

što čini da je ukupno trajanje svih neutrona relativno dugo jer iznosi

$$t'_n = t_n(1 - \beta) + \tau \beta.$$

Za slučaj urana-235 ukupno trajanje neutrona iz fisije iznosi najmanje $8,5 \cdot 10^{-2}$ s, što čini upravljanje lančanom reakcijom mogućnom bez upotrebe posebno brzih kontrolnih sistema (v. *Nuklearni reaktori*).

Tabela 8
EMITERI ZAKASNELIH NEUTRONA IZ FISIJJE URANA-235

Jezgro	Vreme poluraspada, s	Grupa	Srednje vreme za raspad, s	β_i
⁸¹ Br	54,5	1	80,7	0,000215
¹³⁷ J	24,4	2	30,3	0,001424
⁸⁹ Br	16,3			
¹³⁴ J	6,3			
¹³³ Br	4,4	3	9,0	0,001247
⁸⁸ Rb	6,5			
¹³² J	2,0	4	3,3	0,002568
?	1,6...2,4			
⁹⁰ Br	1,6			
⁹² Kr	1,3			
¹⁴⁰ J + ?	0,5	5	0,87	0,000748
Br + ?	0,2			
				0,0065

Fisioni otrovi. Fisioni fragmenti ili produkti njihovog radioaktivnog raspada imaju manje ili veće preseke za apsorpciju neutrona. Oni koji imaju velike preseke nazivaju se fisionim otrovima jer »truju« nuklearni reaktor time što povećavaju gubitke neutrona i pogoršavaju neutronske bilans. Daleko najznačajniji fisioni otrovi su ksenon-135 i samarijum-149, čiji su radioaktivni lanci prikazani gore. U tabeli 9 dati su i podaci o atomskim jezgrama koji prethode ovim fisionim otrovima. Vidi se da su njihovi

Tabela 9
IZOTOPI U LANCU FISIONIH OTROVA ¹³⁵Xe i ¹⁴⁹Sm

	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁹ Pm	¹⁵¹ Sm	¹⁵² Te	¹⁵³ J	¹⁵⁵ Xe
Prinos po fisiji, %	1,3	—	0	5,6	—	0,3
σ_f (term.)	—	0	$4,08 \cdot 10^4$	—	7	$2,7 \cdot 10^4$
$T_{1/2}$	2 h	52 h	—	2 min	6,7	6,7...9,2 h

Tabela 10
SPONTANA FISIIJA

Izotop	Broj spontanah fisija u sekundi po gramu	Vreme poluraspada (godina)
Uran-233	2×10^{-4}	3×10^{17}
Uran-234	8×10^{-3}	$1,6 \times 10^{18}$
Uran-235	3×10^{-4}	$1,8 \times 10^{17}$
Uran-238	7×10^{-3}	8×10^{15}
Plutonium-239	1×10^{-2}	$5,5 \times 10^{15}$
Plutonium-240	5×10^3	$4,2 \times 10^{11}$
Plutonium-242	8×10^2	$7,0 \times 10^{10}$

preseki za apsorpciju termalnih neutrona za više redova veličine veći no što su preseki atomskih jezgara koji se nalaze u nuklearnom gorivu (v. tabelu 3). Svi ostali fisioni fragmenti imaju znatno manje preseke za apsorpciju neutrona i u srednjem se svakom od njih može pripisati presek od ~ 50 b. Samarijum-149 je stabilan, te on delimično nestaje iz reaktora samo apsorpcijom neutrona, tako da se može smatrati kumulativnim otrovom. Ksenon-135 je radioaktivan i po zaustavljanju reaktora njegova koncentracija u principu opada. Ipak postoji period odmah posle zaustavljanja reaktora kada njegova koncentracija raste jer dolazi od stvaranja novog ksenona iz atomskih jezgara fisionih fragmenata koji mu prethode, a njegovo je smanjenje usled apsorpcije neutrona po zaustavljanju reaktora svedeno na nulu. Ovaj efekt ima posebne važnosti kod upravljanja nuklearnim reaktorom (v. *Nuklearni reaktor*).

Spontana fisija. Iako je proces fisije mnogih težih atomskih jezgara energetski moguć, do njega ne dolazi spontano ni trenutno usled prisustva elektrostatičke barijere (v. sliku 2). Po kvantnoj mehanici, međutim, moguće je da čestica koja nema dovoljno energije da savlada barijeru prodrne (tunnelira) kroz nju. Za ovaj proces postoji određena verovatnoća koja je u slučaju fisije srazmerno mala. Međutim, ona je ipak dovoljno velika da se spontana fisija težih jezgara događa brzinom koja se lako može utvrditi. U tabeli 10 dati su podaci o spontanij fisiji za neka teža jezgra. Iako je broj spontanah fisija u sekundi relativno mali, ipak to ima značenja s obzirom na to da se pri svakoj spontanij fisiji stvori oko dva neutrona. Ovi neutroni igraju izvesnu ulogu kod započinjanja lančane reakcije fisije u nuklearnim reaktorima.

LIT: E. Fermi, Nuclear physics, Chicago 1950. — E. Pollard, W. L. Davidson, Applied nuclear physics, New York - London 1951. — S. Glasstone, Principles of nuclear reactor engineering, New York 1955. — R. S. Shankland, Atomic and nuclear physics, New York 1955. — I. Kaplan, Nuclear physics, Cambridge 1956. — J. R. Nix, Calculation of fission barriers for heavy and superheavy nuclei, u djelu Annual review of nuclear science, Vol. 22, Palo Alto 1972. — M. G. Blowler, Nuclear physics, Oxford 1973. — H. J. Specht, Nuclear Fission — Proceedings of the International conference on nuclear physics, Vol. II, Munich 1973. D. Popović

FIZIKA je osnovna prirodna znanost (grč. φυσικη physis, priroda), unutar koje se istražuje i tumači materijalna stvarnost: struktura i odnosi osnovnih sastojaka materije, na osnovi iskustvenih činjenica i teorijskih istraživanja. Te se spoznaje oblikuju u shvatljive principe (početne nazore), tzv. zakone fizike, koji se definišu egzaktnim matematičkim aparatom.

U prvim vremenima nastanka naše civilizacije fizika, tzv. *philosophia naturalis*, obuhvaćala je svu materijalnu stvarnost, no već su se u antičko doba iz ove »prafizike« odvojile grane unutar kojih se proučavaju posebni problemi: medicina, astronomija, kemija, geologija, biologija, a u novije vrijeme različite grane tehnike. I danas je fizika u užem smislu osnova svih grana prirodnih znanosti, te je teško postaviti ostru granicu između fizike kao osnovne znanosti i iz nje proizašlih znanstvenih disciplina.

Do danas su se u jeziku zadržali tragovi sveobuhvatnosti fizike, npr. doskora se u nas gradski liječnik zvao *fizik*, u engleskom je *physician* liječnik, *physic* lijek, ljekarstvo, fizika je *physics*, u francuskom je *le physique* spoljašnost (tjelesna), a *la physique* je fizika.

Današnja fizika obuhvaća: klasičnu mehaniku, termodinamiku, elektrodinamiku, optiku, zatim kvantnu mehaniku, statističku fiziku i elektrodinamiku, nadalje teoriju relativnosti, atomsku i nuklearnu fiziku, te fiziku subatomskih čestica (koja opet obuhvaća niz specijaliziranih grupa).

Gotovo svaka od tih grana ima dva vida istraživanja, eksperimentalni i teorijski, koji se često međusobno isprepliću i utječu jedan na drugi.

ANTIČKA FIZIKA

Već u prapovijesno doba čovjek je stjecao prva empirijska fizikalna znanja. On je naučio da upotrebljava npr. polugu iako nije znao zakon na kojem se temelji njezina upotreba. Fizikalna znanja empirijski su se stjecala i u prvim civilizacijama: Egiptu, Babilonu i Kini. Iako se tih empirijskih znanja dosta nakupilo, ipak su ona interpretirana tek u staroj Grčkoj. *Tales* (← VII st.), bez obzira na to što je raspolagao malom količinom znanja, pokušao je naći međusobnu povezanost pojava, a tvrdio je da je sve proizašlo iz jednog prvotnog počela — vode. Prapočelo su tražili i drugi Grci, pa se tako kao prapočelo isticao zrak ili vatra. *Empedokle* (← V st.) smatrao je da su četiri prapočela: zemlja, voda, zrak i vatra, od kojih svaki može imati i četiri kvalitete: tople, vlažne, hladne i suhe. *Pitagorejci* su napravili razliku između nebeskog područja, koje je savršeno i nepromjenljivo, i zemaljskog, u kojem je sve promjenljivo i nesavršeno. Tako je za ta dva područja vrijedila i različita fizika. *Demokrit* je naprotiv smatrao da se cijeli svijet sastoji od dva dijela: punog i praznog. Puni se sastoji od malih čestica koje su nedjeljive i nazivaju se *atomi*. Svi fizikalni procesi nastaju zbog neprekidnog skupljanja i razdvajanja atoma.

Prema Empedoklu tijela se razdvajaju ili spajaju mržnjom i ljubavlju. To su u biti sile, ali su shvaćene u psihološkom smislu. Silu je i *Platon* (← 427... ← 347) shvaćao u psihološkom

smislu. Po Platonu postoji tendencija da se slično spoji sa sličnim. Zbog toga i počela, zemlja, voda, zrak i vatra, zauzimaju svoja mjesta. *Aristotel* (← 384... ← 322), slično Platonu, uzimao je da počela teže svom prirodnom mjestu i takvo gibanje nazivao prirodnim gibanjem. Sva druga gibanja su nasilna i potječu uvijek od sile kojoj je uzrok u prvom pokretaču. Tako je za nasilna gibanja uvijek potrebna sila bez obzira kakvo je gibanje. Prostor je za Aristotela ograničen i pun. Aristotel prihvaća razliku zemaljskog i nebeskog područja za koja vrijede različite fizike. Aristotelova fizika bila je kvalitativna i spekulativna, ali je imala veliki utjecaj na razvoj znanosti. *Arhimed* (← 287... ← 212), za razliku od Aristotela, uveo je u fiziku kvantitativne odnose. Prvi je dao matematički zakon za polugu i matematički formuliran zakon koji je kasnije nazvan Arhimedov zakon.

SREDNJOVIJEKOVNA FIZIKA

Aristotelova prirodna filozofija, koja je uključivala i fiziku, bila je općenito prihvaćena u srednjem vijeku. Čak i *Roger Bacon* (oko 1214...1292), koji je smatrao da je pokus mjerodavan za formiranje mišljenja o nekom znanstvenom problemu i koji je tražio da se u znanosti eksperimentira, bio je pristaša Aristotelove prirodne filozofije i svoje zaključke donosio unutar nje. Ipak je u srednjem vijeku došlo do stanovitog napretka i do novih znanstvenih rezultata. Dana su rješenja u različitim fizikalnim područjima: optici, magnetizmu i u meteorologiji. Optika je doživjela izvanredni napredak tijekom srednjeg vijeka, osobito u razdoblju 1250...1350. Zanimanje za optičke probleme inicirao je arapski učenjak *Ibn al Haitam* (965...1039), koji je izvršio izvanredan utjecaj na muslimanski Istok i na latinski Zapad. Od optičkih problema opet se najviše istraživao problem duge. *Dietrich* iz Freiberga, poznat i kao *Theodoric*, dao je rješenje postanka dviju duga koje je gotovo u potpunosti kasnije preuzeo Descartes. Problem plime uspješno je rješavan u srednjem vijeku, pa su *Giacomo Dondi* i zadržanin *Federik Grisogono* dali točan opis pojave plime i njene kvantitativne odnose. U srednjem vijeku su rješavani i mnogi drugi fizikalni problemi, ali su gotovo svi bili rješavani u okviru Aristotelove tzv. peripatetičke prirodne filozofije.

Ipak, već u srednjem vijeku došlo je unutar te prirodne filozofije i do znatnih udaljevanja od Aristotelovih gledišta. Već je *Filoponos*, koji je djelovao u prvoj polovini šestog stoljeća, smatrao da je dovoljno da se na početku gibanja utisne u tijelo sila koja mu održava gibanje, a da nije potrebno njezino stalno djelovanje izvana. Slično su tvrdili *Ibn Sina* (980...1037) i *Jean Buridan* (XIII—XIV st.). Prema Buridanu tijelo dobiva na početku gibanja impetus koji održava gibanje tijela. U srednjem vijeku napravljen je veliki napredak i u izučavanju kinematičkih svojstava gibanja. U tom pogledu osobito je važan *Merton College* u Engleskoj u razdoblju između 1328 i 1350. U tom koledžu uvedena je jasna distinkcija između dinamike i kinematike, definirano je jednoliko ubrzano gibanje kao ono gibanje u kojem se jednaki prirasti brzine postižu u jednakim vremenskim razmacima, i dan je izraz za pređeni put kod jednoliko ubrzanog gibanja.

U srednjem je vijeku u fiziku uveden i pojam *kvantitativne* promjene. U staroj Grčkoj promjena se promatrala kao kvaliteta, a u srednjem vijeku počela se promatrati promjena topline, intenziteta svjetla, promjena brzine, akceleracije i gustoće, kao kvantitativna promjena. Neprekinutu promjenu brzine kod jednoliko ubrzanog gibanja grafički je predočivao *Nicole Oresme* (1323...1382).

KLASIČNA FIZIKA

Novi vijek je obilježen pojavom novih pogleda na materijalnu stvarnost. Već je *Nikola Kuzanski* u XV stoljeću tvrdio da je prostor beskonačan, a to su krajem XVI st. prihvaćali *Giordano Bruno* (1548...1600) i *Franjo Petrišević* sa Cresa (1529...1597). Time je napušten Aristotelov pojam ograničenog prostora.

U XVI st. učenjaci su sve više napuštali kvalitativno promatranje fizikalnih pojava i sve više promatrali kvantitativne promjene i kvantitativne odnose. Kvantitativno promatranje fizike i uvođenje matematičke interpretacije bilo je uopće karakteristika renesanse.

Novu mehaniku, koja je bila bitno različita od peripatetičke, dao je početkom XVII st. *Galileo Galilei* (1564...1642). On je

preuzeo sve rezultate koje su dobili prethodnici kritizirajući Aristotelovu prirodnu filozofiju. U prvom redu on je prihvatio pojam impetusa i sve rezultate koje su dobili istraživači u Merton Collegeu. Njegova mehanika je temeljena na čisto matematičkim načelima. Galilei je matematički izvodio svoje poučke iz nekih početnih tvrdnji, ali ih je potvrđivao i pokusom. Tako Galileo izvodi poznati poučak da se prirasti putova kod jednoliko ubrzanog gibanja odnose kao kvadrati proteklih vremena. Taj poučak Galilei je izvodio iz Oresmeovih i Buridanovih tvrdnji matematičkim putem, ali i potvrđivao eksperimentalno. Galilei je dobro definirao gibanje koje je posljedica kosog izbacivanja tijela. On je držao da je to složeno gibanje. Osim toga, Galilei je upotrebljavao kod slaganja gibanja načelo ustrajnosti, iako ga nije dobro formulirao. Taj pojam strože je definirao Descartes. Galilejeva mehanika bila je samo kinematika, on nije htio raspravljati o sili, smatrajući taj pojam nejasnim.

René Descartes (1596...1650) odbacio je pojam sile i umjesto toga je uveo pojam vrtloga. Naime, po Descartesu je prostor ispunjen eterom, a u tom eteru postoje vrtlozi koji su uzrok gibanja. Descartes je definirao i pojam *održanja gibanja* što je bio prvi zakon održanja jedne fizikalne veličine. Taj zakon zajedno s pojmom vrtloga postavio je Descartes u temelj svoje fizike. Pojam punog prostora i vrtloga u fluidima bili su važni u fizici XVIII st.

U XVII st. postalo je jasno da zemlja, voda, zrak i vatra nisu počela, jer se mogu dalje rastavljati. Oštru kritiku tih počela dao je *Robert Boyle* (1627...1691). Umjesto tih počela, u to doba su sve više učenjaci prihvaćali Demokritov atomizam koji je bolje odgovarao općim atomističkim shvaćanjima u matematici i fizici toga doba. Na temelju atomističkog shvaćanja i Boyleove kritike tražio se tada model strukture tvari. Stvaranju tog modela pomogli su Boyleovi pokusi s plinovima, a plin je bio vrlo prikladan da se na njemu promotri model strukture tvari, jer se mogao stlačiti, a i eksperimentirao je ako nije bio u tome spriječen. Izneseno je više teorija koje se mogu podijeliti na one koje pretpostavljaju statički model plina i one koje predlažu kinematički.

Isaac Newton (1642...1727) bio je za statički model udaljenih čestica među kojima djeluje sila. Prema kinematičkom modelu su čestice u silnoj uzbudjenosti te jure kroz prostor ispunjen vrlo finim fluidom. Pod utjecajem Descartesove fizike učenjaci su držali da gibanje čestica dolazi od vrtloga u tom fluidu.

Peripatetička i atomistička shvaćanja odražavala su se također u XVII st. i na shvaćanje prirode svjetlosti. Aristotel je držao da je svjetlost val, a Demokrit je držao da se kroz prostor šire čestice koje prenose svjetlost. Jedno i drugo gledište prihvaćeno je u XVII st. Descartes je prihvatio prirodu svjetla kao vala koji se širi kroz fluid, a *Christian Huygens* (1629...1695) također je na tom temelju izgradio svoju teoriju valnog širenja svjetla. S druge strane, Newton se priklonio teoriji čestica i na temelju toga zasnovao svoju korpuskularnu teoriju svjetlosti.

Newtonova mehanika. Newton je dovršio proces stvaranja nove prirodne filozofije, odnosno fizike. U prvom redu on je na temelju Keplerovih gledišta o privlačenju među tijelima i drugih nastojanja u XVII st. formulirao opći zakon gravitacije (v. *Astronautika*, TE 1, str. 428, *Astronomija*, TE 1, str. 437). Iz njega je matematički izveo Keplerove zakone i to je smatrao dokazom da je pretpostavka izrečena zakonom gravitacije dobro izabrana. Newton je smatrao da taj zakon vrijedi i za mehaniku (v. *Mehanika*) na Zemlji, pa da je uzrok padanja kamena u toj općoj gravitaciji, a da on vrijedi i u nebeskim prostranstvima. Ipak, Newton nije odredio prirodu tog privlačenja, budući da bi to tražilo da se postavljaju pretpostavke koje ne izlaze iz pokusa, što je on smatrao nedopustivim. Na temelju Galilejevih, Descartesovih i drugih gledišta XVII st. formulirao je Newton načelo ustrajnosti, zatim aksiom da je promjena gibanja razmjerna sili koja je proizvođa i aksiom da svakoj akciji odgovara isto tolika reakcija. Ta tri aksioma Newton je postavio u temelj svoje mehanike i iz njih matematički deduktivno izvodio ostale tvrdnje. Newtonova metoda je bila geometrijska i pod snažnim utjecajem Euklida. Newton je pored tih aksioma postavio na početak svoje mehanike i nekoliko pojmova koje je definirao, kao npr. masa, veličina gibanja, sila inercije i dr., a pojmove prostora, vremena i gibanja nije definirao smatrajući te pojmove potpuno poznatim. Prihvatio je od Giordana Bruna pojam beskonačnog prostora koji je homogen i nazivao

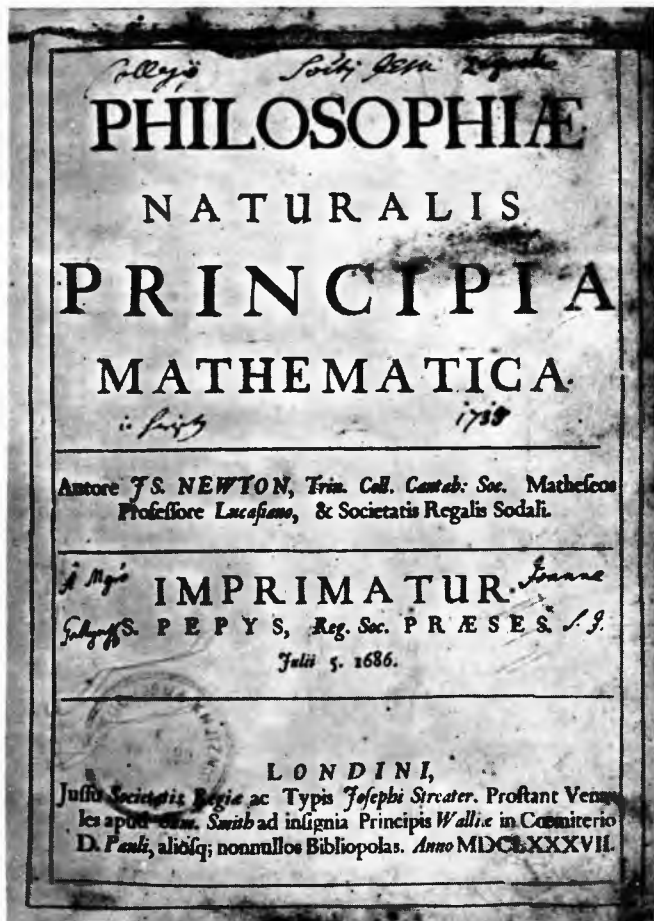
ga apsolutnim prostorom. Vrijeme je također smatrao apsolutnim. Iako je sve tvrdnje Newton formulirao općenito, ipak je mehaniku ograničio samo na Sunčev sustav. Proširenje Newtonove mehanike na cijeli svemir izvedeno je tek u XIX st.

Analiitička mehanika. U XVIII st. *L. Euler, J. R. D'Alembert* i *J. L. Lagrange* dali su Newtonovoj fizici analitički oblik, pa je tako došlo do tzv. analitičke i racionalne mehanike (v. *Mehanika, analitička*). Ti su učenjaci iz jedinstvenih načela izveli analitički sva područja mehanike.

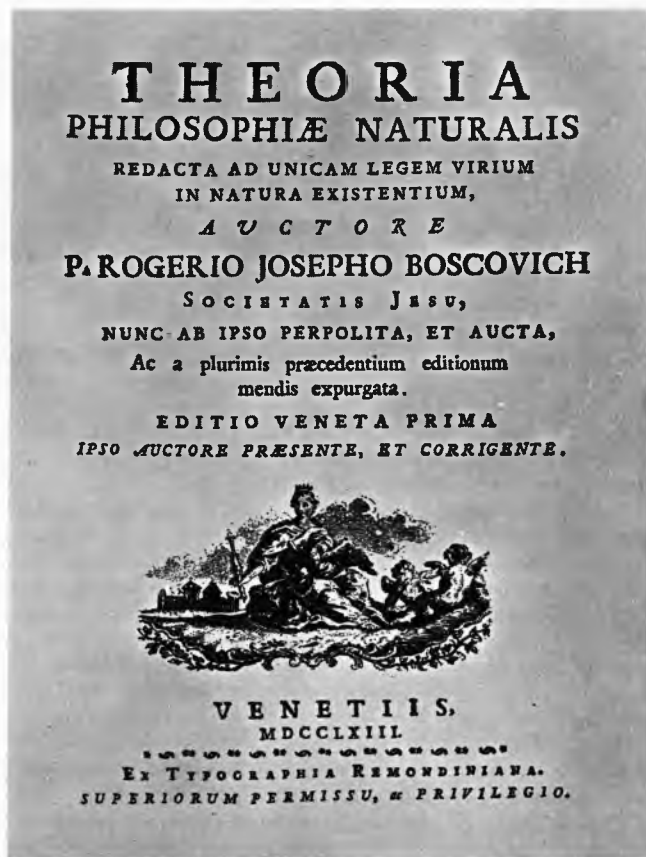
G. W. Leibniz i njegovi sljedbenici bili su uvjereni da se u prirodi ne događaju skokovi, pa su postavili tzv. zakon neprekidnosti koji vrijedi bez iznimke u prirodi. U XVIII st. taj je zakon doživio brojne kritike budući da nije u skladu s mnogim iskustvenim činjenicama (između ostaloga protivio se slučaju skoka brzine pri sudaru dviju kuglica). Nastojanje da spasi taj zakon navelo je dubrovčanina *Rudera Boškovića* (1711...1787) da dade sasvim novu teoriju o strukturi tvari. Po toj teoriji, sila je među česticama u vrlo malim udaljenostima odbojna, zatim nekoliko puta mijenja predznak i u većim udaljenostima postaje privlačna. Ta su gladišta mnogo utjecala na razvoj fizike u XIX st.

Iako je u XVII st. dosta prihvaćena peripatetička koncepcija širenja svjetlosti kao vala, ipak je peripatetičko tumačenje postanka boja kao miješanja svjetla i tame stvaralo mnoge teškoće (v. *Optika*). Mnogi su učenjaci opazili da se prolaskom svjetlosti kroz prizmu dobiva niz različitih boja. Newton je, tražeći uzrok toj pojavi, na temelju mnogih pokusa zaključio da je bijela svjetlost sastavljena od niza boja koje je nazvao spektar. U XVIII st. nije bilo moguće potvrditi koju teoriju svjetla treba prihvatiti. Međutim, kad je *Thomas Young* (1773...1829) oko 1800 otkrio interferenciju svjetlosti i valove svjetlosti usporedio s valovima zvuka i valovima vode, bila je valna teorija svjetlosti gotovo jednoznačno prihvaćena.

Grci su promatrali svijet kao cjelinu. Tako oni nisu nikada promatrali pojedini događaj ili proces izolirano od preostalog



Sl. 1. Naslovna strana Newtonovih *Principia* iz godine 1687, u kojima je prirodna filozofija — fizika prvi puta sustavno postavljena



Sl. 2. Naslovna strana Boškovićeve *Teorije* iz godine 1763, u kojoj je izložen potpuno nov pogled na materijalni svijet i pojave u njemu

svemira. Pokusi u XVI st. ponukali su učenjake da usredotoče svoju pozornost na konkretnu eksperimentalnu situaciju. Sve je više prevladavalo mišljenje da treba pažnju koncentrirati na mali broj okolnosti u izoliranoj situaciji. U takvom izoliranom sustavu ostajala su sačuvana neka svojstva i veličine. Descartes je govorio o očuvanju veličine gibanja, a Huygens je smatrao da je veličina mv^2 , gdje je m masa a v brzina tijela, konstantna u nekom zatvorenom sustavu. Leibniz je nazivao tu veličinu *živa sila*.

Istraživanja toplinskih pojava. Atomistička shvaćanja u XVII i XVIII st. utjecala su i na predodžbe topline. Većina učenjaka, koja je prihvaćala atomističku strukturu tvari, u to doba je zamišljala i da toplina dolazi od gibanja atomskih čestica. *Daniel Bernoulli* (1700...1782) dao je model plina na temelju pojma gibanja čestica. On je utvrdio da povećanju topline odgovara povećanje brzine čestica. Uz takvo su shvaćanje također pristali Euler, Lavoisier i Laplace.

Usprkos uspjeha ove teorije, došlo je u njoj i do nekih teškoća. Naime, mehanička teorija topline je bila u biti kvalitativna i nesposobna da dade neke zadovoljavajuće kvantitativne rezultate u prvoj polovini XVIII st. Iz pokusa je izgledalo da postoji neki agens koji ne samo što djeluje na osjet opipa, a osjeća se kao temperatura tijela, nego izaziva također promjenu sastava tijela. Takav agens nađen je u okviru Descartesove prirodne filozofije. Tako je toplina shvaćena kao fluid karakterističan za toplinske procese. Ta teorija omogućila je kvantitativno mjerenje topline (v. *Termodinamika*).

Elektricitet i atomizam materije. Elektricitet su grčki atomisti tumačili mehaničkim kontaktom između objekta koji privlači i onog tijela koji je privučen. Ta fizikalna veza je emisija koja potječe od natrljanog jantara ili od magneta. U XVI st. je *William Gilbert* prihvatio tu teoriju i zamislio da se oko natrljanog jantara ili oko magneta stvara neki efluvij. Kao atomistička teorija topline i atomistička teorija elektriciteta, ta je teorija doživjela zbog pokusa u XVIII st. modifikaciju. Za *C. F. de Cisternay du Faya* (*Dufay*) postoje dvije vrste elektriciteta, pa tako natrlijano

staklo odbija natrljano staklo, natrljani jantar odbija natrljani jantar, a natrljano staklo privlači natrljani jantar. On je efluvij tumačio kao vrtlog koji okružuje svaki električni objekt. To je potaklo na mišljenje da je i elektricitet fluid. *B. Franklin* je konačno prihvatio postojanje samo jednog električnog fluida kojega može biti više ili manje od normalnog. To je omogućilo kvantitativna mjerenja i pomoglo da *C. A. Coulomb* dođe do zakona koji nosi njegovo ime (v. *Elektrotehnika*, str. 124).

Jedan od prvih modernih modela strukture tvari dao je *John Dalton*. On je prihvatio atomističku strukturu tvari i zamislio da svaki atom okružuju ljuske s atmosferom topline i tako omogućuju fizikalni kontakt među atomima. Nove informacije o strukturi tvari pribavili su pokusi s plinovima. Osobito su bili važni pokusi *J. L. Gay-Lussaca*, na temelju kojih je *Amadeo Avogadro* izgradio novi model strukture tvari. On je pretpostavio da su atomi rasuti u praznom prostoru, a da se atomi spajaju u molekule. Na temelju postulata koji je poznat kao Avogadrov zakon on je uspio objasniti gotovo sve kemijske rezultate poznate u njegovo doba.

Iako je Leibniz uveo pojam žive sile koja je u biti energija, ipak tada još nije bio poznat pojam energije uopće. Lavoisier i Laplace poistovjetili su toplinu s Leibnizovim pojmom žive sile, čime je uspostavljena korespondencija između topline i mehaničke energije. Početkom XIX st. na temelju mnogih pokusa postalo je jasno da mora postojati neko jedinstveno načelo na kojem se temelje mehaničke i toplinske pojave, a 1842 god. *Julius Robert Mayer* (1814...1878) dokazao je da postoji opća ekvivalencija i očuvanje svih oblika energije. To je sve više upozoravalo na to da bi ipak morala biti vjerojatnija pretpostavka kinetičke teorije topline nego fluida. Teoriju topline na temelju gibanja čestica dao je *James Prescott Joule* (1818...1889).

Pojam polja djelovanja. Početkom XIX st. fizičari su pretežno vjerovali da postoji neko djelovanje na daljinu i postupali su s tim pojmom čisto formalno, ne pitajući se kakav je stvarni mehanizam tog djelovanja. Na takav način bi djelovala međusobno dva naelektrizirana tijela, magneti i tijela općenito gravitacijskom silom. Ali, zaobilazanje biti problema počelo je sve više smetati daljem razvoju znanosti i bilo je nužno da se pronađe upravo taj mehanizam djelovanja sile. *Michael Faraday* (1791...1867) u početku je tražio taj mehanizam u Boškovićevoj ideji središta sile. Međutim, Gilbertovi pokusi, koji su pokazali da se željezna piljevina postavlja u određene krivulje oko magnetu, dopunili su tu početnu ideju. Nakon toga Faraday je tvrdio da su magnetske crte sile realne iako nevidljive i da one prenose međusobno djelovanje tijela. Te crte same po sebi nisu supstancija, ali nastaju zgušnjavanjem etera za koji je i Faraday uzimao da ispunja prostor i omogućuje zračenje ugrijanih tijela. Prostor ispunjen tim magnetskim crtama nazivao je Faraday magnetsko polje, a isto tako prostor koji okružuje električki nabijeno tijelo, električno polje.

Elektromagnetski valovi. *Clerk Maxwell* je našao matematički oblik za Faradayeve eksperimentalne rezultate, posebno za njegove pokuse djelovanja magnetskog polja na električno i obrnuto. Maxwell je dobio skup jednadžbi polja iz kojih je izvodio i takve rezultate koji još nisu bili provjereni eksperimentalno. Po Maxwellu za neku dugu ravnu žicu koja vodi električnu struju postoji u okolnom prostoru tzv. elektromagnetsko polje. Ako električni naboji u žici dobivaju akceleraciju, prema Maxwellovim jednadžbama vidi se da je time odaslan u okolni prostor impuls neke energije i taj se širi brzinom svjetlosti. Ako struja u žici oscilira, valni će se niz neprekidno širiti u svim smjerovima brzinom svjetlosti. Zbog toga je Maxwell zaključio da je svjetlost elektromagnetski val (v. *Elektrotehnika*, str. 143).

William Herschel istraživao je (1801) termalna svojstva spektra i utvrdio da se toplinski efekt povećava u blizini vidljivog dijela spektra. Iste je godine *J. Ritter* pustio da padne spektar Sunca na ploču pokrivenu srebrom-nitratom i opazio da se pocrnjenje širi prema ljubičastom području spektra. Time je postalo jasno da vidljivo svjetlo predstavlja samo dio neprekidnog spektra elektromagnetskih valova. 1888 je *Heinrich Hertz* (1857...1894) pokazao da se oscilacijama iskre između dviju kuglica spojenih na izvor struje stvara elektromagnetski val koji može proizvesti iskru između drugog para kuglica postavljenog na nekoj udaljenosti

od prvih, pa je na taj način potvrdio Maxwellovu teoriju barem za frekvencije koje su različite od frekvencija vidljivog svjetla.

Poteškoće klasične fizike. Maxwellovom teorijom klasična je fizika dostigla svoj vrhunac. Povezana su i neka dotad različita područja fizike: optika, elektricitet i magnetizam. S druge strane, atomi i molekule su smatrani temeljnim dijelovima tvari. Toplina se očituje u njihovom gibanju. Zvuk je val, a isto tako i svjetlost. Izgledalo je da se sva područja fizike mogu objasniti mehanički na temelju nekih jedinstvenih načela. Kraj XIX st. pokazao je da to nije tako.

Tome su prethodili neki drugi događaji. U toku XIX stoljeća učenjaci su se čudili kako voda u kojoj je rastopljena npr. sol vodi električnu struju. 1884 godine *Svante Arrhenius* (1859...1927) pretpostavio je da postoje nabijeni atomi koje je nazvao *ionima*. Oni su po njegovom mišljenju uzrok vodljivosti. Međutim, ako postoji nabijeni atom, onda on može imati nešto više ili nešto manje tvari od neutralnog atoma, a to se protivi pojmu atoma.

Da se riješio taj problem pomogli su neki drugi pokusi. Otkriće Geisslerovih cijevi postavilo je pitanje što je električna struja. *William Crookes* (1832...1919) je otkrio da iz katode izlaze neke čestice negativno nabijene, a te je 1891 god. G. J. Stoney nazvao *elektronima*. *Joseph John Thomson* (1856...1940) zaključio je da su katodne zrake elektroni, koji su zajednički svim tvarima. Arrheniusovi zaključci o ionima upućivali su na to da ti elektroni moraju biti sastavni dio atoma. Da bi atom bio neutralan treba postojati njegov dio koji je pozitivno nabijen. Thomson je najprije mislio da je to pozitivno nabijeni fluid u koji su usadeni elektroni. Oscilacije tih elektrona oko ravnotežnih položaja proizvode elektromagnetske valove. Na taj način je bilo moguće objasniti oscilacijom elektrona u atomu mnoge pojave koje su slijedile iz Maxwellove teorije. S druge strane, postalo je jasno da se električna struja sastoji od elektrona, a ne od električnog fluida. Tako je konačno bila priroda elektriciteta i struktura tvari međusobno povezana. Pored tog modela Thomson je dao i model atoma u kojem se elektroni gibaju. On je pretpostavio da se elektroni gibaju oko pozitivno nabijene jezgre. Za tu pretpostavku on je primijenio Boškovićeovu teoriju, po kojoj se čestice mogu gibati samo po nekim krivuljama oko drugih. Planetarni model strukture atoma eksperimentalno je potvrdio *Ernest Rutherford* (1871...1937). Opravdanje uvođenja mogućih staza elektrona dao je *Niels Bohr* (1885...1962). On je postulirao da sustav jezgra-elektron normalno ne zrači energiju. Elektron prelazi s vanjske staze više energije na unutarnju stazu niže energije, pri čemu se višak energije emitira kao kvant elektromagnetskog zračenja (v. *Atom*, TE 1, str. 456).

Stefan-Boltzmannov zakon i Wienov zakon za zračenje užarenog tijela pronađeni krajem XIX stoljeća potvrđivali su Maxwellovu teoriju. Ali, usprkos tome, nije bilo moguće teoretski izvesti oblik krivulje koja bi prikazivala ovisnost emitirane energije i valnih duljina o svakoj pojedinoj temperaturi. *Max Planck* (1858...1947) uvjerio se da zračenje svjetlosti potječe od submikroskopskih električnih oscilatora, a nakon Thomsonovih pokusa bilo je jasno da takve oscilacije proizvode upravo elektroni. Da bi izveo relaciju koja daje raspored emitirane energije po valnim duljinama, Planck je pretpostavio da svaki oscilator može imati samo neku definiranu energiju i da zrači samo onda kad on mijenja jednu dopustivu energetska vrijednost, u drugu manju. Time je odstupio od načela klasične fizike. U početku Planck nije mogao opravdati svoju teoriju, ali je već 1905 god. *Albert Einstein* pokazao da se kvantna pretpostavka mora primijeniti kod objašnjenja fotoefekta. Novi pokusi potvrđivali su sve više Planckovu pretpostavku, pa je time bio otvoren put *kvantnoj fizici*.

Još je Newton pokušao eksperimentalno dokazati postojanje apsolutnog prostora. U XIX st. učenjaci su pokušali identificirati apsolutni prostor s eterom i dokazati njegovo postojanje. *Albert Abraham Michelson* (1852...1931) i *Edward Williams Morley* (1838...1923) pokušali su to eksperimentalno dokazati, ali njihov pokus nije dokazao postojanje etera. To je navelo Alberta Einsteina da odbaci pojam etera i da postulira da u svim sustavima koji miruju ili se konstantnom brzinom gibaju vrijede isti fizikalni zakoni, i da je brzina svjetlosti u svim takvim sustavima jednaka.

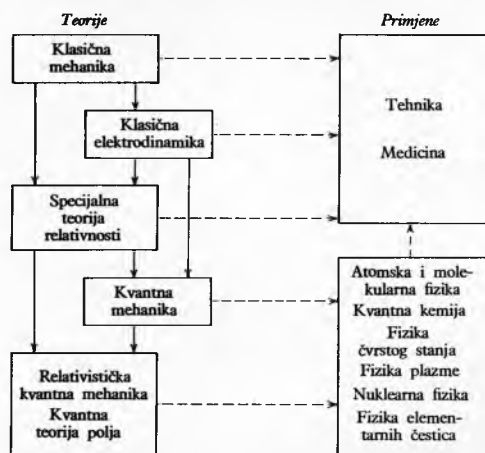
To je zahtijevalo reviziju klasične fizike i uvedena je nova *teorija relativnosti*.

Problem zračenja užarenih tijela i Michelson-Morleyev pokus prodrмали su klasičnu fiziku i označili njezinu krizu. Otkriće elektrona i jezgre atoma (v. *Atomska jezgra*, TE 1, str. 479 i *Subatomske čestice*), kao i otkriće radioaktivnosti potakli su snažan razvoj nuklearne fizike (v. *Nuklearna fizika*), tako da posljednjih nekoliko desetaka godina u fizici zapravo dominira nuklearna fizika u kojoj su učinjena najvažnija otkrića i kroz koju su se otvorili najvažniji novi pogledi na materijalnu stvarnost. Ali razvoj fizike u tom razdoblju dio je naših današnjih pogleda u fizici.

Ž. Dadić

SUVREMENA FIZIKA

Značajke suvremene fizike su sve općiji pogled na prirodu i tumačenje niza pojava na osnovi nekoliko vrlo općenitih principa, te sve veće udaljavanje od priproste intuitivne predodžbe o svijetu.



Sl. 3. Shematski prikaz međusobnog utjecaja fizikalnih teorija te njihovog utjecaja na glavna područja primjene

Početkom XX stoljeća usporedno se razvijaju teorija relativnosti i kvantna fizika. Jedna kao konačna razrada Maxwellove elektrodinamike, a druga kao posljedica nastojanja da se klasična mehanika i elektrodinamika prošire na opisivanje atomske građe tvari.

Transformacijska invarijantnost. U svojoj sintezi, još u renesansi započete revolucije u znanosti, *I. Newton* je naglasio značenje kvantitativnih mjerenja, spoznavanja zašto se stvari događaju kroz opis kako se one događaju, odbacujući aristotelovske moralno etičke antropomorfnе attribute kao irelevantne za tvorni svijet. U novom gledanju, koje je u povijesti ljudskog umnog razvoja isto toliko važno kao i starogrčki skok od empirijske geometrije starih Egipćana i Babilonaca do logički sazdanе euclidске matematičke zgrade, važni su analitički geometrijski koordinatni sustavi (*R. Descartes*, 1637). Objektivne prirodne pojave ne mogu ovisiti o samovoljno odabranom koordinatnom sustavu za njihovo matematičko opisivanje. U suvremenoj su teoretskoj fizici proučavanja ponašanja teoretskih izraza pri promjenama koordinatnih sustava, tzv. *transformacijska invarijantnost*, neobično važne. Te invarijantnosti mogu se povezati sa sačuvanjem fizikalnih veličina (*E. Nöther*, 1918.). Tako npr. invarijantnosti pri translaciji sustava, tj. sloboda u izboru početka koordinatnih osi, znači u četvorodimenzionalnom vremenu-prostoru sačuvanje energije i impulsa. Ta fizikalna relativnost izbora koordinatnog sustava dala je ime teoriji relativnosti. Još krajem XIX st. spoznato je da Maxwellove jednadžbe (v. Osnove elektromagnetske teorije u članku *Elektrotehnika*, str. 143) mijenjaju svoj oblik pri jednolikom gibanju koordinatnog sustava ako se pri tome vrijeme smatra apsolutnim i nepromjenljivim. Newtonove jednadžbe su s obzirom na takve transformacije nepromjenljive. Međutim, sva nastojanja da se djelovanje promjena u elektrodinamičkim sustavima zbog jednolikog gibanja izmjere (najosjetljiviji tadanji pokušaj bio je već spomenuti Michelson-Morleyev pokus) bila su bezuspješna. Proučavajući sustave u gibanju, *H. A. Lorentz*

je ustanovio 1899 i 1903 da Maxwellove jednadžbe ostaju nepromijenjene uvede li se transformacija vremena, koja vodi na neko drugo vrijeme koje je Lorentz nazvao lokalno vrijeme. Te Lorentzove transformacije, čije je potpuno fizikalno značenje spoznao nešto kasnije *A. Einstein*, važna su sastojina moderne fizike. Maxwellova teorija izvanredno je empirijski opravdana, u njoj je sadržano stoljetno iskustvo o elektromagnetizmu i sastavni je dio naše tehnologije i industrijskih primjena. Isto, naravno, vrijedi i za zakone klasične mehanike. Bilo je zbog toga vrlo neobično kada se krajem prošlog i početkom ovog stoljeća činilo da su elektromagnetski i svjetlosni fenomeni u suprotnosti s mehaničkim zakonima. Poznati matematičar *H. Poincaré* posumnjao je u valjanost klasične mehanike (1904), nagadajući da će se razviti nova vrsta dinamike kod koje će najveća moguća brzina biti brzina svjetlosti. U svom fundamentalnom radu (1905) *A. Einstein* je analizirao pojam istodobnosti koji je bitan za mjerenje vremena. Pokazao je da se istodobnost može ustanoviti samo slanjem signala između opažaca, te da ovisi o najbržem mogućem posredniku, a to je svjetlost. Uzme li se da je brzina svjetlosti u svim koordinatnim sustavima jednaka, dobiju se za prijelaz od sustava na sustav Lorentzove transformacije. Time su protumačeni negativni rezultati Michelson-Morleyevog i drugih sličnih pokusa. Pojava dužinske kontrakcije (*G. F. Fitzgerald*, 1892) i dilatacije vremenskog razmaka (*J. Larmor*, 1900), koje su stariji istraživači pripisivali elektromagnetskim pojavama u tvari, posljedica su načina mjerenja, koje je određeno fizikalnim silama i zakonima. Newtonovske jednadžbe mehanike moraju se modificirati, no odstupanja od klasične fizike postaju značajna tek pri vrlo velikim brzinama, blizim brzini svjetlosti, u Maxwellovim jednadžbama mjerenje vremena je i nesvjesno bilo uključeno na relativistički način i te jednadžbe su relativističke. Modifikacije mehanike nevažne su u svakidašnjem životu, no one postaju važne već pri konstrukciji elektroničkih uređaja. Već je 1901 *W. Kaufmann* primijetio da se gibanje vrlo brzih elektrona može opisati klasičnom mehanikom samo ako se dozvoli porast mase s brzinom. Specijalna teorija relativnosti, sinteza klasične mehanike i elektrodinamike, bez poteškoća opisuje sve takve pojave. Njena valjanost je dokazana i svakodneвно se dokazuje u tvornicama i laboratorijima širom svijeta. Rad velikih i moćnih akceleratora elementarnih čestica i pojave koje se s njima proučavaju u potpunom su skladu s teorijom relativnosti i mogu se samo kroz nju sustavno spoznati. Poznato je npr. da brze nestabilne čestice postoje (»žive«) duže od jednakih mirnih čestica, kako to i traži relativistička dilatacija vremena. (*B. Rossi* i *D. B. Hall*, 1941.) Prema jednoj procjeni 1963 je u USA valjanost euclidске geometrije na kojoj se osniva klasična mehanika ispitana pri geodetskim mjerenjima bar 840 000 puta s točnošću od barem 10^{-5} . Istovremeno je pri radu akceleratora elementarnih čestica ispravnost Lorentzovih transformacija koje su osnova teorije relativnosti dokazana barem 1 000 000 puta s jednakom ili većom točnošću. Danas se više i ne govori o specijalnoj teoriji relativnosti kao o posebnoj fizikalnoj teoriji. Zahtjev relativističke invarijantnosti, tj. nepromjenljivosti teorije prema Lorentzovim transformacijama, ugrađen je u sve fizikalne teorije, pa i u kvantnu mehaniku.

Kvantna mehanika. Ta se disciplina razvila u nešto više od jednog desetljeća nakon Bohrovog izvoda vrijednosti Rydbergove konstante (*J. R. Rydberg*, 1890, *N. Bohr*, 1913) i tumačenja Balmerove serije (*J. J. Balmer*, 1885) atomskih spektara. Važne doprinose Bohrovom teoriji dao je *A. J. W. Sommerfeld* (1915), koji je pokazao kako se ona može poopćiti na slučaj eliptičkih staza elektrona, te protumačio hiperfinu strukturu spektralnih linija kao relativističku pojavu.

Proučavajući srazove elektrona i atoma *J. Frank* i *G. Hertz* su 1914 pokazali da se i kod tog procesa predaja energije zbiva u skokovima (v. *Atom*, TE 1, str. 458). Niz pojava u vezi s atomima, njihovim spektrima i drugim svojstvima, počela se kvalitativno, a ponekad i kvantitativno razumijevati. No tumačenje fine strukture spektara alkalijskih metala ili Zeemanovog efekta, nije bilo moguće u okvirima jednostavne Bohrove teorije. Zeemanova pojava (*P. Zeeman*, 1896), da se pri zračenju atoma u snažnom magnetskom polju spektralne linije dijele, bila je važan ko-

rak, uz Rutherfordov rad, za shvaćanje da i atomi imaju neku strukturu (*H. A. Lorentz*, 1897). Ključ za tumačenje došao je kroz opažanje da se rojevi atoma pri prijelazu kroz nehomogeno magnetsko polje dijele u nekoliko komponenata. Moralo se zaključiti da elektron nosi svoj vlastiti impulsni moment, tzv. *spin* (v. *Atom*, TE 1, str. 460) (*G. F. Uhlenbeck* i *S. Goudsmit*, 1925), koji bi u naivnoj slici sličnoj planetarnom sustavu bio analogan okretanju planeta oko vlastite osi. Spin je pomogao *W. Pauliju* (1924) pri formulaciji znamenitog principa isključenja, koji kaže da u atomu niti dva elektrona ne mogu biti u istom kvantnom stanju. Na osnovi principa isključenja elektroni postepeno pune atomske staze, tako da u svakoj može biti određen broj, pa se jedino tako mogu shvatiti atomski spektri i periodni sustav elemenata (v. *Atom*, TE 1, str. 463 i 466). Pri proučavanju nakupina čestica ili atoma metodama statističke fizike primijećeno je da postoje dvije statistike: za čestice s polovičnim spinovima, kao što je elektron, vrijedi princip isključenja (*E. Fermi*, 1926), dok za čestice s cijelim spinovima ne vrijedi (*S. N. Bose*, 1924, *A. Einstein*, 1924). Do sredine dvadesetih godina razvijena stara kvantna teorija bila je još puna formalnih proturječnosti i nekonzistentnosti. U njoj su na klasičnu elektrodinamiku i mehaniku bili nadodani kvantni postulati, što se opravdavallo empiričkim uspjehom. No, dok je tu predviđanje rasporeda spektralnih linija po frekvencijama bilo izvrsno, teorija je tek s velikim poteškoćama mogla nagađati o jakosti ili intenzitetu dane spektralne linije. Valna svojstva svjetlosti, ogib i interferencija nisu se mogli povezati sa svjetlosnim česticama, fotonima, koji se gibaju prostorom kao puščana tanad, što je slijedilo iz Einsteinovog opisivanja fotoefekta. Izučavajući sudare fotona i elektrona *A. H. Compton* (1923) našao je zakone slične sudarima materijalnih objekata. Budući da se radilo o velikim brzinama, pri proračunu je upotrijebljena relativistička formulacija mehanike, a svjetlost je shvaćena kao roj fotona.

Valovi materije. Dalji razvoj kvantne teorije učinio je taj dualizam val-čestica manje zabrinjavajućim. Potaknuti *L. de Broglievim* spekulacijama (1923) o valovima materije (v. *Atom* TE 1, str. 458), više je fizičara pokazalo (*W. Elsasser* 1925; *C. J. Davison* i *C. H. Kunsman* 1925; *C. J. Davison* i *L. H. Germer* 1927; *G. P. Thomson* 1927) da se elektron pri raspršenju na vrlo finoj kristalnoj rešetki ogiba baš kao i svjetlost. *W. Heisenberg* je 1925 u nastojanju da opiše atomske spektre, upotrebljavajući samo fizikalno mjerljive amplitude povezane s jakošću spektralnih linija, postavio algebarski sustav jednadžbi. Ta teorija, razrađena kasnije (*M. Born*, *W. Heisenberg* i *P. Jordan* 1926; *P. A. M. Dirac* 1925) u kvantnu mehaniku (baziranu na formalizmu nekomutativnih operatora) mogla je na matematičko konzistentan i fizikalno potpun način opisati kvantne fenomene. Ubrzo poslije toga, *F. Schrödinger* je (1935), nadovezujući se na de Broglieve ideje i na sličnost između klasične mehanike i geometrijske optike (*W. R. Hamilton*, 1934), konstruirao svoju valnu mehaniku u analogiji s valnom teorijom svjetlosti. Schrödinger je uskoro pokazao matematičku ekvivalentnost između svoje valne mehanike i Heisenbergove kvantne mehanike. Danas govorimo o kvantnoj mehanici prema Schrödingerovom ili prema Heisenbergovom prikazu, te je svaki od njih pogodan za određene primjene (v. *Kvantna mehanika*). Nerelativistička verzija kvantne mehanike bila je bitna kod otkrivanja poluvodiča i izuma lasera, te polako već ulazi u tehničke primjene. Dopolnjena spoznajom o elektronskom spinu dovoljna je za potpuno shvaćanje periodnog sustava elemenata i za opisivanje molekula i kemijskih reakcija. Kroz njene primjene na sustave s više čestica razvile su se discipline: atomska fizika, fizika čvrstog stanja, molekularna fizika, kvantna kemija, nuklearna fizika i sl. (v. *Atom*, TE 1, str. 456; *Čvrsto stanje* TE 3, str. 128; *Kemija*; *Nuklearna fizika*).

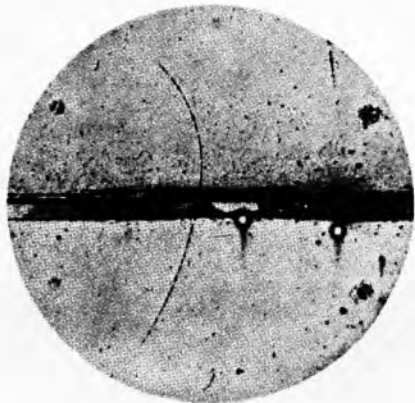
Statistička interpretacija kvantne mehanike. Proučavanje strukture kvantne mehanike i njene fizikalne interpretacije veoma je izmijenilo naše predodžbe o načinu na koji spoznajemo materijalni svijet. Pokazalo se (*M. Born*, 1926) da teorija daje samo statističke informacije o vjerojatnosti zbivanja nekog događaja. Kod raspršenja elektrona na kristalnoj rešetki, teorija ne može predvidjeti ponašanje pojedinog elektrona, nego samo kaže kolika je vjerojatnost da se elektron negdje nađe. Ponovi li

se eksperiment za mnogo elektrona, statistička distribucija odgovara ogibnoj valnoj slici, pa je tako problem dualizma val-čestica razriješen. Statistička interpretacija kvantne mehanike bitno je različita od klasične statistike, gdje je statističko ponašanje posljedica toga što nema točnih informacija o svakoj čestici u mnoštvu, iako se te informacije, u principu, mogu saznati. U kvantnoj se mehanici ne mogu u principu dobiti potpune informacije o danoj čestici, što je formulirano kroz znameniti princip neodređenosti (*W. Heisenberg*, 1927). Impuls i položaj elektrona npr. ne mogu se istodobno po volji točno izmjeriti. Ako je položaj apsolutno poznat, impuls je neodređen i obrnuto. Promatranje nekog fizikalnog sustava znači međudjelovanje sustava s nekim mjernim instrumentom. Po predodžbama klasične fizike, takvo se međudjelovanje zbiva kontinuirano. Može se, dakle, po volji smanjiti, toliko da postane nevažno. No, kod kvantne mehanike samo postojanje kvantnih skokova ograničava mogućnost da se takvo međudjelovanje potpuno reducira. Princip neodređenosti je mnogo puta eksperimentalno verificiran. Osobito je uvjerljivo mjerenje kod nuklearnih raspada, gdje se pokazuje da sve točnije određenje poluživota dovodi do sve veće netočnosti u određivanju energije emitiranog zračenja. Napuštanje jednostavnog determinističkog shvaćanja fizike protivi se, naravno, našem svakidašnjem iskustvu, zasnovanom na vizuelnim i čulnim opažanjima pojava pri kojima su kvantni fenomeni nevažni. Kod atomskih i subatomskih pojava radi se obično o obilju događaja, pa se ta točnost statističkog predviđanja, kao npr. ogibne slike, može testirati izvanredno precizno, često mnogo točnije od mjerenja karakterističnih za klasičnu fiziku iz prošlog stoljeća. Mnogobrojna nastojanja da se ipak razvije deterministička slika kvantnih pojava bila su do sada potpuno bezuspješna. To je 1959 potaklo *D. Bohma* i *Y. Aharonova* da načine pokus koji je pokazao da i elektromagnetski potencijal (dakle nefizikalna veličina u klasičnoj fizici koja poznaje samo polja) i u situaciji u kojoj je polje isključeno utječe na ogib elektrona. To je sasvim u skladu s kvantnomehaničkim jednadžbama.

Stvaranje i nestajanje čestica. Iako vrlo uspješna i u sebi potpuno konzistentna teorija, kvantna mehanika određena Heisenbergovim hamiltonijanom i Schrödingerovom jednadžbom, ne opisuje sve prirodne fenomene. Ta formulacija nema relativističku invarijantnost. U kvantnoj mehanici uzima se da je broj čestica konstantan pa nema mogućnosti da se opiše čin spontane emisije svjetlosti, koji znači stvaranje nove čestice, fotona. Sličnost s klasičnom teorijom elektromagnetizma omogućavala je da se emisija fotona proračuna, no to nije zadovoljavalo potrebu za jasnoćom i skladnošću fizikalne teorije. Želeći ukloniti tu nedorečenost i nepotpunost. *P. A. M. Dirac* je, upotrebljavajući analogiju s harmoničkim oscilatorom, kvantizirao elektromagnetske valove (v. *Atom*, TE 1, str. 463 i *Kvantna mehanika*) (1927). Njegov je rad jedno od važnih znanstvenih dostignuća u našem stoljeću, budući da se u njemu prvi put poslije tisuća godina postojanja atomističkih teorija javlja mogućnost da je broj elementarnih djelića materije promjenljiv. Diracov rad nadovezuje se na dugi razvoj. Započeo ga je *J. W. Rayleigh* 1900 kada je pri izvodu klasične teorije zračenja užarenog tijela promatrao svjetlosne titraje u prostoru kao statistički sustav harmoničkih oscilatora. Već 1906 je *P. Ehrenfest* predlagao da se Planckova kvantizacija oscilatora u tijelima koja zrače proširi i na zamišljene oscilatore elektromagnetskog polja. To je omogućilo *P. Debyeu* da 1910 izvede Planckov zakon zračenja. No prava veza s Einsteinovim česticama svjetlosti dugo nije bila shvaćena. Tek 1926 su *M. Born*, *W. Heisenberg* i *P. Jordan* uočili matematičku ekvivalentnost Debyeovog pristupa s Einstein-Boseovom kvantnom statističkom teorijom plinova. Jer ako kvantizacija Rayleighovih oscilatora daje isti rezultat kao teorija koja opisuje mnoštvo čestica nekog plina, onda su ti kvantizirani valovi zapravo svjetlosne čestice. Diracova uspješna formulacija tih ideja još uvijek nije vodila na skladnu i simetričnu teoriju međudjelovanja elektrona i fotona. Heisenbergova i Schrödingerova kvantna teorija odgovarala je zapravo nekvantiziranim Maxwellovim jednadžbama. Osim toga teorija fotona bila je, automatski, i relativistički invarijantna.

Materija i antimaterija. Još je Schrödinger pokušao povezati čestice i valove na relativistički način. Primjenjujući takvu

teoriju na vodikov atom, primijetio je da se ne slaže s pokusima. Međutim, nerelativistička aproksimacija, tj. znamenita Schrödingerova jednadžba koju je posljednju objavio, bila je točnija. Kasnije je i primijećeno da se relativistička verzija teorije ne može interpretirati u smislu Bornovih vjerojatnosti. Razrješenje obaju problema poteklo je 1928 od *P. A. M. Diraca*, koji je uveo u teoriju spinore. Pokazalo se da postoji više relativističkih verzija Schrödingerove teorije te da prvobitna Schrödingerova relativistička jednadžba (poznata u fizici po kasnijim istraživačima kao Klein-Gordonova jednadžba) opisuje čestice bez spina. Elektroni, čestice spina 1/2, opisani su Diracovom jednadžbom, čija su rješenja u potpunom skladu s finom strukturom atomskih spektara. No uz ta rješenja Diracove jednadžbe pojavila su se rješenja koja bi formalno odgovarala česticama negativnih energija, što je očito bilo besmisleno. Dirac je ta »suvišna« rješenja pokušao pripisati nekim novim česticama različitim od elektrona. Učenjaci su ubrzo spoznali da bi ta dodatna rješenja mogla odgovarati čestici pozitivne energije koja ima istu masu kao elektron, no suprotni električni naboj. Proučavajući u Wilsonovoj komori (*C. T. R. Wilson*, 1897) putanje čestica stvorenih kozmičkim zračenjem (v. *Detekcija nuklearnog zračenja*, TE 3, str. 240), *C. D. Anderson* otkriva 1932 pozitron ili pozitivni elektron, koji ima svojstva baš kao što ih je teorija i predviđjela. Andersonov pokus, pri kojem

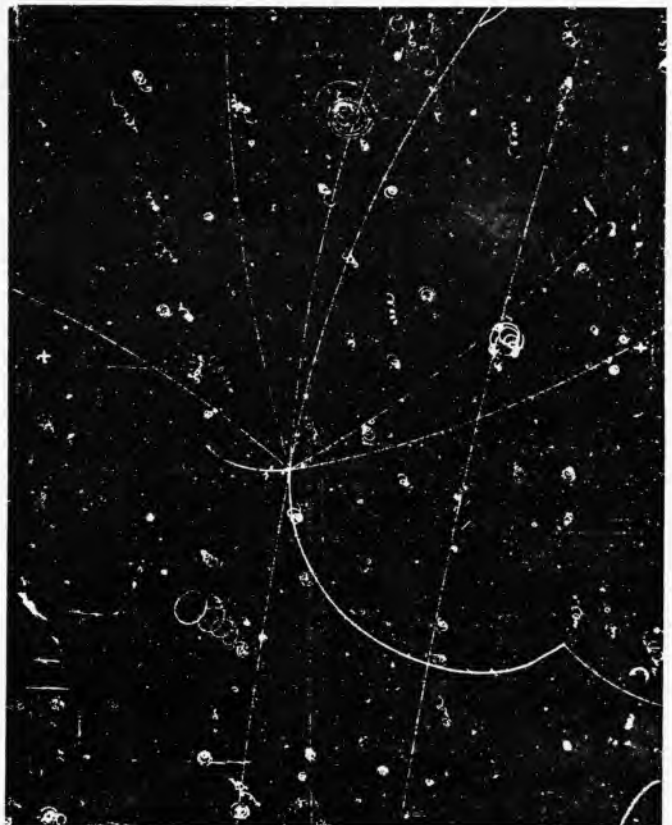


Sl. 4. Snimka maglene komore s kojom je objavljeno Andersonovo otkriće pozitrona 1933. Pozitron, energije 63 MeV, prolazi kroz horizontalnu olovnu pločicu, debelu 6 mm i izlazi s energijom od 23 MeV. Trag je zakrivljen jer se komora nalazila u magnetskom polju okomitom na ravninu slike

je visokoenergetski proton pogodio atomsku jezgru stvorivši par elektron-pozitron, donio je i bitno novu spoznaju. Nisu samo fotoni čestice koje u prirodi mogu nastajati i nestajati, nego to vrijedi za kvante ostalih polja, tj. za elementarne čestice (v. *Subatomske čestice*). U suvremenu teoriju polja pozitron je ugrađen potpuno simetrično s elektronom (*P. Jordan* i *E. Wigner*, 1928; *W. Heisenberg* i *W. Pauli*, 1929, *E. Fermi* 1930), on je njegova antičestica. U teoriji polja i materija (čestica) i antimaterija (antičestica) promatraju se na potpuno simetričan način. O izboru je ovisno što će se nazvati materijom, a što antimaterijom. U kvantnoj teoriji polja elektroni, fotoni i druge elementarne čestice opisuju se na ravnopravan način te u njoj više nema proturječna val-čestica. Tako je Diracovo otkriće čestica i antičestica potpuno izmijenilo pogled na fiziku. Do toga su doba elementarne čestice zamišljane u duhu antičke Demokritove filozofije kao najmanji djelići tvari koji se nikada ne promijene i nikada se ne mogu pretvoriti u nešto drugo. Starodrevni antički problem dijeljenja materije osvjetljen je sada na nov način. Prirodi ne odgovara ni jedna od dviju naivnih logičkih mogućnosti: da se materija ili može beskonačno dijeliti u sve manje i manje dijelice ili da se mora jednom doći do najmanjih mogućih čestica. Relativistička povezanost mase i energije (*A. Einstein*, 1906) znači u teoriji polja mogućnost stvaranja čestica iz energije. Foton dovoljno visoke energije može se u nedogled dijeliti u sve nove i nove parove čestica-antičestica. Pljuskovi čestica zapaženi najprije u kozmičkom zračenju stvaraju se i proučavaju svakodnevno pri akceleratorским eksperimentima.

Kvalitativno opisivanje obilja događaja, stvaranja, pretvorbi i međudjelovanja, koje se otkrilo u svijetu elementarnih čestica bio je potpun uspjeh kvantne teorije.

Uspjesi i poteškoće suvremene fizike. Mnogi drugi uspjesi koji su slijedili nisu bili tako potpuni, ostavljajući ili neke nedorečenosti ili zahtijevajući uvođenje semiempiričkih pretpostavki. Kvantna teorija, kao uostalom i sve teorije prije, nailazi na velike poteškoće pri opisivanju problema mnogih tijela. Oslanjajući proračunske aproksimacije na eksperimentalne podatke, moglo se postići shvaćanje supravodljivosti (*H. Fröhlich*, 1950, *J. Bardeen*, *L. N. Cooper* i *J. R. Schriffer*, 1957), suprafluidnosti (*L. D. Landau*, 1941), razumjeti svojstva poluvodiča i predvidjeti mogućnost konstrukcije tranzistora (*J. Bardeen* i *W. Shockley*, 1946) (v. *Elektronika*, TE 4, str. 471). Shvaćena su mnoga svojstva strukture atomske jezgre (*W. Heisenberg*, 1932, *N. Bohr*, 1936; *M. G. Mayer*, 1948, *J. H. D. Jensen*, 1949, *A. Bohr* i *B. Mottelson*, 1953), iako su tu svi uspješni pristupi nužno poluempirički zbog nedovoljnog poznavanja prave prirode nuklearnih sila. Poteškoće su povezane s još vrlo površnim razumijevanjem svijeta elementarnih čestica s jedne strane i sa stanjem u kvantnoj teoriji polja s druge strane. U poratnim godinama završena je formulacija računa smetnje u kvantnoj elektrodinamici (*R. P. Feynman*, 1949, *J. Schwinger*, 1948, *S. Tomonaga*, 1948, *F. Dyson*, 1949). Nađena je mogućnost uklanjanja beskonačnosti koje se javljaju pri proračunima kroz postupak renormalizacije (*H. A. Kramers*, 1938). Iako je moguće konstruirati formulaciju teorije u kojoj se beskonačnosti ne javljaju (tzv. postupak LZS), među znanstvenicima postoji čvrsto uvjerenje da još uvijek nije postignuto potpuno razumijevanje. Kvantna elektrodinamika uspjela je objasniti mala odstupanja u vodikovom spektru (*W. E. Lamb* i *R. C. Retherford*, 1947; *H. A. Bethe*, 1948) te anomalnu veličinu magnetskog momenta elektrona (*H. M. Foley* i *P. Kush*, 1947, *J.*



Sl. 5. Snimka maglene komore koja pokazuje anihilaciju protona i antiprotona u pionic. Glavni događaj je u sredini slike. Antiproton upada odozdo i njegov je trag gotovo ravan. Pri anihilaciji je stvoreno osam piona. Jedan od njih, koji je gotovo suprotno usmjeren od upadnog antiprotona, raspada se na mion i neutrino. Mion se nadalje raspada na pozitron i dva neutrina. Trag miona je oštar za razliku od tragova piona, a početak traga pozitrona se jasno vidi. Komora je smještena u magnetskom polju okomitom na ravninu slike. Tragovi negativnih čestica zakreću se u smjeru kazaljke na satu, a tragovi pozitivnih čestica u obratnom smjeru. Sporije čestice ostavljaju gušće, a brže isprekidane tragove

Schwinger, 1949). Ni jedan od tih fenomena nije se mogao shvatiti u kvantnoj mehanici, gdje se ostalo na razini u kojoj nije u teoriju uključena mogućnost stvaranja i nestajanja čestica. U jeziku kvantne elektrodinamike fizikalni foton uključuje u sebi i bezbrojne virtualne parove elektron-pozitron, dok je elektron također okružen virtualnim fotonima i parovima, sve u neprekidnom međudjelovanju. Mnogobrojni pokusi u kojima se proučava međudjelovanje elektrona i fotona nisu još otkrili nikakvo neslaganje s kvantno-elektrodinamičkim teoretskim opisom, iako je već postignuta točnost od jedne desetisučinke od 1%. To je dovelo do nastojanja da se ideje kvantne teorije polja primijene i na druge procese. Njena nerelativistička verzija bila je bitna za razumijevanje već spomenutih mnogočestičnih fenomena. Važan sastojak današnje fizike su tzv. *Feynmanovi* dijagrami, slikoviti prikaz fizikalnih procesa u obliku simboličkog crteža kojemu se po jednostavnim pravilima mogu pridruživati odgovarajući matematički izrazi. Isto je tako koristan i pojam *S-matrice* (*W. Heisenberg*, 1943). Ta formulacija teorije želi raditi samo s eksperimentalno mjerljivim veličinama te se u njoj očituje uzročna povezanost fizikalnih događaja. Kvantna teorija polja je jezik koji moderna znanost upotrebljava u opisivanju i proučavanju elementarnih čestica. Već 1935 je *H. Yukawa* zaključio da kratki doseg nuklearnih sila upozorava na postojanje nove elementarne čestice, piona (*C. M. G. Lattes*, *H. Muirhead*, *G. P. S. Ochiaiini* i *C. F. Powell*, 1947) kojoj je mogao predvidjeti i masu. No, zamršeni nelinearni sustav operatorskih jednačbi kvantne teorije polja dozvoljava aproksimativna rješenja samo za slučaj dovoljno slabih međudjelovanja (elektrodinamika, slabe interakcije). Nesposobnost da se problem potpuno i dinamički riješi naglašava važnost proučavanja simetrija među elementarnim česticama. Otkriće izotopnog spina (*W. Heisenberg*, 1932), kvantnog broja stranosti (*K. Nishijina* 1953, *M. Gell-Mann* 1953) i tzv. SU(3) simetrije (*Y. Neeman* 1961; *M. Gell-Mann* 1961) te izučavanje općih zakona sačuvanja fizikalnih veličina, omogućilo je da se teoretski unaprijed predvidi postojanje mnogih novih čestica. Slično je u prošlom stoljeću Mendeljejevjev periodni sustav elemenata upozorio na postojanje do tada nepoznatih elemenata. No, svijet elementarnih čestica još uvijek nije uhvaćen u teoretske sheme jer se neprestano otkrivaju nove neslućene čestice i nova neočekivana svojstva. Uz neočuvanje pariteta (tj. slabo međudjelovanje je u prostoru orijentirano; *T. D. Lee* i *C. N. Yang* 1956) otkrivena je i zagonetna vremenska neobratičnost nekih slabih procesa (raspad K^0 mezona, 1964). Upotreba sve moćnijih i moćnijih akceleratora (v. *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 39) znači promatranje tvari pod sve većim i većim povećanjem (u Hamiltonovom smislu tu postoji potpuna analogija s optičkim mikroskopom), u nadi da će se otkriti nešto novo, kao što se to do sada i događalo. Ima znakova da i subatomske čestice, protoni, pokazuju neku strukturu kada se promatraju pod snopom elektrona vrlo visoke energije (kratka valna duljina, silno povećanje), baš kao što je nekada i atom pokazao strukturu, kada ga je *Rutherford* «osvijetlio» snopom α -čestica. No, poteškoće, nepotpunosti i nedorečenosti u razumijevanju prirode dozvoljavaju da se ozbiljno postavi pitanje nije li pragmatična metoda (oslanjanje na početne, općevrijedne zakonitosti) u fizici, kako ju je definitivno uobličio *Newton*, istrajala svoj vijek? Pokušaji stvaranja jedinstvene osnovne teorije prirode (*W. Heisenberg* 1954) daleko su još od uspjeha. Gravitacija, koja je od osnovne važnosti u astronomskim i kozmičkim razmjerima, zanemaruje se u atomskoj i subatomskoj fizici kao izvanredno slabo međudjelovanje (v. *Gravitacija*). Postoje ipak zanimljiva dodirna područja. Posljedica Einsteinovog principa ekvivalencije (*A. Einstein* 1907, 1911), predviđena promjena valne duljine (energije) elektromagnetskog zračenja u jakom gravitacijskom polju, testirana je i u laboratoriju na Zemlji. *Mössbauerovo* otkriće (*R. L. Mössbauer* 1957) da foton emitiran jezgrom koji je dio čvrstog tijela ne gubi energiju zbog odboja, omogućava izvanredno precizno mjerenje energije elektromagnetskog zračenja. Mogao se izmjeriti porast u energiji fotona koji pada u zemaljskom gravitacionom polju (*R. V. Pound* i *J. L. Snider* 1965). Sinteza neeuclidске geometrije gravitacije u općoj teoriji gravitacije (*A. Einstein* 1913) prisutna je kod mnogih spekulacija u savremenoj astrofizici, kao što je na primjer naganđanje da bi neobične pulsirajuće zvijezde («pulsars», Sveučilište

u Cambridgeu 1967) mogle biti još odavno predviđene neutronske zvijezde (*L. D. Landau* 1934; *T. Gold* 1968).

Tendencije razvoja. Savremena fizika je daleko od sigurnosti tzv. klasične fizike iz sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kada se za jedan kratki trenutak činilo da su gotovo već dokućene i posljednje tajne svijeta. Obilje eksperimentalno-teoretskih spoznaja, od kojih su u ovom prikazu mogle samo neke biti ilustrativno navedene, pokazuje da iako se dosta dobro razumije svijet atoma, u svijet još manjih dimenzija tek se zakoračilo. Fizika u svom eksperimentalno-materijalističkom pristupu izučavanja svijeta nije definicijsko učenje. U njenoj se znanstvenoj metodi želi razumjeti i ustrojstvo i rad mehanizma svijeta, kako bi se on čovječjom voljom mogao iskoristiti i kako bi se moglo na njega utjecati. U tom smislu ova pustolovina ljudskog duha koja se naziva fizikom začela se još s prvom vatrom pračovjeka.

D. Tadić

LIT.: *E. Mach*, Die Mechanik in ihrer Entwicklung, Leipzig 1883. — *J. Jeans*, Fizika kroz vekove (Prevod), Beograd 1952. — *П. С. Кудрявцев*, История физики, Москва 1948. — *M. Laue*, History of physics, New York 1950. — *R. Taton*, Histoire générale des sciences, T. I—IV, Paris 1957. — *G. Holton*, *D. Roller*, Foundations of modern physical science, Reading, Mass. 1959. — *E. Whittaker*, A history of the theories of aether and electricity, Vol. I i II, New York 1960. — *M. Fierz*, *V. F. Weisskopf*, Theoretical physics in the twentieth century, New York 1960. — *Л. Д. Ландау*, *Е. М. Лифшиц*, Теория поля, Москва 1960. — *B. Cohen*, Les origines de la physique moderne, Paris 1960. — *J. Supek*, Teorijska fizika i struktura materije I i II, Zagreb 1960—1963. — *W. Heisenberg*, Slika svijeta savremene fizike (prijevod), Zagreb 1961. — *I. Supek*, Moderna fizika i struktura materije, Zagreb 1965. — *M. Gliozzi*, Storia della fisica, Torino 1965. — *Max Jammer*, The conceptual development of quantum mechanics, New York 1966. — *Б. Г. Кузнецов*, Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна, Москва 1966. — *E. H. Wichtmann*, Quantum Physics (Berkeley physics course, Vol. 4), New York 1967. — *J. Perlmutter*, The atom and the universe, Belmont, Cal. 1970. — *W. H. Cropper*, The quantum physicists, New York, London, Toronto 1970. — *B. Г. Соколов*, Теория сложных ядер, Москва 1971. — *L. C. L. Yan*, Elementary particles, New York, London 1971. — *D. Webber*, Modern physics, Middlesex 1971. — *A. Isaacs*, Introducing science, Middlesex 1972. — *D. Bohm*, Uzročnost i slučajnost u savremenoj fizici (prijevod), Beograd 1972. — *A. C. Давыдов*, Квантовая механика, Москва 1973. — *R. Bošković*, Teorija prirodne filozofije (pretkisak i prijevod), Zagreb 1974.

Ž. Dadić D. Tadić

FLOTACIJA, postupak za odvajanje korisnih od nekorisnih komponenata u čvrstih materija, najčešće mineralnih sirovina, pomoću zračnih mjehura u vodi. Zasniva se na razlikama u kvašljivosti tih komponenata, pri čemu se pod kvašljivošću razumijeva intenzitet hidrofilije, odn. prijemljivosti neke površine za vodu (v. *Detergenti*, TE 3, 248, i *Emulgiranje*, str. 331). Čestice korisnih komponenata obično su nekvašljive ili «masne» (hidrofobne), dok su nekorisne (jalovinske) komponente kvašljive (hidrofile). Uvedu li se u vodu s fino samljevenim raznovrsnim komponentama zračni mjehuri, hidrofobne će čestice za njih prionuti i s njima isplivati («isflotirati»), a hidrofile će ostati u suspenziji (*pulpi*). Na površini pulpe obrazovat će se pjena koja se u obliku *preliva* kao (obično) korisni koncentrat skida s površine, a na dnu pulpe skuplja se *otok* koji se ili odbacuje kao nekorisna jalovina ili se, kao međuprodukt, dalje preraduje. Kako svojstva hidrofobnosti, odn. hidrofilnosti mahom nisu dovoljno izražena, ona se u procesu flotacije reguliraju (pojačavaju ili slabe) prema potrebi, i to dodavanjem posebnih kemikalija, *reagenata*; ovamo se ubrajaju i reagenti za stabilizaciju mjehurâ, tzv. *pjenjivači*. Osim ove standardne *pjenaste flotacije* razvijene su za neke specifične slučajeve i posebne flotacijske varijante koje će biti opisane dalje.

Primjena flotacije. Flotacija je danas najvažniji oplemenjivački postupak za obradu mineralnih sirovina, osobito za sulfidne minerale obojenih metala koji se gotovo u cijelosti dobivaju flotacijom. To su minerali bakra (halkopirit, halkozin, burnonit, bornit, kovelin, enargit, tetraedrit, tenantit), te olova i cinka (galenit, sfalerit, marmatit). Ali i sulfidi željeza i arsena (pirit, pirotin, arsenopirit, lelingit, realgar, auripigment), zatim minerali nikla i kobalta, žive, antimona i molibdena kao i minerali zlata i srebra (kalaverit, silvanit, nadagit, argentit, pirargirit, prustit) dobivaju se danas pretežno postupkom flotacije. Isto tako, flotacija je veoma važan postupak u dobivanju oksidâ željeza (magnetita, hematita, limonita), bakra (kuprita), olova (vulfenita), mangana, titana, kroma, kositra, kao i ostalih kisikovih spojeva teških metala, tj. karbonata, sulfata, fosfata, silikata, molibdata, volframa, vanadata... Pored toga, flotacijom se dobivaju sve veće količine različitih nemetala, topljivih soli i ugljena.

U pogledu intimosraslih mineralnih sirovina općenito, a to su gotovo sve rude i mnogi nemetali, bez flotacije se danas industrija ne bi mogla opskrbiti neophodno potrebnim sirovinama.