

Laika jēdziens fizikā: Galilejs, Ņūtons, Einšteins un Prigožins

Laiks cilvēka dzīvē rit vienā virzienā – no dzimšanas līdz nāvei. Laiks nav atgriezenisks. Atšķirībā no mūsu ikdienas pieredzes, laika jēdziens fizikā no Galileja līdz Einšteinam bija reversīvs. Galilejs 1590.gadā no Pizas torņa novēroja ķermeņu brīvo kritienu un pierādīja, ka krišanas ātrums ir neatkarīgs no ķermeņa masas. Galilejs arī deva pirmo kvantitatīvo kustības aprakstu par sakarību starp krišanas laiku (t) un augstumu (h), parādot, ka krišanas laika kvadrāts ir proporcionāls augstumam ($t^2 \sim h$). Galileja eksperimenti bija modernās fizikas sākums. Nedaudz vēlāk Galilejs ar paša konstruēto tālskatu atklāja Piena Ceļa galaktikas zvaigznes un Jupitera pavadoņus, paverot ceļu modernai astronomijai.

Nepagāja vairāk nekā simts gadu, kad Ņūtons 1687.gadā savā ephālā darbā „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“ formulēja mehānikas pamatlikumus, gravitāciju un optiku un vienlaicīgi deva diferenciāl- un integrālrēķinu pamatus. Ņūtona zinātne vairāk nekā divus gadsimtus bija fizikas un tehniskā progresa pamats. Ņūtona formulas bija neatkarīgas no laika – varēja precīzi aprēķināt ķermeņu kustības parametrus jebkurā momentā – tagadnē, pagātnē un nākotnē. Ņūtona mehāniku K. Heigenss (*Christiann Huygens*, 1629 - 1695) izmantoja arī skaņas un gaismas viļņu aprakstam. Visos šajos procesos laiks bija reversīvs. Alberts Einšteins 1915.gadā publicēja vispārīgo relativitātes teoriju, kurā gravitācija saistās ar laika-telpas metriku (telpas izliekums ap debess ķermeņiem), noliec gaismas staru un izmaina gaismas kvantu enerģiju un frekvenci. Ar šo teoriju varēja aprakstīt Visumu un tā evolūciju. Arī šajā teorijā laika jēdziens bija reversīvs [1].

Pirmie eksperimenti, kas parādīja procesu norisi vienā virzienā, bija siltumvadītspēja. Ar šiem procesiem 19.gadsimta sākumā nodarbojās franču fiziķis Žozefs Furjē (*Jean Baptist Fourier*, 1768 - 1830). Žozefs Furjē 1822.gadā formulēja siltumvadīšanas likumus, pēc kuriem siltuma enerģija no ķermeņa ar augstāku temperatūru ($T_1 > T_2$) tiek pārnesta uz ķermeni ar zemāku temperatūru (T_2). Zinātne par siltuma enerģiju un siltuma procesiem - termodinamika atklāja pirmos neatgriezeniskos procesus fizikā. Tomēr pagāja vairāk nekā simts gadu līdz fizikā un dabaszinātnēs tika radīta nereversīvo procesu teorija un zinātne izprata, ka visi reālie procesi dabā ir neatgriezeniski.

Nākamo soli termodinamikā spēra franču fiziķis un inženieris Sadī Karno (*Nicolas Léonard Sadi Carnot*, 1796 - 1832), kas 1824.gadā izstrādāja ideālās siltummašīnas teoriju. Šī teorija pamatoja siltumdzinēju lietderības koeficientu (η), kas atkarīgs no sildītāja (T_1) un dzesētāja (T_2) temperatūras un vienlīdzīgs $\eta = 1 - T_2/T_1$. Siltumdzinēju efektivitāte ir jo lielāka, jo lielāka ir starpība starp sildītāja un dzesētāja temperatūrām. Visām reālām siltuma mašīnām efektivitāte ir zemāka par Karno ideālo iekārtu un šodienas siltummašīnās η sasniedz 50 – 60%. Sadī Karno darbs sekmēja tvaikmašīnas parametru uzlabošanu (*James Watt*, 1869.gadā) un pēc Karno agrās nāves stimulēja termodinamikas attīstību. Siltuma zudumi reālos siltuma dzinējos pie darba temperatūras T , noveda pie entropijas (S) jēdziena termodinamikā ($S = Q/T$, kur Q ir siltuma daudzums), kas tālākā fizikas attīstībā spēlēja svarīgu lomu.

Vācu fiziķis Rūdolfs Klauziuss (*Rudolf Clausiuss*, 1822 - 1888) ir viens no modernās termodinamikas pamatlicējiem, kas formulēja otro termodinamikas likumu un pamatoja entropijas jēdzienu. Otrais termodinamiskais likums Klauziusa formulējumā skan: “Siltuma daudzums pats no sevis nekad nepāriet no aukstāka ķermeņa uz karstāku ķermeni jeb nav iespējams siltuma dzinējs,

kurš visu no sildītāja saņemto siltumu varētu pārvērst darbā". Siltums vienmēr pāriet no karstākā ķermeņa uz aukstāko un šis process ir neatgriezenisks. Klauziuss pirmais fizikā ievada jēdzienu par neatgriezeniskiem procesiem. Entropiju ($S = Q/T$) Klauziuss izmantoja procesu raksturojumam. Atgriezeniskā procesā (t.i. idealizētā modelī) entropija nemainās un visos neatgriezeniskos procesos entropija pieaug un līdzsvara stāvoklī sasniedz maksimālo vērtību. Deviņpadsmitā gadsimta fizika pamatā aplūkoja līdzsvarotos procesus.

Nākamais etaps termodinamikā saistās ar Ludvigu Bolcmani (*Ludwig Boltzmann*, 1844 - 1906), kas termodinamikā ievada molekulāros priekšstatus un statistiskās metodes. Bolcmans siltumu un temperatūru saistīja ar molekulu kustību gāzēs. Jo augstāka ir temperatūra, jo lielāks ir molekulu kustības ātrums. Bolcmans izmantoja statistiskās metodes un aprakstīja molekulu kustības ātruma sadalījumu atkarībā no temperatūras (Bolcmans statistika). Bolcmans entropiju (S) saistīja ar molekulu enerģijas sadalījumu $S = k_B \ln W$, kur $k_B = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K ir Bolcmans konstante un W ir stāvokļu varbūtība. Entropija ir maksimāla līdzsvara stāvoklī. Bolcmans darbi būtiski ietekmēja fizikas attīstību. Bolcmans statistiku izmanto arī cietvielu fizikā un ķīmijā. Izmantojot Bolcmans sadalījuma funkciju, vācu fiziķis Makss Planks (*Max Planck*, 1858 - 1947) 19.gadsimta beigās aprēķināja termiskā starojuma spektru atkarībā no temperatūras. Termiskais starojums piemīt visiem ķermeņiem, kuru temperatūra ir augstāka par absolūto nulli (0 K). Bija atrastas daudzas empīriskas likumsakarības par termisko starojumu. Tomēr nebija vispārīga sakarība par šī starojuma spektru atkarībā no temperatūras. 1900.gadā Maks Planks, izmantojot Bolcmans statistiku, ieguva universālu sakarību, kas izskaidroja termiskā starojuma spektru un tā atkarību no temperatūras. Jaunais šajā atklājumā bija starošanas mehānisms: gaisma no sakarsētā ķermeņa netiek izstarota nepārtraukti, bet diskrēti atsevišķu porciju - gaismas kvantu veidā (kvantu enerģija $\varepsilon = h\nu$, kur h ir Planka konstante un ν gaismas frekvence). Planka teorētiskie aprēķini bija kvantu fizikas sākums un Maks Planks 1918.gadā par savu atklājumu saņēma Nobela Prēmiju.

Siltuma vadītspēja un otrais termodinamiskais likums viennozīmīgi parādīja procesu un laika neatgriezeniskumu. Termodinamiskie procesi šajā ziņā atšķīrās no procesiem Ņūtona mehānikā. Tomēr lielākā daļa 19.gadsimta fiziķi, tai skaitā arī Bolcmans, to negribēja atzīt. Bolcmans, aplūkojot neatgriezeniskos termodinamiskos procesus, gribēja tos novest uz atgriezeniskiem. Tas viņam, protams, neizdevās un Bolcmans interpretācija viņa dzīves laikā tika kritizēta no tā laika vadošiem fiziķiem.

Dinamisko sistēmu apraksta ierobežojumu Ņūtona mehānikas ietvaros jau 19.gadsimta beigās pierādīja ievērojama franču fiziķis un matemātiķis Anrī Puankarē (*Henri Poincaré*, 1854 - 1912), kurš aplūkoja Saules sistēmas stabilitāti [2]. Kaut gan planētu kustību ap Sauli novēroja jau seno civilizāciju astronomi 3000 gadus p. Kr. un šie dati tika izmantoti visos kalendāros, pacēlās jautājums, kādu iespaidu uz Zemes orbītu ap Sauli atstāj pārējās planētas. Tam nolūkam Puankarē aplūkoja gravitācijas lauku trim ķermeņiem (Saule, Zeme un Marss). Vairāku gadu darba rezultātā Puankarē pierādīja, ka šai problēmai nav precīza matemātiska risinājuma. Trīs un vairāk ķermeņu gravitācijas problēmas atbilst nelineārām dinamiskām sistēmām, kuru īpašības atšķīrās no lineārām Ņūtona mehānikas sistēmām. Puankarē aprēķini pierādīja, ka dabas likumi ir sarežģīti un prasa plašāku pieeju nekā klasiskā Ņūtona mehānika. Šo Puankarē rezultātu 1900. gadā papildināja Maksa Planka atklātie gaismas kvanti un nedaudz vēlāk Alberta Einšteina speciālā un vispārīgā relativitātes teorija. Puankarē par savu atklājumu rakstīja: "Tas, ko zinātne var atklāt, nav vis paši objekti, bet mijiedarbība starp objektiem; ārpus šīs mijiedarbības nav saskatāma reālā pasaule"[2]. Pagāja vairāk

nekā pusgadsimts līdz Pankarē atklājums kļuva pazīstams plašām fiziķu aprindām un stimulēja jaunu virzienu mūsdienu fizikā.

Neatgriezenisko procesu pētījumus sekmēja arī holandiešu fiziķa J. van der Vālsa (*Johanes Diderik van der Waals*, 1837 - 1923) darbi termodinamikā un molekulārā fizikā, kas jau 1910. gadā tika atzīmēti ar Nobela prēmiju fizikā. Pagājušā gadsimta vidū Briseles Universitāte kļuva viens no starptautiski vadošiem centriem termodinamikā. Briseles universitātes profesors T. de Donders (*Thèophile Ernest de Donder*, 1872 - 1957) nodarbojās ar nelīdzsvaroto procesu termodinamiku. Viņa skolnieks Ilja Prigožins (*Ilya Prigogine*, 1917 - 2003) pēc studijām Briseles universitātē 1941. gadā aizstāvēja doktora disertāciju un turpināja darbu nelīdzsvaroto procesu termodinamikā. Prigožins jau studiju gados aizrāvās ar nelīdzsvaroto procesu fiziku. Viņš intuitīvi nojauta, ka procesu aktivitāte ir daudz lielāka tālu no līdzsvara stāvokļa un ka jaunas struktūras var veidoties tikai šajā stāvoklī. Prigožins 1950. gadā kļuva Briseles universitātes profesors un paralēli no 1961. līdz 1966. gadam lasīja lekcijas Ostinas universitātē ASV. Prigožins 1967. gadā Ostinas universitātē dibināja starptautisko institūtu par kompleksām kvantu struktūrām (*Center for complex quantum systems*), kuru viņš vadīja līdztekus darbam Briseles universitātē [3, 4].

Prigožins 1945. gadā publicēja principu (postulātu) par termodinamiskām sistēmām, kas ir tālu no līdzsvara stāvokļa: "Termodinamiskās sistēmās stacionārā stāvoklī entropijas izmaiņas pie nemainīgiem parametriem ir minimālas un nemainīgas. Ja sistēma nav līdzsvara stāvoklī, tad tā izmainīsies līdz stāvoklim, kur entropijas izmaiņas ātrums ir minimāls" [3, 4]. Pēc šī principa Prigožins ar saviem līdzstrādniekiem laikā no 1945. līdz 1967. gadam izstrādāja nelineāro atvērto termodinamisko sistēmu teoriju, kas 1977. gadā vainagojās ar Nobela prēmiju ķīmijā. Prigožins ar nelīdzsvaroto procesu termodinamiku pierādīja, ka līdzsvars ir neaktīvs un jaunas struktūras rodas tikai tālu no līdzsvara stāvokļa.

Prigožina termodinamika izskaidroja daudzas reakcijas fizikā, ķīmijā un vēlāk arī bioloģijā. Specifisku siltumvadīšanas procesu plānos šķidrums slāņos jau 1900. gadā aprakstīja franču fiziķis Anrī Bernars (*Henri Claude Bèrnard*, 1874 - 1939), kas bija pazīstams ar saviem darbiem hidrodinamikā. Bernars novēroja, ka plānā šķidrums slānī siltuma pārnese procesi ir atkarīgi no temperatūras gradienta – starpības starp sildītāja un dzesētāja temperatūrām. Siltumvadītspēja šķidrumā saistās ar molekulu svārstībām. Bernars novēroja, ka paaugstinot karstā ķermeņa temperatūru virs kritiskās vērtības, siltumvadīšana izmainās un notiek konvekcijas ceļā: siltais šķidrums virzās uz dzesētāju, atdziest un nonāk atpakaļ uz sildītāju. Termodinamiskā sistēmā novērojama pašorganizācija līdzīgi kā bioloģijā. Prigožins šīs parādības varēja izskaidrot ar nelīdzsvarotās termodinamikas teoriju [3, 4]. Šis process svarīgu lomu spēlē atgriezeniskā saite un pašorganizācija. Vienkāršās ķīmiskās sistēmās, kas ir tālu no līdzsvara stāvokļa, Prigožins novēroja procesus, kas ir līdzīgi bioloģiskiem procesiem šūnās un dzīvjos organismos.

Pašorganizācijas procesus ķīmiskās reakcijās pagājušā gadsimta vidū krievu ķīmiķis B. Belousovs (*Борис Павлович Белоусов*, 1893 - 1970) novēroja ciklisku oksidācijas reakciju. Citronskābes kālija bromāta ūdens šķīdumā katalizatora Ce^{+3} jonu klātbūtnē notiek periodiskas oksidācijas un redukcijas reakcijas. Šajās reakcijās katalizators $Ce_2(SO_4)_3$ izmainīja šķīduma krāsu no dzeltenās uz dzidru ($Ce^{+3} \leftrightarrow Ce^{+4}$) [5]. Belousovs pirmos rezultātus publicēja vietējā žurnālā un šis atklājums nenonāca līdz plašām ķīmiķu aprindām. Situācija izmainījās pēc krievu-amerikāņu ķīmiķa A. Žabotinska (*Анатолий Маркович Жаботинский*, 1938 - 2008) darbiem, kurš detalizēti aprakstīja sarežģītos katalītiskos procesus Belousova reakcijās un atklāja jaunas cikliskas ķīmiskās

reakcijas [6]. Šodien cikliskās reakcijas (“ķīmiskie pulksteņi”) nes Belousova- Žabotinska vārdu. Šīs reakcijas notiek nelineārās ķīmiskās sistēmās, kas ir tālu no līdzsvara stāvokļa. Arī šīs cikliskās reakcijas Prigožins varēja aprakstīt ar nelīdzsvaroto procesu termodinamiku. Šīs reakcijas pierādīja, ka vienkāršā neorganiskās ķīmijas sistēmā novērojama pašorganizācija līdzīgi sarežģītākiem procesiem bioloģijā [3, 4].

Cikliskās ķīmiskās reakcijas saistās ar produktu difūziju. Lokāli stimulējot reakcijas plānā šķidrums slānī (sasildīta adata, lokāla reakcijas produktu ievadīšana, mehāniskais impulss u.c.) var inducēt “ķīmiskos viļņus”, kas izplatās plānā šķidrums slānī. Šie viļņi mainās laikā un telpā, veidojot dažādus optiski atšķirīgas struktūras [7]. Arī “ķīmiskie viļņi” un katalītiskie procesi uz metālu virsmas 2007. gadā tika atzīmēti ar Nobela prēmiju vācu fizikālam ķīmiķim G. Ertlam (*Gerhard Ertl*, *1936). Ķīmiskie viļņi ir novērojami daudzās reakcijās – oksidācijas un redukcijas procesos, bioķīmijā, dzīvo organismu nervu sistēmā (piemēram, sirds muskuļu stimulācija) u.c. [8].

Prigožina nestacionāro procesu termodinamika aplūkoja plašu parādību loku no fizikas un ķīmijas līdz bioloģijai un dzīvības izcelšanās. Kopīgais šais processos ir atvērtās sistēmas ar enerģijas un masas apmaiņu ar apkārtējo vidi, pie kam sistēmas atrodās tālu no līdzsvara. Prigožins pierādīja, ka jaunas struktūras var veidoties tikai tālu no līdzsvara stāvokļa. Šī teorija guva vispārīgu atziņu un ieguva augstāko apbalvojumu zinātnē – Nobela prēmiju. Prigožina matemātiskā pieeja termodinamikā bija analoga haosa teorijai, kuru uzsāka Anrī Puankarē mehānikā un pagājušā gadsimta otrā pusē pilnveidoja amerikāņu fiziķis Edvards Lorencs (*Edward Norton Lorenz*, 1917 - 2008), aprakstot meteoroloģiskos novērojumus [2, 3]. Visas šīs sistēmas – daudz-ķermeņu gravitācija, Zemes atmosfēra, ķīmiskās reakcijas, dzīvības izcelšanās pēc matemātiskās pieejas ir nelineāras. Kaut gan šīs sistēmas ir deterministiskie (pakļautas dabas likumiem), tajās nav iespējama ilgstoša prognozēšana un necīgas fluktuācijas sistēmās var izraisīt spēcīgus efektus [9].

Prigožins vispārināja termodinamiskos secinājumus par procesu neatgriezenisko dabu. No tā izriet laika neatgriezeniskums. Prigožins to nosauca par “laika bultu” [3, 4]. Analizējot Ņūtona un Einšteina vispārīgo relativitātes teoriju, kā arī kvantu mehānikas procesus, Prigožins nonāca pie secinājuma, ka visi reālie procesi dabā noris atvērtās sistēmās un ir neatgriezeniski. Visuzskatāmāk tas parādās bioloģijā, kur organismu dzimšana un nāve un dzīvības evolūcija uz Zemes ir acīmredzami piemēri. Prigožins uzskata, ka mūsdienu dabas zinātne ir pierādījusi, ka dabas likumi apraksta parādības atvērtās sistēmās, kuros procesi ir neatgriezeniski un ar statistisku raksturu.

Prigožins uzskata, ka arī mūsu Visums ir atvērta sistēma un zvaigžņu un galaktiku veidošanos ir neatgriezeniski termodinamiski procesi. Šo Prigožina domu Rīgas Tehniskās universitātes profesors Harijs Cimermanis detalizēti aprakstījis savā monogrāfijā [10]. Prigožins ilgus gadus interesējās par visumu un raksturoja to ar vārdiem: “Iespējams, ka mūsu izbrīns par šo neparedzamo Visumu vēl nekad nav bijis tik liels kā šodien” [3].

Literatūra

[1] H. J. Störig, *Kleine Weltgeschichte der Wissenschaft*, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt (M), 2007.

[2] H. Poincare, *Science et methode*; Paris 1908.

[3] Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *Das Paradox der Zeit*, R. Piper GmbH, München, 1993.

[4] I. Prigogine, *Die Gesetze des Chaos*, Insel Taschenbuch Verlag, Frankfurt (M).

- [5] B. P. Belousov, *Eine periodische Reaktion und ihr Mechanismus*. In: L. Kuhnert, U. Niedersen: *Selbstorganisation chemischer Strukturen*. Verlag Harri Klein, Frankfurt am Main 1981, S. 73–82.
- [6] A. M. Zhabotinsky: *Eine periodische Oxydationsreaktion in flüssiger Phase*. In: L. Kuhnert, U. Niedersen (Hrsg.): *Selbstorganisation chemischer Strukturen*. Verlag Harri Klein, Frankfurt am Main 1964, S. 83–89.
- [7] Müller S.C., Plessner T., Hess B. Two-dimensional spectrophotometry and pseudo-color representation of chemical patterns, *Naturwissenschaften* 73(4): 165-179, 1986.
- [8] *Chemical Waves*, Ed. R. Kaplan and K. Showalski, Springer, 1995.
- [9] John Briggs, F. David Peat, *Die Entdeckung des Chaos*, Carl Hanser Verlag, München – Wien, 1990.
- [10] H. Cimermanis, *Visums Visumā, Zinātne*, Rīga, 2008.