

## Ciepło i energia

Chyba w żadnym innym dziale fizyki nie uzyskano tak doniosłych wyników opartych na błędnym wyobrażeniu o naturze świata jak przy badaniu zjawisk cieplnych. W pierwszych dekadach XIX wieku powszechnie uznawano istnienie nieważkiego, przenikającego wszystko fluidu zwanego ciepłikiem (łac. *caloricum*), w którym miały znajdować się pierwotne fragmenty materii. Zwiększanie się ilości ciepłika miało prowadzić do rozszerzania ciał i zmian ich stanu skupienia (topnienie i wrzenie), a wrażenia zmysłowe ciepła i zimna miały być przejawem przepływów tego fluidu. Spekulowano także, czy światło i ciepło są przejawami różnych zjawisk fizycznych, czy też można je „zunifikować” jako przejawy różnego rodzaju ruchów tego samego ciepłika.

W 1819 roku Alexis Petit i Pierre Dulong stwierdzili na podstawie swoich eksperymentów, że iloczyn ciepła właściwego ciała stałego i jego ciężaru cząsteczkowego jest w przybliżeniu taki sam dla wszystkich ciał stałych. Wyjaśnienie tego empirycznego prawa było jednym z pierwszych wielkich sukcesów mechaniki kwantowej.

Bardzo ważną rolę w budowaniu matematycznej teorii ciepła odegrał Joseph Fourier. Nie wnikając w szczegółową naturę ciepła, w latach 1808–22 Fourier na podstawie bardzo ogólnych założeń sformułował równania różniczkowe opisujące przepływy ciepła oraz podał nowe metody rozwiązywania tych równań polegające na rozkładaniu badanej funkcji na szeregi funkcji trygonometrycznych określane dziś jego nazwiskiem.

W 1816 roku Fourier został wybrany na członka Akademii Nauk w Paryżu, ale – jako zwolennik niedawno obalonego Napoleona Bonaparte – nie został zatwierdzony przez króla Ludwika XVIII. W kolejnym roku członkowie Akademii jednogłośnie ponowili wybór. Król tym razem ustąpił.

Sadi Carnot prowadził swe rozważania w sposób bardzo poglądowy, ale posługiwał się raczej omówieniami idei fizycznych niż wzorami. Być może z tego powodu jego wyniki nie zostały od razu docenione i zaistniały w świadomości fizyków dzięki omówieniom w dziełach innych badaczy, przede wszystkim Émile’a Clapeyrona i Williama Thomsona.

James Joule był właścicielem browaru; pokaźne dochody, jakie stąd czerpał, pozwalały mu na poświęcanie wiele czasu swemu hobby – doświadczeniom fizycznym. Pochodzący z niezamożnej rodziny Helmholtz z wykształcenia był lekarzem, gdyż w Prusach studia medyczne były bezpłatne dla najlepszych studentów pod warunkiem przepracowania pięciu lat na stanowisku lekarza wojskowego.

W układach z silnymi oddziaływaniami grawitacyjnymi, opisywanymi ogólną teorią względności, zdefiniowanie energii nastręcza sporych trudności. Pisał o tym w *Delcie* 12/2015 Jerzy Kijowski.

Argumenty teoretyczne na rzecz istnienia ciepłika były eleganckie i przekonujące. Używając tego pojęcia, Siméon Denis Poisson wykazał w 1818 roku, że związek między zmianą ilości ciepła  $\Delta Q$  danej ilości gazu oraz zmianami jego objętości  $\Delta V$  i ciśnienia  $\Delta p$  wyraża się wzorem

$$R \cdot \Delta Q = C_V \cdot V \cdot \Delta p + C_p \cdot p \cdot \Delta V,$$

gdzie  $R$  jest stałą gazową, a  $C_V$  i  $C_p$  ciepłami właściwymi odpowiednio przy stałej objętości i stałym ciśnieniu. Jeśli te ostatnie nie zależą od temperatury, stwierdzamy, że całkowite ciepło  $Q$  jest funkcją iloczynu  $p \cdot V^{C_p/C_V}$ , a więc dla przemian adiabatycznych, gdzie nie ma przepływów ciepła, wielkość  $p \cdot V^{C_p/C_V}$  jest stała, w zgodzie z doświadczeniem. Pierre Simon Laplace założył, że wspomniana funkcja jest liniowa i dla  $C_p/C_V = 1,4$  uzyskał zależność ciepła właściwego powietrza od ciśnienia, która doskonale zgadzała się z uzyskanymi w 1813 roku pomiarami François Delaroché’a i Jacques’a Bérarda. Laplace stwierdził także, że można poprawić klasyczne rozumowanie Newtona, który w *Principiach* obliczył prędkość dźwięku, zakładając, że zaburzone cząstki powietrza doznają działania siły zależnej od wychyleń z położenia równowagi, ale uzyskane w ten sposób przewidywania były systematycznie mniejsze od mierzonej wielkości. Laplace dostrzegł, że właśnie uwzględnienie  $C_p/C_V = 1,4$  pozwala uzyskać zgodność z doświadczeniem.

Skonstruowanie i udoskonalanie maszyn parowych niewątpliwie stanowiło inspirację dla dwudziestoosmioletniego podporucznika saperów, Sadi Carnota, który w 1824 roku sformułował – posługując się oczywiście pojęciem ciepłika – teorię maszyn cieplnych i udowodnił, że silnik termodynamiczny działa w sposób najbardziej efektywny, gdy przemiany cieplne zachodzą w nim w sposób odwracalny.

Pierwsze poglądy na naturę ciepłika zakładały, że jest to fluid niezniszczalny, jednak później przekonanie to zaczęło słabnąć. Wielu uczonych wyrażało przekonanie o zachowaniu w przyrodzie pewnej ogólnej wielkości, której ciepło jest zaledwie jednym z przejawów. Sadi Carnot próbował wyznaczyć przelicznik ciepła na pracę mechaniczną, ale na zadowalająco dokładny wynik trzeba było jeszcze czekać kilkanaście lat. W 1843 roku James Joule podał ten uniwersalny przelicznik, a w roku 1847 ukazała się rozprawa Hermanna Helmholtza, w której jasno sformułował on zasadę zachowania energii i udokumentował jej słuszność w wielu działach fizyki. Gwoli ścisłości, należy wspomnieć, że mechaniczny równoważnik ciepła i sformułowanie zasady zachowania energii podał w 1842 roku, a więc przed Joulem i Helmholtzem, Robert Mayer. Jako lekarz miał jednak trudności w zapisaniu swoich wyników w sposób zrozumiały dla fizyków i jego praca pozostawała przez wiele lat niedostrzeżona.

Od tych pierwszych kroków dzieli nas ponad półtora stulecia. Jednym z najważniejszych późniejszych osiągnięć w próbach coraz to lepszego wyrażenia zasady zachowania energii było udowodnienie w 1915 roku przez Emmy Noether twierdzenie o związku symetrii układów fizycznych z prawami zachowania. Przy założeniu, że prawa fizyki są niezmiennicze względem przesunięć w czasie, z twierdzenia tego wynika zachowanie wielkości, którą można utożsamić właśnie z energią. Wyjąwszy może krótki epizod z lat 30. XX wieku, kiedy to Niels Bohr postulował, że prawa zachowania mają charakter statystyczny, a nie ścisły, żeby wyjaśnić, co dzieje się z energią uwalnianą w jądrowych rozpadach  $\beta$  (dziś wiemy, że unosi ją nieznaną wtedy cząstka – neutrino), nikt już na serio nie wątpił w zachowanie energii we wszystkich układach, dla których można ją w sposób sensowny określić.

Krzysztof TURZYŃSKI