

# W obronie tradycyjnych wartości termodynamicznych

Szymon CHARZYŃSKI

Katedra Metod Matematycznych Fizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Teoria względności została sformułowana na początku ubiegłego wieku, czyli już ponad 100 lat temu. Nadal jednak w szkole uczy się klasycznej mechaniki Newtona, która jest tylko przybliżeniem teorii względności. Zakres stosowalności tego przybliżenia jest ograniczony do prędkości małych w porównaniu z prędkością światła. Próba stosowania mechaniki Newtona do opisu obiektów poruszających się z prędkościami porównywalnymi z prędkością światła prowadzi niechybnie do błędnych wyników. Jednak w codziennym życiu człowieka efekty relatywistyczne są niezauważalne i mechanika Newtona wystarcza do modelowania naszej codzienności.

Podobnie jest z dziewiętnastowieczną termodynamiką, która z jednej strony stanowi piękny kawałek czystej fizyki teoretycznej, a z drugiej kawał praktycznej wiedzy, będącej podstawą budowy między innymi maszyn parowych. Jak każda teoria fizyczna, jest tylko pewnym przybliżonym modelem opisującym pewne aspekty rzeczywistości. Z teorii względności wiemy, że podgrzewanie dowolnego obiektu prowadzi do wzrostu jego masy. Jak to się stało, że dziewiętnastowieczni uczeni, wykonując swoje pomiary, nie wykryli tego faktu, że aby zmierzyć, o ile wzrosła energia wewnętrzna gazu w cylindrze, wystarczy go po prostu zważyć przed i po podgrzaniu?

Rozważmy prosty przykład. Powiedzmy, że mamy 1 mol azotu (głównego składnika powietrza) w pojemniku o ustalonej objętości i chcemy zmierzyć wzrost jego energii wewnętrznej po ogrzaniu go o 1 K. Chcemy to zrobić przy użyciu wagi. Jak dokładna ma być nasza waga?

Masa jednego mola azotu (gazu dwuatomowego) to  $m = 28$  g, czyli jego energia spoczynkowa to  $E = mc^2 = 2,52 \cdot 10^{15}$  J. Molowe ciepło właściwe azotu wynosi  $20,8$  J/(mol · K), czyli aby podgrzać mol azotu o 1 kelwin, musimy dostarczyć  $20,8$  J energii. Stosunek tej energii do energii spoczynkowej mola azotu wynosi około  $8,3 \cdot 10^{-15}$ . Czyli z taką dokładnością musielibyśmy ważyć gaz, żeby wykryć zmianę jego masy. Inaczej mówiąc, energia  $20,8$  J przelicza się na około  $2,3 \cdot 10^{-13}$  g. Zatem nasza waga musi być w stanie rozróżnić dwie następujące masy:

28, 000 000 000 000 00 g,

28, 000 000 000 000 23 g.

Żeby lepiej uzmysłowić sobie, jak ogromna jest to dokładność, możemy przeliczyć to na inną skalę. Gdybyśmy wazyli lokomotywę o wadze około 100 ton na wadze kolejowej, to powyżej wymagana dokładność odpowiadałaby rozróżnieniu pomiaru wagi lokomotywy przed i po dołożeniu jednego ziarenka pyłku roślinnego. Takie ziarenko waży około  $1 \mu\text{g}$ , czyli właśnie około  $10^{-14}$  razy mniej od stutonowej lokomotywy. Czy można wyobrazić sobie ważenie ziarenka pyłku na wadze kolejowej w ten sposób, że najpierw ważymy

lokomotywę, a potem lokomotywę z dołożonym ziarenkiem pyłku i odejmujemy wskazania wagi od siebie? Oczywiście nie – w praktyce taka waga może nie drgnąć po dołożeniu kilku (a być może nawet kilkudziesięciu) kilogramów dodatkowego obciążenia.

Zatem odpowiedź na pytanie, dlaczego nie wystarczy zważyć gazu, żeby zmierzyć, jak podgrzewanie zmienia jego energię wewnętrzną, jest prosta. Zmiany energii przy podgrzewaniu o kilka czy kilkaset kelwinów są bardzo małe w porównaniu z iloczynem masy tego gazu i prędkości światła do kwadratu (czyli jego energii spoczynkowej). Efekt, który próbujemy opisać, jest niezwykle subtelny. Jeśli chcemy zmierzyć, ile ziarenek pyłku przykleiło się do lokomotywy, to musimy zdrapać ten pyłek i zważyć go samego na precyzyjnej wadze przeznaczonej do wyznaczania mas rzędu  $\mu\text{g}$ . Musimy odkleić pyłek od lokomotywy i na nim się skupić, a nie ważyć lokomotywę przed i po zdrapaniu drobin pyłku roślinnego na wadze kolejowej.

Stosujemy więc tzw. przybliżenie nierelatywistyczne. W tym przybliżeniu przyjmujemy, że masa gazu po prostu się nie zmienia, a do opisu tego, co się dzieje, gdy gaz sprężamy, rozprężamy, podgrzewamy i chłodzimy, używamy starych dziewiętnastowiecznych wielkości termodynamicznych, takich jak *energia wewnętrzna*. Określenie tej ostatniej, jak słusznie przekonuje Ludwik Lehman w artykule *Energia spoczynkowa czy wewnętrzna?*, dalekie jest od jednoznaczności, cechującej precyzyjną i elegancką definicję energii spoczynkowej w teorii względności. Kiedy jednak chcemy zmierzyć i opisać subtelny efekt zmiany energii, która ma się do energii spoczynkowej badanego obiektu, jak masa drobin pyłku roślinnego do masy lokomotywy, to zmuszeni jesteśmy użyć jakiegoś innego narzędzia niż waga kolejowa i dokładnie określić, którą to drobinę spośród wszystkich przyklejonych do lokomotywy chcemy zważyć i opisać. Nie ma więc jednej uniwersalnej definicji energii wewnętrznej, ponieważ to, co rozumiemy pod tym pojęciem, zależy od tego, jakie zjawisko chcemy uwzględnić w naszym bilansie energii, w ramach przybliżonego modelu, który stosujemy do opisu danej sytuacji fizycznej. Można oczywiście, jak przekonuje Ludwik Lehman, wrzucić wszystko do jednego worka z napisem „energia spoczynkowa”. Uzyskamy wtedy opis jednoznaczny, bardzo elegancki i zgodny z teorią względności, o której wiemy, że opisuje rzeczywistość znacznie dokładniej niż wszystkie teorie nierelatywistyczne. Jednak ceną, jaką się płaci za takie postawienie sprawy, może być niepraktyczność tego opisu w pewnych szczególnych sytuacjach, kiedy chcemy go stosować do zjawisk, w których zmiany energii są znikomo małe w porównaniu z energią spoczynkową badanego obiektu.