



O entropii

Tomasz Kardaś

Zespół Szkół Licealnych, Strzelno

Od ciepłika do entropii

Już starożytni posiadali intuicyjne przekonanie, że istnieją pewne wielkości, które w układach izolowanych nie mogą z niczego powstać ani bezpowrotnie zginąć.

Lukrecjusz (*Titus Lucretius Caro* – urodzony prawdopodobnie w 95 r. p.n.e., według chrześcijańskiego pisarza Hieronima – Sophronius Eusebius Hieronymus (331–420) – miał w wieku 44 lat popełnić samobójstwo) w swoim dziele *O naturze wszechrzeczy* (*De rerum natura*) pisze:

Zatem nic się nie może obrócić w zupełną nicość
i dalej:

I żadna rzecz nie wchodzi w nicość, nie ginie ze szczeniem,
A tylko się rozprzęga w materii elementy.

W innym miejscu autor stwierdza:

Ponieważ zaś wiadomo, że nicość nic nie tworzy
I żadna rzecz nie może ze szczeniem się w nicość rozłożyć.

Próbuje nawet te procesy opisać konstatując:

Wszystko, co widzisz wkoło, jak wchodzi wciąż na stopnie
Wzrostu, aż z biegiem czasu dojrzałych kształtów dopnie
Więcej spożywa materii, niż na ubytek łoży¹.

Historia fizyki pokazuje, że wiele zasad obejmowało z powodzeniem tylko ograniczony zakres zjawisk; podobnie było z zasadami dotyczącymi ciepła. W ogóle zjawiska cieplne należą do tych najstarszych i zarazem najważniejszych procesów fizycznych, które towarzyszyły człowiekowi od zarania dziejów i równie od dawna usiłowano odpowiedzieć sobie na pytanie, czym jest ciepło lub ogień.

Starożytni Grecy uważali, że podstawowymi pierwiastkami, z których zbudowana jest wszelka materia są: ziemia, woda, powietrze i ogień – zwane przez nich żywiołami.

W XVIII wieku pojawił się tajemniczy ciepłik (*coloricum*) – substancja, która miała przepływać od ciała cieplejszego do zimniejszego. Jeszcze **Jędrzej Śniadecki** (1768–1838) w swojej książce *Początki chemii stosownie do terazniejszego trybu umiejętności stanu, dla pożytku uczniów i słuchaczy ułożone y za wzor lekcji akademickich służyc mairce przez Jędrzeja Śniadeckiego Filozofii i Medycyny*

¹ K. Leśniak, *Lukrecjusz*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1985, s. 148–149, 158, 171.

Doktora, Chemii i Farmacyi w Szkole Głównej Litewskiej Zwyczajnego Publicznego Profesora, wydanej w 1800 r., pisał, że światło, ciepło, elektryczność i magnetyzm są pierwiastkami chemicznymi, które nazywał ciałami promienistymi. Według niego światło miało się składać ze świetlika, a ciepło z cieplika, zgodnie zresztą z ówczesnymi teoriami panującymi w nauce, jako że Śniadecki był na owe czasy bardzo dobrze wykształconym, a później wielce zasłużonym człowiekiem dla polskiej oświaty.

Adam Mickiewicz (1798–1855), będąc studentem J. Śniadeckiego w Wilnie, uwiecznił tę teorię w wierszu pt. *Cztery toasty pewnego chemika na cześć istot promienistych* następującymi słowami:

Co by było wśród zakresu,
Na którym ludzie rzuceni,
Bez światła, ciepła, magnesu
I elektrycznych promieni?
Co by było? – zgadnąć łatwo:
Ciemno, zimno, chaos czyste.
Witaj więc, słoneczna dziatwo,
Wiwat światło promieniste!
Lecz cóż po światła iskierce,
Gdy wszystko dokoła skrzeple?
Zimny świat i zimne serce,
Ciepła trzeba. Wiwat ciepło!
Pełnych światła i zapachu
Często silny wiatr rozniesie;
By ciało zbliżyć ku ciału,
Jest magnes. Wiwat magnesie!
Tak gdy zrośnięm w okrąg wielki
Przez magnesową styczność,
Wówczas z lejdejskiej butelki
Palniem: Wiwat elektryczność!²

Jednak w tym samym czasie teoria cieplika zaczęła powoli się chwiać, a to za sprawą **Benjamina Thompsona** (1753–1814, późniejszego hrabiego **Rumforda** Świętego Cesarstwa Narodu Niemieckiego, odznaczonego m.in. orderem św. Stanisława przez króla Stanisława Augusta Poniatowskiego), urodzonego w Ameryce w Massachusetts, wielkiego poszukiwacza przygód, który jako przeciwnik Rewolucji Amerykańskiej po jej zwycięstwie musiał emigrować do Europy, gdzie na dworze elektora Bawarskiego pełnił funkcję inspektora armii i zajmował się jej reorganizacją. Jako inspektor armii bawarskiej nadzorował wiercenie luf armatnich w warsztatach Arsenалу w Monachium, wówczas bowiem najpierw armatę

² I. Stasiewicz (red.), *Rzecz o Jędrzeju Śniadeckim*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1970, s. 50.

odlewano jako metalowy walec, a następnie wiercono w niej otwór³. Do poruszania wiertła używano koni – podczas tej pracy zauważył ogromne ilości wydzielającego się ciepła. Ta obserwacja pozwoliła wysunąć mu przypuszczenie, że ciepło jest pewną formą ruchu cząsteczek w danym ciele, a nie substancjalnym ciepłikiem. Rumford w 1798 r. pisał tak:

Co do mnie, to jest mi nadzwyczaj trudno, że nie powiem niemożliwie, pojąć, aby coś, co wytwarzało się w tych doświadczeniach (tzn. ciepło wytwarzające się przy wierceniu armat) mogło być czym innym, jak tylko ruchem^{4,5}.

Rumford doszedł do następującej konkluzji:

Im bardziej zastanawiałem się nad tymi zjawiskami, tym bardziej wydały mi się one intrygujące i ciekawe. Wydaje mi się nawet, że ich wnikliwe badanie mogłoby dać dobry wgląd w skrytą naturę ciepła i umożliwić nam utworzenie jakichś rozsądnych hipotez dotyczących istnienia bądź też nieistnienia cieczy ognistej – przedmiotu, co do którego opinie filozofów wszystkich czasów były bardzo podzielone⁶.

B. Thompson sugerował dalej, że ciepło wydzielające się podczas wiercenia luf armatnich nie jest związane z utratą ciepłika, lecz z wykonywaną pracą. W następstwie obserwacji Rumforda oraz swoich własnych badań związanych z ilością powstającego ciepła z wykonanej pracy mechanicznej przez konia, **Julius Robert Mayer** (1814–1878; niemiecki lekarz) w 1842 roku opublikował swoją pierwszą pracę w *Rocznikach Chemii i Farmacji* pt. *Uwagi o siłach przyrody nieożywionej*⁷. **L.N. Cooper** tak pisze o jego odkryciu:

„Jeżeli ciepło jest inną formą energii kinetycznej czy potencjalnej, a energia jako całość jest zachowana, to wówczas określona ilość ciepła musi być rezultatem zmiany określonej ilości energii mechanicznej. Albo inaczej – określona ilość pracy musi wytworzyć określoną ilość ciepła”⁸. Widzimy zatem, że substancjonalne traktowanie ciepła było coraz bardziej naukowo zagrożone w świetle gromadzonego materiału doświadczalnego. Rozwój badań naukowych nad istotą ciepła uczy nas, że istotny postęp w tej dziedzinie, jak zresztą w każdej innej, może się dokonać tylko wówczas, gdy znajdzie się liczbowa miarę badanego zjawiska. Po ustaleniu przez **Gabriela Daniela Fahrenheita** (1686–1736, miesz-

³ R. Mierzecki, *Beniamin Thompson 1753–1814 prekursor fizyki technicznej*, „Fizyka w Szkole”, nr 1, 1965, s. 1–4.

⁴ A. Drzewiński, J. Wojtkiewicz, *Opowieści z historii fizyki*, PWN, Warszawa 1995, s. 132.

⁵ L.N. Cooper, *Istota i struktura fizyki*, PWN, Warszawa 1975, s. 359.

⁶ G. Białkowski, *Stare i nowe drogi fizyki. U źródeł fizyki współczesnej*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1980, s. 116.

⁷ A. Teske, *Wybór prac z historii fizyki i filozofii nauki*, Wrocław 1970, cyt. za: H. Drozdowski, *Odkrywczy zasady zachowania energii*, „Fizyka w Szkole”, nr 5, 1990, s. 36–40.

⁸ L.N. Cooper, *Istota i struktura fizyki*, PWN Warszawa 1975, s. 360.

czanina z Gdańska) skali termometrycznej i po wprowadzeniu pojęcia ilości ciepła przez **Josepha Blacka** (1728–1799 szkockiego chemika) okazało się, że temperatura nie wystarczy do opisu zjawisk cieplnych. Twórca pojęcia ciepłika, **Antoine Laurent Lavoisier** (1743–1794, chemik francuski), tak pisał w 1789 r.:

Trudno jest pojąć te zjawiska bez przyjęcia, że są one skutkami rzeczywistej i materialnej substancji lub bardzo subtelnej cieczy, która wciskając się pomiędzy cząstki ciał oddzielając je od siebie; i nawet dopuszczając myśl, że istnienie tej cieczy jest hipotetyczne, zobaczymy dalej, że wyjaśnia ona zjawiska przyrody w sposób bardzo zadowalający⁹.

G. Białkowski pisze, że Lavoisier jeszcze w opublikowanej pracy w 1777 r. dał tej hipotetycznej substancji nazwę cieczy płomiennej i materii cieplnej, a w pracy z 1789 r. zaproponował nazwać ją ciepłikiem. W tym samym czasie pojawiało się jeszcze więcej dowodów przeczących substancjonalnej naturze ciepła. Mimo że silniki parowe już od 1700 r. zamieniały ciepło na pracę mechaniczną, to dopiero francuski inżynier **Nicolas Leonard Sadi Carnot** (1796–1832, syn Lazare'a Carnota – generała z czasów Rewolucji Francuskiej) opublikował w roku 1824 swoją jedyną pracę, która wprowadziła na trwałe jego nazwisko do nauki.

Ta bardzo przenikliwa teoretyczna praca nosiła tytuł *Sur la puissance motrice du feu*.

Carnot pisał w niej, że maszyny parowe pracują w kopalniach, wprawiają w ruch statki, pogłębiają porty i rzeki, kują żelazo, a mimo to ich praca od strony teoretycznej jest bardzo mało wyjaśniona i słabo rozumiana. Zastanawiał się jak należy zbudować silnik, aby za jego pomocą z danej ilości ciepła otrzymanego ze spalania węgla otrzymać jak najwięcej pracy mechanicznej, i doszedł do wniosku, że ilość pracy otrzymanej z danej ilości ciepła w idealnym silniku zależy jedynie od różnicy temperatur między grzejnicą – paleniskiem a chłodnicą – otoczeniem silnika. Uzasadniając swoje twierdzenia, posługiwał się pojęciem ciepłika, ale używał go w taki sposób, w jaki my dziś posługujemy się **entropią**. Był więc prekursorem zdefiniowania wielkości fizycznej, którą dzisiaj nazywamy entropią, choć sam jej tak jeszcze nie nazwał.

Entropia w termodynamice fenomenologicznej

Pracę Carnota uchronił od zapomnienia **Benoit Pierre Emile Clapeyron** (1799–1864, inżynier armii francuskiej) i streścił ją w swojej pracy o silniku cieplnym, opublikowanej dwa lata po śmierci Carnota. **Lorda Kelvina – Williama Thomsona** (1824–1907, angielskiego fizyka) w pracy Carnota najbardziej uderzyła konieczność stosowania chłodnicy do uzyskania pracy z ciepła, natomiast **Rudol-**

⁹ G. Białkowski, *Stare i nowe drogi fizyki. U źródeł fizyki współczesnej*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1980, s. 115.

fa Juliusa Emmanuela Clausiusa (1822–1888, niemieckiego fizyka urodzonego w Koszalinie) intrygowało, czy teoria objaśniająca działanie silnika, podana przez Carnota, wynika z zasady zachowania energii, czyli z I zasady termodynamiki, czy też jest nowym, nieznanym dotąd prawem. Ponownie w 1850 r. przeanalizował działanie idealnego silnika cieplnego, nie czyniąc żadnych założeń, w tym również zasady zachowania energii. To doprowadziło go do podania II zasady termodynamiki. Pokazał, że stosunek ciepła pobranego do ciepła oddanego w idealnym silniku Carnota jest jedynie funkcją temperatury początkowej i końcowej. W 1865 r. wykazał, że możliwe jest zdefiniowanie nowej wielkości fizycznej, która zależy od wielkości opisujących dany układ fizyczny, np. od ciśnienia i temperatury, a jej zmiana zależy wyłącznie od ilości wprowadzonego doń ciepła. Wielkość tę nazwał entropią i tak uzasadniał wybór nazwy tej nowej funkcji:

Wolę korzystać z języków starożytnych przy tworzeniu nazw ważnych wielkości naukowych, tak aby mogły one oznaczać to samo we wszystkich językach. Dlatego proponuję nazwać S entropią ciała, od greckiego słowa „przekształcać”. Rozmyślnie ukulem słowo „entropia” na podobieństwo słowa energia, jako że obie te wielkości są analogicznie ważne w fizyce i stąd analogia nazw wydaje mi się pomocną¹⁰.

L.N. Cooper, przytaczając te definicje, opatruje je takim komentarzem:

Nie czerpiąc z żadnego ze współczesnych języków, Clausius ukuł termin, który znaczył to samo dla każdego, tzn. nic¹¹.

Przyrost entropii układu fizycznego o temperaturze bezwzględnej T , pobierającego niewielką ilość ciepła dQ , zdefiniował jako $dS = dQ/T$.

Entropia zatem na gruncie termodynamiki fenomenologicznej jest wielkością fizyczną podobną do energii, proporcjonalną do masy ciała, ekstensywną funkcją opisującą stan układu fizycznego.

Entropia w termodynamice statystycznej

Na procesy, którym podlega materia, można było do połowy XVIII wieku patrzeć dwojako, o czym pisali Lavoisier i **Pierre Simon de Laplace** (1749–1827, francuski matematyk, astronom i fizyk) w *Rozprawie o cieple* z 1783 r. w sposób następujący:

Fizycy nie są jednomyślni co do istoty ciepła. Wielu z nich uważa je za płyn, który rozpowszechniony jest w całej przyrodzie i który... przenika ciała, stosownie do stopnia ich temperatury oraz właściwej im zdolności zatrzymywania ciepła... Inni fizycy sądzą, że ciepło nie jest niczym innym, jak tylko skutkiem niedostrzegalnych ruchów drobin materii..., cząstki te znajdują się w ustawicznym ruchu, który, wzrastając do oznaczonej granicy, może nawet rozłączać małe cząstki i tym sposobem rozkładać ciała... W hipotezie, którą rozpatrujemy, ciepło jest siłą żywą (energią kinetyczną – dop. G. Białkow-

¹⁰ L.N. Cooper, *Istota i struktura fizyki*, PWN Warszawa 1975, s. 375.

¹¹ Tamże.

skiego) wynikającą z niedostrzegalnych ruchów drobin ciała... Nie chcemy rozstrzygać między dwiema wyżej przytoczonymi hipotezami; wiele zjawisk przemawia na korzyść ostatniej hipotezy..., ale są inne, które łatwiej objaśnić na zasadzie pierwszej hipotezy; być może, że obydwie są słuszne¹².

Pierwszym, który bardzo poważnie potraktował tę drugą hipotezę, był **James Clark Maxwell** (1831–1879, wybitny angielski fizyk), który w 1866 r. w pracy *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases* zaproponował, że prędkości cząsteczek gazu nie są jednakowe, jak dotychczas sądzono, lecz istnieje pewien charakterystyczny rozkład ich prędkości. Maxwell otworzył nową dziedzinę fizyki – fizykę statystyczną, a tym samym termodynamikę statystyczną. Było to „drugie obok elektromagnetycznej teorii pomnikowe dzieło”¹³ jego geniuszu i stanowiło punkt wyjścia do wielu matematycznych uogólnień o ogromnym znaczeniu rozwojowym dla fizyki.

Ludwig Boltzman (1844–1906, fizyk austriacki), wielki kontynuator idei Maxwella, nie tylko ją propagował, ale bardzo rozwinął. To on był gorącym zwolennikiem atomistyczno-kinetycznej teorii budowy materii i znajdował się na pierwszej linii walki z jej przeciwnikami, czyli zwolennikami poglądu termodynamiczno-energetycznego. Przeciwnicy Boltzmana uważali bowiem, że głoszona przez niego teoria podważa fundamentalną zasadę determinizmu w fizyce, a jedynie mechanika i termodynamika prawidłowo opisują np. przekazywanie ciepła między ciałami. Krytycy jego podejścia byli niestety w owym czasie w przewadze, co w 1906 r. doprowadziło go do samobójczej śmierci. W 1904 r. w przedmowie do drugiego wydania *Wykładów kinetycznej teorii gazów* tak pisał: „Zdaję sobie całkowicie sprawę z tego, że jeden człowiek jest bezsilny wobec opinii większości. Chcąc jednak mieć pewność, że gdy ludzkość powróci do badań nad kinetyczną teorią gazów, nie będzie trzeba ponownie odkrywać rzeczy już raz odkrytych, postaram się przedstawić najtrudniejsze fragmenty tej teorii możliwie jasno”¹⁴. To właśnie Boltzman w 1877 r. wpadł na pomysł wyrażenia entropii w oparciu o pojęcia mikroskopowe i o swoje słynne tzw. twierdzenie H, w którym wielkość H występuje jako funkcja, będąca:

logarytmem prawdopodobieństwa odpowiedniego układu prędkości¹⁵.

Zaproponował, aby entropie stanu makroskopowego przedstawić „jako H/N krotnego logarytmu jego prawdopodobieństwa”¹⁶. To on w 1896 r. związał entro-

¹² G. Białkowski, *Stare i nowe drogi fizyki. U źródeł fizyki współczesnej*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1980, s. 159–160.

¹³ Cz. Wronkowski, *James Clark Maxwell 183–1879*, „Fizyka w Szkole”, nr 6, 1979, s. 273–276.

¹⁴ G. Białkowski, *Stare i nowe...*, s. 165.

¹⁵ M. Smoluchowski, *Wybór pism filozoficznych*, PWN, Warszawa 1956, s. 60.

¹⁶ Tamże, s. 115.

pie z liczbą stanów dozwolonych danego układu fizycznego następującą formułą matematyczną: $S = k \ln \Omega$, gdzie S to entropia, k – stała później nazwana jego imieniem, a Ω – to liczba stanów dozwolonych układu fizycznego. Było to diametralnie inne podejście niż droga, jaką kroczyła termodynamika fenomenologiczna, która nie uwzględniała mikroskopowej struktury materii, a zasady wypracowane na jej gruncie są niejako uogólnieniem obserwacji zachowania się makroskopowych ilości materii, np. 1 mola. Parametry, takie jak: ciśnienie, objętość i temperatura, charakteryzujące ogromnie liczne środowisko, a dające się zaobserwować na poziomie makroskopowym, oraz prawa wypracowane na gruncie termodynamiki fenomenologicznej tworzą spójną całość. Termodynamika boltzmanowska – statystyczna zajęła się powiązaniem tych wielkości ze strukturą mikroskopową materii, uzupełniała zatem i uzasadniała termodynamikę fenomenologiczną. Entropia w ujęciu statystycznym Boltzmanna ma wszelkie własności entropii zdefiniowanej na gruncie termodynamiki fenomenologicznej. Atutem definicji statystycznej entropii jest to, że „nie trzeba... wyprowadzać jej istnienia z dodatkowych postulatów fizycznych”¹⁷.

Entropia a II zasada termodynamiki – polski wkład

K. Zalewski, analizując różne sformułowania II zasady termodynamiki, dochodzi do wniosku, że ze wszystkich jej sformułowań wynika jednoznacznie istnienie entropii, a także jej wzrost dla wszystkich fizycznych układów izolowanych, będących w stanie równowagi. Bardzo duży wkład do rozwinięcia i uporządkowania tej problematyki wniósł **Marian Smoluchowski** (1872–1917, wybitny fizyk polski), który opublikował szereg prac na ten temat. W 1904 r. w księdze pamiątkowej ku czci L. Boltzmanna ukazała się jego praca pt. *O nieregularnościach w rozkładzie cząsteczek gazu i wpływie ich na entropię i równanie stanu*, na 84. zjeździe przyrodników w Munster w Westfalii w 1912 r. wygłosił wykład pt. *Obserwowalne zjawiska molekularne sprzeczne z termodynamiką tradycyjną*. Będąc z kolei w 1914 r. w Getyndze na zaproszenie fundacji Wolfskehla, wygłosił cykl wykładów pod wspólnym tytułem *Wykłady o teorii kinetycznej materii i elektryczności*, a wśród nich wykład: *Granice stosowalności drugiej zasady termodynamiki*. Warto też wskazać na pracę z 1915 r. *O pewnych brakach w uzasadnieniu prawa entropii oraz równania zasadniczego Boltzmanna w kinetycznej teorii gazów*¹⁸. Tę ostatnią pracę Smoluchowski rozpoczyna tak:

Byłoby pożądane, aby w badaniach dotyczących drugiej zasady teorii ciepła wyraźnie rozróżnić dwie postacie tej zasady, często uważane za równoważne: twierdzenie

¹⁷ K. Zalewski, *Wykłady z termodynamiki fenomenologicznej i statystycznej*, PWN, Warszawa 1973, s. 81.

¹⁸ M. Smoluchowski, *Wybór pism filozoficznych*, PWN, Warszawa 1956, s. 55–155, 216–234.

o niemożliwości perpetuum mobile drugiego rodzaju – oraz właściwe prawo entropii. Pod tą ostatnią nazwą rozumie się zazwyczaj prawo: „entropia układu zamkniętego nie może się nigdy zmniejszać, z tym zaś sformułowaniem są na ogół równoważne rozmaite inne dobrze znane sformułowania, jak: „ciepło nie może samo przez się przejść od niższej temperatury do wyższej”, albo: „jest rzeczą niemożliwą utrzymywanie w ruchu maszyny cieplnej przy pomocy jednego tylko źródła ciepła”, albo jeszcze: „nie może istnieć urządzenie, którego jedynym działaniem byłoby podniesienie ciężaru i oziębieniem zbiornika ciepła”. Teoria tak zwanych molekularnych zjawisk fluktuacyjnych doprowadza, jak wiadomo, do wniosku, że prawo entropii – w przedstawionym tu właśnie znaczeniu – nie jest ściśle słuszne.

Smoluchowski wnikliwie uzasadnia swoje zastrzeżenia do tak sformułowanej II zasady termodynamiki, kończąc je w sposób następujący:

rozpowszechnione mylne poglądy dotyczące tej kwestii pochodzą stąd, że pomieszano zachowanie się najbardziej prawdopodobne z rzeczywistym... W rzeczywistości można odróżnić trzy stadia, w przypadku gdy stan początkowy układu jest scharakteryzowany przez anomalnie niską wartość entropii: przez pewien czas powiększa się ona z największym prawdopodobieństwem (stadium A), mianowicie w przybliżeniu tak długo, aż się zbliży do stacjonarnej wartości przeciętnej; następnie mamy stadium B stanu w przybliżeniu stacjonarnego, w którym entropia doznaje nieregularnych fluktuacji, ale pozostaje niezbyt oddalona od (zdarzającej się najczęściej) wartości skrajnej; niekiedy wreszcie muszą nastąpić również zmiany doprowadzające do stanu pierwotnego (stadium C), tak mianowicie, że entropia z biegiem nieskończenie długich okresów czasu równie często wzrasta, jak maleje. Stadium A odpowiada termodynamicznie pojęcie nieodwracalności, stadium B – zakres stosowalności zwykłej termodynamiki do procesów odwracalnych. To jednak, że stadium C ujawnia się na ogół tylko w badaniach mikroskopowych i z punktu widzenia potrzeb praktycznych zwykle wolno je pomijać, pochodzi stąd, że przeciętna długość czasu powrotu jest w ogóle w stosunkach makroskopowych nadzwyczajnie duża. Rozumie się samo przez się, że nasze wywody nie mają w niczym naruszać oceny termodynamiki z praktycznego punktu widzenia, skierowane są tylko przeciwko panującej w nauce tendencji do dogmatyzowania i idealizowania termodynamiki jako nienaruszalnej zasady podstawowej¹⁹.

Koncepcje Smoluchowskiego nic nie straciły na swojej aktualności, więcej, jego prace są cytowane i wysoko cenione przez wielu wybitnych fizyków parających się tą problematyką (grudniowy numer radzieckiego wówczas miesięcznika „Podstawy nauk fizycznych” z 1967 r., w całości poświęcony był pamięci Marianna Smoluchowskiego z okazji 50. rocznicy jego śmierci). Dorobek naukowy tego przedwcześnie zmarłego wybitnego fizyka jest wart odrębnego przedstawienia. W tym miejscu jedynie wypada wspomnieć o wyjaśnieniu przez niego – niezależnie od Einsteina – ruchów Browna. Obaj doszli do tych samych wzorów, idąc zupełnie innymi drogami (wyniki ich różniły się tylko o pewien liczbowy współczynnik, którego prawidłową wartość podał Einstein) i prawie w tym samym

¹⁹ M. Smoluchowski, *Wybór pism filozoficznych*, PWN, Warszawa 1956, s. 232–233.

czasie²⁰. (Duża część dorobku naukowego Smoluchowskiego jest dostępna na stronie internetowej: <http://matwbn.icm.edu.pl/spis>).

Podsumowując, w termodynamice entropia jest zdefiniowana tylko dla układów będących w równowadze, jako wielkość statystyczna uśredniona dla dużej ilości cząsteczek. Jeżeli stan początkowy i końcowy układu były w równowadze, to entropia w stanie końcowym nie jest mniejsza, niż w stanie początkowym. Niestety, w stanach dalekich od równowagi pojawiają się kłopoty z entropią. Weźmy np. entropię Wszechświata, którego entropia nie może zmaleć, jeśli uzna się go za układ izolowany od początku jego istnienia. Ciągły zatem wzrost entropii musi nieuchronnie doprowadzić do śmierci termicznej Wszechświata, czyli stanu o maksymalnej entropii. Czy jednak rzeczywiście taki los czeka Wszechświat? Jeżeli druga zasada termodynamiki jest słuszna, to tak powinien skończyć Wszechświat. Inna jednak rysuje się jego przyszłość, odmienna od tej przewidywanej przez drugą zasadę termodynamiki, ponieważ podlega on prawom molekularnym, a entropia jest wielkością prawdziwą, ale po uśrednieniu. Podobne problemy dotyczą entropii czarnych dziur, ale tutaj oczekuje się, że wyjaśni to kwantowa teoria grawitacji.

Entropia a informacja (i nie tylko)

Na nieco inne znaczenie entropii naprowadził badaczy poczciwy telefon, którego prototyp zademonstrował we Frankfurcie nad Menem 26 października 1861 r. **Johann Philipp Reis** (1843–1874, niemiecki wynalazca), a praktyczny telefon opatentował 14 lutego 1876 r. **Alexander Graham Bell** (1847–1922, amerykański fizyk i wynalazca), wyprzedzając o kilka godzin swego rodaka **Elisha Graya** (1835–1901, amerykański wynalazca w dziedzinie łączności). Szybki rozwój telefonii zaczął się 10 marca 1876 r., kiedy to na odległość przesłano pierwsze słowa, a badacze zastanawiali się nad problemem bezbłędnego przesyłania sygnałów elektrycznych na duże odległości. W 1924 r. ukazała się praca **Harrego Nyquista** (1889–1976, amerykańskiego fizyka pochodzenia szwedzkiego)²¹, poświęcona zależności między szybkością telegrafowania a ilością używanego prądu elektrycznego. Wykazał w niej, że jeżeli kolejne wartości prądu elektrycznego są wysyłane w stałych odstępach czasowych, to szybkość telegrafowania **A** jest dana wzorem: $A = B \log C$, gdzie **B** jest pewną stałą zależną od ilości przesyłanych impulsów na sekundę, a **C** jest liczbą wyróżnionych wartości prądu elektrycznego.

²⁰ T. Godlewski, *Maryan Smoluchowski*, Wydawnictwo Redakcji Wiadomości Matematycznych, Warszawa 1919, s. 11.

²¹ H. Nyquist, *Certain factors affecting telegraph speed*, Bell System Technical Journal, marzec 1924, s. 324–346.

W 1928 r. ukazał się artykuł **Ralpa Vintona Lyona Hartleya** (1888–1970)²², w którym przedstawił on problemy dotyczące przekazywania informacji; była to na tyle pionierska praca, że na cześć jej autora jednostkę entropii informacji nazwano hartleyem (jeden hartley to ilość informacji zawarta w wiadomości o zajściu zdarzenia, którego prawdopodobieństwo wynosi 0,1; 1 hartley = 3,219 bita). W pracy tej poszukiwał ilościowej miary do przenoszenia informacji i w tym celu wprowadził pojęcie *pojemność informacji*. Stwierdził, że jeżeli mamy wiadomość przedstawić w postaci wyrażenia o **B** znakach, które są wzięte z **C** symboli wyjściowych, to pojemność informacji **A** można wyrazić za pomocą wyrażenia: $A = B \log C$. Zaiste imponujące jest podobieństwo tych wzorów, mimo że dochodzi się do nich jakże różnymi drogami. W 1929 r. amerykański fizyk węgierskiego pochodzenia **Leo Szilard** (1898–1964) zaproponował, aby posłużyć się pojęciem informacji do wykazania niemożliwości istnienia *perpetuum mobile drugiego rodzaju*. Wskazał zatem na powiązanie informacji z entropią znaną z termodynamiki fenomenologicznej i statystycznej. Wcześniej jednak na ten związek natrafił Maxwell, chociaż nie potrafił go podać. Znamy wszyscy jego słynny problem, określane dzisiaj *demonem Maxwella*. Ponieważ nie znał on związku entropii z informacją, miał kłopot z rozsądnym wyjaśnieniem tego problemu, ów demon potrzebuje bowiem informacji przy sortowaniu cząsteczek wg posiadanych przez nie prędkości, a tę zdobyć może poprzez ich obserwację. Dla porządku dodajmy jeszcze, że w 1946 r. ukazała się praca **Denisa Gabora** (1900–1979, angielskiego fizyka pochodzenia węgierskiego, noblisty z 1971 r., wynalazcy holografii), poświęcona teorii informacji, ale najwięcej wniosła do zrozumienia związku entropii z informacją praca **Claude Elwooda Shannona** (1916–2001, amerykańskiego inżyniera i matematyka) *Matematyczna teoria komunikowania się* (*The Mathematical Theory of Communications*), która ukazała się w 1948 r. Istniała ogromna potrzeba zbudowania teoretycznych podstaw technologii komunikacyjnych w sieciach telefonicznych, telegraficznych czy systemach radiowych i raczkujących telewizyjnych. Aby lepiej pokazać związek entropii z informacją, przyjrzyjmy się bliżej tej drugiej. Czym zatem jest informacja? Zacznijmy od parafrazy aforyzmu, którego autorem jest **Joseph John Thomson** (1856–1940 angielski fizyk, odkrywca elektronu, noblista z 1906 r.), według którego z informacją jest tak jak z pieniędzmi: można ją gromadzić, ale korzyść z niej mamy tylko wtedy, kiedy ją tracimy, a dokładniej, gdy ją przekazujemy innym lub wykorzystujemy w określonym celu.

„Prognoza pogody na następny dzień” jest komunikatem, który dociera do nas poprzez różne nośniki: dźwięk, papier itd. Odbiorcy nie sprawia różnicy, w jaki sposób się o prognozowanej pogodzie dowiedział, istotna jest dla niego zawartość

²² R.V.L. Hartley, *Transmission of Information*, Bell System Technical Journal, lipiec 1928, s. 535.

komunikatu, a ta, podaje nam interesującą nas informację, my ją odebraliśmy i możemy ją zgromadzić, zapisać w różnych systemach pamięci. Przekazywanie musi odbywać się za pomocą jakiegoś kodu i chodzi o to, aby ten wiernie przerosił informację. Jakże często np. na dworcach słyszymy zniekształcone komunikaty o odjazdach pociągów czy autobusów; sygnał – mowa ludzka – jest zniekształcony, ale interesująca nas informacja do nas dotarła, mimo tych oczywistych kłopotów. Podstawowym osiągnięciem Shannona było podanie miary ilości informacji w danym komunikacie. Zastanawiał się on, który komunikat zawiera więcej informacji:

1. Urodziło mi się dziecko.
2. Przy rzucie kostką wypadło „6 oczek”.
3. Mój numer PESEL kończy się cyfrą „2”.

Pierwszy komunikat zawiera w sobie dwa warianty: chłopiec, dziewczynka. Drugi komunikat może mieć sześć wariantów, a trzeci aż 10 wariantów, zatem do przekazania pierwszego komunikatu wystarczą dwa symbole, drugiego – 6 symboli, a trzeciego – 10 symboli. Według Shannona miarą ilości informacji jest liczba możliwych komunikatów i ich prawdopodobieństwa, a nie ich treść i sens. Teoria informacji nie zajmuje się tym, czym jest informacja, lecz interesuje się mierzeniem jej ilości. Jeżeli idziemy po zakupy, to ilość zabranych pieniędzy zależy od tego, co chcemy kupić, bo jeżeli chcemy kupić np. chleb, zapalki czy długopis, to bierzemy złotówki, jeżeli chcemy zakupić np. sprzęt rtv, to zabieramy już setki złotych, a gdy zamierzamy kupić samochód, to tysiące złotych. Inaczej mówiąc, nie jest konieczna znajomość dokładnej kwoty, ale jej rząd wielkości. Doskonale informują nas o rzędzie wielkości logarytmy. Podobnie zachowują się nasze zmysły, też rozróżniają bodźce różniące się o rząd wielkości, stąd dobrze jest te reakcje opisywać w skali logarytmicznej; tak jest z dźwiękami (prawo Webera-Fechnera), z wrażeniami wzrokowymi itd. A zatem do oceny wielkości wysłanej lub odebranej informacji celowe jest stosowanie skali logarytmicznej, ta jednak może mieć różne podstawy. Najczęściej stosuje się logarytmy o podstawie 2, liczbie e lub 10. Podstawa logarytmu determinuje jednostkę ilości informacji, np. gdy podstawą logarytmu jest liczba 2, to jej jednostką jest bit. Można także mierzyć ilość informacji w innych jednostkach, np. w jednostkach energii czy entropii, ale wówczas jeszcze we wzorze przed logarytmem należy dopisać pewną stałą, której wartość zależy od rodzaju przyjętych jednostek. Mamy zatem wg Shannona następujący wzór na ilość informacji: $A = B \log C$, gdzie A jest miarą ilości informacji, B jest pewną stałą, a C jest ilością rozróżnialnych komunikatów, które są jednakowo prawdopodobne. Jeżeli mamy n wariantów komunikatu i nie są one jednakowo prawdopodobne, tylko występują z prawdopodobieństwem p_1, p_2, \dots, p_n , to ilość informacji obliczamy według Shannona ze wzoru:

$$A = -p_1 \log p_1 - p_2 \log p_2 \dots - p_n \log p_n,$$

gdzie minus jest po to, by ilość informacji była liczbą dodatnią, a prawdopodobieństwa spełniają równość:

$$p_1 + p_2 \dots + p_n = 1.$$

Wielkość A nazywamy entropią informacji, lub po prostu entropią i najczęściej oznacza się ją literą H . Widzimy zatem, że entropia przez swój związek z informacją ma ogromne znaczenie we współczesnym świecie. Przecież nasze życie to ciągłe przesyłanie, odbieranie, porządkowanie, gromadzenie, przetwarzanie różnych komunikatów i zawartych w nich informacji. O ważności tej problematyki niech świadczy fakt istnienia od niedawna takiego przedmiotu czy nawet kierunku studiów jak pedagogika medialna, gdzie w ramach studiów naucza się podstaw teorii informacji w oparciu o pracę Shannona.

Entropia jako miara stopnia nieuporządkowania albo inaczej nieokreśloności znalazła zastosowanie np. w badaniach socjometrycznych, w których chodzi o rozkład wyborów w grupie. Jeżeli nieuporządkowanie jest maksymalne, czyli każda osoba otrzymuje tyle samo wyborów, entropia jest maksymalna; jeżeli natomiast wybory są zhierarchizowane, a nas interesuje źródło tej hierarchizacji, to otrzymujemy inną wartość entropii. Entropia zatem nadaje się również do badania struktury grupy społecznej²³. Warto nadmienić, że często w takich sytuacjach korzysta się też z innej wartości występującej w teorii informacji, mianowicie redundancji, wielkości ściśle powiązanej z entropią, która opisuje stopień uporządkowania danej struktury, już niekoniecznie grupy ludzkiej²⁴. Z tych pojęć korzysta też pedagogika²⁵, cybernetyka^{26,27,28}, kryptografia czy lingwistyka.

Widzimy zatem, że entropia rzeczywiście niejedno ma imię, i co ciekawe, tych imion ciągle przybywa.

Od Redakcji:

Polecamy rozdział 12 z *Historii fizyki* Andrzeja Kajetana Wróblewskiego „Od ciepłoty do termodynamiki i fizyki statystycznej” (str. 334). O książce tej piszemy w rubryce „Co czytać” na str. 68.

²³ J.S. Coleman, *Wstęp do socjologii matematycznej*, PWE, Warszawa 1968.

²⁴ C.H. Coombs, R.M. Dawes, A. Tversky, *Wprowadzenie do psychologii matematycznej*, PWN, Warszawa 1977.

²⁵ K. Hercman, *Teoria informacji na użytek szkoły*, WSiP, Warszawa 1977.

²⁶ A.J. Lerner, *Zarys cybernetyki*, WNT, Warszawa 1970.

²⁷ L. Brillouin, *Nauka a teoria informacji*, PWN, Warszawa 1969.

²⁸ M. Mazur, *Jakościowa teoria informacji*, WNT, Warszawa 1970.