, že stejné myšlenky využil už roku 1611 Johann Kepler (1571 - 1630) k vysvětlení šestiúhelníkového tvaru sněhových vloček. K témuž názoru dospěl o něco později na základě vlastních výzkumů také Christiaan Huygens (1629 - 1695) a podobným způsobem uvažovali i mnozí jiní. Za zakladatele vědecké krystalografie je ale považován až René Just Haüy (1743 - 1822), který tuto poněkud spekulativní představu podpořil empirickým zjištěním, že krystaly lze poměrně snadno štípat podél určitých význačných směrů. Postupné štípaní krystalu na

menší a menší části by mělo, podle něj, nakonec přivést k nejmenšímu stavebnímu bloku. Těsným naskládáním takových bloků (v dnešní terminologii elementárních buněk) vedle sebe vysvětloval naopak vznik krystalů a jejich geometrické vlastnosti. Úvahy - byť jen na úrovni dohadů - o vnitřní struktuře těchto bloků jsou ovšem až pozdějšího data (Seeber 1824).

Chemický atomismus

Přibližně v téže době, kdy Haüy položil svými pracemi základy geometrické krystalografie, byla vzkříšena atomistická koncepce i v chemii. V prvních letech devatenáctého století vytvořil John Dalton (1766 - 1844) kvantitativní teorii chemických reakcí spočívající na **postulátu** o existenci atomů - nezničitelných a nestvořitelných - které jsou v chemických reakcích zcela určitým způsobem spojovány či naopak rozlučovány. Z této myšlenkové konstrukce se dala přímo vyvodit řada dříve empiricky zjištěných zákonů (zachování hmoty - Lavoisier 1789, stálých poměrů slučovacíh - Proust 1799, násobných poměrů slučovacíh - Dalton 1802), na druhé straně však existovaly i spolehlivé experimentální závěry, které s Daltonovou představou o atomové struktuře látek slučitelné nebyly (zejména zákon jednoduchých objemových poměrů slučovacíh pro plyny - Gay-Lussac 1808). Tento rozpor vyřešil již roku 1811 Amedeo Avogadro (1776 - 1856) **hypotézou**, že základními částicemi všech látek (a to i prvků) nejsou nedělitelné atomy, jak předpokládal Dalton, ale částice z atomů složené - totiž molekuly a že stejné objemy plynů obsahují (za stejného tlaku a teploty) stejné počty těchto molekul. Tato domněnka, která se o hodně později, po mnohostranném ověření, stala - pod názvem Avogadrův zákon - základem molekulové teorie látek, však většině tehdejších chemiků nebyla známa a zasvěcená část chemické obce se k ní několik desítek let stavěla velmi zdrženlivě. Jedním z důvodů tohoto váhání byla nepochybně velká Daltonova autorita, i když nekonzistentnost některých jeho závěrů byla současně zdrojem téměř všeobecných pochybností. Zřejmě nejvíce ovšem situaci komplikoval fakt, že se vědecká komunita dlouho nedokázala sjednotit ani na pojmech, pomocí nichž se představy o nespojitě struktuře hmoty vyjadřovaly. To, co jedni označovali za atom, jiní nazývali molekulou a ještě jiní částicí. Fyzikové si představovali atomy jinak než chemici a mnozí, jak již bylo řečeno, dokonce nevěřili na jejich reálnou existenci, považující je pouze za pomocné představy.

Molekulárně-kinetická teorie

Z fyziků začal mikroskopické pojetí znovu rozvíjet Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822 - 1888), který je znám jako jeden z hlavních tvůrců termodynamiky. V článku *O povaze pohybu, který nazýváme teplem* (1857) sice zdůrazňuje, že jeho předcházející termodynamické výzkumy jsou zcela obecné a nevyžadují žádnou konkrétní představu o povaze tepla, na druhé straně však přiznává, že si ji už na jejich počátku vytvořil. Jeho nová teorie plynů, kterou sám nazývá "*kinetickou*", **předpokládá**, že plyn sestává z molekul, pohybujících se přímočaře s konstantní rychlostí, která se mění při srážkách s jinými molekulami nebo nepropustnou stěnou. Tlak plynu Clausius vysvětluje nárazy molekul na stěny nádoby a vyjadřuje jej matematicky pomocí jeho objemu a střední hodnoty vnitřní energie. Na Clausiovy průkopnické práce navázal James Clerk Maxwell (1831 - 1879), jenž v roce 1860 odstranil z kinetické teorie plynů provizorně zavedenou hypotézu, že všechny molekuly mají stejně velkou rychlost a nahradil ji

zákonem rozdělení rychlostí, který dnes nese jeho jméno. S tímto výpočetním aparátem se podařilo získat řadu velmi působivých výsledků, například odvodit stavovou rovnici ideálního plynu $pV = \text{konst.}T$, která byla - v poněkud odlišném tvaru - nalezena již dříve (1824 Carnot, 1834 Clapeyron) empiricky.

Tyto nesporné úspěchy však nejsou tak přesvědčivým argumentem ve prospěch atomistické koncepce, jak by se mohlo na první pohled zdát. Na výsledcích by se totiž nic nezměnilo, pokud bychom ve svých úvahách snížili hmotnost každé částice na polovinu a jejich počet zdvojnásobili nebo hmotnost zredukovali na třetinu a počet ztrojnásobiliDokonce by bylo možné pokračovat tímto směrem až k limitě nekonečného počtu nekonečně malých částic, což by ovšem nebylo ničím jiným než přechodem ke konkurenční představě spojitého rozložení hmoty.

Základy statistické mechaniky

Završením molekulárně-kinetické teorie plynů je dílo Ludwiga Eduarda Boltzmannova (1844 - 1906). V letech 1868 - 1871 se Boltzmann v řadě prací pokoušel zobecnit Maxwellovo rozdělení podle rychlostí na případ, kdy se plyn nachází ve vnějším silovém poli a odvodil tak rozdělení, které se označuje jeho jménem. Tento výsledek svým významem daleko přesáhl konkrétní problematiku, v jejímž rámci byl odvozen a spolu s dalšími Boltzmannovými teoretickými pracemi se stal základem mnohem obecnější fyzikální disciplíny - statistické mechaniky. Je smutnou ironií osudu, že právě úvahy rozvíjené v těchto pracech, vycházející z **předpokladu** nespojitě struktury látek, se staly za Boltzmannova života terčem ostré kritiky. Již zmínění jednostranní přívrženci makroskopického přístupu, popírající samu existenci atomů, stavěli snahy o molekulárně-kinetický výklad termodynamických zákonů na roveň zdiskreditovaným pokusům o vysvětlení vlastností elektromagnetického pole pomocí mechanického modelu éteru, označovali je za nevědecké a kategoricky je odmítali. Boltzmann, který neustálými, často značně nevybíravými, útoky velmi trpěl, roku 1904 v předmluvě ke druhému dílu svých *Přednášek o molekulární teorii plynů* píše:

"... Jsem přesvědčen, že tyto výpady pramení z nepochopení a že význam kinetické teorie dosud není doceněn. Podle mého názoru bude pro vědu velikou ztrátou, jestli se jejím současným oponentům podaří dosáhnout toho, aby upadla v zapomenutí, podobně jako se to - díky Newtonově autoritě - dočasně stalo s vlnovou teorií světla. Plně si uvědomuji bezmoc jednotlivce hájícího svůj názor proti mínění většiny. Aby však lidstvo, až se jednou ke kinetické teorii vrátí, nemuselo znovu objevovat už známé věci, budu se snažit vyložit její nejobtížnější a nejméně pochopitelné partie co nejsrozumitelněji."

Boltzmannova slova o budoucnosti kinetické teorie byla prorocká. Špatně odhadl jenom dobu, za niž se prokázala správnost jejích předpokladů. Když roku 1906 ukončil - v duševní depresi - dobrovolně život, zbývaly pouhé dva roky do experimentálního důkazu existence atomů.

Hypotéza nebo jistota?

Až do roku 1908 tedy byla představa o částicové struktuře látek (atomistická koncepce) pouze nadějnou hypotézou, která rozdělovala tehdejší vědeckou komunitu na svoje nadšené příznivce, zaryté odpůrce a ovšem také váhavý zbytek. Současná učebnicová literatura tuto skutečnost příliš nereflektuje: tvrzení o existenci atomů

zpravidla servíruje jako odvěkou pravdu - holý fakt, v nejlepším případě doplněný stručnou zmínkou o Daltonově atomismu (učebnice chemie), případně výkladem molekulárně-kinetické teorie látek (učebnice fyziky). Tato témata sice mohou posloužit jako podpůrné argumenty atomistické koncepce, spolehlivým prubířským kamenem však samy o sobě nejsou. Na základě shody teoretických předpovědí s experimentálními výsledky lze totiž usuzovat pouze na přijatelnost použitého teoretického popisu pro uvažovanou experimentální situaci. Dostatečně široký okruh experimentů, v nichž se určitá teorie osvědčila zajisté posiluje naši víru v její správnost (jsme-li ochotni věřit), jednoznačnou přednost před případnými alternativami bychom jí však měli dát až na základě experimentu, který současně diskvalifikuje její konkurentky. V případě sporu mezi diskrétní a spojitou představou o stavbě látek se stal tímto arbitrem právě Brownův pohyb.

Brownův pohyb a jeho Perrinova analýza

Názvem Brownův pohyb se označuje neustálý chaotický pohyb malých částic (o průměru řádově 10^{-6} - 10^{-7} m) rozptýlených v kapalině nebo plynu. Pojmenování tohoto jevu je počtou anglickému botanikovi Robertu Brownovi (1773 - 1858), který jej roku 1827 náhodně objevil při zkoumání vodní suspenze pylových zrn mikroskopem. Sám objevitel považoval tento pohyb nejprve za projev života, zopakováním pokusu s částicemi minerálního původu však dostal stejný výsledek.

Přestože byl tento jev nečekaný (podle představ mechaniky tekutin měla každá částice v závislosti na své hustotě buď klidně klesat nebo stoupat), vzbudil minimální pozornost a byl dlouho téměř všeobecně považován za analogii známého vířivého pohybu prachových částic (pozorovatelného v ostrém světle), který je způsoben slabými vzdušnými proudy vyvolanými nevelkými rozdíly teploty a tlaku.

Ve druhé polovině devatenáctého století se však objevil i konkurenční názor, zastávaný téměř bez výjimky badateli, kteří studovali jev podrobněji. Jeho východiskem byl **předpoklad**, že kapalina, v níž se Brownova částice nachází, má sama korpuskulární (molekulovou) strukturu. Je-li povrch této částice velký, silové účinky nárazů molekul kapaliny z různých směrů jsou navzájem v rovnováze a pohyb Brownovy částice nevyvolají. Pokud je však její povrch menší, nepravidelnosti v počtech molekul dopadajících na ni z různých stran se již navzájem nevykompenzují. Výsledná síla, působící na Brownovu částici, je v tomto případě nenulová a neustále se mění, jak co do směru, tak co do velikosti, což má za následek její chaotický pohyb.

Mezi oběma alternativními názory na podstatu Brownova pohybu rozhodla - po řadě předchozích prací věnovaných dílčím problémům - důkladná teoretická a experimentální analýza tohoto jevu provedená roku 1908 Jeanem Baptistem Perrinem (1870 - 1942). Perrin se ztotožnil s molekulárně-kinetickou představou, kterou formulovala již řada badatelů před ním (Wiener 1863, Exner 1867, Carbonelle 1870, Gouy 1888). Na rozdíl od nich - a dnešních učebnic - se však nespokojil se závěrem, že existence Brownova pohybu je teoretickým důsledkem nepotvrzené hypotézy o částicové struktuře látek

existence molekul (atomů)

hypotéza

=>

existence Brownova pohybu

(teoretický) důsledek

ale vůbec poprvé logický sled obrátil, takže tvrzení o korpuskulární struktuře látky se v jeho úvaze objevilo jako teoretický důsledek experimentálně zjištěné existence Brownova pohybu

existence molekul (atomů)

(teoretický) důsledek

<=

existence Brownova pohybu

experimentální fakt

Tento argumentační klenot je vhodné ocitovat přímo z Perrinovy práce *Brownův pohyb a molekulární realita*:

"... Skutečně překvapivé a nové je na Brownově pohybu to, že nikdy neustává. Na první pohled se zdá, že jeho existence odporuje naší každodenní zkušenosti s třením. Nalejeme-li například kbelík vody do vany, považujeme za přirozené, že zanedlouho pohyb kapaliny ustane. Rozeberme si však, jakým způsobem se ustaví tento zdánlivý klid. Zpočátku mají všechny části vody přibližně stejně velké a stejně orientované rychlosti. Tento řád se naruší v okamžiku, kdy některé z nich narazí na dno vany a odrazí se od něj do různých směrů s různými rychlostmi, aby se srazily s další kapalinou, která je odrazí zas do jiných směrů. Tak se brzo po dopadu všechny části vody ještě pohybují, ale teď už musíme sledovat dosti malý objem kapaliny, chceme-li, aby rychlost ve všech jeho bodech měla stejný směr a velikost. O tom se snadno přesvědčíme, vhodíme-li do kapaliny několik drobných tělísek: uvidíme, že se navzájem pohybují stále neuspořádaněji a neuspořádaněji.

To, co nyní vidíme, pokud můžeme vůbec ještě něco rozlišit, není vymizení pohybu, ale jeho čím dál chaotičtější rozdělení do menších a menších částí kapaliny.

Pokračuje tato chaotizace donekonečna? Abychom mohli odpovědět na tuto otázku, nebo abychom alespoň mohli studovat proces chaotizace co nejdéle, musíme namísto pouhého oka použít k pozorování mikroskop a jako detekčních zrníček užít mikroskopických částic. Tím dospějeme k podmínkám, v nichž se pozoruje Brownův pohyb, při čemž zjišťujeme, že chaotizace pohybu, tak zřejmá v běžných měřících našeho pozorování, nepokračuje bez omezení a že na mikroskopické úrovni se ustaví rovnováha mezi korelací a chaotizací. ...Zřejmě se nelze vyhnout následujícímu závěru:

Poněvadž chaotizace pohybu v kapalině nepokračuje donekonečna, ale od určité úrovně již neroste, musí se kapalina ve skutečnosti skládat ze zrníček či molekul, které se mohou vůči sobě navzájem libovolně pohybovat, do jejichž vnitřku však již pohyb být přenesen nemůže. Pokud by takové molekuly neexistovaly, pak by chaotizace pohybu musela pokračovat bez omezení. ..."

Po tomto sice přesvědčivě znějícím, ale jen kvalitativním rozboru Perrin pokračuje kvantitativní analýzou jevu. V jejím rámci nejprve ukazuje, že soubor Brownových částic, vznášejících se v kapalině, se chová ve všem všudy jako ideální plyn, což mu dále umožňuje snadno vyjádřit Avogadrovu konstantu pomocí makroskopicky měřitelných veličin (koncentrací Brownových částic ve dvou různých výškách preparátu, velikosti Brownových částic a hustoty kapaliny i materiálu Brownových částic). Po jejich důvtipném, pečlivém a velice pracném experimentálním určení - při němž všechny veličiny měřil na různých vlastnoručně připravených homogenních

emulzích několika nezávislými, často originálními, metodami - získává už jednoduchým statistickým zpracováním pro Avogadrovu konstantu hodnotu $7.05 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Podělením molární hmotnosti touto hodnotou pak stanovil absolutní hmotnosti molekul různých látek (10^{-26} - 10^{-27} kg) a odhadl i průměr molekul různých plynů (10^{-10} m).

Svoje zcela vyčerpávající studium Brownova pohybu Perrin završil (spolu se svým asistentem M. Chaudesaiguesem) experimentálním potvrzením výsledků fyzikálně statistické teoretické analýzy kinetiky tohoto jevu, kterou provedli krátce předtím nezávisle na sobě Marian Smoluchowski (1872 - 1917) a Albert Einstein (1879 - 1955).

Perrinův brilantní rozbor Brownova pohybu je bezesporu mezníkem v nazírání na strukturu látek. Jeho provedením se původní hypotéza změnila v jistotu, což hned v roce 1908 - v novém vydání své knihy *Nárys chemie* - čestně uznal jeden z jejích největších tehdejších odpůrců Wilhelm Ostwald:

"Přesvědčil jsem se, že od nedávna máme experimentální důkaz diskrétní či zrnité struktury látky, který atomová hypotéza marně hledala sta a tisíce let.souhlas Brownova pohybu s požadavky kinetické hypotézy ...opravňuje i toho nejobežřetnějšího vědce mluvit o experimentálním důkazu atomové teorie hmoty. Atomová hypotéza jím byla povýšena na vědecky dobře podloženou teorii."

A atom se stal ústředním pojmem přírodovědy začínajícího dvacátého století.

Rozšiřující literatura:

Již staří Řekové ...

Lucretius Carus Titus: O přírodě. Svoboda, Praha 1971.

Zubov V. P.: Razvitije atomičeskich predstavlenij do načala XIX. veka. Nauka, Moskva 1965.

První úvahy o tepelných jevech

Zajac R., Šebesta J.: Historické pramene súčasnej fyziky 1. Alfa, Bratislava 1990.

Kudrjavcev P. S.: Kurs istorii fiziki. Prosveščeniye, Moskva 1974.

Geometrická krystalografie

von Laue M.: Dějiny fyziky. Orbis, Praha 1963.

Lukáč R.: Všeobecná mineralógia I. Kryštalografia. SPN, Bratislava 1968.

Chemický atomismus

Čeleda J., Kuba J.: Cesta do nitra hmoty. SNTL, Praha 1981.
Brdička R. a kol.: Úvod do fyzikální chemie. SNTL, Praha 1972.

Molekulárně-kinetická teorie

Svoboda E., Bakule R.: Molekulová fyzika. Academia, Praha 1992.
Dorfman J. G.: Vsemirnaja istorija fiziki s načala XIX. do serediny XX. vv. Nauka, Moskva 1979.

Základy statistické mechaniky

Cooper L. N.: Fyzika dlja vseh (Vvedenije v suščnosť i strukturu fiziki)
1. Klassičeskaja fizika. Mir, Moskva 1973.
Reif F.: Statističeskaja fizika. Nauka, Moskva 1972.

Hypotéza nebo jistota?

Einstein A, Infeld L.: Fyzika jako dobrodružství poznání. Orbis, Praha 1962.
Born M.: Pokus a teorie ve fysice. Pokroky matematiky, fysiky a astronomie
IV (1959) 446.

Brownův pohyb a jeho Perrinova analýza

Perrin J. B.: Brownian Movement and Molecular Reality. Taylor and Francis,
London 1910.
Trigg G. L.: Rešajuščije eksperimenty v sovremennoj fizike. Mir, Moskva 1974.
Czudková L.: Perrinova analýza Brownova pohybu. Diplomová práce,
PřF MU Brno 1997.