

Nie powiem nic o trudach i niebezpieczeństwach tej operacji; możecie sobie wyobrazić, co to znaczy chodzić po dwóch stopach śniegu, niosąc ciężkie kije pomiarowe, które trzeba stale wbijać w śnieg i podnosić. Wszystko to przy tak silnym zimnie, że gdy próbowaliśmy napić się eau de vie [brandy], jedynego napoju, który można zachować w stanie płynnym, język i wargi natychmiast przymarzały do kubka i można je było oderwać jedynie z krwią.

**Kontrowersje po wyprawie. Porównania wyników z Laponii i Francji.** Jeszcze przed wyprawą do Laponii Johann Bernoulli, zwolennik Cassinich, zapytał: *Czy obserwatorzy mają jakieś upodobanie do jednej lub drugiej z tych idei? (...) Bo jeśli wierzą, że Ziemia jest spłaszczona na biegunach, z pewnością przekonają się, że jest ona spłaszczona... Dlatego będę wytrwale czekać na wyniki obserwacji amerykańskich.*

Na wyniki z równika trzeba było czekać do połowy 1744 roku, natomiast ekspedycja Maupertuisa, która wyruszyła w kwietniu 1736 roku, już siedemnaście miesięcy później przywiozła do Paryża następujący wynik pomiarów: stopień szerokości geograficznej Laponii wynosi 57 437 sążni, czyli o 477 sążni więcej niż łuk paryski zmierzony przez Cassinich w 1718 r. Pod koniec sierpnia Maupertuis oświadczył członkom Akademii, że *jest oczywiste, że Ziemia jest znacznie spłaszczona na biegunach*.

Rozjątrzony Cassini odrzucił te wyniki jako niemiarodajne. Stwierdził, że Maupertuis zmierzył zbyt krótki fragment południka, by zagwarantować wiarygodny pomiar, że jego pomiary triangulacji terenu były niewiarygodne, gdyż były oparte na pomiarach tylko jednej linii bazowej, a nie dwóch, jak to

powinno być zrobione, oraz że nie skalibrował właściwie pomiarów astronomicznych.

Kiedy dane Maupertuisa przeanalizowano i porównano z wcześniejszymi pomiarami we Francji, okazało się, że średnica Ziemi pomiędzy biegunami była mniejsza niż jej średnica równikowa o 1 część na 178. Spłaszczenie Ziemi na biegunach było zatem dużo większe niż wartość 1/230, którą pierwotnie przewidywał Newton. W tej sytuacji wszyscy pragnęli poznać wyniki ekspedycji na równik. Po sześciu latach ogłoszono jej wyniki: długość jednego stopnia południka wyniosła tam około 56 750 sążni, co tylko potwierdziło słuszność teorii Newtona.

Artykuł rozpoczęliśmy sarkastyczną uwagą Woltera o Cassinich i w podobnej tonacji go zakończymy. Wolter zakpił sobie tym razem z samego Maupertuisa, wypowiadając następującą uwagę:

*W tych trudnych miejscach potwierdziłeś to, co wiedział pan Newton, nie wychodząc z domu.*

#### Bibliografia

- J. Donald Fernie, *The Shape of the Earth, Part III*, American Scientist, Vol. 80, No. 2 (March-April 1992), pp. 125-127.  
Laurie D. Ferreiro, *Measure of the Earth. An Enlightenment Expedition that Reshaped our World*, Basic Books, New York 2011.  
H. Bentley Glass, *Maupertuis and the Beginnings of Genetics*, The Quarterly Review of Biology, Vol. 22, No. 3 (Sep., 1947), The University of Chicago Press, 196-210.  
H. Bentley Glass, *Maupertuis, a Forgotten Genius*, Scientific American, Vol. 193, No. 4 (October 1955), pp. 100-111.  
Michael R. Hoare, *The Quest for the True Figure of the Earth*, Routledge, New York 2017.  
Miljenko Solarić, Nikola Solarić, *French Geodetic and Scientific Expedition to Lapland*, KiG No. 22, Vol. 13, 2014.  
Mary Terrall, *The Man who Flattened the Earth*, The University of Chicago Press, 2006.

## Energia spoczynkowa czy wewnętrzna?

Ludwik LEHMAN

Fizyka jest nauką ścisłą opisującą zjawiska językiem matematyki. Jednak obok matematycznej precyzji sporo jest w fizycznych wywodach intuicji (lepiej lub gorszej), przywiązania do tradycji etc. Czasami stwarza to problemy. Zadajmy dla przykładu proste pytanie: co to jest energia wewnętrzna ciała? Zaczniemy od przytoczenia powszechnie akceptowanej definicji. Według Słownika Fizycznego PWN (Warszawa 1992) to termin stosowany w dwóch znaczeniach:

1. (ogólnie) energia układu fizycznego związana z ruchem jego części składowych względem siebie i ich oddziaływaniami ze sobą, tzn. różnica energii całkowitej układu i sumy jego energii kinetycznej, jako całości, i energii oddziaływania układu, jako całości, z otoczeniem;
2. (w sensie termodynamicznym) e. w. w sensie 1. w przypadku, gdy za części układu uważa się atomy (lub cząsteczki) tworzące ciała wchodzące w skład układu...

Dalej następuje długi opis (w definicji!), jakie rodzaje energii należy wliczać do energii wewnętrznej w różnych przypadkach. Cytujemy fragmenty:

*W przypadku gazu, składającego się z cząsteczek prawie nie oddziałujących ze sobą, e. w. jest równa sumarycznej energii kinetycznej ruchów cieplnych*





cząsteczek, w przypadku ciała stałego *e. w.* składa się z energii drgań atomów wokół położenia równowagi oraz z energii potencjalnej atomów i jonów w polu wytworzonym przez pozostałe atomy, względnie jony (lecz nie w polu przyłożonym z zewnątrz, takim jak zewnętrzne pole elektryczne czy pole sił ciężkości). W skład *e. w.* ciała stałego może też wchodzić energia swobodnych elektronów (w metalach lub półprzewodnikach). Zmiana *e. w.* (w sensie termodynamicznym) w procesie adiabatycznym jest równa pracy, jaką układ wykonuje (*e. w.* maleje) lub jaka jest wykonana nad układem (*e. w.* wzrasta); zmianę *e. w.* w dowolnym procesie określa pierwsza zasada termodynamiki.

Z kolei w Wikipedii (dostęp 12.03.2024) możemy przeczytać następującą definicję: *Energia wewnętrzna* ( $E_w$  lub  $u$ ,  $U$ ) – w termodynamice jest to całkowita energia układu będąca sumą energii potencjalnej i kinetycznej makroskopowych części układu, energii kinetycznej cząsteczek, energii potencjalnej oddziaływań międzycząsteczkowych i wewnątrzcząsteczkowych itd. Wartość energii wewnętrznej jest trudna do ustalenia ze względu na jej złożony charakter. W opisie procesów termodynamicznych istotniejsza i łatwiejsza do określenia jest zmiana energii wewnętrznej, dlatego określając energię wewnętrzną układu, pomija się te rodzaje energii, które nie zmieniają się w rozpatrywanym układzie termodynamicznym. Na przykład dla gazu doskonałego jedyną składową energią wewnętrzną, która może się zmieniać, jest energia kinetyczna cząsteczek gazu. Stąd zmiana energii wewnętrznej równa jest zmianie energii kinetycznej cząsteczek.

Trochę dziwne jest definiowanie w nauce ścisłej jakiegokolwiek wielkości fizycznej w taki sposób, że jej „wartość (...) jest trudna do ustalenia”. Zgodnie z obydwoma definicjami przy różnych zagadnieniach energia wewnętrzna (w sensie termodynamicznym) będzie zawierać różne składniki. Sporo przy tym niejasności. Na przykład, czy energia ruchów konwekcyjnych jest częścią energii wewnętrznej płynu? Są to ruchy makroskopowych porcji substancji. Czy energia sprężystości jest składnikiem energii wewnętrznej ciała? Jest to niewątpliwie energia oddziaływań między cząsteczkami. A energia jądrowa? Na ogół nie wliczamy jej do energii wewnętrznej, jednak gdy rozpatrujemy próbkę plutonu lub Ziemię rozgrzewaną przez rozpad promieniotwórczy – mamy problem. Musimy wtedy uznać, że źródło ciepła jest „zewnętrzne” w stosunku do ciała w oczywistej sprzeczności ze znaczeniem tego słowa. Możemy także uznać, że energia spoczynkowa jąder atomowych jest częścią energii wewnętrznej. W ten sposób zmagamy się z problemami, które sami stworzyliśmy.

Na szczęście istnieje lepsze rozwiązanie. Wiadomo, że w stosowaniu zasady zachowania (całkowitej) energii ważne są tylko te jej rodzaje, które w rozważanym procesie się zmieniają. Nie jest zatem potrzebne definiowanie energii „w sensie termodynamicznym”. Dobrze określona jest tylko energia wewnętrzna w sensie ogólnym (punkt 1 definicji z cytowanego słownika), zatem tylko w tym sensie powinna być konsekwentnie używana.

Jeśli przeczytamy uważnie definicję energii wewnętrznej w sensie ogólnym, zauważymy, że w jej skład wchodzi także energia sprężystości oraz energia kinetyczna ruchu obrotowego. Pierwsza dotyczy oddziaływania makroskopowych części ciała (ściślej mówiąc, cząsteczek), a druga – ich ruchu względem siebie. Są one składnikami energii wewnętrznej również w rozumieniu definicji z Wikipedii. Najlepiej usunąć źródło problemów, czyli definicję energii wewnętrznej w sensie termodynamicznym. Przemawia za tym jeszcze jeden – metodologiczny – argument. Jeśli tak trudno jednoznacznie określić jakąś wielkość fizyczną, to znaczy, że prawdopodobnie nie odpowiada ona żadnemu realnemu składnikowi badanego świata.

Przyjmijmy zatem, zgodnie z pierwszym punktem definicji słownikowej, że energia wewnętrzna ciała (układu)  $E_w$  to całkowita energia ciała pomniejszona o energię kinetyczną i energię oddziaływania z otoczeniem środka masy, czyli ciała traktowanego jako punkt materialny. To cała energia związana z budową wewnętrzną i strukturą ciała, czyli całkowita energia ciała spoczywającego i nieoddziałującego (jako całość) z otoczeniem. Przyjęcie i stosowanie w termodynamice takiej definicji nie zmienia I zasady termodynamiki, bo w niej występuje tylko przyrost energii wewnętrznej. Likwiduje też wszelkie niejasności i zależność samej energii wewnętrznej od rozpatrywanego problemu. Zauważmy, że tak zdefiniowana energia wewnętrzna niczym nie różni się od energii spoczynkowej znanej z teorii względności. Możemy wtedy stwierdzić, że słynny wzór Einsteina dotyczy właśnie tak określonej energii wewnętrznej:

$$E_w = mc^2.$$

Tak właśnie interpretuje ten wzór w pięknej książeczce o teorii względności Andrzej Szymacha. To interpretacja godna polecenia. Zauważmy, jak określona w jednym dziale fizyki wielkość dopasowuje się do wielkości pojawiającej się w zupełnie innej teorii. To znak, że postępujemy właściwie – elementy układanki pasują do siebie!

Podkreślmy na końcu, że sugerowane rozwiązanie likwiduje nie tylko niepotrzebnie wykreowane problemy dotyczące składników energii wewnętrznej w rozumieniu termodynamicznym. Pomoże ono także w wyciszeniu równie niepotrzebnych i mylących interpretacji wzoru Einsteina. Na przykład tej o „równoważności” masy i energii (co to właściwie znaczy?). Albo tej o „zamianie masy w energię”. Energia wewnętrzna każdego ciała jest równa iloczynowi masy tego ciała i prędkości światła do kwadratu. Tylko tyle i aż tyle.