Fyzika očami laika

„Jen učebnice ideální jsou, a snad též nebe...“
(z básne Johna Updika The Dance of Solids, preklad A.Schutz)

Alenka nebola v krajine zázrakov sama

Učebnice fyziky (a exaktných vied vôbec) mávajú v sebe prísnu harmóniu gotického chrámu. Vznešené, s nárokom na dokonalosť, ale chladné, zachovávajúce si k laickému smrteľníkovi nadradený odstup. S výukou samotnou to býva podobné. Možno nebol Feynman prvý[1], kto sa odhodlal prelomiť ľady, ale určite bol so svojím cyklom knižne vydaných prednášok najúspešnejší. Veda potrebuje poľudštenie, ak ju máme chápať, a ak máme chápať, odkiaľ sa vôbec vzala, čo nám tvrdí, čo dokáže popísať a čo nie.

Keď som ako stredoškolák na hodinách fyziky sledoval výklad vyučujúceho, videl som len matematickú ekvilibristiku. Dlhé odvodenia, riadky vzorcov. Nerozumel som. Kde sa skrýva skutočný svet? Čo má táto kabala symbolov na tabuli spoločné so slnečným dňom a spevom vtákov za oknami triedy? A tak namiesto výletu do ríše divov, Alenka skrytá vo mne spala.

Nevravím, že to bola učiteľova chyba. Možno ja som nebol dosť zrelý. (Neviem, či som dnes.) Možno mi len chýbal Feynman, ktorého prednášky u nás vydali až neskôr. Neviem ako, jedného dňa som tie dvere do trinástej komnaty predsa našiel a aspoň na chvíľku pootvoril. Alenka prešla cez zrkadlo. Rád by som sa s vami podelil o niekoľko svojich dojmov z krátkeho výletu do fyziky, ktorý som podnikol. Ospravedlňujem sa, ak to bude trochu nesúvislé. Bolo to veľmi dávno. Chcem len vybrať pár momentov, ktoré sa mi zdajú inšpirujúce, a ktoré z akýchsi dôvodov zanechali v mojej pamäti stopu.

Viac než o fyzike samotnej to bude o našom nazeraní na svet. O spôsobe, ako chytáme realitu do našich sietí, aby sme jej porozumeli, popísali ju, postrehli súvislosti, a napokon zistili, že cez oká našej siete nám vždy niečo unikne.

Bádateľova motivácia

„Explain all that,“ said the Mock Turtle.
„No, no! The adventures first,“ said the Gryphon in an impatient tone: „explanations take such a dreadful time.“
Lewis Carroll: Alice in Wonderland.

Čo vôbec spôsobuje, že určité percento ľudí hľadá profesionálne vyžitie, potešenie a snáď dokonca zmysel života vo vedeckom bádaní? V dobrodružstvách poznania a v pokusoch o pochopenie a vysvetlenie? Nejde predsa ani o peniaze, ani o fyzické

[1] Prvý samozrejme nebol. Napríklad už Einstein sa snažil o popularizáciu fyziky (S L.Infeldom napísal knižku, ktorá u nás vyšla pod názvom Fyzika ako dobrodružstvo poznania.) Mňa osobne ako prvý dostal Rudolf Peierls knihou Zákony prírody.

pôžitky, dokonca ani o komerčnú zábavu alebo masové športy. Ak láska k vede nie je podivínskou deviáciou, prinajmenšom znamená odchýlku od spoločenského mainstreamu. Čo vedie astronóma k tomu, aby dlhé noci pozoroval hviezdnu oblohu? Čokoľvek predsa objaví, isté je, že svoj objav nebude môcť speňažiť (objav nejakej kométy nemáva vplyv na pozemskú ekonomiku). Ak nejde o peniaze, o čo teda? Niet pochýb, že mohutnou hybnou silou akademických bádateľov je (aj) osobná ješitnosť, snaha tromfnúť kolegov bádajúcich v tom istom obore, lenže podobne ako u horolezcov, usilujúcich sa o prvovýstup v Himalájach, súťaživosť je len jeden aspekt veci, a jej najhlbšej podstaty sa vlastne netýka. (Podobne, ako láska nie je len chemickou hrou hormónov v našom tele.)

Prečo vedec báda? Odpoveď bude asi podobná ako odpoveď na otázku, prečo maliar maľuje obrazy, skladateľ komponuje a sochár opracúva kameň, pričom ani jeden z menovaných si nemôže byť istý ani uznaním, ani pochopením zo strany ostatných; primárne koná pre vlastné potešenie. Je jasné, že takto ponímaná veda či umenie sú vlastne amatérskym koníčkom, a len ak má človek mimoriadne šťastie, poskytne mu jeho záľuba súčasne obživu.

Na margo vedcových motívov S. Chandrasekhar píše[2]: *„Všetci sme vnímaví voči kráse prírody. Nie je prehnané tvrdenie, že určité rysy tejto krásy obsahujú aj prírodné vedy.“*

Čo nás na prírode tak fascinuje? Chandrasekhar, sám nositeľ Nobelovej ceny za fyziku, cituje kolegov podobného kalibru:

„Pretože jednoduchosť a nesmiernosť sú obidve krásne, vyhľadávame väčšinou skutočnosti jednoduché a nesmierne, a tak nachádzame radosť raz v pozorovaní gigantických dráh hviezd, inokedy v pozorovaní cez mikroskop čohosi malého, čo je tiež nesmierne, a napokon v hľadaní stôp minulosti v geologických obdobiach, ktoré nás lákajú svojou odľahlosťou.“ (H. Poincaré)

„Ak nás príroda vedie k matematickým formám veľkej jednoduchosti a krásy – pod formami rozumiem kompaktné systémy hypotéz, axióm, atď. – k formám, s ktorými sa nikto predtým nestretol, nemôžeme sa ubrániť pocitu, že sú „pravé“, že prezrádzajú rýdzi charakter prírody... určite to tiež cítite: takmer desivá jednoduchosť a celostnosť vzťahov, ktoré náhle príroda rozprestiera pred nami a na ktoré nikto z nás nebol ani najmenej pripravený.“ (W.Heisenberg, v debate s Einsteinom)

Nájsť nové skryté súvislosti, nájsť poriadok v chaose je nepochybne opojný zážitok. Keďže však žijeme v krajine, ktorej obmedzené možnosti dávajú nepatrnú nádej na objavenie čohokoľvek zásadného a nového (na druhej strane, v globálnom svete s voľným pohybom osôb by nás to nemuselo až tak trápiť), utešme sa faktom, že nielen objavovanie nového, ale aj pochopenie už známeho (a teda štúdium) môže jednotlivcovi prinášať intelektuálne potešenie. Veda a pokrok síce napredujú, ale každý jednotlivec sám za seba začína vždy od začiatku, a cestou do stavu „zasvätenia“ musí sám prekonať neľahký, často úmorný výstup na vrchol hory, kým je odmenený nádherným výhľadom.

[2] S.Chandrasekhar: Beauty and the Quest for Beauty in Science. Physics Today, Vol.32 (1979), 25-30

Klamlivé kúzlo jednoduchosti

„Keď premýšľam o fyzikálnej teórii, pýtam sa sám seba, či by som stvoril vesmír takýmto spôsobom, keby som bol Bohom.“ (Einstein)

Nemusíte sa venovať štúdiu fyziky dlho, aby ste si uvedomili prekvapujúci paradox. Na jednej strane máte (darom od Newtona, Einsteina a ďalších autorít, bez nároku na copyright či patentové práva) vzorce, kryštálovo jasné a jednoduché (teda, jednoduché v základnom kurze, nemusíme sa hneď baviť o všeobecnej teórii relativity). Na druhej strane je skutočný svet, nádherný, občas i škaredý, ale predovšetkým nekonečne zložitý. Ako je možné z toľkých tvarov, farieb, zvukov, zo západu slnka nad morom, Dalího obrazov či z tanca tanečnice na lane vyabstrahovať niečo tak jednoduché, že to dokážeme popísať strohou rečou matematiky? Samozrejmé to iste nie je.

Keď už spomíname matematiku: mnoho ľudí z nej má posvätnú hrôzu. Mal som tiež. Ale fyzika bez nej by bola ťažkopádna a plná nedorozumení. Kdesi v staroveku posadla ľudí meračská mánia. Nestačilo povedať, že niečo je dlhšie a to druhé kratšie, že tento kameň je ťažší, pohár plnší a tento kôň rýchlejší. Ľudia mali potrebu vyjadriť - *o koľko* dlhší (ťažší, plnší, rýchlejší)? *Koľkokrát* dlhší? A keď už boli na svete merateľné veličiny, skôr či neskôr sa začali hľadať súvislosti medzi nimi. Nepochybne, veď trebárs tlak vzduchu závisí od nadmorskej výšky, a čas pádu kameňa od toho, z koľkého poschodia šikmej veže v Pise ho Galileo hodil.

V určitej fáze základného kurzu fyziky vyzerá všetko tak jednoducho: samé funkcie jednej premennej. Jedna merateľná vlastnosť sveta závisí od inej vlastnosti. Dá sa to pekne nakresliť na papier, dostanete ladnú krivku (či dokonca u lineárnych závislostí priamku, ako trebárs Ohmov zákon), a vzťah oboch veličín sa dá vtesnať do matematického vzorca, ktorý cvičená ruka napíše behom piatich sekúnd. Fascinujúce. Ale potom prídu pochybnosti.

Namiesto dlhých rečí si predstavme konkrétny experiment. Na istom mieste pobrežia chrstneme do mora za vedro vody. Tým nepochybne zvýšime morskú hladinu. O koľko stúpne? A o sto krokov ďalej, kedy a o koľko stúpne aj tam, prechodne, kým prehrmí nami spôsobená prívalová vlna? Žiadny problém. Pozdĺž pobrežia rozmiestnime plaváky sledujúce výšku morskej hladiny, a ku každému priložíme elektronický snímač, zaznamenávajúci výšku hladiny v závislosti od času. (Sme predsa vyzbrojení modernou technikou, nie?) Na našom stanovišti v čase T_0 vlejeme do mora ono vedro vody, a po istom čase sa pôjdeme pozrieť, čo zaznamenali plaváky trebárs kilometer-dva vzdialené. A dozvieme sa napríklad, akou rýchlosťou sa šíria na mori vlny! Teda... naozaj?

Je vám asi jasné, že nezistíme nič. Na mori sú vlny stále, plaváky tancujú. No aj keď ich polohu skúsime spriemerovať alebo vyčkáme pekné bezvetrie, stále stojíme zoči-voči zásadnej ťažkosti: na výšku morskej hladiny vplýva nesmierny počet faktorov. Kdesi na mori zúri búrka a lejú sa doň tisíce kubíkov vody. Inde sa more v poludňajšej žiare pekne vyparuje. Morská hladina pomaly stúpa a klesá s prílivom a odlivom, a vlastne ani vplyv gravitácie Slnka nie je zanedbateľný... Kde sa v toľkých vplyvoch stratí kvapka vody, alebo aj celé vedro? Skutočnosť je taká, že výška plaváka (v hociktorom z našich detektorov) ako merateľná, číslom vyjadriteľná veličina závisí od nekonečného množstva vplyvov, nekonečna iných veličín. Fakticky všetka hmota vo vesmíre a jej pohyb môže mať nejaký (akokoľvek malý) vplyv. A my chceme jednoduchú závislosť, čo sa dá nakresliť na papier...

U priekopníkov rádiového vysielania sa zaužíval termín: stratiť sa v šume. Náš vplyv (našich 10 litrov vody z vedra) sa stratilo medzi porovnateľnými, či oveľa silnejšími vplyvmi. Čo s tým? V našom prípade sú dve možnosti. Jednou z nich je povýšiť náš vplyv, náš experimentálny impulz, nad ostatné vplyvy. Namiesto vedra vody necháme pod hladinou vybuchnúť menšiu nukleárnu nálož, z toho už nejakú merateľnú vlnu vygenerujeme (aké jednoduché je uvažovať o podobných veciach akademicky – vždy som miloval myšlienkové experimenty). Ak nemôžeme ovplyvniť túto stránku veci (atómovú bombu v zmrzlinovom stánku na pláži nemali), existuje druhý prístup, pri niektorých experimentálnych technikách bežný. Zopakujeme náš kýblikový experiment mnohokrát (pričom „mnoho“ môže znamenať značne veľké číslo). Zakaždým uložíme v pamäti počítača záznam o tom, ako sa menila výška konkrétneho plaváku v závislosti od času. Napokon všetky záznamy (vždy začínajúce časom T_0) sčítame a vydelíme počtom meraní. Náhodný šum (ako sú napríklad vlny na hladine) sa občas sčíta a občas odčíta, pretože je náhodný. Ale náš signál (prechodné stúpnutie hladiny vplyvom vedra vyliateho o kilometer ďalej), akokoľvek bude slabý, sa vždy pričíta. Takže ak sme sčítali dosť záznamov, signál zo šumu „vylezie“. Teória hovorí, že pomer signálu k strednej šírke šumu narastá priamo úmerne odmocnine z počtu meraní. Takže ak chcete desaťkrát zreteľnejší signál, zvýšte počet meraní stonásobne. Nejde o to, či by sme mali šancu únosným počtom meraní zachytiť slabučký signál onoho vyliateho vedra. Ide o princíp, ktorý v mnohých prípadoch užitočne funguje (konkrétny príklad: keď získavame subtílne informácie o štruktúre molekúl pomocou tzv. nukleárnej magnetickej rezonancie, čo je nesmierne cenná, ale málo citlivá metóda, sčítanie opakovaných meraní je nevyhnutné).

Je skoro neuveriteľné šťastie, že zavše dokážeme v realite naaranžovať situáciu, keď bude skutočne jedna veličina závisieť od druhej veličiny, *a len od nej* (a vplyv ostatných, teda celého zvyšku vesmíru, bude zanedbateľný).
Spomenuli sme Galileiho, ktorý (vraj) s nákladom kamienkov stúpal na šikmú vežu v Pise; z rôznych poschodí veže (a teda z rôznych výšok) nechal kamene voľne padať na zem, aby skúmal, ako závisí doba pádu kameňa od výšky, z ktorej je vypustený. Merať krátke časy nebolo v tej dobe jednoduché; hodinky so sekundovkou neexistovali, a tak Galilei údajne meral dobu pádu kameňa tým, že počítal údery svojho pulzu. Nepresné, ale nič lepšie vtedy nemal.
Poznáme výsledok: doba pádu kameňa **T** je priamo úmerná druhej odmocnine z výšky **H**:

$$\mathbf{T = K.\sqrt{H}} \qquad \textbf{(1)}$$

(konštanta úmernosti **K** závisí od zemskej gravitácie, a samozrejme od toho, v akých jednotkách meriame čas a vzdialenosť)
Máme skrátka závislosť, akú by sme očakávali pre poctivý rovnomerne zrýchlený pohyb. Bola poznaná súvislosť, matematicky vystihnuteľná v nádherne jednoduchej podobe.

Prečo závisí **T** od **H** práve takto, už bolo námetom pre Newtonovskú mechaniku, takisto ako pozoruhodný fakt, že **T** nezávisí od hmotnosti použitého kameňa – ťažšie i ľahšie kamene padajú rovnako dlho.
Na tomto mieste si však všimnime iný aspekt celej veci: ak by mal Galilei dostatočne presné stopky, takýto krásne jednoduchý vzťah by nedostal. Teda, uvedená rovnica by platila aj naďalej, ak nám odchýlka plus mínus nejaké to percento neprekáža. V čom je problém?
Jednou z komplikácií je odpor vzduchu, ktorý sa prejaví najmä u relatívne malých a ľahkých predmetov (skúste namiesto kameňa vypustiť pingpongovú loptičku – dopadne neskôr než solídne kamene). Dobre, v myšlienkovom (a prípadne i v skutočnom) experimente môžeme nechať predmety padať vo vákuu – tam aj papierová servítka padá ako kameň. Pribudnú však iné komplikácie – napríklad, gravitačné pole na vrchole veže je o čosi slabšie, než dole pri základoch stavby, a hoci tento rozdiel je nepatrný, pre presné merania by sme mali uvažovať, že **K** nie je konštanta, ale (v nej zahrnutá) gravitačná konštanta je funkciou výšky **H**. A teda namiesto jednoduchého vzťahu (**1**) by sme mali riešiť diferenciálnu rovnicu, ktorá poskytne zložitejšiu závislosť **T** od **H**. Nehovoriac o možnom vplyve vesmírnych telies, alebo o tom, že trochu inak dopadne náš pokus v Pise, inak na rovníku a inak na severnom póle. Trebárs na rovníku bude padať kameň o čosi pomalšie vďaka odstredivej sile rotujúcej Zeme (a vďaka Coriolisovej sile ani nebude padať celkom zvislo, hoci na čas **T** to nemá vplyv).

Aké z toho plynie poučenie? Nemalá časť prírody sa síce dá vtesnať do jednoduchých rovníc a zákonov, ale za predpokladu, že najrôznejšie komplikácie a rušivé vplyvy môžeme zanedbať. Vedieť, čo a kedy možno zanedbať, je v skutočnosti vo fyzike jedným z najväčších umení. V prírode máme vždy nekonečný počet premenných. Na zistenie podstatných súvislostí potrebujeme modelové situácie. Matematika je (aj) vedou o modeloch reality, a rozumný model vie pracovať len s konečným a jasne vymedzeným počtom premenných. Takže je osudom fyzika, že skúma zjednodušené modely reality, trebárs hmotné body (nemajú tvar ani rozmery, nemôžu rotovať), dokonale tuhé telesá (nedeformujú sa pôsobením sily), dokonale pružné telesá (deformácia je priamo úmerná pôsobiacej sile) či trebárs ideálny plyn. Je jasné, že fyzikove výsledky potom nebudú vo vzťahu k realite presné, lenže to nie je rozhodujúce – model je užitočný, ak vieme, v akom rozmedzí hodnôt tej-ktorej fyzikálnej veličiny bude dávať užitočné predpovede, to jest, výsledky zaťažené len nejakou bezvýznamnou chybou – pričom veľkosť prípustnej chyby si môžeme stanoviť. Skrátka, ak chceme niečo zistiť, musíme odfiltrovať rušivé vplyvy a nasimulovať situáciu, keď nám príroda môže dať len jednoznačnú odpoveď.

Núka sa však provokatívna otázka. Sú základné zákony prírody jednoduché, alebo si onú jednoduchosť vynucujeme tým, že znásilníme prírodu do pravouhlej súradnicovej sústavy, uzavrieme ju do väzenia nekonečne hlbokej potenciálovej jamy, priškrtíme slnečný jas na jediný tenučký lúč prenikajúci do Newtonovej tmavej komnaty cez dierku v tienidle, a pomocou diferenciálnych operátorov vytlčieme z vlnových funkcií priznanie o vlastných viazaných stavoch hmoty? Stvoril Boh svet tak, aby vyhovel Einsteinovi? V nasledujúcich kapitolách sa pokúsime vniesť do týchto temných záhad trochu svetla.

Zrkadlo našich definícií

„Myslíš si, že zrkadlo ti ukáže skutočnosť? Zrkadlo z Erisedu ti ukáže to, čo túžiš vidieť.“
Joanne Rowling: Harry Potter (voľne citované)

Dívajúc sa na zákony fyziky (tak, ako ich uvádzajú učebnice), čo vlastne vidíme? Prírodu existujúcu nezávisle na našom vedomí, alebo našu predstavu, náš spôsob myslenia a stavania myšlienkových konštrukcií? Skôr či neskôr si študent uvedomí nástojčivosť jednej z najzásadnejších otázok: čo vo fyzike je objektívna realita, a čo dôsledok našich definícií, nášho spôsobu uvažovania a prístupu k problému? Do očí bijúcou sa stáva táto otázka v kvantovej mechanike, kde viedla k rozlišovaniu dvoch druhov veličín: **observable** (reálne fyzikálne veličiny, ktorých hodnoty v princípe možno zistiť meraním) a **non-observable** (naše myšlienkové konštrukcie, ktoré nám poslúžia ako lešenie pri stavbe či ako rebrík pri výstupe; po použití ich môžeme odstrániť). Napríklad vlnová funkcia je non-observable, čo ani neprekvapí, veď vo všeobecnosti je to komplexná veličina (jej hodnoty sú komplexné čísla). Energia či rozdelenie elektrónovej hustoty n-tého orbitalu v akejkoľvek molekule je non-observable. Zato rozdelenie celkovej elektrónovej hustoty v priestore okolo atómov molekuly je pozorovateľná veličina, dá sa zistiť napríklad z difrakcie roentgenového žiarenia.
Otázka objektivity je však vo fyzike všadeprítomná a neobmedzuje sa na kvantovú mechaniku; tu je len vypuklejšia než inde.

Pre potešenie i pobavenie si opäť doprajme experiment; tento krát môže byť aj reálny a ľahko realizovateľný.
Vedec-amatér chce študovať odraz reality v zrkadle, aby porozumel pravidlám zrkadlenia. A tak sa díva sám na svoj odraz a na odraz izby v zrkadle, potom sa odvráti od zrkadla a prezerá si skutočnú miestnosť. Porovnáva realitu a obraz, až si napokon zapíše takúto múdrosť: „Zrkadlo zobrazuje realitu tak, že predmety, ktoré sú v reále hore, budú hore aj v zrkadle, a tie dole budú dole. No všetko, čo bolo v realite vpravo, vidno v zrkadle vľavo a naopak.“ Čosi však nesedí. Nezodpovedaná otázka. Prečo by bola preferovaná akurát pravo-ľavá zámena, kým hore zostalo hore a dole je dole? Na rozdiel od zrkadielka Snehulienkinej macochy, nám zrkadlo na žiadnu otázku neodpovie, a tak musíme záhadu riešiť sami.
Ak je vedec bystrý, zíde mu na um: čo ak sa od zrkadla odvrátim smerom k izbe inak, než zvyčajne? Namiesto otočenia vojenským „čelom vzad“, vedec zakloní hlavu dozadu, tak ďaleko, až vidí izbu, ktorej obraz v zrkadle pozoroval. Ak sa vyhne úrazu, čaká ho prekvapenie: čo bolo v zrkadle vpravo, je teraz aj v reále vpravo, a vľavo je vľavo; zato na rozdiel od prvého prípadu vidí všetko hore nohami. A nasleduje dôležitý poznatok: pravo-ľavá zámena vyplývala z toho, že medzi zrkadlom a realitou sme sa otáčali okolo zvislej osi. Ak sa otáčame okolo vodorovnej osi (napr. zakloníme hlavu), pre zmenu uvidíme zámenu hore-dole. Takže sme neobjavili žiadny nový fyzikálny princíp, ale artefakt, vyplývajúci z nášho prístupu k problému, z nášho spôsobu pozorovania. Hoci sme nič nové neobjavili, tento skoro komický príbeh môžeme chápať ako poučné podobenstvo.

Samozrejme, zrkadlo nám môže poskytnúť skutočné fyzikálne pravdy: napríklad tú, že dopadajúci lúč svetla sa pod rovnakým uhlom odrazí (tak, ako by to urobila i dokonale pružná lopta). Je však celá fyzika takáto jasná a jednoduchá, dá sa zhrnúť do samých podobných pravidiel? Podstatnú časť učebníc vypĺňajú matematické vzorce, teda vyjadrenia kvantitatívnych vzťahov. (Ak zväčším napätie päťnásobne, drôtom preteká päťnásobne väčší prúd. Ak sa kométa vzdiali od Slnka dvojnásobne, príťažlivá sila klesne na jednu štvrtinu. A podobne.) Sú tieto vzťahy absolútne, presné a univerzálne pravdivé? Dajú sa odvodiť z iných, základnejších a všeobecnejších právd? A ak áno, kde sa vzali tie najzákladnejšie pravdy, ktorých pravdivosť nevieme dokázať? Sú to azda zjavenia vyššej moci?

V matematike sa takéto základné a nedokázateľné tvrdenia nazývajú **axiómy**. To je skrátka tak, neriešte to - mykne plecom vedec, zameraný na aplikácie. Ako je to však naozaj? Bol to Poincaré, ktorý si naplno uvedomil tušené: axiómy nespadli z neba, v skutočnosti sú to skryté definície. Niečo „je tak“, pretože my pri budovaní nejakej teórie chceme, „aby to bolo tak“. Pozrite sa na Newtonov zákon sily:

$$\mathbf{F} = m.\mathbf{a} \qquad \textbf{(2)}$$

(Skúsme na chvíľu zabudnúť na komplikácie plynúce z teórie relativity; princíp, o ktorý mi ide, sa nezmení). Tento jednoduchý vzťah tvrdí, že ak na objekt s hmotnosťou **m** pôsobí sila **F**, táto sila vyvolá u objektu zrýchlenie **a.** Pritom zrýchlenie je priamo úmerné pôsobiacej sile.

Poviete si: to je predsa presné a nespochybniteľné, nie? Je to vzťah z iného súdka, než Galileov empirický poznatok o dobe pádu kameňa v zemskom gravitačnom poli (**1**). Žiadne komplikácie ani odchýlky pri presnejších meraniach nepozorujeme. Takže tento zákon môžeme zaradiť medzi akési „absolútne“, presné a univerzálne platné fyzikálne zákony, kým zákony odpozorované z experimentu (a platné len približne) môžeme označiť za empirické (a svojím spôsobom za druhoradé).

Pravdou je, že tento vzťah je presný preto, lebo chceme, aby bol presný. Je to totiž definičný vzťah. Kým zrýchlenie ako pojem sa dá definovať pomocou geometrie a času, Newtonov zákon sily definuje silu (Teda preložený do ľudskej reči nám hovorí: „Sila, to je tá vec, ktorá spôsobuje zrýchlenie v zmysle rovnice (**2**).“), a je to súčasne jeden zo spôsobov, ako definovať hmotnosť – je to miera zotrvačnosti daného telesa (a teda vlastnosť konkrétneho telesa), miera toho, ako veľmi sa určité teleso bráni zmene svojho pohybového stavu účinkom sily.

Takže, ako poznamenáva aj Feynman, tento zákon je skôr návod na poznávanie prírody, konkrétne pohybu a jeho zmien, tým, že priniesol na svetlo sveta novú veličinu – silu.

Podobných príkladov by sme našli viac. **Absolútne platné vzorce definujú určitú veličinu, alebo určitý model reality.** Ako príklad na druhú časť tvrdenia nech poslúži stavová rovnica ideálneho plynu:

$$\mathbf{p.V = n.R.T} \qquad \textbf{(3)}$$

(**P** je tlak, **V** objem plynu, **n** je látkové množstvo plynu v móloch, **T** je absolútna teplota (tá, čo sa meria v Kelvinoch) a **R** je konštanta úmernosti, tzv. plynová konštanta)

Táto rovnica v skutočnosti definuje ideálny plyn. To jest plyn, ktorého molekuly majú zanedbateľný objem v porovnaní s objemom nádoby, kde sa plyn nachádza, a molekuly na seba nepôsobia žiadnymi silami, iba pri bezprostrednej zrážke. Súčasne platí, že molekuly plynu sú dokonale pružné. (Tým sa líšia od bežných telies typu lopta, ktoré pri každej zrážke stratia časť svojej energie premenou na teplo. Hodené lopty sa nebudú od dlážky odrážať do rovnakej výšky, ale po každom dopade vyskočia menej a menej, až zostanú ležať. Naproti tomu, molekuly vzduchu sú očividne dokonale pružné, inak by vzájomnými zrážkami postupne strácali energiu, a napokon by vplyvom gravitácie popadali na zem.) Ak si predstavíme súbor veľkého počtu takýchto pružných teliesok, skutočne môžeme stavovú rovnicu (**3**) odvodiť rýdzo teoreticky, bez akýchkoľvek experimentov – akurát potrebujeme definovať absolútnu teplotu **T** ako veličinu úmernú strednej kinetickej energii molekúl. (Odvodenie (**3**) je vcelku ľahké, čitateľ ho nájde v učebniciach fyziky alebo fyzikálnej chémie.) Akýkoľvek reálny plyn sa však chová podľa tejto rovnice len približne – zhoda bude tým lepšia, čím viac objemu (v porovnaní s vlastným objemom molekúl) má plyn k dispozícii, a čím lepšie možno energiu vzájomného priťahovania molekúl tzv. medzimolekulovými silami zanedbať, v porovnaní s ich kinetickou energiou. Takže na opis reálnych plynov bolo časom nutné hľadať rovnice s dodatočnými korekciami (a teda zložitejšie), ktoré nejakým spôsobom zohľadňovali objem molekúl a sily medzi nimi (najstarším príkladom je tzv. Van der Waalsova rovnica (**4**)).

$$\mathbf{(p + n^2.A/V^2).(V - n.B) = n.R.T} \qquad \mathbf{(4)}$$

Dodatočné empirické parametre **A** a **B** možno chápať tak, že $\mathbf{n^2.A/V^2}$ je korekciou tlaku zohľadňujúcou príťažlivé sily medzi molekulami, a **B** je zhruba vlastný (efektívny) objem 1 mólu molekúl. Ako vidíme, korekcia objemu parametrom **B** je ešte jednoduchá; korekcia tlaku však obsahuje veličinu nepriamo úmernú druhej mocnine objemu. Takáto rovnica pri správnej voľbe hodnôt **A** a **B** presnejšie vystihuje chovanie plynu (najmä pri vysokom tlaku a nízkej teplote, kde sú odchýlky od rovnice (**3**) najzreteľnejšie), ale stále nie je úplne presná (úplne presná rovnica, taká, ktorá by opísala aj premenu plynu na kvapalinu, by mala nekonečný počet korekčných členov).

Model ohraničuje oblasť platnosti každého zákona. Vráťme sa ku Galileovi: jeho poznatok, že doba pádu kameňa je priamo úmerná odmocnine z výšky pádu (**1**), platí dokonale a presne v modelovom svete. Konkrétne, ak sme v inerciálnej sústave, ak niet odporu vzduchu, ak je gravitačné pole dokonale homogénne. Zákon platí v realite nepresne zato, že žiadna z týchto podmienok nie je splnená ani splniteľná (alebo len približne). Svet je vždy zložitejší, než naše modely.

Do tretice, doprajme si matematický príklad. Klasická geometria je postavená na axiómach, zvaných Euklidove vety. Tých je dokopy päť (v každej teórii je želateľné, aby počet axióm bol čo najmenší). Dlho sa verilo, že tieto axiómy sú základné, všeobecné a jediné možné pravdy o geometrii nášho sveta, o priestore, v ktorom žijeme. V skutočnosti, Euklidove axiómy definujú geometriu nášho sveta, a sú dobré, pokiaľ takto budovaná geometria vyhovuje našej každodennej skúsenosti s vlastnosťami priestoru. V matematike sú však možné aj hry typu „čo by bolo, keby“. Napríklad, čo by bolo, ak by určitá axióma neplatila – k akému modelu by sme dospeli, aké by mal (podľa prísne logických dôsledkov a odvodení v duchu matematických pravidiel) vlastnosti, a prípadne, či by tento model bol tiež použiteľný na opis reality. Dlho sa verilo, že tzv. neeuklidovská geometria (geometria „krivého priestoru“, kde neplatí, že bodom ležiacim v rovine mimo priamky A možno viesť v tejto rovine *jedinú* priamku B rovnobežnú s priamkou A) je len matematickou hračkou, neopisujúcou reálny svet.[3] Einstein prišiel na to, že použitím takejto geometrie môže vybudovať funkčný model sveta, v ktorom platí všeobecná teória relativity. Vlastne, Einstein mal na výber. Buď ponechá priestor aký je, v zhode s Euklidovou geometriou, a bude musieť pridávať korekčné členy (asi tak, ako sa zo stavovej rovnice ideálneho plynu (**3**) stala Van der Waalsova rovnica (**4**), a potom ešte zložitejšie rovnice), pretože v relativite dochádza napríklad k skráteniu dĺžok pohybujúcich sa telies, a k spomaľovaniu plynutia času vplyvom zrýchlenia (alebo gravitácie, čo je z hľadiska všeobecnej relativity jedno). Druhá možnosť bola, zabudnúť na gravitačné polia a zrýchlenia, a namiesto deformácie telies a spomalenia času uvažovať, že samotný priestor a čas (teda časopriestor) je deformovaný (v prípade priestoru v zmysle neeuklidovskej geometrie). Einstein si vybral druhú možnosť, pretože celok bol matematicky lepšie spracovateľný.

Posledný príklad naznačuje, že pri opise reality si neraz môžeme vyberať z viacerých modelov. Rozhodujúce je len, či všetky modely dajú tie isté (a s experimentom zhodné) predpovede. Napríklad na opis kvantovej mechaniky vypracoval iný matematický aparát Schroedinger, a iný aparát Heisenberg. Fyzici sa trochu zapotili, kým dokázali, že oba prístupy sú v najhlbšej podstate ekvivalentné a vedú k rovnakým predpovediam (fyzikálne správnym). Častejšie sa používa Schroedingerov model, pretože je pre začiatočníka matematicky ľahšie stráviteľný. Žiaľ, všetky uvedené príklady si žiadajú o dosť viac matematiky, než sa (na čitateľovo i moje šťastie) zmestí do takejto eseje.

Poznatok a jeho interpretácia

„...predsa nám táto teória medzi riadkami vraví: „Neberte ma príliš vážne ani doslova. Týkam sa totiž sveta, o ktorom vlastne nehovoríte, keď hovoríte o mne.“
J.R.Oppenheimer (o kvantovej fyzike)

Kedy možno povedať, že určitý fyzikálny problém máme skutočne vyriešený, prebádaný a pochopený? Odpoveď na túto otázku sa stala ťažšou najmä od čias kvantovej fyziky.

Paradoxy kvantovej fyziky nedali spať už oveľa kompetentnejším a pomazanejším hlavám. Mne samému sa ako jeden z najprekvapujúcejších a obor presahujúcich javí nasledovný poznatok: kvantová fyzika nás poučila, že ešte i deje a javy, ktorým *nerozumieme*, dokážeme (niekedy) matematicky správne *opísať*. Dokážeme nájsť taký matematický opis alebo model, ktorý nám dáva správne predpovede. To je prekvapujúci,

[3] Inou dobre známou hračkou sú komplexné čísla. Že takéto fiktívne hračky môžu byť na osoh, sa zistilo napríklad vtedy, keď sa s použitím komplexných čísiel podarilo vyriešiť (napríklad) niektoré dovtedy neriešiteľné diferenciálne rovnice.

takmer šokujúci poznatok. Fyzici nebudú jednotní v tom, či a nakoľko v prípade kvantovej fyziky chápeme, čo sa vlastne deje; tvrdím však, že v najhlbšom filozofickom zmysle slova chovaniu častíc v mikrosvete jednoducho *nerozumieme*.
Chovanie mikrosveta sa skrátka nepodobá ničomu, čo poznáme z každodennej zmyslovej skúsenosti s reálnym svetom, chýba nám teda i predstava, a nerozumieme ani samotnému mechanizmu dejov (a nie je jasné, či mu vôbec môžeme porozumieť). Napriek tomu, vhodným použitím matematického modelu opisujúceho vlnenie, dostali fyzici fungujúci matematický model. V tomto modeli však vystupujú veličiny (napr. vlnová funkcia), ktorých interpretácia je dodnes predmetov sporov. Poviete si: je to tragické? Veď model funguje. To je síce dostatočná útecha pre pragmatika, ale filozoficky uspokojivú odpoveď nemáme. Musíme sa s týmto poznaním uspokojiť? Čas ukáže.

Pozoruhodné je, že niekedy i v prípade veľmi jednoduchých poznatkov (z matematického hľadiska) sa interpretácie líšia od fyzika k fyzikovi, od učebnice k učebnici. Pokúsim sa ilustrovať toto tvrdenie na príklade asi najjednoduchšieho fyzikálneho vzťahu, tak populárneho, že ho občas nosia i študenti na tričkách (bez záruky, že mu rozumejú). Ide o Einsteinov vzťah ekvivalencie hmotnosti a energie, čiže notoricky známe

$$\mathbf{E = m.c^2} \qquad \mathbf{(5)}$$

E je pritom celková (všetka mysliteľná) energia určitého objektu, **m** jeho hmotnosť a **c** rýchlosť svetla vo vákuu. Čo vlastne tvrdí tento vzťah? Že môžeme premieňať hmotnosť na energiu? Že zákon zachovania hmoty ani zákon zachovania energie neplatia, zachováva sa len súčet hmotnosti a energie? Jedno i druhé je omyl. (Bol som šokovaný, že takto interpretuje Einsteinov vzťah aj inak skvelá klasická učebnica fyzikálnej chémie[4])? V skutočnosti platí zákon zachovania hmoty i zákon zachovania energie, každý aj sám osebe, a Einsteinov vzťah (**5**) ich len nerozlučne spája, ako uvidíme. Nezaškodí objasniť si vec bližšie, pretože nás to privedie k jednému zaujímavému poznatku.
Vieme, že v relativite narastá hmotnosť telesa s jeho rýchlosťou, pri bežných rýchlostiach zanedbateľne, ale pri rýchlosti blízkej **c** narastá do nekonečna. A tak, v zhode s rovnicou (**5**), prírastok kinetickej energie **ΔE** spôsobí prírastok hmotnosti telesa **Δm**, pričom platí:

$$\mathbf{\Delta E = \Delta m.c^2} \qquad \mathbf{(6)}$$

A tak nás neprekvapí, že napríklad horúce teleso je (nepatrne) ťažšie, než studené – dodaním tepla sme mu dodali aj zodpovedajúcu dávku hmotnosti, pretože teplo je prejavom pohybu molekúl a atómov v látke, a teda kinetickej energie týchto častíc. Ak sa častice pohybujú rýchlejšie, sú ťažšie, a aj celok navonok musí mať väčšiu hmotnosť. Pritom zákony zachovania stále platia – teplo sme odniekiaľ dodali (napríklad horením paliva). Ochladené spaliny po zhorení majú menšiu energiu, než pôvodné palivo a kyslík, a majú (presne podľa vzťahu (**6**)) menšiu hmotnosť. Suma všetkých hmotností zostala zachovaná, a suma energií takisto.

[4] W.J.Moore: Fyzikální chemie. SNTL Praha 1981, s. 62.

Vzťah (**5**) resp. (**6**) však platí pre každú energiu, nielen kinetickú. Čo sa napríklad stane, ak nabijeme elektrický kondenzátor? (Predstavte si kondenzátor ako dve rovnobežné kovové platničky, plochými stranami blízko seba.) Vlastne sme neurobili nič, len sme preniesli isté množstvo elektrického náboja z jednej platne na druhú (takže jedna je teraz nabitá kladne, druhá záporne). Na to sme museli konať prácu, teda dodať energiu, a podľa Einsteinovho vzťahu aj zodpovedajúcu hmotnosť. Nabitý kondenzátor je ťažší, než nenabitý. Kde sa však táto „hmotnosť navyše“ nachádza? Nič sa tu nepohybuje, teplota platní sa nezmenila, takže o zmene kinetickej energie niet ani reči. Zmenila sa však potenciálna energia, a súčasne pribudlo elektrické pole medzi platňami. Je zrejmé, že práve toto pole je sídlom dodanej energie i hmotnosti. (Pole je síce „riedka“ forma hmoty, ale jeho hmotnosť je nenulová!)
Môžeme nad vecou chvíľu hĺbať, až dospejeme k nasledujúcemu všeobecnému záveru: **Kedykoľvek zvyšujeme v systéme potenciálnu energiu, znamená to, že generujeme pole**.

Nebol by som to ja, ak by som nedodal, že všetko má svoj háčik. Platí toto tvrdenie aj pre gravitačné pole? Veď ono samo je mierou hmotnosti. Existujú navyše modely reality (všeobecná teória relativity), ktoré sa zaobídu aj bez gravitačného poľa. Nakoľko reálne je vôbec gravitačné pole? Prečo sa zatiaľ nepodarilo vypracovať jednotnú teóriu všetkých interakcií, ktorá by zahŕňala aj gravitáciu? A prečo zatiaľ (napriek nemalému úsiliu) neboli pozorované gravitačné vlny (vlnenie gravitačného poľa, podobné elektromagnetickým vlnám)? Dobré otázky, na ktoré ešte nepoznáme odpovede.

Metafora vo fyzike

Tomáš si tehdy neuvědomoval, že metafory jsou nebezpečná věc. S metaforami není radno si hrát. Láska se může narodit z jediné metafory.
Milan Kundera: Nesnesitelná lehkost bytí.

Keď sa pokúšame pochopiť nejaký nový, nám osobne doteraz neznámy alebo nejasný jav, často si pomáhame iným, názornejším a zrozumiteľnejším javom (dúfajúc, že správne odhadneme, pokiaľ siaha analógia). Povedzme, stredoškolák môže mať problém pochopiť vzťah medzi elektrickým napätím (rozdielom potenciálov) a elektrickým prúdom. Azda má problém vytvoriť si predstavu, čo to vôbec napätie je. Napokon, napätie i prúd sú voľným okom neviditeľné.

Vtedy môže učiteľ povedať: pozrite – je to ako so spojenými nádobami, naplnenými vodou. Ak je hladina vody v dvoch nádobách rôzne vysoko, a tieto nádoby spojím hadičkou, bude ňou pretekať prúd vody. Rozdiel výšky hladín je príčinou prúdenia vody, podobne ako rozdiel potenciálov je príčinou elektrického prúdu. V analógii môžeme ísť i ďalej – relatívne široká a krátka hadička prepustí za časovú jednotku viac vody, a prietok bude väčší, než pri dlhej a úzkej hadičke. Podobne má hrubý a krátky kus drôtu (teda vodič) menší elektrický odpor, než tenký a dlhý drôt.

V istom bode však učiteľ musí dodať, že každá analógia je nedokonalá. V prípade prúdenia vody platí lineárny vzťah medzi prietokom a rozdielom hladín len pre tzv. laminárne prúdenie – ak dostatočne zväčšíme rozdiel hladín, použijeme menej viskóznu kvapalinu či zmeníme geometriu hadičky, prúdenie začne byť turbulentné, a lineárny vzťah už neplatí. Naproti tomu, lineárny vzťah medzi napätím a prúdom (Ohmov zákon) platí s dostatočnou presnosťou v širokom rozmedzí hodnôt elektrického prúdu. Iste, ak oba lineárne vzťahy (pre prúdenie vody i pre elektrický prúd) platia len pre istý rozsah hodnôt, možno je to len smola a zhoda okolností, že prúdenie vody je i v bežných situáciách (napríklad v našom vodovode) skôr turbulentné (a teda mimo oblasti lineárneho vzťahu), zatiaľ čo elektrickým prúdom, aké sú v praxi bežné, lineárny vzťah dobre vyhovuje. Ale rozdiely oboch javov sú hlbšie, a čím viac sa zavŕtame do detailov (ako je napr. rýchlostný profil v priereze potrubia resp. vodiča), tým viac rozdielov objavíme; analógia sa rozplýva. Oná metaforická podobnosť funguje len pri pohľade na vec z dostatočnej vzdialenosti, bez zaostrenia na detaily. Z tejto perspektívy môžeme s potešením nájsť ďalšie analogické vzťahy – trebárs šírenie tepla v materiáli možno vystihnúť lineárnym vzťahom medzi tokom tepla a rozdielom teplôt, alebo difúziu látky v roztoku vystihuje lineárny vzťah medzi tokom látky a rozdielom koncentrácií. Je potešujúce, aké rôzne javy možno popísať matematicky podobnými vzťahmi (v tomto prípade vzťahom typu „Zovšeobecnený tok rovná sa zovšeobecnená vodivosť krát zovšeobecnená hnacia sila, daná rozdielom zovšeobecnených potenciálov.“). Podstatné je však aj vedieť, kde podobnosť končí.

Pripomeňme si, že Maxwell sa svojho času snažil vizualizovať elektromagnetické pole pomocou siločiar (prevzatých od Faradaya), pričom hustota siločiar je úmerná intenzite poľa v danom mieste priestoru. V rámci Maxwellovej modelovej predstavy sa pole chovalo ako zvláštna pružná hmota, ktorá sa snaží čo najviac zmraštiť pozdĺž smeru siločiar (aby sa siločiary skrátili), a súčasne sa čo najviac roztiahnuť v smere kolmom na siločiary (aby sa siločiary od seba oddialili); výsledkom týchto snáh sú potom pozorovateľné elektrické a magnetické sily. Analógia s pružnou hmotou (natiahnutou po dĺžke a stlačenou z bočných strán) skutočne po istú úroveň pomáha, umožňuje trebárs predvídať elektromagnetickú indukciu a správne predpovedať smer indukovaného prúdu, ale akonáhle sa pokúšame uchopiť štruktúru poľa, siločiary (či zložitejšie mechanické modely), sú len zavádzaním.

Napokon dodajme, že analógia mnohých fyzikálnych vzťahov z rôznych oblastí vyplýva jednoducho z faktu, že všetky popisované javy sa dejú v našom trojrozmernom priestore. Napríklad gravitačná sila medzi telesami je nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti z rovnakého dôvodu, ako je nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti elektrická sila medzi nábojmi. Teda podobnosť gravitačného a Coulombovho zákona nie je náhoda, ale dôsledok trojrozmernosti priestoru.

Jeden fyzikálny úlet

„That´s enough about lessons," the Gryphon interrupted in a very decided tone: „tell her something about the games now."
(Lewis Carroll: Alice in Wonderland)

Na záver výletov do sveta fyziky by som vám rád porozprával o jednom dobrodružstve, ktoré som na takomto výlete zažil.
Viete, prečo vždy teplo prechádza z teplejšieho telesa na chladnejšie a nie naopak (v klasickej termodynamike ide o axiómu menom druhá veta termodynamiky)? A prečo majú merania zaťažené náhodnou chybou Gaussovo normálne rozdelenie? A ako tieto veci súvisia? Človeka vždy poteší, keď zistí, že napohľad odlišné a nezávislé prejavy či vlastnosti nášho sveta majú spoločnú príčinu. V tomto prípade pôjde o štatistiku a pravdepodobnosť.

Skúsme poslúchnuť Gryphona z horeuvedeného citátu, a venujme sa na chvíľu hrám. Povedzme, keď hádžete kockou (stokrát, tisíckrát,...), budete pozorovať, že približne v jednej šestine všetkých prípadov padla jednotka, v šestine prípadov dvojka, a tak ďalej, až po šestku. Samozrejme, ak by bolo hodov nekonečne veľa, tak každé číslo od jedna do šesť sa v priemere vyskytovalo *presne* rovnako často. Inak povedané: **Výsledkom mnohých náhod je zákonitosť**. Takáto zákonitosť je v jadre veci odlišná od zákonov mechaniky, je o niečom inom. Najpravdepodobnejšia situácia (v našom prípade tá, že každé zo šiestich čísiel sa vyskytlo rovnako často, a teda na každé pripadá šestina hodov) je taká situácia, ktorá sa dá zrealizovať najväčším počtom spôsobov. Čo tým myslím? Buďme leniví a hoďme kocku len šesťkrát (je to predsa ľahšie, než nekonečno...). Je nepravdepodobné, že by šesťkrát padla povedzme jednotka, pretože to sa mohlo udiať len jediným spôsobom – vtedy, ak v každom hode padla akurát jednotka. Prípad, že padla päťkrát jednotka a raz dvojka, sa mohol udiať šiestimi rôznymi spôsobmi (pretože nezáleží na poradí, je jedno, v ktorom hode padla dvojka), a je teda šesťkrát pravdepodobnejší. Dá sa ľahko dokázať, že prípad, keď padlo zakaždým iné číslo (teda každé od 1 do 6 sa vyskytlo raz), sa mohol udiať 720 spôsobmi, pretože $6! = 6.5.4.3.2.1 = 720$. Počet spôsobov označme **W**, teda v poslednom prípade **W**=720
Ak sme nehádzali šesťkrát, ale trebárs šesťdesiatkrát (tu ešte kalkulačka utiahne výpočty), môžeme sa presvedčiť, že počet spôsobov pre najpravdepodobnejšiu situáciu (na každé číslo pripadá jedna šestina zo všetkých hodov, teda 10) stúpa s počtom hodov rýchlejšie, než pre iné, menej pravdepodobné situácie – takže pri veľkom počte hodov sú iné situácie, (odborne: iné *rozdelenia*) z hľadiska pravdepodobnosti zanedbateľné.

Prepáčte toto suché pripomenutie stredoškolskej matematiky. Dôležité je, že štatistiku môžeme použiť na veľký súbor javov alebo veľký počet objektov (napríklad molekúl či atómov – spomeňme si, že trebárs 18 gramov vody, teda jeden mól vody, obsahuje $6{,}023.10^{23}$ molekúl). A keďže teplo je prejavom pohybu atómov a molekúl v látkach, neprekvapí, že aj na teplo sa vzťahujú zákony štatistiky. A ak máme v prípade dvoch telies k dispozícii dané celkové množstvo tepla, výpočtom vyjde, že najpravdepodobnejšia situácia je tá, kedy majú obe telesá rovnakú teplotu (preto prúdi teplo z teplejšieho telesa na chladnejšie, nie naopak – je to pravdepodobnejšie). Toto odvodenie už nie je celkom jednoduché (odporúčam najprv si pozrieť, ako sa odvodí Boltzmannovo rozdelenie energií častíc pre veľký súbor, napríklad pre plyn), treba povedať, že sa vlastne hľadá maximum veličiny zvanej entropia – pritom entropia je v skutočnosti len zlogaritmovaný počet spôsobov, ktorými možno zrealizovať dané rozdelenie ((teda **ln W** ; pre účely termodynamiky sa tento logaritmovaný počet spôsobov ešte násobí Boltzmannovou konštantou, aby sedeli rozmery, ale to je technický detail). Kde dosiahne maximum počet spôsobov (**W**), dosiahne maximum aj logaritmus počtu spôsobov (**ln W**), teda aj entropia – inak povedané, najpravdepodobnejšia situácia má najväčšiu entropiu.

Pojem entropie pôvodne vzišiel z klasickej náuky o teple a jeho premenách (teda z termodynamiky), súvis so štatistikou odhalil Boltzmann, ale v skutočnosti sa entropia uplatní všade, kde ide o veľké súbory a pravdepodobnosť. Raz sa mi dostal do rúk veľmi podnetný článok na túto tému[5]. Článok okrem iného tvrdil, že pomocou princípu maximálnej entropie je možné odvodiť Gaussovo normálne rozdelenie (známa zvonovitá krivka). Normálne rozdelenie sa v matematike/fyzike vynorí v rôznych situáciách, ale odvodenie jeho vzorca pomocou princípu maxima entropie má zásadný význam – ukazuje totiž fyzikálny pôvod normálneho rozdelenia. Skrátka, toto rozdelenie je (pri danej hodnote rozptylu, resp. strednej kvadratickej odchýlky) najpravdepodobnejšie, dá sa uskutočniť najväčším počtom spôsobov (hodnota **W** je väčšia, než pre akékoľvek iné rozdelenie). V článku nebolo uvedené detailné step-by-step odvodenie, a prezradím vám, že som sa s príslušným matematickým dôkazom pekne zapotil – bolo to dosť na hranici mojich vtedajších matematických vedomostí (a za hranicou dnešných), ale málokedy ma úspech tak potešil. Je vždy fajn, keď porozumiete novej a pritom zásadnej veci.

Vlastne by som tu mohol skončiť, ale dlho mi nedala spať jedna špekulatívna úvaha.
Zásadnú úlohu v kvantovej fyzike zohrávajú takzvané vlnové funkcie. Vlnová funkcia určitého objektu či systému (napríklad elektrónu v atóme vodíka) obsahuje všetky informácie o tomto objekte; ak ju poznáme, stačí na vlnovú funkciu použiť vhodný diferenciálny operátor, a získame tzv. vlastné hodnoty fyzikálnych veličín, ktoré nás zaujímajú (napríklad energia) a sú v princípe merateľné (observable). Z toho vyplýva, že nájsť vlnovú funkciu je dôležité. Tam, kde sa to dá matematickým (analytickým) odvodením, sa vlnová funkcia získa ako riešenie (pre daný systém vhodne upravenej) Schroedingerovej rovnice.

Vlnová funkcia sa v priestore mení od miesta k miestu (je funkciou polohových súradníc), a vo všeobecnosti závisí aj od času; výnimkou sú vlastné či viazané stavy (stojaté vlny), u ktorých vlnová funkcia od času nezávisí (napríklad vlnová funkcia elektrónu v atóme vodíka pre jednotlivé energetické hladiny).
Pozoruhodné je, že vlnová funkcia[6] je tiež určitý druh rozdelenia – chápe sa ako rozdelenie pravdepodobnosti výskytu príslušnej častice v priestore, čiže kde má funkcia

---

[5] S.Guiasu, A.Shenitzer: The Principle of Maximum Entropy. The Mathematical Intelligencer, Vol **7** (1985), 42-48.
[6] Presnejšie, toto platí pre druhú mocninu vlnovej funkcie, či vo všeobecnosti pre jej súčin s komplexne združenou funkciou.

vyššie hodnoty, sa častica vyskytuje s vyššou pravdepodobnosťou. Zišla mi na um zvláštna otázka (nie je mi známe, či ju doteraz niekto vyriešil). Totiž, či sa vlnová funkcia nedá nájsť aj inak, než riešením Schroedingerovej rovnice – napríklad pomocou princípu maximálnej entropie, alebo pomocou nejakého analogického variačného princípu. Ide síce o jedinú časticu, a nie o veľký súbor objektov, ale to, čo hľadáme, je v zmysle zaužívanej interpretácie rozdelenie pravdepodobností.

Mohlo by azda aj na úrovni molekúl, atómov či ešte menších častíc platiť, že „*výslednicou mnohých náhod je zákonitosť*", ako to bolo uvedené o pár riadkov vyššie? Kde, na akých nižších úrovniach by sa vzalo také množstvo náhod? Je to samozrejme rýdza špekulácia, ale ak by existovalo niečo ako „základný šum hmoty", ktorého mierou nech je trebárs Planckova konštanta, potom by bolo prinajmenšom predstaviteľné, že dôsledkom tohto šumu sú isté stabilné rozdelenia (vlastné stavy, zodpovedajúce kvantovaným energetickým hladinám, a ktoré majú súčasne maximálnu entropiu).

Nemal som poňatia, či táto moja laická špekulácia obsahuje nejaké zdravé jadro, ktoré môže slúžiť ako impulz k hľadaniu alternatívnych teórií. Neskôr som však čítal o takzvanej de Broglie-Bohmovej interpretácii kvantovej fyziky, čo je pozoruhodná alternatíva k mainstreamovej, tzv. kodanskej interpretácii. De Broglie-Bohmova teória obsahuje isté myšlienky[7], ktoré sú mi sympatické (a náhodou sú blízke mojej vlastnej špekulácii), a podstatné je, že nie je v rozpore s výsledkami experimentov; jej rozdiel oproti bežnému ponímaniu kvantovej fyziky je možno len filozofický (aspoň na dnešnej úrovni poznania). To je aj dôvod, prečo je uvedená teória na okraji záujmu súčasných fyzikov – tých totiž väčšinovo zaujímajú skôr aplikácie a nové objavy. Fungujúcu teóriu v rukách majú, a po jej najhlbšej filozofickej pravdivosti sa takmer nikomu nežiada pátrať.[8] Škoda, že nie som fyzik. Je to jedna z veľmi zaujímavých otázok, ktoré by ma pravdepodobne zamestnávali.

Medze nášho poznania v kvantovej fyzike sú určitým spôsobom znepokojujúce. Ak môžeme hovoriť len o pravdepodobnostiach, nie o istotách, že sa to či ono stane, ako je to s determinizmom? Je beh tohto sveta do posledného detailu vopred určený počiatočnými parametrami vesmíru (a teda to, čo nazývame náhoda, je v skutočnosti len naša nevedomosť o príčinách), alebo naozaj existuje akýsi nevypočítateľný šum hmoty, ktorý priebežne mieša karty? Či snáď sedí na druhej strane pomysleného zrkadla osobne Boh? Nastavuje skryté parametre, a tým ovplyvňuje vývoj sveta i bez toho, aby musel konať zázraky (ak pod zázrakom chápeme jav, ktorý sa prieči fyzikálnym zákonom)? Je fyzika kompetentná zodpovedať i takéto (filozofické, náboženské) otázky?

Odpoveď nepoznám, a nie som sám. V zbierke Murphyho zákonov možno nájsť aj takéto konštatovanie: *„Sú veci, o ktorých nevieme zistiť vôbec nič. A nevieme ani zistiť, ktoré*

---

[7] V de Broglie-Bohmovej teórii nemá vlnový charakter samotná častica, ale takzvané vodiace pole, ktoré sa šíri ako vlna – častica sama však vždy existuje a je detegovaná ako častica, čo je v zhode s experimentom. Že toto vodiace pole má vlnový charakter, je v tejto teórii dôsledkom pôsobenia „skrytých parametrov".

[8] Pokiaľ som schopný to posúdiť, o rozvoj de Broglie-Bohmovej teórie s použitím princípu maxima entropie sa pokúša A.Valentini (Physics Letters A, Vol **156** (1991), 5-11. (Žeby som nebol jediný, komu tento prístup zišiel na um?)

veci to sú.“ V súvislosti s predošlými úvahami som si spomenul na skvelý film Creator, kde Peter O´Toole ako geniálny, i keď svojský profesor biológie vraví o budúcnosti vedy kolegovi: *„I tell you Sid, that one of these days we'll look in to our microscope and find ourselves staring right into God's eyes, and the first one who blinks is going to lose his testicles.”*

Takto odľahčene by sme mohli celú vec nechať plávať. Ale dal by som veľa za to, keby som sa mohol dozvedieť, ako sa veda bude dívať na interpretáciu kvantovej fyziky o nejakých sto-dvesto rokov.

Záverečné poznámky

Alice thought to herself: „I don´t see how he can ever finish, if he doesn´t begin.“
Lewis Carroll: Alice in Wonderland

Vlastne som ani poriadne nezačal, a už sa dostávam na koniec tejto skromnej eseje.
Ak má byť fyzika súčasťou modernej kultúry (a tou podľa Feynmana nepochybne je, i keď ju väčšina populácie takto nevníma), musí sa dať vyložiť aj v reči bežného človeka, nielen strohým jazykom matematiky. Zhrniem už povedané: ak neexistuje aspoň kvalitatívne slovné vysvetlenie, znamená to, že danému javu v skutočnosti celkom nerozumieme. Fakt, že máme teóriu a matematický aparát, ktorá dáva správne predpovede, sám o sebe nestačí. Presnejšie, stačí v pragmatickom, ale nie vo filozofickom zmysle. Z dôsledne pragmatického hľadiska je dokonca samotná pravdivosť teórie nepodstatná; dôležité je len, či nám výpočet podľa takejto teórie poskytne správne čísla.

Čo však mám na mysli, ak hovorím o pravdivosti? Predstavme si príklad: všetci vieme, že existuje gravitačná sila, vďaka ktorej sa všetky hmotné telesá vzájomne priťahujú. A vďaka ktorej predmety voľne pustené padajú na zem. Stačí však, že vám na jarmoku nafúkajú balónik héliom, vy ho pustíte, a namiesto pádu nadol balón vyletí hore. Ak by bol fyzik rýdzo pragmaticky založený, a pozadie, podstata javov či pravdivosť ho nezaujímajú, kľudne by mohol vysloviť nasledovnú teóriu: „Gravitácia existuje príťažlivá i odpudivá, závisí to od konkrétnej látky. Sú látky, napríklad hélium, vodík, a ešte zopár ďalších plynov, ktoré sú od Zeme odpudzované. Táto odpudivá sila je príčinou, že balón naplnený takouto látkou letí hore, preč od Zeme.“
Čuduj sa svete, hoci takáto teória je falošná a nepravdivá (veď vieme, že balón v skutočnosti letí nahor, pretože ho vytláča od neho ťažší vzduch, ktorý sa tlačí na jeho miesto), v istom rozsahu experimentov bude aj takáto teória dávať správne predpovede. Trebárs väčší balón bude tlačený nahor väčšou silou, čo môže byť interpretované ako väčšie odpudzovanie. Verím, že čitateľ by vedel vymyslieť experiment na vyvrátenie takejto teórie. Problém je v tom, že nie vždy musí byť falošnosť teórie taká zjavná. A faktom zostáva, že čím bližšie sme k súčasnej hranici poznania, tým opatrnejší musíme byť; stále hrozí, že (ako povedal rabín na smrteľnej posteli) „všetko je inak“.

Máme naše teórie, matematické modely, pokúšame sa pomocou nich pochopiť a vysvetliť svet. Niekedy sa zamotávame do vlastných konštrukcií, a viac než o svete a prírode sa dozvedáme o našom spôsobe myslenia. Ale nič lepšie nemáme, ak sa chceme spoliehať na vlastný rozum. Mohli by sme vedu ignorovať a dívať sa na svet trebárs z pohľadu (ľubovoľného) náboženstva. Sme slobodní, svetonázor si môžeme vybrať. Isté však je, že vedecké uchopenie reality (tak, ako ho poznáme od čias Descarta, Galileiho a osobitne Newtona) umožnilo pokrok v technológiách, ktorý nás ako civilizáciu posunul ďalej. Neriešim otázku, či sme vďaka tomu šťastnejší. Poznávať svet je však jednoducho zaujímavé, a to aj bez ohľadu na možné aplikácie.

Bolo mi potešením, môcť podniknúť aspoň krátky exkurz do ríše fyziky. Ako skúsenosť to bolo fascinujúce. A tak každému, kto sa chystá na podobný výlet, želám šťastnú cestu, a prajem mu, aby došiel ďalej, než sa podarilo dôjsť mne.