



Ivan Červeň

FYZIKA PO KAPITOLÁCH

Kapitola o histórii fyziky a o jednotkách
fyzikálnych veličín

Slovenská technická univerzita v Bratislave
2021

Táto kapitola nebola súčasťou prvého vydania súboru zošitkov
Fyzika po kapitolách

ISBN 123456789

Súbor učebných textov *Fyzika po kapitolách* pôvodne vyšiel v roku 2007, skladal sa z trinástich zošitkov formátu A5. K pôvodnému súboru sme pridali tento štrnásty zošitok, v ktorom sú informácie o historickom vývoji fyziky, a o jednotkách fyzikálnych veličín, najmä jednotkách sústavy SI.

História fyziky siaha hlboko do minulosti, často sa uvádza obdobie helénizmu, teda obdobie pred začiatkom nášho letopočtu, ale fyzika v dnešnom chápaní obsahu tohto slova sa začala rozvíjať až v sedemnástom storočí, najmä zásluhou Galileiho a Newtona. V tomto zošitku je síce spomenuté obdobie starého Grécka, ale viac sa zaoberá newtonovskou fyzikou, teda klasickou fyzikou. História modernej fyziky, najmä obdobiu po druhej svetovej vojne, sa v zošitku venuje menej pozornosti, čo súvisí s obsahom predchádzajúcich zošitkov. Ale aj so skutočnosťou, že základný kurz fyziky na technických univerzitách bol doposiaľ zameraný predovšetkým na klasickú fyziku. Tá tvorí základ štandardných technických disciplín, a takej sú venované doteraz vydané zošitky. Preto sa aj v zošitku o histórii fyziky venuje pozornosť vývoju v oblasti *mechaniky, náuky o teple, elektriny a magnetizmu, optiky, a trocha aj začiatkom modernej fyziky*, čomu je venovaný zošitok s číslom 13. Moderné trendy súvisiace s kvantovou mechanikou by si zaslúžili osobitný zošitok.

Druhá časť zošitka sa zaoberá fyzikálnymi jednotkami a ich sústavami, vo vývoji ktorých sa odzrkadľuje postupný vývoj fyzikálnych poznatkov. Najväčšia pozornosť je venovaná sústave SI, platnej v súčasnosti, a špeciálne jej nedávnej zmene z mája roku 2019. Uvedené sú aj informácie o sústave CGS, predchodkyni SI.

Zošitok obsahuje tabuľku nositeľov Nobelovej ceny za fyziku, ktorá dokresľuje vývoj fyziky v 20-tom storočí. Na konci je abecedný zoznam mien fyzikov, ktorí sú v zošitku spomenutí.

OBSAH	
Fyzika ako vedná disciplína	5
Začiatky fyziky	6
Fyzika v sedemnástom storočí	10
Osemnásť a devätnásť storočie	16
Mechanika	16
Optika	18
Náuky o teple	20
Elektrina a magnetizmus	23
Štatistická fyzika	26
Ďalšie objavy	27
Dvadsať storočie	29
Vývoj po 2. svetovej vojne	37
Jednotky fyzikálnych veličín	38
Medzinárodná sústava - SI	39
Sústava CGS	42
História definície metra	43
História definície sekundy	44
Nobelove ceny za fyziku	46
Kedy žili významní fyzici	55
Pramene	60
Abecedný zoznam osobností	61

Fyzika ako vedná disciplína

Súbor zošitkov *Fyzika po kapitolách* je o fyzike a tak by sa patrilo hneď na začiatku napísať, čo to fyzika vlastne je. Presnú a vyčerpávajúcu odpoveď na túto otázku však nie je jednoduché sformulovať, jednoduchšie je napísať, čím sa fyzika zaoberá a ako sa vyvíjala. Napriek tomu niekoľko formulácií uvedieme.

Vo veľkej slovenskej encyklopédii Beliana¹ existuje heslo fyzika, podľa ktorého:

fyzika je veda skúmajúca najjednoduchšie a najvšeobecnejšie zákonitosti prírodných javov, štruktúru a vlastnosti hmoty, ktorá môže mať podobu látky alebo poľa, ako aj interakcie medzi neživými objektmi, ich pohyb a premeny ich stavov.

V Slovníku školskej fyziky² je uvedené:

fyzika je prírodná veda, pričom predmetom jej skúmania sú dve formy hmoty – látka a pole; skúma hmotné objekty s najrozličnejšími štruktúrnymi a organizačnými úrovňami, ich vzájomné pôsobenie a ich doposiaľ známe najjednoduchšie a tým aj najvšeobecnejšie formy pohybu.

A Concise Dictionary of Physics³ o fyzike píše (uvádzame len začiatok dlhšieho textu):

je to štúdium javov, ktoré určujú štruktúru vesmíru z hľadiska hmoty a energie, z ktorých sa skladá. Nezaoberá sa chemickými zmenami, ale silami pôsobiacimi medzi objektmi a vzťahom medzi hmotou a energiou. . . .

Nemecká verzia Wikipédie:

fyzika je prírodná veda, ktorá skúma základné javy vyskytujúce sa v prírode, s cieľom vysvetliť ich vlastnosti a správanie prostredníctvom kvantitatívnych modelov a zákonitostí, zaoberajúc sa najmä hmotou a energiou a ich vzájomným pôsobením v priestore a čase.

Z citátov vidno, že definície nie sú celkom zhodné, ale to podstatné sa z nich dá vybrať.

Úplnejšiu predstavu o fyzike načrtujeme, keď uvedieme, na aké časti sa delí a z akých hľadísk. Podľa metódy práce sa delí na fyziku *teoretickú* a *experimentálnu*. Podľa predmetu skúmania sa delí na rad odborov, napr. mechaniku, akustiku, termodynamiku, štatistickú fyziku, elektrodynamiku, optiku, kvantovú fyziku, jadrovú fyziku, teóriu relativity, astrofyziku, či fyziku tuhých látok. Využívanie fyziky v iných odboroch viedlo k vzniku *aplikovanej fyziky* napr. geofyziky, biofyziky, či chemickej fyziky.

1 *Encyklopaedia Beliana*, 4. zväzok, Encyklopedický ústav SAV, Bratislava 2005

2 *Slovník školské fyziky*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1988

3 *A Concise Dictionary of Physics*, Oxford university Press, Oxford, New York 1992

Fyzika sa delí aj na *klasickú* a *modernú*. Do klasickej sa zaraďujú poznatky získané do konca 19. storočia, a to z mechaniky, elektrodynamiky, termodynamiky či optiky. Niekedy sa za zavŕšenie tejto etapy považuje vznik špeciálnej teórie relativity. Do modernej fyziky sa zahŕňajú poznatky vychádzajúce z kvantovej teórie, a teórie relativity.

Zriedkavejšie sa stretneme s delením podľa veľkosti objektov skúmania, teda na *makrofyziku* (neprihliada na štruktúru hmoty, patrí tam prakticky celá klasická fyzika) a *mikrofyziku*, zaoberajúcu sa atómami, a elementárnymi časticami.

Začiatky fyziky

Údaje o začiatkoch fyziky možno vyhľadať na internete, Wikipedia v rôznych jazykoch poskytuje bohaté informácie, k dispozícii sú aj videá. Z knižných publikácií je v tomto ohľade klasickým dielom kniha Maxa Laueho⁴, ktorá opisuje udalosti do roku 1940. K dispozícii sú však viaceré súčasné tituly, najmä v angličtine, o čom sa dá rýchlo presvedčiť pomocou vyhľadávačov. Existujú knihy aj v češtine, jednu napísal Ivan Štoll druhú v štyroch zväzkoch Ivo Kraus. Pokiaľ ide o pôvodnú slovenskú literatúru, história fyziky je podrobne a zaujímavo spracovaná v skriptách *Dejiny fyziky* a v knihe *Historické pramene súčasnej fyziky*⁵. Vhodné je však nazrieť aj do kníh *Priekopníci modernej fyziky*⁶, alebo *Fyzika v experimentoch*⁷. V uvedených knihách nájdete mnoho podrobností o osobnostiach, ale aj o pozadí experimentov, ktoré významne ovplyvnili vývoj fyziky. Podrobný zoznam udalostí o vývoji fyziky je zachytený vo štvrtom zväzku veľkej slovenskej encyklopédie *Beliana*. Stránky ktoré ste práve začali čítať sú však stručnejšie a venujú sa najmä tým udalostiam a osobnostiam, ktoré súvisia s fyzikou prednášanou v rámci základného kurzu na technických univerzitách. Ak si chcete zalistovať aj v starších knihách, významných z hľadiska historického vývoja fyziky, treba si na internete zvoliť adresu *archive.org* a zadať meno autora, alebo názov knihy. Dobré poslúži aj projekt Gutenberg: *gutenberg.org*.

Tento text obsahuje údaje prevzaté z uvedených prameňov, je to teda kompilát, napísaný bez nároku na udelenie titul Mgr autorovi. Z uvedených prameňov sa dozvedáme, že termín fyzika sa nachádza už v Aristotelovom encyklopedickom diele, kde však nemal súčasný význam, ale predstavoval všeobecnú prírodu. Zakladateľ klasickej fyziky Isaac Newton (1642 – 1727) pre svoju najvýznamnejšiu prácu zvolil

4 Laue M.: *Geschichte der Physik* Univ.-Verl., 1946, český preklad *Dejiny fyziky*, Orbis Praha 1959

5 Zajac R., Chrapan J.: *Dejiny fyziky*, Univerzita Komenského, 1983

Zajac R., Šebesta J.: *Historické pramene súčasnej fyziky*, ALFA, Bratislava 1990

6 Kvasnica J.: *Priekopníci modernej fyziky*, Smena, Bratislava 1987

7 Hajko V. a kol.: *Fyzika v experimentoch*, VEDA, Bratislava 1988

názov *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Matematické princípy prírodnej filozofie - prvé vydanie 1687). Až do 17. storočia sa pod názvom *Philosophia Naturalis* rozumeli vedy (náuky) o mechanike, Zemi, fyzike, aj astronómii, či dokonca fyziológii. Voľne by sme tento názov mohli preložiť ako *náuka o prírode*. Tradícia používať termín *Philosophia Naturalis* namiesto termínu *fyzika* v Spojenom kráľovstve pretrvala až do 20. storočia. Napríklad na univerzite v Glasgove existoval *Department of Natural Philosophy* až do roku 1986, keď bol premenovaný na *Department of Physics*. Naproti tomu vo Francúzsku sa už v 18. storočí termín *fyzika* používal v súčasnom význame, napríklad v roku 1788 ho nájdeme v názve ročenky *Histoire de L'Accadémie Royale des Sciences Avec les Mémoires de Mathématique et de Physique pour la même Année*. A Johannes Kepler, Newtonov predchodca, ho použil už v roku 1609 v nadpise svojej knihy *Astronomia Nova seu physica coelestis* (Nová astronómia, alebo fyzika nebies).

Nie však pomenovanie, ale obsah tejto vednej disciplíny si budeme všimáť v ďalšom texte - kedy sa ľudia začali zaujímať o objekty, ktoré v súčasnosti považujeme za predmet fyziky a ako ich opisovali.

V najstarších písomných dokumentoch z obdobia Sumerov, Babylončanov a Egyptanov sa možno dočítať o astronomických pozorovaniach, pre ktoré bolo potrebné zvládnuť meranie času a veľkosti uhlov. Z praktického hľadiska sa vyvinulo aj meranie dĺžok, veľkosti plôch a objemov. Už vtedy sa využívali naklonené roviny, páky a iné mechanizmy, ale o rozvinutí aspoň elementárnej fyziky sa nedá hovoriť. S vedou v našom ponímaní sa dá stretnúť azda až v období antiky, asi od 6. storočia pred našim letopočtom (pnl), pestovanou v gréckych mestách. Z hľadiska fyziky však išlo v podstate o špekulatívnu vedu, keďže hypotézy sa neoverovali experimentom. Hoci z tohto obdobia sú známe mená Thales (pokusy s trením jantáru), Pythagoras, či Demokritos (zloženie látok z atómov), tak z hľadiska fyziky sa za vrchol gréckeho teoretického snaženia považuje dielo Platónovho žiaka a učiteľa Alexandra Veľkého - **Aristotela** zo Stageiry (384 – 322 pnl). Nestotožnil sa so všetkými názormi svojich predchodcov a za zdroj vedomostí o prírode začal považovať analýzu reálnej skúsenosti.

Súčasťou rozsiahleho Aristotelovho diela sú aj spisy o prírode, z ktorých sa fyziky týkajú texty *Physica*⁸ (8 kníh) a *De caelo* (4 knihy). Mechanický pohyb chápal ako zmenu polohy telesa v priestore a čase, a venoval časť textu aj opisu rýchlosti takéhoto pohybu. Zvuk chápal ako šírenie sa zhustení a zriedení vzduchu, ozvenu ako odraz zvuku od prekážky. Opísal aj lom svetla, pravda kvalitatívne. Na druhej strane však akceptoval geocentrizmus, tvrdil, že na udržanie rovnomerného pohybu je potrebná stála sila (voz sa pohybuje len ak ho kôň ťahá), alebo že ťažšie teleso padá k zemi rýchlejšie než ľahké. Jeho dielom bolo ovplyvnené celé prednewtonovské obdobie, a k náprave nesprávnych názorov došlo až v 17. storočí, zásluhou najmä

8 Český preklad: *Aristoteles: Fyzika*, Rezek, Praha 1996

dvoch významných vedcov - Galileiho a Newtona. Trvalo však ešte storočie, pokým sa Galileiho, Huygensove a Newtonove myšlienky presadili v našich krajinách. V takomto duchu sa napríklad štúdium na Filozofickej fakulte v Prahe začalo reformovať až v roku 1753, na čom mala zásluhu aj Mária Terézia.

Významnou vedeckou osobnosťou najstaršieho obdobia fyziky bol aj **Archimedes** (287 – 212 pnl). Patril do tzv. alexandrijskej školy⁹, do obdobia, v ktorom sa pri riešení fyzikálnych problémov začali uplatňovať matematické metódy. Definoval niektoré významné pojmy, napríklad ťažisko či moment sily. Opísal princípy činnosti jednoduchých strojov – páky, kladky, naklonenej roviny aj ozubeného kolesa. Známa je Archimedova skrutka na čerpanie vody. Z jeho početných spisov sú z hľadiska fyziky významné dva – *O rovnováhe rovinných útvarov* a spis *O plávajúcich telesách*. V prvom z nich sa nachádza odvodenie vzťahu o rovnováhe na páke, pričom sa traduje jeho výrok: *Daj mi pevný bod a pohnem Zemou*. Archimedovo meno nesie zákon o nadľahčovaní telies vo vode. Archimedes napísal aj dielo *Katoptrika* o odraze a lome svetla, ktoré sa však nezachovalo.

V alexandrijskom období sa venovala pozornosť aj štúdiu šírenia svetla, v podstate išlo o začiatok geometrickej optiky. Poznali už zákon priamočiareho šírenia svetla a matematik Euklides opísal zobrazovanie predmetov v rovinných a sférických zrkadlách.

Obrazne môžeme napísať, že prapredchodcom Aurela Stodolu, teoretika a konštruktéra parných a plynových turbín, bol **Heron** Alexandrijský (10 – 70 nl). Skonstruoval zariadenie využívajúce reaktívnu silu pary unikajúcej z banky (Heronova banka¹⁰). Venoval sa aj optike, v diele *Katoptrika* kvalitatívne sformuloval princíp najkratšej optickej dráhy pri odraze svetla od rovinných a sférických zrkadiel.

Vo vývoji fyziky potom nastalo pomerne dlhé hluché obdobie. Zánik západnej Rímskej ríše koncom 5. storočia spôsobil stagnáciu kultúrneho rozvoja Európy. Fyzikálne poznatky staroveku začali prenikať do Európy až v 13. a 14. storočí, a to okľukou cez arabskú vedu, keď sa do latinčiny začali prekladať práce antických vedcov, predtým preložené do arabčiny. Pre toto obdobie boli typické scholastické diskusie o prekladoch Aristotelových diel, pričom jeho učenie bolo považované za nenapadnuteľné, čo obmedzovalo vývoj vedy.

9 Mesto Alexandria založil Alexander Veľký v roku 331 pnl, pôsobila v ňom vedecká inštitúcia Museion s významnou knižnicou, ktorá žiaľ vyhorela. Archimedes bol odchovancom Museionu, ale pôsobil v Syrakúzach na Sicílii.

10 Reaktívnu silu vystrekujúcej vody využil v roku 1750 bratislavský rodák Andrej Segner (Segnerovo koleso)

K najstaršiemu vývoju fyziky treba ešte pridať pár poznámok o Indii, Číne a o islamských krajinách.

V Indii sa v rámci filozofie už okolo r. 200 pnl. objavili úvahy o atómovej štruktúre hmoty, založené však na logike, nie na osobnej skúsenosti či experimente. Z konca 5. storočia sú známe aj názory o rotácii Zeme.

Začiatky fyziky v Číne sa dajú položiť do obdobia medzi 5. až 2. storočím pnl. Výsledky úvah vtedajších vedcov sa nachádzajú v rôznych filozofických dielach, najmä v dielach tzv. Moistov (4. stor. pnl). Ide napríklad o formuláciu zákona zotrvačnosti, podľa ktorej „prerušenie pohybu nastáva za účinku sily pôsobiacej proti pohybu; ak takej niet, pohyb sa nezastaví“. Nachádzajú sa tam aj náznaky o akcii a reakcii, o páke aj o teplotnej rozťažnosti telies. Je známe, že v 11. storočí začali v Číne používať kompas s magnetickou ihlou.

Viac údajov je z islamských krajín. V období medzi 7. a 15. storočím boli do arabčiny preložené mnohé klasické diela pochádzajúce z Indie, Asýrie, Perzie aj z Grécka, vrátane Aristotelových prác. Významnou osobnosťou tohto obdobia bol Ibn al-Haytham (lat. **Alhazen**, 965–1040), v niektorých prameňoch považovaný za prvého moderného vedca, lebo kládol dôraz na experimentálne údaje. Napísal viacero vedeckých kníh na rôzne témy, ale jeho najvýznamnejšie práce sú obsiahnuté v siedmich knihách o optike, ktoré napísal okolo roku 1000. Tieto práce boli neskôr preložené do latinčiny, v Európe uverejnené až v roku 1572 pod názvom *Opticae thesaurus* (Poklad optiky). Videnie chápal ako proces, pri ktorom svetlo do očí prichádza, a nie naopak, že by bolo výsledkom „ohmatávania“ okolia čímsi čo vychádza z očí. K tomuto názoru ho priviedli aj výsledky pokusov s tmavou komorou - prechodom svetla cez jej malý otvor, na zadnej stene ktorej vzniká prevrátený obraz. Uvedomil si, že rozhodujúcim je v tomto prípade priamočiare šírenie svetla. O svetle predpokladal, že sa skladá z drobných častíc vznikajúcich v Slnku alebo v plameňoch ohňa. Usúdil, že svetlo sa šíri veľkou ale konečnou rýchlosťou. Na základe pozorovania lomu na rozhraní vzduch - voda (ponorená palička sa javí ako zlomená) usúdil, že vo vode sa svetlo šíri inou rýchlosťou než vo vzduchu. Alhazenove práce výrazne ovplyvnili vedcov, ktorí v 17. storočí začali v Európe tvoriť novú fyziku.

Ďalším významným islamským vedcom bol Abu Ali ibn Sína (lat. **Avicenna** 980–1037), ktorý dosiahol zaujímavé výsledky v optike a mechanike. O pohybe projektilu tvrdil, že sa vo vákuu nezastaví, pokiaľ ho k tom čosi neprinúti. Táto myšlienka bola v rozpore s vtedy ešte v Európe akceptovaným Aristotelovým názorom a predbehla Newtonovu formuláciu o niekoľko storočí.

Fyzika v sedemnástom storočí

Až sedemnásťte storočie sa dá považovať za obdobie konštituovania fyziky ako modernej vedy, za začiatok tzv. klasickej fyziky. Hovorí sa aj o období vedeckej revolúcie. Vznikajú prvé akadémie vied a prvé vedecké časopisy. Ale už aj predtým existovalo isté úsilie o kvantitatívny opis pohybov a úloh statiky. V tejto súvislosti, napríklad v skriptách *Dejiny fyziky*, sa spomínajú **Leonardo da Vinci** (1452 – 1519) a flámsky matematik Simon **Stevin** (1548 – 1620). Za skutočný začiatok rozvoja fyziky sa však považuje obdobie od uverejnenia prvých Galileiho prác na rozhraní 16. a 17. storočia, po vydanie Newtonovho diela *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* v roku 1687. Vo vedeckom výskume sa vtedy začali využívať experimentálne metódy, čo sa často spája práve s Galileiho menom. Je zaujímavé uviesť, že práve v tom období pôsobil aj Jan Amos **Komenský** (1592 - 1670), významný predstaviteľ protischolastickej filozofie. Toto obdobie priamo nadväzuje na myšlienky Mikuláša **Kopernika** (1473 – 1543), tvorca heliocentrickej sústavy, ktorý žil zhruba o storočie skôr. Mnohí považujú vydanie jeho diela *De revolutionibus orbium coelestium*¹¹ za medzník medzi stredovekom a novovekom. Rukopis bol dokončený v roku 1530, ale dielo vyšlo až 1543, tesne pred Kopernikovou smrťou; slovenský preklad vyšiel v roku 1974.

Johannes **Kepler** (1571 – 1630) vydal svoje najvýznamnejšie diela začiatkom 17. storočia a ich obsahom sa zaradil medzi najvýznamnejších predstaviteľov nástupu novodobej fyziky. Vo vedeckej práci vychádzal zásadne z výsledkov pozorovaní. Bol zástancom heliocentrizmu a pôvodcom kinematického opisu pohybu planét slnecnej sústavy. Bol autorom troch zákonov o ich pohybe, ktoré poznáme pod jeho menom. Prvé dva z nich sformuloval počas pobytu v Prahe¹² (1600 - 1612), pričom mu významne pomohli merania uskutočnené Tichom **Brahem**¹³ (1546 – 1601), ku ktorému nastúpil v roku 1600 ako asistent. Stojí za zmienku, že pri výpočtoch používal logaritmické tabuľky. Dokázal, že dráha Marsu je eliptická, pričom jej ohnisko leží v Slnku a že plošná rýchlosť planéty je stála. Obidva tieto výsledky publikoval v roku 1609 v knihe *Astronomia Nova*. V tejto knihe vyslovil domnienku, že Slnko sa otáča okolo svojej osi. V roku 1612 odišiel do rakúskeho mesta Linz, kde dokázal platnosť prvých dvoch zákonov pre ostatné planéty. Tretí zákon o úmernosti druhých mocnín obežných dôb tretím mocninám dĺžok hlavných polosí sformuloval v roku 1618 a zverejnil v knihe *Harmonices Mundi* (1619). V roku 1611 vydal dielo *Dioptrice*, v ktorom geometricky (bez vzťahov) opísal odraz a lom svetla, prechod svetla šošovkami, aj úplný odraz svetla. Zaviedol pojmy ohnisko a optická os. Kepler

11 Kopernik M.: *Obehy nebeských sfér*, Vydavateľstvo SAV, Bratislava 1974

12 Viac je v knihe Z. Horský: *Kepler v Praze*, Mladá fronta, Praha 1980

13 Brahe bol autorom kompromisnej sústavy – planéty obiehajú okolo Slnka, Slnko s nimi okolo Zeme

skonštruoval vlastný hvezdársky ďalekohľad a vytvoril aj príslušnú teóriu. Na rozdiel od skôr zhotoveného Galileiho ďalekohľadu mal obidve šošovky spojné. Prvú prácu o planétach - *Mysterium Cosmographicum*¹⁴ vydal ešte na konci 16. storočia, počas pôsobenia v terajšom Grazi. Za mystérium zrejme považoval istú zhodu polomerov dráh šiestich vtedy známych planét s rozmermi piatich Platónových ideálnych telies, ktoré sa dajú uložiť medzi dráhy planét. Vtedajší spôsob uvažovania vhodne charakterizuje Keplerov výrok týkajúci sa rýchlostí planét a polomerov ich dráh: „alebo sú hybné duše planét o to slabšie, o čo vzdialenejšie sú od Slnka, alebo existuje iba jedna hybná duša v strede dráh, t.j. v Slnku, ktorá poháňa teleso o to silnejšie, o čo je k nej bližšie“.

Galileo **Galilei** (1564 – 1642), v podstate Keplerov súčasník, sa zapísal do histórie ako konštruktér hvezdárskeho ďalekohľadu, prácami z oblasti astronómie a najmä mechaniky. Mnohé jeho objavy boli prevratné. Vo vedeckej práci začal dôsledne používať kombináciu experimentu, merania a matematiky. Prvé dve významnejšie diela vydal ešte v poslednom desaťročí 16. storočia – *De motu* (O pohybe) a *Le Meccaniche* (Mechanika). V prvom kritizuje Aristotelovo delenie telies na ľahké a ťažké, a v tejto súvislosti zdôrazňuje význam hustoty telies (drevo vo vzduchu padá, lebo má väčšiu hustotu než vzduch, ale na vode pláva). V druhom spise poprel možnosť konštrukcie perpetua mobile, a tvrdil, že jednoduchými strojmi (pákou či skrutkou) nemôžeme získať mechanickú prácu navyše. Galilei sa zaoberal štúdiom rýchlosti a zrýchlenia telies, ich voľného pádu, dokázal, že tento pohyb nezávisí od veľkosti telesa. Venoval sa otázkam zotrvačnosti telies, vlastnostiam kyvadiel, aj hydrostatickým váham. Sformuloval mechanický princíp relativity - na základe pokusov dospel k názoru, že mechanické deje prebiehajú rovnako v sústave pohybujúcej sa rovnomerne priamočiari, ako v nehybnej sústave. Je autorom transformácie súradníc polohy bodov medzi takýmito sústavami – Galileiho transformácií. Osobitne významnou etapou jeho života bola vlastná konštrukcia ďalekohľadu a pozorovanie objektov na oblohe. V januári 1610 pozoroval Jupiterove mesiace, videl že Mliečna cesta sa skladá z množstva drobných hviezd. V tom istom roku objavil fázy Venuše a Marsu, pohoria na Mesiaci, aj slnečné škvrny a ich pohyb. Tieto pozorovania ho utvrdili v názore o správnosti Kopernikovej heliocentrickej sústavy, v čom sa zhodol s Keplerom, s ktorým si dopisoval. Jeden z jeho argumentov: *ak sa okolo Jupitera otáčajú štyri mesiace, nemôže mať Zem výlučné postavenie jediného telesa, okolo ktorého sa otáčajú všetky ostatné*. Svoje prvé astronomické objavy uverejnil v roku 1610 v spise *Sidereus nuntius*¹⁵. Na obranu Kopernikovho systému vyšlo v roku 1632 Galileiho slávne dielo *Dialóg o dvoch*

14 Existujú preklady do češtiny aj nemčiny. Do slovenčiny bola doposiaľ preložená len útlá Keplerova knižočka *Novoročný darček, čiže o snehovej vločke*. VEDA, Bratislava 2018

15 G. Galilei: *Sidereus nuntius, Hviezdny posol*, Martin Caban, Bratislava 2017

hlavných systémoch sveta, Ptolemaiovom a Kopernikovom¹⁶, čo mu spôsobilo vážne komplikácie so zástancami geocentrického systému. Na základe rozhodnutia inkvizičného súdu zvyšok života prežil v domácom väzení. Vtedy napísal knihu *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze*, v ktorej zhrnul výsledky svojej štyridsaťročnej práce. Aj táto kniha vyšla v slovenskom preklade¹⁷. Prvá časť knihy obsahuje náuku o pevnosti telies a zákony týkajúce sa páky. Druhá časť obsahuje výsledky bádania o priamočiarom rovnomerne zrýchlenom pohybe, šikmom vrhu, o kyvadlách, trení pri pohybe telies, o akustike, aj o stojatom vlnení. Galilei dokázal, že voľný pád a pohyb telesa po naklonenej rovine sú pohyby rovnomerne zrýchlené, že zrýchlenie na naklonenej rovine závisí len od uhla jej sklonu. Šikmý vrh opísal ako zložený z priamočiareho rovnomerného pohybu a voľného pádu. Dokázal, že doba kyvu pri malých výchylkách kyvadla nezávisí od amplitúdy. Objavil, že výška tónu súvisí s jeho frekvenciou, že počet kmitov struny závisí od jej dĺžky, napätia a hrúbky. Zistil a vysvetlil budenie tónov rezonanciou a poznal osobitné vlastnosti stojateho vlnenia.

René **Descartes** (1596 – 1650) je známy najmä ako filozof a matematik, ale zasiahol aj do fyziky. Jasnejšie sformuloval Galileiho princíp relativity a zotrvačný pohyb opísal ako priamočiary a rovnomerný. Rovnako ako Galilei, bol presvedčený o dôležitosti matematického opisu. Časový účinok sily nazval impulzom. V knihe *La Dioptrique* (1637) nezávisle od Sneliusa odvodil zákon lomu svetla. Jeho fyzikálny obraz sveta bol však značne vykonštruovaný, snažil sa opísať všetky typy prírodných javov pomocou mechanických pohybov. Založil teóriu fluíd, čím nadlho ovplyvnil názory o elektrine, magnetizme a teple.

V sedemnástom storočí pôsobil aj fyzik, matematik a astronóm Christian **Huygens** (1629 – 1695). Významne prispel k pokroku v optike a mechanike, a ako astronóm je známy štúdiom Saturnových prstencov, a objavom jeho mesiaca Titan. Na pozorovanie skonštruoval niekoľko teleskopov a špeciálny okulár (Huygensov). Najvýznamnejším Huygensovým vynálezom boli kyvadlové hodiny (1656), čo predstavovalo prevratnú zmenu v presnosti merania času (Galilei používal na meranie času váženie odkvapkanej vody, alebo vlastný pulz). V roku 1659 v spise *De vi centrifuga* odvodil vzorec pre dostredivú silu - uvedomil si, že nielen rýchlosť, ale aj smer pohybu telesa podlieha pôsobeniu sily. Už na začiatku spisu uviedol, že hocaké teleso zotrúva v rovnomernom a priamočiarom pohybe, ak mu v tom nič nebráni. V súvislosti s rotačnými pohybmi načrtol moment zotrvačnosti. Ako prvý správne opísal pružnú zrážku telies, a platnosť zachovania hybnosti a energie pri nej. Je pôvodcom vlnovej teórie svetla, ktorú opísal v diele *Traité de la Lumière* (1690). Jej súčasťou je predstava, že každý bod vlnoplochy je zdrojom nového vlnenia, známa

16 G. Galilei: *Dialóg o dvoch systémoch sveta*, Vydavateľstvo Veda, Bratislava 1962

17 G. Galilei: *Rozhovory a matematické dôkazy o dvoch nových vedách*, Verbum, Ružomberok 2013

ako *Huygensov princíp*. Pomocou tohto princípu vysvetlil priamočiare šírenie svetla, odraz, lom, ale aj dvojlom svetla v islandskom vápenci. Teória sa nestretla hneď s porozumením, Newtonova korpuskulárna teória bola spočiatku viac akceptovaná.

Rok po Galileiho smrti sa narodil Isaac **Newton** (1643 – 1727), považovaný za jednu z najvýznamnejších osobností nielen fyziky, ale vedy všeobecne. Metódu jeho práce, zmenu od scholastického k modernému uvažovaniu výstižne charakterizuje časť listu, ktorý napísal jednému zo svojich kritikov: *Ako najlepšia a najbezpečnejšia metóda filozofovania sa mi javí najprv usilovne skúmať vlastnosti vecí a tieto vlastnosti určiť experimentálne, a potom pomaly postupovať k hypotézam, ktoré ich vysvetľujú. Lebo hypotézy by mali byť využívané iba na vysvetľovanie vlastností vecí, nie však formulované vopred, aby tieto vlastnosti určovali.*

Svoju fyzikálnu kariéru Newton začal objavmi v optike. Skonstruoval zrkadlový ďalekohľad (1672), pomocou optického hranola rozložil svetlo na dúhové farby, zistil, že farba telies závisí od ich schopnosti odrážať zložky svetla. Bol autorom korpuskulárnej teórie svetla a zakladateľom teórie farieb. Newton spojil dovtedajšie poznatky o mechanike do jednotného systému, pričom výsledky dosiahnuté jeho predchodcami ocenil vyjadrením: „Postavil som sa na plecía obrov a dovidel som ďalej“. Zákomom o všeobecnej gravitácii extrapoloval pozemské zákony na celý vesmír. Bol spolutvorcom diferenciálneho a integrálneho počtu. Jeho najvýznamnejším dielom sú *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*¹⁸, kniha, ktorá prvýkrát vyšla v roku 1687 (na náklad astronóma Edmunda **Halleya** (1656 – 1742)). Dielo začína definíciami základných pojmov - hmotnosti, množstva pohybu (hybnosti), zotrvačných vlastností telies, sily, vrátane dostredivej sily. V tejto úvodnej časti sú sformulované aj tri pohybové zákony – *Axiomata Sive Leges Motus*. Uvedieme ich v preklade pôvodnej Newtonovej formulácie:

1. *každé teleso zotrvaáva v stave pokoja alebo rovnomerného priamočiareho pohybu, ak ho pôsobiace sily nenúti zmeniť svoj stav*
2. *zmena pohybu je úmerná pôsobiacej sile a deje sa v smere priamky, po ktorej sila pôsobí*
3. *akcia sa rovná reakcii, alebo vzájomné pôsobenia dvoch telies sú vždy rovnaké a majú opačný smer.*

Tri axiomy sú doplnené *zákomom o skladaní síl* (princípom supepozície). Po tomto úvode nasledujú tri knihy. Prvá s názvom *De Motu Korporum* (O pohybe telies) je o kinematike a dynamike pohybov, špeciálne pohybov planét. Druhá má rovnaký názov, ale je o pohybe v prostredí kladúcom pohybu odpor, a o hustote a tlaku tekutín. Tretia má názov *De Mundi Systemate* (Systém sveta) a zaoberá sa v nej najmä pohybmi Mesiaca, komét, planét a ich mesiacov.

18 Slovenský preklad: *Matematické princípy prírodnej filozofie*, Spektrum, Bratislava 2021. Kniha obsahuje aj podrobný Newtonov životopis. Často nazývaná aj ako „*Newtonove Princípiá*“.

Úspech Newtonovej mechaniky mal za následok rozšírenie názoru medzi fyzikmi, že všetky procesy vo vesmíre majú v konečnom dôsledku mechanický charakter.

Newton akceptoval Galileiho princíp relativity a predpokladal (považoval za samo-zrejmu) existenciu absolútneho priestoru a času, čo podoprel pokusom s roztočeným vedrom naplneným vodou. Sformuloval aj teóriu o zachovaní hybnosti. Osobitná pozornosť je v „*Princípoch*“ venovaná gravitácii, v ktorej tiež nadviazal na predchodcov, resp. na diskusie so súčasníkmi. Robert **Hooke** (1635 – 1703), autor zákona o pružnosti, v roku 1647, teda 40 rokov pred vydaním Newtonových „*Princípov*“, v súvislosti s gravitáciou napísal:

1. *všetky nebeské telesá majú príťažlivosť k svojim centráram, priťahujú nielen svoje časti, ale aj iné telesá,*
2. *každé teleso, ktoré nadobudlo jednoduchý priamočiary pohyb, pokračuje v ňom, pokiaľ sa neodchýli zo svojho pohybu pôsobením inej sily a nebude prinútené opisovať kružnicu, elipsu alebo inú zložitú čiaru*
3. *príťažlivé sily pôsobia tým viac, čím je teleso na ktoré pôsobia bližšie k centru príťažlivosti. Čo sa týka veľkosti tejto sily nemohol som ju ešte pokusom určiť.*

Takže Newton naozaj nadväzoval na svojich súčasníkov, resp. predchodcov. Na rozdiel od Keplera však predpokladal, že dostredivé zrýchlenie planét, a tým aj dostredivá sila, sa znižuje s druhou a nie s prvou mocninou vzdialenosti. Túto závislosť odvodil z tretieho Keplerovho zákona už Edmund Halley, ale ani spolu s Hookom nevedeli dokázať, že planéta sa v takomto centrálnom silovom poli pohybuje po kužeľosečke. To sa podarilo až Newtonovi¹⁹. Tým prekonal svojich súčasníkov aj oponentov, menovite Hooka a Halleya a preto je považovaný za pôvodcu gravitačného zákona. S Hookom mal rozpor aj v súvislosti s teóriou farieb, možno preto knihu o optike vydal až po jeho smrti v roku 1704.

Spor mal aj s Gottfriedom **Leibnizom** (1646 – 1716), o prvenstvo ohľadne diferen-ciálneho a integrálneho počtu. Leibniz uverejnil prácu na túto tému v roku 1684 v *Acta eruditorum* v článku nazvanom *Nova methodus pro maximis et minimis*. Newton svoje práce z roku 1666 údajne zanechal len v rukopise, ale kniha *The methods of fluxions* vyšla až po jeho smrti v roku 1736. Newton v „*Princípoch*“ (1687) používal túto metódu nie v takej forme ako ju poznáme dnes, ale v geometrickej podobe, založenej na kreslení obrázkov s názorným hľadaním limity podielu postupne sa znižujúcich veličín. Pre deriváciu používal termín *moment* aj *fluxia*, a značil ju bodkou nad písmenom. V dnešnej podobe – písmenom *d* – začal diferenciály označovať Leibniz v spomenutej práci²⁰.

K významným objavom 17. storočia treba pridať aj *Hookov zákon* (1687), vyjadrujúci súvislosť medzi predĺžením telesa a pôsobiacou silou.

19 Dôkaz nájdete napríklad v Ilkovičovej učebnici *Fyzika*, dostupnej na webovej stránke Ústavu jadrového a fyzikálneho inžinierstva STU.

20 Obidve práce -Leibnizova aj Newtonova - sú dostupné na internete.

V sedemnástom storočí sa začala rozvíjať aj **optika**. Už v roku 1611 Kepler sa v diele *Dioptrice* zaoberal odrazom aj lomom svetla na rozhraniach a prechodom svetla cez spojné a rozptylné šošovky. Opísal aj úplný odraz na rozhraniach kryštál – vzduch a sklo - vzduch. Ďalekohľady skonštruované Galileim, Keplerom a Newtonom boli už spomenuté, ako aj ďalšie Newtonove prínosy k optike. Zákon lomu svetla sa spája s menom Willebrod **Snellius** (1580 – 1626), lebo ho matematicky sformuloval, ale istým spôsobom prispel k nemu aj René Descartes. Fyzikálne ho zdôvodnil v roku 1662 Pierre de **Fermat** (1601 - 1665) pomocou princípu najkratšieho časového intervalu (*Fermatov princíp*). V roku 1665 Francesco **Grimaldi** (1618 – 1663) opísal interferenciu a difrakciu svetla, a poukázal na skutočnosť, že tieto javy sa nezhodujú s predstavou o priamočiariom šírení svetla. V roku 1668 bol objavený dvojlom a v roku 1678 polarizácia svetla. V roku 1676 Ole **Rømer** (1644 – 1710) určil rýchlosť svetla na základe nepravidelností časových intervalov medzi zákrytmi Jupiterových mesiacov. V tomto období vznikla aj Huygensova vlnová teória svetla, konkurentka Newtonovej korpuskulárnej teórie, pričom sa predpokladalo, že svetlo je vlnením osobitého pružného prostredia – éteru.

O vzduchu sa vtedy predpokladalo, že sa skladá z veľkého počtu nehybných pružných častíc; predstava o tepelnom pohybe molekúl bola akceptovaná až neskôr. Evangelista **Torricelli** (1608 – 1647) v roku 1643 uskutočnil pokus s nakláňaním trubice naplnenej ortuťou, čím fakticky vynašiel barometer. Preto sa tlak vzduchu, neskôr aj tlak krvi, začal merať v milimetroch ortuťového stĺpca²¹. V roku 1686 Edmund **Halley**, využívajúc Torricelliho tlakomer zistil, že tlak vzduchu sa s narastajúcou výškou znižuje, a usúdil, že klesá geometrickou postupnosťou. Na Torricelliho pokusy nadviazal aj Blaise **Pascal** (1623 - 1662), v roku 1647 zostrojil barometer a v roku 1663 zistil, že tlak v kvapalinách sa šíri všetkými smermi rovnako. V roku 1654 Otto von **Guerricke** (1602 – 1686) navzdory aristotelovským názorom dokázal, že vákuum predsa len existuje a predviedol „jeho silu“, v známom pokuse s „magdeburskými polguľami“. Zistil, že svetlo vákuom prechádza, ale zvuk nie. Robert **Boyle** (1627 – 1691) začal v tom období sledovať vlastnosti plynov v uzavretých nádobách, prvé výsledky publikoval v roku 1660.

Boli zostrojené reálne teplomery, už Galilei využil na meranie teploty rozpínavosť vzduchu, a jeho žiak rozťaznosť liehu (Celzius žil až v prvej polovici 18. storočia).

Začali sa skúmať elektrické a magnetické javy. William **Gilbert**²² (1544 - 1603) už v roku 1600 v knihe *De magnete* opísal veľa pokusov s magnetickými a elektrickými látkami, skonštruoval elektroskop, zaviedol názov elektrina. Dospel k názoru, že Zem je vlastne veľký magnet.

21 Jednotkou tlaku v SI je pascal, pomenovaná podľa Blaise Pascala

22 V sústave CGS *gilbert* bol jednotkou magnetomotorického napätia. Jeho kniha je dostupná na internete.

Osemnásťte a devätnásťte storočie

Infinitezimálny počet pochádza zo sedemnásteho storočia, ale tento matematický aparát sa vo fyzike začal používať v rozvinutej podobe až v osemnástom storočí. V tom storočí sa výrazne zvýšil aj význam experimentov. Popri tom sa však naďalej akceptovala teória fluíd a vzájomné pôsobenie telies na diaľku, pôsobenie nablízko je súčasťou teórie poľa, ktorá vznikla až v 19. storočí zásluhou Faradaya. Pomerne dobre už bola rozpracovaná mechanika, čo podnecovalo vysvetľovať aj iné javy pomocou mechaniky. Neviedli však k úspechu, tzv. mechanicizmus bol nakoniec prekonaný. Postupne vznikali nové súčasti fyziky - teória elektromagnetického poľa, či termodynamika, ale pritom sa nezapúšťalo ani na zdokonaľovanie mechaniky vyspelejšími matematickými metódami.

Vývoj v mechanike

Vo fyzikálnej komunite sa v tomto období doriešili spory o charakterizáciu účinku sily medzi Newtonovým názorom (preferoval časový účinok a tým impulz sily a hybnosť) a Leibnizovým názorom (preferoval dráhový účinok a teda prácu). V roku 1743 vyšla kniha *Pojednanie o dynamike*, ktorej autorom bol Jean le Rond **d'Alembert** (1717 – 1783). Sformuloval princíp (po ňom pomenovaný), ktorým sa pomocou Newtonových fiktívnych síl dajú dynamické problémy mechaniky previesť na statické. Bol aj pri začiatkových formuláciách zákonov zachovania energie a hybnosti pri zrážke telies. Daniel **Bernoulli** (1700–1782) riešil problémy kmitania pomocou diferenciálnych rovníc, výsledky tejto práce sú známe z roku 1734. Práce o dynamike a prúde tekutín zverejnil v roku 1738 v knihe *Hydrodynamica*. Významnou osobnosťou tohto obdobia bol Leonhard **Euler** (1717 – 1783). Bol najmä matematikom (napr. základ prirodzených logaritmov je známy ako Eulerovo číslo), ale prispel aj k rozvoju teoretickej mechaniky, mechaniky kontinua, hydrodynamiky aj optiky. Pri riešení mechanických úloh začal používať diferenciálne rovnice, takto riešil voľný aj viazaný pohyb hmotných bodov, balistiku aj pohyb kyvadla. V roku 1739 vyriešil diferenciálnu rovnicu vynúteného kmitania, pričom opísal aj rezonančné javy, vytvoril teóriu kmitania struny. Bol zakladateľom teórie pohybu dokonale tuhých telies, a jedným zo zakladateľov analytickej hydrodynamiky. Vypracoval teóriu momentu zotrvačnosti, zaviedol moment hybnosti, a spolu s Danielom Bernoullim sformulovali zákon jeho zachovania (1746). Euler uvažoval aj o redukcii síl v tuhom telese. Vo svojich analytických prácach zaviedol veličinu *účinok* a na jej základe variačný princíp spolu s Pierom **Maupertuisom** (1698 – 1759). Neskôr sa princíp najmenšieho účinku (označovaný ako Maupertuisov) stal fundamentálnym pre všetky oblasti fyziky. Euler matematicky opísal pohyb dokonale tekutiny, aj stlačiteľnej, čoho výsledkom bola *Eulerova rovnica*. Z mnohých jeho prác o

mechanickom pohybe je významná *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum* (Teória pohybu dokonale tuhých telies 1765) a o hydrodynamike práca z roku 1757 *Principe généraux de l'état de l'équilibre des fluides* (Všeobecné princípy rovnovážneho stavu tekutín).

Pozoruhodné stanovisko zastával Ruder **Boškovič** (1711 – 1787), ktorý v monografii z roku 1758 *Philosophiae Naturalis Theoria*²³ (Teória prírodnej filozofie) uvažoval o zložení telies z atómov, akoby hmotných bodov, ktoré sa pri malej vzájomnej vzdialenosti odpudzujú, pri väčšej priťahujú.

Za vrcholné dielo analytickej mechaniky 18. storočia sa považuje *Méchanique analytique* (1788), ktorého autorom bol Joseph **Lagrange** (1736 – 1813). Syntetizoval diela svojich predchodcov i súčasníkov, sformuloval niekoľko základných princíпов mechaniky a ovplyvnil tak vývoj všetkých jej súčastí. Od neho pochádzajú *Lagrangeove rovnice* prvého a druhého druhu. V roku 1777 zaviedol do mechaniky funkciu *potenciál*, ktorého gradientom sa vyjadruje sila pôsobiaca v príslušnom silovom poli. Na konci 18. storočia sa zúčastnil zavádzania metrickej sústavy fyzikálnych jednotiek. Pokračovateľom v budovaní teórie potenciálu bol Pierre **Laplace** (1749 -1827), ktorý v roku 1782 odvodil pre potenciál parciálnu diferenciálnu rovnicu. Vystupuje v nej *Laplaceov operátor*. Je autorom tzv. *Laplaceovej transformácie*, využívanéj v mnohých oblastiach matematickej fyziky. Znalosti o vesmíre zhrnul a rozvinul v knihe *Mécanique Céleste*, v ktorej sa zaoberal pôvodom slnečnej sústavy a v ktorej ako prvý predpokladal existenciu čiernych dier a gravitačného kolapsu hviezd.

Do tohto obdobia patrí aj práca Henryho **Cavendisha** z roku 1790, ktorý torznými váhami určil veľkosť gravitačnej konštanty a v roku 1798 určil hmotnosť Zeme.

Základnou učebnicou mechaniky sa však stalo *Pojednanie o mechanike* (1811), ktorého autorom bol Siméon **Poisson** (1781 - 1840). Pokračoval v budovaní teórie potenciálu, rozšíril Laplaceovu rovnicu na oblasti, v ktorých sa nachádzajú zdroje poľa, čo našlo osobitné uplatnenie v teórii elektromagnetického poľa. Známe sú konštanty z teórie pružnosti a z termodynamiky pomenované po ňom.

V roku 1829 Gaspard **Coriolis** (1792 – 1843) exaktne zaviedol pojmy práca a kinetická energia. V roku 1835 opísal zotrvačnú silu pomenovanú po ňom.

William **Hamilton** (1805 – 1865), predovšetkým matematik, významne prispel k optike a klasickej mechanike. Úlohy geometrickej optiky riešil prostredníctvom variačného počtu. Variačné metódy použil aj v mechanike, čím Newtonovskú mechaniku preformuloval do novej podoby. V roku 1835 publikoval *princíp najmenšieho účinku*. Pohybovým rovniciam dal nový tvar, vznikli – *Hamiltonove kanonické pohybové rovnice* - v ktorých vystupujú prvé derivácie premenných, na

23 Originálny latinský text spolu s prekladom do angličtiny je dostupný na internete.

rozdiel od Lagrangeových rovníc, s druhými deriváciami. Hamiltonove meno nesie aj operátor, ktorý má ťažiskovú úlohu v kvantovej mechanike. Tieto jeho práce boli uverejnené len v časopisoch.

K teórii polí prispela aj *Gaussova integrálna veta* z roku 1867 o zámene objemového integrálu na plošný integrál cez uzavretú plochu, ktorá sa využíva v elektrostatičnom aj gravitačnom poli.

V 18. storočí sa pestovala aj fyzikálna akustika, do ktorej prispel Leonhard Euler analytickým opisom kmitania struny a aj Ernst **Chladni** (1756 – 1827), ktorý podrobne preskúmal kmitanie tyčí a najmä blán, na povrchu ktorých vznikali tzv. chladniho obrazce.

Vývoj v optike

Pierre **Bouguer** (1698 – 1758) publikoval v roku 1729 prácu *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, predstavujúcej nasmelý začiatok fotometrie. Opísal v nej, aké množstvo svetla sa stráca prechodom cez istú hrúbku atmosféry, a bol objaviteľom zákona, ktorý v súčasnosti je známy skôr pod menom *Beerov – Lambertov zákon*. Zistil, že slnečné svetlo je 300-krát silnejšie než odrazené od Mesiaca, takže vykonal jedno z prvých fotometrických meraní. Vo fotometrii sa angažoval aj Johann **Lambert** (1728 – 1777), v roku 1760 vydal knihu *Photometria*. Zaviedol termíny *jas* a *osvetlenie*. Dokázal, že osvetlenie objektu je úmerné intenzite zdroja, kosínusu uhla naklonenia plochy voči dopadajúcemu svetlu a nepriamo úmerné druhej mocnine vzdialenosti od zdroja. V súvislosti s difúznym odrazom svetla zaviedol termín *albedo*. Významne prispel k formulácii Beerovho–Lambertovho zákona o zoslabovaní svetelného toku pri prechode prostredím. V minulosti bola po ňom pomenovaná jednotka jasu. Patrí mu vynález vlhkomeru.

K rozvoju optiky významne prispel aj **Euler**. V trojzväzkovom diele *Dioptrica* (1771) uviedol ako sa majú počítať charakteristiky ďalekohľadov a mikroskopov a ako zostrojiť achromatickú šošovku. Vyjadril nesúhlas s Newtonovou korpuskulárnou teóriou svetla, ktorá bola dovtedy prevládajúcou teóriou. Jeho články z roku 1740 pomohli presadiť sa vlnovej teórii svetla.

Na prelome 18. a 19. storočia bolo objavené infračervené žiarenie – Frederick **Herschell** (1738 – 1822), a v roku 1801 aj ultrafialové žiarenie – Johann **Ritter** (1776 – 1810).

Étienne-Louis **Malus** (1775 – 1812) objavil polarizáciu svetla odrazom, čo zverejnil v roku 1809, a o rok neskôr aj teóriu dvojlomu. Známy je Malusov zákon vyjadrujúci intenzitu svetelného lúča prechádzajúceho analyzátorom v závislosti od uhla jeho natočenia voči polarizátoru. David **Brewster** (1781 – 1868) sa zapísal do histórie fyziky experimentálnymi prácami v oblasti fyzikálnej optiky, najmä

polarizácie svetla odrazom a lomom a objavom *Brewsterovho uhla* (1815). Študoval dvojlom na kryštáloch vyvolaný tlakom a objavil *fotoelasticitu*, čím prispel k založeniu optickej mineralógie.

V prvej polovici 19. storočia došlo k oživeniu vlnovej teórie svetla. V roku 1803 Thomas **Young** (1773 – 1829) pomocou tejto teórie vysvetlil interferenciu svetla, ktorú demonštroval tzv. dvojštrbinovým experimentom. Ten využil aj na určenie vlnových dĺžok rôznych farieb svetla. Pomocou interferencie vysvetlil farby pozorované na tenkých vrstvách. Ohyb svetla demonštroval na tenkých vláknach. Young sa zaoberal aj teóriou pružnosti, prácu o tom publikoval v roku 1807, po ňom je pomenovaný modul pružnosti v ťahu. Je považovaný za zakladateľa fyziologickej optiky, vysvetlil akomodáciu oka zmenou krivosti očnej šošovky, a v roku 1801 opísal astigmatizmus.

K presadeniu sa vlnovej teórie svetla významne prispel Jean **Fresnel** (1788 – 1827). Študoval vlastnosti svetla teoreticky aj experimentálne, zovšeobecnil Huygensov princíp. Zatiaľ čo Young tvrdil, že svetlo je pozdĺžnym vlnením s malou priečnou zložkou, Fresnel v roku 1821 dokázal, že polarizáciu svetla možno vysvetliť len za predpokladu, že je čisto priečnym vlnením. Obaja predpokladali, že svetlo je pružným vlnením éteru. Fresnel poskytol prvé uspokojujúce vysvetlenie difrakcie svetla na ostrej hrane a kvantitatívne opísal difrakciu blízko zdrojov svetla, tj. difrakciu rozbiehavých zväzkov (difrakcia rovnobežných zväzkov je spojená s menom Fraunhofer). Spoločne s **Aragom** (Dominique, 1786 – 1853) študoval interferenciu polarizovaných svetelných zväzkov a pomocou špeciálneho hranola sa mu podarilo vytvoriť kruhovo polarizované svetlo. Od Fresnela pochádzajú termíny lineárne, kruhovo a elipticky polarizované svetlo. Najviac sa preslávil vynálezom plochej šošovky (Fresnelova šošovka 1822), ktorá našla významné využitie na majákoch.

Joseph von **Fraunhofer** (1787 – 1826) objavil v slnečnom spektre tmavé absorpčné čiary (Fraunhoferove čiary 1814). V roku 1822 vyvinul difrakčnú mriežku, čo neskôr, využitím vlnovej teórie (1835), umožnilo absorpčným čiaram, ako aj rôznym farbám viditeľného spektra priradiť vlnové dĺžky. Po Fraunhoferovi je pomenovaná difrakcia vznikajúca ďaleko od zdroja svetla, keď prichádzajúce lúče sú už prakticky rovnobežné, hoci na teórii opisujúcej tento jav sa nepodieľal.

Jean **Foucault** (1819 – 1868) v rokoch 1850 až 1851 meral pomocou rýchlo rotujúceho zrkadla rýchlosť svetla, pričom výsledok sa od dnes akceptovanej hodnoty líšil len o 0,6 %. Rovnakou aparátúrou zistil, že vo vode sa svetlo šíri pomalšie než vo vzduchu. Známy je aj konštrukciou kyvadla, ktorým v parížskom Panteóne demonštroval (1851), že Zem sa otáča, že nie je inerciálnou sústavou.

Vývoj v náukach o teple

V osemnástom storočí sa ešte stále udržiavala viera, že nositeľom tepla je “tepelné fluidum”. Ale existovala aj skupina vedcov, ktorí zastávali názor, že teplo v telesách je pohybom ich vnútorných mikročastíc. Patrili medzi nich Robert Boyle, Robert Hooke, Daniel Bernoulli, Leonhard Euler aj M. V. Lomonosov. Tieto dve hypotézy rozsúdil až Joule v nasledujúcom storočí určením mechanického ekvivalentu tepla. V 18. a na začiatku 19. storočia začala sa rozvíjať termometria a kalorimetria, začalo sa rozlišovať medzi teplom a teplotou, a postupne boli prekonávané názory akceptujúce kalorikum²⁴ a teóriu flogistonu²⁵. V 19. storočí sa rozvinula aj termodynamika.

Prvý teplomer eliminujúci tlak vzduchu pochádza z roku 1702, presnejší ortuťový teplomer skonštruoval v roku 1714 Daniel **Fahrenheit** (1686 – 1739), s inou než Celziovou stupnicou²⁶. Termodynamická teplotná stupnica bola zavedená v roku 1849, o čo sa zaslúžili W. **Thomson** a J. **Joule**.

Ešte v druhej polovici sedemnásteho storočia vznikli prvé kvantitatívne opisy vlastností ideálneho plynu. V roku 1662 Robert **Boyle** (1621 – 1691) a nezávisle v roku 1676 Edme **Mariotte** (1620 – 1684) sformulovali zákon vyjadrujúci stálosť súčinu objemu a tlaku plynu pri nemeniacej sa teplote. Teplotnou rozťažnosťou plynu sa zaoberal už od roku 1663 Guillaume **Amontons** (1663 – 1705), a na základe výsledkov meraní (1703) dospel k názoru, že existuje absolútne nulová teplota -293,5 °C. Prvé presné merania rozťažnosti plynu publikovali nezávisle od seba až v roku 1802 Joseph **Gay-Lussac** (1778 – 1850) a John **Dalton** (1766 – 1844). Zistili, že objem plynu pri stálom tlaku rastie lineárne s teplotou. Teplotnú rozpínavosť vzduchu kvantitatívne opísal už v roku 1787 Jacques Alexandre César **Charles** (1746 – 1823), ale o jeho nepublikovanej práci informoval až Gay-Lussac, preto tento zákon sa niekedy označuje ako Gay-Lussacov izochorický zákon. Podľa tohto zákona sa tlak plynu pri stálom objeme mení s teplotou lineárne. Z nameraných hodnôt vyplynulo, že pri zmene teploty o jeden stupeň (Celziov) sa tlak (resp. objem) plynu zmení o zlomok $\gamma = 1/273,16$, s čím zjavne súvisí určenie najnižšej možnej teploty. Treba uviesť, že pomenovanie týchto zákonov nie je medzinárodne jednotné, v našej literatúre Gay-Lussacov zákon je o rozťažnosti a Charlesov o rozpínavosti plynu.

24 Hypotetické tepelné fluidum pozostávajúce z navzájom sa odpudzujúcich častíc, viažucich sa na molekuly obyčajných látok, a vyplňajúce priestor medzi nimi.

25 Prekonaná teória horenia, podľa ktorej existoval prvok nazývaný flogiston, nachádzajúci sa vo všetkých horľavých látkach, ktorý sa pri horení z nich uvoľňuje. K prekonaniu teórie prispel v roku 1798 B. Rumford zistením, že pri vŕtaní hlavni kanónov sa uvoľňuje teplo.

26 Vo Fahrenheitovej stupnici je bodu mrazu priradená teplota 32 °F, a bodu varu vody 212 °F. Celziova stupnica pochádza z roku 1742.

Spojením vzťahov vyjadrujúcich tieto zákony vznikla *stavová rovnica plynov*, ktorú sformuloval Benoit **Clapeyron** (1799 - 1864) v roku 1834. V stavovej rovnici ideálneho plynu vystupuje už aj látkové množstvo, o ktorom sa v predošlých zákonoch predpokladalo, že sa nemení. Zákon o parciálnych tlakoch zverejnil **Dalton** v roku 1805.

Do osemnásteho storočia treba zaradiť aj začiatok *kinetickej teórie plynov*. V roku 1738 Daniel **Bernoulli** (1700 – 1782) predpokladal, že plyny sú zložené z obrovského počtu molekúl, náhodne sa pohybujúcich. Vzťah vyjadrujúci tlak plynu na steny nádoby odvodil zo zmeny hybnosti molekúl pri nárazoch na jej steny. Predpokladal, že teplo plynu súvisí s kinetickou energiou molekúl; tým značne preskočil vtedajšie „fluidové“ názory.

Veličiny *tepelná kapacita* aj *latentné (skupenské) teplo* zaviedol v roku 1804 Joseph **Black** (1728 – 1799), jednotku *kalória* zaviedol Nicolas **Clément** (1779 – 1841) vo svojich prednáškach z rokov 1819 – 1824. Bola to v podstate kilokalória, „malá“ kalória sa začala používať od roku 1852. Zriedka sa spomína Johann **Wilcke** (1732 – 1796), ktorý už v roku 1772 vypočítal latentné teplo ľadu a zaviedol termín *špecifické teplo*²⁷.

Antoine **Lavoisier** (1743 – 1794), spolu s **Laplaceom** sa považujú za zakladateľov kalorimetrie. Skonstruovali tzv. ľadový kalorimeter, pomocou ktorého merali tepelné kapacity a skupenské teplá rôznych látok. Spočiatku ešte akceptovali teóriu kalorika. Ich spoločné kalorimetrické práce sú opísané v knihe *Úvahy o teple* z roku 1780. V knihe je okrem iných poznatkov spracovaná aj teória tepelnej kapacity a jej závislosti od teploty, ako aj teplotná rozťažnosť látok. Lavoisier v roku 1783 objasnil význam kyslíka pri horení, oxidácii a dýchaní, čím vyvrátil teóriu flogistonu. Pripisuje sa mu aj primát formulácie zákona zachovania hmotnosti (rok 1789), hoci zákon zachovania hmoty uviedol Lomonosov už v r. 1760 v liste Eulerovi. Spolupracoval na príprave metrickej sústavy fyzikálnych jednotiek.

Amadeo **Avogadro** (1776 – 1856) v roku 1811 publikoval prácu, v ktorej vyslovil hypotézu, podľa ktorej v rovnakom objeme dvoch ideálnych plynov, pri rovnakej teplote a tlaku, sa nachádza rovnaký počet molekúl (*Avogadrov zákon*). Rozlíšil atómy od molekúl, tvrdil, že ideálne plyny obsahujú molekuly zložené z dvoch atómov. Podľa Avogadra je pomenovaná konštanta vyjadrujúca počet molekúl v jednom móle, ktorá je v súčasnosti jednou zo siedmich konštánt, na ktorých je vybudovaná sústava základných jednotiek SI.

Jean **Fourier** (1768 – 1830) v roku 1822 vydal knihu *Analytická teória tepla*, v ktorej odvodil rovnicu vedenia tepla v tuhých látkach, a kde na opis zložitejších funkcií začal používať Fourierov rozvoj. Pridržiaval sa pritom teórie tepelného fluida. Opísal skleníkový jav.

27 Článok vyšiel len vo švédskom jazyku.

Sadi **Carnot** (1796 – 1832) v roku 1824 napísal *Úvahy o hybnej sile ohňa a o strojoch schopných ju využiť*. Carnotov opis práce tepelného stroja bol kvalitatívny. Kniha obsahuje aj náznaky prvého a druhého zákona termodynamiky. Prácu Carnotovho stroja matematicky sformuloval Benoit **Clapeyron** o desať rokov neskôr, pričom použil termíny *vratný proces*, a *diagram pV*.

James **Joule** (1818 – 1889) je známy najmä objavom vzťahu medzi teplom a mecha-nickou prácou, našiel ich ekvivalent. Výsledok oznámil na zasadnutí učenej spoločnosti v roku 1843, publikovaný bol o dva roky neskôr v časopise *Philosophical Magazine*. Vyjadril sa, že „*keď sa spotrebuje mechanická sila, vždy vzniká rovnocenné množstvo tepla*“. Známe je *Jouleovo teplo* vznikajúce pri prechode elektrického prúdu vodičom. Spolu s Williamom **Thomsonom** (= lord **Kelvin** 1824 – 1907) v roku 1849 na základe účinnosti Carnotovho ideálneho stroja zaviedli termodynamickú teplotnú stupnicu, nezávislú od meracieho média.

Jouleove práce stáli pri začiatku vývoja **termodynamiky**, ktorá sa historicky vyvinula z úsilia zvýšiť účinnosť parných strojov, ktorých činnosť z fyzikálneho pohľadu opísal už Carnot. Termodynamika stojí na troch zákonoch. *Prvý zákon termodynamiky* je vlastne zákonom zachovania energie, a to z pohľadu ekvivalencie tepla a práce. Formoval sa postupne. V roku 1840 Germain **Hess** (1802 – 1850) tvrdil, že teplo sa pri chemických reakciách zachováva, čo sa však ešte netýkalo vzťahu medzi teplom a prácou. Julius **Mayer** (1814 – 1878) v roku 1841 sformuloval zákon zachovania energie, ale jeho článok nebol hneď akceptovaný. Potvrdenie platnosti zákona zachovania sa pripisuje Hermannovi **Helmholtzovi** (1821 – 1894), ktorý v knihe z roku 1847²⁸ zahrnul do úvah mechanické, tepelné aj elektrické javy. Za kvantitatívnu matematickou formuláciou prvého zákona stojí Rudolf **Clausius** (1822 – 1888). V roku 1850 publikoval prácu, v ktorej zaviedol veličinu *vnútorná energia* sústavy a o ktorej uviedol, že jej prírastok je súčtom dodaného tepla a dodanej práce. To je rovnocenné s vyjadrením, že sústava môže konať prácu len na úkor dodaného tepla alebo poklesu vnútornej energie. *Druhý zákon termodynamiky* Clausius sformuloval v roku 1854, ako nemožnosť samovoľného prechodu tepla zo studenšieho telesa na teplejšie. To priamo súvisí s nemožnosťou využiť všetko teplo odobraté zásobníku na konanie práce, časť sa musí odovzdať chladiču. Pri matematickom vyjadrení druhého zákona zaviedol v roku 1865 novú fyzikálnu veličinu – *entropiu*. V izolovaných sústavách sa entropia nemôže zmenšovať, čo vyjadril tzv. *Clausiovou nerovnosťou*. *Tretí zákon termodynamiky* – o nedosiahnuteľnosti absolútne nulovej teploty – sformuloval Walther **Nernst** (1864 – 1941) až v roku 1906.

28 *Über die Erhaltung der Kraft*, Reimer, Berlin 1847

Elektrina a magnetismus

V osemnástom a devätnástom storočí boli dosiahnuté veľké úspechy aj v štúdiu elektrických a magnetických javov. V prvej polovici 18. storočia však ako jediný zdroj elektriny slúžila elektrizácia trením. Významný príspevok k elektrostatike urobil Stephen **Gray** (1666 – 1736). Objavil elektrostatickú indukciu a súčasne dokázal, že elektrické náboje sa nachádzajú na povrchu elektrizovaného telesa. Skonstruoval leydenskú fľašu – kondenzátor, spoznal pyroelektrické vlastnosti, skonstruoval elektrofór, študoval elektrický výboj. Jeho najvýznamnejší úspech sa spája s pokusmi z roku 1720, ktorými preukázal možnosť prenosu elektriny látkami na väčšiu vzdialenosť. Spojením viacerých leydenských fliaš vznikol zdroj dostatočne silného, i keď len krátkodobého prúdu na uskutočňovanie ďalších experimentov. V roku 1734 Charles **Dufay** (1698 – 1739) ukázal, že existujú dva druhy náboja “sklený” a “živcový”, rozlíšil vodiče a izolanty. Benjamin **Franklin** (1706 – 1790) pozoroval atmosférické výboje, vytvoril umelý výboj, v 1752 navrhol bleskozvod²⁹. Veril na elektrické a magnetické fluidá, pri elektrických rozlišoval sklené a jantárové, pri magnetických severné a južné.

Henry **Cavendish** (1731 – 1810) sa zaujímal o elektrostatické javy, aj o elektrický prúd už v druhej polovici 18. storočia, ale výsledky jeho práce (okolo roku 1771) uložené v rodinnom archíve zverejnil až Maxwell v roku 1879. Cavendish určil elektrickú kapacitu gule, uvažoval o relatívnej permitivite, našiel vzťah medzi elektrickým potenciálom a elektrickým prúdom (Ohmov zákon), zistil, ako sa prúd vetví do paralelných vodičov. Zistil, že sila medzi elektrickými nábojmi sa znižuje s druhou mocninou ich vzájomnej vzdialenosti. Túto skutočnosť dôkladne overil Augustin **Coulomb** (1736 – 1806). Skonstruoval torzné vážky, na ktorých študoval vzájomné silové pôsobenie medzi elektrickým nábojmi. Výsledky prác začal publikovať v roku 1785, pričom v druhom zo siedmich článkov³⁰ je slovné uvedenie závislosti sily od veľkosti nábojov a vzdialenosti medzi nimi – *Coulombov zákon*.

K štúdiu elektrického prúdu významne prispel Alessandro **Volta** (1745 – 1827) vynálezom elektrickej batérie. V roku 1799 skonstruoval „elektromotorický aparát“ - Voltov stĺp, čím dokázal, že elektrina môže vzniknúť aj chemickou cestou. Dá sa povedať, že to bol začiatok elektrochémie. Volta svoje výsledky oznámil Kráľovskej akadémii v roku 1800 dvoma listami. Voltov pomerne stály zdroj umožnil dôkladnejšie skúmať javy súvisiace s elektrickým prúdom.

29 Uzemnený bleskozvod postavil Prokop Diviš v roku 1754, Franklin v roku 1760 (z českej Wikipédie).

30 *Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme*, Histoire de l'Acad. Royale des Sciences, 1785

Hans Christian **Oersted**³¹ (1777 – 1851) v roku 1820 objavil vplyv elektrického prúdu na magnetku kompasu, tj. vytváranie magnetického poľa elektrickým prúdom. Bol to objav súvislosti medzi elektrinou a magnetizmom, považované dovedy za nezávislé javy.

Na objav generovania magnetického poľa elektrickým prúdom nadviazali Jean-Baptiste **Biot** (1774 – 1862) a Félix **Savart** (1791 – 1841), keď už v roku 1820 určili, aká je veľkosť intenzity magnetického poľa v okolí vodiča elektrického prúdu. Výsledok sformulovali len slovne³², matematickú podobu dostal tento Biotov – Savartov zákon až zásluhou Laplacea³³.

André-Marie **Ampère** (1775 – 1836) už dva týždne po Oerstedovom objave zistil vzájomné silové pôsobenie vodičov elektrického prúdu. Ukázal, že dva paralelné vodiče sa priťahujú alebo odpudzujú v závislosti od smeru prúdu v nich. V roku 1826 odvodil príslušný vzťah, ktorý sa stal základom medzinárodnej definície jednotky intenzity elektrického prúdu - ampéra³⁴. Zaviedol pojem elektrického prúdu, aj termín elektrodynamika. Teoreticky najvýznamnejší bol jeho názor, že všetky magnetické javy majú pôvod v elektrických prúdoch, zavrhol teóriu magnetického fluida a nahradil ho molekulárnymi prúdmi. Prehľad Ampérových vystúpení v Kráľovskej akadémii vied, týkajúcich sa elektrodynamiky bol zverejnený v roku 1826 v knihe *Teória elektrody-namických javov*³⁵. Bol jedným zo zakladateľov klasickej teórie elektromagnetizmu.

Na začiatku 20-tych rokov 19. storočia sa objavili práce o termoelektrických javoch (Seebeckov, Peltierov a Thomsonov jav), ale prvé pokusy s vznikom rozdielu potenciálov medzi koncami vodiča s rozdielnymi teplotami vykonal už Alessandro Volta v roku 1794. Tento jav však dostal pomenovanie podľa Thomasa **Seebecka** (1770 – 1831), ktorý ho znovu objavil v roku 1821. Pomenovanie *termoelektrický jav* použil Oersted v článku uverejnenom v roku 1823.

Ohmov zákon, tj. zákon o vzťahu medzi napätím, prúdom a odporom v elektrickom vodiči sformuloval v roku 1826 Georg **Ohm** (1789 – 1854), *Kirchhoffove zákony* platné v elektrických obvodoch - sformuloval Gustav **Kirchhoff** (1824 – 1887) v roku 1845.

Michael **Faraday** (1791 – 1867) začal hľadať opačný jav k Oerstedovmu objavu – vznik prúdu pôsobením magnetu. V roku 1831 zistil, že pri otáčaní magnetu

31 Po Oerstedovi bola pomenovaná jednotka intenzity magnetického poľa v CGS sústave

32 Prácu pod názvom "*Note sur le magnétisme de la pile de Volta*" publikovali na dvoch stranách v časopise *Annales de chimie et de physique* 1820.

33 Niektorí autori používajú pomenovanie Biotov – Savartov – Laplaceov zákon.

34 Definícia platila do roku 2019,

35 *Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience*, Méquignon-Maris, Paris 1826

sa v susednom vinutí indukuje elektrický prúd. Ukázal, že prúd vzniká aj pri zmene veľkosti prúdu v susednom vinutí. Sformuloval indukčný zákon, ktorý je teoretickým základom súčasnej elektroenergetiky. Stal sa priekopníkom nových názorov pri opise elektrických a magnetických javov – zaviedol siločiaru a tým pojem elektrického a magnetického poľa, v ktorých namiesto pôsobenia na diaľku existuje pôsobenie od bodu k bodu. Faraday objavil aj zákony elektrolýzy, v roku 1845 diamagnetizmus. Svoje experimenty opísal v trojzväzkovom diele *Experimentálne výskumy elektriny*³⁶. Obohatil odbornú terminológiu o pojmy anóda, katóda, elektróda či ión. V roku 1845 objavil stáčanie roviny polarizácie svetla v magnetickom poli (*Faradayov jav*). Podľa encyklopédie Britannica skonštruoval elektromotor v roku 1821 a v roku 1830 elektrický generátor. Po Faradayovi je pomenovaná jednotka elektrickej kapacity v sústave SI.

V tejto súvislosti treba uviesť, že Štefan Anián **Jedlík** (1800 – 1895, otec Slováka, matka Maďarka), dokázateľne v rokoch 1827–1829, ako prvý na svete skonštruoval taký model elektromotora, v ktorom pevnú aj otáčajúcu časť tvorili elektromagnety. Jeho „elektro-magnetický rotor“ bol priekopnícky aj použitím ortuťového komutátora. V roku 1842 použil podobný motor na pohon vozíka pohybujúceho sa na koľajniciach. V roku 1861, teda aspoň päť rokov pred Wernerom Siemensom opísal a použil princíp samobudenia na dyname vlastnej konštrukcie.

Faradayovým objavom a myšlienkam o elektromagnetických poliach dal matematickú podobu James Clarke **Maxwell** (1831 – 1879). Už vo svojej prvej práci z roku 1855 *O Faradayových siločiarach* zovšeobecnil vtedy známe poznatky o elektrine a magnetizme. Zapísal ich v tvare vzťahov medzi veličinami charakterizujúcimi tieto polia. V roku 1865 pridal k týmto veličinám tzv. posuvný prúd (v publikácii *Dynamická teória elektromagnetického poľa*³⁷), čím vznikla úplná sústava Maxwellových rovníc³⁸. V práci je aj vlnová rovnica, ktorá vyplynula zo sústavy rovníc, a ktorá ukazuje, že elektrické a magnetické polia sa šíria priestorom ako vlny rýchlosťou svetla. Maxwell predpokladal, že svetlo je vlnením toho istého média, ktoré je nositeľom elektrických a magnetických javov. Maxwell zhrnul svoje názory a výsledky prác v knihe vydané v roku 1873: *Pojednanie o elektrine a magnetizme*³⁹.

Existenciu elektromagnetických vln experimentálne potvrdil Heinrich **Hertz**⁴⁰ (1857 – 1894), o čom v roku 1888 podal správu na zasadnutí Akadémie vied v Berlíne. Objavil Maxwellov posuvný prúd v dielektrikách, zistil existenciu polarizácie aj odrazu týchto vln. Pripisuje sa mu objav fotoelektrického javu (1887), hoci viaceré čiastočne úspešné pokusy boli uskutočnené už pred ním.

36 *Experimental Researches in Electricity*, (1839, 1844, 1855)

37 *A dynamical theory of the electromagnetic field*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, **155**: 459–512, 1865

38 Do vektorovej podoby, ktorú používame v súčasnosti, prepísal Maxwellove rovnice O. Heaviside.

39 *A treatise on electricity and magnetism* Vol I, Vol II Oxford, Clarendon Press 1873

40 Po Hertzovi je pomenovaná jednotka frekvencie v sústave SI.

O ďalší rozvoj teórie elektromagnetického poľa sa zaslúžil Hendrik **Lorentz** (1853 – 1928). Upravil Maxwelllove rovnice tak, že zohľadnil diskrétny charakter rozloženia elektrického náboja v látke (1892). Ďalej dokázal, že elektromagnetickému poľu treba prisúdiť nielen energiu, ale aj hybnosť, moment hybnosti či zotrvačnosť. Pomenovaná je po ňom sila pôsobiaca na pohybujúci sa elektrický náboj v elektromagnetickom poli.

Carl Friedrich **Gauss** (1777 – 1855) sa od roku 1831 venoval otázkam magnetizmu a spolu s W. E. Weberom skonštruovali magnetometer. Uskutočnili prvé telegrafické spojenie (1833) využitím elektromagnetického pôsobenia na magnetku kompasu. Spolu vytvorili CGS sústavu jednotiek, ktorá bola na medzinárodnom kongrese v Paríži v roku 1881 uznaná za sústavu vhodnú pre elektrotechniku.

Wilhelm **Weber** (1804 – 1891) s Rudolfom **Kohlrauschom** (1809–1858) experimentálne určili pomer veľkostí elektrodynamickej a elektrostatickej jednotky elektrického náboja (1856), pričom zistili, že sa zhoduje s rýchlosťou svetla. To významne ovplyvnilo názory v optike aj elektromagnetizme a malo rozhodujúci vplyv na Maxwellovu elektro-magnetickú teóriu svetla. Podľa Webera je pomenovaná jednotka magnetického toku v sústave SI.

V roku 1858 boli objavené katódové lúče (Julius **Plücker** 1801 - 1868), ktorých štúdium prispelo k viacerým objavom, napríklad elektrónu a röntgenových lúčov. K ich štúdiu významne prispel aj bratislavský rodák Philipp **Lenard** (1862 - 1947).

V roku 1880 John **Poynting** (1852 – 1914) vyjadril hustotu toku energie prenášanej elektromagnetickým vlnením, zaviedol *Poyntingov vektor*.

Štatistická fyzika

Aj táto vedná disciplína sa rozvinula v devätnástom storočí, ale jej prvé kroky súvisia s kinetickou teóriou plynov, načrtnutou už v roku 1738 Danielom **Bernoullim**. Ide o opis vlastností sústav skladajúcich sa z veľkého počtu častíc, preto používa štatistické metódy a teóriu pravdepodobnosti. Opisom vlastností súvisiacich s pohybom veľkého počtu častíc sa zaoberá štatistická mechanika. Pri jej rozvinutí v 19. storočí bol opäť **Maxwell**, ktorý v roku 1860 odvodil rozdelenie molekúl ideálneho plynu podľa rýchlostí. Maxwell nadviazal na myšlienky Rudolfa **Clausiusa**, na jeho predstavy o strednej rýchlosti molekúl a ich strednej voľnej dráhe. Do rozvoja tejto disciplíny významne zasiahol Ludwig **Boltzmann** (1844 – 1906). *Maxwellovo-Boltzmannovo rozdelenie* je o distribúcii molekúl ideálneho plynu podľa ich energie a je dôležitou súčasťou termodynamických výpočtov⁴¹. Významným Boltzmannovým príspevkom k termodynamike bola štatistická interpretácia entropie. Odvodil aj kinetickú rovnicu, ktorá sa využíva pri opise nerovnovážnych procesov, napr. chemických reakcií. Josiah **Gibbs** (1839 – 1903) vytvoril axiomatickú sústavu

41 V rozdelení vystupuje Boltzmannova konštanta, ktorá je jednou zo siedmich konštánt, na ktorých je od roku 2019 vybudovaná sústava siedmich základných jednotiek SI.

štatistickej fyziky a podrobne opísal jej základné distribučné funkcie – *Gibbsove rozdelenia*. Gibbsova energia je jednou zo stavových funkcií termodynamických sústav. Ďalší významný vývoj štatistickej fyziky nastal v 20. storočí, po aplikácii kvantovej mechaniky na súbory častíc, vznikom *Fermiho - Diracovej* a *Boseho - Einsteinovej* štatistiky o distribúciách častíc po dovolených kvantových stavoch.

Ďalšie významné objavy v 19. storočí

V roku 1822 botanik Robert **Brown** (1773 – 1858) objavil pohyb peľových zrníkov vo vode, čo sa vysvetlilo ako dôsledok nárazov rýchlo sa pohybujúcich molekúl kvapaliny. Objav podporil predstavy o atómovej štruktúre látok.

Christian **Doppler** (1803 - 1853) pozorovaním optických spektier rotujúcej dvojhviezdy objavil závislosť frekvencie vlnenia od vzájomného pohybu zdroja a prijímača. Objav je z roku 1842, keď Doppler pôsobil v Prahe.

V roku 1881 Albert **Michelson** (1852 – 1931) uskutočnil optický experiment, ktorým zistil, že svetlo sa šíri všetkými smermi rovnakou rýchlosťou, bez ohľadu na pohyb pozorovateľa vzhľadom na zdroj, a že nejestvuje preferovaná vzťažná sústava viazaná na hypotetický éter. To bolo v rozpore s Newtonovou predstavou o absolútnom priestore. V roku 1887 Michelson s Edwardom **Morleyom** (1838 – 1923) pokus zopakovali s oveľa väčšou presnosťou. Nezávislosť rýchlosti svetla od pohybu pozorovateľa sa stala jedným z postulátov teórie relativity.

V 19. storočí sa rozvinula *spektrálna analýza*, pričom pri jej začiatkoch stál Gustav **Kirchhoff**. Skúmal aj *žiarenie čierneho telesa*, pričom zaviedol aj tento názov. Nespojité čiarový charakter optických spektier atómov klasická fyzika nedokázala vysvetliť, a bol jedným zo stimulov pre vznik kvantovej teórie v 20. storočí. V roku 1885 Johan **Balmer** (1825 – 1898) dospel k vzťahu na výpočet vlnových dĺžok spektrálnych čiar atómu vodíka, čo prispelo k vzniku Bohrovej kvantovej teórie. V roku 1888 Johannes **Rydberg** (1854 – 1919) zovšeobecnil tento vzťah aj na iné atómy. V roku 1896 Pieter **Zeeman** (1856 – 1943) preskúmal vplyv magnetického poľa na spektra atómov, zistil, že niektoré spektrálne čiary sa štiepia na viacero blízkych čiar (*Zeemanov jav*). To prispelo k objavu spinu elektrónu. V roku 1880 bolo namerané spojité spektrum žiarenia vysielaného tzv. čiernym telesom; snaha vysvetliť ho zohrala významnú úlohu pri vzniku kvantovej teórie.

Wilhelm **Röntgen** (1845 – 1923) objavil „žiarenie X“ v roku 1895, čo vytvorilo podmienky pre nové experimentálne metódy štúdia látok, napríklad štruktúry kryštálov.

Joseph **Thomson** (1856 – 1940) objavil v roku 1897 elektrón, o ktorom však mohol uviesť len toľko, že má hmotnosť podstatne menšiu než atómy a veľmi veľký pomer veľkostí náboja k hmotnosti. Bol to prvý objav subatomárnej častice, ktorým sa začala éra fyziky smerujúca do vnútra atómu. Udialo sa to v rámci štúdia výbojov v plynách a s tým súvisiaceho katódového žiarenia, v ktorom významné výsledky

dosiahol bratislavský rodák Philipp **Lenard**. Zaoberal sa aj fotoelektrickým javom, dokázal, že energia vyletujúcich elektrónov závisí len od frekvencie dopadajúceho svetla.

Značná pozornosť bola venovaná skúmaniu a opisu žiarenia vysielaného zohriatymi telesami, tzv. teórii absolútne čierneho telesa⁴². Jozef **Stefan** (1835 – 1893) a Ludwig **Boltzmann** určili v roku 1879 závislosť celkovej intenzity vyžarovania takýchto telies od teploty, ale pomocou klasickej fyziky sa nepodarilo vysvetliť jej závislosť od vlnovej dĺžky (resp. frekvencie). Wilhelm **Wien** (1864 – 1928) v roku 1893 teoreticky určil len vlnovú dĺžku, na ktorej pri danej teplote vyžarujú najviac.

V prvej polovici 19. storočia sa udial významný pokrok aj v **mechanike kontinua**, menovite v opise elasticity tuhých látok, a pri kvapalinách sformulovaním Navierovej – Stokesovej rovnice, opisujúcej hydrodynamiku viskózne tekutiny. Rovnicu zostavili nezávisle Claude **Navier** (1785 - 1836) v roku 1827 a George **Stokes** (1819 – 1903) v roku 1845. V teórii polí sa uplatňuje *Stokesova integrálna veta* o súvislosti krivkového integrálu vektorového poľa po uzavretej krivke a plošného integrálu z rotácie tohto poľa po ploche ohraničenej touto krivkou.

42 Absolútne čierne teleso dokonale absorbuje dopadajúce elektromagnetické žiarenie akejkoľvek vlnovej dĺžky, neodráža z neho ani malú časť.

Dvadsiate storočie

Koncom devätnásteho storočia panovala všeobecná zhoda v názore, že všetky dôležité fyzikálne zákony boli už objavené. Napriek tomu pretrvávali vážne pochybnosti o úplnosti klasických teórií, lebo nedokázali vysvetliť niektoré pozorované javy, ako žiarenie čierneho telesa, fotoelektrický jav, či diskrétné atómové spektrá. Na vysvetlenie týchto javov boli potrebné nové teórie, čo viedlo k vzniku tzv. **modernej fyziky**.

Na neúplnosť klasických teórií poukázali aj ďalšie objavy z devätnásteho storočia, najmä objavy rôznych druhov žiarenia. Bol to jednak Röntgenov objav, ale aj objav neznámeho žiarenia vychádzajúceho zo smolincovej rudy, ktoré v roku 1896 zaznamenal Henri **Becquerell** (1852 – 1908) a ktoré neskôr Ernest **Rutherford** (1871 – 1937) a Frederick **Soddy** (1877 – 1956) identifikovali ako prúd elektrónov (žiarenie beta) resp. héliových jadier (žiarenie alfa). Manželia Maria **Skłodowska** (1867–1934) a Pierre **Curie** (1859 – 1906) objavmi rádioaktívnych premien prvkov polónia a rádia (1898) spochybnili predstavu o nedeliteľnosti atómov.

Na prelome storočí tak začali vznikať nové teórie. Už v roku 1900 Max **Planck** (1858 – 1947) vyriešil problém žiarenia absolútne čierneho telesa tzv. kvantovou hypotézou, čiže predpokladom, že energia elektromagnetického žiarenia sa z telies uvoľňuje alebo telesami absorbuje len v celočíselných násobkoch istého minimálneho množstva (kvanta), ktorého veľkosť je priamoúmerná frekvencii žiarenia⁴³. O výsledku referoval na konci roka 1900, a článok s nadpisom *O zákone rozdelenia energie v normálnom spektre* vyšiel v roku 1901⁴⁴. Predpoklad bol v zásadnom protiklade s predstavami klasickej fyziky o ľubovoľne malej veľkosti vyžarovanej, resp. absorbovanej energie žiarenia. Planckovi sa podarilo odvodiť závislosť intenzity vyžarovania telies od teploty aj od vlnovej dĺžky (resp. frekvencie), pričom výsledky z toho plynúce boli v dokonalom súlade s experimentálnymi údajmi. Z Planckovho zákona sa dajú odvodiť aj dovtedy známe zákony o žiarení – Wienov a Stefanov-Boltzmannov.

V roku 1905 Albert **Einstein** (1879 – 1955) využitím Planckovej kvantovej hypotézy vysvetlil podstatu *fotoelektrického javu*⁴⁵ a všetky jeho vlastnosti. Predpokladal, že energia svetla dopadajúceho na kov sa absorbuje len po konečných

43 Vo vzťahu vyjadrujúcom energiu kvanta vystupuje Planckova konštanta, ktorá je jednou zo siedmich konštánt, na ktorých je od roku 2019 vybudovaná sústava siedmich základných jednotiek sústavy SI.

44 *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, Annalen der Physik **309** (1901), 553-563

45 *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes . . .*, Annalen der Physik **17** (1905), 549-560,

množstvách – kvantách, ktoré až neskôr dostali meno *fotóny*. Takéto vysvetlenie predstavovalo istú podporu Newtonovej korpuskulárnej teórii svetla, čo pri paralelnom akceptovaní vlnovej povahy svetla neskôr viedlo k používaniu názvu *korpuskulárno-vlnový dualizmus*.

V tom istom roku a opäť v časopise *Annalen der Physik* **Einstein** publikoval článok o *špeciálnej teórii relativity*. Článok mal nadpis *O elektrodynamike pohybujúcich sa telies*⁴⁶. Teória spočívala na dvoch predpokladoch (postulátoch) – a) všetky inerciálne sústavy sú rovnocenné a b) rýchlosť svetla nezávisí od pohybu, ani voľby vzťažnej sústavy, vzhľadom na ktorú sa meria, čo je v súlade s výsledkom Michelsonovho pokusu. Teória priniesla nové chápanie priestoru a času, relatívnosť časových a dĺžkových údajov, relatívnosť súčasnosti dejov, závislosť hmotnosti od rýchlosti, ako aj ekvivalenciu energie a hmotnosti telies, vyjadrenú vzťahom $E = mc^2$. Galileiho transformácie, vyjadrujúce vzťahy súradníc a času medzi dvoma vzťažnými sústavami, boli nahradené Lorentzovými transformáciami. Tie, na rozdiel od Galileiho transformácií, sú kompatibilné s Maxwellovými rovnicami. Treba poznamenať, že Lorentzove transformácie odvodili ešte pred Einsteinom Hendrik **Lorentz** a Joseph **Larmor** (1857 – 1942), a Henri **Poincaré** (1854 -1912) z nich v roku 1905 odvodil transformáciu rýchlosti. Štvorrozmerný časopriestor umožňujúci geometrickú interpretáciu špeciálnej teórie relativity zaviedol Hermann **Minkowski** (1864 – 1909) v roku 1907.

V roku 1907 Albert **Einstein** vypracoval teóriu tepelnej kapacity tuhých látok predpokladom o atónoch ako kvantových harmonických oscilátoroch. O päť rokov neskôr teóriu zdokonalil Peter **Debye** (1884 – 1966).

V roku 1911 Ernest **Rutherford**, po pokusoch s rozptylom častíc alfa na tenkej zlatej fólii usúdil, že atóm sa skladá z kladne nabitého jadra obklopeného záporne nabitými elektrónmi – vznikol *planetárny model atómu*. Podľa klasickej elektromagnetickej teórie takáto sústava nemôže byť stabilná. Problém vyriešil Niels **Bohr** (1885 – 1962) v roku 1913 poloklasickým modelom, založeným na troch postulátoch⁴⁷. Podľa tohto modelu elektrón v atóme vodíka sa môže nachádzať len na určitých hladinách energie, pričom pri jeho preskoku na nižšiu energiu sa vyžiarí kvantum energie s presne určenou vlnovou dĺžkou. To bolo prvé prijateľné vysvetlenie diskretných spektier atómov. *Bohrov model* atómu vodíka – prvý kvantový model atómu – vznikol na základe predstáv Rutherfordovho planetárneho modelu a Planckovej kvantovej hypotézy. Na základe svojho modelu, rozšíreného Arthurom **Sommerfeldom** (1868 - 1951), Bohr v roku 1921 teoreticky vysvetlil periodickú sústavu prvkov.

V roku 1911 bola objavená supravodivosť, na čom má zásluhu Heike **Kamerling Onnes** (1853 -1926). Vysvetliť sa ju podarilo až po druhej svetovej vojne.

46 *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* **17** (1905), 891-921

47 *On the Constitution of Atoms and Molecules*, 3 články vo *Philosophical Magazine* (1913)

V roku 1912 bola pomocou difrakcie na kryštáloch dokázaná vlnová povaha röntgenového žiarenia, a to pokusom, ktorý navrhol Max **Laue** (1879 – 1960). Pokus súčasne preukázal pravidelné usporiadanie atómov v kryštáloch, existenciu kryštálovej mriežky.

V súvislosti s Bohrovým modelom boli zavedené *kvantové čísla* slúžiace na opis stavu elektrónov v atóme. V Bohrovom modeli vystupuje len tzv. *hlavné* kvantové číslo, určujúce energiu sústavy jadro – elektrón. Sommerfeld v roku 1916 zaviedol ďalšie dve⁴⁸ - druhé, tzv. *orbitálne*, súvisiace s excentricitou eliptickej dráhy elektrónu a určujúce veľkosť jeho momentu hybnosti a tretie, *magnetické*, súvisiace s orientáciou eliptickej dráhy vzhľadom na vonkajšie magnetické pole. Štvrté kvantové číslo – *spinové* – bolo zavedené v roku 1924.

Len rok po Bohrovom uverejnení kvantového modelu atómu James **Franck** (1882 – 1964) a Gustav **Hertz** (1887 – 1975) experimentálne potvrdili kvantový charakter atómov. V ich pokuse rýchle elektróny letiace cez riedke ortuťové pary strácali pri nepružných zrážkach s atómami ortute vždy len určitú hodnotu kinetickej energie – takú, ktorá bola potrebná na prechod atómu do vyššieho kvantového stavu.

Ešte pred touto udalosťou, v roku 1913, Robert **Millikan** (1868 - 1953) zmeral veľkosť náboja elektrónu. Pomer náboja a hmotnosti určil už predtým Joseph **Thomson**, čo umožnilo určiť aj hmotnosť elektrónu. Thomson určil tento pomer na zdokonalenom type hmotnostného spektrometra, pôvodne navrhnutého Wilhelmom Wienom už v roku 1899.

Postupujúc podľa rokov treba na tomto mieste uviesť **Einsteinovu všeobecnú teóriu relativity**, ktorú predstavil v roku 1915 na zasadnutí Pruskej akadémie vied. Správa mala názov *Rovnice gravitačného poľa* (*Die Feldgleichungen der Gravitation*). Teória zrovnoprávnila všetky vzťahné sústavy, nielen inerciálne, ktorých sa týkala špeciálna teória relativity. Z rovníc vyplynulo zakrivenie priestoru, aj ohyb svetla vplyvom gravitačného poľa. V nasledujúcich rokoch Einstein podal správy aj o riešení týchto rovníc, o ich kozmo-logických aspektoch a o možnej existencii gravitačných vln.

V roku 1917 **Einstein** publikoval významnú prácu *O kvantovej teórii žiarenia*⁴⁹, v ktorej sa zaoberal kvantovými prechodmi, aj stimulovanými, ktoré sú rozhodujúce z hľadiska činnosti laserov.

S prvou umelo vytvorenou jadrovou reakciou z roku 1917 sa spája opäť meno Ernest **Rutherford**. Ožaroval dusíkové jadrá časticami alfa, pričom sa uvoľňovali dovtedy neznáme častice, ktoré o tri roky neskôr dostali meno – *protóny*.

Významný medzník v teoretickej fyzike predstavovala práca Emmy **Noether** (1882 – 1935), publikovaná v roku 1918, týkajúca sa súvislosti zovšeobecnených symetrií a zákonov zachovania. Podľa jej teorémy homogénnosť času súvisí so

48 *Zur Quantentheorie der Spektrallinien* Annalen der Physik **57** (1916), 1-94

49 *Zur Quantentheorie der Strahlung*, Physikalische Zeitschrift **18** (1917) 121-128

zákonom zachovania energie, homogénnosť priestoru so zákonom zachovania hybnosti. Teoréma sa uplatnila aj vo fyzike elementárnych častíc, pri tvorbe tzv. štandardného modelu ich súboru.

V roku 1922 Otto **Stern** (1888 – 1969) a Walther **Gerlach** (1889 – 1979) uskutočnili pokus, ktorým zistili, že priemet magnetického momentu atómov je kvantovaný, má niekoľko diskretných hodnôt. Výsledok pokusu s atómami striebra – existencia len dvoch hodnôt priemetu – naznačil existenciu vlastného magnetického momentu elektrónu. V roku 1925 George **Uhlenbeck** (1900 – 1988) a Samuel **Goudsmith** (1902 – 1978) predložili jednoduchú interpretáciu pokusu, keď elektrón považovali za časticu rotujúcu okolo vlastnej osi (spinning particle – odtiaľ názov *spin*), ktorá môže voči magnetickému poľu zaujať len dve polohy. Ešte predtým, v roku 1924, Wolfgang **Pauli** (1900 – 1968) zaviedol štvrtý stupeň voľnosti pre elektróny – neskôr daný do súvislosti so spinovým kvantovým číslom. Bol to výsledok Pauliho úsilia eliminovať nezrovnalosti pozorované v spektrách atómov. O rok neskôr, teda 1925, sformuloval *Pauliho vylučovací princíp*, podľa ktorého v atóme nemôžu existovať elektróny, ktoré by mali všetky štyri kvantové čísla rovnaké. Neskôr (1940) sa zistila jeho platnosť pre všetky fermióny – tj. častice s poločíselným spinom; ide o ich fundamentálnu vlastnosť. Kvantovú teóriu spinu Pauli vypracoval v roku 1927⁵⁰.

Arthur **Compton** (1892 - 1962) sa zaoberal zrážkami fotónov s voľnými elektrónmi. Výsledky a ich teoretické zdôvodnenie publikoval v roku 1923⁵¹. Pri zrážke fotón odovzdá elektrónu časť svojej energie aj hybnosti; strata energie fotónu sa prejaví zväčšením jeho vlnovej dĺžky (*Comptonov jav*). Aj tento experiment ukázal – podobne ako fotoelektrický jav – že elektromagnetické žiarenie má aj časticovú povahu. Tento jav sa nedá vysvetliť bez využitia výsledkov teórie relativity.

V roku 1924 Louis **de Broglie** (1892 – 1987) prišiel s prevratnou myšlienkou, že ak elektromagnetické žiarenie má vlnovú aj časticovú povahu, tak aj naopak, častice by sa mali vyznačovať vlnovými vlastnosťami⁵². Jeho hypotéza *vlnovo-časticovej duality* bola pomerne rýchlo experimentálne overená, keď v roku 1927 Clinton **Davisson** (1881 – 1958) a Lester **Germer** (1896 – 1971) pozorovali difrakciu zväzku elektrónov na povrchu kryštálu niklu, čím sa potvrdili ich vlnové vlastnosti.

Hypotéza de Broglieho, spolu s výsledkami experimentov Francka a Hertza, Millikena, Comptona, Sterna a Gerlacha, a Davissona s Germerom, boli podnetom na vznik kvantovej mechaniky, ktorej začiatok súvisí s prácami Heisenberga a Schrödingera.

50 *Zur Quantenmechanik des magnetischen Electrons*, Zeitschrift für Physik **43** (1927) 601

51 *A Quantum theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements*, Physical Review **21** (1923) 483 - 502

52 *Recherches sur la théorie des quanta*, Thesis, Paris, 1924, Ann. de Physique **3**, (1925) 22

Erwin **Schrödinger** (1887 – 1961) videl v hypotéze de Broglieho prirodzené východisko na získanie kvantovania energie elektrónov v atómov. Ak elektrón v atóme má vlnové vlastnosti, tak vzhľadom na obmedzený priestor by mu mali prislúchať len určité vlnové dĺžky (resp. frekvencie) a tým aj energie; podobne ako frekvencie kmitania napätej struny. V súlade s de Broglieho hypotézou Schrödinger vo vlnovej funkcii opisujúcej výchylku postupujúcej vlny nahradil vlnovú dĺžku a frekvenciu hybnosťou resp. kinetickou energiou elektrónu. Pre takto upravenú vlnovú funkciu našiel príslušnú diferenciálnu rovnicu, známu ako *Schrödingerova*. Jej riešenia – *vlnové funkcie* – je možné získať len pri istých dovolených, tzv. *vlastných hodnotách* energie. Tým bolo matematicky zdôvodnené kvantovanie energií, ktoré Niels Bohr len postuloval. Schrödinger tieto výsledky publikoval v roku 1926 v časopise *Annalen der Physik* v štyroch na seba nadväzujúcich článkoch s nadpisom *Kvantovanie ako problém vlastných hodnôt*⁵³. Pre Schrödingerovu teóriu sa používa pomenovanie *kvantová mechanika*, niekedy aj *vlnová mechanika*.

O význame vlnovej funkcie sa viedli dlhé diskusie, a z roku 1926 pochádza jej pravdepodobnostná interpretácia sformulovaná Maxom **Bornom** (1882 – 1970). Podľa nej sa vlnové funkcie vyznačujú tým, že ich kvadrát má význam objemovej hustoty pravdepodobnosti výskytu častice ako funkcie priestorových súradníc. To znamená, že v takýchto prípadoch neplatí klasický determinizmus, nie je možné presne určiť nasledujúcu polohu a rýchlosť častice. Kvantovomechanický determinizmus umožňuje pre časticu určiť len pravdepodobnosť zaujatia konkrétnej polohy a rýchlosti.

Rok pred spomenutými Schrödingerovými publikáciami Werner **Heisenberg** (1901 – 1976) uverejnil svoj prístup ku kvantovej teórii, všeobecne označovaný ako *maticová kvantová mechanika*. Na rozdiel od Schrödingera nevychádzal z de Broglieho hypotézy, ale z Bohrovej kvantovej hypotézy. V úvode svojho článku⁵⁴ vyjadril názor, že teóriu buduje výlučne na vzťahoch medzi pozorovateľnými veličinami. Jeho teória sa nezaoberá súradnicami či orbitálmi častíc, ale možnými energiami elektrónov v atóme, vyžarovanými frekvenciami a pravdepodobnosťami kvantových prechodov medzi možnými stavmi atómu. Oveľa častejšie sa však cituje Heisenbergov *princíp neurčitosti*, ktorý sformuloval v roku 1927. Vyjadruje principiálnu nemožnosť súčasného presného určenia polohy a rýchlosti častice. Ide o fundamentálnu vlastnosť kvantových sústav, ktorú nie je možné prekonať zdokonalením meracej techniky. Svoje názory na kvantovú teóriu zhrnul v knihe vydané v roku 1930 – *The Physical Principles of the Quantum Theory*.

53 *Quantisierung als Eigenwertproblem* (Erste Mitteilung) *Annalen der Physik*, (4), **79** (1926) + ďalšie tri články

54 *Zeitschrift für Physik*, **33** (1925), 879

Schrödingerova rovnica nezohľadňuje relativistické javy v kvantových sústavách. O dva roky po Schrödingerovi, v roku 1928, Paul **Dirac** (1902 – 1984) odvodil relativistickú *Diracovu rovnicu* týkajúcu sa elektrónu resp. častíc s poločíselným spinom. Na základe výsledkov, ktoré z nej vyplývajú predpovedal existenciu *pozitrónu*, objaveného o štyri roky neskôr (1932). Poznatky o kvantovej mechanike zhrnul v často citovanej učebnici z roku 1930 *Princípy kvantovej mechaniky*⁵⁵, v ktorej ukázal rovnocennosť Heisenbergovej a Schrödingerovej formulácie kvantovej mechaniky, ako dva aspekty tej istej teórie.

Kvantová mechanika sa uplatnila nielen v atómovej fyzike, ale aj pri opise molekúl, tuhých látok, či elementárnych častíc, kde dosiahla významné úspechy.

V rokoch 1924 a 1925 vznikala *Boseho – Einsteinova štatistika*, vzťahujúca sa na sústavu navzájom nerozlíšiteľných a neinteragujúcich častíc s celočíselnými hodnotami spinového kvantového čísla – na tzv. bozóny. Neplatí pre ne Pauliho vylučovací princíp. Protikladom je *Fermiho – Diracova štatistika*, platná pre fermióny (častice s poločíselným spinom), ktorá vznikla v roku 1926. Obidve štatistiky sa týkajú kvantových súborov, vyjadrujú pravdepodobnosti rozdelenie častíc po dovolených energetických hladinách.

Pribúdali objavy ďalších častíc, v roku 1931 *deuterón* a v roku 1932 *neutrón*. Cestu k objavu neutrónu dláždili aj manželia Iréne (1897 – 1956) a Frédéric **Joliot-Curie** (1900 - 1958), pokusmi s ožarovaním bóru a berília časticami alfa. Pri neskorších pokusoch ožarovaním hliníka a bóru zistili, že časť atómov sa premenila na fosfor, resp. na rádioaktívny izotop dusíka. Tak objavili *jadrovú fúziu* – zlučovanie jadier, v týchto dvoch prípadoch jadra hélia s jadrami hliníka a bóru.

Objavom neutrónu, o ktorý sa zaslúžil James **Chadwick** (1891 – 1974), ku ktorému však mali blízko manželia Curieovci, boli vytvorené podmienky na uskutočnenie nových jadrových reakcií vyvolaných neutrónmi, ale aj na dotvorenie názoru o zložení atómových jadier. Model jadra skladajúceho sa z protónov a neutrónov ešte v tom istom roku vytvorili Dmitrij **Ivanenko** (1904 – 1994) a Werner **Heisenberg**. Úspešný model jadrových síl vytvoril v roku 1935 Hideki **Yukawa** (1907 – 1981) predstavou o výmene π - mezónov medzi nukleónmi, ktorých existencia bola experimentálne dokumentovaná až v roku 1947.

V roku 1934 Enrico **Fermi** (1901 – 1954) vypracoval teóriu premeny beta, podľa ktorej sa jadrový neutrón zmení na protón, pričom sa vyžiari elektrón. Aby pri tejto premene nebol narušený zákon zachovania energie a zákon zachovania hybnosti, Wolfgang **Pauli** už v roku 1930 navrhol chýbajúcu energiu riešiť vyžiarení *neutrína* vtedy ešte hypotetickej častice. Teoretické vysvetlenie rozpadu neutrónu pri tejto premene si vyžiadalo popri silnej jadrovej interakcii zaviesť *slabú jadrovú interakciu*, tj. štvrtú fundamentálnu fyzikálnu interakciu.

55 *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, 1930

V tom istom roku 1934 začal Fermi skúmať jadrové reakcie vyvolané pomalými neutrónmi, pri ktorých vznikali nové rádioaktívne izotopy. Experimenty s pomalými neutrónmi sa uskutočňovali aj v iných laboratóriách a v roku 1938 sa Ottovi **Hahnovi** (1879 – 1968), a jeho asistentovi Fritzovi **Strassmanovi** (1902 – 1980) podarilo bombardovaním uránu vytvoriť izotop takmer o polovicu ľahšieho bária. Hahn o výsledku listom informoval bývalú kolegyňu Lise **Meitner** (1878 – 1968), ktorá spolu s Ottom **Frischom**⁵⁶ (1904 – 1979) výsledok experimentu interpretovala; článok uverejnili v časopise Nature⁵⁷. V článku uviedli, že pri reakcii sa uvoľňuje značné množstvo energie. O pár mesiacov bol uverejnený článok o množení neutrónov pri tejto reakcii, s poukazom na možnosť jadrovej reťazovej reakcie⁵⁸.

K akým dôsledkom viedlo poznanie štiepnej reťazovej reakcie, je už všeobecne známe. Prvý jadrový reaktor bol uvedený do chodu v decembri 1942 pod vedením Enrica Fermiho, prvá jadrová bomba bola vyskúšaná v júli 1945.

Na konci dvadsiatych rokov sa začala rozvíjať kvantová teória polí, ktorá sa dodnes využíva pri konštrukcii modelov subatomárnych častíc a vo fyzike kondenzovaných látok. Predstavuje spojenie klasickej teórie poľa, kvantovej mechaniky a teórie relativity. Schrödingerova nerelativistická verzia kvantovej mechaniky nie je spôsobilá poskytnúť informácie o relativistických časticiach, napríklad o fotónoch, ktoré sa pohybujú rýchlosťou svetla. Vierohodný opis vzniku či zániku fotónov dokáže len kvantová teória polí. Jej začiatok sa zvyčajne kladie do roku 1927 v súvislosti s Diracovým článkom *Kvantová teória emisie a absorpcie žiarenia*⁵⁹, v ktorom sa podujal kvantovať elektromagnetické pole. Pre novú teóriu Dirac použil názov *kvantová elektrodynamika*, ktorá sa stala prvou z vypracovaných kvantových teórií poľa. Poskytuje dokonalý opis interakcie svetla s látkou. Elektromagnetické pole predstavil ako súbor harmonických oscilátorov, ktoré podľa kvantovej mechaniky môžu nadobúdať len diskrétné hodnoty energie. Fotóny vznikajú, resp. zanikajú pri zmene energie niektorého z oscilátorov. Dirac tak vytvoril teoretický základ pre kvantovanie aj iných fyzikálnych polí.

Po druhej svetovej vojne vedúcu úlohu vo vývoji fyziky prevzali USA. Na konci štyridsiatych rokov vznikla zásluhou Richarda **Feynmana** (1918 - 1988), Juliana **Schwingera** (1918 – 1994) a Freemana **Dysona** (1923 – 2020) nová formulácia kvantovej teórie polí, vrátane kvantovej elektrodynamiky. Feynman v tom

56 Meitnerová po emigrácii z Nemecka nesmela publikovať s Hahnom, preto nie je spoluautorom.

57 *Desintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction*, Nature **143** (1939) 239-240

58 H. von Halban, F. Joliot and L. Kowarski, Nature **143** (1939) 470 and 680

59 *The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation*, Proceedings of the Royal Society of London **114** (1927) 243-65

období vytvoril aj metódu dráhových integrálov⁶⁰. Koncom sedemdesiatych rokov kvantová teória polí dospela k úspešnému opisu silných aj slabých jadrových síl a k vytvoreniu štandardného modelu fyziky častíc. Kvantová teória polí síce doposiaľ nedokázala opísať gravitačné sily, ale stále je významnou metódou teoretickej fyziky v rôznych jej oblastiach.

Po druhej svetovej vojne sa do popredia dostala aj fyzika tuhých látok, najmä fyzika polovodičov, kde to viedlo k objavu tranzistora v roku 1947. Za objavom stáli John **Bardeen** (1908 – 1991), Walter **Brattain** (1902 – 1987), pričom vedúcim laboratória bol Wiliam **Shockley** (1910 - 1981). Objav tranzistora postupne viedol k miniaturizácii polovodičových súčiastok, k integrovaným obvodom a procesorom.

V období po vojne metódy kvantovej elektrodynamiky poskytli vysvetlenie takým významným javom, ako supravodivosť a supratekutosť. Prvá, tzv. fenomenologická teória supravodivosti, ktorú vypracovali Vitalij **Ginzburg** (1916 - 2009) a Lev **Landau** (1908 - 1968) vznikla v roku 1950. Vychádzala z Landauovej teórie fázových prechodov, a úspešne vysvetlila makroskopické vlastnosti supravodičov. Mikroskopickú teóriu vypracovali John **Bardeen**, Leon **Cooper** (1930 -) a John **Schrieffer** (1931 – 2019) v roku 1957. Táto, tzv. BCS teória vysvetľuje prúd v supravodičoch ako supratekutinu Cooperových párov – tj. párov elektrónov, ktoré interagujú s fonónmi⁶¹. V roku 1980 bol objavený kvantový Hallov jav (Klaus **von Klitzing** *1943) a v roku 1986 vysokoteplotné supravodiče (Georg **Bednorz** *1950 a Alex **Miller** *1927). Tieto objavy mali veľký dopad nielen na pokrok v technológiach, ale aj na teóriu tuhých látok, najmä na teóriu fázových prechodov.

Technológia radarov rozvinutá počas druhej svetovej vojny, prispela k vzniku nových experimentálnych metód, aj k vývoju *maserov*⁶² (uprostred 50-tych rokov) a po nich aj *laserov* (60-te roky). Objavená bola *elektrónová paramagnetická rezonancia* a *jadrová magnetická rezonancia*, ktoré majú význam nielen ako analytické metódy vo fyzike a chémii, ale jadrová rezonancia aj ako medicínska diagnostická metóda.

60 Ide o iný spôsob formulácie kvantovej teórie, určenie stavu objektu superpozíciou všetkých možných histórií objektu.

61 *Theory of superconductivity*, Physical Review **108** (1957), 1175-1205

62 Maser je kvantový generátor koherentného elektromagnetického žiarenia, vznikajúceho stimulovanou emisiou. Špeciálnym prípadom je laser, vyžarujúci vo viditeľnej oblasti.

Ďalší vývoj fyziky po druhej svetovej vojne

Osobitne sa treba zmieniť o úsilí vedcov zostaviť úplnú tabuľku elementárnych častíc, vytvoriť tzv. štandardný model. Ich úsiliu veľmi pomohlo vybudovanie veľkých urýchľovačov častíc a ich detektorov.

V 60-tych rokoch sa pri zostavovaní tabuľky ukázala užitočnosť využitia symetrií⁶³ a ich formulácií prostredníctvom kvantovej teórie polí, pri ktorých zohrali svoju úlohu tzv. kalibračné teórie. Veľký teoretický význam nadobudol objav narušenia jednej zo základných symetrií pri slabej jadrovej interakcii (1956) – narušenie parity⁶⁴. Významným prínosom k teórii elementárnych častíc bola hypotéza kvarkov – bodových častíc, z ktorých sa podľa tzv. chromodynamiky skladajú mezóny a baryóny⁶⁵ (70. roky). Tým boli zavŕšené práce na tzv. štandardnom modeli elementárnych častíc. Niektoré kvarky boli neskôr objavené pri pokusoch s časticami urýchlenými na extrémne vysoké energie. V 90. rokoch boli postupne objavené všetky teóriou predpovedané kvarky a v roku 2010 aj Higgsov bozón, ktorým bola skompletizovaná „zoologická záhrada“ elementárnych častíc.

V 60. rokoch došlo k zjednoteniu opisu slabej a elektromagnetickej interakcie. Ku koncu 70. rokov do štandardného modelu vstúpila teória strún, ktorá namiesto bodových kvarkov začala uvažovať o útvaroch konečných rozmerov, s vlastnosťami pripomínajúcimi struny. Teória strún mala za cieľ aj zjednotenie teórie gravitácie s kvantovou teóriou, čo sa zatiaľ nepodarilo.

V roku 2015 bola priamou detekciou potvrdená existencia gravitačných vĺn, ktoré predpovedal Einstein už v roku 1916.

Veľké úspechy boli v dvadsiatom storočí dosiahnuté v kozmológii, o vzniku a vývoji vesmíru, o čom by však bolo treba napísať samostatnú kapitolu. Spomenieme aspoň kvasary, pulzary, mikrovlnné pozadie, neutrónové hviezdy, alebo čierne diery. Pokroku významne pomohli nové technológie optických teleskopov aj rádioteleskopov.

K rýchlemu vývoju v týchto oblastiach pomohla miniaturizácia elektronických obvodov, ktorá začala objavom tranzistora a umožnila konštrukciu extrémne výkonných počítačov.

Stále existujú pokusy vytvoriť všeobecnú teóriu poľa, zahŕňajúcu všetky štyri fundamentálne interakcie, teda aj gravitačnej. V priebehu 20. storočia pokračovali pokusy vytvoriť kvantovú teóriu gravitácie.

Vývoj v posledných rokoch možno do istej miery posúdiť podľa udeľovania Nobelových cien za fyziku, uvedených v priloženej tabuľke.

63 Išlo o symetrie predstavujúce invariantnosť dejov pri inverzii času, priestoru a elektrického náboja

64 Ide v podstate o rovnocennosť „pravého“ a „ľavého“. K ich zámene dochádza pri inverzii priestoru, tj. pri zmene znamienka polohových vektorov všetkých bodov v priestore. Z pravotočivej súradnicovej sústavy vznikne ľavotočivá.

65 Medzi baryony patria tzv. ťažké častice, najmä protóny a neutróny. Mezóny sa skladajú z dvoch, nukleóny z troch kvarkov.

Jednotky fyzikálnych veličín

Jednotky fyzikálnych veličín, ich výber, aj definície, prešli pomerne dlhým vývojom. Prvé definície vytvorené na základe prírodných konštánt vznikli na konci 18. storočia a tento trend potom pokračoval. Vývoj jednoznačne súvisel s prehlbovaním fyzikálnych poznatkov. Jednotky dĺžky, plošného obsahu, objemu, hmotnosti aj času sa používali už pred vyše 5000 rokmi, o čom svedčia zachované písomné doklady z obdobia Sumerov alebo starého Egypta. Doložené sú aj názvy niektorých týchto jednotiek, a možno ich nájsť napríklad v knihe *Míry, jednotky, veličiny*⁶⁶. Dalo by sa do istej miery povedať, že už z tohto obdobia pochádza jednotka času *sekunda*, ako časový úsek predstavujúci zlomok trvania jedného dňa. Delenie dňa na 24 hodín malo praktický význam, lebo číslo 24 je deliteľné číslami 12, 8, 6, 4, 3 aj 2. Ďalšie delenie celku na 60 častí má pôvod v babylonskej šesťdesiatkovej sústave, ale meranie času na sekundy bolo umožnené až vynálezom kyvadlových hodín v 17. storočí. Z najstaršieho obdobia ľudských dejín je pozoruhodné aj delenie kruhu na 360 stupňov, čo má súvislosť s predpokladanou dĺžkou roka 360 dní. Veľkosť jednotky dĺžky sa v minulosti volila na základe antropomorfných údajov – ako palec, lakeť, či stopa, čo sú názvy jednotiek, používané v niektorých štátoch doposiaľ. Takýto spôsob voľby jednotiek mal za následok nejednotnosť ich veľkosti, rovnaké nebývali ani pri jednotkách s rovnakým názvom (napr. galón v USA, galón v UK).

Až do konca 18. storočia sa veľkosti jednotiek dĺžky, plošného obsahu, objemu či hmotnosti odlišovali nielen medzi štátmi, ale často aj medzi susednými regiónmi. Úsilie zjednotiť a objektivizovať veľkosť jednotiek dosiahlo svoju realizáciu na konci 18. storočia počas Veľkej francúzskej revolúcie, keď Ústavodarné národné zhromaždenie rozhodlo zaviesť sústavu jednotiek založenú na princípoch logiky a prírodných javov. Meter bol vtedy definovaný ako desaťmiliónta časť vzdialenosti od pólu po rovník meranej pozdĺž poludníka a kilogram ako tisícina hmotnosti kubického metra čistej vody. Je pozoruhodné, že tieto dve jednotky pretrvali až do súčasnosti, napriek niekoľkým spresneniam ich definícií. Stali sa základom tzv. *metrickej sústavy* jednotiek, ktorá bola 20. mája 1875 oficiálne uznaná podpisom tzv. *Metrickej konvencie* sedemnástimi štátmi⁶⁷. Ku konvencii sa postupne pridávali ďalšie štáty, Česko-Slovensko v roku 1922.

Metrická sústava, ktorej základ tvorili meter a kilogram sa postupne rozširovala o jednotky ďalších veličín, budovaných na ich základe (napr. jednotky plošného

66 Ivan Kapler: *Míry, jednotky, veličiny*, Repronis, Ostrava 2000

67 Argentína, Belgicko, Brazília, Dánsko, Francúzsko, Nemecko, Osmanské ríša, Peru, Portugalsko, Rakúsko-Uhorsko, Rusko, Španielsko, Švédsko a Nórsko, Švajčiarsko, Taliansko, USA, Venezuela

obsahu, objemu, hustoty). V roku 1889 bola *Generálnou konferenciou o váhach a mierach* (Conférence Générale des Poids et Mesures - CGPM) schválená sústava **MKS** (meter, kilogram, sekunda), pričom boli schválené aj nové prototypy metra a kilogramu. Spolu so sekundou, už dlhšie používanou v astronómii, vytvorili sústavu založenú na troch základných jednotkách. Návrh na pridanie ampéra ako štvrtej základnej jednotky pochádza z roku 1901 od G. Giorgiho⁶⁸, ale až v roku 1954 bol *ampér*, spolu s jednotkami *kelvin* a *kandela* prijatý medzi základné. Prijatím Giorgiho návrhu sa vytvorila koherentná sústava jednotiek vhodná aj na opis elektromagnetických javov, niekedy označovaná ako **MKSA**, alebo **Giorgiho** sústava. Táto sústava bola v roku 1960 na 11. CGPM premenovaná na **Medzinárodnú sústavu jednotiek**, so skratkou **SI** (Système International d'unités). Obsahovala 6 základných jednotiek – meter, kilogram, sekunda, ampér, kelvin a kandela. Siedma základná jednotka *mól*, jednotka *látkového množstva*, bola do sústavy SI zaradená v roku 1971.

Ešte pred oficiálnym prijatím sústavy MKS sa vo vedách, najmä vo fyzike používala sústava s tromi základnými jednotkami – centimeter, gram a sekunda, označovaná ako sústava **CGS**. Podrobnejšie údaje o tejto sústave sú uvedené v samostatnej časti tohto textu.

V niektorých fyzikálnych časopisoch sa objavujú články, v ktorých autori používajú tzv. *prirodzenú sústavu jednotiek*. Sú to viaceré sústavy, ktorých základom sú univerzálne fyzikálne konštanty, napr. elementárny elektrický náboj, či rýchlosť svetla, ktorým sa prisudzuje číselná hodnota 1. Takto zvolené konštanty sa môžu zo zápisov rovníc vynechať, čo síce zjednodušuje zápis rovníc, ale sťažuje až znemožňuje tzv. rozmerovú analýzu.

Údaje o britsko-americkej sústave jednotiek do tohto textu nie sú zaradené. Metrickú konvenciu podpísal zástupca USA už v roku 1875, chýbal však reprezentant Veľkej Británie a tak táto sústava sa aj v súčasnosti používa vo viacerých štátoch. Americký metrologický inštitút NIST (National Institute of Standards and Technology) podporuje a propaguje používanie metrických jednotiek, ale jeho úsilie nenachádza primeranú odozvu.

Medzinárodná sústava jednotiek - SI

Medzinárodná sústava jednotiek predstavuje súčasnú formu metrickej sústavy. Obsahuje dve skupiny – *základné jednotky* a *odvodené jednotky*. V súčasnosti je definovaných sedem základných jednotiek – *meter* (m), *kilogram* (kg), *sekunda* (s), *ampér* (A), *kelvin* (K), *mól* (mol) a *kandela* (cd). Základné jednotky SI sú jednotkami siedmich základných veličín: dĺžky, hmotnosti, času, elektrického prúdu,

68 Giovanni Giorgi (1871 – 1950), taliansky elektrotechnický inžinier

termodynamickej teploty, látkového množstva a svietivosti. Pri ostatných veličinách ide o odvodené jednotky (napr. volt, ohm, joule, watt, pascal, radián, lúmen atď.). Zatiaľ čo spočiatku boli jednotky metrickej sústavy definované na základe prototypov (meter, kilogram), neskôr prevládlo úsilie definovať ich pomocou univerzálnych konštánt, resp. prírodných invariantov. Cieľom bolo aj umožniť realizáciu štandardov jednotiek v ktoromkoľvek metrologickom laboratóriu, aby nebolo potrebné porovnávať národné etalóny s medzinárodnými etalónmi uloženými v Medzinárodnom úrade pre váhy a miery (BIPM). V roku 1960 sa s týmto úmyslom uskutočnila zmena definície metra, namiesto dĺžky prototypu bol meter definovaný na základe vlnovej dĺžky žiarenia kryptónu a v roku 1967 bola prijatá definícia sekundy prostredníctvom frekvencie (doby kmitu) žiarenia atómov cézia. V roku 1983 bola opäť zmenená definícia metra, odvtedy meter predstavuje vzdialenosť, ktorú svetlo prejde vo vákuu za definovaný zlomok sekundy. Tým sa do definícií základných jednotiek SI dostali dva prírodné invarianty – rýchlosť svetla a frekvencia žiarenia atómov cézia. Už predtým bola jednotka teploty kelvin definovaná na základe trojitého bodu vody, do definícia ampéra vstupovala magnetická konštanta (permeabilita vákua), mól bol definovaný cez Avogadrovu konstantu a kandela prostredníctvom experimentálne určenej svetelnej účinnosti žiarenia. Kilogram zostal jedinou základnou jednotkou definovanou prostredníctvom prototypu. V prvých rokoch 21. storočia sa začali pripravovať návrhy na nové definície ampéra, kilogramu, mólu a kelvina, aby sa v nich využívali fundamentálne fyzikálne konštanty. Na tento účel bolo zvolených sedem konštánt a dohodou určené ich *pevné hodnoty*. Ide o tieto konštanty: Planckova konštanta, elementárny náboj, Boltzmannova konštanta, Avogadrova konštanta, rýchlosť svetla, frekvencia žiarenia cézia a konštanta svetelnej účinnosti.

V novembri 2018 na 26. CGPM bolo prijaté rozhodnutie o nových definíciách siedmich základných jednotiek SI podľa ktorého sú definované takýmito vzťahmi

sekunda na základe frekvencie žiarenia atómov cézia

meter na základe rýchlosti svetla a sekundy

kilogram prostredníctvom Planckovej konštanty, sekundy a metra

ampér na základe veľkosti elementárneho náboja a sekundy

kelvin na základe Boltzmannovej konštanty, metra, kilogramu a sekundy

mól prostredníctvom Avogadrovej konštanty

kandela prostredníctvom svetelnej účinnosti, metra, kilogramu a sekundy.

Definície v plnej verzii s uvedenými hodnotami konštánt sú dostupné na adrese Medzinárodného ústavu pre váhy a miery (BIPM), stačí na vyhľadávači zvoliť *BIPM* a potom *SI Brochure*. Alternatívny zdroj je na adrese *2019 redefinition of base SI units*, kde je graficky znázornená vzájomná súvislosť medzi jednotkami a konštantami.

V skrátnnej a zrozumiteľnejšej forme, zachovajúc podstatu, definície vyzerajú takto:

sekunda (s) predstavuje časový interval zhodný s 9 192 631 770 periódami žiarenia vysielaného izotopom cézia -133 .

meter (m) je definovaný predpokladom, že rýchlosť svetla vo vákuu má pevnú hodnotu 299 792 458 m/s, pričom sekunda je definovaná prostredníctvom frekvencie žiarenia cézia.

Je to len inak sformulovaná predchádzajúca definícia, podľa ktorej meter je vzdialenosť, ktorú svetlo prejde vo vákuu za časový interval $1/299\,792\,458$ sekundy.

kilogram (kg) je definovaný prostredníctvom pevnej hodnoty Planckovej konštanty $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, pričom meter a sekunda sú definované rýchlosťou svetla a frekvenciou žiarenia vysielaného izotopom cézia -133 .

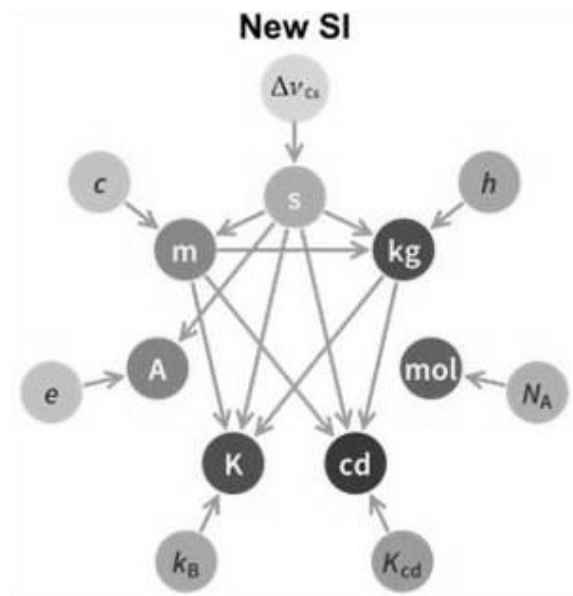
ampér (A) je definovaný prostredníctvom pevnej hodnoty elementárneho náboja $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$, pričom sekunda je definovaná prostredníctvom frekvencie žiarenia vysielaného izotopom cézia -133 .

To znamená, že ak má prierezom vodiča tiecť prúd veľkosti jeden ampér, musí za sekundu prierezom vodiča prejsť $1/(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$ elementárnych nábojov.

kelvin (K) je definovaný pomocou pevnej hodnoty Boltzmannovej konštanty $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, kde kilogram, meter a sekunda sú definované pomocou Planckovej konštanty, rýchlosti svetla a frekvencie žiarenia vysielaného izotopom cézia -133 . Táto definícia nahrádza definíciu prostredníctvom trojitého bodu vody.

mól (mol) - jednotka látkového množstva obsahuje presne $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementárnych entít. Tento počet je určený pevnou hodnotou Avogadrovej konštanty N_A .

kandela (cd) - jednotka svietivosti je definovaná prostredníctvom pevnej hodnoty svetelnej účinnosti $683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ týkajúcej sa monochromatického žiarenia s frekvenciou $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, pričom kilogram, meter a sekunda sú vyjadrené prostredníctvom Planckovej konštanty, rýchlosti svetla a frekvencie žiarenia vysielaného izotopom cézia -133 .



O fyzikálnych jednotkách, základných aj odvodených, existujú európske normy ISO, preložené do slovenčiny majú označenie napr.: STN EN ISO 80000-1. Viac na webovej adrese Slovenského ústavu technickej normalizácie (SÚTN).

Sústava jednotiek CGS

Sústava CGS má tri základné jednotky – jednotku dĺžky (centimeter – cm), jednotku hmotnosti (gram – g) a jednotku času (sekunda – s). Začiatok jej používania je spojený s návrhom C. F. Gaussa z roku 1832, rozšírenie na elektromagnetické veličiny súvisí s vybudovaním Maxwellovej teórie elektromagnetického poľa, z poslednej tretiny 19. storočia. V niektorých teoretických disciplínach sa občas ešte používa, ale v podstate ju už celkom nahradila sústava SI. Medzi odvodené jednotky týkajúce sa mechanických veličín patria napr. jednotka rýchlosti cm/s, zrýchlenia cm/s^2 , jednotka sily s názvom dyn: $1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2 (=10^{-5} \text{ N})$, aj jednotka práce s názvom erg, pričom platí: $1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 (=10^{-7} \text{ J})$. Sústava CGS našla celkom prirodzené uplatnenie v mechanike, ale nebola optimálna pre jednotky elektromagnetických veličín. Pre jednotky odvodených elektrických a magnetických veličín v rámci CGS sú známe tri varianty – sústava CGSE pre elektrické veličiny, sústava CGSM pre magnetické veličiny a Gaussova sústava, ktorá je ich kombináciou. Východiskom pre zavedenie jednotky elektrického náboja v CGSE, ktorá dostala názov statcoulomb (sC), bol Coulombov zákon. Bola určená tak, aby dva náboje s jej veľkosťou, pri vzájomnej vzdialenosti 1 cm, pôsobili na seba silou 1 dyn. Jej značka, zapísaná pomocou značiek základných jednotiek CGS, je $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{s}^{-1}$. Je podstatne menšia než jednotka náboja v SI (coulomb), prevodovým faktorom je číslo $2,998 \times 10^9$, presnejšie – desatina rýchlosti svetla vyjadrenej pomocou jednotky cm/s. Od statcoulombu sa odvíjali ďalšie jednotky – jednotka elektrického prúdu $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{s}^{-2}$

(statampér - sA), elektrického potenciálu $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{1/2}\text{s}^{-1}$ (statvolt) a ďalšie jednotky s kurióznymi značkami (rozmermi). Napr. kapacita kondenzátorov sa v CGSE vyjadrovala pomocou jednotky cm^1 , čo poukazuje na nedokonalosť sústavy jednotiek, ktorá neobsahuje základnú jednotku prirodzene vystihujúcu elektrické javy. V rámci tejto sústavy bolo možné odvodiť aj jednotky veličín vzťahujúcich sa na magnetické javy, ale takýto postup nebol optimálny. Východiskom pri zavádzaní odvodených jednotiek v sústave CGSM bol Ampérov zákon, pomocou ktorého sa dá vyjadriť sila pôsobiaca medzi dvoma veľmi dlhými rovnobežnými vodičmi. Jednotka elektrického prúdu bola potom definovaná tak, aby sila pôsobiaca na 1 cm dĺžky takýchto vodičov, pri ich vzájomnej vzdialenosti 1 cm, mala veľkosť 2 dyn (vzhľadom na faktor 2 vystupujúci vo vzťahu vyjadrujúcom túto silu). Jednotka dostala názov absolútny ampér (abA), pričom bola 10-krát väčšia, než súčasná jednotka SI – ampér. Zaujímavý je vzťah k statampéru, $1 \text{ abA} = 2,998 \times 10^{10} \text{ sA}$, kde uvedený prevodový faktor sa číselne zhoduje s rýchlosťou svetla c vyjadrenou v sústave CGS, teda v centimetroch za sekundu. Rýchlosť svetla c ako konštanta úmernosti vystupuje nielen v tomto prípade, ale aj v mnohých iných vzťahoch medzi veličinami sústav CGSE a CGSM. Je súčasťou aj Faradayovho zákona o elektromagnetickej indukcii, vyjadreného v Gaussovej sústave: $U_i = -(1/c)(d\Phi/dt)$, v ktorom indukované napätie U_i je vyjadrené jednotkou CGSE a magnetický tok Φ jednotkou CGSM. Napriek tomu, že jednotky veličín magnetického poľa bolo možné odvodiť v rámci sústavy CGSE a naopak, na opis elektromagnetických javov sa začala používať rozumnejšia Gaussova sústava. Elektrické veličiny – napríklad náboj, intenzita elektrického poľa, elektrický potenciál, kapacita, elektrický odpor, elektrický prúd sa vyjadrovali pomocou jednotiek CGSE a magnetické veličiny – intenzita magnetického poľa, magnetická indukcia, magnetický tok a ďalšie v sústave CGSM. V sústavách CGSE a CGSM sa nepoužíval racionalizačný faktor 4π .

História definície metra

Meter bol zavedený v roku 1793 dekrétom francúzskej vlády, ako desaťmilióna časť vzdialenosti od severného pólu po rovník, meranej pozdĺž zemského poludníka prechádzajúceho Parížom. Dĺžku časti poludníka od Barcelóny po Dunkirque zmerali zememerači Délambre a Méchain v rokoch 1792 – 1798. Platínový prototyp metra s tvarom tyče, zhotovený na základe ich merania, sa však od správnej hodnoty líšil o 0,2 mm ale za meter sa naďalej považovala dĺžka prototypu. Prototyp bol v roku 1799 uložený v Paríži v *Archive de la République*, spolu s prototypom kilogramu. Meter a kilogram boli medzinárodne uznané v roku 1875 Metrickou konvenciou. Definície metra a kilogramu boli potvrdené aj na prvej Generálnej konferencii o váhach a mierach (CGPM) v roku 1889, a akceptované ich

nové prototypy, zhotovené zo zliatiny 90% platiny a 10% irídia. Za meter sa odvtedy považovala vzdialenosť medzi dvoma čiarkami (vrypami) v blízkosti koncov prototypu. Meranie dĺžky poludníka nie je možné uskutočniť s presnosťou, ktorú v súčasnosti vyžaduje metrológia, preto v roku 1960 bol meter definovaný na základe vlnovej dĺžky jednej zo spektrálnych čiar kryptónu. Podľa tejto definície meter predstavoval 1 650 763,73 vlnových dĺžok jednej zo spektrálnych čiar vyžarovanej izotopom kryptónu ^{86}Kr . Počet vlnových dĺžok bol zvolený tak, aby sa novou definíciou dĺžka metra nezmenila. Nová definícia umožnila kontrolovať dĺžku meradiel v ktoromkoľvek metrologickom laboratóriu, nebolo potrebné porovnávanie s etalónom metra uloženým v Paríži. Táto definícia sa v podstate ešte aj dnes využíva pri kontrole dĺžkových etalónov, napriek tomu, že podľa rozhodnutia 17. CGPM z roku 1983 *meter je vzdialenosť, ktorú svetlo prejde vo vákuu za časový interval $1/(299\,792\,453)$ sekundy*. Pritom časový interval, ako aj konvenčná hodnota rýchlosti svetla boli zvolené tak, aby sa veľkosť metra novou definíciou nezmenila. Nová definícia má navyše výhodu v tom, že nie je viazaná na konkrétnu metódu realizácie, ani vlnovú dĺžku, čo umožňuje naďalej zlepšovať postupy pri meraní a zvyšovať ich presnosť. Takáto definícia metra platí v podstate aj v súčasnosti, po zavedení nových definícií základných jednotiek SI v roku 2019.

Meter definovaný ako vzdialenosť čiarok na prototypy umožňoval dosiahnuť relatívnu neistotu merania 10^{-7} , definícia pomocou vlnovej dĺžky 10^{-9} a súčasná definícia až 10^{-12} . Definícia na základe vzdialenosti ktorú prejde svetlo za definovaný časový interval sa opiera o skutočnosť, že pri meraní časových intervalov je možné dosiahnuť najmenšiu relatívnu neistotu v porovnaní s meraním iných veličín.

História definície sekundy

Sekunda, ako jednotka merania času, je vlastne dôsledkom delenia dňa na 24 hodín, používaného už pred niekoľkými tisícročiami. Keď hodiny delíme na minúty, minúty na sekundy, tak deň má 86 400 sekúnd. Prvé hodiny, ktoré ukazovali aj sekundy, sú známe z druhej polovice 16. storočia, ale spoľahlivo ich začali ukazovať až zdokonalené Huygensove kyvadlové hodiny z roku 1670. Dĺžka dňa súvisí s uhlovou rýchlosťou rotácie Zeme okolo vlastnej osi, ktorá sa však spomaľuje, o čom bol predložený dôkaz v roku 1938 meraním pomocou hodín riadených piezoelektrickým kryštálom kremeňa. Sekunda odvodená od periódy rotácie Zeme sa tak postupne predlžuje a z hľadiska mnohých technických a vedeckých aplikácií je takáto jej definícia neprijateľná. Bola určovaná pomocou astronomických meraní, ako $1/(86\,400)$ časť stredného slnečného dňa. Zlepšenie nastalo v roku 1960, keď sa sekunda začala odvodzovať od doby obehu Zeme okolo Slnka, ktorá je oveľa stabilnejšia než doba rotácie Zeme okolo osi. Bola zavedená tzv. *efemeridová sekunda* ako $1/(31\,556\,925,9747)$ časť tropického roka. Pritom išlo o dĺžku tropického roka k

prelomu 19. a 20. storočia, lebo aj ten sa pomaly predlžuje. Konečne v roku 1967 bola prijatá tzv. *atómová sekunda*, definovaná prostredníctvom frekvencie žiarenia vysielaného atómami cézia – ^{133}Cs . Predstavuje časový interval, zhodujúci sa s 9 192 631 770 periódami tohto žiarenia. Počet periód v definícii atómovej sekundy bol zvolený tak, aby sa zhodovala s efemeridovou sekundou.

Vzhľadom na postupné spomaľovanie rotácie Zeme deň trvá o zlomok sekundy dlhšie než 86 400 atómových sekúnd. V záujme zhody medzi stredným slnečným časom a atómovým časom sa tento rozdiel kompenzuje občasným pridaním jednej tzv. prestupnej sekundy, zvyčajne k poslednej minúte na Silvestra. Súčasné najkvalitnejšie atómové hodiny majú presnosť až 1 ku 10^{16} , čo znamená, že chyba jednej sekundy môže v nich vzniknúť až uplynutím rádovo 100 miliónov rokov. Vysoká presnosť sa prejavuje aj v možnosti registrovať rozdiel v rýchlosti chodu atómových hodín od nadmorskej výšky, vyplývajúcej zo všeobecnej teórie relativity. Preto sa čas udávaný atómovými hodinami prepočítava na úroveň hladiny mora a z neho sa určuje *univerzálny koordinovaný čas* (UTC) ako priemer údajov okolo 300 atómových hodín rozmiestnených po celej zemeguli. Korekcia chodu atómových hodín na nadmorskú výšku sa musí zohľadňovať aj v globálnom systéme určovania polohy (GPS) pomocou sústavy družíc, na ktorých sú umiestnené atómové hodiny.

Nobelove ceny za fyziku

Rok	Meno	Dôvod udelenia ceny
1901	Wilhelm Conrad Röntgen	za objav žiarenia nesúceho jeho meno
1902	Hendrik Antoon Lorentz a Pieter Zeeman	za výskum vplyvu magnetizmu na žiarenie
1903	Antoine Henri Becquerel	za objav spontánnej rádioaktivity
	Pierre a Marie Curie	za výskum žiarenia objaveného Henri Becquerelom
1904	Lord Rayleigh (John William Strutt)	za výskum hustôt najdôležitejších plynov a s tým súvisiaci objav argónu
1905	Philipp Eduard Anton von Lenard	za výskum katódových lúčov
1906	Sir Joseph John Thomson	za výskum vodivosti plynov
1907	Albert Abraham Michelson	za presné optické prístroje a výskum nimi uskutočnený
1908	Gabriel Lippmann	za metódu fotografickej reprodukcie farieb pomocou interferencie
1909	Guglielmo Marconi a Karl Ferdinand Braun	za príspevky k rozvoju bezdrôtovej telegrafie
1910	Johannes Diderik van der Waals	za prácu na stavovej rovnici plynov a kvapalín
1911	Wilhelm Wien	za objavy zákonov vyžarovania tepla
1912	Nils Gustaf Dalén	za objav automatických regulátorov v plynových akumulátoroch na osvetlenie majákov a bójok
1913	Heike Kamerlingh Onnes	za výskum vlastností hmoty pri nízkych teplotách, čo viedlo aj k výrobe kvapalného hélia
1914	Max von Laue	za objav rozptylu rentgenových lúčov na kryštáloch
1915	Sir William Henry Bragg a William Lawrence Bragg	za analýzy kryštálových štruktúr pomocou rentgenových lúčov
1916	<i>(Cena nebola udelená, finančná časť ceny bola vložená do špeciálneho fondu Nobelovej ceny za fyziku.)</i>	
1917	Charles Glover Barkla	za objav charakteristického röntgenového žiarenia prvkov
1918	Max Planck	za objav kvánt energie
1919	Johannes Stark	za objav Dopplerovho javu v kanálových lúčoch a štiepenie spektrálnych čiar
1920	Charles Edouard Guillaume	za objav anomálií v niklovej oceli, čo prispelo k rozvoju presných meraní

1921	Albert Einstein	za príspevky k teoretickej fyzike, najmä za objav zákonitostí fotoelektrického javu
1922	Niels Bohr	za výskum štruktúry atómov a žiarenia, ktoré vysielajú
1923	Robert Andrews Millikan	za výskum elementárneho elektrického náboja a fotoelektrického javu
1924	Karl Manne Georg Siegbahn	za výskum v oblasti rentgenovej spektroskopie
1925	James Franck a Gustav Ludwig Hertz	za objav zákonov, ktorými sa riadi zrážka elektrónu s atómom
1926	Jean Baptiste Perrin	za výskum nespojitých stavov hmoty, najmä za objav sedimentačnej rovnováhy
1927	Arthur Holly Compton	za objav javu nesúceho jeho meno
	Charles Thomson Rees Wilson	za objav metódy zobrazovania trajektórií elektricky nabitých častíc pomocou kondenzácie pár
1928	Owen Willans Richardson	za výskum tepelnej emisie, najmä za objav zákona nesúceho jeho meno
1929	Louis de Broglie	za objav vlnovej povahy elektrónov
1930	Sir Chandrasekhara Venkata Raman	za výskum rozptylu svetla a objav po ňom pomenovaného javu
1931	<i>(Cena nebola udelená, finančná časť ceny bola vložená do špeciálneho fondu Nobelovej ceny za fyziku.)</i>	
1932	Werner Heisenberg	za vytvorenie kvantovej mechaniky, ktorej aplikácia viedla aj k objavu alotropických foriem vodíka
1933	Erwin Schrödinger a Paul Dirac	za objav nových foriem teórie atómov
1934	<i>(Cena nebola udelená, 1/3 finančnej časti ceny bola vložená do spoločného fondu Nobelových cien, 2/3 do špeciálneho fondu Nobelovej ceny za fyziku.)</i>	
1935	Sir James Chadwick	za objav neutrónu
1936	Victor Franz Hess	za objav kozmického žiarenia
	Carl David Anderson	za objav pozitronu
1937	Clinton Joseph Davisson a George Paget Thomson	za experimentálny objav rozptylu elektrónov na kryštáloch
1938	Enrico Fermi	za potvrdenie existencie nových rádioaktívnych prvkov vytvorených neutrónovým ožarovaním a s tým spojený objav jadrových reakcií vyvolaných pomalými neutrónmi
1939	Ernest Orlando Lawrence	za vynález cyklotrónu a ním získané výsledky, týkajúce sa najmä umelých rádioaktívnych prvkov

1940	<i>Cena nebola udelená, 1/3 finančnej časti ceny bola vložená do spoločného fondu Nobelových cien, 2/3 do špeciálneho fondu Nobelovej ceny za fyziku.)</i>	
1941		
1942		
1943	Otto Stern	za príspevok k vývoju metódy molekulových lúčov a objav magnetického momentu protónu
1944	Isidor Isaac Rabi	za rezonančnú metódu na určovanie magnetických vlastností atómových jadier
1945	Wolfgang Pauli	za objav vylučovacieho princípu
1946	Percy Williams Bridgman	za vynález prístroja na vytvorenie extrémne vysokého tlaku a ním vytvorené objavy
1947	Sir Edward Victor Appleton	za výskum fyziky vyšších vrstiev atmosféry, najmä za objav tzv. Appletonovej vrstvy
1948	Patrick Maynard Stuart Blackett	za rozvoj Wilsonovej metódy hmlovej komory a súvisiace objavy v oblasti jadrovej fyziky a kozmického žiarenia
1949	Hideki Jukawa	za predpoveď existencie mezónov na základe teoretického výskumu jadrových síl
1950	Cecil Frank Powell	za vývoj fotografickej metódy výskumu jadrových procesov a za objavy mezónov ňou uskutočnené
1951	Sir John Douglas Cockcroft a Ernest Thomas Sinton Walton	za priekopnícky výskum transmutácie atómových jadier pomocou umelo urýchlených atómových častíc
1952	Felix Bloch a Edward Mills Purcell	za rozvoj nových metód presného merania magnetizmu jadier a objavy s tým spojené
1953	Frits Zernike	za objav metódy fázového kontrastu, najmä za vynález takého mikroskopu
1954	Max Born	za zásadný výskum v kvantovej mechanike, najmä za štatistickú interpretáciu vlnovej funkcie
	Walther Bothe	za vynález koincidenčnej metódy a ňou vytvorené objavy
1955	Willis Eugene Lamb	za objavy týkajúce sa jemnej štruktúry vodíkového spektra
	Polykarp Kusch	za presné určenie magnetického momentu elektrónu

1956	William Bradford Shockley, John Bardeen a Walter Houser Brattain	za výskum polovodičov a objav tranzistorového javu
1957	Jang Čen-ning a Li Čang-tao	za prelomový výskum zákonov parity, ktorý viedol k dôležitým objavom týkajúcich sa elementárnych častíc
1958	Pavel Alexejevič Čerenkov, Il'ja Frank a Igor Jevgenievič Tamm	za objav a interpretáciu Čerenkovovho- Vavilovovho javu
1959	Emilio Gino Segré a Owen Chamberlain	za objav antiprotónu
1960	Donald Arthur Glaser	za vynález bublinkovej komory
1961	Robert Hofstadter	za priekopnícky výskum rozptylu elektrónov na atómových jadrách a tým dosiahnuté objavy týkajúce sa štruktúry nukleónov
	Rudolf Ludwig Mössbauer	za výskum rezonančnej absorpcie žiarenia gama a s tým spojený objav po ňom pomenovaného javu
1962	Lev Davidovič Landau	za priekopnícky výskum kondenzovaných stavov hmoty, najmä kvapalného hélia
1963	Eugene Paul Wigner	za príspevky k teórii atómového jadra a elementárnych častíc, najmä objav a aplikáciu fundamentálnych princípov symetrie
	Maria Goeppert-Mayer a J. Hans D. Jensen	za objavy týkajúce sa orbitálov v atómových jadrách
1964	Charles Hard Townes, Nikolaj Gennadijevič Basov a Alexander Prochorov	za zásadný výskum v oblasti kvantovej elektroniky, ktorý viedol ku konštrukcii oscilátorov a zosilňovačov založených na princípe maserov a laserov
1965	Šin'ičiró Tomonaga, Julian Schwinger a Richard P. Feynman	za kľúčové práce na kvantovej elektrodynamike s hlbokými dôsledkami pre fyziku elementárnych častíc
1966	Alfred Kastler	za objav a rozvoj optických metód na štúdium hertzovských rezonancií v atómoch
1967	Hans Albrecht Bethe	za príspevky k teórii jadrových reakcií, najmä za objavy týkajúce sa získavania energie vo hviezdach

1968	Luis Walter Alvarez	za rozhodujúce príspevky k fyzike elementárnych častíc, najmä za objav veľkého množstva rezonančných stavov, umožneného jeho predchádzajúcim zdokonaľovaním techník vodíkovej bublinkovej komory a dátovej analýzy
1969	Murray Gell-Mann	za príspevky a objavy týkajúce sa klasifikácie elementárnych častíc a ich interakcií
1970	Hannes Olof Gösta Alfvén	za zásadnú prácu a objavy v oblasti magnetohydrodynamiky, s uplatnením v rôznych častiach plazmovej fyziky
	Louis Eugène Félix Néel	za zásadnú prácu a objavy týkajúce sa antiferromagnetizmu a ferrimagnetizmu, ktoré viedli k dôležitým aplikáciám vo fyzike tuhých látok
1971	Dénes Gábor	za objav a rozvoj holografie
1972	John Bardeen, Leon Neil Cooper a John Robert Schrieffer	za ich spoločnú teóriu supravodivosti, obvykle nazývanú „BCS teória“
1973	Leo Esaki a Ivar Giaever	za experimentálne objavy týkajúce sa tunelovania v polovodičoch a supravodičoch
	Brian David Josephson	za teoretické predpovede vlastností prúdu pri prechode bariérou tunelovaním, najmä javu známeho ako Josephsonov
1974	Sir Martin Ryle a Antony Hewish	za priekopnícky výskum v oblasti rádiovkej astrofyziky: Ryle za pozorovanie a vynálezy, najmä techniku apertúrovej syntézy, Hewish za rozhodujúcu úlohu pri objave pulzarov
1975	Aage Niels Bohr, Ben Roy Mottelson a Leo James Rainwater	za objav vzťahov medzi pohybom jadra a pohybom častíc v jadre a za rozvoj teórie štruktúry atómových jadier na základe týchto vzťahov
1976	Burton Richter a Ting Čao-čung	za priekopnícku prácu pri objave nového druhu ťažkej elementárnej častice
1977	Philip Warren Anderson, Sir Nevill Francis Mott a John Hasbrouck van Vleck	za zásadné teoretické výskumy elektrónovej štruktúry magnetických a neusporiadaných štruktúr

1978	Piotr Leonidovič Kapica	za zásadné vynálezy a objavy v oblasti fyziky nízkych teplôt
	Arno Allan Penzias a Robert Woodrow Wilson	za objav reliktného mikrovlnného žiarenia
1979	Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam a Steven Weinberg	za príspevky k teórii zjednotenej elektroslabej interakcie medzi elementárnymi časticami, vrátane predpovede neutrálnych prúdov
1980	James Watson Cronin a Val Logsdon Fitch	za objav narušenia fundamentálnych princípov symetrie pri rozpade neutrálnych K-mezónov
1981	Nicolaas Bloembergen a Arthur Leonard Schawlow	za príspevky k rozvoju laserovej spektroskopie
	Kai Manne Boerje Siegbahn	za príspevok k rozvoju elektrónovej spektroskopie s vysokým rozlíšením
1982	Kenneth G. Wilson	za teóriu kritických javov v súvislosti s fázovými prechodmi
1983	Subrahmanyan Chandrasekhar	za teoretický výskum fyzikálnych procesov dôležitých pre štruktúru a vývoj hviezd
	William Alfred Fowler	za teoretický a experimentálny výskum jadrových reakcií dôležitých pre vývoj chemických prvkov vo vesmíre
1984	Carlo Rubbia a Simon van der Meer	za rozhodujúce príspevky k rozsiahlemu projektu, ktorý viedol k objavu intermediálnych častíc W a Z, sprostredkujúcich slabé interakcie
1985	Klaus von Klitzing	za objav kvantového Hallovoho javu
1986	Ernst Ruska	za zásadnú prácu v elektrónovej optike a za návrh prvého elektrónového mikroskopu
	Gerd Binnig a Heinrich Rohrer	za návrh riadkovacieho tunelového mikroskopu
1987	Johannes Georg Bednorz a Karl Alexander Müller	za zlomový objav supravodivosti v keramických materiáloch
1988	Leon Max Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger	za metódu neutrínového zväzku a demonštráciu existencie leptónových dubletov objavom miónového neutrína
1989	Norman Foster Ramsey	za vynález metódy separovaných oscilujúcich polí a ich použitie vo vodíkových maseroch a iných atómových hodinách
	Hans Georg Dehmelt a Wolfgang Paul	za vývoj metódy iónovej pasce

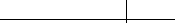
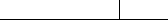
1990	Jerome Isaac Friedman, Henry Way Kendall a Richard Edward Taylor	za priekopnícky výskum hlbokých nepružných rozptylov elektrónov na protónoch a viazaných neutrónoch, ktoré mali zásadný význam pre vývoj kvarkového modelu fyziky častíc
1991	Pierre-Gilles de Gennes	za objav, že metódy vyvinuté na štúdium javov v jednoduchých usporiadaných systémoch sa dajú zovšeobecniť na zložitejšie formy hmoty, najmä kvapalné kryštály a polyméry
1992	Georges Charpak	za vynález a vývoj detektorov častíc, osobitne drôtovej komory
1993	Russell Alan Hulse a Joseph Hooton Taylor Jr.	za objav nového typu pulzaru, ktorý otvoril nové možnosti štúdia gravitácie
1994	Bertram Neville Brockhouse, Clifford Glenwood Shull	za príspevky k rozvoju štúdia kondenzovaných stavov neutrónovou spektroskopiou: Brockhouse za rozvoj neutrónovej spektroskopie, Shull za rozvoj techniky difrakcie neutrónov
1995	Martin Lewis Perl, Frederick Reines	za priekopnícke experimentálne príspevky v leptónovej fyzike: Perl za objav leptónu tau, Reines za detekciu neutrína
1996	David Morris Lee, Douglas Dean Osheroff a Robert Coleman Richardson	za objav supratekutosti v hélíu 3
1997	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji a William Daniel Phillips	za rozvoj metód ochladzovania a záchytu atómov pomocou laserového svetla
1998	Robert B. Laughlin, Horst Ludwig Störmer a Cchuej Čchi	za objav nového druhu kvantovej kvapaliny s neceločíselnými excitáciami
1999	Gerardus 't Hooft a Martinus J. G. Veltman	za objasnenie kvantovej štruktúry elektroslabých interakcií
2000	Žores Ivanovič Alfiorov	za zásadnú prácu v informačnej a telekomunikačnej technológii
	Herbert Kroemer	za vývoj heterogénnych polovodičových štruktúr používaných vo vysokorýchlostnej elektronike a optoelektronike
	Jack St. Clair Kilby	za podiel na vynáleze integrovaného obvodu

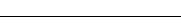
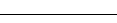
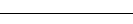
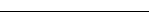
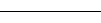
2001	Eric Allin Cornell, Wolfgang Ketterle a Carl Edwin Wieman	za vytvorenie Boseho-Einsteinovho kondenzátu na zriedených parách alkalických atómov a principiálny výskum jeho vlastností
2002	Raymond Davis Jr. a Masatoši Košiba	za priekopnícke príspevky k astrofyzike, najmä za detekciu kozmických neutrín
	Riccardo Giacconi	za priekopnícke príspevky k astrofyzike, ktoré viedli k objavu kozmických zdrojov rentgenového žiarenia
2003	Alexej Alexejevič Abrikosov, Vitalij Lazarevič Ginzburg a Sir Anthony James Leggett	za priekopnícke príspevky k teórii supravodičov a supratekutín
2004	David Jonathan Gross, H. David Politzer a Frank Wilczek	za objav asymptotickej voľnosti v teórii silnej interakcie
2005	Roy Glauber, John Hall a Theodor Hänsch	za objavy v oblasti optiky – Hall, Hänsch za príspevok k rozvoju laserovej spektroskopie, Glauber za kvantové teórie optickej koherencie
2006	John C. Mather a George F. Smoot	za objav, že reliktné žiarenie má podobu žiarenia absolútne čierneho telesa, a za zistenie jeho anizotropie
2007	Albert Fert a Peter Grünberg	za objav obrovskej magnetorezistencte
2008	Jóičiró Nambu	za objav mechanizmu spontánneho narušenia symetrie v subatómovej fyzike
	Makoto Kobajaši a Tošihide Masukawa	za objav pôvodu narušenej symetrie a predpoveď existencie najmenej troch rodín kvarkov
2009	Charles Kao	za prielom v oblasti prenosu svetla v optických vláknach
	Willard Boyle a George E. Smith	za vynález CCD senzora
2010	Andre Geim a Konstantin Novoselov	za objav grafénu
2011	Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt a Adam Riess	za objav zrýchľujúcej sa expanzie vesmíru pozorovaním veľmi vzdialených supernov
2012	Serge Laroche a David Wineland	za vývoj prelomových experimentálnych metód umožňujúcich manipuláciu kvantových sústav
2013	Francois Englert a Peter Higgs	za teoretický objav mechanizmu prispievajúceho k pochopeniu pôvodu hmotnosti subatomárnych častíc a jeho potvrdenie objavom predpovedanej častice na urýchľovači v CERNe

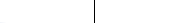
2014	Isamu Akasaki, Hiroshi Amano a Shuji Nakamura	za vynález diódy vyžarujúcej modré svetlo, umožňujúcej výrobu výkonných a energiu šetriacich svetelných zdrojov
2015	Takaaki Kajita a Arthur Mc Donald	za objav oscilácie neutrín, dokazujúcej, že neutrína majú hmotnosť
2016	David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz	za teoretický objav topologických fázových prechodov a topologických fáz hmoty
2017	Reiner Weiss, Barry Barish a Kip Thorne	za kľúčové príspevky k detektoru LIGO a pozorovanie gravitačných vln
2018	Arthur Ashkin	za vývoj optickej pinzety a jej využitie v biológii
	Gérard Mourou a Donna Strickland	za vývoj metódy umožňujúcej vytvárať vysokoenergetické ultrakrátké optické záblesky
2019	James Peebles	za teoretické objavy vo fyzikálnej kozmológii
	Michel Mayor a Didier Queloz	za objav exoplanéty obiehajúcej okolo hviezdy podobnej Slnku
2020	Roger Penrose	za objav, že tvorba čiernych dier vyplýva z predpovedí všeobecnej teórie relativity
	Reinhard Genzel a Andrea Ghez	za objav superhmotného kompaktného objektu v strede našej galaxie

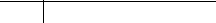
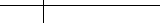
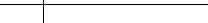
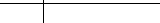
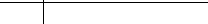
Kedy žili významní fyzici

Autorov subjektívny výber

	1500	1600	1700	1800
Gilbert			1544 - 1603	
Brahe			1546 - 1601	
Galilei			1564 - 1642	
Kepler			1571 - 1630	
Snelius			1580 - 1626	
Komenský			1592 - 1670	
Descartes			1596 - 1650	
Fermat			1601 - 1665	
Torricelli			1608 - 1647	
Mariotte			1620 - 1684	
Pascal	1623 - 1662			
Boyle R.	1627 - 1691			
Huygens	1629 - 1695			
Hooke	1635 - 1703			
Newton	1643 - 1727			
Leibnitz	1646 - 1716			
Maupertius	1698 - 1759			
Bernoulli D.	1700 - 1782			
Franklin	1706 - 1790			
Boškovič	1711 - 1787			
d' Alembert	1717 - 1783			
Euler	1717 - 1783			
Lambert	1728 - 1777			
Cavendish	1731 - 1810			
Lagrange	1736 - 1806			
Coulomb	1736 - 1806			
Lavoisier	1743 - 1794			
Volta	1745 - 1827			
Charles	1746 - 1823			

	1500	1600	1700	1800
Laplace	1749 - 1827			
Dalton	1766 - 1844			
Fourier	1768 - 1830			
Seebeck	1770 - 1831			
Young	1773 - 1829			
Biot	1774 - 1862			
Ampère	1775 - 1836			
Avogadro	1776 - 1856			
Oersted	1777 - 1851			
Gauss	1777 - 1855			
Gay-Lussac	1778 - 1853			
Poisson	1781 - 1840			
Brewster	1781 - 1868			
Navier	1785 - 1836			
Arago	1786 - 1853			
Fraunhofer	1787 - 1826			
Fresnel	1788 - 1827			
Ohm	1789 - 1854			
Savart	1791 - 1841			
Faraday	1791 - 1867			
Coriolis	1792 - 1843			
Carnot	1796 - 1832			
Clapeyron	1799 - 1864			
Jedlik	1800 - 1895			
Doppler	1803 - 1853			
Weber	1804 - 1891			
Hamilton	1805 - 1865			
Mayer	1814 - 1878			
Joule	1818 - 1889			
Foucault	1819 - 1868			

	1600	1700	1800	1900
Stokes	1819 - 1903			
Helmholtz	1821 - 1894			
Kirchhoff	1824 - 1887			
Clausius	1822 - 1888			
Thomson K	1824 - 1907			
Balmer	1825 - 1898			
Maxwell	1831 - 1874			
Gibbs	1839 - 1903			
Boltzmann	1844 - 1906			
Röntgen	1845 - 1923			
Poynting	1852 - 1914			
Michelson	1852 - 1931			
Becquerel	1852 - 1908			
Lorentz	1853 - 1928			
Kamerling-	1853 - 1926			
Rydberg	1854 - 1919			
Poincaré	1854 - 1912			
Zeeman	1856 - 1943			
Thomson J.	1856 - 1940			
Hertz H.	1857 - 1894			
Larmor	1857 - 1942			
Planck	1858 - 1947			
Curie P.	1859 - 1906			
Lenard	1862 - 1947			
Nernst	1864 - 1941			
Wien	1864 - 1928			
Minkowski	1864 - 1909			
Sklodowska	1867 - 1934			

	1600	1700	1800	1900
Sommerfeld	1868 - 1951			
Millikan	1868 - 1953			
Rutherford	1871 - 1937			
Meitner Lise	1878 - 1968			
Einstein	1879 - 1955			
Hahn Otto	1879 - 1968			
Davisson	1881 - 1958			
Franck	1882 - 1964			
Noether E	1882 - 1935			
Born Max	1882 - 1970			
Debye	1884 - 1966			
Bohr Niels	1885 - 1962			
Hertz	1887 - 1975			
Schrödinger	1887 - 1961			
Stern	1888 - 1969			
Gerlach	1889 - 1979			
Chadwick	1891 - 1974			
Compton	1892 - 1962			
de Broglie	1892 - 1987			
Bose	1894 - 1974			
Germer	1896 - 1971			
Curie Irène	1897 - 1956			
Uhlenbeck	1900 - 1988			
Pauli	1900 - 1968			
Curie Fred.	1900 - 1958			
Heisenberg	1901 - 1976			
Fermi	1901 - 1954			
Goudsmith	1902 - 1978			

	1600	1700	1800	1900
Dirac	1902 - 1984			
Ivanenko	1904 - 1994			
Jukava	1907 - 1981			
Landau	1908 - 1968			
Bardeen	1908 - 1991			
Feynman	1918 - 1988			
Schwinger	1918 - 1994			

Pramene

Kvasnica J.: Priekopníci modernej fyziky, Smena 1987

Gribbin J.: Schrödingerova koľata, Columbus 2001

Hajko V. a kol.: Fyzika v experimentoch, VEDA 1988

Kraus I.: Fyzika v kulturních dějinách Evropy, Praha, ČVUT, 2006, + ďalšie 4 diely

Štoll I.: Dějiny fyziky, Praha, Prometheus 2009

Laue M.: Geschichte der Physik Univ.-Verl., 1946,

Zajac R., Chrapan J.: Dejiny fyziky, Univerzita Komenského, 1983

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

Wikipedia

https://de.wikipedia.org/wiki/Zeittafel_physikalischer_Entdeckungen

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik

**Zoznam osobností spomenutých v texte,
neobsahuje mená z tabuľky nositeľov Nobelových cien**

Alembert d' (1717 – 1783) 16	Chladni (1756 – 1827) 18
Alhazen , (965–1040) 9	Clapeyron (1799 – 1864) 22
Amontons (1663 – 1705) 20	Clausius (1822 – 1888) 22, 26
Ampère (1775 – 1836) 24	Clément (1779 – 1841) 21
Arago (1786 – 1853) 19	Compton (1892 – 1962) 32
Archimedes (287 – 212 pnl) 8	Cooper (*1930 -) 36
Aristoteles (384 – 322 pnl) 7	Coriolis (1792 – 1843) 17
Avicenna (980–1037) 9	Coulomb (1736 – 1806) 23
Avogadro (1776 – 1856) 21	Curie P. (1859 – 1906) 29
Balmer (1825 – 1898) 27	Dalton (1766 – 1844) 21
Bardeen (1908 -1991) 36	Davisson (1881 – 1958) 32
Becquerell (1852 – 1908) 29	Debye (1884 – 1966) 30
Bednorz (*1950) 36	Descartes (1596 – 1650) 12, 15
Bernoulli D. (1700–1782) 16, 20, 26	Dirac (1902 – 1984) 34
Biot (1774 – 1862) 24	Doppler (1803 – 1853) 27
Black (1728 – 1799) 21	Dufay (1698 – 1739) 23
Bohr (1885 – 1962) 30	Dyson (1923 – 2020) 35
Boltzmann (1844 – 1906) 26, 28	Einstein (1879 – 1955) 29, 30, 31
Born (1882 – 1970) 33	Euler (1717 – 1783) 16, 18, 20
Bose (1894 – 1974) 30	Fahrenheit (1686 – 1739) 20
Boškovič (1711 – 1787) 17	Faraday (1791 – 1867) 24
Bouguer (1698 – 1758) 18	Fermat (1601 - 1665) 15
Boyle R. (1621 – 1691) 15, 20	Fermi (1901 – 1954) 34
Brahe (1546 – 1601) 10	Feynman (1918 – 1988) 35
Brattain (1902 – 1987) 36	Foucault (1819 – 1868) 19
Brewster (1781 – 1868) 18	Fourier (1768 – 1830) 21
Broglie de (1892 – 1987) 32	Franck (1882 – 1964) 31
Brown (1773 – 1858) 27	Franklin (1706 – 1790) 23
Carnot (1796 – 1832) 22	Fraunhofer (1787 – 1826) 19
Cavendish (1731 – 1810) 17, 23	Fresnel (1788 – 1827) 19
Chadwick (1891 – 1974) 34	Frisch (1904 – 1979) 35
Charles (1746 – 1823) 20	Galilei (1564 – 1642) 11, 15, 30

Gauss (1777 – 1855) 26
Gay-Lussac (1778 – 1850) 20
Gerlach (1889 – 1979) 32
Germer (1896 – 1971) 32
Gibbs (1839 – 1903) 26
Gilbert (1544 – 1603) 15
Ginzburg (1916 – 2009) 36
Goudsmith (1902 – 1978) 32
Gray (1666 – 1736) 23
Grimaldi (1618 – 1663) 15
Guerricke (1602 – 1686) 15
Hahn (1879 – 1968) 35
Halley (1656 – 1742) 13, 15
Hamilton (1805 – 1865) 17
Heisenberg (1901 – 1976) 33, 34
Helmholtz (1821 – 1894) 22
Heron (10 – 70 nl) 8
Herschell (1738 – 1822) 18
Hertz H. (1857 – 1894) 25
Hertz G. (1887 – 1975) 31
Hess (1802 – 1850) 22
Hooke (1635 – 1703) 14, 20
Huygens (1629 – 1695) 12, 15
Ivanenko (1904 – 1994) 34
Jedlik (1800 – 1895) 25
Joliot-Curie (1900 - 1958) 34
Joule (1818 – 1889) 22
Kamerling-Ones (1853 -1926) 30
Kelvin 22
Kepler (1571 – 1630) 10, 14
Kirchhoff (1824 – 1887) 24, 27
Klitzing von (*1943) 36
Kohlrausch (1809–1858) 26
Komenský (1592 – 1670) 10
Kopernik (1473 – 1543) 10
Lagrange (1736 – 1813) 17
Lambert (1728 – 1777) 18
Landau (1908 – 1968) 36
Laplace (1749 -1827) 17, 24
Larmor (1857 – 1942) 30
Laue (1879 – 1960) 6, 31
Lavoisier (1743 – 1794) 21
Leibniz (1646 – 1716) 14, 16
Lomonosov (1711 – 1765) 20
Lenard (1862 – 1947) 26, 28
Lorentz (1853 – 1928) 30, 27
Malus (1775 – 1812) 18
Mariotte (1620 – 1684) 20
Maupertuis 1698 – 1759) 16
Maxwell (1831 – 1879) 23, 26
Mayer (1814 – 1878) 22
Meitner (1878 – 1968) 35
Michelson (1852 – 1931) 27
Miller (*1927) 36
Millikan (1868 – 1953) 31
Minkowski (1864 – 1909) 30
Morley (1838 –1923) 27
Navier (1785 – 1836) 28
Nernst (1864 – 1941) 22
Newton (1643 – 1727) 13
Noether (1882 – 1935) 31
Oersted (1777 – 1851) 24
Ohm (1789 – 1854) 24
Pascal (1623 – 1662) 15
Pauli (1900 – 1968) 28, 34
Planck (1858 – 1947) 29
Plücker (1801 – 1868) 26
Poincaré (1854 -1912) 30
Poisson (1781 – 1840) 17
Poynting (1852 – 1914) 26
Ritter (1776 – 1810) 18
Rømer (1644 – 1710) 15
Röntgen (1845 – 1923) 27
Rutherford (1871 – 1937) 29, 31
Rydberg (1854 – 1919) 27
Savart (1791 – 1841) 24

Schrieffer (1931 – 2019) 36
Schrödinger (1887 – 1961) 33
Schwinger (1918 – 1994) 35
Seebeck (1770 – 1831) 24
Shockley (1910 – 1981) 36
Skłodowska (1867–1934) 29
Snellius (1580 – 1626) 15
Soddy (1877 – 1956) 29
Sommerfeld (1868 – 1951) 30
Stefan (1835 – 1893) 25, 28
Stern (1888 – 1969) 32
Stevin (1548 – 1620) 10
Stokes (1819 – 1903) 28
Strassman (1902 – 1980) 35
Thomson J. (1856 – 1940) 31
Thomson W. (1824 -1907) 20, 22

Torricelli (1608 – 1647) 15
Uhlenbeck (1900 – 1988) 32
Vinci de (1452 – 1519) 10
Volta (1745 – 1827) 23
Weber (1804 – 1891) 26
Wien (1864 – 1928) 28
Wilcke (1732 – 1796) 21
Young (1773 – 1829) 19
Yukawa (1907 – 1981) 34
Zeeman (1856–1943) 27

Vydavateľstvo STU SPEKTRUM 2021