Juraj Tekel

# FYZIKA V SLEPÝCH ULIČKÁCH

EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020

MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

*Juraj Tekel*

# FYZIKA V SLEPÝCH ULIČKÁCH

**Mgr. Juraj Tekel, PhD.**, je teoretický fyzik. Pôsobí na Katedre teoretickej fyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Vo svojej vedeckej práci sa venuje aspektom teórií definovaných na priestoroch s pozmenenou štruktúrou na krátkych vzdialenostiach, ktorú predpovedá spojenie kvantovej mechaniky a teórie gravitácie. Je zodpovedným riešiteľom projektu grantovej agentúry VEGA s názvom Kvantová štruktúra časopriestoru. Na fakulte tiež vyučuje a venuje sa popularizácii fyziky a vedy všeobecne.

Voľný čas mu vypĺňa z veľkej časti športovanie, v čase vydania tejto knihy najmä trailový beh.

*Juraj Tekel*

# FYZIKA V SLEPÝCH ULIČKÁCH

EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020

MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Podpora národného systému pre popularizáciu výskumu a vývoja (kód ITMS: 313011T136), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.
Investícia do Vašej budúcnosti

**FYZIKA** ***V SLEPÝCH ULIČKÁCH***

Autor textu: Mgr. Juraj Tekel, PhD.
Obrázky, ilustrácie: podľa zoznamu na s. 140 – 144

Na redakčnej príprave diela spolupracovali:
Mgr. Renata Józsová, Mgr. Lucia Kralovičová

Zodpovedný redaktor: Mgr. Stanislav Muntág
Jazyková redaktorka: Elena Režná
Grafická úprava a príprava tlačových podkladov: Ing. Roman Krause
Tlač: KASICO, a. s., Bratislava

Vydalo Vydavateľstvo Matice slovenskej, s. r. o.
www.vydavatel.sk
pre Centrum vedecko-technických informácií Slovenskej republiky.

Prvé vydanie
Nepredajné

© Centrum vedecko-technických informácií Slovenskej republiky 2021

**ISBN 978-80-8115-314-3**

# Obsah


***Na úvod*** . . . . . 7

***Aristotelovská fyzika*** . . . . . 9

***Planéta Vulkán*** . . . . . 23

***Existencia atómov*** . . . . . 33

***O povahe svetla*** . . . . . 47

***Zloženie atómov*** . . . . . 63

***Éter*** . . . . . 81

***Kozmologická konštanta*** . . . . . 95

***Tmavá hmota a tmavá energia*** . . . . . 109

***Teória strún*** . . . . . 123

***Na záver*** . . . . . 139

***Zdroje obrázkov a ilustrácií*** . . . . . 140

# Na úvod

V škole sa toho učíme veľmi veľa a často aj veľmi veľa zaujímavého. Vesmír sa rozpína, ľudia pochádzajú z Afriky, jadro atómu sa skladá z protónov a neutrónov, Cyril a Metod sa spájajú s rokom 863... V prírodných vedách je okrem prirodzenej otázky „Ako to je?“ zaujímavá aj otázka „Ako na to ľudia prišli?“ Odpovede sú zakódované v mnohých prekvapivých a čiastkových náznakoch, ktoré nám príroda ponúka, a preto nie je vždy jasné, ako informáciu použiť.

V tejto knižke sa pozrieme na niekoľko momentov z histórie fyziky, pri ktorých cesta k prírodným zákonom nebola ani zďaleka priamočiara. Niekedy blúdili celé generácie, niekedy iba jeden človek. Niektoré blúdenia správne nasmerovala jedna konkrétna informácia, niekedy debata prebiehala desaťročia. Budeme svedkami mnohých z najvýznamnejších a najprekvapivejších momentov z histórie fyziky a na záver si povieme, ako v ďalších otázkach blúdime ešte aj dnes. Hlavne zistíme, že veda nie je jeden víťazný pochod za poznaním a slávou, ale skôr predieranie sa džungľou a úspech jedného stojí na práci či na produktívnom neúspechu iných.

Výber tém, ktorým sa v knihe budeme venovať, je veľmi subjektívny, iný autor alebo autorka by si takisto zvolili svoje. Mne sa pozdávali práve tieto. Nie je ich príliš veľa, aby bol priestor ísť aj do hĺbky a naučiť sa niečo zo samotnej fyziky. Témy tvoria akýsi jednoliaty celok a navzájom sa dopĺňajú. Preto nepokračujú úplne chronologicky, sú usporiadané v logickej nadväznosti.

Skôr ako začneme, chcel by som sa poďakovať ľuďom, ktorí mi (nielen) pri práci na tejto knižke veľmi pomohli. Za diskusie a výborné nápady k rôznym častiam textu veľmi pekne ďakujem Peťovi Matákovi, Janovi Smrekovi, Lukášovi Konečnému, Samovi Beznákovi, Fricovi Valachovi, Samovi Kováčikovi a Peťovi Bálintovi. Ďakujem aj kolegom z Katedry teoretickej fyziky a ďalších pracovísk Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave, od ktorých som sa veľa naučil. Redakcii časopisu Quark a Vydavateľstvu Matice slovenskej ďakujem za veľmi príjemnú spoluprácu. Ministerstvu školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Európskemu fondu regionálneho rozvoja ďakujem za spolufinancovanie projektu, vďaka ktorému mohla vzniknúť táto publikácia. Za dlhodobú podporu srdečne ďakujem Antonovi Zajacovi. Rodičom Danke a Milanovi ďakujem za všetko, čo pre mňa spravili. Julke ďakujem za každý jeden spoločný deň a za trpezlivosť a starostlivosť pri písaní tejto knihy.

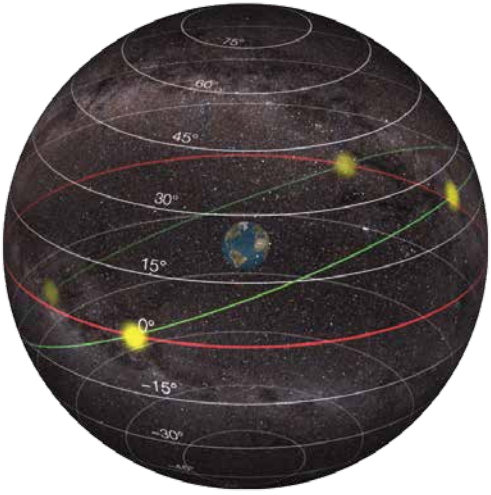
# Aristotelovská fyzika

Začneme na úplnom začiatku fyziky. Ako veda o neživej prírode vznikla v antike a dlho sa vyvíjala spoločne s filozofiou. Jej prvé solídne základy položil v štvrtom storočí pred naším letopočtom starogrécky filozof Aristoteles (384 – 322 pred n. l.). Ľudia si však svet okolo seba detailnejšie všímali už oveľa skôr.

## Planéty

Prekvapivo veľa o svete okolo nás vieme vďaka tomu, že sa naši predkovia pozerali na nočnú oblohu. A aj na pochopenie toho, prečo Aristoteles a nasledovatelia jeho myšlienok o prírodných zákonoch nakoniec nemali pravdu, budeme potrebovať celú slnečnú sústavu.

Nočná obloha je posiata obrovským množstvom drobných svetielok a ľudia si už veľmi dávno všimli, že oblohu si môžu predstaviť tak, že sa okolo Zeme otáča obrovská sféra, na ktorej sú tieto svetielka a hýbu sa spolu s ňou. Spolu s touto sférou sa otáča aj Slnko, preto sa strieda deň s nocou. Ale Slnko nie je na túto sféru úplne fixované a pomaly sa po nej pohybuje. V rôznych obdobiach roka sa nachádza na rôznych miestach, napríklad inde zapadá v zime, inde v lete. A v lete vidno na oblohe iné hviezdy ako v zime.




Zem v strede sféry stálic. Zelenou je vyznačená trajektória Slnka, ekliptika. Sféra stálic sa okolo Zeme otočí raz za 24 hodín, Slnko navyše spraví za 365 dní jednu kompletnú cestu po ekliptike.

Slnko na pozadí hviezd urobí jednu kompletnú otočku za približne 365 dní. Toto číslo ľudia poznali oddávna s veľmi dobrou presnosťou. Dráha, po ktorej sa Slnko medzi hviezdami pohybuje, sa nazýva ekliptika. Prechádza cez dvanásť súhvezdí, ktoré sú známe ako súhvezdia zverokruhu.

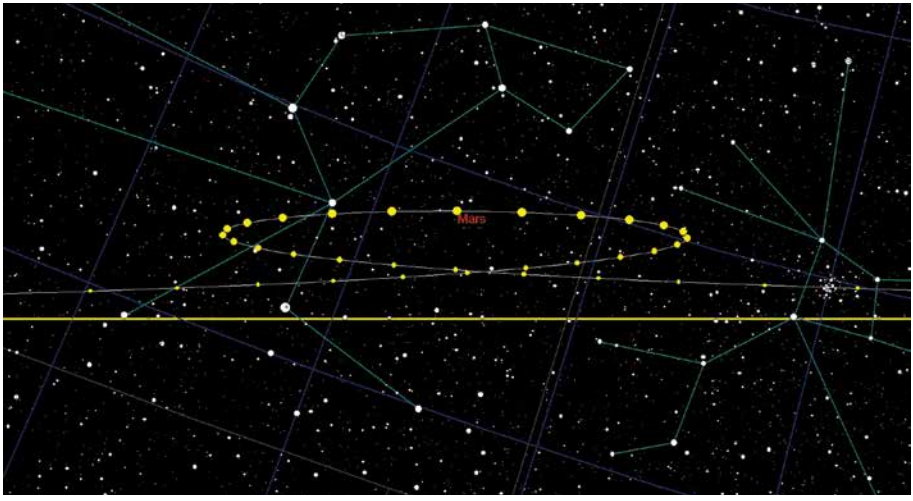
Po Slnku je druhým najvýraznejším objektom na oblohe Mesiac. Aj ten sa otáča spolu s oblohou a koná po nej svoj vlastný pohyb. Je

rýchlejší ako Slnko a jednu otočku dokončí približne za 28 dní. Pohybuje sa po dráhe, ktorá nie je zhodná s ekliptikou a je naklonená asi o 5 stupňov, čo nie je málo; uhlový priemer Mesiaca je asi polovica stupňa.

A potom sú tu spomínané svetielka, veľmi veľa svietiacich bodiek. Väčšina bodiek sa označuje ako stálice, pretože sú na spomínanú sféru úplne fixované. Ale nie všetky bodky sú rovnaké. Už dlho pred Aristotelom si ľudia medzi stálicami všimli päť svetielok, ktoré sú špeciálne. Nestoja na mieste, ale po oblohe putujú. Z gréckeho slova pre pútnika (*planetos*) pochádza aj pomenovanie pre putujúce hviezdy. Ak začneme pohyb planét podrobnejšie sledovať, všimneme si dve veľmi zaujímavé veci.

Prvou je, že planéty neputujú po celej oblohe len tak – neusporiadane. Všetky sa premiestňujú blízko ekliptiky. Niektoré rýchlejšie, niektoré pomalšie, niektoré spravia celú otočku a niektoré sa ponevierajú iba v okolí Slnka. Ale žiadna sa od ekliptiky nevzdiali o viac ako niekoľko stupňov. Väčšina planét do troch stupňov, najviac Merkúr – o sedem stupňov.

Druhou zaujímavosťou je to, že planéty občas svoj pohyb otočia. Neposúvajú sa dookola stále tým istým smerom ako napríklad Slnko, ale v niektorých momentoch zastanú a nejaký čas sa pohybujú opačným smerom. Potom opäť zastanú a zasa sa pohybujú ako predtým. Odborne sa takýto pohyb nazýva retrográdny alebo spätný.




Spätný pohyb planéty Mars medzi stálicami na oblohe. Žlté bodky znázorňujú polohu Marsu v rôznych časoch, žltá čiara je ekliptika.

Ľudia poznali planéty pod rôznymi názvami. Postupne sa medzi astronómami v našich zemepisných šírkach ustálili mená podľa rímskych božstiev: Merkúr, Venuša, Mars, Jupiter a Saturn.

## Státie ako význačný pohyb

Vedomosti o usporiadaní vesmíru sa Aristoteles podujal zakomponovať do jednotného opisu sveta a procesov v ňom. Pri našom rozprávaní o dejinách fyziky bude hrať dôležitú úlohu ešte jedno pozorovanie tu na Zemi.

Keď na bicykli prestaneme šliapať do pedálov, skôr či neskôr zastaneme. Môžeme sa rozbehnúť viac, ale jediné, čo sa zmení, je, že zastaneme neskôr. Môžeme investovať stovky eur do keramických ložísk a špeciálneho oblečenia, ktoré znižuje odpor vzduchu, aj tak zastaneme, ibaže neskôr. Státie je, zdá sa, medzi rôznymi pohybmi niečím význačné. A neplatí to iba pre telesá, ako sú kamene alebo bicykle. Platí to pre kávu, ktorú sme v šálke roztočili lyžičkou, pre vzduch, ktorý sme vyfúkli z úst, alebo pre poskakujúcu tenisovú loptičku.

Tam, kde nie je pôsobiaca sila, skôr či neskôr sa akýkoľvek pohyb skončí. Státie sa zdá byť veľmi špecifickým druhom pohybu a všetky zmeny spejú k pokoju.

## Aristotelovská mechanika

Aristoteles vo svojej filozofii veľmi jasne formuloval zákony fyziky. I keď neboli zapísané tak, ako to zvykneme robiť dnes, jazykom matematiky, Aristoteles sformuloval pravidlá pre deje v prírode. Nás budú zaujímať zákony pre mechanické procesy, preto budeme tieto idey nazývať aristotelovská mechanika.

Prvou črtou Aristotelovho prístupu je, že delil vesmír na dve rôzne sféry – pozemskú a nebeskú. Hranica medzi týmito oblasťami je kdesi medzi Zemou a Mesiacom. V nebeskej sfére je všetko dokonalé a nemenné. Objekty majú dokonalý guľový tvar. Mesiac, Slnko aj planéty sú gule a sú fixované na sférické plochy, ktoré sa otáčajú. A telesá sa otáčajú spolu s nimi. Taký istý tvar má aj sféra, na ktorej sa podľa Aristotela nachádzajú stálice.

Na vysvetlenie spätného pohybu planét Aristoteles zaviedol pre každú z planét ďalšie sféry, ktoré sú navzájom prepojené. Ich otáčania sa kombinujú a v konečnom dôsledku vytvárajú komplikovanejší pohyb planét. Na presné určenie vlastností týchto sfér si Aristoteles čas nenašiel, vtedy ešte nebola taká móda. Stačilo mu takéto kvalitatívne vysvetlenie. K dopracovaniu tejto myšlienky sa ešte vrátime.

Nebeská sféra sa končí Mesiacom. Ďalšie objekty, ktoré občas vidíme na oblohe ako meteory a kométy, sa už nachádzajú v pozemskej sfére. Môžu sa totiž objavovať, vznikať a zanikať. Takáto zmena však nie je možná v dokonalej nebeskej sfére. Obrazce, ktoré vidíme na Mesiaci, Aristoteles vysvetľoval tým, že Mesiac je veľmi blízko k pozemskej sfére, akoby sa do nej namáčal a zostával zašpinený.

Aristoteles formuloval aj princípy mechanických dejov v pozemskej sfére. Všetko má svoj prirodzený stav a prirodzené miesto. Deje v prírode a zmeny v usporiadaní telies sú ich hľadaním. Vo vodorovnom smere je prirodzeným stavom státie. Akýkoľvek pohyb sa skôr či neskôr skončí. Telesá opustia svoj prirodzený stav, až keď ich z neho niečo núti vyjsť.

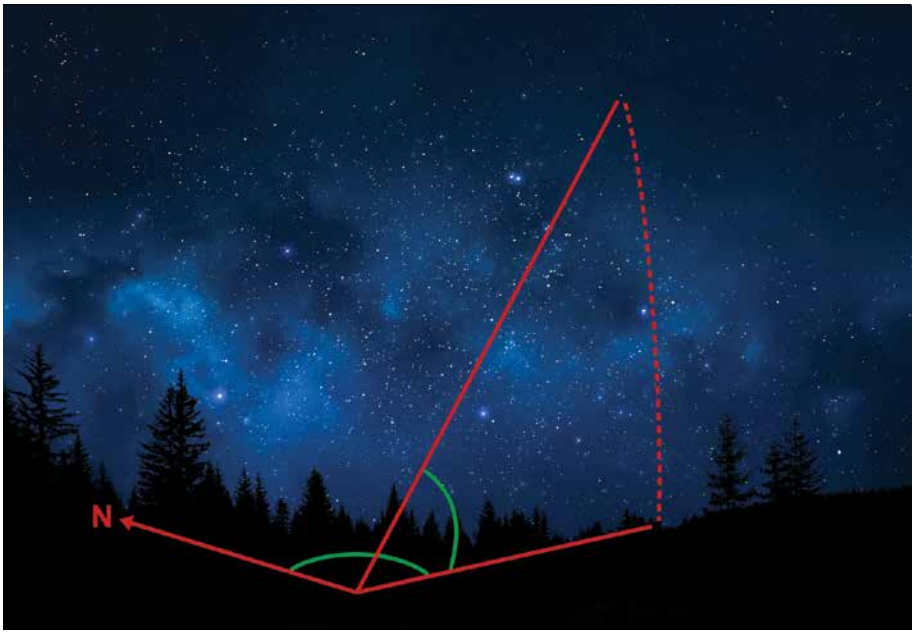
Pohyby vo zvislom smere zas vysvetľuje zloženie telies. Podľa Aristotela sa svet skladá zo štyroch základných elementov – zeme, vody, vzduchu a ohňa. Ich prirodzené miesto je v tomto poradí od stredu vesmíru a telesá podľa svojho zloženia hľadajú prirodzené usporiadanie, čo spôsobuje ich pohyb smerom nahor alebo nadol. Prirodzené usporiadanie elementov vysvetľuje klesanie ťažkých telies. Je to prvá, i keď z dnešného pohľadu vcelku naivná teória gravitácie. Aspoň tej pozemskej.

Aristoteles nepristupoval k svojim teóriám kvantitatívne a nenaučili sa to ani jeho nasledovníci. Neskorší astronómovia boli veľmi precízni v tom, ako merali polohy telies na oblohe, ale o čosi menej precízni v tom, ako merali procesy na Zemi. Trvalo vyše 1 500 rokov, kým si niekto, vychádzajúc z Aristotelovho učenia, uvedomil, že by dvakrát ťažšie teleso malo padať k zemi dvakrát rýchlejšie.

## Ptolemaios a geocentrický model

Aristotelova predstava o usporiadaní nebeských telies nebola veľmi precízna. Neskôr sa postupne zlepšovala presnosť astronomických pozorovaní, pokrok sa dial aj v matematike a jej využití. Bol potrebný presnejší model, na základe ktorého by sa dali astronomické merania predpovedať.

Práca niekoľkých generácií astronómov a matematikov vyústila do diela gréckeho astronóma Klaudia Ptolemaia (asi 85 – 165). Kľúčovou vlastnosťou nebeských telies a ich usporiadania zostala dokonalosť a nemennosť. Upustil však od takmer všetkých sfér, na ktorých mali byť nebeské telesá fixované, a na jedinú zostávajúcu boli zafixované stálice. Medzi nimi a Zemou, ktorá sa nachádzala v strede vesmíru, obiehajú ostatné telesá – v poradí od Zeme:

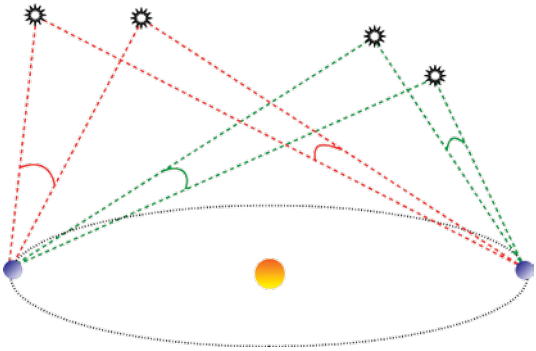



Astronomické súradnice hviezdy na nočnej oblohe.

Mesiac, Merkúr, Venuša, Slnko, Mars, Jupiter a Saturn. Obiehajú po inom dokonalom útvare, po kružnici. V strede planetárnej sústavy bola Zem, a tak hovoríme o tomto modeli ako o geocentrickom.

Ako vyzerajú astronomické pozorovania, ktoré sa akýkoľvek astronomický model snaží vysvetliť a predpovedať? V danom čase na danom mieste na Zemi astronóm zmeria, ako vysoko je teleso nad obzorom, aký je uhol medzi severom a smerom, kde sa teleso nachádza. Z modelu sa tak napríklad dá zistiť, pod akým uhlom a v akom smere budeme vidieť planétu Mars o druhej ráno 9. mája 2136 z Lomnického štítu. Ak si uvedomíme, aké nástroje a podmienky mali k dispozícii astronómovia na prelome letopočtov, musíme vzdať úctu ľuďom, ktorí to dokázali.

Ptolemaiov model však nebol až taký jednoduchý. Na vysvetlenie pozorovaní nestačilo dať obiehať telesá po kružniciach. Také niečo by nemalo šancu vysvetliť spätný pohyb planét, a tak boli do modelu pridané menšie kružnice, po ktorých planéty obiehali a ktorých stredy obiehajú po väčších kružniciach. Hovorí sa im epicykly. Tak sa môže stať, že planéta sa občas vzhľadom na Zem



Ak by sa Zem pohybovala okolo Slnka, vzájomná poloha hviezd na oblohe by sa mala v dôsledku tohto pohybu meniť.

pohybuje opačným smerom ako stred tej malej kružnice. Keď na vysvetlenie pozorovaní nestačilo pridať jednu kružnicu, fintu bolo treba pre tú istú planétu zopakovať viackrát. Pôvodný Ptolemaiov model tak vo finálnej verzii obsahoval desiatky epicyklov. Okrem tejto komplikácie musel Ptolemaios posunúť stredy najväčších kružníc mimo Zeme a rýchlosť obiehania planét sa trochu menila.

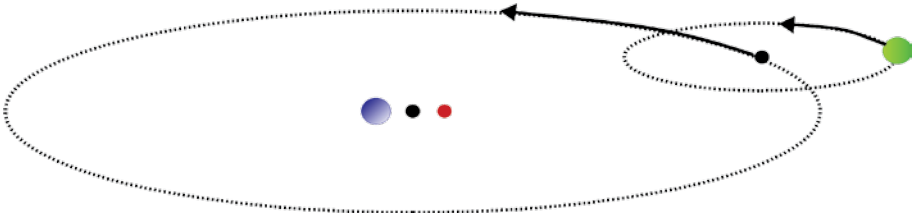
Tento model mal potom ohromné množstvo voľných parametrov, ktoré bolo treba dopočítať tak, aby vysvetľovali pozorovania. To sa Ptolemaiovi podarilo a vznikol model vesmíru, ktorý astronómovia používali ďalších štrnásť storočí. Z moderného pohľadu na vedecké teórie malo však Ptolemaiovo dielo problém – bolo ho nevyhnutné pričasto upravovať. Nové pozorovania sa veľakrát dali vysvetliť iba tým, že sa do modelu pridali ďalšie parametre, ktoré sa nastavili tak, aby všetko sedelo. Ako negatívum to berieme až teraz; kedysi ľudia ešte takto vedu nechápali.

Ptolemaiov model s postupnými úpravami slúžil astronómom štrnásť storočí. Svetom sa preháňali armády, centrá poznania sa presúvali. Presnosť meraní sa zlepšovala, a tým sa model upravoval. V období renesancie však už za technickým pokrokom nestačil a model sa postupne prehodnocoval spolu s celou aristotelovskou predstavou o fungovaní sveta.

## Keplerove zákony

Prvá rana aristotelovskému zmýšľaniu o svete prišla z neočakávaného smeru. Nevedomky jej ju uštedril nemecký astronóm a matematik Johannes Kepler (1571 – 1630), keď medzi rokmi 1609 a 1619 svojimi zákonmi zostrojil plne funkčný heliocentrický systém.

V heliocentrických modeloch nie je stredom planetárneho systému Zem, ale Slnko. Prvé také predstavy sa vyskytli ešte v antických časoch, dokonca



Ilustrácia Ptolemaiovej myšlienky epicyklov. Zelená planéta neobieha priamo okolo modrej Zeme, ale po ďalšej kružnici. V Ptolemaiovom modeli nebola Zem v strede najväčšej kružnice (čierny bod) a rýchlosti planét boli nastavené tak, aby boli konštantné pri pohľade z červeného bodu (z ekvantu).

pred vznikom Aristotelovho učenia. Najznámejším antickým zástancom Slnka ako stredu vesmíru bol starogrécky astronóm Aristarchos zo Samosu (asi v rokoch 320 – 230 pred n. l.).

Z aristotelovského a stredovekého pohľadu mal však akýkoľvek heliocentrický systém niekoľko problémov. V prvom rade pohybujúca sa Zem odporuje pokoju ako prirodzenému stavu vecí. Ak by Zem obiehala okolo Slnka, muselo by každé jedno teleso na nej čosi poháňať, inak by zastalo. V druhom rade vytrhnutím Zeme zo stredu vesmíru sa stráca význam aristotelovského modelu gravitácie skrz prirodzené miesta jednotlivých elementov. Po tretie, ak sa Zem pohybuje vo vnútri sféry stálic, mala by sa ich vzájomná poloha na oblohe počas roka meniť, pretože sa na ne pozeráme v rôznych častiach roka z rôzneho miesta. Tejto zmene relatívnej polohy telies v dôsledku pohybu pozorovateľa sa hovorí paralaxa. Žiadna hviezdna paralaxa však pozorovaná nebola.

Geocentrický model bol preto veľmi dlho jasnou a prirodzenou voľbou astronómov. Ako prvý oživil myšlienku heliocentrizmu poľský astronóm Mikuláš Kopernik (1473 – 1543). Roku 1543 po vyše štyridsiatich rokoch práce vyšlo dielo *Dērevolutionibus orbium coelestium*, v ktorom Kopernik prezentoval heliocentrický model.

Problémy heliocentrického systému v kontexte aristotelovskej mechaniky však zostali. Navyše – Kopernikovi tiež nestačili jednoduché kružnice. Na presnú predpoveď polôh planét na oblohe potreboval aj jeho model množstvo epicyklov a prediktívnu silu, čo je v modernom ponímaní vedy kľúčová vlastnosť vedeckej teórie, nemal lepšiu ako vtedajšie geocentrické modely. Napriek tomu malo jeho dielo aj vďaka historickým zmenám, ktoré sa v tom

čase diali v európskej spoločnosti, ohromný význam a vplyv. Keď sa neskôr ukázala heliocentrická predstava správna, išlo o takú veľkú zmenu v pozeraní na svet, že sa všetky veľké a zásadné zmeny začali označovať revolúciou (napríklad aj tie na námestiach).

Kopernikovo dielo malo významný vplyv na mnohých európskych astronómov. Jedným z nich bol Tycho Brahe (1546 – 1601), Dán, ktorý neskôr pracoval v Prahe. Brahe bol najlepším astronómom svojej generácie, dokázal robiť merania s presnosťou, ktorej sa vyrovnali až pozorovania ďalekohľadmi. Po tom, ako roku 1572 pozoroval supernovu – novú stálicu – a dokázal, že musí byť oveľa vzdialenejšia ako Mesiac, vyvrátil Aristotelovu predstavu o nemeniacej sa a dokonalej nebeskej sfére. Nepodarilo sa mu pozorovať paralaxy hviezd, a tak Kopernikov model úplne neprijal. Nahradil ho vlastným modelom, ktorý bol medzi geo- a heliocentrickým pohľadom na vesmír.

Braheho merania sa stali základom pre dielo Johannesa Keplera. Kepler bol v Prahe Braheho asistentom a po smrti svojho mentora pracoval na zosúladení astronomických pozorovaní s Kopernikovým heliocentrickým modelom. Riešenie sa nakoniec ukázalo ako veľmi pôvabné. V jednej z najgeniálnejších myšlienok histórie vedy Kepler ukázal, že ak sa v heliocentrickom modeli nahradia kruhové dráhy elipsami, už netreba pridávať žiadne epicykly. Ak sa umiestni elipsa tak, že sa Slnko nebude nachádzať v jej strede, ale v jej ohnisku, a správne sa nastavia rýchlosti obiehania, polohy planét budú dokonale sedieť s pozorovaniami. Navyše tieto rýchlosti tiež nebudú hocijaké, ale budú pre každú planétu presne dané vzdialenosťou od Slnka.

Prvé tvrdenie je obsahom prvého zo zákonov, ktorý dnes nesú Keplerovo meno. Druhé tvrdenie je obsahom druhého a tretieho, ktoré hovoria, ako sa rýchlosť planéty počas obiehania mení, a dávajú do súvisu veľkosť eliptickej dráhy a celkovú periódu obehu.

Kepler a veľa iných astronómov sa potom dlhé roky snažili nájsť nejakú štruktúru vo vzdialenostiach planét od Slnka. Dnes už vieme, že márne. Presné miesta, kde obiehajú planéty v našej sústave, ale aj Jupiterove mesiace alebo iné planéty okolo iných hviezd, sú dôsledkom náhodných procesov pri vzniku týchto systémov. To je však úplne iný príbeh.

Vrátime sa ku Keplerovým zákonom. Sú veľmi jednoduchým a veľmi presným modelom slnečnej sústavy, ktorý je v ostrom protiklade s aristotelovskou

predstavou mechaniky. V prvom rade sa vytratili kružnice. Dokonalé tvary nahradila hrubo nedokonalá elipsa. Okrem toho – ak Zem nestojí, na všetky telesá na nej musí niečo pôsobiť, aby ich pohyb okolo Slnka neustal. Každého človeka, každý strom a každý kameň musí niečo udržiavať v pohybe. A je záhadou, prečo sú tieto objekty priťahované k Zemi a nie k Slnku, ktoré tvorí prirodzený stred univerza.

## Galileo Galilei a zotrvačnosť

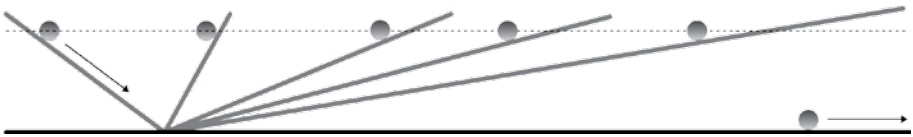
Vplyv, ktorý mal na modernú vedu taliansky renesančný učenec Galileo Galilei (1564 – 1642), sa dá len veľmi ťažko preceniť. Pre nás bude dôležitá jeho práca v astronómii a zavedenie konceptu zotrvačnosti.

Galilei roku 1609 skonštruoval prvý ďalekohľad, ktorým sa dali robiť praktické astronomické pozorovania. Tak získal nástroj s ohromnou silou objavovať na oblohe doposiaľ neviditeľné javy. Asi nás neprekvapí, že ich nebolo málo.

Galilei na povrchu Mesiaca uvidel tiene, ktoré sa pohybovali so Slnkom a ktoré museli byť dôsledkom vrchov, údolí a kráterov. Toto pozorovanie ukázalo, že Mesiac určite nie je dokonalá guľa, ktorá sa „zašpinila od nedokonalej pozemskej sféry“. Pri pozorovaní Venuše roku 1610 Galilei uvidel fázy. Rovnako ako Mesiac aj Venuša mení na oblohe svoj výzor podľa toho, ktorá jej časť smeruje k Slnku. To jasne dokazovalo, že Venuša nevydáva svoje vlastné svetlo a musí obiehať okolo Slnka, nie okolo Zeme. V tom istom roku si Galilei pri pozorovaní Jupitera všimol, že okolo tejto planéty tiež obieha niekoľko telies a v žiadnom prípade teda nemôže byť pravda, že nebeské telesá obiehajú výhradne okolo Zeme. Neskôr sa dokonca ukázalo, že tieto mesiace obiehajú okolo Jupitera podľa rovnakých (Keplerových) zákonov ako planéty okolo Slnka.

Týmito pozorovaniami Galilei vyvrátil niekoľko základných predstáv a argumentov, na ktorých bolo postavené geocentrické usporiadanie nášho vesmíru – našej slnečnej sústavy. Jeho ďalšou úlohou v páde aristotelovskej fyziky bolo vyvrátenie predstavy pokoja ako prirodzeného stavu telies.

Hovorí sa, že dôležitú úlohu v tom hral experiment, pri ktorom mal Galilei zhadzovať predmety z naklonenej veže v Pise. Tak si mal všimnúť, že všetky telesá zrýchľujú pri voľnom páde rovnako, teda bez ohľadu na svoju hmotnosť. Tento konkrétny experiment Galilei pravdepodobne neuskutočnil, jeho



Ilustrácia Galileiho pokusu s guľami na naklonených rovinách. Ak fixujeme sklon roviny naľavo, ale sklon roviny napravo postupne znižujeme, guľa zájde vždy ďalej a ďalej. Ak by sme naklonenú rovinu vyrovnali, nemala by sa zastaviť nikdy.

autorom bol flámsky učenec Simon Stevin (1548 – 1620) a miestom kostolná veža v meste Delft.

Pravdou však určite je, že Galilei uskutočnil experimenty s rovnakým záverom. Použil gule, ktoré sa valili po naklonených rovinách. To spomalilo ich zrýchľovanie, čím sa znížil efekt odporu vzduchu a zjednodušilo sa meranie časových intervalov, ktoré v tej dobe ešte nebolo veľmi presné. Záver z týchto experimentov bol, že telesá zrýchľujú rovnako, teda bez ohľadu na hmotnosť, a že toto zrýchlenie je rovnomerné.

Galilei pri ďalších pokusoch postavil na koniec klesajúcej naklonenej roviny druhú naklonenú rovinu, tentoraz stúpajúcu. Pritom zistil, že guľa vyjde do rovnakej zvislej výšky, z akej bola spustená, a to bez ohľadu na sklon jednej či druhej naklonenej roviny. Tým položil základ úvah o zachovaní mechanickej energie. Dôležitejšie však je, že nasledujúcim myšlienkovým experimentom prišiel ku konceptu zotrvačnosti a tým aj rovnomerného priamočiareho pohybu ako význačného stavu telies.

Pri pokusoch sa naklonená rovina, z ktorej sa guľa spúšťa, nemení, ale sklon naklonenej roviny, do ktorej guľa stúpa, sa postupne znižuje. Ak má guľa vyjsť do rovnakej zvislej výšky, z akej bola spustená, na plytšej a plytšej naklonenej rovine bude musieť zájsť ďalej a ďalej. Ak bude druhá naklonená rovina úplne vyrovnaná, guľa bude pokračovať donekonečna a nezastane nikdy. Na základe toho vyslovil Galilei myšlienku, že prirodzeným stavom telies je rovnomerný priamočiary pohyb. Táto vlastnosť dostala názov zotrvačnosť, pretože telesá v pohybe zotrvávajú a nezastavujú sa.

Aristotelovská mechanika bola v mysliach učencov tej doby veľmi hlboko zakorenená. Galileiho úvahy o zotrvačnosti a bezprecedentná presnosť a jednoduchosť Keplerových zákonov ju však veľmi výrazne rozkývali. Na definitívny pád potrebovala už len posledný úder.

# Tri zákony na pleciach obrov

„Ak som videl ďalej, bolo to preto, že som stál na pleciach obrov.“ Túto vetu vyslovil Isaac Newton (1643 – 1727), anglický fyzik a matematik. Mal na mysli najmä Keplera a Galileiho. Na výsledkoch ich práce významným spôsobom stáli Newtonove výsledky. Newtonovo životné dielo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Matematické princípy prírodných vied)* z roku 1687 úplne zmenilo pohľad na svet. Newton v ňom položil základy mechaniky, keď sformuloval tri základné zákony, podľa ktorých prebiehajú deje v prírode. Prvý zákon, zákon zotrvačnosti, je prerozprávanie Galileiho princípu. Ak na telesá nepôsobia žiadne sily, ani zotrvačné, telesá konajú rovnomerný priamočiary pohyb. Nezastavujú sa, pohybujú sa ďalej, až kým ich niečo nezastaví. Druhým je zákon sily, ktorý hovorí, čo presne sa s telesom deje, ak naň pôsobí sila. Konkrétnejšie hovorí, že výsledná sila spôsobuje zrýchlenie telesa. To, ako veľmi pri danej sile teleso zrýchľuje, je dané jeho hmotnosťou. Z dnešného pohľadu je dôležitý aj preto, že je priamo formulovaný ako matematická rovnica. Nejde o slovný opis toho, čo sa bude diať, ale o jasný matematický zápis, z ktorého sa dá budúcnosť priamočiaro vypočítať a výsledok výpočtov porovnať s experimentom. Tretí zákon je známy ako zákon akcie a reakcie. Hovorí, že ak jedno teleso pôsobí silou na druhé, musí aj druhé teleso rovnako pôsobiť na prvé.

Newtonove zákony ešte v sebe zahŕňajú koncept inerciálnej vzťažnej sústavy, ktorý súvisí so spomínanými zotrvačnými silami. Hovoria aj to, ako vidia ten istý proces dvaja rôzni pozorovatelia. To však pre nás teraz nie je až také podstatné.

Newton ukázal, že z týchto zákonov vyplývajú Keplerove zákony. Jediné, čo bolo treba spraviť, bolo nájsť správny tvar pre gravitačnú silu. Ako si možno pamätáme zo strednej školy, tento tvar je daný zákonom „prevráteného štvorca vzdialenosti“. Gravitačná sila, ktorá pôsobí univerzálne medzi dvomi akýmikoľvek hmotnými telesami, je úmerná súčinu ich hmotností a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti.

Prekvapivo jednoduché. Dve rovnice, ktoré sa v dnešnom zápise vmestia do jedného riadka, dokážu vysvetliť pohyb všetkých známych telies v slnečnej sústave a aj všetkých telies na Zemi. A vysvetľujú, prečo aristotelovská mechanika nefunguje. Telesá padajú k Zemi preto, lebo ich tam priťahuje gravitačná sila. Hýbať všetkým, čo sa na Zemi nachádza, pri pohybe okolo Slnka nemusí nikto. To zariadi zotrvačnosť.

## Prvé veľké zjednotenie

Newtonove pohybové zákony znamenali, že po dvetisíc rokoch prišiel definitívny koniec aristotelovskej predstavy o svete. Vo svojich zákonoch však z dnešného pohľadu spravil Newton ešte dve veľmi veľké veci.

V prvom rade ukázal, že z fyzikálneho hľadiska nie je rozdiel medzi nebeským a pozemským svetom a že rovnaké fyzikálne zákony platia pri páde jablka na Zem, pri obiehaní planét okolo Slnka a aj pri obiehaní mesiacov okolo Jupitera. Hovoríme, že Newton zjednotil nebeskú a pozemskú mechaniku. Akékoľvek takéto zjednotenie je veľmi veľká vec, pretože prináša hlbšie porozumenie sveta. A šetrí to papier, pretože dokážeme menším počtom fyzikálnych zákonov opísať väčší počet javov. Každé podobné zjednotenie vo vede znamená veľkú revolúciu a v budúcnosti sa stalo veľmi dôležitým znakom skutočne významných objavov.

Druhým veľkým posunom je použitie matematiky ako jazyka na formuláciu prírodných zákonov. Áno, dá sa povedať, že v inerciálnej vzťažnej sústave všetky telesá zotrvávajú v rovnomernom priamočiarom pohybe, až kým nie sú nútené vonkajšou silou tento stav zmeniť. Ale dá sa jednoducho napísať $F = m \cdot a$. Tým je povedané oveľa viac a dá sa z toho oveľa viac vypočítať. Matematické úpravy nás dovedú k presným a jasným výsledkom. Niečo, v čom slová nemajú šancu. Od roku 1687 definitívne vieme, že o fyzike a fyzikálnych procesoch je najvýhodnejšie rozprávať v jazyku matematiky.

Aristotelovské zmýšľanie je však hlboko zakorenené v každom z nás. A tak keď vidíme po oblohe letieť medzinárodnú vesmírnu stanicu, máme pocit, že ju dopredu niečo tlačí podobne ako lietadlo, ktoré môže letieť vedľa nej. Skúste si nabudúce pri tom pohľade uvedomiť, aké je to vlastne zvláštne a zaujímavé a že ľuďom trvalo dvetisíc rokov, kým prišli na to, ako to v skutočnosti je.

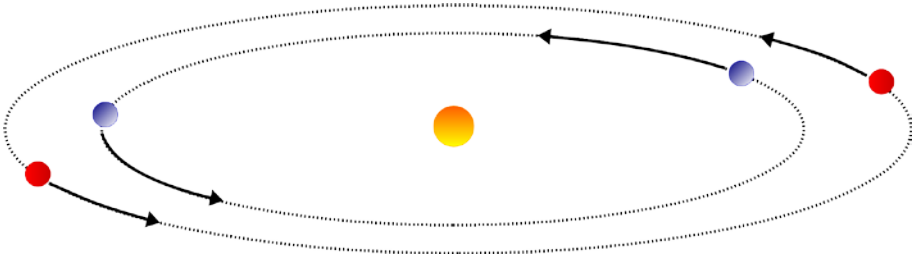
# Planéta Vulkán

V prvom príbehu o aristotelovskej fyzike sa v slepej uličke ocitlo veľa generácií fyzikov a cesta z nej znamenala zrod úplne novej fyziky, takej, akú poznáme dnes. V druhom príbehu sa v slepej uličke ocitne len jediný človek. Odohráva sa v druhej polovici deväťnásteho storočia a veľkú úlohu opäť hrá pohyb planét okolo Slnka.

## Urán

Galileo Galilei objavom ďalekohľadu doslova otvoril nové okná pre pohľad na oblohu. Ako sa postupne technológia zlepšovala, pozorovania boli čím ďalej, tým presnejšie. Tak sa stalo, že anglický astronóm William Herschel (1738 – 1822) spozoroval roku 1781 pohybujúcu sa bodku. Bodku zaznamenali už aj astronómovia pred ním, ale nikto neidentifikoval jej pohyb. Mysleli si, že ide o stálicu. Planéta bola veľmi ďaleko, a tak jej putovanie po oblohe nebolo veľmi výrazné. Sám Herschel ju dlho považoval za kométu. Presvedčili ho až pozorovania a výpočty iných astronómov. Podľa gréckeho boha nebies dostala meno Urán. Ide teda o jedinú planétu, ktorej meno je odvodené od boha gréckej a nie rímskej mytológie.

Začiatkom deväťnásteho storočia sa začalo ukazovať, že s Uránom nie je úplne všetko v poriadku. Astronómovia vypracovali model jeho trajektórie okolo Slnka a z neho očakávané miesto na oblohe, ale pozorovania sa s týmito predpoveďami nezhodovali. Urán sa nesprával úplne tak, ako predpovedali Newtonove zákony. Rozdiely naznačovali, že sa občas pohybuje trochu rýchlejšie, ako by mal, a občas zas trochu pomalšie. To mohlo mať dve vysvetlenia. Jedno navrhovalo prehodnotiť Newtonov gravitačný zákon. Čo



V konfigurácii napravo červená planéta svojím pôsobením modrú planétu pri obiehaní okolo Slnka spomaľuje, naopak – v konfigurácii naľavo ju urýchľuje.

ak gravitácia na takých veľkých vzdialenostiach funguje inak? Urán obieha okolo Slnka vo vzdialenosti asi dvadsaťkrát väčšej ako Zem a asi dvakrát väčšej ako Saturn, druhá najvzdialenejšia známa planéta. V princípe nič negarantuje, že Newtonov vzorec, ktorý dobre vysvetľuje pohyb ostatných planét, musí platiť aj na väčších vzdialenostiach.

Druhé vysvetlenie navrhovalo ponechať univerzálnosť gravitačného zákona aj naďalej, ale vysvetliť neočakávaný pohyb Uránu prítomnosťou ďalšej planéty. Tá by občas svojou gravitáciou Urán ovplyvňovala: brzdila by ho, keď by bola z pohľadu Slnka za ním, a urýchľovala, keď by bola pred ním.

## Neptún

Viacero ľudí sa pokúšalo vypočítať vlastnosti hypotetickej planéty, ktorá by svojím pohybom ovplyvňovala Urán, tak ako to pozorovali astronómovia. Najúspešnejším z nich bol francúzsky matematik a astronóm Urbain Le Verrier (1811 – 1877), ktorý sa na konci tohto príbehu ocitne v slepej uličke. Le Verrier sa roku 1845 pustil do komplikovaných výpočtov. Najskôr veľmi presne opísal pohyb planéty Urán a v prvej polovici roka 1846 dostal prvé predbežné výsledky pre hypotetickú planétu.

V tomto momente začínajú byť dôležité dokonca aj presné dátumy. Le Verrier 31. augusta 1846 pred členmi Francúzskej akadémie vied prezentuje svoje finálne výpočty a predpovede pre novú planétu, ale nikoho vo Francúzsku sa mu nepodarí dostatočne nadchnúť svojou predpoveďou, a tak 18. septembra posiela list nemeckému astronómovi Johannovi Gallemu (1812 – 1910) do Berlínskeho observatória. 23. septembra 1846 prichádza jeho list do Berlína a Galle so svojím študentom ešte v ten večer mieria teleskop smerom k predpokladanej pozícii novej planéty. Študent Heinrich Louis d'Arrest (1822 – 1875) si uvedomil, že budú vedieť presnejšie odhaliť akúkoľvek zmenu charakteristickú pre planétu, pretože zhodou okolností majú medzi staršími nákresmi oblohy k dispozícii nákres tej časti oblohy, v ktorej Le Verrier predpovedal nový objekt. Tesne po polnoci identifikujú zmenu polohy jednej bodky takmer presne na mieste, kde to Le Verrier predpovedal. Po ďalších dvoch nociach spresňujúcich meraní potvrdzujú objav a posielajú list späť do Francúzska. Nová planéta bola na svete. Teleskop, ktorý bol použitý pri objave planéty, je dnes vystavený v Nemeckom múzeu v Mníchove.

Galleho úspešné objavenie novej planéty hneď prvú noc po tom, ako dorazil Le Verrierov list s jej predpovedanou polohou, je takmer určite jedným z najfantastickejších momentov histórie vedy. A možno aj histórie vôbec. Le Verrier demonštroval ohromnú silu výpočtov a geniálnej myšlienky. Bez jeho presnej predpovede by mohli astronómovia oblohu kontrolovať noc čo noc a na pohyb Neptúna by nenarazili. Neptún videli astronómovia v ďalekohľadoch už skôr, ale podobne ako pri Uráne ho považovali iba za bezmennú nevýznamnú bodku. Niekoľkí boli veľmi blízko k jej identifikácii ako planéty a v máji roku 1795 si v Parížskom observatóriu dokonca všimli aj zmenu polohy, no nesprávne ju prisúdili chybnému pozorovaniu. Galle mal vďaka Le Verrierovej predpovedi istotu, že ide o planétu.

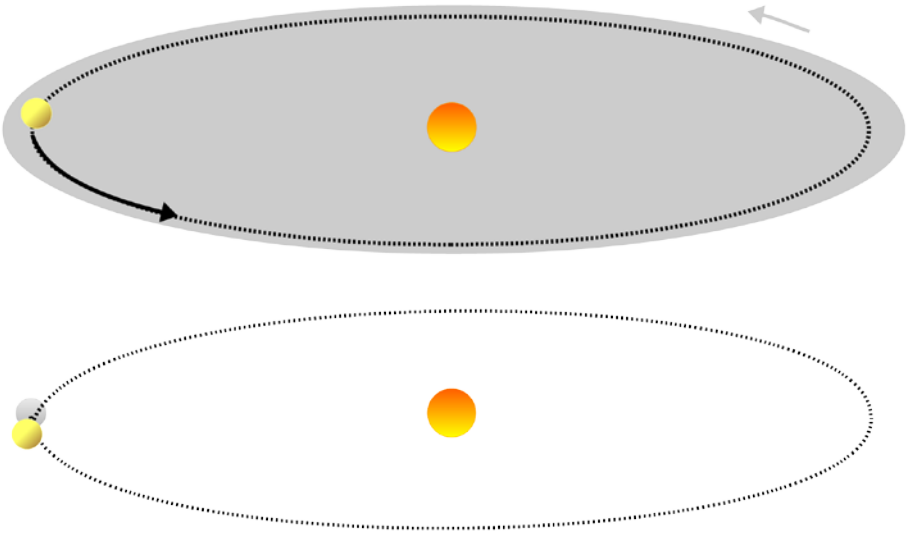
A nielen to. Objaviť niečo len tak z pohodlia obývačky použitím matematiky hraničilo s mágiou. Dnes to berieme ako bežnú vec a predpovede z obývačky (alebo kancelárie), predchádzajúce objav v laboratóriu, nikoho neprekvapia, no roku 1846 to bol skutočný prelom vo vedeckom prístupe. Ľudia matematiku používali, ale iné je, keď matematika niečo vysvetľuje, a iné, keď niečo úplne nové predpovedá. Hlavne keď to nové je ohromne vzdialená planéta.

V rovnakom čase ako Le Verrier pracoval na predpovediach existencie hypotetickej planéty ovplyvňujúcej pohyb Uránu aj britský astronóm John Adams (1819 – 1892). Jeho predpovede však neboli ani zďaleka také presné ako tie Francúzove, a tak historici pripisujú zásluhu na objave novej planéty najmä Le Verrierovi.

## Merkúr

Úspešný objav povzbudil Le Verriera a svoju pozornosť potom obrátil opačným smerom – k planéte najbližšej k Slnku. Zo svojich skorších prác totiž vedel, že ani pohyb Merkúra nie je dokonale vysvetlený Newtonovými zákonmi.

Efekt, o ktorom hovoríme, má vcelku technický názov – precesia perihélia. Čo to znamená? Keplerove zákony hovoria, že planéty obiehajú okolo Slnka po elipsách a Slnko je v ich spoločnom ohnisku. Bod na elipse, v ktorom je planéta k Slnku najbližšie, sa nazýva perihélium. Newtonove zákony predpovedajú, že po jednom obehu, keď sa planéta najskôr od Slnka postupne vzďaľuje a potom sa k nemu postupne približuje, ocitne sa v najmenšej vzdialenosti opäť v tom istom bode priestoru.



Na hornom obrázku Merkúr obieha po elipse, ktorá sa navyše okolo Slnka aj otáča. Na spodnom obrázku vidno posunutie planéty po jednej otočke po pôvodnej elipse.

To však pre Merkúr neplatilo. Merania ukázali, že Merkúr musí prejsť ešte trochu viac ako jednu otočku, aby sa dostal k Slnku najbližšie. Jeho približovanie sa k Slnku je o niečo málo pomalšie ako vzďaľovanie. Z pohľadu vonkajšieho pozorovateľa to teda vyzerá tak, že elipsa, po ktorej Merkúr obieha okolo Slnka, sa sama pomaly otáča. Akoby Merkúr obiehal po elipse, ktorá je nakreslená na obrovskom pomaly sa otáčajúcom kolotoči. Keď povieme pomaly, myslíme naozaj veľmi pomaly. Presne 574 uhlových sekúnd za storočie. To v ľudskej reči znamená, že Merkúr musí obehnúť okolo Slnka vyše 2 600-krát, aby sa tento kolotoč otočil o jediný stupeň alebo o 1/360 otočky. Precesia je teda ozaj veľmi pomalá, ale predsa pozorovateľná. A to aj s presnosťou, s akou boli astronómovia už v polovici deväťnásteho storočia schopní uskutočňovať merania.

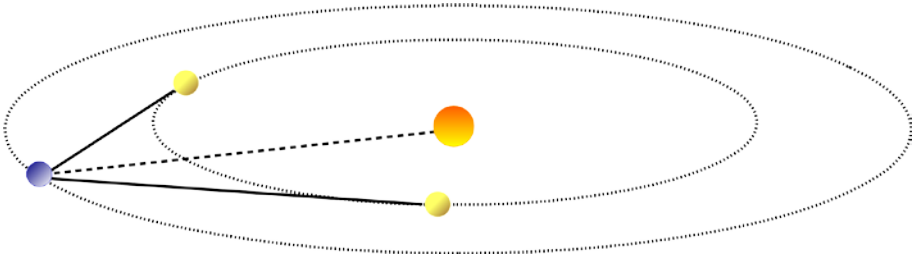
Na téme pohybu Merkúra okolo Slnka pracoval Le Verrier ešte pred rokom 1845 a na pomoc pri riešení tejto záhady si privolal ostatné planéty. Pri odvodení Keplerových zákonov z Newtonových sa ich príťažlivosť zanedbáva a počíta sa, ako keby každá z planét obiehala okolo Slnka samostatne a nezávisle od ostatných. A pre väčšinu situácií je to veľmi dobré priblíženie. Merkúr je však z planét najľahší, a tak majú na jeho pohyb ostatné planéty najväčší vplyv. Le Verrier bol schopný ich efekt započítať, čo je, ako iste uznáme, bez

použitia moderných nástrojov ozaj úctyhodné. Pre posun perihélia určil roku 1843 hodnotu 565 uhlových sekúnd za storočie a z nej predpoveď pre tranzit Merkúra cez slnečný kotúč roku 1848. Le Verrierova predpoveď sa ukázala trochu nepresná. Keď sa k tomuto problému roku 1859 Le Verrier vrátil, podarilo sa mu ukázať, že presný výsledok by dostal pre precesiu o 38 sekúnd za storočie rýchlejšiu. (Dnešné hodnoty týchto dvoch čísel sú 574 a 43.) Tento rozdiel však nedokázal vysvetliť prítomnosťou známych planét. Problém nemohol byť ani v presnosti Le Verrierových výpočtov a ani v presnosti astronomických meraní. S Merkúrom sa muselo diať niečo ďalšie, niečo neznáme, čo vedci dovtedy nepoznali.

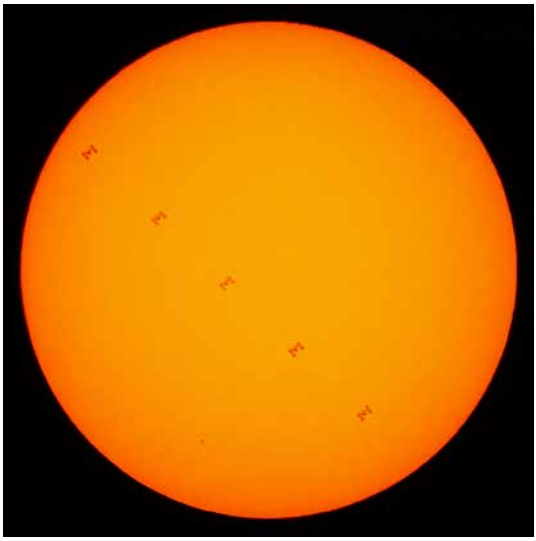
## Vulkán

Le Verrier bol presvedčený, že za týmto rozdielom je ďalšia, doteraz nepozorovaná planéta, ktorá okolo Slnka obieha ešte bližšie ako Merkúr. Taký objekt sa mohol veľmi jednoducho pred astronómami ukryť. Planéty, ktoré sa nachádzajú k Slnku bližšie ako Zem, sa nikdy nemôžu nachádzať na úplne opačnej strane oblohy. Astronómovia takej situácii, keď je teleso na oblohe najvyššie presne o polnoci, hovoria opozícia. Venušu napríklad vidieť vždy nad ránom pred svitaním alebo večer po západe Slnka. Ale nikdy nie hlboko v noci.

Čím bližšie je takáto vnútorná planéta k Slnku, tým bližšie sa k nemu bude na oblohe nachádzať. A asi nikoho z nás neprekvapí, že astronomické pozorovania v okolí Slnka sú veľmi komplikované. Môže sa čakať na zatmenie Slnka alebo sa snažiť nejakým iným umelým spôsobom prekryť prichádzajúce svetlo, no najbezpečnejší spôsob, ako objekty blízko pri Slnku pozorovať, sú spomínané tranzity. Vtedy dané teleso prechádza pred slnečným diskom a pri pozorovaní sa



Planéty obiehajúce okolo Slnka bližšie ako Zem sa pri pohľade z našej planéty nikdy nemôžu vzdialiť od Slnka viac, ako je vyznačené na obrázku.



Medzinárodná vesmírna stanica ISS prechádza slnečným kotúčom. Podobné tranzity Merkúra a Venuše, najmä presné časy ich začiatku a konca, zohrali významnú úlohu pri budovaní a testovaní astronomických modelov.

objaví ako malá čierna škvrna. Pozorovanie prechodov patrilo do bežného arzenálu astronómov. Napríklad Le Verrier mal najpresnejšie údaje o pohybe Merkúra z pozorovaní jeho tranzitov. Ešte v prvej polovici osemnásteho storočia astronómovia z pozorovaní tranzitu Venuše na viacerých vzdialených miestach Zeme veľmi presne vypočítali vzdialenosť medzi Zemou a Slnkom.

Pozorovať tranzity je beh na dlhé trate. Tým, že planéty neobiehajú okolo Slnka úplne v tej istej rovine ako Zem, musí sa Merkúr alebo Venuša počas prechodu nachádzať na veľmi špeciálnom mieste svojej dráhy. Le Verrier sa začiatkom roka 1859 pustil do nových predpovedí a hľadal možné trajektórie planét tak, aby mohli zodpovedajúcim spôsobom ovplyvniť pohyb Merkúra. Tomuto hypotetickému objektu dal aj názov a planétu pomenoval Vulkán (podľa rímskeho boha ohňa).

Pozorovania predpokladanej planéty na seba nenechali dlho čakať. Už na konci roka 1859 sa Le Verrierovi ozval francúzsky amatérsky astronóm Edmond Lescarbault (1814 – 1894) so správou, že ešte na jar toho istého roka pozoroval prechod neznámeho telesa cez slnečný kotúč. Le Verrier ho okamžite navštívil, a keď mu bolo meranie podrobne opísané, ohlásil začiatkom roka 1860 objav novej planéty. Ani problémy však na seba nenechali dlho čakať...

Iný francúzsky astronóm Emmanuel Liais (1826 – 1900) pozoroval Slnko presne v tom istom čase, keď Lescarbault videl prechod Vulkána popred Slnko, ale nič nevšedné si nevšimol. Le Verrier tiež na základe pozorovania hypotetickej planéty predpovedal jej ďalšie prechody, ale tie sa nepodarilo nikomu pozorovať. Naopak, vždy keď niekto niekde Vulkán zahliadol, bolo treba parametre jeho trajektórie upraviť. Ako sme už viackrát videli a ešte sa veľakrát

ukáže, také niečo je pre akúkoľvek vedeckú teóriu veľmi nepríjemné. Dobré modely sú také, ktoré po prvotnom nastavení prinášajú samé dobré výsledky a treba ich upravovať už len kozmeticky: ako napríklad v prípade Neptúna. Ak treba s každým novým meraním model upravovať, rozširovať a meniť, takmer určite bude niekde hlbší problém.

Vymenovať všetky relevantné „pozorovania" planéty Vulkán je nemožné a pre nás aj zbytočné. Žiadne sa nepotvrdilo a všetky sa nakoniec vysvetlili inak. Či už ako artefakty rôznych optických efektov v aparatúre teleskopov, ako slnečné škvrny nesprávne označené za tranzitujúcu planétu alebo ako nesprávne identifikované hviezdy počas hľadania planéty pri zatmení Slnka. Alebo jednoducho išlo o ľudskú tendenciu vidieť to, čo sa urputne hľadá, aj keď to tam nie je.

Samotnému Le Verrierovi slúži ku cti to, že nikdy žiadnemu planému poplachu neuveril natoľko, aby nebol ochotný cúvnuť pri dôkazoch, ktoré svedčili proti nemu. Ale v existenciu Vulkána veril až do svojej smrti roku 1877. V tom čase už nadšenie väčšiny vedeckej komunity opadlo, aj keď niektorí astronómovia pokračovali v hľadaní Vulkána až do dvadsiateho storočia.

Dnes vieme, že medzi Slnkom a Merkúrom sa nenachádza žiadny objekt, ktorý by bol väčší ako šesť kilometrov. To je približne rozlišovacia schopnosť družíc SOHO a STEREO, ktoré majú za cieľ pozorovať Slnko a jeho okolie. Istý odkaz Le Verrierovho hľadania v slepej uličke však zostal. Drobné objekty, ktoré sa nachádzajú medzi Merkúrom a Slnkom, sa dodnes nazývajú vulkanoidy.

## Všeobecná teória relativity

Odkiaľ sa vlastne berie tých kritických 43 uhlových sekúnd v precesii perihélia Merkúra? Odpoveďou je všeobecná teória relativity nemeckého fyzika Alberta Einsteina (1879 – 1955), o ktorom budeme počuť ešte veľakrát. Jedným z výsledkov tejto teórie je modifikácia Newtonovho gravitačného zákona a drobný relativistický príspevok nad rámec štandardnej sily ešte z Newtonových čias. Einstein v článku z roku 1915, v ktorom definitívne predstavil svoje životné dielo, ukázal, ako táto malá korekcia dá v prípade Merkúra presne ten rozdiel, ktorého pôvod astronómovia na čele s Le Verrierom päťdesiat rokov neúspešne hľadali v neexistujúcej planéte. Paradoxne sa ukázalo, že v prípade Merkúra gravitácia predsa len funguje inak, ako hovoril Newton, ale nie je to tá istá situácia ako v prípade Neptúna, pri ktorom by bolo treba meniť

gravitáciu na veľmi veľkých vzdialenostiach. Rozdiel medzi všeobecnou relativitou a Newtonovou gravitáciou sa prejavuje pri silných gravitačných poliach, a teda na malých vzdialenostiach.

Merkúr nie je jedinou planétou, ktorej perihélium vykonáva precesiu. Pri ostatných planétach sú však hodnoty oveľa menšie, napríklad pre Zem to je 3,8 uhlovej sekundy za storočie. A všeobecná relativita predpovedá túto hodnotu prakticky dokonale. Sú tri dôvody pre také maličké číslo. Zem je oveľa ťažšia, a tak jej pohyb ostatné planéty prakticky neovplyvňujú. Jej dráha sa oveľa viac podobá na kružnicu a Zem obieha okolo Slnka oveľa pomalšie ako Merkúr. Obe tieto vlastnosti výrazne potláčajú relativistický efekt.

## Pluto

Spomeňme ešte jednu súvisiacu zaujímavosť. Podobne ako pri Uráne aj v pohybe Neptúna sa objavili isté nezrovnalosti. A napriek Le Verrierovmu neúspechu s Vulkánom sa na prelome deväťnásteho a dvadsiateho storočia astronómovia pustili do hľadania *Planéty X*, ktorá mala tieto odchýlky spôsobovať. Keďže táto kapitola nemá názov Vulkán a Pluto a keďže vieme, že v slepej uličke sa ocitol iba Urbain Le Verrier, toto hľadanie nakoniec dopadlo úspešne. Aj keď nie tak rýchlo ako pri Neptúne, novú planétu roku 1930 objavil americký astronóm Clyde Tombaugh (1906 – 1997) porovnávaním fotografických platní a nie priamo hľadením do teleskopov. Dostala meno Pluto.

Ale príbeh sa zamotáva. Presnejšie merania postupne ukazovali, že objavená planéta je oveľa menšia, ako sa pôvodne myslelo. Nakoniec sa ukázalo, že vôbec nemôže byť zdrojom neočakávaných rozdielov v pozorovaniach Neptúna. A aby toho nebolo málo, roku 1989 družica Voyager 2 pri svojom prelete okolo Neptúna presnejšie odmerala jeho hmotnosť a ukázalo sa, že vlastne nikdy žiadne nezrovnalosti neboli. Opravené výpočty so správnou hmotnosťou hovoria, že Neptún sa pohybuje presne tak, ako predpovedajú Newtonove zákony. A tak bolo Pluto objavené úplnou náhodou, doslova bolo v správnom čase na správnom mieste.

# Existencia atómov

Richard Feynman (1918 – 1988), americký fyzik a držiteľ Nobelovej ceny z roku 1965, vo svojich prednáškach z fyziky píše: „Ak by pri nejakej katastrofe zanikli všetky vedecké poznatky a ďalším generáciám by mala zostať len jediná veta, ktoré tvrdenie by pri najmenšom počte slov obsahovalo najbohatšiu informáciu? Som presvedčený, že je to atómová hypotéza…“ Cieľom vedeckého bádania je v čo najmenšom počte slov povedať čo najviac informácií. Napríklad Newtonove pohybové zákony v troch vetách opisujú všetky možné mechanické deje. Stačí vedieť túto informáciu vhodne dešifrovať. Podľa Feynmana je vedomosť o existencii atómov vedou par excellence. Jediná veta „Veci sa skladajú z atómov!“ dokáže vysvetliť množstvo inak ohromne tajomných fyzikálnych javov. Napríklad postavme pred seba dva rovnaké poháre: jeden s horúcim čajom, druhý so studenou vodou. Potom hoďme do každého tabletku šumivého celaskonu. Ak vieme, že svet sa skladá z atómov, to, čo uvidíme, sa dá vcelku priamočiaro pochopiť, ale bez tejto vedomosti len veľmi ťažko.

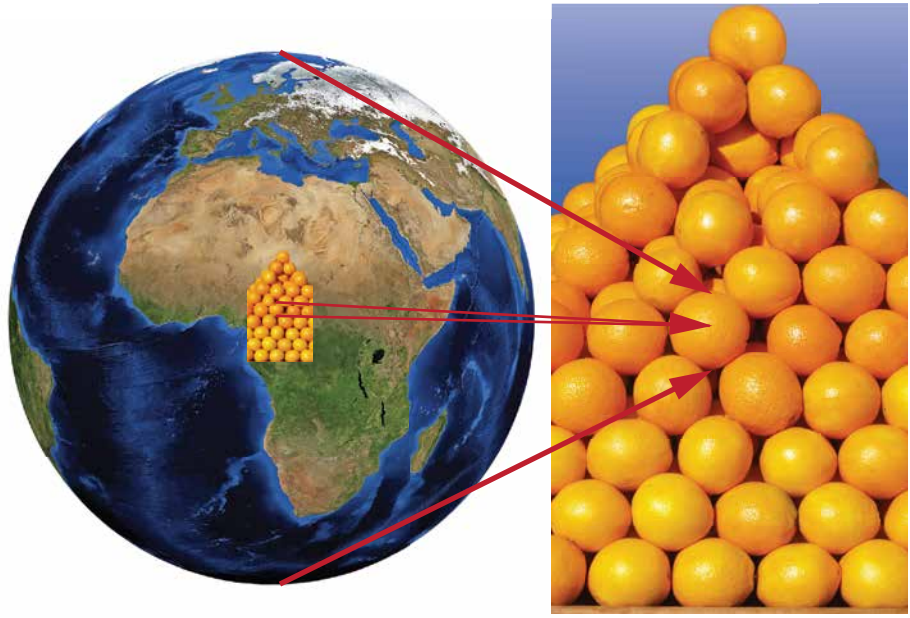
Preto sa v škole učíme, že hmota okolo nás nie je spojitá, ale je zložená z maličkých atómov: miniatúrnych guľôčok, ktoré sú očami, dokonca aj za pomoci mikroskopu, neviditeľné. Asi nás neprekvapí, že tento poznatok ani zďaleka nie je taký samozrejmý a odhaliť nespojitú štruktúru hmoty bolo veľmi ťažké. A aj to je pravdepodobne dôvodom Feynmanovho presvedčenia. Proces, ktorý sa začal pozorovaním anglického chemika začiatkom deväťnásteho storočia, skončil sa až veľmi presným štúdiom Brownovho pohybu roku 1908.

## Čo sú to atómy?

Na úvod tejto kapitoly si povedzme, čo sú to atómy. Pomôže nám to pochopiť, ako a prečo ľudia blúdili pri ich objavovaní.

Atómy sú základné stavebné kúsky všetkého okolo nás. Ako uvidíme v inej kapitole, aj atómy majú svoju vnútornú štruktúru, ale tu sa na ne môžeme pozerať ako na guľôčky. Existuje niekoľko desiatok druhov guľôčok, ktoré sa vedia podľa istých pravidiel, ktorým hovoríme chémia, spájať do zložitejších štruktúr – do molekúl.

Atómy sú malé. Veľmi malé. Malosť atómov sa dá len veľmi ťažko predstaviť. Možno ju napríklad charakterizovať číslom. Veľkosť atómov je približne $10^{-10}$ metra. Čo to znamená? Dá sa to predstaviť takto: Ak by sme Zem zmenšili na veľkosť bežného pomaranča, pomaranč na pôvodnej Zemi by sa zmenšil



Predstavme si zemeguľu ako pyramídu z pomarančov v supermarkete. Ak by sme ju zmenšili na veľkosť pomaranča, pôvodné pomaranče by sa zmenšili približne na veľkosť atómov.

na veľkosť atómu. Atómy sú tak nepredstaviteľne malé, ako nepredstaviteľne veľká je naša planéta.

Inú predstavu toho istého dáva počet atómov, ktorý potrebujeme na vybudovanie bežných vecí. Predstavme si napríklad, že zoberieme pollitrový pohár obľúbeného nealkoholického nápoja a vylejeme ho do najbližšej rieky. Počkáme dosť dlho na to, aby sa voda vo svete dostatočne pomiešala, a z rieky si naberieme vodu do pohára. V pohári bude niekoľko tisícok molekúl vody z pôvodného pohára, aj keď sa nápoj premiešal so všetkými oceánmi na svete! Molekúl v našom pohári je tisícnásobne viac ako pollitrových pohárov vo všetkých oceánoch. A ešte inak. Pollitrový pohár vody obsahuje viac molekúl, ako je hviezd v celom vesmíre.

Atómy sú také maličké, že sa principiálne nedajú pomocou svetla vidieť ani pod najlepším mikroskopom. Vlnová dĺžka viditeľného svetla, ktorá určuje jeho rozlišovaciu schopnosť, je niekoľko stoviek nanometrov, asi tisíckrát viac ako veľkosť atómov. Svetlo sa od mriežky atómov bez problémov odrazí podobne ako fitlopta od podlahy s malými nerovnosťami.

## Staroveký atomizmus

K nápadu, že hmota by sa mohla skladať z maličkých, okom neviditeľných častíc, sa dopracovalo prekvapivo veľa učencov starovekých civilizácií, ale väčšina z nich na to mala rôzne filozofické a náboženské dôvody, ktoré sú z dnešného pohľadu na prírodné vedy iba strieľaním od pása.

Špecifickú pozíciu medzi nimi majú starogrécki filozofi Leukippos z Milétu (5. stor. pred n. l.) a Démokritos z Abdér (asi 460 – asi 370 pred n. l.). Aj ich viedla k predstave o štruktúre hmoty idea, ktorá nebola založená na žiadnom pozorovaní alebo výpočte, ale napriek tomu mala ich motivácia v niečom pravdu. Verili, že základné pravidlá sveta musia byť jednoduché a že komplikovanosť a rozmanitosť všemožných foriem v prírode musí byť až ich dôsledkom. To sa dá veľmi jednoducho dosiahnuť myšlienkou, na ktorej sú založené mnohé dnešné stavebnice. Z niekoľkých základných kúskov, ktoré možno navzájom rôzne spájať, sa dá vytvoriť prakticky nekonečné množstvo rôznych tvarov a predmetov. A tak prišli s myšlienkou, že svet je zložený z maličkých kúskov, ktoré robia presne to isté. Spájajú sa a v množstve možných kombinácií dávajú zrod rôznorodosti sveta, ktorý pozorujeme. Podľa ich predstavy sa tieto kúsky nedali viac deliť na nič menšie, a tak dostali meno atómy (z gréckeho *atomon* – nedeliteľný). A meno im zostalo, aj keď sa na začiatku dvadsiateho storočia ukázalo, ako to s ich nedeliteľnosťou v skutočnosti je.

Loď. Alebo lietadlo. Alebo dom. Je to na nás, z rovnakých kúskov sa dá postaviť prakticky čokoľvek.

## Štruktúra hmoty od Aristotela po Daltona

V prvej kapitole sme hovorili, ako Aristoteles v štvrtom storočí pred naším letopočtom svojou filozofiou položil základy prírodných vied. Vo svojom učení odmietol atómovú hypotézu z jednoduchého dôvodu, že atómy nevidieť. Kryštál soli môžeme drviť stále na menšie a menšie kúsky. Nezdá sa, že by sa tento proces mal niekedy skončiť.

Zloženie hmoty Aristoteles založil na teórii štyroch základných elementov: zeme, vody, vzduchu a ohňa, ktorú prebral od svojich predchodcov. Rôzne látky v prírode sa potom skladajú z týchto štyroch elementov v rôznom pomere. Prisúdil im ešte ďalšie dve sady vlastností: suchý oheň a zem v kontraste s vlhkou vodou a vzduchom; horúci vzduch a oheň v kontraste so studenou vodou a zemou. Stretnutie elementov rôznych vlastností má za následok zmeny, čím Aristoteles vysvetľoval rôzne deje od metalurgie až po varenie.

Počas renesancie sa znovu objavila aj predstava o nespojitom zložení hmoty. Medzi najvýraznejšie postavy tej doby, ktoré v nejakej forme uvažovali týmto smerom, patrili Galileo Galilei, Francúz René Descartes (1596 – 1650), Angličan Robert Boyle (1627 – 1691) a sčasti aj Isaac Newton. V úvahách mnohých z nich sa častice hmoty dali donekonečna deliť a nezodpovedali jednotlivým chemickým prvkom, ktoré vtedy zväčša ešte neboli známe. Preto si na úvahy o atómoch, ako im rozumieme dnes, musíme počkať až do začiatku devätnásteho storočia.

## Atomizmus chemikov

Najdostupnejšie procesy prebiehajúce až na atomárnej úrovni sú chemické reakcie. Na rozdiel od fyzikálnych procesov v chemických reakciách dochádza k zmenám látok. Napríklad chemická látka, ktorej hovoríme vodík, sa môže spojiť s inou chemikáliou, kyslíkom, a vytvoria zlúčeninu – vodu. Preto nie je prekvapivé, že v dejinách modernej vedy ako prví narazili na existenciu atómov práve chemici.

Ukázalo sa, že chemické reakcie sa riadia veľmi špecifickými pravidlami. Recepty, podľa ktorých prebiehajú, sú veľmi striktné. Napríklad pri vzniku vody z kyslíka a vodíka musia byť hmotnosti vstupujúcich látok vo veľmi presnom vzťahu. Na vznik 100 gramov vody potrebujeme presne 11,19 gramov vodíka a 88,81 gramov kyslíka. Ak pridáme viac kyslíka, nevznikne kyslíkovejšia voda, ale tento nadbytočný kyslík zostane nezreagovaný. Viac vody vznikne, až keď dodáme aj patričné množstvo vodíka. Chemickým látkam, ktoré takto vstupujú do reakcií, hovoríme prvky. Môžu sa zúčastňovať na rôznych, často veľmi komplikovaných procesoch, ale samy sa nedajú vytvoriť zmiešaním iných chemikálií a ani sa chemicky nedajú rozdeliť. Ako uvidíme, rádioaktivita dokáže meniť aj niektoré chemické prvky, ale to už je úplne iný príbeh.

Druhé dôležité pozorovanie je, že niektoré prvky vedia v tej istej kombinácii, ale za rôznych podmienok dať vznik rôznym zlúčeninám. Napríklad kyslík a vodík môžu okrem vody vytvoriť aj peroxid vodíka. Pre túto reakciu tiež platí tvrdenie o veľmi špecifickom vzťahu medzi hmotnosťami vstupujúcich látok. Na 100 gramov peroxidu vodíka potrebujeme 5,925 gramov vodíka a 94,075 gramov kyslíka. V týchto štyroch gramážach je ukrytá existencia atómov.

Tým, ktorí majú radi hádanky a chcú sa s týmto problémom trochu potrápiť, vrelo odporúčam, aby sa na tomto mieste zastavili a skúsili porozmýšľať, v čom presne sa existencia jednotlivých stavebných kúskov látok skrýva a ako.

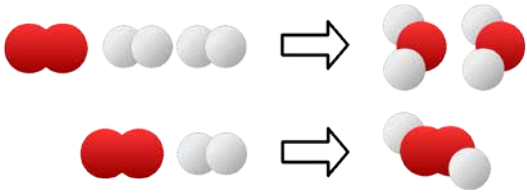
A tu je odpoveď.

Kľúčovým je pomer hmotností prvkov v týchto dvoch reakciách. Ani jeden nie je pekné celé číslo, ale jeden pomer je presný dvojnásobok toho druhého. Pekné celé číslo na mieste, kde v princípe môže vyjsť čokoľvek, je takmer vždy dôkazom nejakej hlbšej, nespojitej štruktúry. V tomto prípade by dvojka hovorila, že ak do vzniku vody vstupuje rovnaký počet častíc kyslíka a vodíka, v druhej reakcii je častíc kyslíka dvakrát viac ako častíc vodíka. Dnes už vieme, že to je trochu inak, pretože do týchto reakcií vstupujú v skutočnosti molekuly a nie jednotlivé atómy. Ďalej si o tom povieme viac. Pomer hmotností v prvej reakcii udáva pomer hmotnosti jednej častice kyslíka a jednej častice vodíka. O hmotnostiach častíc sme sa však z týchto informácií nič nedozvedeli.

Rovnako to funguje aj pri iných kombináciách chemických prvkov, ktoré vedia vytvoriť viacero rôznych zlúčenín. Chemici študovali podobné procesy oddávna ešte pod značkou alchymistov. Vedomosti generácií vedcov spolu s mnohými vlastnými zisteniami zhrnul anglický chemik John Dalton (1766 – 1844) roku 1808 do troch zákonov pre chemické reakcie. Podľa jeho predstavy sú chemické prvky tvorené malými nezničiteľnými časticami, pre ktoré si požičal meno od antických filozofov. Všetky atómy daného prvku sú identické a atómy rôznych prvkov sú navzájom rôzne. Chemické zlúčeniny sú tvorené rôznymi kombináciami týchto atómov a pri chemických reakciách sa atómy v kombináciách preskupujú.

Na dokončenie Daltonovej atómovej myšlienky a na konzistentný opis chemických reakcií boli potrebné ešte dve ďalšie ingrediencie. Tie nám pomôžu odhaliť molekuly v predchádzajúcich reakciách.

Prvou bolo pozorovanie francúzskeho chemika Josepha Gay-Lussaca (1778 – 1850). Ten roku 1809 zistil, že ak študujeme chemické reakcie plynov a namiesto hmotností sa pozeráme na objemy, tak pekné celé čísla sú



Na hornom obrázku je znázornená reakcia, pri ktorej sa molekula kyslíka $O_2$ spojí s dvomi molekulami vodíka $H_2$ a vytvorí dve molekuly vody $H_2O$. Na dolnom obrázku vznik peroxidu vodíka $H_2O_2$.

už priamo pomery objemov plynov v reakciách. A nie až pomery týchto pomerov. Napríklad dva litre vodíka a jeden liter kyslíka dajú vznik dvom litrom vody, jeden liter vodíka a jeden liter kyslíka dá vznik jednému litru peroxidu vodíka. Druhým pozorovaním je predpoklad talianskeho chemika Amedea Avogadra (1776 – 1856), ktorý vysvetlil zdanlivý rozpor medzi Daltonovým a Gay-Lussacovým pozorovaním. Podľa neho rovnaké objemy plynov za rovnakých podmienok obsahujú rovnaký počet molekúl. Tak sa teda prišlo na to, že plynný vodík nie je zložený z jednoduchých atómov, ale z molekúl. Každá molekula kyslíka sa musí skladať z dvoch atómov, aby ju bolo možné rozdeliť.

Všetky známe chemické reakcie sa stali veľkou hádankou. Bolo potrebné konzistentne zvoliť atómové zloženie molekúl, ktoré sa v reakciách vyskytujú. Keďže nevieme, koľko atómov vstupuje do danej chemickej reakcie, dali sa určiť iba relatívne hmotnosti jednotlivých atómov, teda koľkokrát je atóm jedného prvku ťažší ako atóm iného prvku. V polovici deväťnásteho storočia mali o nich chemici už celkom dobrú predstavu. Nenápadne tam o sebe začala dávať vedieť ich vnútorná štruktúra, ale k tomu sa dostaneme neskôr. Teraz sa poďme pozrieť, ako sa atómová hypotéza dostala k fyzikom.

## Atomizmus fyzikov

O zložení hmoty uvažovali aj fyzici, ale spočiatku sa nezdalo, že by táto štruktúra mala mať priame dôsledky na procesy, ktoré študovali. V prvej polovici osemnásteho storočia si švajčiarsky matematik a fyzik Daniel Bernoulli (1700 – 1782) uvedomil, že časticová podstata plynov by mohla vysvetliť ich správanie. Nárazy častíc na steny nádoby by spôsobovali tlak, ktorý sa zväčšuje s rýchlosťou častíc. Teplota častíc by súvisela s ich energiou. Medzi svojimi kolegami však pochopenie nenašiel a fyzici až do polovice deväťnásteho storočia vysvetľovali termodynamické procesy úplne inak.

Na prelome osemnásteho a deväťnásteho storočia nastal v termodynamike veľký rozmach. Na plné obrátky sa rozbehla priemyselná revolúcia,

ktorej symbolom a hnacím motorom bol parný stroj. V továrňach, v doprave a prakticky v každej ľudskej činnosti to bol nástroj, ako premieňať energiu uloženú v palive na mechanickú prácu ďaleko prevyšujúcu schopnosti svalov akéhokoľvek živočícha. Preto bolo dôležité pochopiť kľúčové deje pri tejto premene: ako možno dané množstvo tepla čo najefektívnejšie premeniť na prácu, akú úlohu hrajú jednotlivé fázy parného stroja a podobne. Mnohé zo starších predstáv o fungovaní tepla a zohrievaní telies skombinoval vo svojej teórii kalorika francúzsky chemik Antoine Lavoisier (1743 – 1794). Podľa nej je teplo dôsledkom nehmotnej tekutiny, ktorá dostala meno kalorikum. Túto tekutinu nemalo byť možné vytvoriť ani zničiť, teplejšie telesá jej mali obsahovať viac a chladnejšie menej. Sama seba mala odpudzovať, a preto sa chladnejšie telesá ohrievajú od teplejších.

V polovici deväťnásteho storočia však v uvažovaní fyzikov postupne nastal významný obrat. Popularita atómovej hypotézy u chemikov oživila túto myšlienku aj medzi fyzikmi, navyše sa postupne ukazovali diery v teórii kalorika. Popri technologickom a vedeckom pokroku sa objavovali javy, ktoré od tejto látky vyžadovali komplikovanejšie a komplikovanejšie vysvetlenia. Napríklad je zvláštne, že ohrievaním, teda dodávaním kalorika, sa ľad roztopí, ale jeho teplota sa nezmení.

Najpresvedčivejším argumentom proti kaloriku bolo pozorovanie britského vedca Benjamina Thompsona (1753 – 1814). Ten si ešte roku 1798 všimol, že pri vŕtaní kanónov dochádzalo k zohrievaniu toho istého kusu kovu neustále – aj po mnohých opakovaniach. Ak by vrták z tela kanóna postupne vytláčal kalorikum, jeho zásoba by sa mala skôr či neskôr minúť, ale to sa nikdy nestalo. Neskôr anglický fyzik James Joule (1818 – 1889) ukázal, že akúkoľvek prácu možno využiť na ohriatie vody. Definitívne tak dokázal súvis energie, tepla a teploty.

Mnoho fyzikov postupne znovu objavilo a zlepšilo vyše sto rokov staré výsledky Daniela Bernoulliho. Na ich čele boli najmä Joule a nemecký fyzik Rudolf Clausius (1822 – 1888). Vznikala kinetická teória látok a postupne sa darilo odvádzať z predstavy o hmote ako veľkom množstve zrážajúcich sa častíc ďalšie dôsledky. Medzi nimi bolo dôležité odvodenie koeficientu viskozity (vnútorného trenia) plynu, ktoré spravil rakúsky vedec Johann Loschmidt (1821 – 1895) roku 1865. V ňom sa prvýkrát objavila priamo veľkosť častíc. Viskozita totiž súvisí so zrážkami medzi molekulami a frekvencia týchto zrážok závisí od toho, aké sú molekuly veľké. A tak sa zistilo, že častice vzduchu majú

veľkosť približne jedného nanometra. To je asi štvornásobok dnešnej, oveľa presnejšie nameranej hodnoty. Ale aj tak tento výsledok odhalil prekvapivo malé rozmery molekúl a atómov.

## Odporcovia atómovej hypotézy

Na prvý pohľad sa môže zdať, že ide všetko ako po masle, ale pripomeňme si, že atómová hypotéza bola dlho veľmi kontroverznou témou a jej prijatie ani zďaleka nebolo priamočiare.

Veľmi dlho bol prirodzeným a hlavným argumentom proti existencii atómov jednoduchý fakt, že ich nevidno, a tak sa zdá, že ich existencia je v rozpore s pozorovaním. Od roku 1865 bolo jasné, že sa principiálne nedajú vidieť, čo však mnohým odporcom stále nestačilo. Podľa nich bolo zavedenie neviditeľných objektov na vysvetlenie pozorovateľných javov proti zásadám vedy.

Hlavné ťažkosti atómovej hypotézy však boli inde. Reálny plyn sa správa tak, že nech v nádobe na začiatku vyzerá akokoľvek, veľmi rýchlo ju rovnomerne vyplní, vyrovná sa v ňom tlak a teplota. A tak to zostane. Všetky procesy majú tendenciu zabúdať na počiatočnú konfiguráciu plynu, napríklad ak plyn nebol rozdelený rovnomerne alebo mal niekde vyššiu teplotu. Tieto deje sú často nevratné, čo je v ostrom protiklade s tým, ako fungujú zrážky častíc podľa newtonovskej mechaniky. Ako prvý na tento rozpor upozornil práve Johann Loschmidt. Vidíme, že debata o atómoch nebola iba zaslepenou hádkou dvoch skupín ľudí, ale mnohým záležalo na skutočnom rozlúsknutí problému, a preto pracovali na jeho oboch stranách.

Francúzsky matematik Henri Poincaré (1854 – 1912) ukázal, že v jednoduchej pravouhlej škatuli sa pri pružných zrážkach akákoľvek počiatočná konfigurácia častíc dostane po čase do stavu, ktorý je veľmi podobný tomu počiatočnému. Pri plynoch sa nič také nedeje.

V odborných termínoch ide o zdanlivý rozpor atómovej hypotézy s druhou termodynamickou vetou. Prvá termodynamická veta hovorí, že v prírode sú povolené iba také procesy, pri ktorých sa zachováva energia. Druhá termodynamická veta hovorí, že ani z nich nie sú všetky povolené. Napríklad horúci čaj. Podľa prvej vety pri chladnutí čaju musí byť energia, ktorú čaj stratí, rovnako veľká ako energia, o ktorú sa ohreje šálka a okolitý svet. Druhá termodynamická veta zakazuje opačný proces, pri ktorom by

spontánne stratila energiu studená šálka a zohrial sa horúci čaj. Aj keď by tento proces spĺňal vetu prvú.

V druhej polovici devätnásteho storočia začala vznikať štatistická fyzika. Jej tvorcov bolo mnoho, spomeňme len troch najdôležitejších: škótskeho fyzika Jamesa Clerka Maxwella (1831 – 1879), rakúskeho fyzika Ludwiga Boltzmanna (1844 – 1906) a amerického vedca Willarda Gibbsa (1839 – 1903). Ich snahou bolo odvodiť z atómovej hypotézy a predstavy plynov ako húfu drobných častíc, ktoré lietajú priestorom a zrážajú sa, kompletné zákony termodynamiky.

V čom bol hlavný problém? V termodynamike charakterizuje telesá malý počet veličín, napríklad tlak, teplota. Na mikroskopickej úrovni atómov je však údajov príliš veľa. Všetky častice tvoriace teleso majú svoju hmotnosť, polohu a rýchlosť a je ich ohromne veľa. Tieto detailné informácie sa do makroskopických veličín musia nejako premietnuť. Ale ako? V štatistickej fyzike sa predpokladá, že konkrétne vlastnosti jednotlivých častíc nie sú dôležité; pre procesy na veľkých škálach, teda pre termodynamiku, sú dôležité len akési spriemerované vlastnosti. Keď do horúceho čaju vložíme prst, narážajú do neho častice všemožných rýchlostí. Niektoré pomalšie, niektoré rýchlejšie, ale to, aké presne sú, pre nás až také dôležité nie je. Ako veľmi vás čaj popáli, rozhoduje priemerná energia častíc, ktorá určuje teplotu čaju ako celku. A ako je to s tou nevratnosťou dejov podľa štatistickej fyziky? Nuž má čisto pravdepodobnostný charakter. Napríklad častice plynu v spomínanej škatuli. Nachádza sa ich tam ohromne veľa, a preto je veľmi nepravdepodobné, že by sa všetky nahromadili na jednom mieste. Ak sú ich polohy naozaj náhodné, budú v škatuli rozdelené viac či menej rovnomerne. Je to niečo také, ako keď hádžeme tisíckrát mincou. Ak by sme hodili výrazne viac alebo menej ako päťsto znakov, čosi by nebolo v poriadku. V plyne je to rovnako, len hodení mincou je viac, ako je hviezd vo vesmíre. No a formálne tieto myšlienky v štatistickej fyzike opisuje fyzikálna veličina, ktorej sa hovorí entropia.

Takéto vysvetlenia odporcom atómovej hypotézy ani zďaleka nestačili. Spochybňovali správnosť odvodenia druhej termodynamickej vety v štatistickej fyzike a tiež poukazovali na jej zdanlivú nevedeckosť. Prechod od exaktného opisu sveta fyzikálnymi zákonmi k štatistickému zmýšľaniu bol mnohým extrémne proti srsti. Atómová hypotéza tiež zápasila s tým, že newtonovská mechanika, ktorá mala opisovať dynamiku atómov, nijakým

spôsobom nedokázala vysvetliť, ako sa z atómov stávajú molekuly, prečo držia pohromade a prečo sú niektoré chemické reakcie možné a iné nie. Z najznámejších a najhlasnejších odporcov atómovej hypotézy spomeňme rakúskeho fyzika Ernsta Macha (1838 – 1916) a nemeckého chemika Wilhelma Ostwalda (1853 – 1932).

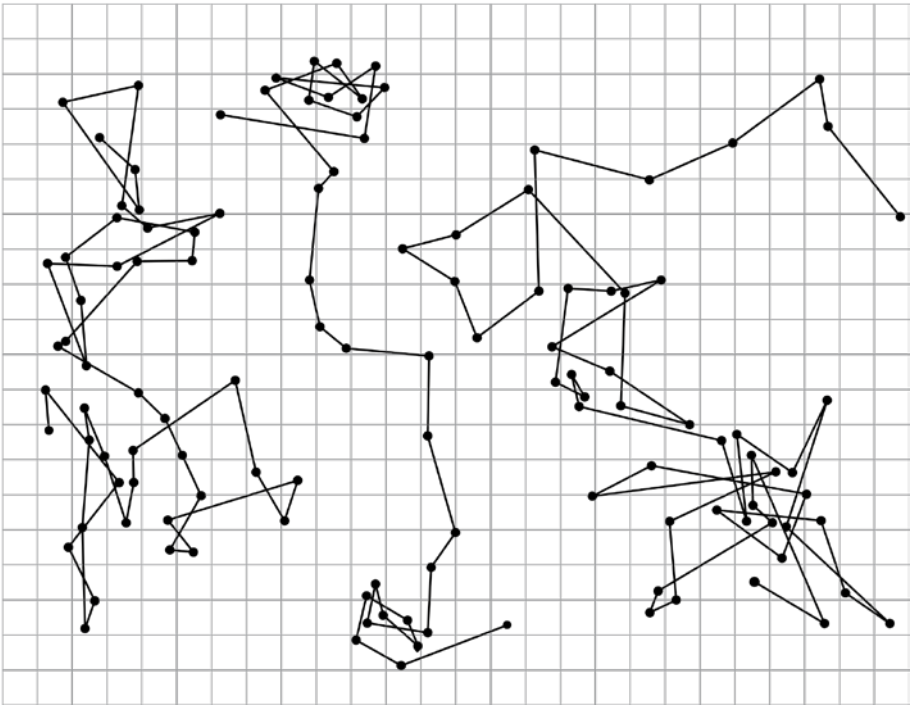
A stále tu bol najväčší problém: z atómovej hypotézy vo fyzike nič nevyplývalo. Zástancom existencie atómov sa darilo iba odvodzovať, viac alebo menej presvedčivo, už doteraz známe fakty, ale nepodarilo sa z nej dostať žiadnu principiálne novú vedomosť. Tak bola na prelome storočí debata o skutočnej existencii atómov vo vedeckých kruhoch horúcou témou. Zapojili sa do nej ľudia z rôznych vedeckých oblastí, ktorí priniesli mnoho zaujímavých pohľadov a argumentov, ale široký konsenzus sa dosiahnuť nepodarilo.

## Nečakané rozuzlenie

Veľké otázky si zaslúžia veľké odpovede a reálna existencia atómov nebola výnimkou. Ako dnes už vieme, pravda sa ukázala na strane atomistov, ale miesto, kde sa definitívne našla, by čakal málokto. Na povrchu malej kvapky vody pod mikroskopom.

Keď pod mikroskopom sledujeme kúsky z peľového zrniečka alebo niečo podobne malé a ľahké, čo pláva v kvapaline, uvidíme, že to nestojí, ale náhodne poskakuje z miesta na miesto. Tento pohyb nesie meno škótskeho botanika Roberta Browna (1773 – 1858), ktorý ho roku 1827 ako prvý detailne študoval. Samotný efekt si ešte roku 1785 všimol holandský lekár Jan Ingenhousz (1730 – 1799) ako poskakovanie drobných čiastočiek uhoľného prachu na povrchu kvapiek etanolu, ale bol to Brown, kto mu venoval veľkú pozornosť. Myslel si totiž, že v pohybe kúskov peľových zrniečok objavil podstatu života a akúsi špecifickú energiu živých organizmov. Pri ďalšom štúdiu však zistil, že sa rovnako správajú akékoľvek malé čiastočky bez ohľadu na ich pôvod. Neskôr sa zistilo, že pohyb musí byť spôsobený niečím v kvapaline a nie je vlastnosťou častíc oddelene.

Tu prichádza na scénu Albert Einstein. Píše sa rok 1905, Einstein pracuje ako patentový úradník v švajčiarskom Berne. Okrem toho je však mladým a veľmi ambicióznym vedcom, ktorý má zacielené na tie najťažšie a najdôležitejšie otázky svojej doby. Vtedy išlo o definitívne rozuzlenie problému existencie atómov.



Reprodukcia originálnych Perrinových zápiskov z pozorovaní mikroskopom. Čierne bodky reprezentujú polohu malej častice zaznačenú každých 30 sekúnd. Spojnice týchto bodov nereprezentujú skutočnú dráhu častice, tá bola oveľa nepravidelnejšia. Einstein predpovedal, že priemerná dĺžka týchto spojníc rastie s odmocninou časového úseku, po ktorom polohu častice sledujeme.

Už pred Einsteinom si viacero vedcov uvedomilo, že vysvetlenie Brownovho pohybu by bolo možné hľadať v neustálom bombardovaní drobného telesa molekulami kvapaliny, v ktorej sa nachádza. Tieto nárazy nie sú rovnomerné a kvôli ich veľkému množstvu je výsledná sila, ktorou nimi pôsobia na malé teleso, náhodná. To má za následok náhodné poskakovanie a menenie smeru, ktorým sa častica pohybuje.

Einstein si uvedomil, že v Brownovom pohybe existuje priestor na kvantitatívnu, presnú a overiteľnú predpoveď atómovej hypotézy. V jednom z článkov z dôležitého roka 1905 Einstein z predpokladov štatistickej fyziky a atómovej hypotézy presne odvodil priemernú vzdialenosť polôh častice po danom časovom intervale. Pohyb častice a jej posunutie sú náhodné,

ale Einstein predpovedal, že priemerné posunutie častice bude úmerné odmocnine času, počas ktorého necháme časticu poskakovať. Vo svojej dizertačnej práci z toho istého roku dvomi rôznymi spôsobmi odvodil konštantu úmernosti v tomto vzťahu, ktorá okrem iného závisí aj od veľkosti molekúl kvapaliny.

Einstein vo svojom článku *O pohybe malých častíc rozptýlených v statických kvapalinách z hľadiska molekulovo-kinetickej teórie tepla* píše: „Ak bude tento pohyb pozorovaný..., bude možné presne určiť atomárne veľkosti... Ak by sa však predpovede tohto pohybu ukázali nesprávne, znamenalo by to silný argument proti molekulárno-kinetickej teórii tepla.“ Niet inej cesty. Einstein dal definitívnu predpoveď. Ak bude pozorovanie v súlade s ňou, existenciu atómov to potvrdí; naopak, pozorovanie v rozpore s predpoveďou sa nedá s atómovou hypotézou zosúladiť.

Overenie Einsteinovej predpovede na seba nedalo dlho čakať. Už roku 1908 francúzsky fyzik Jean Baptiste Perrin (1870 – 1942), jeden z najlepších experimentátorov svojej doby, túto predpoveď potvrdil a konštantu úmernosti presne zmeral. Za svoj objav dostal roku 1926 Nobelovu cenu za fyziku.

A tak sa začiatkom dvadsiateho storočia stala z atómovej hypotézy tentoraz už definitívne atómová teória. No ako uvidíme ďalej, vtedy ľudia už takmer desať rokov vedeli, že ani atómami sa štruktúra hmoty končiť nemôže. Na objavenie čakalo ešte oveľa viac zákonov prírody, ako bolo dovtedy objavených. Ale skôr než sa dovnútra atómov pozrieme my, musíme si posvietiť na svetlo.

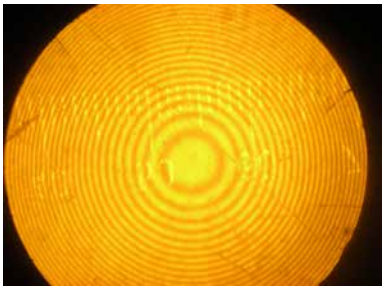
# O povahe svetla

V predchádzajúcej kapitole sme zistili, ako sa postupne budovala predstava o zložení hmoty od atómov antických filozofov až po overenie Einsteinovej predpovede pre Brownov pohyb. Teraz obrátime pozornosť na svetlo, veľmi podstatnú súčasť nášho každodenného života. Vďaka nemu vidíme, ohrieva nás a v súčasnosti plní úlohu sprostredkovateľa takmer všetkých informácií. Pochopenie svetla sa takisto začína u antických filozofov a cez mnohé osobnosti dejín klasickej fyziky sa opäť končí u Alberta Einsteina. Snaha dobre uchopiť tento fenomén je tiež plná diskusií, viac či menej nesprávnych predstáv a jej koniec znamená začiatok toho, čomu dnes hovoríme moderná fyzika.

## Lom, difrakcia, dvojlom a polarizácia

Ani vlastnosti svetla neušli pozornosti a úvahám filozofov antického Grécka. Ich myšlienky však boli často veľmi vzdialené realite. Napríklad dlho pretrvávala predstava, že vidíme vďaka lúčom vychádzajúcim z našich očí, ktoré sa od predmetov odrážajú späť. Slnko malo mať iba schopnosť tieto lúče podporovať, a preto bez neho v noci vidíme horšie. Z dnešného pohľadu bol relevantný prínos Euklida (4. stor. pred n. l.), ktorý dokázal, že svetlo sa šíri po priamkach. Tým položil základy geometrickej optiky a v nej napríklad jednoduchého zákona pre odraz svetla na lesklých povrchoch – že uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu. Neskôr sa veľa ďalších vedomostí podarilo získať arabským učencom na prelome tisícročí, napríklad zákon pre lom, podľa ktorého svetlo na hranici dvoch rôznych médií mení smer svojho šírenia. Charakteristike média, ktorá lom svetla opisuje, hovoríme index lomu. Ďalšiu zaujímavú vlastnosť, rozklad bieleho svetla na hranole, poznali už Rimania a Newtonovi sa podarilo dokázať, že svetlo jednej farby sa už nedá ďalej rozložiť a že spojením rôznych farieb dostaneme naspäť biele svetlo. Ukázal aj to, že farba telies súvisí s tým, aké svetlo odrážajú a aké pohlcujú.

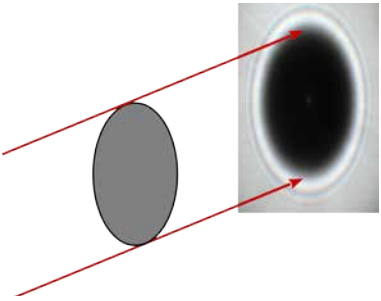
Ceruzka v pohári s vodou sa zdá v dôsledku lomu svetla deformovaná.



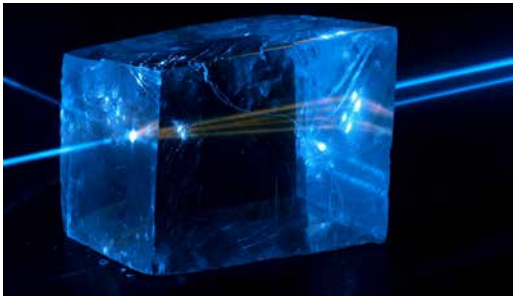
Newtonove krúžky vznikajú na rozhraní rovnej a guľovej sklenenej plochy. Keď zasvietime na takúto sústavu svetlo, časť prejde cez guľové sklo, odrazí sa od rovného skla a po prechode guľovým sklom môže s prvou časťou lúča interferovať.

K tomu mnohé ďalšie vedomosti získali brusiči skla v snahe zostrojiť lepšie ďalekohľady a iné optické prístroje. Pri tom sa podarilo zistiť, že na veľmi tenkých vrstvách skla sa svetlo dokáže správať zvláštne. Niekedy sa objavujú farby dúhy, inokedy zas svetlé a tmavé pásy, napríklad Newtonove krúžky, ktoré vznikajú na rozhraní guľovej a rovinnej sklenenej plochy. V tých časoch si ľudia všimli aj to, že v dobrých podmienkach nie sú tiene malých prekážok alebo svetelné stopy malých otvorov dokonale ostré. Sú rozmazané a na ich okrajoch tiež vznikajú malé svetlé a tmavé pruhy. Tento jav dostal pomenovanie difrakcia alebo ohyb.

Roku 1669 opísal dánsky vedec Erasmus Bartholinus (1625 – 1698) dvojlom svetelného lúča na kalcite. Optický jav, ktorý sa ukázal skutočnou skúškou v akomkoľvek úsilí vysvetliť povahu svetla. Pri vhodnej orientácii kryštálu sa lúč pri lome rozdvojí, ako by mal materiál dva rôzne indexy lomu. V bežnom svetle sa teda musia skrývať dva rôzne druhy svetla, ktoré majú v mnohom identické vlastnosti, ale pri prechode cez niektoré kryštály sa správajú rôzne. Skrytú vlastnosť svetla dokázalo aj ďalšie experimentovanie s prechodom lúčov viacerými kryštálmi a s ich otáčaním. Dostala meno polarizácia.



Fotografia tieňa prekážky s tvarom disku. Tmavé a svetlé pásy v okolí hrany objektu sú spôsobené difrakciou.



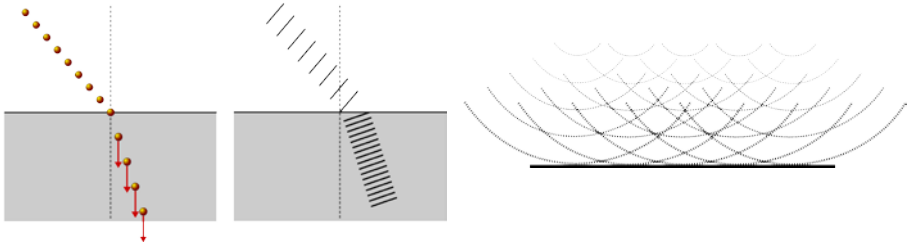
Laserový lúč dopadá na kryštál kalcitu, na ktorom sa dvojlomom rozdelí na dva lúče s rôznou polarizáciou.

# Vlny alebo častice? Častice!

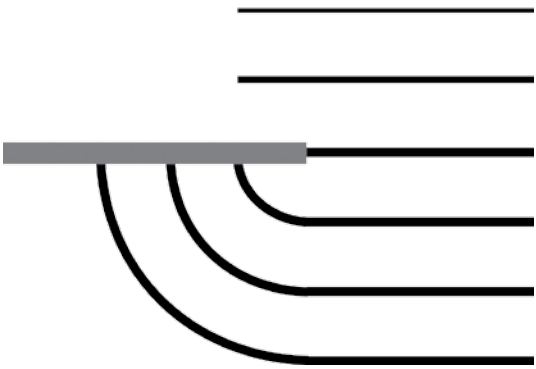
V sedemnástom storočí vznikali prvé moderné predstavy o svetle, ktoré mali ambíciu všetky dovtedajšie poznatky skĺbiť. Postupne sa zrodili dve rôzne predstavy o tom, čo svetlo vlastne je. Častica a vlna. Časticovú alebo korpuskulárnu hypotézu vyslovil filozof Pierre Gassendi (1592 – 1655) v prvej polovici sedemnásteho storočia. Podľa neho bolo svetlo zložené z malých častíc, ktoré sa pohybovali priestorom podobne ako hmota. Neskôr tento názor prebral Isaac Newton a postavil na ňom svoje druhé najdôležitejšie dielo *Optika* z roku 1704. S vlnovou hypotézou svetla zas prišiel ako prvý anglický vedec Robert Hooke (1635 – 1703). Pod jeho vplyvom vypracoval detailnejšiu vlnovú teóriu svetla dánsky fyzik Christiaan Huygens (1629 – 1695) roku 1690. Oba prístupy vysvetľovali vyššie uvedené procesy a vlastnosti svetla rôzne a každý mal svoje silné aj slabé stránky.

Na vysvetlenie lomu svetla časticová hypotéza predpokladala, že v hustejšom médiu sa svetelné častice pohybujú rýchlejšie. Mala to spôsobovať sila, ktorá na ne v prostredí pôsobí. Mala byť gravitačného pôvodu a pôsobiť na častice smerom do prostredia kolmo na jeho rozhranie. Naopak, vlnová hypotéza vysvetľovala lom pomalším šírením svetla v látkach. Na tento rozdiel pamätajme, neskôr bude dôležitý. Rozdielna rýchlosť šírenia svetla v rôznych médiách bola charakterizovaná ich indexom lomu.

Vlnová hypotéza sa najskôr zdala byť v rozpore s pozorovaným priamočiarym šírením svetla, napríklad vlny na vodnej hladine po hodenom kameni sú kruhové. Huygensovi sa však podarilo vysvetliť, ako sa lúče zložené z vĺn šíria rovno; priamy lúč vzniká ako obálka týchto vĺn. To však nedokázalo vysvetliť, prečo sa svetlo nešíri za roh. Zvuk, ktorý je podobným vlnením, počuť za rohom bez problémov.



Lom svetla z pohľadu časticovej teórie (naľavo) a vlnovej teórie (v strede). Na pravom obrázku náčrt toho, ako z guľových vlnení vzniká priamo sa šíriaci lúč.



Vlnenie sa dokáže šíriť aj za prekážku.

Vysvetlenie svetla rôznych farieb v časticovej hypotéze vyžadovalo periodicky sa meniace vlastnosti častíc, ktoré sa menili aj podľa toho, v akom médiu sa častica pohybovala. Vo vlnovej hypotéze sa ponúkalo prirodzené vysvetlenie farieb na základe rôznej vlnovej dĺžky svetla, ale nikto z jej autorov sa tejto myšlienky nechopil. Na svoje objavenie čakala až do deväťnásteho storočia.

Časticová teória vysvetľovala difrakčné javy silovým pôsobením hrán telies na častice svetla a následnou zmenou smeru ich pohybu. Vlnová teória, tak ako ju formuloval Huygens, tieto javy vysvetliť nedokázala.

Polarizáciu svetla vysvetľovala časticová hypotéza hranatým a nesymetrickým tvarom častíc. Rôzne polarizácie svetelných lúčov zodpovedali rôznemu natočeniu takto tvarovaných častíc. Vlnová hypotéza si ani s polarizáciou nevedela uspokojivo poradiť.

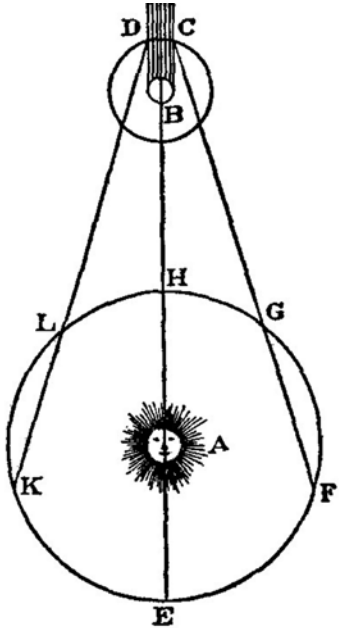
Ďalším problémom hypotézy o vlnových vlastnostiach svetla bola potreba existencie média na jeho šírenie. Podobne ako sa zvukové vlny šíria vo vzduchu, aj svetelné vlny by mali mať nositeľa. Ľudia si nevedeli predstaviť šírenie vĺn prázdnym priestorom. Huygens tomuto médiu prisúdil názov pre antický element, z ktorého boli telesá v nebeskej sfére: éter. To však očividne predstavuje problém. Toto médium má dokonale vypĺňať celý priestor a prenikať do vzduchu, vody, skla a všetkého ďalšieho, čím svetlo vie prechádzať. Pritom však nemá mať nijaký vplyv na mechanický pohyb telies alebo planét. To znie veľmi zvláštne.

Od začiatku osemnásteho storočia sa na svetlo väčšina vedcov pozerala ako na prúd častíc. Vysvetlenia na základe tohto prístupu sa zdali prirodzenejšie. Ďalším dôvodom bola určite aj výrazná autorita Isaaca Newtona v komunite a veľké úspechy jeho myšlienok v mechanike. Vlnová hypotéza však stále niekde potichu tlela, až kým ju nerozdúchali objavy na začiatku deväťnásteho storočia.

# Rýchlosť svetla

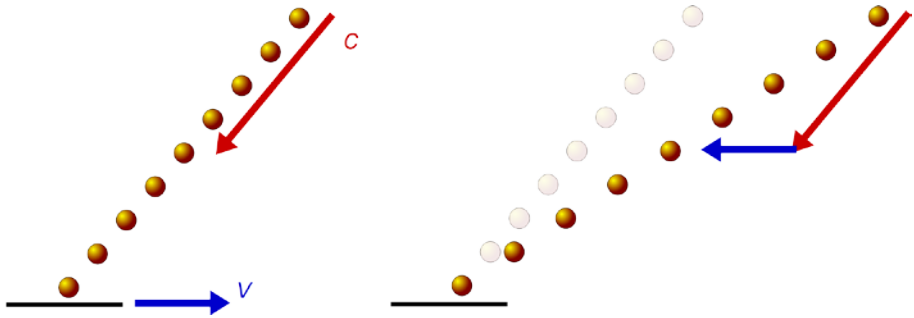
Všetci máme skúsenosti s tým, že zvuk sa šíri konečnou rýchlosťou. Napríklad počítame sekundy medzi bleskom a hromom, aby sme zistili, ako ďaleko sa búrka nachádza. Nie každému však napadne, že aj to, kým uvidíme blesk, chvíľu trvá. A svetlo sa šíri konečnou, aj keď obrovskou rýchlosťou. Rozumnú predstavu o rýchlosti šírenia svetla získali ľudia už na konci sedemnásteho storočia. Trik bol v tom, že nevyužili merania na Zemi, ale astronomické pozorovania v slnečnej sústave.

Prvý, kto dokázal, že sa svetlo šíri konečnou rýchlosťou, bol dánsky astronóm Ole Rømer (1644 – 1710). V rokoch 1671 – 1676 študoval Jupiterove mesiace, konkrétne ich zákryty, teda situácie, keď sa mesiac z pohľadu Zeme stratí za Jupiterom. Rømer si všimol, že časy medzi jednotlivými zákrytmi sú rôzne podľa toho, či sa Zem pri svojom obehu okolo Slnka nachádza k Jupiteru bližšie alebo ďalej. Vysvetlil si to tým, že v druhom prípade musí svetlo pri svojej ceste od Jupitera prekonať navyše ešte časť dráhy Zeme. Neskôr z týchto meraní ako prvý vypočítal rýchlosť šírenia svetla práve Huygens. Získal hodnotu približne 215 000 km/s, čo je síce výrazne menej ako dnešných 299 792,458 km/s, no pre rádový odhad rýchlosti svetla to stačilo.




Ilustrácia z Rømerovho článku z roku 1676. Slnko (A) vytvára za Jupiterom (B) tieň. Bod L reprezentuje polohu Zeme v momente, keď sa Jupiterov mesiac objaví z tieňa (D). Po jednom obehu mesiaca (za čas, ktorý poznali astronómovia veľmi presne) sa Zem bude nachádzať v bode K (obrázok nie je v mierke). To znamená, že svetlo musí k Zemi uraziť ešte dráhu LK, a preto mesiac vidno vychádzať z tieňa neskôr. Rømerovi sa podarilo zmerať kumulatívny efekt viacerých takýchto obehov.

Neskôr sa objavilo oveľa presnejšie astronomické meranie rýchlosti svetla, ktoré tiež výrazne zahralo do karát časticovej hypotéze. Pri neúspešnom hľadaní hviezdnej paralaxy anglický astronóm James Bradley (1693 – 1762) pozoroval v rokoch 1725 – 1728 iný zdanlivý pohyb hviezd. Tento jav dostal meno aberácia a bol vysvetlený ako dôsledok




Aberácia svetla a jej vysvetlenie v časticovej teórii svetla. Z pohľadu Zeme treba k rýchlosti častíc c pridať aj rýchlosť Zeme v. Keďže tá sa počas roka mení, bude sa meniť aj pozorovaná rýchlosť častíc, a teda aj pozorovaná poloha hviezdy na oblohe.

skladania rýchlosti častíc svetla a rýchlosti Zeme. Je to podobný efekt, ako keď v idúcom aute dopadajú kvapky na čelné sklo auta pod iným uhlom než v stojacom aute. Častice svetla sú ako kvapky dažďa a hviezdu vidíme pod takým uhlom, pod akým na Zem dopadá jej svetlo. Preto sa poloha hviezdy mení podľa toho, ako sa pohybuje Zem. Zo známej obežnej rýchlosti Zeme a zmien polohy hviezd určil Bradley hodnotu rýchlosti svetla na 303 000 km/s.

Okrem úctyhodnej presnosti to znamenalo ďalší silný argument v prospech časticovej hypotézy. Vysvetliť aberáciu analógiou s dažďovými kvapkami bolo priamočiare. Vo vlnovej hypotéze bolo potrebné robiť ďalšie predpoklady o správaní éteru. Časticová povaha svetla sa teda zdala neohrozená.

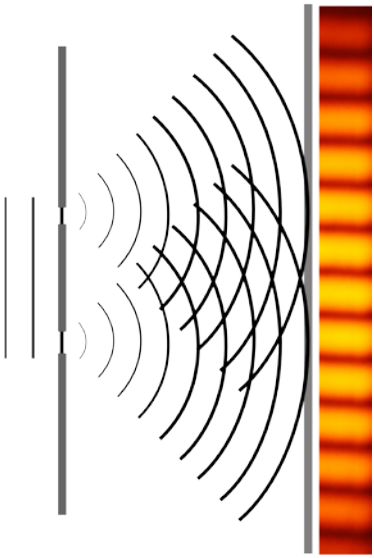
## Svetlo sú vlny!

Všetko sa začalo meniť, keď roku 1804 britský polyhistor Thomas Young (1773 – 1829) pozoroval interferenciu svetla. Interferencia je výsostne vlnový jav. Vysvetliť ho akokoľvek inak je veľmi problematické, naopak, pre vlny ide o úplne priamočiary a jednoduchý dôsledok. Keď na jedno miesto prídu naraz vrcholy dvoch vĺn, sčítajú sa a výsledkom je oveľa výraznejšie vlnenie. Naopak, ak sa stretne maximum jednej vlny s minimom druhej, výsledkom je vzájomné vyrušenie vlnení.

Young ukázal, že presne čosi také sa deje so svetlom. Detailne študoval vlastnosti tieňov drobných prekážok a pripísal ich interferencii. Pri jednom

pokuse napríklad osvietil doštičku užšiu ako jeden milimeter a pozoroval jej tieň. Ak zakryl jeden z okrajov doštičky, tieň v okolí druhého okraja sa výrazne zmenil. Svetlo prichádzajúce z jednej strany doštičky musí teda ovplyvňovať svetlo na opačnej strane.

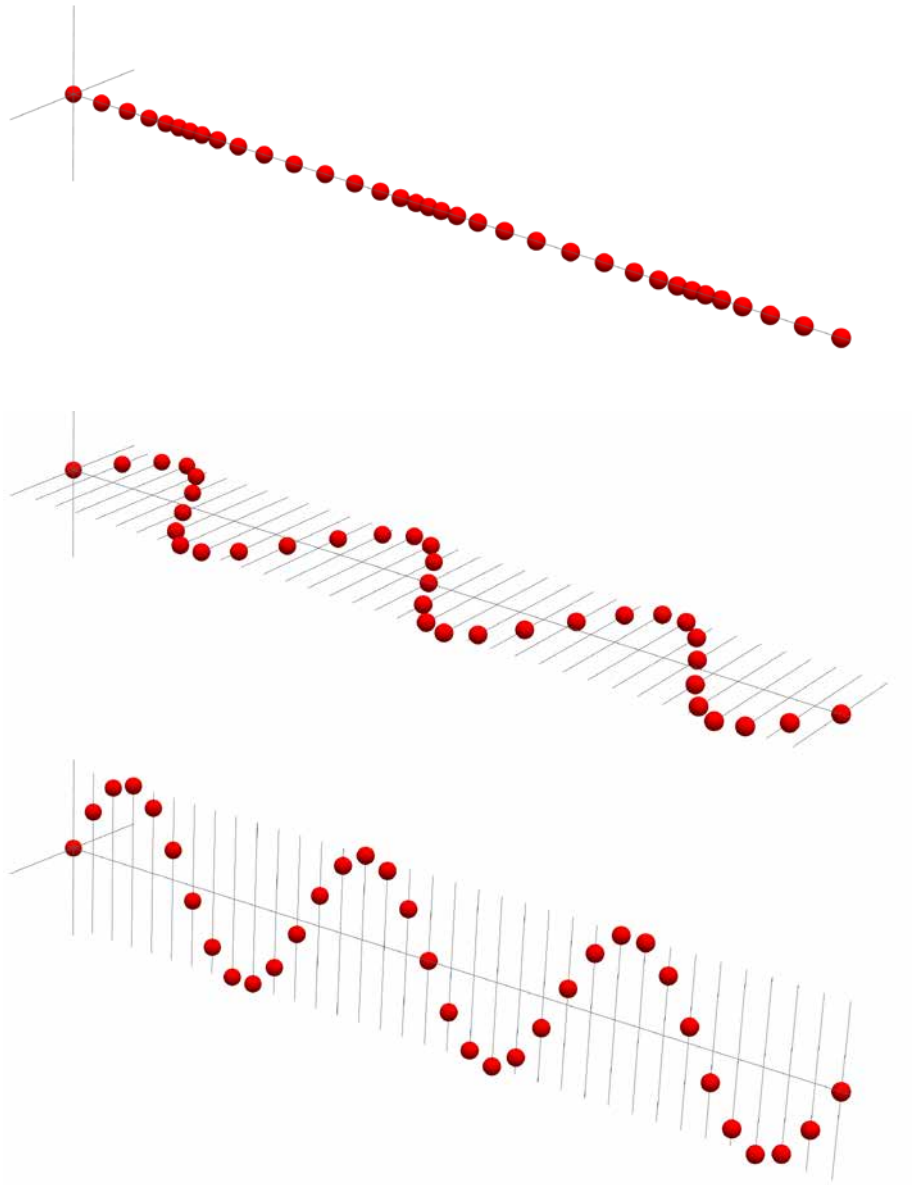
Najdôležitejší z Youngových experimentov nesie dodnes jeho meno a pozoruje sa pri ňom obraz, ktorý vzniká osvetlením dvoch veľmi tenkých blízkych štrbín. V dôsledku interferencie svetla z oboch štrbín nevznikne iba jednoduchý súčet dvoch obrazov samostatných štrbín. Na niektorých miestach bude stena osvetlená výraznejšie a to sú presne miesta, kde sa stretli maximá svetelných vĺn vychádzajúcich z jednotlivých štrbín. Naopak, kde sa stretne maximum s minimom, vlny sa zrušia a vznikne tmavé miesto.



Náčrt dvojštrbinového experimentu. Na miestach, kam dorazili súčasne maximá svetelných vĺn z jednotlivých štrbín (hovoríme, že vlny sú vo fáze), vznikli svetlé pásy. Na miestach, kde sa stretli maximá a minimá svetelných vĺn, vznikli tmavé pásy.

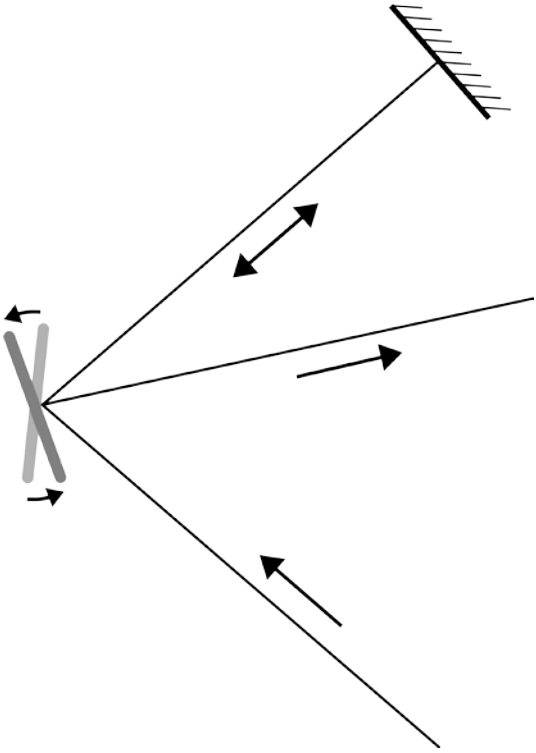
Toto zistenie ešte na presvedčenie celej komunity nestačilo najmä preto, že vlnová hypotéza doposiaľ nedokázala vysvetliť jav polarizácie. Háčik bol v tom, že éter mal byť veľmi ľahké fluidum. Očakávalo sa teda, že bude vedieť niesť iba pozdĺžne vlnenie, pri ktorom kúsky média kmitajú v smere šírenia vlny ako pri šírení zvuku. S prevratnou myšlienkou, že vlnová hypotéza by dokázala vysvetliť polarizáciu, ak by išlo o vlnenie iného druhu, prišiel francúzsky fyzik a inžinier Augustin Jean Fresnel (1788 – 1827).

V priečnych vlnách na rozdiel od pozdĺžneho kmitania v smere dopredu-dozadu kmitá médium v smere hore-dole alebo doprava-doľava, teda v smere kolmom na smer šírenia vlny. Sú to práve tieto dva rôzne smery kmitania priečnej vlny, ktoré dávajú šancu vysvetliť dve rôzne polarizácie svetla. Fresnel detailne dopracoval vlnovú hypotézu a matematicky formalizoval niektoré Huygensove myšlienky o šírení svetla ako vlny. Roku 1821 zverejnil prácu, v ktorej na základe vlnovej hypotézy svetla uspokojivo vysvetlil takmer všetky jeho pozorované vlastnosti.



Na hornom obrázku náčrt pozdĺžneho vlnenia: kmitanie je v smere pohybu vlny a dochádza k zhusťovaniu a zrieďovaniu média. Na spodných dvoch obrázkoch dva rôzne módy priečneho vlnenia, pri ktorých kmitá médium vo vodorovnom a zvislom smere.

Záverečným a jasným dôkazom, že svetlo má charakter vĺn, bolo veľmi presné meranie rýchlosti jeho šírenia, tentoraz už v pozemských podmienkach. Uskutočnil ho roku 1850 francúzsky fyzik Léon Foucault (1819 – 1868) a využil pri ňom veľmi rýchlo rotujúce zrkadlo. Lúč svetla sa od neho odrazil smerom k druhému zrkadlu, ktoré lúč odrazilo naspäť. Kým sa lúč dostal naspäť k prvému zrkadlu, to sa medzičasom o trochu otočilo, a tak sa lúč neodrazil do pôvodného smeru, ale trochu vedľa. Zo známej rýchlosti otáčania zrkadla a rozmerov niekoľkokilometrovej aparatúry dospel k hodnote rýchlosti svetla 298 000 km/s. Pri takomto postupe sa svetlu dali priamočiaro do cesty dať rôzne iné prostredia. Tu si pripomenieme, že časticová hypotéza predpokladala, že v hustejších prostrediach sa svetlo šíri rýchlejšie, vlnová hypotéza, naopak, pomalšie. Foucault ukázal, že rýchlosť šírenia svetla je vo vode menšia ako vo vzduchu, čo bol dôkaz vlnovej hypotézy a definitívny rozpor s časticovou hypotézou.



Náčrt merania rýchlosti svetla pomocou otáčajúceho sa zrkadla. Svetelný lúč dopadne na zrkadlo, ale kým sa vráti, zrkadlo sa otočí o istý malý uhol a lúč sa odrazí do iného smeru. Na základe pozorovania tejto zmeny možno určiť rýchlosť svetla.

V skutočnosti všetky argumenty proti vlnovej teórii svetla z čias Newtona boli opodstatnené. Mnohé javy, ktoré vlnová hypotéza predpovedala, neboli pozorované, pretože vtedajšie prístroje na to nestačili. Keď sa objavili zariadenia s dostatočnou presnosťou, potvrdila sa aj vlnová podstata svetla. Dôvodom veľmi malých prejavov vlnových vlastností svetla, aspoň v bežných situáciách, je veľmi veľká rýchlosť svetla a jeho malá vlnová dĺžka vo viditeľnej časti spektra. V Huygensových časoch ešte nebol k dispozícii ani

matematický aparát potrebný na opis svetla vlnami a správne teoretické vysvetlenia nemal šancu spraviť. Niektoré komplikovanejšie matematické postupy dokonca Fresnel vo svojej práci sám vymyslel.

## Maxwellova teória elektromagnetizmu

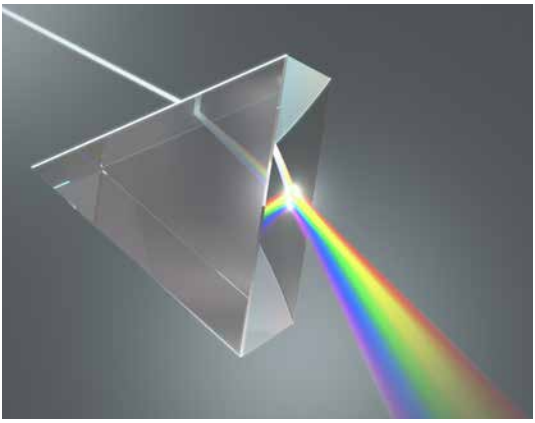
V šesťdesiatych rokoch deväťnásteho storočia sa James Clerk Maxwell venoval okrem štatistickej fyziky aj formalizovaniu vtedajších vedomostí o elektrických a magnetických javoch. Ukázalo sa, že jeho práca mala prekvapivý dôsledok na teóriu a pochopenie svetla. O súvise svetla a elektromagnetických javov sa vedelo už skôr. Anglický vedec Michael Faraday (1791 – 1867) roku 1845 ukázal, že magnetické polia vedia meniť polarizáciu svetla. Ale definitívu v tomto smere dal až Maxwell.

Dopracoval sa k sade rovníc, ktoré známe elektromagnetické javy opisovali a navzájom prepájali a vo svojej finálnej podobe sú jedným z vrcholov teoretickej fyziky deväťnásteho storočia. Keď študoval rôzne riešenia týchto rovníc, všimol si, že jedným z nich je aj riešenie v tvare postupnej vlny. Podľa zákonov elektromagnetizmu zmena elektrického poľa generuje magnetické pole, zmena magnetického poľa generuje zas elektrické pole. Takto sa môžu elektrické a magnetické polia navzájom striedavo budiť a vzruch bude postupovať priestorom. Zatiaľ je to zaujímavé, ale nič špeciálne. No keď Maxwell vypočítal rýchlosť šírenia elektromagnetických vĺn, dostal s veľmi dobrou presnosťou rýchlosť svetla.

Tak niekedy roku 1862 v úvahách a výpočtoch tohto škótskeho fyzika došlo náhle a prekvapivo k ďalšiemu veľkému zjednoteniu. Vyhlásiť svetlo za elektromagnetickú vlnu bolo to najprirodzenejšie, čo mohol Maxwell urobiť. Optické a svetelné javy sa stali prejavom zdanlivo nesúvisiacich elektrických a magnetických procesov.

Maxwellova teória predpovedala, že elektromagnetické vlny sa viditeľným svetlom nekončia. Experimentálne boli objavené deje za červenou a fialovou farbou svetla ešte na začiatku deväťnásteho storočia. Roku 1800 si britský astronóm William Herschel (1738 – 1822) všimol, že slnečné svetlo rozložené hranolom na svetelné spektrum ohrieva teplomer aj na neosvetlených miestach za červeným koncom. O rok nato zasa nemecký chemik Johann Wilhelm Ritter (1776 – 1810) skúmal vlastnosti fialového svetla, o ktorom sa vedelo, že dokáže spúšťať niektoré chemické reakcie. Ukázal, že tento efekt pokračuje aj v miestach, kde sa fialové svetlo končí, a efekt je tam dokonca výraznejší. O povahe týchto dvoch žiarení

sa počas deväťnásteho storočia viedli spory. Z rovníc elektromagnetizmu však vyplývalo, že ide o rovnaké vlny ako viditeľné svetlo, iba inej vlnovej dĺžky. Dnes im hovoríme infračervené svetlo a ultrafialové svetlo, pretože majú menšiu, respektíve väčšiu frekvenciu ako svetlo na tom-ktorom konci viditeľného spektra. Keď sa roku 1887 nemeckému fyzikovi Heinrichovi Hertzovi (1857 – 1894) podarilo úspešne vytvoriť a zachytiť elektromagnetické vlny, bola Maxwellova teória potvrdená. A tým sa aj dokázalo, že svetlo je elektromagnetické vlnenie.

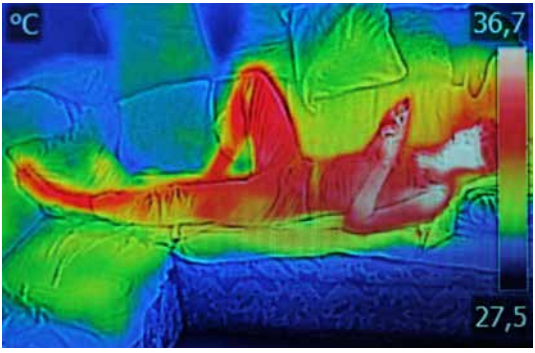


Rozklad bieleho svetla na hranole na farebné spektrum viditeľného svetla. Na začiatku deväťnásteho storočia vedci prišli na to, že po dopade svetla na hranol dochádza aj napravo od červeného konca, aj naľavo od fialového konca spektra k novým dejom.

## Svetlo žiarovky

Zdalo by sa, že fyzika bola na konci deväťnásteho storočia v podstate „utrasená“. Vedomosti v mechanike a elektromagnetizme do seba pekne zapadali, štatistická fyzika slávila prvé veľké úspechy. Zdalo sa, že pochopenie sveta je na dosah, no cez zdanlivo malé medzery v klasickej fyzike začali presvitať jej veľmi vážne problémy.

Jednou z medzier bolo žiarenie zahriatych telies. Všetky telesá bez ohľadu na svoju teplotu vyžarujú elektromagnetické žiarenie. Chladnejšie telesá, napríklad ľudské telá, dostatočne nevyžarujú vo viditeľnej časti spektra, ale pomocou tepelných kamier sa ich žiarenie dá zachytiť. Horúcejšie telesá, napríklad vlákna




Vizualizácia tepelného vyžarovania človeka pomocou infračervenej kamery.

žiaroviek, vyžarujú aj viditeľné svetlo. A práve presný opis žiarenia žiarovky bol na konci devätnásteho storočia veľmi dôležitý technický problém. Žiarovka bola vtedy nový vynález a ľudia sa potrebovali naučiť, ako ju čo najefektívnejšie využívať. Úsilie opísať toto žiarenie zákonmi štatistickej fyziky a teórie elektromagnetického poľa však viedlo k veľmi problematickému výsledku.

Žiarovka by vôbec nemala svietiť! Elektromagnetické žiarenie so sebou nesie energiu a podľa Maxwellovej teórie je pre danú elektromagnetickú vlnu táto energia úmerná frekvencii. Nízkofrekvenčné infračervené žiarenie nás príjemne ohrieva, vysokofrekvenčné ultrafialové žiarenie môže spôsobiť nebezpečné choroby. Keď elektrickým prúdom ohrievame vlákno žiarovky, podľa klasickej fyziky vzniká žiarenie všetkých možných frekvencií. A tu je problém. Vysoké frekvencie si vyžadujú veľa energie. A tá sa bez ohľadu na to, koľko energie dodáme vláknu, všetka premení na veľmi málo intenzívne žiarenie veľmi vysokých frekvencií. Akákoľvek konečná energia by preto nemala stačiť na to, aby žiarovka začala svietiť.

Ak sa obzrieme okolo seba, vidíme, že žiarovky veselo svietia. To je z klasického pohľadu ešte prekvapujúcejšie. Ak sa nám totiž akýmkoľvek spôsobom podarilo žiarovku rozsvietiť, okrem viditeľného svetla by z nej malo vychádzať ohromné množstvo extrémne nebezpečného ultrafialového žiarenia. Svietiaca žiarovka by mala okamžite zničiť všetko vo svojom okolí. Ak sa obzrieme okolo seba, vidíme, že sa to nedeje.

V klasickom vysvetlení je niekde problém. Pracoval na ňom aj nemecký fyzik Max Planck (1858 – 1947) a roku 1900 ho vyriešil zaujímavým trikom. Frekvencie žiarenia, ktoré žiarovka vyžaruje, podelil na maličké dieliky a predpokladal, že v jednom dieliku sa nemôže nachádzať ľubovoľne málo energie, že žiarenie s danou frekvenciou vie žiarovka vyžiariť iba v dávkach (kvantách), ktorých veľkosť je úmerná tejto frekvencii. Konštanta, ktorá charakterizuje najmenšiu možnú energiu v jednom dieliku, dnes nesie Planckovo meno.

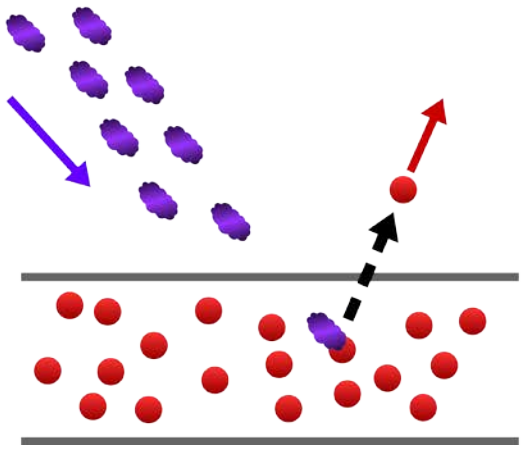
To znamená, že ak vlákno nie je zohriate na dostatočnú teplotu, žiarenie od istej frekvencie vyššie z neho už nemôže vychádzať. Jednoducho v ňom nie je dostatok energie ani na vyžiarenie jednej základnej dávky. Situácia je zachránená. Podľa novej teórie žiarovky zúrivo neničia svoje okolie a dajú sa rozsvietiť dodaním konečnej energie. Planck z tohto predpokladu dokonca odvodil spektrum žiarenia, teda presné množstvo energie, ktoré žiarovka pri danej teplote vyžiari v tej-ktorej frekvencii. A jeho výpočet bol (pre vhodnú hodnotu spomínanej konštanty) v dokonalej zhode s meraniami. Planck však

nedal žiadne vysvetlenie toho, prečo dochádza k takémuto deleniu energie v žiarení. Sám to dokonca považoval iba za užitočný trik, ale nespojitému charakteru žiarenia nepripisoval skutočný význam. Bolo to pre neho „ako keby“.

## Svetlo sú častice!

Tu sa v našom rozprávaní opäť raz objavuje Albert Einstein a jeho zázračný rok 1905. Einstein sa rozhodol zobrať Planckovu myšlienku nie „ako keby“, ale naozaj. Uvedomil si, že Planckov prístup by bol dôsledkom iného, oveľa hlbšieho predpokladu: že elektromagnetické žiarenie sa nešíri spojito, ale v akýchsi balíčkoch, akýchsi dávkach, ktorých energia je úmerná frekvencii zodpovedajúceho žiarenia. V jednom zo štyroch „zázračných“ článkov roku 1905 znovu odvodil Planckove výsledky, ale oveľa prirodzenejšie a elegantnejšie. A navyše, len tak mimochodom vyriešil záhadu fotoelektrického efektu.

Roku 1887 si Heinrich Hertz pri svojich pokusoch všimol, že ultrafialové žiarenie zjednodušuje vznik iskier medzi dvomi nabitými vodičmi. Toto pozorovanie vzbudilo vlnu záujmu a výskum mnohých ďalších fyzikov – najmä Brita J. J. Thomsona (1856 – 1940), Rusa Aleksandra Stoletova (1839 – 1896) a Nemca Philippa Lenarda (1862 – 1947). Podarilo sa im zistiť, že to je dôsledok vyrážania elektrónov v kove pod vplyvom dopadajúceho žiarenia. Tieto elektróny sa môžu podieľať aj na vedení elektrického prúdu, a tak dostal fotoelektrický efekt svoje pomenovanie. Pri jeho štúdiu však prišli aj na to, že pri fotoelektrickom jave sa dejú veci, ktoré ťažko zosúladiť s vlnovými vlastnosťami svetla. So zvyšujúcou sa intenzitou svetla sa množstvo vyrazených elektrónov zväčšuje. Energia jednotlivých vyrazených elektrónov závisí iba od frekvencie



Náčrt fotoelektrického efektu. Elektróny v kove potrebujú na svoje uvoľnenie (vyrazenie) istú energiu a fotóny, ktoré dostatočnú energiu nemajú, ich vyraziť nedokážu. Ak vyrazenie elektrónu nastane, nesie si zvyšnú energiu fotónu vo forme kinetickej energie.

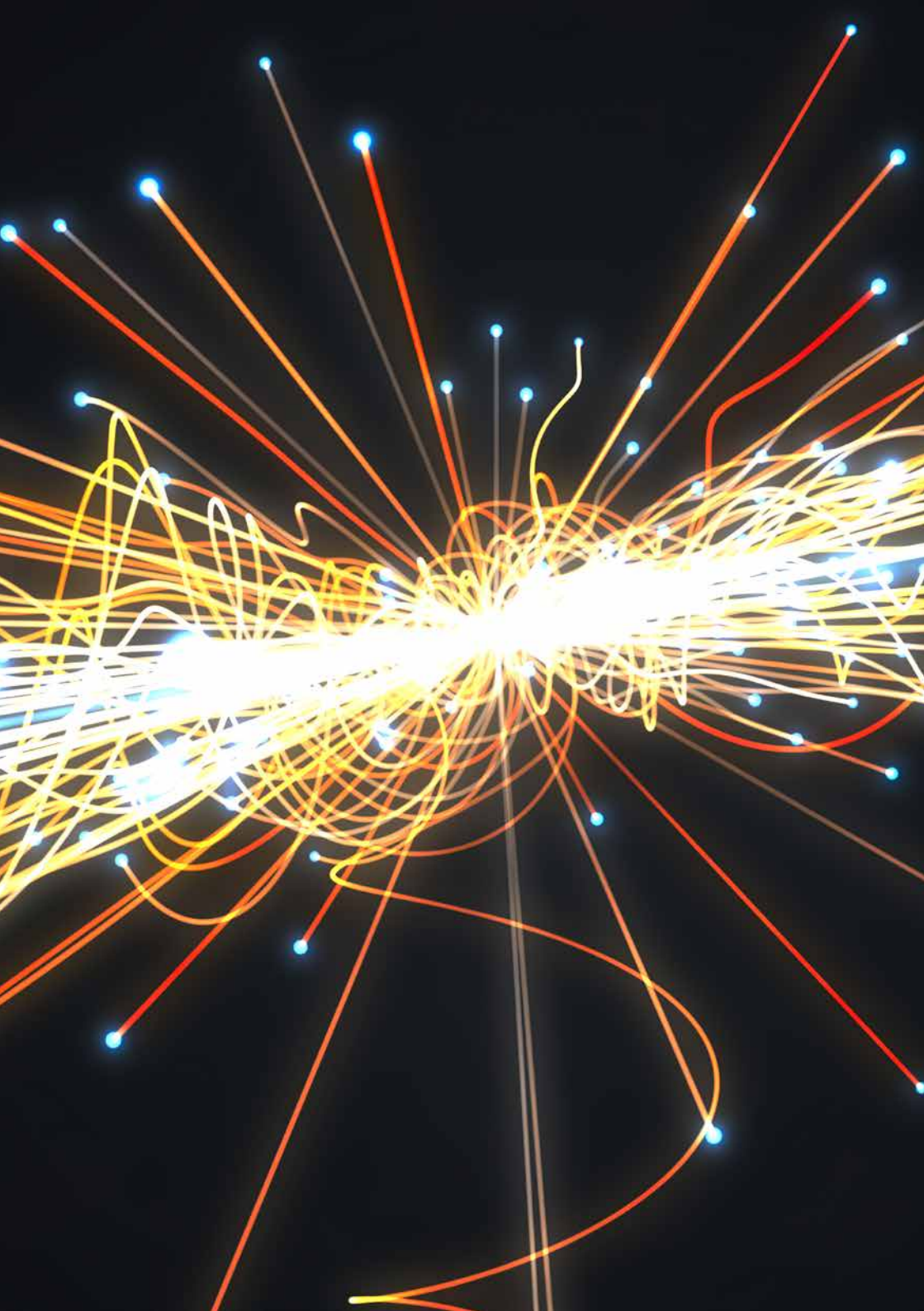
svetla a nezávisí od intenzity, čo je zvláštne. Ak by bolo svetlo vlna a jeho intenzita je daná amplitúdou tejto vlny, bolo by prirodzené očakávať, že vlna vyrazí elektrón tým silnejšie, čím je jej kmitanie výraznejšie. Fotoelektrický jav tiež nenastupuje postupne. Svetlo do istej hraničnej frekvencie elektróny z kovu vôbec nevyráža a efekt sa objaví až pri prekročení tejto frekvencie, ktorá je pre daný kov špecifická. A ani na toto správanie nemá intenzita svetla žiadny vplyv.

Einstein si počas svojej práce na rozšírení Planckovej hypotézy uvedomil, že všetky tieto výsledky by boli veľmi prirodzeným dôsledkom nespojitého charakteru svetla. Vtedy je intenzita svetla daná množstvom energetických balíčkov, ktoré neskôr dostali meno fotóny. Ak by jeden elektrón vedel reagovať iba s jedným fotónom, zvýšenie intenzity dopadajúceho žiarenia by nemalo vplyv na energiu jednotlivých elektrónov. Jediné, čo by na ňu vplyv malo, je energia jednotlivých fotónov. No ak fotóny nemajú dostatok energie, nedokážu elektrón z kovu vyraziť vôbec.

Táto úvaha predpovedá aj veľmi priamočiary vzťah medzi frekvenciou dopadajúceho žiarenia a energiou vyrazeného fotónu, ktorý roku 1914 overil americký fyzik Robert Millikan (1868 – 1953). Einstein dostal roku 1922 Nobelovu cenu a bolo to najmä za jeho vysvetlenie fotoelektrického javu. Millikan – z veľkej časti aj za svoju prácu na tomto jave – ju dostal rok po Einsteinovi. To sa dnes môže zdať trochu prehnané. Einsteinov opis spolu s technickými detailmi a výpočtami sa dnes bežne učí na stredných školách. Ale myšlienka svetla ako prúdu častíc bola vo svojej dobe úplne prevratná. Pamätajme, že vtedy ešte veľa ľudí verilo dokonca v spojitý charakter hmoty. Nespojité vlastnosti elektromagnetického žiarenia boli niečo nepredstaviteľné a ich potvrdenie bolo naozaj revolučné.

## Svetlo sú aj vlny, aj častice

Ďalšie storočné blúdenie vedcov sa skončilo trochu rozpačitým spôsobom. Ukázalo sa, že svetlo sú aj vlny, aj častice, i keď veľmi iné ako tie, ktoré mal na mysli Newton. V istých situáciách (pri interferencii alebo pri difrakcii) sa prejavuje vlnový charakter svetla, v iných (pri fotoelektrickom efekte či pri opise žiarenia telies) sa prejavuje jeho časticový charakter. Na vysvetlenie toho, ako to je možné a čo to má znamenať, si budeme musieť zavolať na pomoc kvantovú mechaniku, ktorej dali zrod práve Planckove a Einsteinove úvahy. Pri tom sa budeme musieť ponoriť ešte hlbšie do štruktúry atómov.



# Zloženie atómov

Doteraz sme boli zväčša svedkami scenára, v ktorom mali ľudia o svete nejakú predstavu a tú sa snažili ubrániť proti novým poznatkom, ktoré jej odporovali. Neraz ju museli upravovať a meniť, až kým sa nedostala do bezvýchodiskovej pozície. Či to už boli aristotelovci, zástancovia geocentrického modelu vesmíru alebo odporcovia atómovej hypotézy. V tejto kapitole ide o scenár iný.

Paralelne s potvrdením atómovej hypotézy sa začalo ukazovať, že nedeliteľnosť atómov a ich pozícia základných stavebných kameňov hmoty – to vôbec nie je také isté. S rýchlym pokrokom v technológiách ľudia objavovali nové a nové vlastnosti hmoty na malých vzdialenostiach. Začiatok dvadsiateho storočia bol obdobím častých, rýchlych a významných objavov, keď s každým novým a presnejším prístrojom ľudia objavovali nové a nečakané vlastnosti sveta. Trochu sa to podobalo situácii v astronómii so zlepšujúcimi sa ďalekohľadmi, len namiesto väčších vzdialeností ľudia prehľadávali tie menšie a menšie.

Z predchádzajúcej kapitoly vieme, že atómy neboli ani zďaleka takou istotou, za akú ich pokladáme dnes. Preto sa žiadny ich opis nemal šancu etablovať a pátranie po štruktúre atómov bolo blúdením v slepých uličkách nového charakteru. Modely atómu pribúdali ako huby po daždi, každý nový objav niektoré pochoval a, naopak, iné na ňom vyrástli.

## Periodická tabuľka chemických prvkov a spektrálne čiary

Prvé myšlienky o vnútornej štruktúre atómov sa objavili prekvapivo skoro. Už sme písali o tom, ako chemici v prvej polovici osemnásteho storočia postupne odhaľovali hmotnosti atómov chemických prvkov. Zistili, že tieto hmotnosti sú okrem pár výnimiek, o ktorých budeme ešte písať, s veľkou presnosťou násobkom hmotnosti najľahšieho z nich, vodíka. Navyše roku 1869 ruský chemik Dmitrij Mendelejev (1834 – 1907) prišiel so svojou periodickou tabuľkou prvkov. Jej moderná verzia visí v každej učebni chémie a hovorí, že vlastnosti chemických prvkov sa periodicky menia s ich rastúcou atómovou hmotnosťou. Už pri svojom objave si Mendelejev uvedomil, že ak by mohli byť hmotnosti a vlastnosti atómov chemických prvkov úplne ľubovoľné, nájsť takúto pravidelnosť by bolo extrémne nepravdepodobné. Veľmi prirodzené je preto očakávať v atómoch nejakú skrytú štruktúru, ktorej dôsledkom budú ich periodické chemické vlastnosti.

Socha D. I. Mendelejeva s neštandardným zobrazením chemických prvkov. Nachádza sa v areáli Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, jej autorom je Karol Lacko.

Pri atómoch sa objavuje ešte jedno usporiadanie charakterizované prirodzenými číslami, ktoré tiež naznačuje, že v atómoch sa deje niečo zaujímavé. Je to štruktúra v spektrálnych čiarach chemických prvkov. O čo ide?

O vlastnostiach svetla a jeho rôznych farbách ľudia vedeli veľmi veľa už na prelome sedemnásteho a osemnásteho storočia. Neskôr sa prišlo na to, že

Pri rozklade svetla chemických prvkov nevidíme farebné spektrum ako pri rozklade bieleho svetla, ale jednotlivé spektrálne čiary charakteristických farieb. Na hornom obrázku rozklad svetla vodíka, na dolnom obrázku rozklad svetla hélia. Zaujímavosťou je, že roku 1868 práve vďaka dovtedy nepozorovaným spektrálnym čiaram vo svetle Slnka bolo objavené hélium. Až neskôr sa ho podarilo izolovať na Zemi.

chemikálie v plameni kahana vydávajú svetlo, ktoré v sebe obsahuje iba niektoré farby svetla a nie kompletné spektrum. Postupným štúdiom sa zistilo, že tieto farby sú pre každý jeden chemický prvok špecifické a tvoria preň akýsi odtlačok prsta. Podľa týchto konkrétnych čiar sa dokonca prítomnosť chemického prvku dá dokázať. Roku 1885 si Švajčiar Johann Balmer (1825 – 1898) všimol, že čiary vodíka nie sú úplne ľubovoľné, ale je v nich istá štruktúra charakterizovaná celými číslami. Nech už svetlo vzniká akýmkoľvek procesom, určite v ňom je pravidelnosť, a preto sa dá v atómoch očakávať nejaká vnútorná štruktúra. Tieto čiary sa ešte ukážu ako veľmi dôležité. Nezabudneme na ne, aj keď teraz pokračujeme o inom.

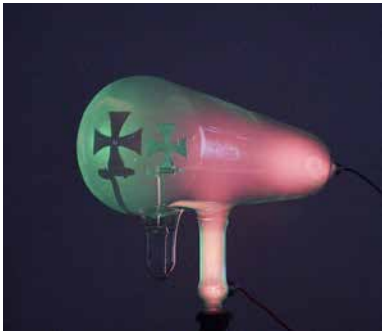
## Subatomárne procesy a častice

Priame dôkazy toho, že sa v atómoch deje niečo hlbšie, prišli tesne pred koncom devätnásteho storočia.

Prvým bol objav rádioaktivity roku 1896. Na začiatku tohto roka začal francúzsky fyzik Henri Becquerel (1852 – 1908) študovať vplyv röntgenových lúčov na vlastnosti uránových solí. Keď mu neprialo počasie, vložil celú aparatúru do šuplíka a venoval sa iným projektom. Aparatúra pozostávala z fotografických platní, ktoré malo osvetľovať žiarenie z uránových solí vybudené slnečným svetlom. Becquerel platne z tmavého šuplíka neskôr predsa len vyvolal a zistil, že urán na nich aj tak zanechal silné stopy. Prišiel k záveru, že z tohto materiálu musí vychádzať žiarenie nezávisle od vonkajších podmienok. Po pokusoch s rôznymi ďalšími uránovými zlúčeninami zistil, že ide o vlastnosť akejkoľvek látky, ktorá urán obsahuje.

O ďalšie pochopenie rádioaktivity sa výraznou mierou zaslúžila poľsko-francúzska manželská dvojica Maria Curie-Skłodowska (1867 – 1934) a Pierre Curie (1859 – 1906). Roku 1897 Maria prišla na to, že intenzita žiarenia závisí od a iba od množstva uránu vo vzorke. Neskôr spoločne identifikovali rádioaktívne vlastnosti pri ďalšom prvku, tóriu. Zistili aj to, že niektoré látky vyžarujú oveľa viac žiarenia, ako by sa podľa obsahu uránu dalo čakať. Tak usúdili, že sa v nich musí nachádzať ďalší rádioaktívny prvok, ktorý sa im aj roku 1898 podarilo identifikovať a dali mu meno polónium. Manželia Curieovci ukázali, že tieto procesy nie sú ani zďaleka viazané iba na urán, a ako prví pre ne použili termín rádioaktivita. Dovtedy sa tomuto efektu hovorilo Becquerelove lúče.

Neónové osvetlenie. Aj keď pôvodná technológia je dnes už nahradená modernejším dizajnom, pôvodné žiarovky využívali priamo charakteristické svetlo ionizovaného plynu.

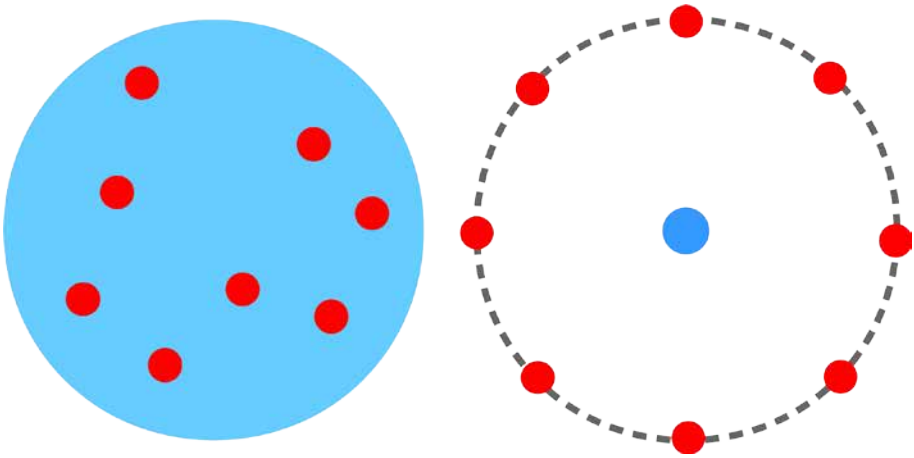


Katódové lúče vytvárajú na povrchu nádoby zelenkavé svetlo. Vylietavajú z katódy v pravej časti nádoby (anóda je umiestnená v dolnej časti nádoby) a za kovovým krížom zanechávajú tieň. Fialová žiara pochádza zo zvyškov ionizovaného plynu v nádobe.

Krátko potom prišiel roku 1898 novozélandský rodák Ernest Rutherford (1871 – 1937) na to, že pri rádioaktivite vznikajú dva rôzne typy žiarenia. Skúmal, ako sa žiarenie správa v magnetickom poli a ako dokáže prechádzať rôzne hrubými prekážkami. Identifikoval relatívne ťažké a kladne nabité žiarenie alfa a ľahšie a záporne nabité žiarenie beta. Roku 1900 francúzsky chemik Paul Villard (1860 – 1934) objavil tretie, elektricky neutrálne a veľmi energetické žiarenie gama.

Rutherford potom spolu s anglickým chemikom Frederickom Soddym (1877 – 1956) študoval medzi rokmi 1900 a 1903 emanácie rôznych rádioaktívnych prvkov. Pod pojmom emanácia sa skrývali látky, ktoré unikali z rádioaktívnych materiálov, ale nemali charakter žiarenia. Rutherford a Soddy ukázali, že tieto látky sú v skutočnosti atómami iných chemických prvkov, ktoré zostávajú po rádioaktívnom rozpade. Tým dokázali, že atómy jedného chemického prvku sa dokážu meniť na iný, že táto zmena je sprievodným javom rádioaktivity a že energia, ktorá sa pri rádioaktivite uvoľňuje, určite pochádza priamo zo samotných atómov.

Krátko po objave rádioaktivity roku 1897 objavil J. J. Thomson elektrón. V prvej polovici devätnásteho storočia sa ukázalo, že v plyne pod nízkym tlakom dokáže elektrické pole vytvoriť žiaru. Farba tohto svetla je určená chemickým zložením plynu a dnes sa používa napríklad na zábavné nočné osvetlenie. Pri ďalšom znižovaní tlaku žiara postupne slabne, ale objaví sa nové svetlo. Na stenách nádoby sa rozsvieti zelenkavé svetlo; sú to už spomínané katódové lúče. O jeho pôvode sa viedli dlhé spory. Jedni hovorili, že ide o elektromagnetické žiarenie, a druhí verili v jeho materiálny pôvod.



Náčrty modelu atómu: vľavo Thomsonov, vpravo Nagaokov.

Túto debatu Thomson rozsúdil v prospech časticovej podstaty katódových lúčov. Malo to však prekvapivú pointu. Detailne skúmal lúče v magnetickom a elektrickom poli a prišiel k záveru, že katódové lúče tvorí častica 1 800-krát ľahšia ako atóm vodíka. Ten bol dovtedy najľahšou známou časticou a bol považovaný za základný stavebný prvok ťažších prvkov. Thomson ukázal, že to tak nie je a že existujú oveľa ľahšie objekty, ktoré sa musia v atómoch nachádzať.

## Modely atómu pred objavom jadra

Pálčivou otázkou bolo, ako to vlastne vnútri atómu vyzerá. S prvým nápadom prišiel sám Thompson. Podľa jeho predstavy bol objem atómu rovnomerne vyplnený kladným nábojom, v ktorom sa voľne nachádzali záporne nabité elektróny. Kladný náboj vykompenzuje záporný náboj elektrónov a atóm je ako celok neutrálny. Keďže elektróny boli oveľa ľahšie ako atómy, predpokladalo sa, že sú aj oveľa menšie a v atóme zaberajú veľmi malý objem. Viacero vedcov vrátane Thomsona uvažovalo nad tým, koľko elektrónov sa v atómoch daného prvku nachádza a ako presne sú usporiadané. Trápili sa so stabilitou konfigurácií záporne nabitých elektrónov s tým, ako by mohla ich štruktúra vysvetľovať chemické vlastnosti prvkov a pozorované spektrum ich charakteristického žiarenia. Bez väčšieho úspechu.

Iné riešenie navrhol roku 1904 japonský fyzik Hantaro Nagaoka (1865 – 1950). Kladný náboj sústredil do stredu atómu a záporné elektróny nechal obiehať po

jednej dráhe okolo neho. Tak atóm trochu pripomínal planétu Saturn s prstencom. Elektróny sú v takejto situácii labilné a v atóme by musel existovať neznámy mechanizmus, ktorý túto konfiguráciu stabilizuje. Ale ešte väčší problém je, že obiehanie elektrónov okolo jadra je nestabilné aj dynamicky. Čo to znamená?

Podľa teórie elektromagnetického poľa je zrýchľovanie nabitých častíc sprevádzané vyžarovaním vĺn, ktoré časticu spomaľujú. Na tomto princípe fungujú vysielače a antény. Elektrón obiehajúci po kružnici okolo jadra zrýchľuje dostredivým zrýchlením. Tak by elektróny v Nagaokovom atóme za zlomky sekundy stratili svoju energiu a spadli by do jadra. Tento a ani žiadny iný model s obiehajúcimi elektrónmi teda ani náhodou nemohol zodpovedať realite vo svete riadenom zákonmi klasickej fyziky.

## Gule z kanóna sa odrážajú od servítky

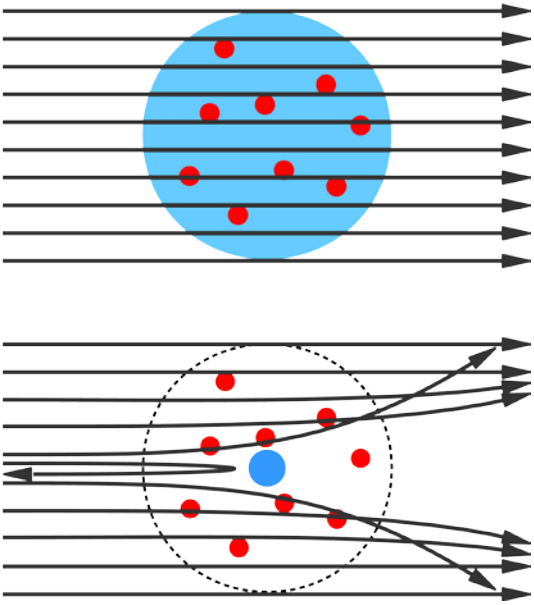
V našej predstave o zložení atómov je rok 1911 prelomovým. Vtedy si Ernest Rutherford uvedomil dôsledky experimentu, ktorý pod jeho vedením o dva roky skôr uskutočnili Hans Geiger (1882 – 1945) a Ernest Marsden (1889 – 1970). Bol to experiment, ktorý svojím neočakávaným výsledkom zmenil vedecký svet a našu predstavu o fungovaní sveta ako žiadny iný!

Rutherfordov kolega Geiger roku 1909 hľadal projekt na zabavenie mladého študenta Marsdena. Rutherford navrhol začať prácu na štúdiu rozptylu alfa častíc na zlatej fólii. Zlato možno vytepať do skutočne tenučkej fólie, a tak je tento materiál veľmi vhodný na podobné experimenty. O alfa časticiach zas Rutherford už skôr ukázal, že ide o atómy hélia zbavené elektrónov. Takýto experiment mal preto šancu povedať niečo o vnútornej štruktúre atómov.

Predpokladaný výsledok experimentu mal byť veľmi nudný. Elektróny v atóme zlata sú príliš malé a príliš ľahké na to, aby dokázali dráhu alfa častice zmeniť. Kladný náboj je zas v thomsonovskom atóme zlata rozptýlený príliš riedko na to, aby odpudivá sila dokázala výrazne odkloniť nalietavajúce častice. Očakávali preto, že alfa častice preletia tenkou fóliou a odchýlia sa od svojho pôvodného smeru len veľmi nepatrne. Výsledok však bol celkom iný. Niektoré častice zmenili svoj smer oveľa výraznejšie a dokonca jedna z asi 8 000 nalietavajúcich častíc sa odrazila opačným smerom, úplne nekompatibilne s vtedy prevládajúcim modelom atómu podľa Thompsona. Rutherford výsledok tohto experimentu označil za najneuveriteľnejšiu správu, aká sa mu kedy dostala do uší. Povedal, že to je „také neuveriteľné, ako keby ste

vystrelili delovú guľu do hodvábnej servítky a náboj by sa vám vrátil späť“.

Rutherfordovi trvalo dva roky, aby správne interpretoval tento výsledok. Nakoniec bolo jediným možným vysvetlením, že kladný náboj nie je v atóme rozmiestnený rovnomerne, ale je sústredený v malom objeme v strede atómu. V takom prípade sa pri zrážke alfa častica a jadro zlata dostanú k sebe dostatočne blízko a odpudivá sila medzi nimi bude dostatočne veľká na to, aby takto drasticky zmenila pohyb alfa častice.



Na hornom obrázku očakávaný výsledok Rutherfordovho experimentu. Alfa častice mali hladko prejsť cez riedky kladný náboj a ľahké elektróny v atóme. Na dolnom obrázku Rutherfordovo riešenie. Ak by bol kladný náboj sústredený v malom objeme v strede, na alfa častice letiace v jeho tesnej blízkosti by pôsobila dostatočne veľká sila na to, aby sa výrazne odklonili zo svojho pôvodného smeru.

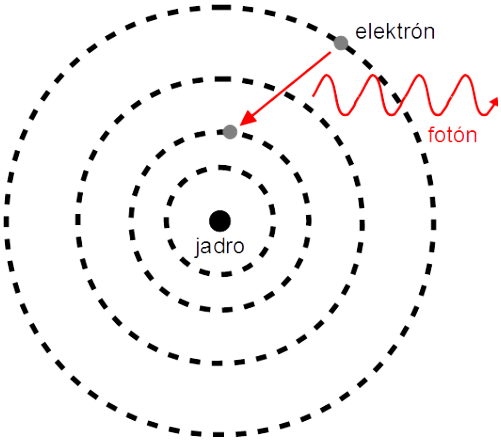
Z presnej štatistiky rozptylu a zo známych hmotností a nábojov častíc Rutherford vypočítal, že kladný náboj musí byť sústredený do priestoru s rozmerom asi stotisíckrát menším, ako je veľkosť atómu zlata. V tomto maličkom priestore, ktorý dostal veľmi prirodzene pomenovanie jadro, je sústredená prakticky celá hmotnosť atómu. Ak by bol atóm veľký ako futbalové ihrisko, jadro by bolo iba malé zrniečko ryže v jeho strede. So všetkou hmotnosťou atómu by nechalo celý ostatný priestor prakticky prázdny, vyplnený iba ľahkými a malými elektrónmi. Pripomeňme, že skutočná veľkosť atómov je približne $10^{-10}$ metra a jadrá majú iba $10^{-15}$ metra.

Tento objav má v sebe ešte jeden dôsledok, trochu skrytý, ale o to fascinujúcejší. Znamená definitívny a neodvrátiteľný koniec klasickej mechaniky. Veľmi podobný atóm mal na mysli Nagaoka a priamočiary výpočet ukázal, že je úplne nekompatibilný so zákonmi elektrodynamiky. Napriek tomu tu taký atóm je: má malé kladne nabité jadro a elektróny okolo neho. Nedá sa nič robiť, to, čo zostalo nekompatibilné, je klasická fyzika.

# Zrod kvantovej mechaniky

V predchádzajúcej kapitole sme písali o Planckovom nápade pozerať sa na svetlo ako na diskrétne balíčky energie a aj o Einsteinovom nápade zobrať túto myšlienku vážne a pripísať svetlu skutočne časticové vlastnosti. Tieto dva momenty sa zvyknú označovať ako začiatok kvantovej mechaniky. Skutočný rozkvet však nová teória zažila až vysvetlením štruktúry atómu.

Ako prvý, a to ešte veľmi opatrne, začal kvantové úvahy aj na hmotu rozširovať dánsky fyzik Niels Bohr (1885 – 1962). Zostrojil model atómu, v ktorom pre častice platia ešte zákony klasickej fyziky, ale sú doplnené o ďalšie obmedzenia. Podľa Bohra atóm vyzerá ako miniatúrna slnečná sústava s veľmi ťažkým jadrom a s elektrónmi. Tie okolo jadra obiehajú v rôznych vzdialenostiach, ktoré však nie sú ľubovoľné. Elektróny sa môžu pohybovať iba po istých špecifických dráhach, na ktorých nestrácajú energiu. Kde presne tieto dráhy sú, je určené vlastnosťami jadra daného chemického prvku. Pri prechode z energetickejšej hladiny na menej energetickú hladinu elektrón vyžiari fotón zodpovedajúcej energie. Tak Bohrov model priamočiaro vysvetľuje jednotlivé farby pozorované v spektre chemických prvkov, pretože medzi povolenými dráhami existujú prechody len istých energetických rozdielov, a tak svetlo vychádzajúce z atómov obsahuje iba tieto frekvencie. Bohr sa pokúsil nastaviť energie povolených dráh tak, aby dostal Bahlmerov zákon. Popritom si všimol, že takéto dráhy zodpovedajú zaujímavej podmienke. Elektróny v Bohrovom atóme obiehajú tak, aby bol moment hybnosti, teda fyzikálna veličina, ktorá charakterizuje toto obiehanie, celočíselným násobkom istej základnej hodnoty. V takom prípade hovoríme, že moment hybnosti je kvantovaný. Podľa výpočtu základná hodnota priamo súvisí s Planckovou konštantou.




Bohrov model atómu a možné energetické hladiny pre elektrón v okolí jadra (vyznačené prerušovanou čiarou). Ak elektrón spadne z vyššej hladiny na nižšiu, vyžiari fotón so zodpovedajúcou energiou.

Tým boli kvantové vlastnosti svetla a hmoty definitívne prepojené. Bohrov model však nedával takémuto zvláštnemu fungovaniu žiadne hlbšie vysvetlenie. Nevysvetlil, prečo na špeciálnych dráhach elektróny napriek všetkému nestrácajú energiu, a iba sa snažil opísať, ako to v atómoch vyzerá. Navyše fungoval presne iba pre atóm vodíka, pre ťažšie prvky už nie. Neskôr zlyhali aj snahy využiť v modeli komplikovanejšie stránky planetárneho pohybu, ako sú elipsy a precesia. V novej mechanike sa teda museli zmeniť priamo zákony pre pohyb častíc.

## Objav protónu a izotopov

Paralelne s teoretickým budovaním kvantovej mechaniky pokračoval aj výrazný technologický a experimentálny pokrok. Po Rutherfordovom objave atómového jadra vedcov trápila ďalšia otázka. Z čoho sa jadro skladá?

Ešte roku 1815 anglický chemik William Prout (1785 – 1850) navrhol hypotézu, že ťažšie atómy by sa mohli skladať z atómov najľahšieho prvku – vodíka. Viedla ho k tomu pravidelnosť v hmotnostiach atómov, o ktorej sme už písali, a atóm vodíka vyhlásil za skutočne fundamentálnu časticu. Keď sa však objavilo viacero prvkov s neceločíselnou atómovou hmotnosťou, od tejto hypotézy sa upustilo.

Úspech pri objave jadra Rutherforda povzbudil a ďalej experimentoval s bombardovaním rôznych terčov alfa časticami. Ak ich nechal voľne vylietať do vzduchu, prístroje zaznamenali vznik jadier vodíka. Pri detailnejšom štúdiu tohto procesu sa mu podarilo identifikovať ako kľúčový proces zrážky alfa častíc s atómami dusíka, v ktorom sa z dusíka vyrazili jadrá vodíka. Tým Rutherford ukázal, že atómové jadrá v skutočnosti obsahujú vodík a Proutova hypotéza sa potvrdila, ibaže na úrovni jadier. A jadro vodíka opäť dostalo štatút elementárnej častice, ktorej dal Rutherford meno protón.

Čo však s prvkami, ktoré nespĺňali Proutovu hypotézu? Napríklad atómová hmotnosť chlóru je 35,45-násobkom hmotnosti atómu vodíka. Tento problém vyriešil objav izotopov. Pomenovanie pochádza zo spojenia dvoch latinských slov: *isos* (rovnaký) a *topos* (miesto). To sú atómy, ktoré zaujímajú v periodickej tabuľke to isté miesto (ide teda o atómy toho istého chemického prvku), ktorých hmotnosti a ďalšie fyzikálne vlastnosti sú rôzne. Vo veľmi zvláštnom historickom vývoji sa nakoniec ukázalo, že pravdu mal Prout a nie Dalton.

Izotopy objavil roku 1913 Soddy. Pri štúdiu produktov rádioaktívnych rozpadov ukázal, že medzi olovom a uránom by sa malo nachádzať asi 40 rôznych atómov, ale v periodickej tabuľke je medzi týmito dvomi prvkami iba 11 miest. Prišiel aj na to, že ak atóm vyžiari alfa časticu a potom dvakrát beta časticu, z chemickej stránky vznikne identický atóm, len s inou hmotnosťou a inými rádioaktívnymi vlastnosťami.

Krátko po prvej svetovej vojne sa ako prvému podarilo definitívne identifikovať rôzne atómy toho istého chemického prvku anglickému chemikovi Francisovi Astonovi (1877 – 1945). Zostrojil dômyselný prístroj, ktorý pracuje na takomto princípe: v elektrickom a magnetickom poli je sila pôsobiaca na atómy daná ich nábojom, ale zotrvačné vlastnosti sú dané ich hmotnosťou. Po ionizovaní atómov sa preto rôzne izotopy toho istého prvku pohybujú rôzne a možno ich oddeliť. Aston objavil dva rôzne stabilné izotopy neónu, chlóru a niektorých ďalších prvkov. Všimol si, že hmotnosť všetkých týchto izotopov je skutočne s obrovskou presnosťou celočíselným násobkom hmotnosti vodíka. Prvky s neceločíselnou atómovou hmotnosťou budú mať v prírode výrazné zastúpenie rôznych izotopov. Spomínaný chlór má izotopy s hmotnosťou 35 a 37 hmotností vodíka.

Z iných experimentov bolo zas jasné, že v chémii v skutočnosti nehrá rolu atómová hmotnosť prvku, ale priamo jeho poradie v periodickej tabuľke. Rutherford z rozptylu alfa častíc letiacich na jadrá rôznych prvkov usúdil, že celkový kladný náboj v strede atómu je daný poradovým číslom daného chemického prvku, napríklad pre vodík jeden elementárny náboj, pre hélium dva, pre zlato 79. To číslo znamená potom aj počet elektrónov, ktoré sa v atóme nachádzajú. K rovnakému výsledku prišiel anglický fyzik Henry Moseley (1887 – 1915) štúdiom spektrálnych čiar. Využil na to Bohrov model atómu, v ktorom energia elektrónových hladín závisí od celkového náboja jadra. Lepšie výsledky dostal, keď bol tento náboj daný pozíciou prvku v periodickej tabuľke a nie jeho atómovou hmotnosťou.

Na základe toho sa medzi fyzikmi okolo roku 1920 udomácnila predstava atómového jadra, v ktorom sa okrem protónov nachádzajú aj elektróny. Tieto elektróny sa nepodieľajú na chemických vlastnostiach atómu, ale znižujú náboj jadra na potrebnú hodnotu. Počet protónov je určený hmotnosťou atómu, napríklad v prípade izotopov chlóru je ich 35 a 37 a počet elektrónov je 18 a 20. Ani takéto vysvetlenie však nemalo dlhé trvanie. Dôvodom bol pokrok v kvantovej mechanike.

## Princíp neurčitosti

Nemecký fyzik Werner Heisenberg (1901 – 1976) roku 1925 prišiel so svojou formuláciou kvantovej mechaniky a uvedomil si, že sa v nej skrýva veľmi hlboký fyzikálny princíp. Roku 1927 ho formalizoval a dodnes sa mu hovorí Heisenbergov princíp neurčitosti. Podľa neho nemožno mať pre kvantovo-mechanický objekt ľubovoľne presnú informáciu o polohe aj o hybnosti súčasne. Ak si to náhodou nepamätáme, hybnosť je súčin rýchlosti a hmotnosti.

Takéto neurčitosti sú základným pravidlom kvantovej mechaniky a zachraňujú napríklad stabilitu atómov. Elektrón nemôže pri svojom pohybe v atóme spadnúť do jadra, pretože by jeho poloha bola definovaná s ohromnou presnosťou. Tak by sme však o jeho rýchlosti nevedeli prakticky nič, s veľkou pravdepodobnosťou by mal veľkú hybnosť, a preto aj rýchlosť a z jadra by vyletel preč.

Princíp neurčitosti tiež kvantifikuje časticovo-vlnovú dualitu. Vlnu môžeme chápať ako niečo, čo má dobre definovanú rýchlosť, ale je rozptýlené všade v priestore. Ako časticu zas môžeme chápať niečo, čo je v priestore presne lokalizované, ale samo má ľubovoľnú rýchlosť. Princíp neurčitosti hovorí, že v kvantovej mechanike nikdy nemôžeme charakterizovať niečo úplne ako časticu alebo úplne ako vlnu.

## Objav neutrónu

Už Rutherford uvažoval o tom, že by sa v jadre mohla nachádzať neutrálna častica, ktorá by bola viazaným stavom protónu a elektrónu. Prítomnosť akýchkoľvek elektrónov v jadre sa však nedala skĺbiť s novými objavmi. Lokalizovať elektrón v takom malom priestore, ako je atómové jadro, je v priamom rozpore s princípom neurčitosti. Pre protóny problém nenastane, pretože sú oveľa ťažšie a veľká neurčitosť v hybnosti sa neprejaví nutne veľkou neurčitosťou v rýchlosti. Pre mnohé izotopy tiež predpovedal protónovo-elektrónový model jadra iné vlastnosti, aké boli experimentálne namerané; častíc tam bolo príliš veľa. A v takomto modeli atómu by energetické hladiny a tým aj farby v jeho spektre vyzerali v dôsledku interakcie orbitálnych elektrónov s elektrónmi v jadre inak.

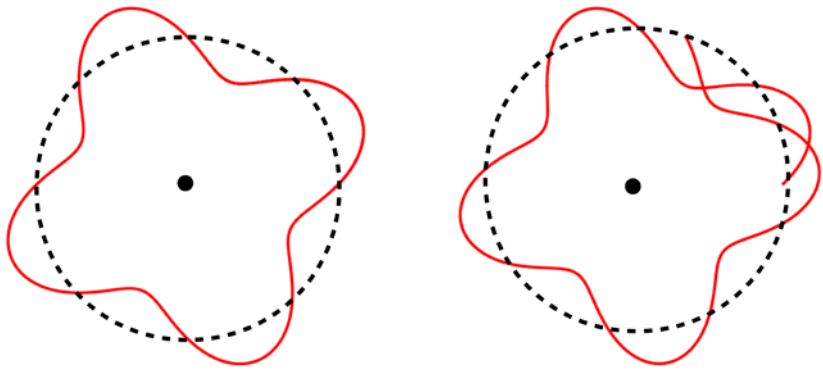
Čo presne sa teda v jadre deje, zostalo dlho záhadou. Prvé dôležité pozorovanie urobil roku 1930 nemecký fyzik Walther Bothe (1891 – 1957). Všimol si, že po bombardovaní niektorých ľahkých prvkov, ako sú lítium, berýlium a bór, vzniká veľmi energetické žiarenie. Keďže toto žiarenie nebolo nijako ovplyvnené elektrickým a magnetickým poľom, predpokladal, že ide o gama častice. O dva

roky neskôr francúzski manželia Irène Joliotová-Curie (1897 – 1956) a Frédéric Joliot-Curie (1900 – 1958) (dcéra a zať Marie a Pierra) zistili, že toto žiarenie dokáže z látok bohatých na vodík, napríklad z parafínu, vyrážať vysokoenergetické protóny. Ak by toto mala dokázať nehmotná častica gama žiarenia, musela by mať nemysliteľne veľkú energiu. Anglický fyzik James Chadwick (1891 – 1974) detailne zopakoval a rozšíril ich experimenty s neznámym žiarením a dokázal, že musí ísť o neutrálne častice s hmotnosťou veľmi podobnou protónu. Roku 1935 veľmi presným meraním hmotnosti Chadwick definitívne dokázal, že nová častica nie je viazaným stavom elektrónu a protónu. Ukázal, že hmotnosť neutrónu je väčšia ako súčet hmotností týchto dvoch častíc. Ak by išlo o viazaný stav, častica by musela mať menšiu hmotnosť ako tento súčet. Dôvodom je záporná väzbová energia, ktorú táto sústava má. Aj keď termín záporná energia znie zvláštne, je to presne to, čo by sme od záporného čísla očakávali: sústave treba dodať energiu, aby sa rozdelila na jednotlivé kúsky.

Idea, že jadro atómov sa skladá z protónov a podobne ťažkých neutrónov, nenechala na seba dlho čakať. A keď sa podarilo takýmto zložením vysvetliť pozorované vlastnosti mnohých známych izotopov, bola aj rýchlo prijatá.

## Elektrónový obal

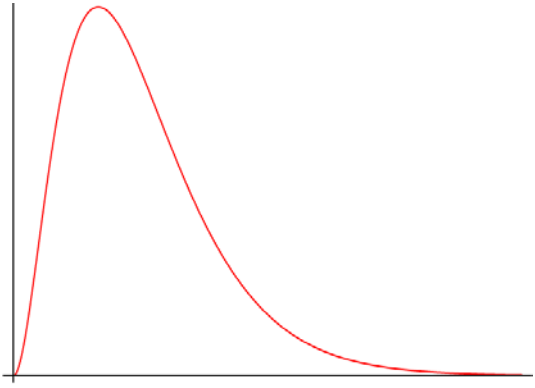
Aby sme zloženie atómov skutočne pochopili, budeme sa ešte musieť vrátiť ku kvantovej mechanike. Snahu zlepšiť Bohrov model atómu nasmeroval



Podľa de Broglieho hypotézy sú energetické hladiny elektrónov v Bohrovom atóme umiestnené tak, aby zodpovedali elektrónovým vlnám, ktoré nebudú samy so sebou deštruktívne interferovať. Naľavo príklad takejto vlny, napravo príklad zlej vlny, ktorá sama seba utlmí.

správnym smerom francúzsky fyzik Louis de Broglie (1892 – 1987). Ten rozšíril časticovo-vlnové správanie sa svetla aj na častice. Časticu roku 1924 navrhol reprezentovať vlnou, ktorej vlnová dĺžka súvisela s hybnosťou častice cez Planckovu konštantu. Dráhy, na ktorých takáto vlna pri pohybe okolo jadra nebude sama so sebou deštruktívne interferovať, sú presne tie, ktoré dostal Bohr z podmienky kvantovania momentu hybnosti. Krátko po de Broglieho hypotéze boli roku 1926 dokázané vlnové vlastnosti elektrónu v pokusoch amerických fyzikov Clintona Davissona (1881 – 1958) a Lestera Germera (1896 – 1971). Ukázali, že elektróny dokážu medzi sebou interferovať rovnako ako vlny.

De Broglieho myšlienky sa chytil rakúsky fyzik Erwin Schrödinger (1887 – 1961), ktorého smerovanie teoretickej fyziky v tom období veľmi trápilo. Nepozdávali sa mu nespojité dráhy Bohrovho modelu a vo vlnovom opise častíc videl šancu vrátiť do mikrosveta spojitosť klasickej fyziky. V rokoch 1925 a 1926 sa mu podarilo sformulovať rovnicu pre spojitú funkciu, ktorá dnes nesie jeho meno. Diskrétne hodnoty, napríklad energetické hladiny elektrónov v atómoch, sa objavujú až ako riešenie tejto rovnice. Schrödingerova rovnica je základným pohybovým zákonom kvantovej mechaniky a objekt, ktorý v nej vystupuje a opisuje vlastnosti častíc, sa nazýva vlnová funkcia. No rýchlo bolo jasné, že priamo vlnová funkcia nemôže určovať vlastnosti častíc, pretože môže nadobúdať komplexné hodnoty. Komplexné čísla sú užitočný nástroj v matematike, ale fyzikálne veličiny môžu nadobúdať iba reálne hodnoty.



Rozdelenie pravdepodobnosti výskytu elektrónu v základnom stave atómu vodíka v závislosti od vzdialenosti od jadra. Na vodorovnej osi – vzdialenosť, na zvislej – hustota pravdepodobnosti nájsť elektrón v danej vzdialenosti. Vidno, že sú miesta, kde sa elektrón vyskytuje s väčšou pravdepodobnosťou, ale napriek tomu nie je jeho poloha ostro definovaná a môže sa vyskytovať v širšom intervale vzdialeností.

Roku 1926 nemecký fyzik Max Born (1882 – 1970) navrhol interpretovať vlnovú funkciu pravdepodobnostne. To znamená, že vo vlnovej funkcii nie je zakódovaná

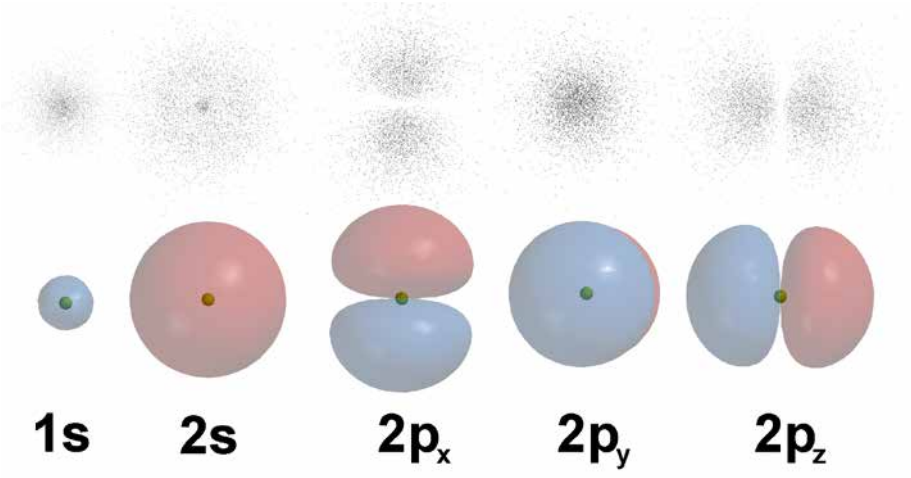
priamo poloha častice, napríklad elektrónu, ale iba pravdepodobnosť, že elektrón nájdeme v blízkom okolí daného miesta. Viedli ho k tomu rôzne matematické vlastnosti, ktoré musela vlnová funkcia ako riešenie Schrödingerovej rovnice spĺňať, a potvrdila sa napríklad pri interpretácii experimentov Davissona a Germera.

Slovom pravdepodobnosť bola dokorán otvorená Pandorina skrinka kvantovej mechaniky a ideál klasickej fyziky s presne definovanými trajektóriami a časovými vývinmi sa rozplynul. Povedzme si k tomu iba krátku poznámku, táto kapitola je už aj tak dlhá. Pravdepodobnosti v kvantovej mechanike neznamenajú, že sa nič nedá presne povedať. Naopak, Schrödingerova rovnica ako zákon kvantovej mechaniky je deterministická a existuje veľa vecí, ktoré sa dajú dopočítať veľmi presne, napríklad časový vývoj vlnovej funkcie, energetické hladiny elektrónov v komplikovaných molekulách alebo konfigurácie týchto molekúl. Nie však všetko, na čo sme z klasickej fyziky zvyknutí. Niektoré s tým súvisiace problémy riešime dodnes. Problém merania, kvantová teleportácia a aj kvantové počítače sú plodnou a zaujímavou oblasťou moderného výskumu, ale to už opäť zachádzame do oblasti, ktorá by si zaslúžila aspoň vlastnú kapitolu.

Ako sme spomínali, Heisenberg prišiel s vlastnou formuláciou kvantovej mechaniky, a to dokonca krátko pred Schrödingerom. Zvykne sa nazývať maticová – v kontraste s Rakúšanovou vlnovou formuláciou. Heisenberg na rozdiel od Schrödingera bral diskrétnosť úplne vážne a staval na nej celú teóriu. To sa Schrödingerovi nepáčilo a veril, že takýto prístup je úplne nesprávny. Snažil sa preto nájsť iný, čo sa mu aj čiastočne podarilo. Pri ďalšej práci na kvantovej mechanike však Schrödinger ukázal, že vlnový a maticový prístup sú ekvivalentné a dávajú teda rovnaké výsledky. Sklamaný vyhlásil: „Nepáči sa mi to a je mi ľúto, že som s tým niekedy mal niečo spoločné.“

## Štruktúra atómov

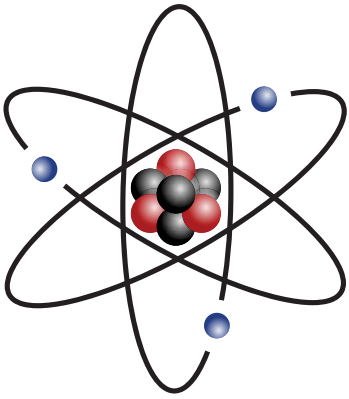
Rokom 1935 sa teda uzavrelo hľadanie štruktúry atómov. Po takmer sto rokoch od prvého vyslovenia myšlienky, že atómami sa štruktúra hmoty nekončí, ju mali ľudia zvládnutú. Atómy sa skladajú z maličkého jadra a elektrónov. V jadre je v protónoch a neutrónoch sústredená prakticky celá hmotnosť atómu a elektróny svojou prítomnosťou vytvárajú zas prakticky celý jeho objem. Počet elektrónov a protónov je v každom atóme daného




Zobrazenie niekoľkých základných elektrónových orbitálov v okolí jadra spolu s ich odborným označením (rozdelenie pravdepodobnosti pre základný 1s orbitál je naznačené na prechádzajúcom grafe). V spodnej časti obrázka sú naznačené miesta s najväčšou pravdepodobnosťou výskytu elektrónu, pričom farba reprezentuje komplikovanejšie vlastnosti vlnovej funkcie. V hornej časti obrázka sú rozdelenia pravdepodobnosti vyznačené ako možné miesta výskytu elektrónu, hustejšie bodky zodpovedajú väčšej pravdepodobnosti. V atómoch s viacerými elektrónmi je obsadených viacero orbitálov súčasne.

prvku rovnaký a určuje jeho chemické vlastnosti. Počet neutrónov môže byť pre atómy prvku rôzny, chemické vlastnosti atómu neovplyvňuje, ale má niekedy úplne kľúčové dôsledky na jeho fyzikálne vlastnosti.

Paralelne s predstavou o tom, ako to vnútri atómov vyzerá, sa vyvíjalo aj pochopenie fyzikálnych zákonov, ktoré túto štruktúru riadia. Aj tu sa naša predstava za sto rokov dramaticky zmenila. Elektróny už neobiehajú okolo jadra po presne definovaných dráhach a ich pohyb nepodlieha trom Newtonovým pohybovým zákonom. Poloha elektrónov je daná iba



Veľmi časté, ale veľmi nesprávne zobrazenie atómu. Jadrá atómov sú v skutočnosti oveľa menšie a elektróny neobiehajú po dobre definovaných kruhových alebo eliptických dráhach.

pravdepodobnostne a skôr sa dá hovoriť o elektrónových oblakoch ako o časticiach lokalizovaných v priestore. Navyše tieto oblaky môžu mať iba niekoľko presne definovaných tvarov, ktoré sú dané novými zákonmi kvantovej mechaniky.

# Éter

V doterajších kapitolách sme sa stretli s niektorými z najzaujímavejších a najprekvapujúcejších momentov v histórii fyziky: elipsy v Keplerových zákonoch, svetlo ako elektromagnetické vlny, objav atómového jadra. Aj v tejto kapitole budeme svedkami udalosti, ktorá na nepoznanie zmenila náš pohľad na svet. A zakončíme ju posledným článkom Alberta Einsteina zo zázračného roku 1905. Budeme hľadať éter – hypotetickú látku, v ktorej sa mali šíriť elektromagnetické vlny, a teda aj svetlo. A budeme opäť svedkami toho, ako starší vedci nedokázali vo svojom uvažovaní opustiť zaužívané predstavy, a preto prevratnú myšlienku objavil niekto s úplne novým pohľadom na svet.

## Teórie éteru a ich problémy

Z kapitoly o svetle zostal nezodpovedaný jeden celkom veľký problém. Po Youngovej, Fresnelovej a Foucaltouvej práci sa vo vedeckej komunite okolo roku 1850 ustálila vlnová teória svetla. Pri uvažovaní vedcov si však toto vlnenie vyžadovalo prítomnosť prostredia, v ktorom by sa šírilo. Vlastnosti svetla si vyžadovali od éteru, ako sa tomuto médiu hovorilo, veľmi zvláštne správanie.

Kľúčovou vlastnosťou svetla ako vlnenia je priečny charakter jeho kmitov, čo je v kontraste s pozdĺžnym charakterom šírenia zvuku. Iba tak sa Fresnelovi podarilo vysvetliť jav polarizácie. Do teórie éteru to však prináša vážny problém. Priečne vlny sa môžu šíriť iba v pevných látkach, napríklad na gitarovej strune. Keď sa kúsok struny vychýli, potiahne tým vedľajšie kúsky a tie ho nasledujú. Potiahnu zas ďalšie kúsky vedľa nich a tak vzniká vlna. Ťah je tu tým podstatným slovom. V tekutinách, ako sa kvapaliny a plyny zvyknú spoločne označovať, sa priečne vlnenie šíriť nedokáže, pretože elementy týchto materiálov sa nevedia navzájom ťahať, ale iba do seba tlačiť.

Preto musí mať éter vlastnosti tuhej látky, ale nesmie nijako ovplyvňovať telesá pri mechanickom pohybe. Dokonca do niektorých z nich, ako sú napríklad sklo alebo kovy, preniká. Aby toho nebolo málo, rýchlosť šírenia vĺn v tuhých látkach je určená ich pevnosťou. Preto sa zvuk šíri rýchlejšie v kovových koľajniciach ako vo vzduchu. Na to, aby sa v éteri mohli šíriť vlny takou obrovskou rýchlosťou, ako je rýchlosť svetla, musel by mať pevnosť prevyšujúcu akúkoľvek známu látku, no pritom stále nijako nemeniť mechanické vlastnosti telies. A to stále nie je všetko. Pokusy s interferenciou polarizovaného

svetla ukázali, že svetelné vlny nesmú mať žiadnu pozdĺžnu zložku, musia byť čisto priečne. Éterom sa nesmie šíriť vlnenie podobné zvuku, čo od neho vyžaduje ďalšie podivné vlastnosti pri stláčaní. Lebo naopak, ako vieme z príkladu s koľajnicami, bežnými pevnými látkami sa zvuk šíri veľmi dobre.

V kapitole o svetle sme už písali, že problematická sa ukázala aj aberácia hviezd a jej vysvetlenie pri predpoklade vlnových vlastností svetla. Tu sa však budeme musieť detailnejšie pozrieť na to, ako presnejšie si ľudia éter predstavovali. Vo svojich prácach o vlnovej povahe svetla Fresnel navrhol, že telesá by mohli svojím pohybom éter čiastočne strhávať. To znamená, že okolo telies éter na ich pohyb predsa len reaguje a čiastočne ich pohyb nasleduje. Ako veľmi to robí, malo závisieť od indexu lomu materiálu, z ktorého sa teleso skladá.

Na základe svojich skúseností s dynamikou tekutín navrhol anglický fyzik a matematik George Stokes (1819 – 1903) iný model éteru ako zvláštnej, takzvanej nenewtonovskej kvapaliny. Niektoré druhy týchto látok sa dokážu pre pomalé telesá správať ako kvapaliny, ale pri rýchlych pohyboch spevnejú a správajú sa ako tuhá látka. Bežným príkladom je med alebo vhodná zmes kukuričného škrobu a vody. Tak by sa éterom mohli šíriť veľmi rýchle svetelné vlny a súčasne by nekládol odpor pomalým telesám. Stokes vo svojej teórii predpokladal, že éter je pohybom telies strhávaný úplne a v ich okolí sa pohybuje spolu s nimi. Túto ideu tiež preniesol z hydrodynamiky. Pri pohybe telesa v kvapaline alebo v plyne zostáva malá vrstva tekutiny vzhľadom na teleso v pokoji. Preto sa napríklad na listoch stropného ventilátora zbiera prach napriek tomu, že sa vo vzduchu rýchlo pohybujú. Tento predpoklad však bol v rozpore s pozorovanou aberáciou hviezd. Ak by bol éter v blízkosti Zeme v pokoji, jej pohyb by nemal mať na pohyb svetla žiadny vplyv a poloha hviezd by sa počas roka nemala vplyvom pohybu Zeme meniť.

Akékoľvek strhávanie éteru telesami je tiež v rozpore s Newtonovým princípom akcie a reakcie. Ak telesá pôsobia na éter a strhávajú ho, mal by nejakým spôsobom ovplyvňovať aj éter ich pohyb, ale bolo jasné, že sa to nedeje. Ľudia vedeli, že planéty už minimálne dvesto rokov obiehali okolo Slnka podľa gravitačného zákona, ktorý éter nijako nebral do úvahy. Na druhej strane je éter záležitosť elektromagnetizmu a bolo teda možné, že tam už zákony mechaniky, ako sú akcia a reakcia, úplne neplatia.

## Rozpor medzi elektromagnetizmom a mechanikou

Maxwellova teória elektromagnetizmu, o ktorej sme písali v kapitole o svetle, bola fantastickým úspechom teoretickej fyziky. Priniesla zjednotenie elektrických a magnetických javov v novom, elegantnom šate a len tak mimochodom si zobrala pod krídla celú optiku. Ale ani toto dielo nebolo bez problémov. Jedným bol už spomínaný éter a jeho vlastnosti, ďalším bola nekompatibilita novej teórie s Newtonovou mechanikou.

Už Galilei prišiel na to, že zákony mechaniky fungujú rovnako bez ohľadu na to, či sa proces deje v pokoji alebo sa vzhľadom na Zem pohybuje rovnomerne priamočiaro. Ak by sme uskutočňovali experimenty v zatemnenom vagóne, nedokázali by sme prísť na to, či náš vlak na koľajniciach stojí alebo sa po nich plynule pohybuje z Trenčína do Šaštína. Vedeli by sme rozlíšiť brzdiaci vlak, ale tu prichádza do hry zrýchlenie – a to už je čosi iné. Táto skutočnosť sa odráža aj v matematických vlastnostiach Newtonových pohybových rovníc. V sústavách súradníc, ktoré sa navzájom pohybujú rovnomerne priamočiaro, majú zákony úplne rovnaký tvar. A rovnaké rovnice majú rovnaké výsledky – nielen vo vagónoch. Ešte sa dá Galileiho princíp formulovať aj tak, že nemá zmysel hovoriť o absolútnom pohybe a neexistuje preferovaná sústava, vzhľadom na ktorú by sa dal pohyb takto definovať. Existuje len v relatívnom zmysle ako pohyb jedného telesa vzhľadom na druhé.

A tu nastáva problém. Maxwellove rovnice vyzerajú v sústavách, ktoré sa vzhľadom na seba pohybujú rovnomerne priamočiaro, rôzne. No tento problém má aj veľmi priamočiare riešenie. Predpokladalo sa preto, že elektromagnetizmus má na rozdiel od Newtonovej mechaniky istú preferovanú vzťažnú sústavu, v ktorej majú Maxwellove rovnice ten správny tvar. A v tejto sústave by mal byť éter nehybný. Optickými a elektromagnetickými experimentmi by sa teda v princípe mal dať zistiť pohybový stav našej sústavy vzhľadom na túto preferovanú sústavu. Tak by bolo možné definovať pohyb aj v absolútnom zmysle. Rýchlosť svetla je veľmi veľká a v porovnaní s ňou rýchlosti na Zemi maličké. Napríklad rýchlosť Zeme pri obiehaní okolo Slnka je asi 30 km/s, chabá stotina percenta rýchlosti svetla.

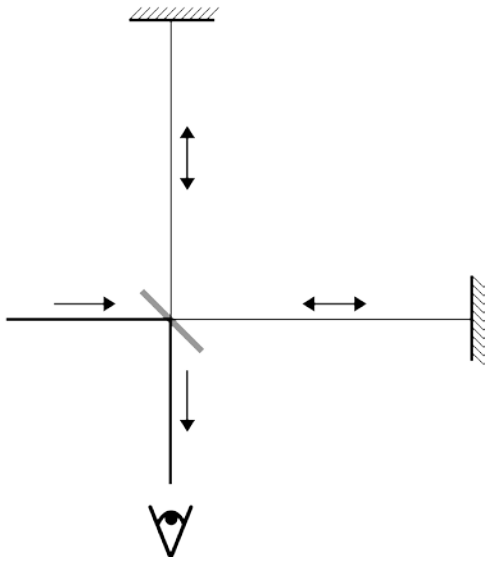
## Michelsonov-Morleyho experiment

Pozorovať pohyb v éteri nie je vôbec jednoduché, ale je aspoň v princípe možné. Od začiatku deväťnásteho storočia sa o to pokúšalo množstvo vedcov.

Ich experimenty narazili na technické limity svojej doby a napriek tomu, že výsledky niektorých boli pozitívne a zdali sa byť v zhode s Fresnelovou hypotézou čiastočného strhávania éteru, všetci si boli vedomí ich obmedzení. Boli potrebné presnejšie pokusy.

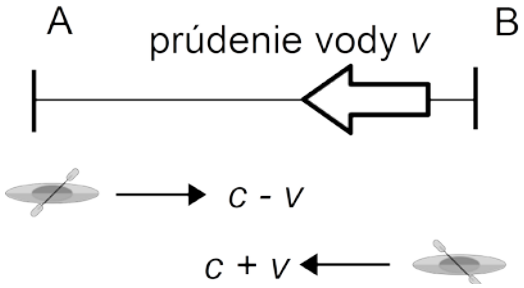
Tu prichádza ten prekvapivý moment, o ktorom sme hovorili v úvode. A ako uvidíme, bol na prvý pohľad zdanlivým „prepadákom“. Roky prípravy a precíznej práce viedli k experimentu, ktorý nenameral nič. Nulu. Efekt, ktorý hľadal, neexistuje. Ukázalo sa to však ako jedna z najdôležitejších núl v histórii fyziky. Americkí fyzici Albert Michelson (1852 – 1931) a Edward Morley (1838 – 1923) sa podujali zistiť rýchlosť pohybu Zeme vzhľadom na éter ešte presnejšie ako ich predchodcovia. Pripravili na to úžasne dômyselný a prepracovaný experiment s výsledkom, ktorý sa neskôr ukázal podobne úžasný.

Základnou myšlienkou jeho fungovania bola opäť interferencia svetla. Lúč svetla sa rozdelí na dve časti, ktoré potom prejdú rovnakú vzdialenosť v dvoch navzájom kolmých smeroch a následne sa opäť spoja. Za normálnych okolností by sa nič špeciálne nemalo stať, výsledkom spojenia by mal byť rovnaký lúč, s akým sa začínalo. Ale ak by sa zariadenie hýbalo vzhľadom na médium, v ktorom sa vlny šíria, výsledok by už bol iný. Svetlo by sa malo šíriť rôzne podľa toho, či sa šíri v smere pohybu éteru alebo kolmo na tento smer. Je to podobná situácia ako s kajakármi na vode. Na stojatej vode prejdeme vzdialenosť tam a späť rýchlejšie ako na vode s prúdom. Kto neverí, môže skúsiť spočítať alebo vyskúšať. Jedným smerom nás voda síce unáša, ale druhým smerom



Náčrt experimentu Michelsona a Morleyho. Lúč svetla prichádza zľava, rozdelí sa a prejde tú istú vzdialenosť v dvoch navzájom kolmých smeroch. Ak bude cesta lúčom k zrkadlám a späť v dvoch ramenách trvať rôzne dlho, svetelné vlny sa navzájom posunú a interferenciou dôjde k zmene vlastností výsledného lúča, ktorý je pozorovaný.

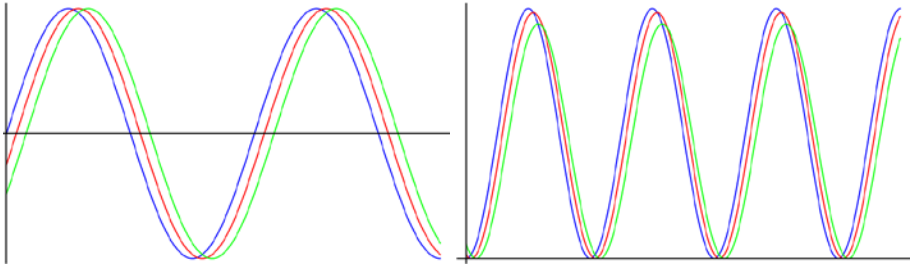
nás brzdí a vo výsledku je efekt brzdenia väčší ako efekt unášania. Ak sa hýbeme kolmo na prúd, výsledné spomalenie je menšie. Podobne je to v prípade éterového vetra, ako bol pohyb éteru vzhľadom na Zem nazvaný. Svetelnú vlnu jedným smerom unáša a druhým ju brzdí. Výsledkom je, že v ramene, ktoré smeruje do vetra, sa svetlo vráti o trochu neskôr. Maximá vlny sa posunú a dôjde k interferencii, ktorá sa dá veľmi presne pozorovať.




Celkový čas, ktorý bude trvať cesta na kajaku z miesta A na miesto B a späť bude väčší, ak je na rieke prúd. Cestou proti prúdu sa stratí viac času, ako sa získa cestou s prúdom.

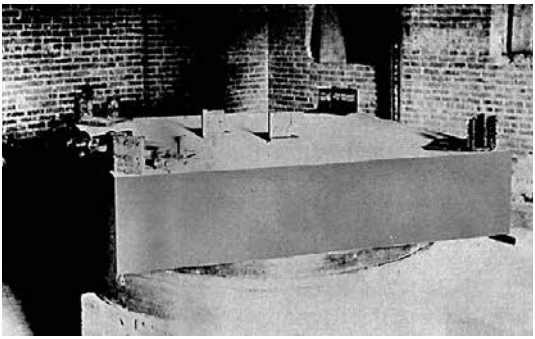
Na podobnom princípe funguje veľa prístrojov – v oveľa nedávnejšej minulosti napríklad zariadenia LIGO a VIRGO, ktoré úspešne pozorovali existenciu gravitačných vĺn. Interferencia je silný nástroj na meranie extrémne malých vzdialeností vďaka tomu, že ide o veľmi delikátny efekt. Vlny musia byť ozaj presne synchronizované a ich maximá sa musia veľmi presne prekrývať. Stačí maličké posunutie jednej z vĺn a vzájomné zosilnenie vĺn začne výrazne klesať. Táto citlivosť na drobné posunutia je dôvodom úžasnej presnosti interferometrov.

Michelson a Morley vedeli tým svojím merať rozdiel v rýchlosti šírenia svetla v dvoch rôznych smeroch. O precíznosti dvojice vedcov pri príprave aparatúry svedčí aj to, že ju kvôli stabilizácii umiestnili na jeden a pol metra veľký kamenný kváder, ktorý plával na hladine ortuti. Pomocou série zrkadiel



Na prvom obrázku tri navzájom mierne posunuté vlny. Na druhom obrázku je vyznačená intenzita svetla: modrá – zodpovedá spojeniu dvoch modrých vĺn, červená – spojeniu modrej a červenej vlny, zelená – spojeniu modrej a zelenej vlny. Aj malé posunutie vĺn spôsobí zmenu intenzity svetla.

predĺžili dráhu lúčov až na 11 metrov, čím by sa akýkoľvek rozdiel v rýchlostiach zvýraznil. Otáčaním bloku v ortuťovom bazéne bolo možné hľadať efekt éterového vetra v rôznych smeroch; opakovaním experimentu v rôznych častiach dňa alebo roka sa mohol dať nakoniec určiť smer prúdenia éteru v slnečnej sústave.



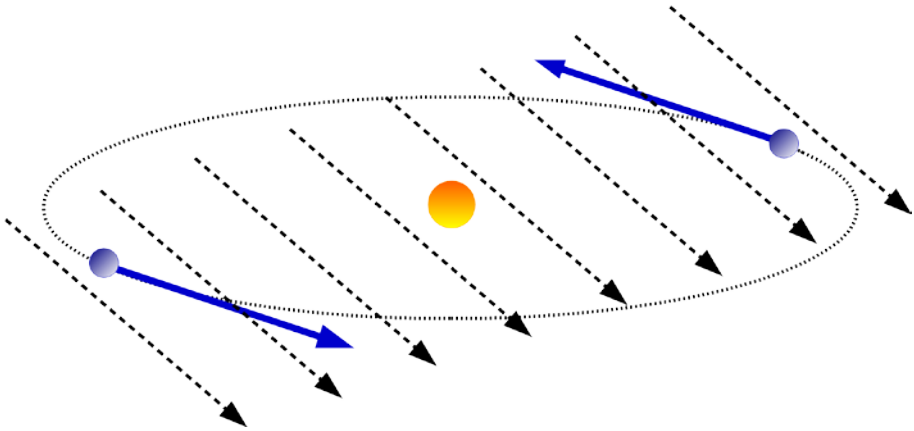
Fotografia originálnej aparatúry použitej pri experimente Michelsona a Morleyho.

Výsledok experimentu sme už prezradili. Napriek enormnej snahe a veľkej presnosti prístroja sa žiadnu zmenu nepodarilo namerať. Interferometer mal byť schopný zaznamenať signál štyridsaťkrát menší, ako sa očakávalo, ale nenameral ani to. Bez ohľadu na to, ako bol prístroj otočený a v ktorom ročnom období sa meranie robilo, výsledok bol stále rovnaký. Nijaký pohyb alebo zmena pohybu vzhľadom na éter sa nevyskytla v žiadnom momente dňa ani roka. Niečo také nikto nečakal. Michelson a Morley v ďalšej práci na tomto experimente nepokračovali, ale niekoľko ďalších vedcov v najbližších pätnástich rokoch uskutočnilo ešte presnejšie merania s rovnakým výsledkom. Bez akýchkoľvek pochýb sa s éterom musí diať niečo veľmi, veľmi špeciálne.

## Éterové vysvetlenia

Zdalo by sa, že experiment Michelsona a Morleyho dokázal Stokesovu hypotézu o úplnom strhávaní éteru, ale dobre sa vedelo o jej priamom rozpore s aberáciou hviezd. Bolo teda treba vymyslieť niečo iné.

Roku 1889 írsky fyzik George FitzGerald (1851 – 1901) a nezávisle od neho roku 1892 dánsky fyzik Hendrik Lorentz (1853 – 1928) postrehli, že výsledky experimentu sa dali vysvetliť skracovaním telies v smere pohybu éterom. Obaja vyslovili špekuláciu, že medzimolekulové sily majú elektromagnetický pôvod, a preto môže mať pohyb telies v éteri na tieto sily vplyv, čím sa môže meniť ich tvar. Experiment by to vysvetľovalo tak, že jedno rameno interferometra sa pod vplyvom éteru skrátilo, vďaka čomu svetlo v tomto ramene predsa len nebude zaostávať. Obom sa podarilo prísť s presným vzorcom pre

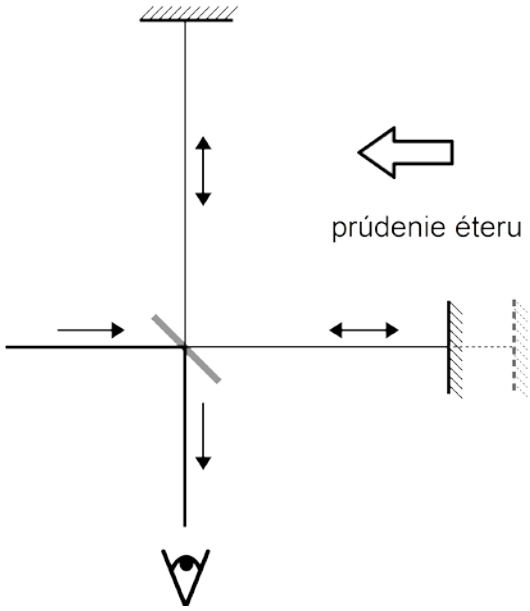


Pri obiehaní okolo Slnka mení Zem svoju rýchlosť (modré šípky). Tým by sa menila jej rýchlosť vzhľadom na éter bez ohľadu na to, ako by sa toto médium v slnečnej sústave pohybovalo (čierne prerušované šípky). Michelson a Morley však zistili, že Zem sa v žiadnom momente svojej dráhy vzhľadom na éter nepohybuje.

potrebné skracovanie telies, ale ani jeden nevedel tento výsledok odvodiť z mechanických vlastností telies a zo zákonov elektromagnetizmu. Lorentz na tom ďalej usilovne pracoval a podarilo sa mu dosiahnuť niekoľko dôležitých čiastkových výsledkov.

Predpokladal, že éter je dokonale nehybný bez ohľadu na to, ako sa v ňom pohybujú telesá. Všimol si, že by to malo za dôsledok konštantnú rýchlosť šírenia svetla bez ohľadu na to, akou rýchlosťou sa v éteri pohyboval jeho zdroj. Rovnako to funguje na vodnej hladine, čím vznikajú za loďami charakteristické rázové vlny. Roku 1895 zaviedol Lorentz pre pozorovateľov v pohybe iný čas, ako plynie v sústave spojenej s éterom, a tým matematicky dokázal vysvetliť aberáciu hviezd a ďalšie známe výsledky pre svetlo. Roku 1899 si všimol, že dôsledkom iného času pre pohybujúcich sa pozorovateľov by bola dilatácia času, teda efekt, pri ktorom pozorovateľ v pohybe nameria menší čas medzi dvomi udalosťami ako pozorovateľ, pre ktorého boli tieto udalosti v pokoji. Roku 1900 potom Henri Poincaré urobil viac-menej prirodzený predpoklad, že pozmenený čas v pohybujúcich sa sústavách je reálny efekt a hodinky v pohybe budú skutočne ukazovať iný čas ako stojace hodiny.

Lorentz si okolo roku 1900 všimol, že ak sa zmeny dĺžok a vzdialeností interpretujú ako transformácie súradníc medzi stojacou a pohybujúcou sa




Ak by sa rameno, ktoré sa pohybuje do éteru, skrátilo, vykompenzovalo by to spomalenie spôsobené pohybom éteru a svetelné lúče by späť dorazili naraz.

sústavou, Maxwellove rovnice zostanú v novej sústave nezmenené. Lorentz však celý čas považoval zmenené súradnice a čas za zdanlivé. V jeho teórii éter svojím účinkom na látku spôsoboval, že sa pozorovateľom zdali vzdialenosti skrátené a časy pomalšie, no nepovažoval ich za reálne fyzikálne efekty. Napriek tomu sa Lorentzovi podarilo nájsť funkčnú verziu teórie, ktorá opisovala elektromagnetizmus v kombinácii s hmotou a vysvetľovala výsledky známych experimentov. Prehľadnejšiu štruktúru jej postupne dával Poincaré. Lorentz bol fyzik, Poincaré matematik. Tak sa stalo, že na konci deväťnásteho storočia prišiel Holanďan s množstvom dôležitých fyzikálnych riešení, ktorým neskôr Francúz prisúdil hlbší matematický význam. Poincaré si ako prvý uvedomil, že Lorentzove transformácie sa dajú skladať a použiť aj na prechod medzi viacerými sústavami. Odvodil z nich pozmenený zákon skladania rýchlostí a uvedomil si aj to, že rýchlosť svetla je v každej sústave rovnaká.

Poincarého a niektorých iných vedcov v práci na relativite motivoval ďalší veľmi praktický problém. S príchodom telegrafu získali ľudia možnosť rýchlo komunikovať na obrovské vzdialenosti. Preto bolo potrebné urobiť na rôznych miestach na svete nejakú spoločnú dohodu o synchronizovanom čase, ktorá by sa nespoliehala na Slnko ani nič podobne nepresné.

Na to treba vymyslieť, ako sa dvaja ľudia na veľkú diaľku môžu iba vymieňaním správ s konečnou rýchlosťou šírenia dohodnúť na jednom špecifickom momente, ktorý nastane naraz pre oboch z nich. Ukázalo sa, že je na to potrebná relativita.

Ak sa na vodnej hladine pohybuje loď alebo čokoľvek iné rýchlejšie ako vlny, vznikajú charakteristické rázové vlny. Dôležité je, že rýchlosť lode sa k rýchlosti vlny nepripočítava, a tak loď predbieha vlny, ktoré vytvorila.

## Von zo slepej uličky – éter neexistuje

Geniálnosť posledného Einsteinovho počinu zázračného roka 1905 je v tom, že vyslovil myšlienku, ktorá doslova visela vo vzduchu. Éter neexistuje. Preto Michelson a Morley nenamerali žiadny pohyb Zeme vzhľadom na éter, preto si éter vyžaduje množstvo komplikovaných vysvetlení a preto sa zdá, že ho príroda pred nami všemožne skrýva. Jednoducho nie je. A snaha celej generácie vedcov pred Einsteinom bola zachrániť newtonovskú fyziku pridávaním éteru.

Otázka sa dala formulovať aj ako hľadanie zákonov elektromagnetizmu pre pohybujúce sa telesá a sústavy v pohybe. Aj názov Einsteinovho kľúčového článku je *O elektrodynamike pohybujúcich sa telies* (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*). Teória, s ktorou Einstein prišiel, dostala označenie špeciálna teória relativity. Tak ako ju Einstein sformuloval, stojí na dvoch základných predpokladoch. Prvý je rozšírenie Galileiho princípu. Žiadnym, ani elektromagnetickým, experimentom sa nedá rozlíšiť, či náš vagón stojí alebo sa pohybuje rovnomerne priamočiaro. Druhý predpoklad hovorí, že sa svetlo šíri vždy tou istou rýchlosťou bez ohľadu na rýchlosť jeho zdroja. Je to práve konštantnosť rýchlosti svetla, ktorá je prekvapivá a pre nás veľmi kontraintuitívna. S rozbehom dohodíme loptu ďalej, v pomalom vlaku vieme kráčať v protismere tak, že vzhľadom na nástupište stojíme. Odchýlka od klasickej

mechaniky, ktorá komplikuje jednoduché skladanie rýchlostí, tiež vysvetľuje výsledok experimentu Michelsona a Morleyho.

Z dvoch predpokladov sa podarilo Einsteinovi odvodiť Lorentzove transformácie a všetky ďalšie efekty, ktoré sa pripisovali komplikovanému éteru. Princípy, na ktorých Einstein postavil svoju teóriu, boli známe aj jeho predchodcom a uvedomovali si ich. Prvý princíp vyslovil už Poincaré a druhú vlastnosť svetla si vo svojom modeli všimol aj Lorentz. Obaja to však považovali za dôsledky teórie a nie za jej základy. Neuvedomovali si, že sú pre jej vybudovanie dostatočné a že teória nič ďalšie na svoju kompletnosť nepotrebuje. Hlavne nie éter.

V jednej učebnici špeciálnej teórie relativity sa píše, že jej je oveľa ťažšie uveriť ako ju pochopiť. Dnes to už asi nie je pravda a na relativitu sme celkom zvyknutí, no na začiatku dvadsiateho storočia boli Einsteinove úvahy prelomové. Predmety sa pri pohybe skracujú, ale nie preto, že by na ne pôsobil neviditeľný éter, alebo preto, že keď to budeme tak počítať, dostaneme správne výsledky. Tak to je, tak funguje príroda a jej zákony. Nakoniec éter dopadol veľmi podobne ako epicykly. Astronómovia sa nimi snažili zosúladiť presnejšie pozorovania so zaužívaným geocentrickým modelom slnečnej sústavy, ale keď prišiel heliocentrický model a Keplerove zákony, potreba epicyklov sa úplne vytratila.

Ale čo sa pri šírení svetla vlní, keď to nie je éter? Sú to elektrické a magnetické polia. Pojem poľa do fyziky zaviedol pri svojom štúdiu elektrických a magnetických javov Michael Faraday. Roku 1831 pozoroval elektromagnetickú indukciu, jav, pri ktorom zmena elektrického poľa budí magnetické pole a naopak. Ide o kľúčovú súčasť Maxwellovej elektrodynamiky a je základom šírenia elektromagnetických vĺn. Faraday vo svojich úvahách prešiel od okamžitého pôsobenia nabitých telies na diaľku k poliam, ktoré nabité telesá vytvárajú a ktoré sú nositeľmi tohto pôsobenia. Po roku 1850 vedci považovali tieto polia za vhodný matematický spôsob, ako opísať deje v éteri. Keď sa ukázalo, že éter neexistuje, prisúdila sa skutočná existencia priamo elektrickým a magnetickým poliam.

Je ešte jeden článok Alberta Einsteina z roku 1905. V ňom prišiel s rovnicou $E = m \cdot c^2$, pravdepodobne najslávnejším fyzikálnym vzťahom všetkých čias. Ukázal, že ak teleso stratí energiu v akejkoľvek forme, jeho hmotnosť sa zmenší podľa tohto vzťahu. Energia a hmotnosť sú teda ekvivalentné. Závislosť hmotnosti telesa od jeho rýchlosti ľudia predpokladali už predtým, ale teraz bola táto myšlienka rozšírená na všetky druhy energie a bola priamočiaro odvodená z postulátov špeciálnej teórie relativity.

## 1905 – Annus mirabilis

Einsteinov rok 1905 sa nazýva *zázračným* a zvykne sa chápať ako medzník medzi klasickou a modernou fyzikou. Einstein v ňom publikoval štyri vedecké články a dizertačnú prácu. Jedným článkom a dizertačnou prácou matematicky vysvetlil Brownov pohyb a rozhodol diskusiu o reálnej existencii atómov. V ďalšom článku prisúdil elektromagnetickým vlnám časticové vlastnosti, čím veľmi nenápadne začala vznikať kvantová mechanika. Posledné dva články, o ktorých sme písali v tejto kapitole, obrátili na ruby porozumenie elektromagnetizmu a mechanike. Vznikla v nich špeciálna teória relativity.

Albert Einstein na fotografii z roku 1904.

Ťažko by sme hľadali rok, v ktorom práca jedného človeka znamenala taký veľký pokrok v toľkých rôznych oblastiach fyziky, ako sa to podarilo Einsteinovi roku 1905. Mal vtedy iba 26 rokov.

## Špeciálna relativita ako einsteinovská mechanika

Einstein vlastne ukázal, že v konflikte Newtonovej a Maxwellovej teórie nebolo treba počúvať Newtona a správna cesta bola opačná, ako sa očakávalo. Vedci sa snažili éterom vysvetliť Maxwellove rovnice v termínoch Newtonových zákonov. Po roku 1905 naďalej zostali platiť Maxwellove rovnice a prispôsobili sa Newtonove zákony a klasická mechanika. Skutočným zákonom prírody je Einsteinova teória a Newtonova mechanika z roku 1687 zostane iba ako priblíženie pre telesá, ktoré sa pohybujú oveľa pomalšie ako svetlo.

Pri tom všetkom, špeciálne pri pohľade na formuláciu druhého Einsteinovho postulátu, nám do očí udrie svetlo ako kľúčová postava v základnom zákone prírody. Môžeme sa pýtať, prečo práve svetlo. Veď ide iba o veľmi špecifický fyzikálny jav, podobných je v prírode mnoho. Prečo sa príroda rozhodla zobrať do definície svojich pravidiel práve tento fenomén? Odpoveďou je, že

svetlo je tam tak trochu náhodou. V skutočnosti špeciálna relativita hovorí, že základné zákony fyziky v sebe obsahujú jednu špecifickú fundamentálnu rýchlosť, od ktorej sa potom odvíja všetko ďalšie. A keďže fyzika funguje pre všetkých rovnako bez ohľadu na to, ako rýchlo sa pohybujú, musí byť táto rýchlosť pre všetkých rovnaká. No a svetlo je pre nás najdostupnejšia vec, ktorá sa touto rýchlosťou pohybuje.

Dnes už máme veľmi veľa dôkazov, že aj mechanické predpovede špeciálnej relativity sú pravdivé. Od opisu elektrónov v ťažkých atómoch cez atómové hodiny v lietadlách testujúce dilatáciu času až po presné overenia ekvivalencie medzi hmotnosťou a energiou. To však nič nemení na tom, že na úplnom začiatku sme sa o nej dozvedeli vďaka elektromagnetizmu. Einsteinova teória bola vo vedeckej komunite prijatá veľmi rýchlo. Jedným dôvodom bolo, že ľudia už poznali množstvo jej fyzikálnych dôsledkov. Einstein im dal iba iný, oveľa prirodzenejší šat. Ďalšími dôvodmi boli ďalekosiahle dôsledky, ktoré mala pre súvis času a priestoru. Ale to už je trochu iný príbeh.

# Kozmologická konštanta

Táto kapitola sa nedá začať inak. Dočkali sme sa! Aj Albert Einstein sa raz ocitol v slepej uličke! Keď nás zlomyseľnosť prejde, uvidíme, že história mu nakoniec predsa len dala za pravdu. To, čo sám Einstein označil za „najväčšiu chybu svojho života“, je dnes súčasťou našej základnej predstavy o vesmíre. Ale pekne po poriadku. Tak ako sa dnes bežne učíme, že svet sa skladá z atómov, bežne sa učíme aj to, že vesmír sa rozpína. Cesta k tejto vedomosti bola dlhá a komplikovaná.

## Usporiadanie vesmíru za slnečnou sústavou

V prvej kapitole sme písali o slnečnej sústave a o tom, aké predstavy o nej ľudia mali na konci sedemnásteho storočia. V ďalších kapitolách sme sa postupne dostali do dvadsiateho storočia a za ten čas sa výrazne zmenilo pochopenie toho, ako to vo vesmíre vyzerá.

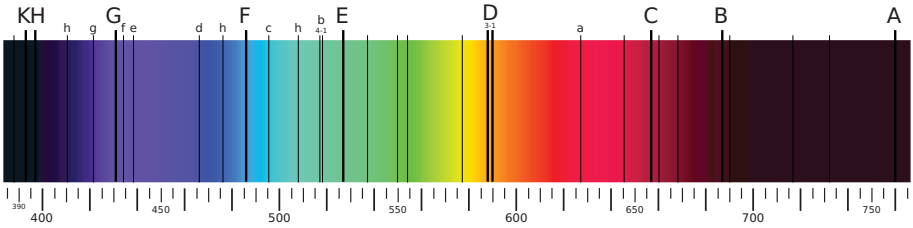
Mliečna cesta na nočnej oblohe.

Na oblohe je v noci pri priaznivých podmienkach okrem planét a stálic viditeľný aj dlhý biely pás. Aristoteles ho považoval za atmosférický jav, ale táto predstava sa veľmi rýchlo ukázala ako nesprávna. Ak by bol pôvod pásu blízko v atmosfére, z rôznych miest by mal vyzerať inak. Na prelome tisícročí sa toto vysvetlenie pokúšali potvrdiť perzskí astronómovia a dokázali, že nech ide o čokoľvek, pás sa musí nachádzať veľmi ďaleko od Zeme. Prirodzene sa ako alternatíva k Aristotelovmu vysvetleniu objavila myšlienka, v ktorej biely pás tvorili tiež stálice, ale tak blízko pri sebe, že sa voľným okom nedali rozlíšiť. Definitívne tento predpoklad dokázal Galileo Galilei, keď sa mu na začiatku sedemnásteho storočia pomocou ďalekohľadu podarilo jednotlivé hviezdy rozlíšiť.

Začiatkom osemnásteho storočia sa ľudia už celkom dobre zorientovali v newtonovskej mechanike a niekoľkí si nezávisle uvedomili, že úplná stálosť stálic by znamenala problém. Ako je možné, že sa vzájomným gravitačným priťahovaním postupne všetky nedostanú do jedného bodu? Možné riešenie ponúka samotná slnečná sústava. Ak by všetky hviezdy obiehali okolo spoločného stredu, podobne ako planéty obiehajú okolo Slnka, nič také by sa stať nemuselo.

Roku 1750 anglický astronóm Thomas Wright (1711 – 1786) prišiel s hypotézou, že hviezdy sú v skutočnosti usporiadané do obrovského tenkého disku, ktorý celý rotuje okolo svojho stredu, a my na Zemi sa spolu so slnečnou sústavou nachádzame niekde v ňom. Hviezdy, ktoré sú pri nás blízko, vidíme jednotlivo a vzdialenejšie nám splývajú do jednoliateho bieleho pásu. Podľa jeho gréckeho pomenovania *kyklos galaktikos* (mliečny kruh) dostala táto sústava hviezd meno galaxia.

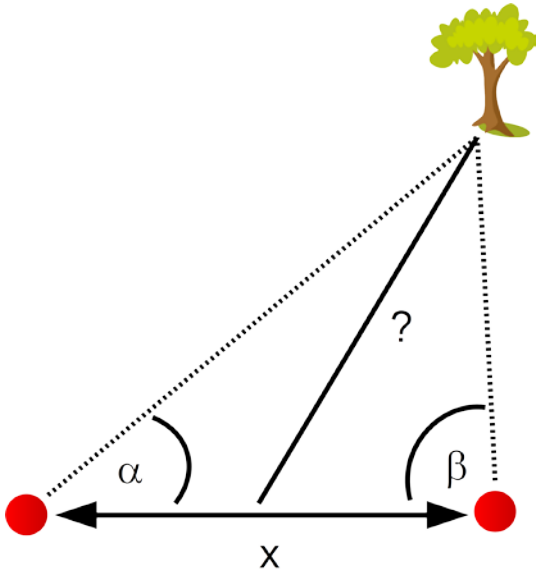
Roku 1814 bavorský fyzik Joseph von Fraunhofer (1787 – 1826) detailným štúdiom slnečného svetla zistil, že vo farebnej dúhe niektoré farby jednoducho chýbajú. Fraunhofer neskôr analyzoval svetlo vzdialených hviezd a objavil v ňom rovnaké vlastnosti, aké má svetlo prichádzajúce zo Slnka. Tým




Pri rozklade slnečného svetla nevidno dokonalé farebné spektrum, niektoré farby chýbajú.

ukázal, že stálice sú ďalšie vzdialené slnká. O päťdesiat rokov neskôr podrobná analýza ukázala, že chýbajúce farby v spektrách hviezd sú presne tie špecifické farby, ktoré vychádzajú zvnútra atómov. To zas dokázalo, že hviezdy sa skladajú z rovnakých chemických prvkov, aké máme tu na Zemi.

Stále však nikto nevedel, ako ďaleko sa hviezdy nachádzajú. To ľudia zistili kartografickou metódou triangulácie. Ak zmeriame z dvoch rôznych miest so známou vzdialenosťou uhly k tomu istému bodu, z jednoduchej geometrie trojuholníka vieme vypočítať vzdialenosť k tomu bodu. Túto vedomosť používali ľudia pri tvorbe máp už v staroveku. Takto aj taliansky astronóm Giovanni Cassini (1625 – 1712) pozorovaním Marsu z dvoch rôznych miest na Zemi určil ako prvý ešte roku 1672 rozmery v slnečnej sústave. Tie sa v druhej polovici osemnásteho storočia viac spresnili použitím rovnakej metódy pri pozorovaní tranzitu Venuše.



Ak poznáme vzdialenosť medzi dvomi bodmi a uhly, pod ktorými vidno vzdialený objekt, dá sa vypočítať vzdialenosť k objektu.

Vzdialenosti k trom rôznym hviezdam určili roku 1832 nezávisle od seba traja astronómovia: Nemec Friedrich Bessel (1784 – 1846) k dvojhviezde 61 Cygni, Nemec Friedrich von Struve (1793 – 1864) k hviezde Vega a Škót Thomas Henderson (1798 – 1844) k hviezde Alpha Centauri. Všetkým sa podarilo nameráť hviezdnu paralaxu, čiže zdanlivý posun polohy hviezdy v rôznych častiach roka, spôsobený zmenou polohy Zeme. A prišli s veľmi prekvapivým zistením. Hviezdy sú naozaj, ale naozaj ďaleko. Ich vzdialenosť od Slnka je stovkytisíckrát väčšia ako vzdialenosť medzi Zemou a Slnkom. A tieto tri hviezdy sú medzi tými najbližšími! Vesmír sa v našich predstavách zrazu ohromne rozrástol.

A to sme ešte iba na začiatku. Tak ako sa zlepšovala technika ďalekohľadov, darilo sa astronómom na oblohe objavovať nové a nové objekty. Medzi nimi boli takzvané špirálové hmloviny a jedna z nich je viditeľná aj voľným

okom v súhvezdí Andromedy. Ako pomenovanie naznačuje, išlo zväčša o rozmazané chumáče, v ktorých sa črtala špirálová štruktúra; malo ísť o vznikajúce planetárne systémy podobné tomu nášmu. Avšak roku 1917 americký astronóm Heber Curtis (1872 – 1942) pozoroval v spomínanej hmlovine novu. Tá vzniká ako výsledok kolízie medzi dvomi blízkymi hviezdami, ktoré do seba narazia pri vzájomnom obiehaní. Pri zrážke sa uvoľní veľmi veľa energie, ktorá sa na oblohe prejaví ako záblesk trvajúci niekoľko týždňov alebo mesiacov. Novy sú relatívne bežný astronomický jav. V našej galaxii je ich niekoľko desiatok za rok. Vedci ho už vtedy dobre poznali, a preto bolo jasné, že táto nova je čímsi divná. Bola oveľa menej jasná ako všetky dovtedy známe. Curtis to vysvetlil tak, že hmlovina sa nenachádza v našej galaxii, ale je od nás veľmi ďaleko a v skutočnosti je úplne inou, nezávislou galaxiou.

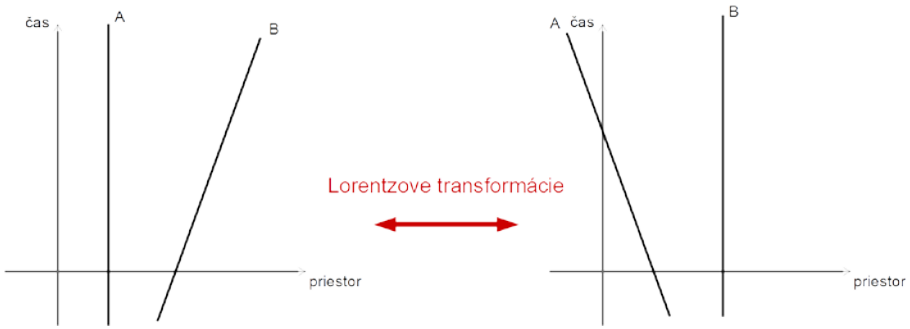
Túto hypotézu potvrdili presné merania jej vzdialenosti estónskym astronómom Ernstom Öpikom (1893 – 1985) roku 1922 a americkým astronómom Edwinom Hubblom (1889 – 1953) z roku 1924. Výsledok? Vzdialenosť takmer na úrovni miliónnásobku vzdialenosti k najbližším hviezdam. Pri takých veľkých vzdialenostiach je už nepraktické používať pozemské jednotky, ako sú kilometre. Astronómovia zväčša používajú inú jednotku vzdialenosti – svetelný rok. Je to vzdialenosť, ktorú prejde svetlo za jeden rok. Kým najbližšie hviezdy sú od nás vzdialené niekoľko svetelných rokov, naša galaxia má veľkosť niekoľkých stoviek tisícov svetelných rokov a najbližšie galaxie sú od nás niekoľko miliónov svetelných rokov.

Tak sa astronómovia na začiatku dvadsiatych rokov dvadsiateho storočia dopracovali k vesmíru, v ktorom sú hviezdy zoskupené do galaxií a tie sú roztrúsené v priestore ďaleko od seba. Tento čas je dôležitý preto, že na teoretickom poli sa tiež diali veľké veci.

## Čas, priestor a časopriestor

Krátko po objave špeciálnej teórie relativity prišiel nemecký matematik Herman Minkowsky (1864 – 1909) s jej geometrickou formuláciou. Znie to trochu krypticky, ale myšlienka to nie je až taká zložitá. Minkowsky si roku 1907 uvedomil, že čas a tri priestorové rozmery môžeme skombinovať do jedného štvorrozmerného priestoru, v ktorom bude mať teória veľmi elegantnú interpretáciu.

Pohyby telies v takomto štvorrozmernom časopriestore charakterizujú spoločne ich polohu aj jej časový vývoj. Napríklad teleso, ktoré




Zjednodušený náčrt časopriestoru a dvoch telies v ňom. V sústave vľavo teleso A stojí a teleso B sa pohybuje rovnomerne priamočiaro smerom doprava. V sústave vpravo stojí teleso B a teleso A sa pohybuje doľava. Prechod medzi týmito sústavami a aj časopriestorovú transformáciu, ktorá prevedie jeden obrázok na druhý, zabezpečujú Lorentzove transformácie.

v trojrozmernom priestore stojí na mieste, sa v časopriestore pohybuje po rovnej čiare. Jeho poloha sa nemení, ale časová súradnica sa postupne zväčšuje. Teleso, ktoré sa pohybuje rovnomerne priamočiaro, sa tiež pohybuje po rovnej čiare, ktorá je oproti predchádzajúcej naklonená, pretože spolu s časom sa mení aj jeho poloha. Keď sa na tú istú situáciu pozrieme z pohľadu pozorovateľa v pohybe, jeho trajektória sa vyrovná a nakloní sa pôvodne zvislá trajektória prvého pozorovateľa. A z matematickej stránky to zariadia Lorentzove transformácie, ktoré sú akýmsi prekladovým slovníkom medzi pohľadom na situácie očami dvoch rôznych pozorovateľov.

Lorentzove transformácie sa v novej formulácii stanú analógiou bežných otočení z nášho trojrozmerného priestoru. Ak v ňom vyhlásime jeden smer za dopredu-dozadu a druhý doprava-doľava, ide o našu voľbu. Človek stojaci vedľa nás sa môže otočiť a zvoliť smery inak. To, čo považuje za pravo-ľavý smer, je nejaká kombinácia našich dvoch smerov, ale fyzikálne zákony a výsledky dejov budú pre nás oboch aj tak rovnaké. Preto v klasickej mechanike nemá dobrý zmysel brať tri priestorové rozmery osobitne, otočenia ich aj tak medzi sebou pomiešajú. To je skutočná pridaná hodnota spojenia času a priestoru do jedného celku. Minkowsky ukázal, že v relativite nemá dobrý zmysel brať čas oddelene od priestorových rozmerov. Sú to rôzne aspekty toho istého – súradníc v štvorrozmernom časopriestore. Pozorovateľom v pohybe sa pri Lorentzových transformáciách primieša medzi priestorové rozmery aj čas a to má za následok relativistické efekty – relatívnosť súčasnosti, dilatáciu času a podobne.

Navyše, ak začneme iba so štvorrozmerným časopriestorom a požadujeme zákony fyziky, ktoré sú rovnaké pre akokoľvek otočené súradnice, dostaneme ako priamočiary dôsledok Lorentzove transformácie. A s nimi špeciálnu relativitu so všetkým, čo prináša. Takáto formulácia špeciálnej relativity získala medzi fyzikmi veľkú obľubu. To bol jeden z faktorov, ktoré prispeli k jej rýchlemu rozšíreniu vo vedeckej komunite.

## Všeobecná teória relativity

Albert Einstein roku 1905 obhájil dizertačnú prácu. Do roku 1908 ešte pracoval na patentovom úrade, potom krátko pôsobil na univerzite v Berne. Jeho sláva vo svetovej teoretickej fyzike začala naberať na obrátkach a od roku 1909 bol dva roky mimoriadnym profesorom na univerzite v Zürichu, v rokoch 1911 a 1912 pôsobil v Prahe a v rokoch 1912 – 1914 na technickom inštitúte v Zürichu. Roku 1914 získal profesúru na univerzite v Berlíne.

V tomto čase sa mu podarilo spraviť aj väčšinu dôležitých krokov na ceste k všeobecnej teórii relativity. Tá špeciálna totiž mala niekoľko problémov a Einstein veril, že je len krokom ku kompletnejšej verzii. V prvom rade v špeciálnej teórii relativity chýbala gravitácia. Okamžité silové pôsobenie telies na diaľku sa nijakým spôsobom nedalo skombinovať s princípom relativity. Vedci už skôr uvažovali nad tým, že éter by mohol byť aj nositeľom gravitačnej interakcie, ale v Einsteinových prácach sa vyparil a pre gravitáciu bolo treba nájsť iný mechanizmus. Podobne ako sa úlohy prenášať elektromagnetické sily zhostili elektrické a magnetické polia. Druhým nedostatkom špeciálnej teórie relativity bola jej špeciálnosť. Fungovala iba pre rovnomerné priamočiare pohyby; sústavy, ktoré sa pohybujú zrýchlene, v nej neboli nijako opísané. Ukázalo sa, že oba tieto problémy mali spoločné riešenie. Einsteinova cesta k nim bola kľukatá. My si pripomenieme iba najdôležitejšie momenty.

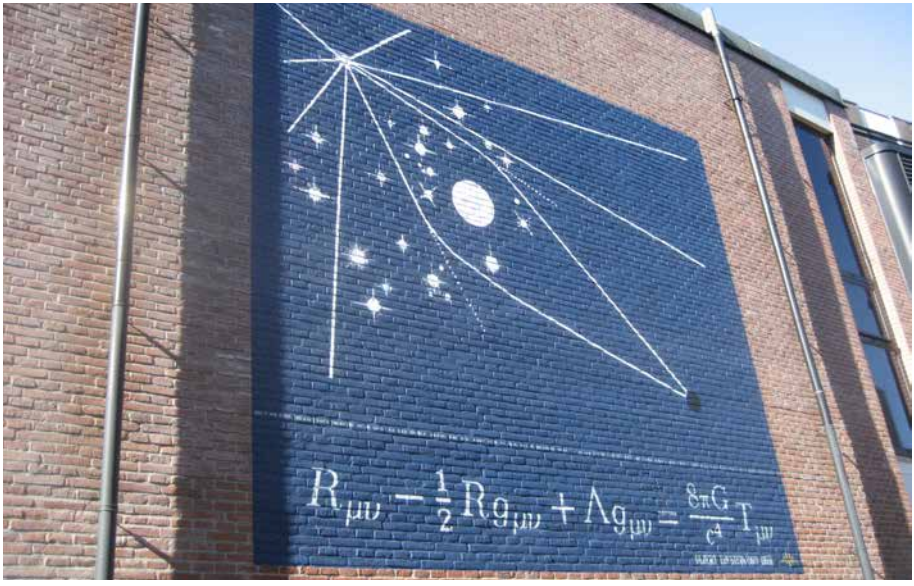
Roku 1907 si Einstein uvedomil, že gravitácia je ekvivalentná zrýchľovaniu. V myšlienke, ktorú označil za najšťastnejšiu vo svojom živote, pochopil, že vhodne zrýchľujúci výťah je na nerozoznanie od stojaceho výťahu s gravitačným poľom. Naopak, voľne padajúci výťah je na nerozoznanie od výťahu bez akejkoľvek gravitácie.

Einstein roku 1911 urobil výpočet, ktorý ukázal, že v zrýchľujúcom sa výťahu musí čas plynúť pomalšie ako pri jeho rovnomernom pohybe. Zrýchlenie výťahu spôsobí, že svetlo musí prejsť väčšiu dráhu, a preto sa musí

zmeniť plynutie času, aby pozorovatelia v oboch sústavách odmerali rovnakú rýchlosť svetla. A táto myšlienka priamo vedie ku kľúčovému momentu celej všeobecnej relativity. Ak zrýchlenie, a teda aj gravitácia, ovplyvňuje čas, neostáva jej nič iné ako ovplyvňovať aj priestor. „Pretože to, čo je v jednej sústave čas, je v inej sústave kombinácia času a priestoru," povedali Minkowsky a Lorentz. Tak si Einstein uvedomil, že gravitácia spôsobuje zakrivenie priestoru a zakrivenie priestoru sa prejavuje ako gravitácia.

Roku 1912 sa Einsteinovi podarilo nájsť nositeľa gravitačnej interakcie – je to priestor medzi telesami. Ďalšie tri roky Einstein strávil hľadaním rovníc, ktoré by zakrivenie časopriestoru opisovali a dávali ho do súvisu s rozložením a pohybom hmoty. Tieto rovnice, samozrejme, nemohli byť akékoľvek. Museli sa v jednoduchých situáciách zredukovať na Newtonov gravitačný zákon. Pre rovnomerných priamočiarych pozorovateľov sa museli zredukovať na špeciálnu relativitu, museli v nich platiť všetky známe zákony zachovania a rovnice museli vyzerať rovnako pre všetkých pozorovateľov.

To sa Einsteinovi nakoniec podarilo koncom roka 1915, keď sa v článku *Rovnice poľa pre gravitáciu* objavila definitívna verzia vzťahov pre zakrivenie




Einsteinove rovnice vrátane kozmologickej konštanty Λ a náčrt efektu gravitačnej šošovky na stene múzea v holandskom Leidene.

časopriestoru spôsobené prítomnosťou hmoty. Jedna z najúžasnejších fyzikálnych teórií bola na svete! Pritom prišiel Einstein na ďalšiu dôležitú vec. Nielenže sú čas a priestor medzi sebou nerozlučiteľne spojené, ale ovplyvňujú sa s hmotou, ktorá časopriestor vypĺňa. Dynamiku hmoty a dynamiku priestoru od seba nemožno oddeliť. Tak ako sa dejú zaujímavé veci s jedným (s hmotou), môžu a musia sa diať zaujímavé veci aj s tým druhým (s časom a priestorom). Priestor nie je pasívnym javiskom, na ktorom sa odohráva divadlo fyziky. Naopak, je plnohodnotnou a dôležitou postavou v tomto predstavení.

## Statický vesmír, kozmologická konštanta a kozmológia

Vo všeobecnej teórii relativity sa zrodila moderná kozmológia – štúdium dynamiky vesmíru ako takého, nie iba usporiadania hmoty v ňom. Krátko po publikovaní Einsteinovej práce si veľa vedcov uvedomilo, čo sa v rovniciach všeobecnej relativity skrýva, a pustili sa do práce na kozmologických dôsledkoch novej teórie. Vrátane samotného Einsteina. Ten si už pri pôvodnej práci uvedomil, že jedným z dôsledkov nových rovníc je dynamický časopriestor a neponúkajú žiadne riešenia pre statický vesmír. A keď už teraz povieme vesmír, nemáme na mysli iba hviezdy a galaxie v ňom. Máme na mysli aj priestor a jeho dynamiku. Zdalo sa, že všeobecná teória relativity dovoľuje iba vesmíry, ktoré sa rozpínajú alebo zmršťujú.

Gravitačnou interakciou sa hmota v priestore priťahuje a bez vzájomnej rýchlosti by do seba telesá nakoniec tak či tak narazili. Ak je táto rýchlosť dostatočná, nestane sa tak a rozídu sa do nekonečna – podobne ako odletí dostatočne rýchle teleso z povrchu Zeme. Telesá majú vplyv aj na priestor, v ktorom sa nachádzajú, a svojím pohybom môžu priestor brať so sebou. Ak sa galaxie nepohybujú od seba dostatočne rýchlo, môže sa stať, že gravitácia ich postupne spolu s priestorom medzi nimi vráti do jedného bodu. A ak rýchlosti dostatočné sú, priestor sa spolu s galaxiami bude rozširovať do nekonečna. To sa Einsteinovi ani trochu nepáčilo. Na jednej strane to odporovalo vtedajším pozorovaniam, na druhej strane to bolo proti predstave statického usporiadania sveta, ktorú zastávala väčšina vedcov tej doby.

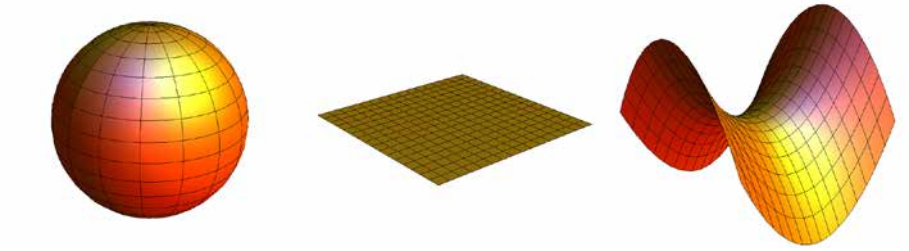
Einstein si pomerne rýchlo, už roku 1917, uvedomil jedno možné riešenie tohto problému. Jeho rovnice nie sú najvšeobecnejšie možné, dajú sa ešte trochu upraviť. Konkrétne sa do nich dá pridať ešte jeden člen bez toho, aby

to pokazilo základy, na ktorých všeobecná relativita stála. Do teórie zaviedol jeden ďalší parameter, ktorý novinku charakterizoval. Člen nijako neovplyvňuje gravitačné pôsobenie hmotných telies a vplýva iba na dynamiku priestoru ako celku. Parameter preto dostal meno kozmologická konštanta.

Jej fyzikálna interpretácia je akési samoodpudzovanie priestoru. Priestor sa nechce dať príliš stlačiť a pôsobí proti hmote a jej gravitácii. Tieto dve tendencie teda idú proti sebe a parametre teórie sa dajú zvoliť tak, aby sa navzájom vyrušili a situácia bola statická.

Mnohým Einsteinovým kolegom však nebolo po chuti niečo také. Predsa len išlo o rozšírenie teórie, ktoré do hry vnášalo nové parametre s jedinou úlohou zachraňovať jej problémy. To, ako sme už viackrát videli, zväčša nevedie k ničomu dobrému. Problematické bolo aj to, že kozmologická konštanta viedla na rovnováhu, ktorá nebola stabilná. Malé fluktuácie v priestore by viedli k ďalším zmenám a vesmír by sa do pôvodného, statického stavu nikdy nevrátil. Ľudia sa preto snažili statickosť vesmíru dosiahnuť iným spôsobom alebo navrhovali reálne uvažovať o možnosti dynamického vesmíru.

Roku 1922 našiel dynamické riešenia pre vývoj vesmíru ruský matematik Alexander Friedmann (1888 – 1925). Ukázal, že vesmír ako celok môže mať tri rôzne tvary: uzavretý (guľový), otvorený (sedlový) a plochý. Ktorý z týchto tvarov je realizovaný, určuje množstvo hmoty v ňom. Ak je hmoty priveľa, jej pôsobenie priestor uzavrie do tvaru (trojrozmernej) gule, ak hmoty nie je dostatok, bude mať vesmír zas sedlový tvar. Ak je hmoty presne kritické množstvo, vesmír bude na veľkých škálach plochý. Tieto tvary a zakrivenia priestoru si však netreba mýliť so zakrivením spôsobeným gravitačným poľom telies. To sa dá predstaviť ako malé vlny na povrchu oceánu, ktorých dôsledkom je gravitačná interakcia, a to v kontraste s guľovým tvarom celej vodnej hladiny na povrchu zemegule.



Dvojrozmerné analógie troch rôznych trojrozmerných možností globálneho zakrivenia vesmíru. Zľava: uzavretý vesmír, plochý vesmír a otvorený vesmír.

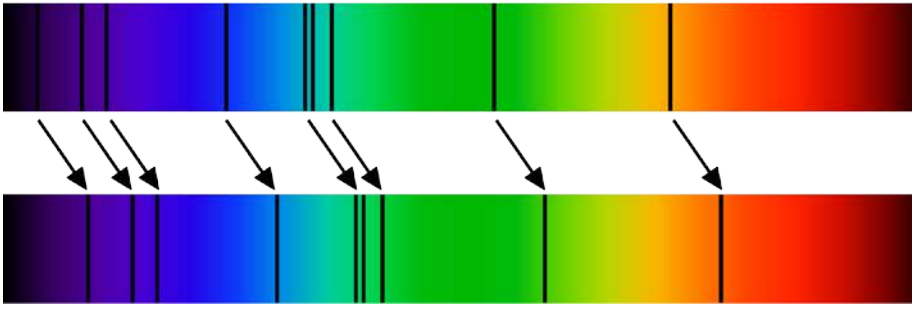
Po Friedmannovi odvodil rovnaké vlastnosti kozmologických riešení Einsteinových rovníc belgický fyzik a matematik Georges Lemaître (1894 – 1966). Roku 1927 ukázal, že rozpínanie sa vesmíru by sa malo prejaviť zväčšovaním vzdialeností medzi galaxiami. Neskôr si uvedomil aj to, že ak sa vesmír rozpína a vzdialenosti v ňom sa zväčšujú, pri pohľade do minulosti tohto procesu by sme mali zistiť moment, keď bol vesmír veľmi malý a všetka hmota sústredená v tomto malom priestore. Z tejto konfigurácie sa potom rozpínaním sa začína história vesmíru a všetkého v ňom.

Einsteinovi sa úvahy o rozpínaní sa vesmíru nepozdávali. Pevne veril v statický vesmír a kozmologickú konštantu. Riešenia rovníc, ktoré mu prisudzovali dynamiku, odmietal a považoval ich za chybné.

## Rozpínanie sa vesmíru a veľký tresk

Kým teoretickí fyzici uvažovali o tom, ako zachrániť statický vesmír, jeden americký astronóm objavil presný opak. Vesto Slipher (1875 – 1969) si v rokoch 1913 – 1917 všimol, že veľká väčšina špirálových hmlovín sa od Zeme vzďaľuje. Ako na to prišiel?

Dôležitú úlohu v jeho objave opäť hralo spektrum prichádzajúceho svetla a medzery v ňom. Slipher si všimol, že vo svetle hmlovín sa nachádzajú podobné medzery ako vo svetle prichádzajúcom zo Slnka alebo z iných hviezd, ale sú oproti nim posunuté. S niečím podobným má väčšina z nás skúsenosť zo situácie, keď okolo prefrčí sanitka so zapnutou sirénou. Keď sa k nám približuje, jej zvuk počujeme o čosi vyšší, ako keď sa od nás vzďaľuje. Možno si pamätáme, že tento jav sa nazýva podľa rakúskeho fyzika Christiana Dopplera (1803 – 1853) a dochádza



Červený posun spektrálnych čiar. Vľavo spektrum stojaceho zdroja, vpravo spektrum zdroja, ktorý sa od nás vzďaľuje.

k nemu vždy, keď sa zdroj a prijímač vlnenia vzhľadom na seba pohybujú. Svetlo je tiež vlnenie, a tak aj pri jeho šírení dochádza k podobnému efektu, i keď mechanizmus je v tomto prípade kvôli špeciálnej relativite trochu iný ako pre zvuk a sanitku. Svetlo telies, ktoré sa od nás vzďaľujú, je potom posunuté smerom k červeným farbám svetelného spektra a pre približujúce sa telesá k modrým. Veľkosť tohto posunu priamo súvisí s rýchlosťami zdroja a pozorovateľa.

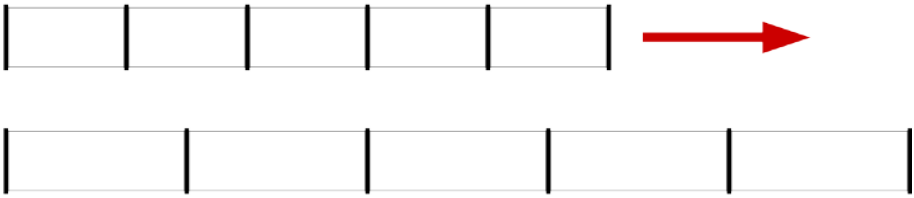
Slipher ešte nevedel, že špirálové hmloviny sú iné galaxie, a nevedel, ako sú ďaleko. Ani všeobecná relativita ešte nebola dostatočne rozpracovaná na to, aby si vedci dokázali úplne uvedomiť dôsledok tohto pozorovania. To prišlo až roku 1929 s pozorovaním iného amerického astronóma Edwina Hubbla (1889 – 1953). Hubblovi sa podarilo zmerať vzdialenosť k 24 galaxiám metódou, ktorá stojí na dvoch kľúčových princípoch.

Prvým princípom je vcelku jednoduchá geometria. Ak sa pozeráme na zdroj svetla z väčšej vzdialenosti, uvidíme ho menej jasný. Nie preto, že by zoslabol, ale intenzita žiarenia so vzdialenosťou klesá kvôli zákonu zachovania energie. Vyžiarená energia sa vo väčšej vzdialenosti rozloží na väčšiu plochu. Ak by sme poznali absolútnu svietivosť zdroja (teda koľko energie presne vyžaruje), z relatívnej svietivosti (koľko energie presne zachytíme) by sme vedeli vzdialenosť presne určiť.

Druhým princípom sú vhodné zdroje svetla, ktorých absolútnu svietivosť poznáme. Poslúžili cefeidy, špeciálny druh hviezd, pre ktoré sa dá z pozorovaných vlastností veľmi dobre odhadnúť ich absolútna svietivosť. Tento dôležitý objav spravila americká astronómka Henrietta Leavittová (1868 – 1921). A Hubblovi sa podarilo pre galaxie, v ktorých takúto hviezdu našiel, odmerať vzdialenosť.

Na Hubblovom objave však je najdôležitejšie to, že vo vzťahu medzi ich vzdialenosťami a rýchlosťami objavil priamu úmernosť. Galaxie sa od nás vzďaľujú tým rýchlejšie, čím sú od nás vzdialenejšie. To je veľmi zvláštne. Na prvý pohľad by to malo hovoriť, že naša Zem alebo aspoň galaxia má vo vesmíre veľmi špeciálne miesto, no od podobných úvah vedci už veľmi dávno upustili a Hubblovo pozorovanie bolo potrebné vysvetliť inak.

Presne také niečo sa deje pri rozpínaní sa vesmíru. V jednom rozmere sa to dá dokonca veľmi jednoducho vyskúšať. Zoberieme akúkoľvek gumičku, nakreslíme na ňu rovnako vzdialené čiarky a gumičku natiahneme. Medzery medzi čiarkami sa zväčšia všetky rovnako, to znamená, že vzdialenosti medzi dvomi čiarkami sa zväčšia tým viac, čím ďalej od seba pôvodne boli. Ale žiadna čiarka nie je špeciálna a toto rozpínanie sa nemá významný bod, od ktorého by sa veci vzďaľovali. S galaxiami sa deje to isté, ibaže v troch rozmeroch.



Ilustrácia rozpínania sa jednorozmernej gumičky, pri ktorom sa všetky jej body vzďaľujú od ostatných a rýchlosť vzďaľovania sa je úmerná ich vzájomnej vzdialenosti.

Hubble teda neobjavil len pohyb galaxií od Zeme, ale aj to, že ich vzďaľovanie je spôsobené rozpínaním sa celého vesmíru. Jeho meranie v kombinácii so všeobecnou teóriou relativity teda dokázalo, že vesmír statický nie je, rozpína sa. Kuriozitou je, že Hubblove pôvodné merania neboli presné. Dopustil sa niekoľkých chýb, ktoré však robil zodpovedne a vždy rovnako, čím sa priama úmera medzi vzdialenosťou a rýchlosťou zachovala. Šťastie praje pripraveným! Napriek tejto chybe dnes poznáme túto lineárna závislosť pod názvom Hubblov zákon.

## Najväčší omyl?

Einstein nakoniec ešte okolo roku 1931 od svojej kozmologickej konštanty upustil. Ukázala sa zbytočná a jeho teória aj bez nej opisovala vesmír tak, ako ho pozorujeme. Sám ju nazval najväčšou chybou svojho života a niekoľko desaťročí aj po Einsteinovej smrti opisovali fyzici vesmír bez nej. Teória, ktorá toto rozpínanie sa vysvetľovala, neskôr dostala pomenovanie teória veľkého tresku a mnoho vedcov na nej ďalej pracovalo a rozvíjalo ju. Nebola úplne bez problémov, ale postupne sa nachádzali dôkazy, ktoré teóriu potvrdzovali. Definitívnym bolo objavenie žiarenia kozmického pozadia roku 1964, o ktorom budeme písať v ďalšej kapitole.

Všetko sa zdalo byť v poriadku, o vesmíre sme sa dozvedeli veľa nového a zaujímavého a všetky pozorovania viac či menej súhlasili s našimi predstavami. Až kým roku 1998 neprišlo prekvapivé zistenie, že rozpínanie sa vesmíru sa dokonca zrýchľuje. Pre také niečo je najjednoduchším vysvetlením existencia kozmologickej konštanty. Einstein mal predsa len pravdu a jeho veľké zlyhanie sa stalo súčasťou našej predstavy o fungovaní vesmíru. Aj vy by ste chceli, aby vaše omyly vyzerali takto? Kozmologická konštanta však so sebou prináša oveľa viac otázok ako odpovedí, o čom si povieme ďalej.

# Tmavá hmota a tmavá energia

Doteraz sme sa zaoberali minulosťou. Sledovali sme, ako fyzici hľadali a úspešne nachádzali cesty z mnohých slepých uličiek. Pri tom sa im podarilo nájsť zákony fyziky, ako ich poznáme dnes. Aby však nevznikol dojem, že tento proces je ukončený a prírode dokonale rozumieme, záverečné dve kapitoly budeme venovať blúdeniam, ktoré stále trvajú. Výber týchto dvoch tém je veľmi subjektívny. Každý vedec a každá vedkyňa by ako dve najdôležitejšie otázky, v ktorých medzi odborníkmi nevládne zhoda, pravdepodobne vybrali niečo iné. My budeme rozprávať o tmavých zložkách vesmíru a o teórii strún, o dvoch problémoch teoretickej fyziky. O tom, z čoho presne sa skladá náš vesmír a ako presne skombinovať gravitáciu a kvantovú mechaniku.

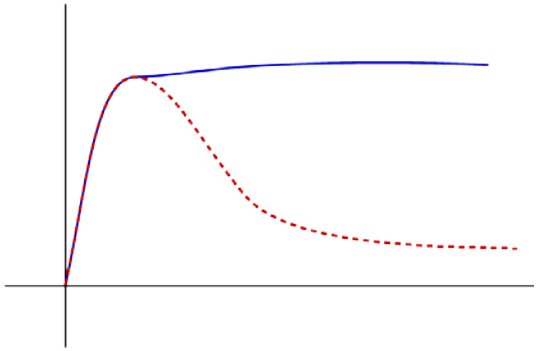
Keď sa spýtame rôznych ľudí na názor na tieto veci, dostaneme celé spektrum odpovedí. Od úplného presvedčenia o správnosti dnešných vysvetlení a o tom, že ich definitívne potvrdenie je za rohom, cez rôzne úrovne viac či menej zdravého skepticizmu až po presvedčenie, že súčasné vedecké smerovanie je úplne pomýlené a dlhé roky plytváme talenty a zdroje zablúdení v slepej uličke.

Začneme tmavou hmotou a tmavou energiou, ktoré sa zvyknú spomínať spoločne. Možno je za tým nádych tajomstva, ktoré ich spája a ktoré prichádza s ich tmavým názvom. Možno preto, že sa obe snažia vysvetliť úkazy vo vesmíre, ktorým nerozumieme. Ale z fyzikálnej stránky ide o dve veľmi, veľmi odlišné veci, ktoré majú vysvetliť úplne iné pozorovania. Aké sú to?

## Svietivá hmota a jej usporiadanie

Pri pohľade do vesmíru toho vidíme ozaj veľmi veľa. Aspoň tak sa zdá. Voľným okom vidíme planéty, hviezdy a dokonca aj najbližšie galaxie. Vďaka ďalekohľadom sa ich počet významne rozširuje, a keď budeme sledovať žiarenie mimo viditeľného spektra – rádiové, röntgenové alebo mikrovlnné –, objavíme ďalšie zložky vesmíru, napríklad medzihviezdny plyn. Všetkej tejto hmote budeme hovoriť svietivá hmota, pretože vyžaruje elektromagnetické žiarenie, ktoré môžeme zachytiť a z ktorého sme sa o nej a o fyzike vo všeobecnosti naučili veľmi veľa. A ak nesvieti vlastným svetlom, s elektromagnetickým žiarením interaguje.

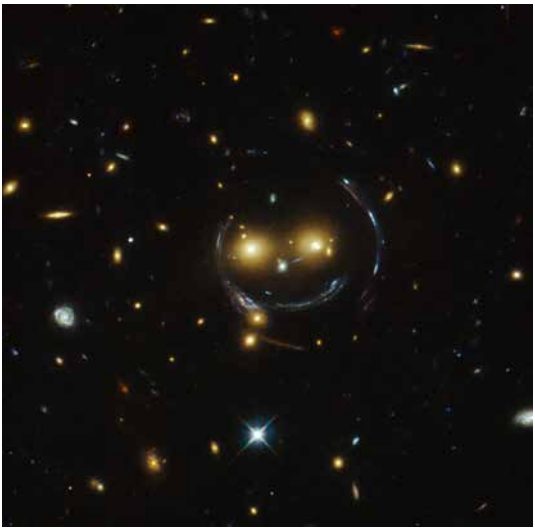
Roku 1980 publikovala trojica amerických astronómov Vera Rubinová (1928 – 2016), Kent Ford (1931) a Ken Freeman (1940) štúdiu, ktorá významným spôsobom zmenila náš pohľad na oblohu. Išlo o sumár vyše



Približné zobrazenie očakávanej rotačnej krivky galaxie (červená) a bežne pozorovanej krivky (modrá).

dvadsaťročného študovania rotačných kriviek galaxií. Vedci sledovali rýchlosť obiehania hviezd okolo stredov galaxií v závislosti od toho, ako ďaleko sa nachádzajú. Ide o niečo veľmi podobné, ako keď sa pozeráme na slnečnú sústavu a sledujeme obežné rýchlosti jednotlivých planét. So vzdialenosťou klesajú, pretože klesá gravitačná sila, ktorá je dostredivou silou pri pohybe. Podobne by sme očakávali, že bude klesať obežná rýchlosť hviezd v galaxiách. Výskum však ukázal, že sa to prakticky pri všetkých galaxiách nedeje. Rotačné krivky sú pre väčšie vzdialenosti ploché a hviezdy v nich obiehajú oveľa rýchlejšie, ako by sme z rozloženia svietivej hmoty očakávali. Pri svojej rýchlosti by hviezdy v galaxiách mali uletieť, pretože gravitačná sila je v takej vzdialenosti príliš malá. Napriek tomu držia pohromade. Podobné výsledky dostali neskôr ďalší vedci, keď sledovali medzihviezdny plyn v galaxiách. Ten síce nevyžaruje viditeľné svetlo, ale vyžaruje svetlo v mikrovlnnej časti spektra a jeho pohyb sa tiež nedá vysvetliť iba z pozorovanej hmoty.

O niečom podobnom sa získali čiastkové informácie už dávnejšie. Prvé priniesol dokonca už roku 1884 britský fyzik William Thomson, lord Kelvin (1824 – 1907) . Niektoré z týchto skorších pozorovaní sa nakoniec vysvetlili inak, ale v osemdesiatych rokoch sa podarilo nazbierať ďalšie nezávislé dôkazy, že vo vesmíre nie je všetko podľa našich predstáv. Jedným bolo pozorovanie kôp galaxií. Kopa galaxií je presne to, čo by sme podľa názvu očakávali. Niekoľko galaxií, ktoré sú relatívne blízko pri sebe. Vzájomná gravitácia ich drží pohromade a vesmírom sa pohybujú ako celok. V ich okolí často dochádza k efektu gravitačnej šošovky: dráha svetla sa v okolí väčšej koncentrácie hmoty zmení natoľko, že sa výrazne zdeformuje obraz objektov, z ktorých svetlo pochádza. Pre mnohé kopy galaxií však bol efekt oveľa výraznejší, ako by sme iba z hmotnosti viditeľnej hmoty v galaxiách očakávali.



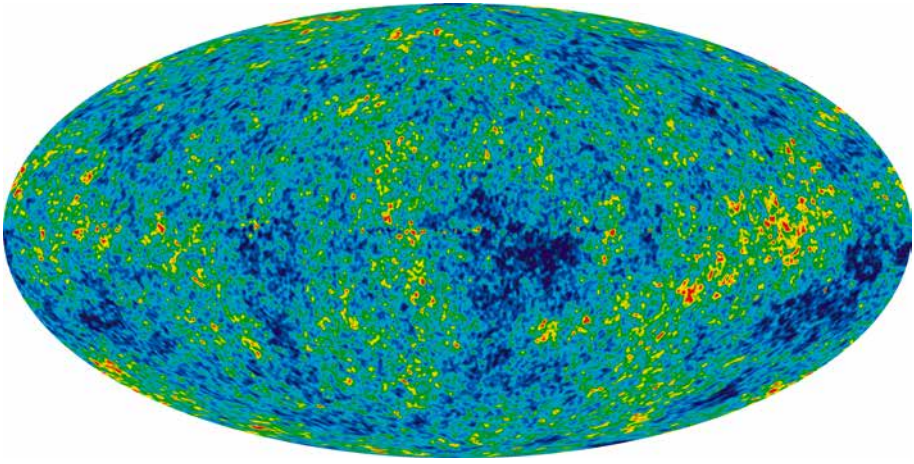
Usmievavá tvár, ktorú zachytil Hubblov vesmírny teleskop. Okrúhle útvary nie sú skutočné, ale vznikli deformovaním svetla veľmi masívnym objektom medzi zdrojom a prijímateľom. V prípade, že sú všetky tri objekty v jednej línii, jeden zdroj sa môže zobraziť dokonca až na takýto kruhový útvar, takzvaný Einsteinov prstenec.

Ďalším dôkazom bola naša predstava o vývoji vesmíru po veľkom tresku, konkrétne – akým spôsobom v ňom vznikala dnešná štruktúra hmoty. Ako sa z počiatočného homogénneho vyplnenia mohol vesmír dopracovať k hmote sústredenej vo hviezdach a galaxiách s veľkými kusmi prázdneho priestoru medzi nimi? Hypotéza bola taká, že kvôli kvantovým fluktuáciám nebolo vyplnenie na začiatku úplne homogénne a z hustejších miest sa pod vplyvom vlastnej gravitácie stávali útvary ako galaxie a hviezdy. Ale raný vesmír sa rozpínal veľmi rýchlo, a keby bol vyplnený iba tým, čo pozorujeme ďalekohľadmi, galaxie by nemali čas vytvoriť sa. Hustejšie miesta by sa zriedili rozpínaním sa a vesmír by bol vyplnený riedkou rovnomernou hmotou. Tento proces sa dnes dá veľmi dobre študovať na počítači. Numerická analýza rovníc je veľmi silný a často používaný nástroj nielen v kozmológii. Na začiatku zvolíme priestor a rozloženie hmoty v ňom a potom necháme počítač robiť to, čo vie najlepšie: počítať, riešiť dynamiku takéhoto systému danú Einsteinovými rovnicami. Výpočet je to náročný, treba na to obrovské špecializované zariadenia, ale výsledkom je časový vývoj rozloženia hmoty v priestore. Je to dôležité preto, že v kozmológii sa nedajú robiť experimenty, nemáme k dispozícii testovacie vesmíry, kde by sme skúšali, ako sa menia vlastnosti zmenou niektorého z parametrov modelu. A tak nám počítače dávajú šancu niečo vyskúšať aspoň takto. Výsledok je taký, že nech skúšame, ako chceme, pozorované rozdelenie hmoty vo vesmíre nedostaneme. Hmota je jednoducho príliš riedka a nedokáže sa svojou vlastnou gravitačnou príťažlivosťou dostať z počiatočného stavu do stavu, ktorý dnes pozorujeme.

# Tmavá hmota

Svietivá hmota vo vesmíre sa z mnohých stránok správa inak, ako by sme čakali. Vedci teda boli v trochu podobnej situácii ako pri riešení problému zvláštneho pohybu Uránu. Buď musíme prehodnotiť zákony fyziky, alebo je tu ešte niečo, čo sme do nich doteraz nezarátali. Podobne ako v spomínanom prípade skúsime najskôr druhú možnosť. Malo by ísť o hmotu, ktorá sa nachádza hojne vo vesmíre, ale so svietivou hmotou okrem gravitačného pôsobenia prakticky vôbec neinteraguje. Švajčiarsky astronóm Fritz Zwicky (1898 – 1974) vymyslel pre takýto druh hmoty veľmi príznačný názov tmavá hmota už roku 1933, keď študoval pohyb galaxií v kopách.

Kandidátov na tmavú hmotu je viacero a ide zväčša o častice, ktoré majú rozšíriť štandardný model. Sú to napríklad supersymetrickí partneri klasických častíc, o ktorých budeme trochu písať v ďalšej kapitole. Zo simulácií a výpočtov vychádza, že tmavej hmoty nie je vôbec málo. Z analýzy rotačných kriviek sa dalo usúdiť, že v galaxiách sa nachádza asi šesťkrát viac tmavej hmoty ako tej svietivej. K podobných číslam vedú aj iné odhady, napríklad simulovaním histórií vesmíru s rôznou hustotou tmavej hmoty. Metódou pokus a omyl sa dá dopátrať k takej hustote, ktorá vedie k pozorovanému rozloženiu svietivej hmoty.



Žiarenia kozmického pozadia pozorované družicou WMAP. Červené miesta zobrazujú teplejšie a modré chladnejšie miesta v žiarení. V štruktúre týchto fluktuácií je ukryté veľké množstvo informácií o histórii nášho vesmíru a o vlastnostiach hmoty, ktorá ho vypĺňa.

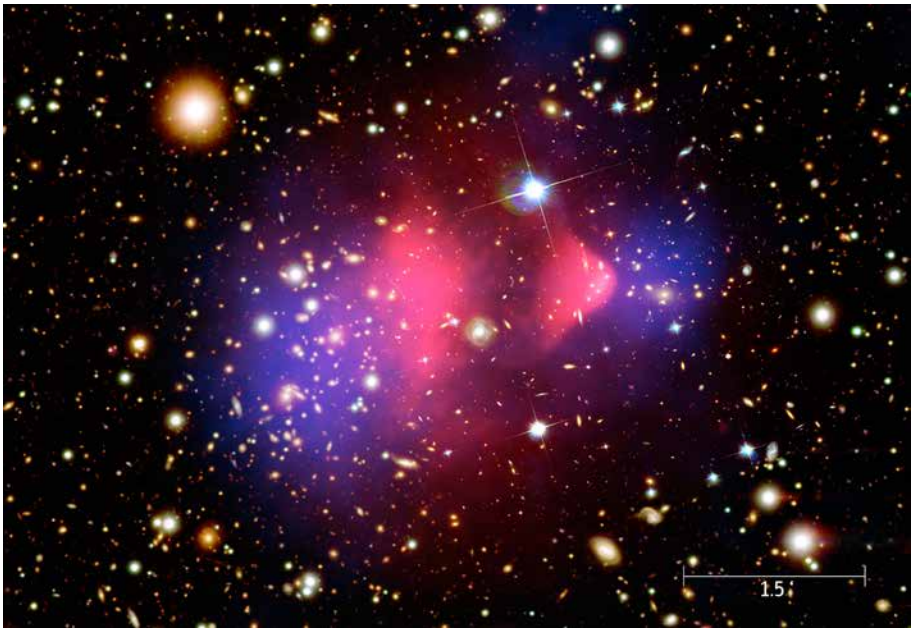
O tmavej hmote toho vieme veľa aj vďaka štúdiu žiarenia kozmického pozadia. Ide o prekvapivo dôležitý pozostatok vývoja vesmíru. Pri rozpínaní sa vesmíru v ňom hmota postupne chladne a asi 380 000 rokov po veľkom tresku vychladla tak veľmi, že sa elektricky nabité častice spojili do neutrálnych atómov. Zrážky medzi nimi už neboli dostatočne energetické, aby atómy rozbili. Fotóny, ktoré sa v tom čase vo vesmíre nachádzali, tak s neutrálnou hmotou prestali interagovať a doteraz voľne poletujú priestorom. Tieto fotóny tvoria žiarenie kozmického pozadia a v jeho vlastnostiach je zachytená informácia o vesmíre z tej doby. Dôležité je, že kým svietivá hmota interagovala s fotónmi gravitačne aj elektromagneticky, tmavá hmota interagovala iba gravitačne. Tak nechali tieto dva druhy hmoty v žiarení rôzne odtlačky a z toho, ako žiarenie vyzerá, vieme dokázať, že sa vo vesmíre tmavá hmota musí nachádzať a koľko jej je. Toto pozorovanie je dnes jedným z najdôležitejších dôkazov podporujúcich hypotézu o existencii neznámej komponenty vesmíru.

Tmavej hmote teda rozumieme tak, že sa počas vývoja vesmíru usporiadala do dlhých vlákien, ktoré tvoria akúsi pavučinu. Táto pavučina tvorí kostru, na ktorú sa postupne uložila svietivá hmota.

## Bullet klaster

Najlepšie priame informácie o správaní tmavej hmoty máme vďaka pozorovaniu jednej konkrétnej udalosti. Vo vzdialenosti asi štyri miliardy svetelných rokov došlo k zrážke dvoch kôp galaxií. Jedna z nich má názov Bullet (Náboj) a podľa nej sa táto udalosť nazýva. Kopy sa skladajú z troch rôznych druhov hmoty: z bežných hviezd, medzihviezdneho materiálu a tmavej hmoty. Za normálnych okolností putujú vesmírom všetky tri pohromade, ale počas zrážky sa každá správa inak.

Pri slove zrážka si asi predstavíme vcelku dramatickú udalosť. Pre samotné hviezdy v galaxiách je to sotva povšimnutiahodné. V porovnaní so vzdialenosťami medzi nimi sú totiž nesmierne maličké, a preto šanca, že niektoré do seba narazia, je úplne zanedbateľná. Gravitačné pôsobenie tiež nie je z tých najsilnejších, a tak sa hviezdy v klastroch pohybujú ďalej, ako keby sa nechumelilo. Medzihviezdny plyn však je v galaxiách rozmiestnený rovnomernejšie a, čo je dôležité, pôsobia v ňom aj elektromagnetické sily. Preto táto zložka v galaktických kopách pri zrážke výrazne zaostane. Toto všetko vidíme v ďalekohľadoch.




Kombinovaný obrázok zrážky Bullet klaster. Fotografia viditeľného spektra zobrazujúca hviezdy z Hubblovho vesmírneho teleskopu je kombinovaná s röntgenovou snímkou z teleskopu Chandra, v ktorom je medzihviezdny plyn vyznačený ružovou. Modrou je do obrázka doplnené rozdelenie hmoty (svietivej aj tmavej) z výpočtov na základe efektu gravitačnej šošovky.

Tmavú hmotu ďalekohľadom nevidieť, ale jej rozmiestnenie môžeme zmapovať podľa toho, ako pôsobí na svetlo prichádzajúce z objektov za ňou. Poslúži nám opäť efekt gravitačnej šošovky. Máme tak šancu sledovať deje s tmavou hmotou a z toho vieme, že jej pohyb viac či menej nasleduje hviezdy. Tmavá hmota nereaguje ani na medzihviezdny plyn, ani na tmavú hmotu z druhej kopy galaxií. Z toho sa dá vypočítať, ako môže a ako nemôže vyzerať interakcia tmavej hmoty so svietivou hmotou aj samej so sebou.

## Priame hľadanie častíc tmavej hmoty

Asi nás neprekvapí, že nájsť častice tmavej hmoty je problematické. Je tmavá a prakticky s ničím neinteraguje. Rovnako nás asi neprekvapí, že sa o to vedci veľmi intenzívne pokúšajú. Veria, že by sa to mohlo podariť vďaka veľmi citlivým prístrojom, ktoré neustále zdokonaľujú. Všetky pokusy sa snažia nájsť

drobné dôsledky maličkých interakcií tmavej hmoty s bežnou hmotou. Tie by boli ozaj miniatúrne, preto sa tieto experimenty uskutočňujú zväčša hlboko pod zemou, kde sú tienené od rušivého kozmického žiarenia a ďalších zdrojov šumu.

Druhou šancou na nájdenie častíc tmavej hmoty sú urýchľovače častíc, napríklad LHC (Veľký hadrónový urýchľovač) v CERN-e. V nich sa urýchlia častice bežnej hmoty na obrovské energie a pri ich zrážkach vznikajú na krátke časy spŕšky ťažších nestabilných častíc. Vyznať sa v takejto krátkej a neprehľadnej udalosti nie je jednoduché. Sú na to potrebné jedny z najsofistikovanejších zariadení, aké ľudia kedy vytvorili, ale dá sa to. A vedci veria, že by v nich mohli okrem iného zahliadnuť aj častice tmavej hmoty. Presnejšie – nezahliadnuť. Ak by s istotou zachytili všetky ostatné produkty rozpadu, a stále by im niekde chýbala energia a hybnosť, dalo by sa usúdiť, že si ich nepozorovane odniesla nejaká častica. Informácia o tom, koľko a kam, by nám prezrádzala čosi o vlastnostiach tejto častice.

Ani jedno z týchto hľadaní však doteraz úspešné nebolo. Žiadnu inú ako gravitačnú interakciu sme medzi tmavou a klasickou hmotou nepozorovali. Jediné, čo sa darí, je posúvať limity, ako málo musia častice tmavej hmoty interagovať so svietivou hmotou, aby to bolo s našimi experimentmi kompatibilné. Napriek tomu, že väčšinu vedeckej komunity dôkazy presvedčili a čakajú na objavenie častíc tmavej hmoty, je prirodzené, že niektorí vedci skúšajú hľadať alternatívne vysvetlenia.

## Čo ak nie?

Nájsť rozumnú alternatívu je prekvapivo ťažké. Čiastkové riešenia niektorých problémov sa nájsť dajú, ale vždy zlyhávajú v iných situáciách. Nájsť jednu komplexnú náhradu, čo by riešila naraz všetky otázky, na ktoré má byť tmavá hmota odpoveďou, je aspoň také ťažké, ako detegovať tmavú hmotu.

Dlho sa napríklad myslelo, že úlohu tmavej hmoty by mohla tvoriť tmavá svietivá hmota. Napríklad hnedé trpaslíky alebo iné objekty, ktoré tvorí klasická hmota, ale nijako nesvietia. Takéto objekty by však tienili svetlo za nimi, čo tmavá hmota nerobí, a mali by iný dopad na žiarenie kozmického pozadia. Z teórie veľkého tresku a zo štúdia žiarenia kozmického pozadia tiež vieme, koľko svietivej hmoty vo vesmíre môžeme očakávať. A ukazuje sa, že ju vidíme všetku, žiadne významné množstvo sa pred nami nemôže skrývať.

Inou možnosťou je, že to, čo musí tentoraz ustúpiť, je naše porozumenie zákonom fyziky. Možno na škálach galaxií už gravitácia ozaj funguje inak a treba nájsť modifikovanú verziu všeobecnej relativity. Budeme o tom ešte v tejto kapitole písať, ale ani toto vysvetlenie nie je bez problémov. Modifikovaná gravitácia má problém vysvetliť správanie Bullet klastra, preto je aj táto udalosť ozaj dôležitá. Bez prítomnosti tmavej hmoty totiž veľmi ťažko vysvetliť pozorovaný efekt gravitačnej šošovky tak, ako ho vidíme.

Tmavá hmota teda napriek všetkej snahe stále zostáva tmavou. Nesvieti, priamo sme ju nedetegovali a ešte toho o nej veľa nevieme.

## Tvar vesmíru a jeho rozpínanie sa

Je čas pozrieť sa na druhú z neznámych a tajomných zložiek vesmíru – na tmavú energiu. Pri nej je, na rozdiel od tmavej hmoty, otáznikov a neznámych oveľa viac. Ako sme písali v predchádzajúcej kapitole, Albert Einstein roku 1931 upustil od kozmologickej konštanty a zdalo sa, že sa potvrdením rozpínania sa vesmíru definitívne stala nepotrebnou. Takmer o 67 rokov neskôr sa však ukázalo, že to tak vôbec nemusí byť.

Supernova SN1994D v galaxii NGC 4526. Analýzou svetla z podobných udalostí sa prišlo na to, že rozpínanie vesmíru sa zrýchľuje.

Roku 1998 bola zverejnená štúdia, v ktorej vedci sledovali špeciálny druh supernov. Supernova je krátka a výrazná udalosť na oblohe – podobná ako nova, o ktorej sme už písali. Ide o explóziu niektorých druhov hviezd a prejavuje sa ako nové svetielko na oblohe, ktoré po niekoľkých týždňoch alebo mesiacoch od objavenia zas zmizne. Istý špeciálny typ supernov, takzvané supernovy Ia (čítaj jedna á), je špecifický tým, že majú veľmi presne známu a konzistentnú absolútnu svietivosť. Sú teda dokonalými zdrojmi svetla na

meranie vzdialeností, tak ako sme to opísali v predchádzajúcej kapitole. A z analýzy mnohých takýchto supernov vo vzdialených galaxiách naprieč celým vesmírom sa podarilo ukázať, že rozpínanie sa vesmíru sa dokonca zrýchľuje! Veľa výkričníkov v tejto knihe nenájdete, ale táto veta si jeden zaslúžila.

Z Einsteinovej teórie naopak vyplýva, že rozpínanie sa vesmíru by sa malo gravitačným pôsobením hmoty spomaľovať. Vďaka Einsteinovi máme aj priamočiare riešenie tohto problému – kozmologickú konštantu. Jej prítomnosť by spôsobovala presne čosi také. Od Einsteinových čias náš pohľad na svet predsa len o čosi pokročil a ľudia sa dnes na kozmologickú konštantu pozerajú radšej iným, aj keď ekvivalentným spôsobom: ako na energiu prázdneho priestoru. V analógii s pomenovaním tmavej hmoty dostala táto energia tiež označenie tmavá. Od hmoty, ktorej množstvo je vo vesmíre konštantné, sa tmavá energia líši tým, že jej je stále viac – s pribúdajúcim priestorom jej pribúda.

Objavenie tmavej energie bolo tak trochu vykúpením pre tmavú hmotu. V deväťdesiatych rokoch ľudia analýzou žiarenia kozmického pozadia zistili, že vesmír je s veľkou presnosťou plochý. Z troch možností vo Friedmannových rovniciach sa naša ukazuje byť tá prostredná – na malých vzdialenostiach je priestor zakrivený gravitáciou telies, ale ako celok má rovný tvar. To však vyžaduje veľmi špecifické množstvo hmoty, ktoré musí vesmír vypĺňať. Nie príliš malé, nie príliš veľké. Svietivú hmotu máme zmapovanú veľmi dobre a pred objavom tmavej energie sa predpokladalo, že zvyšok do kritickej hustoty tvorí tmavá hmota. V iných častiach modelu už veľa tmavej hmoty spôsobovalo problémy. Keď ľudia objavili zrýchľovanie rozpínania sa vesmíru a z neho určili približné množstvo tmavej energie, vesmír získal ďalšiu zložku energetického obsahu a množstvo tmavej hmoty, ktoré teraz vyžadovala plochosť vesmíru, už bolo konzistentné.

Dnes je tmavá energia a ňou spôsobený člen v Einsteinových rovniciach štandardnou súčasťou kozmologických úvah a veľmi dobre vysvetľuje pozorované vlastnosti a históriu vesmíru. Bez nej je napríklad veľmi ťažké vysvetliť, prečo sa vo vesmíre striedajú miesta husto a riedko vyplnené galaxiami. Zaujímavé je, že samotná hustota tmavej energie je maličká, absolútne neporovnateľná s hustotou bežných objektov vo vesmíre, ale vypĺňa celý priestor, všetky obrovské medzihviezdne a medzigalaktické prázdnoty, a tak je jej v konečnom dôsledku viac ako svietivej a tmavej hmoty. Tmavá energia tvorí skrz ekvivalenciu hmoty a energie asi 68 % výplne vesmíru.

Pre nás je tmavá energia zatiaľ iba názov. Momentálne nemáme žiadnu konkrétnu a dobre uznanú predstavu, čo sa za ním skrýva. Nápadov je veľa a všetky sa zdajú byť rovnako dobré alebo rovnako zlé. Záleží na tom, ako sa na to pozeráme.

## Najhoršia teoretická predpoveď v histórii

Viackrát píšeme o prelomových teoretických predpovediach – o planéte Neptún, o vzťahu pre fotoelektrický efekt alebo (v ďalšej časti) o existencii antičastíc. Aby to nevyzeralo, že je vždy všetko jednoduché, pozrieme sa teraz na teoretickú predpoveď, ktorá si svojím neúspechom vyslúžila pomenovanie – najhoršia v histórii.

Spojenie kvantovej mechaniky a špeciálnej teórie relativity predpovedá, že prázdny priestor nie je zďaleka také nudné miesto, ako by sa mohlo zdať. Kvantové polia v ňom fluktuujú a na škálach elementárnych častíc je vákuum plné častíc, ktoré na krátky čas vznikajú a potom zas zanikajú. Efekt týchto fluktuácií je dokonca pozorovateľný, spôsobuje malú príťažlivú silu medzi vodivými platňami vo vákuu. Roku 1948 ho predpovedal dánsky fyzik Hendrik Casimir (1909 – 2000) a pozorovali ho roku 1997. Celé to pripomína bublajúcu polievku. Práve to bublanie by mohlo dávať prázdnemu priestoru energiu a prejavovať sa ako kozmologická konštanta. Priamočiary nápad s priamočiarym výpočtom, ktorý vedie k výsledku o 120 rádov väčšiemu ako pozorovaná hodnota kozmologickej konštanty. To je fakt vedľa – ak by sme sa snažili vypočítať hmotnosť elektrónu a ako výsledok by sme dostali hmotnosť Slnka, pomýlili by sme sa „iba“ o 60 rádov. Vákuové fluktuácie teda ani náhodou nemôžu byť tmavou energiou. Musíme hľadať ďalej. A k tomu ešte treba vysvetliť, prečo nemá kozmologická konštanta túto ohromne veľkú hodnotu.

## Kandidáti na tmavú energiu – možno je všetko inak

Jednou z možností, ako objasniť záhadu tmavej energie, je, že originálna Einsteinova kozmologická konštanta je nakoniec predsa jedným z parametrov nášho vesmíru a nemá iný hlbší pôvod. Toto vysvetlenie má však háčik v tom, že jej hodnota je veľmi malá. Keď si zoberieme tri základné fyzikálne konštanty – rýchlosť svetla, Planckovu konštantu a gravitačnú konštantu –,

vieme z nich určiť hodnotu kozmologickej konštanty, ktorá by k nim prirodzene prislúchala. Ide o podobný výpočet a rovnaký výsledok ako v predchádzajúcom odseku. Nameraná hodnota kozmologickej konštanty je pritom v porovnaní s týmto výsledkom ukrutne maličká. Taká malá hodnota si pýta vysvetlenie. Žiadne momentálne nemáme.

Ďalšou možnosťou je urobiť z kozmologickej konštanty dynamický objekt. Veľmi zvláštnu hmotu rovnakých vlastností, ktorej hustota by sa však mohla v priestore a v čase meniť. Zvykne sa označovať ako kvintesencia, piaty element, ako sa niekedy nazýval ešte aristotelovský éter. Vedci sa snažia sformulovať pre ňu zákony a zakomponovať ju do našej predstavy vesmíru a časticovej fyziky. Zatiaľ bez väčšieho úspechu predpovedať nejaké nové zaujímavé správanie.

Rovnako ako v prípade tmavej hmoty aj pre tmavú energiu je alternatívou zmenené správanie gravitácie na škálach porovnateľných s veľkosťou vesmíru. Takých teórií bolo k dispozícii veľmi veľa, ale veľká časť z nich dostala studenú sprchu pozorovaním gravitačných vĺn z roku 2017. Predpovedal ich už Albert Einstein v začiatkoch všeobecnej teórie relativity a prvýkrát boli pozorované roku 2015. Tak sa astronómom otvoril ďalší kanál, ktorým môžu sledovať oblohu a získavať o nej nové informácie nezávisle od pozorovaní elektromagnetických vĺn. Roku 2017 sa pozorovaním kilonovy, ďalšej zo spektra rôznych dynamických udalostí na oblohe, ukázalo, že sa gravitačné vlny šíria prakticky rýchlosťou svetla, presne podľa predpovede všeobecnej teórie relativity. V jej modifikáciách sa táto rýchlosť často výrazne zníži, a tak sa vedci museli vrátiť späť na úplný začiatok a modifikácie prehodnotiť.

Niektorí bádatelia sa snažia nájsť slabé miesto hypotézy tmavej energie v samotných meraniach zrýchľovania vesmíru. Podľa iných by mohlo byť v skutočnosti dôsledkom nehomogénneho rozdelenia hmoty v priestore. Všetky štandardné kozmologické modely predpokladajú, že na veľkých škálach je hmota vo vesmíre rozdelená približne rovnomerne. Na malých škálach to však nie je pravda a niektorí vedci sa pokúšajú ukázať, že práve dôsledkom toho sa zdá, ako keby sa rozpínanie vesmíru zrýchľovalo. Všetky takéto snahy boli doteraz bezpečne vyvrátené a zrýchľovanie rozpínania sa vesmíru je zatiaľ neohrozeným poznatkom. Ale vidíme, vo vede ozaj nie je nič „sväté“. Aj tie najdôležitejšie a najznámejšie objavy, ktoré úplne zmenili náš pohľad na svet a za ktoré bola udelená Nobelova cena, sú neustále podrobované skúškam.

## Svetlá budúcnosť tmavej fyziky

Keď sa opäť budeme pozerať na oblohu, skúsme chvíľu nehľadať medzi hviezdami medvedice alebo levy. Skúsme sa zamyslieť nad tým, že vidíme iba 5 % toho, čo sa tam hore nachádza, 27 % tvorí hmota, ktorú sme doteraz nijakým priamym spôsobom nezachytili, a 68 % tvorí niečo, čo ani poriadne nevieme, čo je.

Takýto je stav problematiky začiatkom roka 2021. Pravidelne sa objavujú správy o možných objavoch, viac či menej bombastické potvrdenia alebo vyvrátenia zaužívaných hypotéz a mnoho vedcov a vedkýň na celom svete trávi tisícky hodín rozmýšľaním, ako tieto otázky vyriešiť. A nech sa ukáže rozuzlenie dvoch tmavých problémov akékoľvek, takmer určite sa popri ňom naučíme niečo úplne zásadné o fungovaní nášho sveta. Fascinujúce je to, že problémy fyziky na obrovských škálach galaxií a celého vesmíru pravdepodobne úzko súvisia s fyzikou na úplne opačnom konci spektra. Problém tmavej hmoty možno vysvetlia experimenty s najmenšími časticami. V ďalšej kapitole uvidíme, že problém kozmologickej konštanty pravdepodobne súvisí s posledným veľkým zjednotením vo fyzike, na ktoré ešte len čakáme.

# Teória strún

V poslednej kapitole sa budeme venovať teórii (super)strún. Máloktorej fyzikálnej teórii, navyše takej komplikovanej, sa podarilo dostať do povedomia širokej verejnosti tak výrazne ako teórii strún. Preto si povedzme, čo to tie struny vlastne sú a čím sú zaujímavé, na aké otázky odpovedajú, na aké otázky zatiaľ márne odpoveď hľadajú a prečo sa nájdu ľudia, ktorí sú vehementne presvedčení o nesprávnosti tejto teórie.

Teória strún je súčasťou väčšieho príbehu objavovania teórie kvantovej gravitácie. Aj keď sú struny hlavným a najviac rozpracovaným kandidátom na takú teóriu, celé hľadanie má pred sebou ešte dlhú cestu. Takže okrem predstavenia teórie strún si v tejto kapitole ukážeme, že pri hľadaní kvantovej gravitácie sme v uličkách, z ktorých sú niektoré takmer určite slepé, niektorých koniec nevidíme, niektoré sa zdali sľubné, ale ukázali sa nepriechodné. Je to taký labyrint bez mapy a my si lámeme hlavu nad tým ako ďalej.

## Trochu histórie

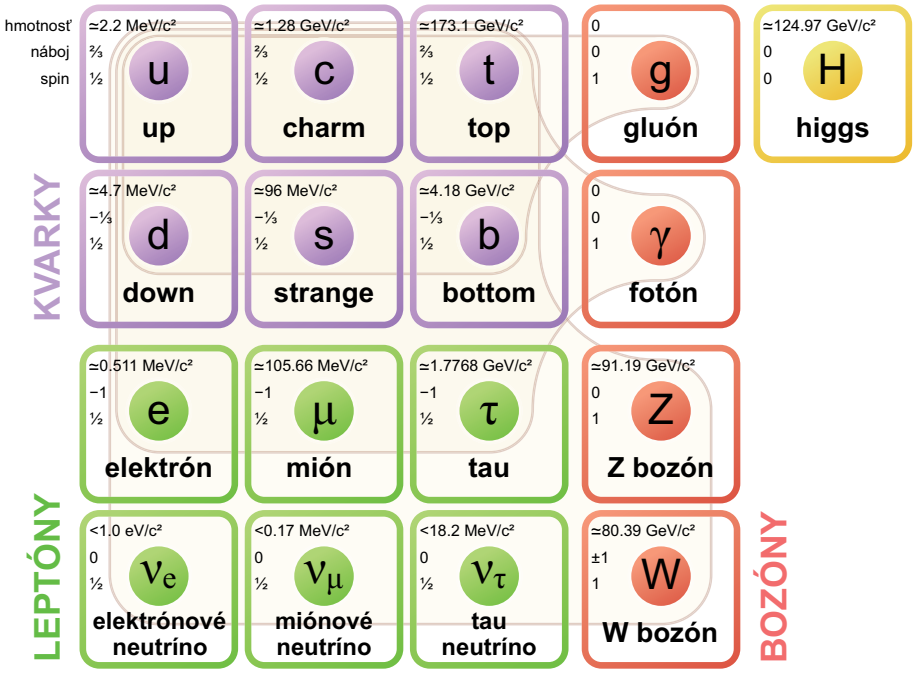
Nepriamo sa príbeh strún začal už pred druhou svetovou vojnou. Kvantová mechanika, tak ako ju v dvadsiatych rokoch dvadsiateho storočia úspešne formulovali vedci, napríklad Heisenberg a Schrödinger, nebola kompatibilná s Einsteinovou teóriou relativity. Čas a priestor v nej hrali významne inú úlohu.

Na stole bola teda otázka, ako tento problém v kvantovej mechanike vyriešiť a ako získať teóriu, ktorá by okrem kvantovej povahy častíc brala do úvahy aj relativistickú povahu sveta, v ktorom sa pohybujú. Prvým dôležitým krokom bola práca anglického fyzika Paula Diraca (1902 – 1984), ktorému sa roku 1928 podarilo nájsť zovšeobecnenie Schrödingerovej rovnice pre elektrón, spĺňajúce podmienky relativity. Riešením rovnice Dirac ukázal, že pre konzistentnosť musí teória obsahovať častice veľmi podobné elektrónom, ale s kladným nábojom. Nová častica dostala meno pozitrón, a keď sa roku 1932 potvrdila jej existencia experimentálne, znamenalo to veľký úspech vznikajúcej teórie. Druhým kľúčovým krokom bolo naučiť sa opisovať systémy s meniacim sa počtom častíc. Vlnové funkcie v klasickej mechanike opisujú častice, ale nedokážu opísať ich vznik alebo zánik, pretože vlnová funkcia nevie vzniknúť alebo zaniknúť. Procesy ako rádioaktivita alebo vyžarovanie fotónov z atómov, ktoré sa snažíme opísať, nevyhnutne potrebujú nové častice.

Tento technický problém vyriešilo začiatkom tridsiatych rokov v postupnom úsilí niekoľko vedcov a na svete bol spôsob, ako elektromagnetické javy opisovať kvantovo. Výsledok začal sláviť aj prvé úspechy, ale ešte pred rokom 1939 americký teoretický fyzik Robert Oppenheimer (1904 – 1967) ukázal, že nový prístup má aj veľké problémy. Pri výpočtoch v istom momente začnú vychádzať úplne nezmyselné výsledky. Napríklad pre mnohé pravdepodobnosti, ktoré by mali byť medzi 0 a 1, dostaneme nekonečný výsledok. Podobne sa nekonečné a úplne nezmyselné výsledky začnú objavovať naprieč celou teóriou a jej schopnosť opísať akúkoľvek realitu sa úplne vytratí. Pred druhou svetovou vojnou sa preto medzi fyzikmi rozšírila obava, že špeciálnu relativitu a kvantovú mechaniku nebude možné nijako skĺbiť a fyziku bude potrebné budovať od začiatku. Keď sa vedci po vojne vrátili k svojej bežnej práci, ukázalo sa, že situácia nie je až taká beznádejná. Už roku 1948 nemecko-americký fyzik Hans Bethe (1906 – 2005) ukázal, ako tieto nekonečná „zamiesť pod koberec“. Ako sa dajú zakomponovať do teórie a nastaviť jej parametre vhodne tak, aby dávala konečné výsledky v zhode s experimentom. Ďalší fyzici tento proces postupne upravili, sformalizovali a dali mu fyzikálnu interpretáciu; pomenovali ho renormalizácia. Tým vznikla kvantová elektrodynamika, prvá konzistentná relativistická kvantová teória, ktorá dokázala s úžasnou presnosťou opísať vlastnosti častíc známe na konci štyridsiatych rokov dvadsiateho storočia.

Rýchly rozvoj technológií po druhej svetovej vojne znamenal obrovský experimentálny pokrok aj v časticovej fyzike. Vedci postupne objavovali nové a nové elementárne častice. Na konci päťdesiatych rokov ich bolo niekoľko desiatok, neskôr až stovky. Mali mnohé prekvapivé vlastnosti, ktoré kvantová elektrodynamika opísať nedokázala. Zistilo sa, že elementárne častice na seba pôsobia okrem elektromagnetickej interakcie ešte ďalšími dvomi spôsobmi. Tieto sily dostali (veľmi neoriginálne) názvy – silná interakcia a slabá interakcia. Silná interakcia napríklad drží v jadre pohromade kladne nabité protóny atómov napriek ich odpudzovaniu, slabá interakcia zasa spôsobuje niektoré rádioaktívne procesy. Hľadanie teoretického opisu všetkých týchto efektov by si zaslúžilo celú jednu kapitolu. Nie je však prekvapujúce, že ho takisto neobišli zablúdenia do slepých uličiek. Blúdenie sa skončilo okolo roku 1975 a vypísať čo i len laureátov Nobelovej ceny za tieto objavy by zabralo celý odsek.

Výsledná teória s neoriginálnym názvom štandardný model elementárnych častíc opisuje základné stavebné kúsky hmoty a interakcie medzi nimi. V nej častice ako protón alebo neutrón nie sú elementárne, ale skladajú sa




Častice štandardného modelu. Z kvarkov sa skladajú ťažšie častice ako protóny a neutróny. Kvarky a leptóny sú fermiónové častice a spoločne tvoria hmotu vo vesmíre. Bozóny sú častice, ktoré prenášajú interakcie: gluóny silnú, W a Z bozóny slabú, fotóny elektromagnetickú. Higgsov bozón je zodpovedný za spontánne narušenie symetrie, za proces, v ktorom elementárne častice získavajú hmotnosť.

z menších častíc, ktorým hovoríme kvarky. Niektoré častice, napríklad elektrón, si udržali status elementárnych častíc. V štandardnom modeli sa častice delia na dva druhy – na častice hmoty, ktorým hovoríme fermióny, a na častice prenášajúce interakcie s názvom bozóny.

Štandardný model opisuje dynamiku týchto častíc a v jednej teórii zahŕňa elektromagnetickú, silnú a slabú interakciu. Pre svoju vnútornú konzistenciu predpovedal vlastnosti niekoľkých nových elementárnych aj zložených častíc, ktoré boli neskôr aj úspešne objavené. Posledný kúsok tejto skladačky bol experimentálne objavený v čase, keď o jej správnosti už ozaj nikto nepochyboval, roku 2012 na Veľkom hadrónovom urýchľovači v CERN-e. Je to dobre známy Higgsov bozón.

# Zjednotenia vo fyzike

Ako sme sa už viackrát dozvedeli v tejto knižke, zjednotenia sú v teoretickej fyzike veľmi veľká a dôležitá vec. Stretli sme sa s Newtonovým zjednotením nebeskej a pozemskej mechaniky, Maxwellovým zjednotením optiky a elektromagnetizmu, Einsteinovým zjednotením mechaniky a elektromagnetizmu. Spomenuli sme aj spojenie špeciálnej relativity, kvantovej mechaniky a troch interakcií medzi elementárnymi časticami v štandardnom modeli elementárnych častíc.

Zjednotenia so sebou prinášajú veľa zaujímavých momentov. Prvým, aj keď asi nie tým najpraktickejším, je bezpochyby intelektuálne potešenie. Vidieť, ako sa dva zdanlivo nesúvisiace princípy stanú súčasťou jednej teórie, patrí k najkrajším momentom štúdia (nielen) teoretickej fyziky. Druhým sú nové poznatky. Okrem toho, že máme možnosť pozerať sa na staré veci novou optikou, v zjednocujúcej teórii sa objavujú vlastnosti, o ktorých sme doteraz netušili. Tie potom fungujú ako test novej teórie a ich úspešné pozorovanie toto zjednotenie definitívne cementuje. Z Newtonovho zjednotenia napríklad plynie, že Keplerove zákony musia platiť aj pre Jupiterove mesiace. Einstein v špeciálnej teórii relativity objavil ekvivalenciu medzi hmotnosťou a energiou. Maxwellova teória elektromagnetizmu rozšírila pojem svetla ďaleko za viditeľnú oblasť spektra. Štandardný model predpovedal nové elementárne častice.

Tretím zaujímavým momentom je pomalé, ale jednoznačné pochodovanie fyzikálnych teórií smerom k úplnému zjednoteniu. To, čo sa niekoľko stoviek rokov zdalo ako veľké množstvo rôznorodých princípov a pravidiel, našlo v druhej polovici dvadsiateho storočia miesto pod dvomi strechami. Jednou je spomínaný štandardný model, teória elementárnych častíc, z ktorých sa skladajú všetky komplikovanejšie objekty vo vesmíre, a interakcií medzi týmito časticami. Druhou je všeobecná teória relativity, teória gravitácie ako zakrivenia časopriestoru v prítomnosti hmotných objektov.

Počet fyzikálnych teórií, ktoré potrebujeme na vysvetlenie fungovania sveta na úrovni jeho úplne základných stavebných blokov, sa postupne zoštíhľoval a pred rokom 2000 sa zastavil na čísle dva. To by v tom ozaj bol čert, aby to tak zostalo a nedal sa nájsť jeden ucelený a kompletný obraz sveta, v ktorom by boli opísané všetky základné zložky hmoty, časopriestor a interakcie medzi nimi.

# Problémy kvantovej gravitácie

Skôr ako budeme hľadať jednotnú teóriu všetkého, potrebujeme vyriešiť ešte jeden problém. Naša teória gravitácie, všeobecná teória relativity, je klasickou teóriou. Bez neurčitosti, superpozície a ďalších dôležitých známok kvantovej mechaniky. Štandardný model je plne kvantovou teóriou so všetkým, čo k tomu patrí. Einsteinove rovnice nutne hmotu s priestorom miešajú, a ak je kvantovo opísané jedno, musí tak byť opísané aj to druhé. Neostáva nám preto nič iné ako hľadať aj kvantový opis gravitácie, ale to sa oveľa jednoduchšie povie, ako spraví.

Samozrejme, prvé, čo ľudia vyskúšali, bolo, že použili na všeobecnú teóriu relativity postup renormalizácie, ktorý fungoval v prípade elektrodynamiky a štandardného modelu. Neúspešne. Renormalizácia je na všeobecnú relativitu prikrátka.

Kvantová mechanika v spojení s teóriou relativity výrazne mení našu predstavu prázdneho priestoru – vákua. Na veľkých vzdialenostiach sa môže zdať prázdny, ale keď sa pozrieme dostatočne blízko, uvidíme bublajúcu polievku vznikajúcich častíc a antičastíc, takzvané kvantové fluktuácie. Písali sme o nich v predchádzajúcej kapitole v súvislosti s tmavou energiou. Pre nás sa veľa nemení, ale pre drobné elementárne častice je to veľmi živé prostredie. A tak to, čo sa nám z diaľky zdá ako elektrón, v skutočnosti nie je úplne tá elementárna častica, ktorú by sme čakali. Je to elementárny elektrón obalený mrakom virtuálnych častíc v kvantových fluktuáciách, má trochu iný náboj ako elementárny elektrón a jeho elektrické pole vyzerá trochu inak. Zarátanie rozdielu medzi elementárnym elektrónom a elektrónom, ktorý vidíme v oblaku kvantových fluktuácií, je základnou myšlienkou procesu renormalizácie.

A tu nastáva problém. Ak dovolíme fluktuovať aj gravitácii, zavedieme gravitóny ako kvantá týchto fluktuácií a celá procedúra prestane dávať zmysel. Elektrón sa v oblaku virtuálnych gravitónov nedá dobre opísať, a čím bližšie sa na elektrón pozrieme, čím presnejšie chceme tento oblak študovať, tým je situácia horšia. Niečo musí fungovať inak, no nevieme presne čo.

Ďalším problémom všeobecnej relativity, ktorý by mala vyriešiť kvantová gravitácia, sú singularity, teda situácie, v ktorých Einsteinove rovnice predpovedajú nekonečné zakrivenia časopriestoru. V akejkoľvek teórii podobné patologické výsledky naznačujú, že ju treba prehodnotiť, že sme ju dohnali

za hranicu jej možností a v týchto situáciách už prestáva platiť. Všeobecná relativita je bezradná v strede čiernej diery a na úplnom začiatku histórie vesmíru. Musíme ju rozšíriť, ale zatiaľ nevieme ako.

Skôr než sa pustíme ďalej, treba ešte zdôrazniť, že hľadanie kvantovej teórie gravitácie nie je nevyhnutne hľadaním vysnenej teórie všetkého. V existenciu zjednocujúcej teórie síce veríme, ale v princípe existovať nemusí. Aj bez nej by svet s dvomi teóriami – osobitne pre gravitáciu a osobitne pre ostatné interakcie – dával zmysel. Niektorí vedci a vedkyne sú dokonca presvedčení, že niečo také vôbec nie je možné, že každá fyzikálna teória je nekompletná. Bez kvantovej teórie gravitačného pôsobenia sa jednoducho nezaobídeme. Jednotná teória všetkého by bola pekný bonus.

## Teória strún zachraňuje...

A tak sa konečne dostávame aj k samotným strunám. Struny sa dajú ako riešenie našich starostí motivovať niekoľkými rôznymi spôsobmi. Historicky to bolo inak, ale s odstupom času je najprirodzenejší spôsob, aký tu predstavíme.

V momente, keď sme začali spájať kvantovú mechaniku a relativitu, začali sme mať na rôznych frontoch veľké problémy s nekonečnými výsledkami. Keď sa to rozmení na drobné, nekonečná pochádzajú z toho, že naše častice majú bodový charakter, v priestore nezaberajú žiadne miesto a sú nekonečne malé. V spojení kvantovej mechaniky so špeciálnou relativitou sa tento problém dá ešte vyriešiť, ale pre všeobecnú relativitu s gravitáciou už toto riešenie nefunguje.

Najjednoduchším riešením sa teda zdá byť upustenie od bodových vlastností elementárnych stavebných kúskov a ich charakter posunúť vyššie. Častice skúsiť namiesto bodov bez priestorovej veľkosti opisovať objektmi s jedným rozmerom – úsečkami alebo akýmisi šnúrkami. Ak by bola dĺžka týchto šnúrok veľmi malá, z diaľky by boli v skutku na nerozoznanie od bodových častíc. Z pohľadu vesmíru, ľudí alebo protónov by sa nič nezmenilo, všetci sme príliš veľkí. Ale na naozaj malých škálach, ktoré spôsobujú problémy pri kvantovaní všeobecnej relativity, by už veci fungovali inak.

Šnúrky môžu byť dvojaké: voľné, s dvomi koncami, a uzavreté, ktoré majú konce zviazané dohromady a tvoria slučku. Ak budú tieto šnúrky napäté, budú okrem pohybu priestorom vedieť robiť aj čosi vzrušujúcejšie. Budú sa vedieť rôzne zaujímavo vlniť – podobne ako gitarová struna. Presne tieto vlnenia nám z jedného druhu napätých šnúrok, teda strún, dovolia vybudovať

Vľavo voľná struna, ktorej konce sa môžu nezávisle pohybovať v priestore. Vpravo uzavretá struna, ktorá nemá konce a pohybuje sa v priestore ako slučka.

komplikovaný svet elementárnych častíc. V angličtine sa tieto objekty nazývajú *strings*, čo môžu byť aj struny, aj šnúrky. Rozdiel medzi nimi a dôležitosť napätia sa tak trochu vytráca.

Ak sa vám zdá, že táto myšlienka znie príliš dobre a príliš jednoducho na to, aby s ňou nebol spojený nejaký vážny problém, máte, samozrejme, pravdu. Ale pekne po poriadku.

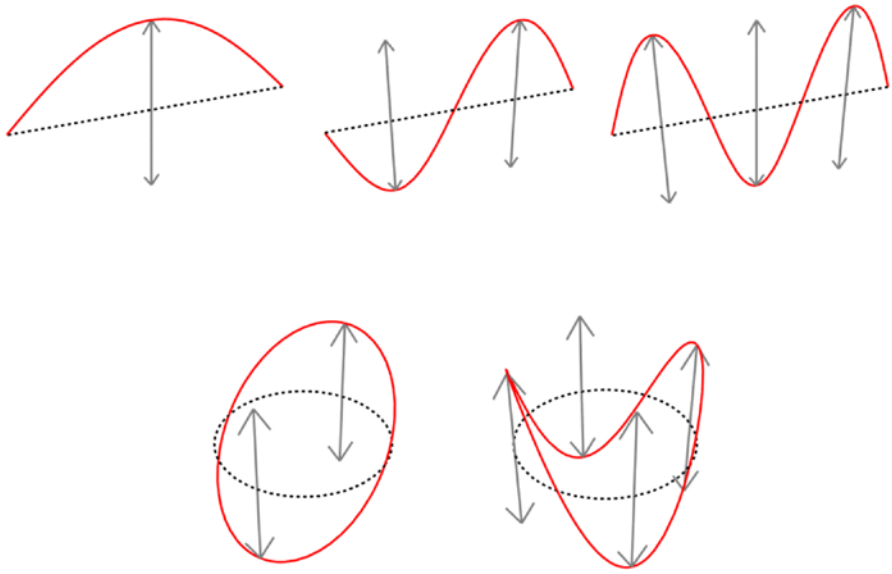
Zobrať mechaniku strún a napísať jej kvantovú verziu nie je nič ťažké, ak za „nič ťažké“ považujeme veci, ktoré zvládne študent magisterského študijného programu teoretická fyzika. Interpretovať tieto výsledky je už trochu ťažšie, ale stále v silách tých istých študentov. Dá sa ukázať, že druhé najjednoduchšie kmitanie uzavretej struny má presne také vlastnosti, aké by sme čakali od gravitónu, kvantovej častice gravitačného poľa. Aby to nebolo málo, z kmitaní otvorených strún sa dajú poskladať fotóny a ďalšie častice, ktoré v štandardnom modeli prenášajú interakcie medzi časticami hmoty.

Začali sme s rozšírením bodových častíc na struny a vypadol nám z toho kvantový opis častíc prenášajúcich všetky známe interakcie – okrem tých zo štandardného modelu aj gravitáciu. Ešte stále sa nám to nezdá príliš dobré na to, aby za tým nebol nejaký „zádrheľ“?

## ... ale

Určite sme si v tom všimli niekoľko nedostatkov. V prvom rade – zatiaľ ani chýru, ani slychu po fermiónoch, ako sú elektróny alebo kvarky. Možno nám napadne, že by sa to dalo vyriešiť pridaním ďalších „motúzov“, žiaľ, to nefunguje. Z nich budeme rovnakým postupom vždy dostávať iba bozóny, no žiadne častice hmoty.

Druhý problém je oveľa vážnejší. Tkvie v slove „druhé“ najjednoduchšie kmitanie. Čo sa deje s tými ostatnými? Komplikovanejšie kmitania sa prejavia ako častice, ktoré majú veľmi veľkú hmotnosť. Na ich vytvorenie je



Niekoľko základných módov kmitania otvorených a uzavretých strún.

potrebná veľká energia, a preto ich v žiadnom experimente nevidíme. Ale čo s najjednoduchším kmitaním? Takéto struny sa správajú ako častice s komplexnou hmotnosťou, ktorým hovoríme tachyóny a ktoré sa podľa špeciálnej teórie relativity pohybujú rýchlejšie ako svetlo. To, ako si isto pamätáme, nie je možné. Narušuje to mnohé predpoklady o fungovaní nášho sveta, napríklad kauzalitu. Niekde sme spravili chybu a musíme začať odznovu.

Aby toho nebolo málo, je tu ešte tretí problém. Pri opise vlnenia musíme na strune zvoliť súradnice, ale táto voľba je iba náš technický nástroj a výsledky, ktoré v konečnom dôsledku dostaneme, od nej nesmú závisieť. Podobne ako výsledky v klasickej mechanike nezávisia od toho, ako sme natočili svoje súradnice. V klasickej teórii strún s tým problémy nie sú, ale kvantová teória je divná a v nej to k problémom vedie. Výsledky závisia od toho, ako na strune zvolíme súradnice. A taká teória je tiež zrelá na zahodenie. Iba..., že by sme žili nie v troch, ale v 25-priestorových rozmeroch! Výpočet ukáže, že v takomto a iba v takomto počte rozmerov sa v teórii strún nepríjemné kvantové korekcie odčítajú. Výsledky potom nezávisia od toho, ako presne sa rozhodneme struny opisovať.

Tak si to zhrňme. Máme zatiaľ teóriu strún, ktorá zďaleka neopisuje všetky druhy častíc, na svoju konzistentnosť potrebuje 26-rozmerný časopriestor a obsahuje v sebe častice, ktoré ju úplne destabilizujú a berú jej akýkoľvek fyzikálny význam. Priznajme si, dúfali sme v čosi viac. Alebo menej.

## Struny musia byť super

Zhruba takýto bol stav teórie strún na začiatku sedemdesiatych rokov. Vtedy sa ňou vedci pokúšali opísať silné interakcie, ale keď sa v tomto smere ukázal byť úspešný štandardný model elementárnych častíc, na teóriu strún sa z veľkej časti zabudlo.

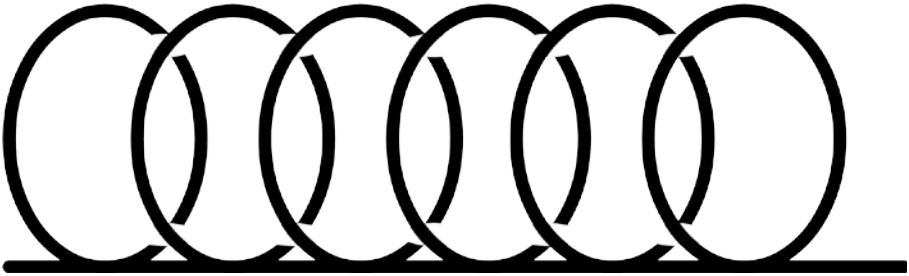
Svoju renesanciu však zažila v osemdesiatych rokoch. Vtedy prišli ľudia na to, že použitím asi desať rokov starej idey sa dá do teórie strún vniesť nový život. Idea sa volá supersymetria a vnáša do teórie nové častice, ale veľmi špecifickým spôsobom. Ku každej častici fermiónového typu pridá bozón a naopak. Tak vznikne sada častíc, ktorá je symetrická vzhľadom na zámenu bozónov a fermiónov, niečo ako svet symetrický vzhľadom na zámenu pravej a ľavej ruky.

Supersymetrická verzia teórie strún úplne vyriešila dva z troch spomínaných problémov. Z fermiónových kmitov otvorených strún sa dajú vyskladať častice hmoty, ktoré v pôvodnej formulácii chýbali. Navyše základné fermiónové kmitania uzavretých strún vyrušia príspevky problematických základných bozónových kmitov, s ktorými ich spája supersymetria. Tak sa vytratia tachyóny, ktoré v pôvodnej formulácii úplne kazili celú teóriu.

Ostáva otázka, čo s rozmermi navyše? Nestane sa náhodou aj s divnými kvantovými korekciami to isté čo s tachyónmi? Že sa bozónové a fermiónové príspevky vyrušia a výsledky budú nezávislé od našich výberov? Žiaľ, odpoveď je nie. V supersymetrickej teórii je situácia predsa len trochu iná a výpočet ukáže, že superstruny potrebujú deväť priestorových rozmerov. To je o čosi lepšie ako pôvodných dvadsaťpäť, ale stále o šesť viac, ako potrebujeme. Otázka stále zostáva: Čo s nimi?

## Kompaktifikácia a strunová krajina

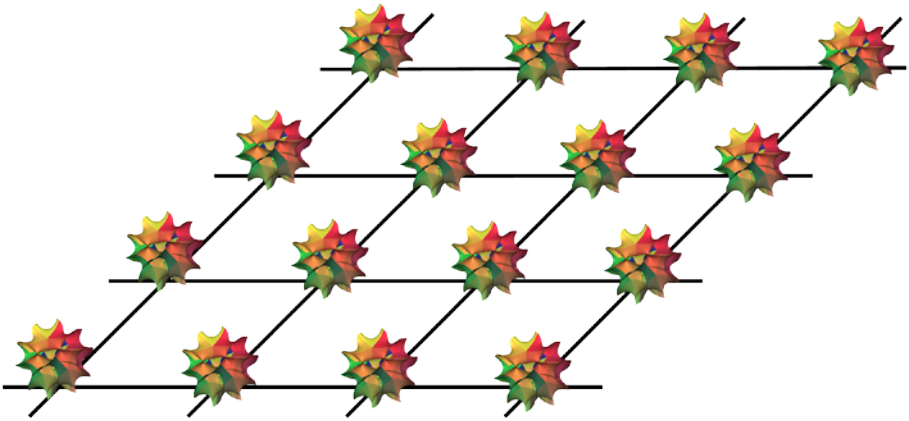
Tu prichádza na scénu nápad, ktorý ešte začiatkom dvadsiateho storočia postupne rozpracovali dvaja teoretickí fyzici. Najskôr Nemec Theodor Kaluza (1885 – 1954) a neskôr Švéd Oskar Klein (1894 – 1977). Ich motiváciou bolo hľadanie jednotnej teórie gravitácie a elektromagnetizmu: v prípade prvého



Pohľad na drôt ako na priamku s kružnicou v každom bode. Medzi kružnicami v dvoch blízkych bodoch sa dá presúvať bez návratu na priamku.

klasickej a v prípade druhého kvantovej. Ani jeden nakoniec úplne úspešný nebol, ale ich myšlienka našla po vyše šesťdesiatich rokoch uplatnenie v modernej fyzike.

Superstruny vyžadujú existenciu šiestich „nadbytočných“ rozmerov, ale nemajú požiadavky na to, ako tieto rozmery majú vyzerať. A tak môžu byť veľmi, veľmi maličké a zvinuté do seba. Ako príklad si zoberme rovný drôt. Ak sa naň pozeráme z veľkej diaľky, jeho rozmer „dookola“ si vôbec nevšimneme. Zdá sa nám jednorozmerný a rozdiel medzi priamkou a drôtom uvidíme, až keď sa pozrieme bližšie. Z matematického hľadiska sa na povrch drôtu dá pozerať ako na rovnú priamku, ktorá má v každom svojom bode ešte navyše kružnicu.



Komplikovanejšia analógia situácie na predchádzajúcom obrázku, keď sa v každom bode priestoru nachádza komplikovanejší šesťrozmerný priestor.

Zo vzdialenosti oveľa väčšej, ako je polomer tejto kružnice, drôt vyzerá ako priamka. V teórii strún je to riešené podobne. Len namiesto jednorozmerného drôtu máme štvorrozmerný časopriestor a namiesto jednoduchej kružnice potrebujeme nejaký, zatiaľ nešpecifikovaný, šesťrozmerný objekt.

Týmto by sme vysvetlili, prečo extra dimenzie nevidíme. Sú príliš malé a so vzdialenosťami, ktoré vieme momentálne experimentálne skúmať, neviditeľné. Elementárne (super)struny sú pritom dosť malé na to, aby tieto rozmery videli a mohli sa v nich pohybovať. Tu prichádza druhý kľúčový moment aplikácie starej myšlienky Kaluzu a Kleina. My z veľkej diaľky tento pohyb strún nevidíme, ale niektoré jeho aspekty sa premietajú do ich vlastností, ktoré viditeľné aj z diaľky sú. Podobne nevidíme presný spôsob kmitania uzavretej struny, ale jej pohyb sa nám prejavuje ako hmotnosť danej častice. Keď zoberieme napríklad konfiguráciu strún, ktorá sa na veľkých vzdialenostiach prejavuje ako elektrón, ich pohyb v šiestich neviditeľných rozmeroch určuje jeho náboj a iné vlastnosti.

Tak by sme mohli z teórie strún dostať vlastnosti častíc ako predpoveď, nie ako vstupný parameter. Štandardný model obsahuje deväťnásť vlastností častíc, ktoré nijako nepredpovedá, ale musia sa najskôr odmerať. Až keď zistíme tieto parametre, dokáže teória odpovedať na všetky ďalšie otázky. V týchto parametroch nie je nijaká rozumná štruktúra, niektoré sú malé, niektoré zas veľmi veľké. Aj sám časticový obsah teórie je trochu záhadný. Teória by fungovala aj s menším alebo väčším počtom častíc, prípadne s iným druhom interakcie. Prečo je to práve takto? Od skutočne fundamentálnej teórie sveta by sme očakávali odpovede aj na takéto otázky.

A tu prichádza teória superstrún. Má iba jeden voľný parameter – napätie struny. Zdá sa, že všetko ostatné by mohlo byť presne určené spôsobom, ktorým je do seba zabalených šesť malých rozmerov a ktorým pri vzďaľovaní z desaťrozmernej fyziky strún dostaneme štvorrozmernú fyziku častíc štandardného modelu.

Ale opäť to je príliš dobré na to, aby to bolo také jednoduché. Chyták je v tom, že zatiaľ nevieme, ako presne zostúpiť z desiatich do štyroch rozmerov. Možností je veľmi, veľmi veľa. Niekedy sa zvykne uvádzať číslo $10^{500}$, ale presne to nevie nikto. A nie je to ani také dôležité, veď ide o absurdne veľké číslo, že pár (desiatok) rádov „hore-dole“ veľký rozdiel nespraví. A tento počet možností vyjadruje, koľko rôznych fyzík v štyroch rozmeroch vieme dostať zo základnej fyziky strún v desiatich rozmeroch.

Toto obrovské množstvo možností sa zvykne označovať ako strunová krajina (*string landscape*). V jej zvlnenom profile predstavuje každé minimum možný vesmír a v rôznych častiach univerza sa môže štvorrozmerná fyzika nachádzať v inom minime. V skutočnosti môžeme byť súčasťou obrovského multiverza a náš vesmír s jeho hodnotami fundamentálnych konštánt a parametrov časticovej fyziky je jedným výberom z tých $10^{500}$ možností. V iných, veľmi vzdialených a nám nedostupných častiach multiverza môžu byť realizované iné možnosti.

## Nedostatky teórie strún

A dostali sme sa na miesto, z ktorého môžeme začať teóriu strún plnohodnotne a často veľmi oprávnene kritizovať. Spomínané bohatstvo rôznych štvorrozmerných výsledkov desaťrozmernej fyziky sa teórii strún vytýka najčastejšie. Bez nejakej preferencie v mamuťom množstve možností sa prediktívna sila teórie znižuje prakticky na nulu.

Podľa niektorých oponentov teória strún „nie je ani len nesprávna“ – nedá sa vraj vyvrátiť. Akékoľvek staré alebo nové experimenty dokáže vysvetliť výberom jednej zo spomínaných možností. A je to. Od fundamentálnej teórie sveta by sme chceli vysvetlenie, prečo sú fyzikálne konštanty a časticový obsah vesmíru práve také, aké sú. Niekedy je to iba estetická otázka. Ale niekedy, napríklad pri hodnote kozmologickej konštanty, o ktorej sme písali v predchádzajúcej kapitole, je to doslova otázka života a smrti. Ak by bola kozmologická konštanta väčšia, vesmír by sa rozpínal príliš rýchlo a z kvantových fluktuácií by nemali čas vzniknúť galaxie a hviezdy. Teória strún nehovorí, prečo žijeme vo vesmíre s takouto hodnotou. Podľa nej (aj) taká možnosť existuje. A teda prečo nie? Strunoví teoretici tvrdia, že pri dostatočne vysokých energiách by sa dalo do štruktúry priestoru vidieť dostatočne na to, aby sme vedeli niektoré predpovede vyvrátiť. Niektorým oponentom tento argument stačí, niektorým nie.

Ďalším problémom je, že sa doteraz nepodarilo nájsť žiadne nové častice, ktoré supersymetria v teórii strún predpovedá. Áno, tieto častice môžu byť stále príliš ťažké na to, aby sme ich v dnešných experimentoch videli. Po tridsiatich rokoch čakania však oponentom pomaly dochádza trpezlivosť a na mieste je otázka, či neustále posúvanie hmotností nových častíc s každým novým experimentom nepoukazuje na nejaký problém.

Teória strún sa tiež z mnohých stránok zdá byť zbierkou iných a starších postupov. Či už ide o samotné struny, kompaktifikáciu alebo o niektoré novšie myšlienky, o ktorých sme nepísali. Niektorí menej vľúdni oponenti charakterizujú teóriu strún ako zbierku zlyhaných nápadov, ktoré našli jednu strechu a pod ňou sa ukrývajú, kým ich niekto definitívne nepošle na smetisko vedeckých dejín.

Ako odpoveď na tieto výhrady strunoví teoretici a teoretičky často poukazujú na to, že ich teória je stále vo výstavbe. Mnohé z jej dávnejších problémov sa podarilo vyriešiť a aj na tých aktuálnych sa intenzívne pracuje. Oponenti zvyknú reagovať, že táto situácia je tu už dlho a fyzici získavajú menej uspokojivých riešení ako nových problémov. Áno, niektoré aspekty strún sú zaujímavé a dokonca aj pekné, ale skutočnou otázkou je, či sme sa nenechali krásou zahnať do slepej uličky.

Ako sme písali, teória strún sa považuje za hlavného kandidáta na teóriu kvantovej gravitácie. To podľa oponentov často zohľadňujú aj grantové agentúry, a tak ide na práce v teórii strún neproporčne veľa zdrojov a iné prístupy k tomuto problému zostávajú ochudobnené. Možno sa tým v slepej uličke iba dlhšie motáme. Ako vidno, debata a polemika o strunách nie je iba o vede.

## Silné stránky teórie strún

Diskusia o význame a pravdivosti teórie strún je zaujímavá a zvláštna aj tým, že oponenti a oponentky niečo považujú za najväčší problém a, naopak, veľa zástancov a zástankýň to považuje za veľké pozitívum. Mať presne takú hodnotu kozmologickej konštanty, ktorú pozorujeme a ktorá dovoľuje vznik štruktúram, ako sú galaxie a planetárne sústavy okolo hviezd, sa zdá byť veľmi neprirodzené. A existencia princípu, ktorý by ju určoval na presne túto hodnotu, je veľmi nepravdepodobná. Naopak, ak existuje multiverzum a v ňom obrovské množstvo možností, je prirodzené, že sme sa ocitli v tej časti, ktorá takéto niečo povoľuje.

Podobné úvahy sa označujú pojmom antropické. Ide o argumenty, pri ktorých vstúpi v nejakej forme existencia človeka ako inteligentného pozorovateľa nie ako dôsledok, ale ako podmienka. Multiverzum je myšlienka nezávislá od teórie strún a je schopná antropickým spôsobom vysvetliť pozorované hodnoty niektorých fyzikálnych konštánt. Mnohí to považujú za jediný prirodzený spôsob a to, že teória strún multiverzum predpovedá, za jej veľké pozitívum.

Ďalším z argumentov, ktorý používajú obhajcovia aj oponenti teórie, je matematická štruktúra teórie strún. Objavilo sa v nej veľmi veľa zaujímavých a inovatívnych matematických konceptov, ktoré do nej nijako neboli vložené. Obhajcovia tvrdia, že to musí znamenať, že na tej teórii niečo je. Oponenti zas tvrdia, že sme sa matematikou nechali zahnať ďaleko do uličky, ktorá je čo do fyzikálnej stránky slepá.

Ako sme videli, teória strún nie je iba kvantovou teóriou gravitácie. Dokáže priamočiaro opísať aj všetky ďalšie interakcie, a tak je teória strún úplne zadarmo aj kandidátom na zjednocujúcu teóriu všetkého. A to mnohé jej alternatívy nie sú. Na druhej strane mať jednu a práve jednu fyziku s čo najmenším a podľa možnosti s úplne žiadnym množstvom voľných parametrov je síce pekné, ale je to stále iba naše rozhodnutie. Svet možno funguje inak a možno neexistuje princíp, ktorý by fyzikálne zákony určoval jedinečne. Možno by sme mali zostať pri zemi a riešiť problémy postupne. A možno nie. Ku ktorej strane sa prikloníme, zostáva na každom z nás.

Momentálne nie je naším problémom zistiť, ktorá z možných teórií kvantovej gravitácie opisuje svet. Obrovským problémom je vôbec napísať nejakú konzistentnú, funkčnú teóriu, ktorá by náš svet aspoň mala šancu opisovať. Pozitívom teórie strún je, že ako-tak funguje. Teória strún má konzistentné formulácie. Ide síce o prípady o čosi jednoduchšie, ako je náš svet, ale predsa ich má. A tak je z možných prístupov ku kvantovej gravitácii skutočne najúspešnejšia a najďalej.

## Slová o strunách na záver

Na začiatku tretieho tisícročia sa fundamentálna veda ocitla vo veľmi zvláštnej situácii. Jedným z problémov je, že teoretické uchopenie sveta výrazne predbehlo naše experimentálne a technické možnosti. Higgsov bozón čakal na svoje objavenie desiatky rokov a škály, na ktorých vieme hľadať známky novej fyziky, sa posúvajú len veľmi pomaly. Druhým problémom je, že tento pomalý posun zatiaľ žiadnu novú fyziku neobjavil. Všetky nové experimenty s predpoveďami štandardného modelu a všeobecnej relativity súhlasia a nič nové, čo by naznačilo, ako to vyzerá ďalej, nemáme.

Teória strún nie je, samozrejme, ani zďaleka jediným kandidátom na kvantovú teóriu gravitácie a ani na vysnívanú teóriu všetkého. Ako sme videli, ešte je na nej veľmi veľa práce a je otázne, či sa podarí vyriešiť jej problémy. Má svoje neodškriepiteľné pozitíva, ale rovnako veľa tienistých stránok.

O ostatných prístupoch ku kvantovej gravitácii tu písať nebudeme. To neznamená, že nie sú dôležité a zaujímavé, ale do tejto knižky by sa nám už nezmestili. Povedzme o nich preto iba jednu vec, ktorá sa dotýka teórie strún. Možno jej najväčšou výhodou je, že v prístupe k fyzike a opisu sveta toho veľa nemení. Na svet sa stále pozerá rovnako ako kvantové teórie pred ňou. Zmenil sa obsah a s tým prišli zodpovedajúce komplikácie, no jazyk teórie zostal podobný. Ostatné prístupy ku kvantovej gravitácii viac alebo menej tento jazyk musia meniť. Ak sa teória strún ukáže ako odpoveď na otázky, ktoré hľadáme, učebnice fyziky sa budú musieť doplniť, ale nie úplne prepísať. Ak by sa nakoniec ukázalo, že teória strún svet neopisuje, veľa z dnešných predstáv o fundamentálnej fyzike bude treba od základu premyslieť.

Teória strún sa možno nakoniec ukáže byť nesprávnou, ale možno sa ukážu byť jej dôsledky dôležitou indíciou smerom k tej správnej teórii. Nech to dopadne akokoľvek, na konečnú odpoveď si ešte nejaký čas budeme musieť počkať. A možno zohrá kľúčovú úlohu v jej hľadaní niekto z vás čitateľov a čitateliek tejto knižky.

# Na záver

Čo dodať na záver? Hádam už len krátka rekapitulácia.

Porozumieť svetu okolo nás je jedna z najfantastickejších vecí, ktoré ľudia dokázali. A to nielen preto, že vďaka tomu máme autá, vakcíny a mobilné telefóny, ale aj pre ten úžasný pohľad na Mliečnu cestu s vedomím, čo všetko sa v nej skrýva. Cesty poznávania sú kľukaté. A aj keď sme sa na nich za tie tisícky rokov hľadania a odkrývania tajomstiev dostali už celkom ďaleko a vysoko, ešte zďaleka nie sme na ich konci. A to neplatí iba o teoretickej fyzike, o ktorej bola v tejto knižke reč. Armádu vedcov a vedkýň celého sveta čaká v labyrinte poznávania ešte veľa slepých uličiek a je otázkou, či vôbec má východ. Ak by ho aj nemal, blúdenie tiež prináša svoj úžitok – vo forme praktických výsledkov a radosti z poznávania.

Budem veľmi rád, ak táto kniha vzbudí vo vás záujem o históriu vedy. Myslím si, že na ceste, ktorú ľudia museli prejsť za dnešnými vedomosťami, sa skrýva veľa zaujímavého a dá sa veľa naučiť.

Veľa zaujímavého som si prečítal v staršej sérii kníh *Historické pramene súčasnej fyziky* od autorov Rudolfa Zajaca, Juraja Šebestu a Jána Pišúta. Žiaľ, dnes sa k nim už nedá ľahko dostať. Z mnohých ďalších populárnejšie ladených kníh sa mi veľmi páčila kniha *A short history of nearly everything* od Billa Brysona, ktorá vyšla aj v češtine: *Stručná historie téměř všeho*.

Ak vy objavíte dobrú knižku na tému histórie vedy a zvlášť fyziky, budem rád, ak mi dáte vedieť.

To je už ozaj všetko. Nech vám spoznávanie sveta okolo seba robí radosť.

*Juraj Tekel*

# Zdroje obrázkov a ilustrácií

Obrázky sú identifikované číslom strany a umiestnením na strane. Autorom všetkých obrázkov a ilustrácií v knihe, ktoré nie sú uvedené v tomto zozname, je autor publikácie Juraj Tekel.

***s. 6***

**Autor:** leonello
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/tall-glass-of-water-with-a-red-pencil-inside-gm179105552-25306769
**Licencia:** iStockphoto

***s. 8***

**Autor:** Elen11
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/view-of-moon-limb-with-earth-rising-on-the-horizon-footprints-as-an-evidence-of-gm1162816285-319096204
**Licencia:** iStockphoto

***s. 10***

**Autor:** Christian Ready / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Celestial_Sphere_-_Dec_Ecliptic.png
**Licencia:** CC BY-SA 4.0
**Odkaz na licenciu:** https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode

***s. 11***

**Autor:** Tom Ruen / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mars_motion_1995.png
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 14***

**Autor:** pixelparticle / úprava JT
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/night-sky-landscape-gm809971888-131045303
**Licencia:** iStockphoto

***s. 22***

**Autor:** Elen11
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/mercury-planet-solar-lens-flare-elements-of-this-image-furnished-by-nasa-gm1051617320-281168758
**Licencia:** iStockphoto

***s. 29***

**Autor:** Paween Arayangura
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/iss-solar-transit-gm1050834526-280971519
**Licencia:** iStockphoto

***s. 32***

**Autor:** AltoClassic
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/water-molecules-background-gm465027410-59438922
**Licencia:** iStockphoto

***s. 35***

**Autor:** qimono / jeffwqc / úprava JT
**Zdroj:** https://www.needpix.com/photo/602154/, https://www.istockphoto.com/photo/pyramid-of-oranges-in-store-front-display-gm148233244-7708424
**Licencia:** Public Domain, iStockphoto

***s. 36***

**Autor:** Ekaterina79
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/heap-of-lego-blocks-gm510326038-86205775
**Licencia:** iStockphoto

***s. 44***

**Autor:** J. B. Perrin, 1909 / kresba Mirai Warren / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PerrinPlot2.svg
**Licencia:** Public Domain

***s. 46***

**Autor:** Pornpak Khunatorn
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/led-light-power-saving-concept-asia-man-changing-compact-fluorescent-bulbs-with-new-gm1130699882-299127714
**Licencia:** iStockphoto

***s. 48***

**Autor:** leonello
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/tall-glass-of-water-with-a-red-pencil-inside-gm179105552-25306769
**Licencia:** iStockphoto

***s. 49 hore***

**Autor:** Warren Carpani / Wikimedia Commons / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20cm_Air_1.jpg
**Licencia:** Public Domain

***s. 49 dole vľavo***

**Autor:** Aleksandr Berdnikov / Wikimedia Commons / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_photograph_of_the_Arago_spot.png
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 49 dole vpravo***

**Autor:** Jan Pavelka / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorescence_in_calcite.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 52***

**Autor:** Ole Rømer, 1676 / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustration_from_1676_article_on_Ole_R%C3%B8mer%27s_measurement_of_the_speed_of_light.jpg
**Licencia:** Public Domain

***s. 54***

**Autor:** Epzcaw / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SodiumD_two_double_slits_2.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 58 hore***
**Autor:** ktsimage
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/crystal-prism-gm496616093-41447204
**Licencia:** iStockphoto

***s. 58 dole***
**Autor:** ivansmuk
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/infrared-image-showing-the-heat-emission-when-woman-used-smartphone-gm588997416-101155903
**Licencia:** iStockphoto

***s. 62***
**Autor:** vchal
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/particles-collision-in-hadron-collider-astrophysics-concept-3d-rendered-illustration-gm1151479376-312086876
**Licencia:** iStockphoto

***s. 65 hore***
**Autor:** Lucia Kralovičová

***s. 65 dole***
**Autor:** Merikanto / Adrignola / Jan Homann / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://en.wikipedia.org/wiki/File:Emission_spectrum-H.svg
**Licencia:** Public Domain, CC BY-SA 4.0

***s. 67 hore***
**Autor:** hepjam
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/neon-sign-background-saying-hello-sign-hanging-on-a-wall-and-lit-brightly-gm1150397497-311395235
**Licencia:** iStockphoto

***s. 67 dole***
**Autor:** Zátonyi Sándor / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1gneses_mez%C5%91ben(2).jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 78 hore***
**Autor:** Benjah-bmm27 / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AOs-3D-dots.png
**Licencia:** Public Domain

***s. 78 dole***
**Autor:** Halfdan, Indolences, Rainer Klute / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stylised_atom_with_three_Bohr_model_orbits_and_stylised_nucleus.svg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 80***
**Autor:** Aleksander Zhelonkin
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/vector/ayurvedic-elements-water-fire-air-earth-and-ether-icons-isolated-on-white-background-gm904348464-249403278
**Licencia:** iStockphoto

***s. 87***

**Autor:** Case Western Reserve University, 1887 / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson_morley_experiment_1887.jpg
**Licencia:** Public Domain

***s. 90***

**Autor:** Medvedkov
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/aerial-view-of-general-cargo-ship-gm841943882-137381799
**Licencia:** iStockphoto

***s. 92***

**Autor:** Lucien Chavan, 1905 / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein_patentoffice.jpg
**Licencia:** Public Domain

***s. 94***

**Autor:** dzika_mrowka
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/the-rosette-nebula-in-the-constellation-of-monoceros-hst-image-gm1135482189-302085874
**Licencia:** iStockphoto

***s. 96***

**Autor:** standret
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/starry-sky-gm492097398-76126867
**Licencia:** iStockphoto

***s. 97***

**Autor:** Arnaugir / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraunhofer_lines.svg
**Licencia:** Public Domain

***s. 102***

**Autor:** Vysotsky / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EinsteinLeiden4.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 105***

**Autor:** Wereon / Wikimedia Commons / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectrum.svg
**Licencia:** Public Domain

***s. 108***

**Autor:** mik38
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/background-of-galaxy-and-stars-gm1035676256-277258896
**Licencia:** iStockphoto

***s. 112***

**Autor:** Judy Schmidt / NASA & ESA / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_smiling_lens.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 113***

**Autor:** NASA / WMAP Science Team / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilc_9yr_moll4096.png
**Licencia:** Public Domain

***s. 115***

**Autor:** NASA / CXC / M. Weiss / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1e0657_scale.jpg
**Licencia:** Public Domain

***s. 117***

**Autor:** NASA / ESA / Wikimedia Commons
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SN1994D.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 122***

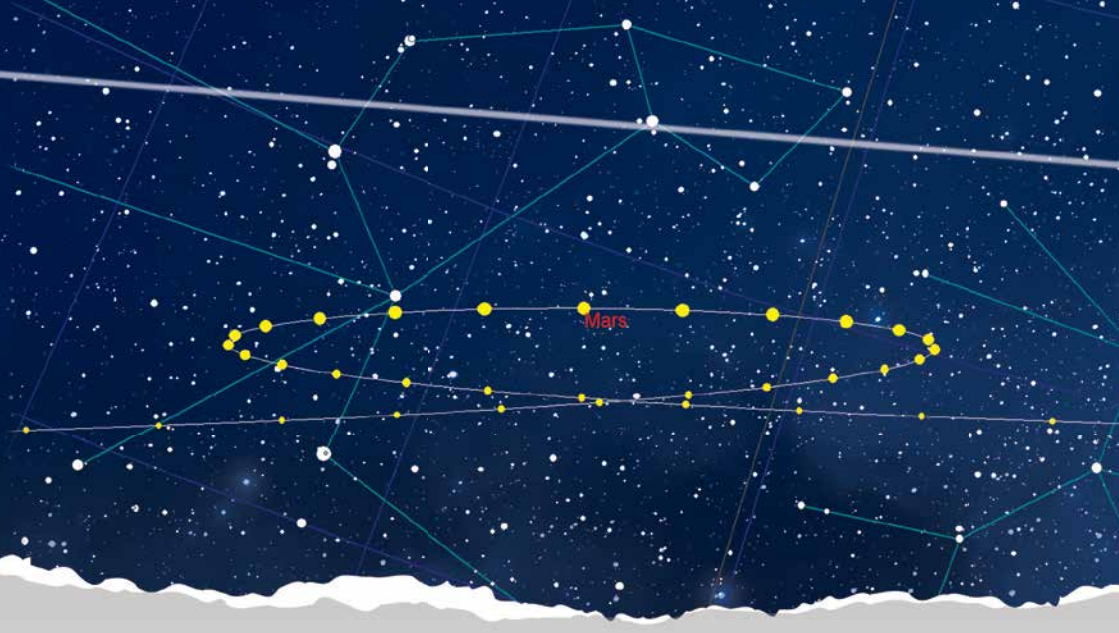
**Autor:** Bombaert
**Zdroj:** https://www.istockphoto.com/photo/hands-playing-wooden-violin-gm674505030-123616723
**Licencia:** iStockphoto

***s. 126***

**Autor:** MissMJ / Cush / Wikimedia Commons / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0

***s. 133 dole***

**Autor:** Andrew J. Hanson / úprava JT
**Zdroj:** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CalabiYau5.jpg
**Licencia:** CC BY-SA 4.0




V pochopení prírodných zákonov sa ľudstvo počas svojej histórie dostalo veľmi ďaleko. Často však bola cesta k porozumeniu ťažká a kľukatá. Priblížime si niekoľko príbehov z histórie fyziky. Uvidíme v nich, ako ľudia blúdia v slepých uličkách poznania, kým sa dopracujú k vytúženej pravde. Ako vlastne funguje mechanika? Čo spôsobuje precesiu Merkúra? Aké je zloženie hmoty? Čo je to svetlo? Z čoho sa skladajú atómy? Existuje éter? Mal Albert Einstein vždy iba geniálne nápady? A aby nevznikol dojem, že fyzika je uzavretý proces, pozrieme sa aj na dve otázky, nad ktorými si fyzici a fyzičky lámu hlavy aj dnes.

www.opii.gov.sk
www.opvai.sk

ISBN 978-80-8115-314-3

9 788081 153143