

•

P. Duhem.

EWOLUCYA MECHANIKI.¹⁾

V. PODSTAWY TERMODYNAMIKI.

1. Fizyka jakości.

Usiłowanie sprowadzenia wszystkich własności ciał do figury i do ruchu zdaje się być przedsięwzięciem chimerycznym, już to dla tego, że redukcya taka osiąga się kosztem przerażających wyobrażeń komplikacyj, już też dlatego, że byłaby ona w sprzeczności z naturą rzeczy materyalnych.

Zmuszeni tedy jesteśmy wprowadzić do Fizyki naszej co innego, niż elementy czysto ilościowe, stanowiące przedmiot badań geometry, i przyjąć, że materya posiada jakości. Z narazieniem się nawet na zarzut, że wracamy do własności ukrytych, zniewoleni jesteśmy uważać za jakość pierwszą i nieprzywiedlną to, przez co ciało jest ciepłe, świecące, naelektryzowane lub namagnesowane; słowem, wyrzekając się prób, bez przerwy od czasów Descartes'a ponawianych, musimy związać teorye nasze z najbardziej zasadniczymi pojęciami Fizyki perypatetycznej.

Czy ten odwrót nie narazi na szwank całego ciała doktryny, budowanej przez fizyków od chwili, w której zrzucili byli z siebie jarzmo Szkoły? Czy najplodniejsze metody Nauki nowoczesnej nie zaczną przez to wychodzić z użycia?

W przeświadczeniu, że wszystko w naturze ciał sprowadza się do figury i ruchu, jak je pojmują geometrowie, że wszystko tu

Patrz „Wiad. mat.” t. VII, 1903 str. 113—168, 244—288. t. VIII, str.

jest czysto ilościowe, fizycy wprowadzili wszędzie miarę i liczbę; każda własność ciał stała się wielkością, każde prawo—wzorem algebraicznym, każda teoria—łańcuchem twierdzeń. Zdziwiająca swą precyzją i ścisłością, oraz swą jednością majestatyczną, była Fizyka „Matematyką powszechną“, o jakiej marzył Descartes. Mamyż zniweczyć tę formę doskonałą, tak dogodną jak i piękną zarazem? Mamyż odrzucić cudownie potężną pomoc, jakiej używało naszym dedukcyom stosowanie symboli liczbowych? Zgodzimyż się pozostać jedynie przy rozprawach niejasnych, przy sporach zawiłych i ciemnych, które stanowiły Naukę Przyrody, zanim uczeni zaczęli posługiwać się językiem algebraicznym? Mamyż znów narażać się na szyderstwa, które zdyskredytowały Kosmologię Szkoły?

Żaden fizyk nie przystałby na takie cofnięcie się. Ale ofiara ta bynajmniej konieczną nie jest: zarzucenie wyjaśnień mechanicznych wcale nie pociąga za sobą porzucenia Fizyki matematycznej.

Liczba—wiemy to zresztą—może służyć do przedstawienia różnych stanów wielkości, mogącej być poddaną działaniu dodawania; przejście od wielkości do przedstawiającej ją liczby stanowi właśnie miarę wielkości. Ale liczba służyć też może do wyrażania różnych stanów jakości. To rozszerzenie pojęcia miary, to stosowanie liczby, jako symbolu rzeczy, która ilościową nie jest, byłoby bezwątpienia zadziwiło i uraziło perypatetyków Starożytności. Ale ono to właśnie stanowi najpewniejszy postęp, najtrwałszą zdobycz, jaką zawdzięczamy fizykom XVII stulecia i ich kontynuatorom. Wprawdzie nie udała się ich próba zastąpienia wszędzie jakości przez ilość, ale usiłowania te nie pozostały daremne, gdyż ustalili oni prawdę nieocenioną wartości, mianowicie, że możliwym jest rozprawianie o jakościach fizykalnych w języku Algebry.

Przykład pokaże, w jaki sposób dokonywa się to przejście od jakości do liczby.

Uczucie ciepła, doznawane przy dotykaniu różnych części ciała, pozwala nam spostrzedz pewną jakość tego ciała; wyrażamy to, mówiąc, że ciało jest ciepłe. Dwa ciała różne mogą być

jednakowo ciepłe; posiadają one rozważaną jakość w jednakowym natężeniu. Z dwóch ciał jedno może być cieplejsze od drugiego: pierwsze posiada wtedy tę jakość w większym natężeniu, niż drugie.

Nie wdając się w dalsze dochodzenie natury jakości, którą wyraża przymiotnik „ciepły”, nie podejmując próby rozkładu jej na elementy ilościowe, możemy dobrze zrozumieć, że każdemu z jej stanów odpowiada liczba; że dwa ciała jednakowo ciepłe charakteryzuje jedna i ta sama liczba; że z dwóch ciał nierówno ciepłych to, które jest cieplejsze, będzie charakteryzowała liczba większa; liczby tak obrane będą stopniami temperatury.

Proste te wskazówki dają już poznać, w jaki sposób, zamiast rozprawiać o tem, co jest ciepłe w języku zwykłym, można stosować do stopni temperatury symbole Algebry; zamiast mówić, że jedno ciało jest tak samo ciepłe, więcej albo mniej ciepłe niż inne, piszemy, że stopień temperatury pierwszego jest równy stopniowi temperatury drugiego, wyższy albo niższy od niego.

Rozumiemy już teraz, że teoria, w której będzie mowa o ciałach ciepłych, będzie mogła być przedstawiona już nie w postaci wykładu filozoficznego na podobieństwo owych rozpraw scholastycznych, które tak łatwo stawały się zawilemi i ciemnymi, lecz w formie szeregu równań lub nierówności algebraicznych, mających najwyższy stopień jasności i precyzji, jaki tylko umysł ludzki osiągnąć jest w stanie.

Nie wystarczy, aby stosowanie znaków Algebry pozwoliło nam rozważać ciepło z jasnością i dokładnością, lecz w sposób abstrakcyjny i ogólny; potrzeba jeszcze, abyśmy się mogli zapewnić co do możliwości przejścia od naszych twierdzeń abstrakcyjnych i ogólnych do praw konkretnych i szczególnych; abyśmy mogli porównywać wyniki naszych teorii z danymi doświadczenia, albowiem kontrola faktów jest dla teorii fizycznej jedynym kryterium prawdy.

To przejście od abstrakcyj do rzeczy konkretnych, od rzeczy ogólnych do szczególnych byłoby niemożliwe, gdybyśmy wiedzieli jedynie, że każdemu natężeniu ciepła odpowiadać może stopień temperatury i że ten stopień podnosi się, skoro natężenie rośnie.

Potrzeba jeszcze, by jakieś prawidło praktyczne dawało nam wartość liczbową stopnia temperatury ciała faktycznie danego; aby pewne narzędzie, wprowadzone sposobem określonym w związek z ciałem, którego stopień temperatury znać chcemy, wskazywało nam ten stopień. Wzory matematyczne, w których występuje litera T , symbol temperatury, mają znaczenie fizykalne jedynie przez wybór t e r m o m e t r u.

Stosowanie wybranego termometru podlega pewnym prawidłom, poddaje się pewnym warunkom; wymaga ono naprzykład, aby temperatura ciała badanego była jednostajna, aby była stała w ciągu pewnego czasu, aby nie była ani za wysoka, ani za niska. Wskazania termometru najbardziej doskonałego nie są ściśle, są one tylko przybliżone: dla dwóch natężeń ciepła różnych, lecz bardzo bliskich, narzędzie to nie daje wskazań, dających się odróżnić; danemu natężeniu ciepła odpowiada nie jedyny stopień temperatury, ale wszystkie stopnie temperatury, zawarte pomiędzy dwiema granicami, których przedział nie daje się ocenić przy pomocy naszych środków obserwacyjnych.

Przy pomocy termometru można będzie tedy porównać z doświadczeniem nie wszystkie wyniki teorii, ale tylko niektóre z nich. Te, które odnoszą się do temperatur zmiennych od punktu do punktu, albo od jednej chwili do drugiej; te, które dotyczą ciał bardzo ciepłych albo bardzo zimnych, pozostaną bez kontroli bezpośredniej. W tych zaś przypadkach, w których to porównanie będzie możliwe, nie będzie ono miało bezwzględnej ścisłości: dokładność jego będzie ograniczona i zależna od stopnia dokładności termometru. Niemniej wszakże narzędzie to pozwoli przejść od twierdzeń abstrakcyjnych i ogólnych, które formułuje teoria, do sądów konkretnych i szczególnych, które daje doświadczenie. Przejście to będzie możliwe w tem większej liczbie przypadków, im szerszymi będą warunki, w których stosowanie termometru jest uprawnione. Przez definicyę i użytek narzędzia teoria nabiera znaczenia fizykalnego: staje się sprawdzalną i stosowalną.

To, co powiedziano wyżej o jakości, odpowiadającej orzeczeniu, że ciało jest ciepłe, i o jej przedstawieniu symbolicznem przez liczbę, t. j. przez stopień temperatury, można

mutatis mutandis — powtórzyć o wszelkich jakościach, będących przedmiotem uwagi fizyka: o elektryzacji, magnetyzacji, polaryzacji dielektrycznej, świeceniu (światle) ¹⁾. Analiza faktów doświadczenia doprowadza nas do pojęcia abstrakcyjnego jakości o większym lub mniejszym natężeniu; do jakości tej dobieramy symbol liczbowy, którego wartość jest tem większa, im większe jest natężenie jakości. Ta odpowiedniość, której możliwość ustanawiamy z całą ogólnością, staje się praktycznie pewna w bardzo rozległej liczbie przypadków przez stosowanie narzędzia. Narzędzie to określa nam przybliżenie wartość liczbową symbolu, odpowiadającą danej faktycznie jakości. Bez procesu mierzenia i definicyja wielkości fizycznej jakości byłaby niepełna i pozbawiona znaczenia; ten to proces jedynie pozwala nam na przejście od wzoru algebraicznego ogólnego i abstrakcyjnego, wyrażającego prawo Fizyki teoretycznej, do faktu jakościowego, szczególnego i konkretnego, do którego chcemy prawo to stosować.

Te zasady, wypowiedziane już przed półwiekiem przez Rankine'a ²⁾ na kilku stronicach pracy mało znanej, odsłaniają nam prawdziwą budowę tej dziwnej nauki, jaką jest Fizyka, nauki doświadczałnej o jakościach cielesnych, rozwijającej się równocześnie na ciąg rachunków algebraicznych.

Geometrowie czasów Odrodzenia nauk zarzucali Fizyce Szkoły nietylko brak ścisłości, którego mogłaby uniknąć przez stosowanie języka algebraicznego, lecz i to jeszcze, że tworzyła własności ukryte, formy substancyjalne, sympatyje i antypatyje, ile razy miała wyjaśniać różne skutki przyrodzone; że w ten sposób stała się gadaniną, której forma napuszona pobudzała próżność

¹⁾ Co się tyczy przedstawienia symbolicznego jakości, którą oznacza wyrazem: *świecić*, przy pomocy symbolów matematycznych, nadających się do zbudowania teorii światła, odsyłamy czytelnika do naszej pracy: „Fragments d'un cours d'Optique“ (Ann. de la Soc. Scient. de Bruxelles, tomy XVIII, XIX, XX, 1894 - 1896).

²⁾ J. Macquorn Rankine. „Outlines of the Science of Energetics“ (Glasgow Philosophical Society Proceedings, t. III, №6, 2 maja 1855; Miscellaneous Scientific Papers s 209).

pedantów i podziw głupców, stekiem słów o treści pustej i próżnej, nie dającej żadnego pokarminu ludziom rozsądnym i myślącym.

Fizyka nowoczesna nie powinna by zasłużyć sobie na podobne zarzuty.

Fizyka tedy, sprowadzając teorię zjawisk Przyrody nieożywionej do rozważania pewnej liczby jakości, powinna starać się o możliwe zmniejszenie tej liczby. Ile razy przedstawi się jej jaki nowy skutek, powinna wszelkimi sposobami próbować sprowadzenia go do jakości, już określonych. Dopiero, gdy uzna taką redukcję za niemożliwą, wtedy zgodzi się na przyjęcie do swych teoryj nowej jakości, na wprowadzenie do swych równań nowego gatunku zmiennych. Podobnie chemik, odkrywający nowe ciało, stara się rozłożyć je na pierwiastki już znane i dopiero, gdy wyczerpie daremnie wszelkie środki analizy, jakimi rozporządza pracownia, wnosi nową nazwę na listę pierwiastków.

Nazwę p r o s t e j nadajemy substancji chemicznej nie na podstawie rozumowania metafizycznego, mającego jakoby stwierdzać, że jest nierozkładalna z natury, lecz na mocy faktu, że oparła się wszelkim próbom rozkładu. Epitet ten jest wyznaniem naszej niemocy; nie ma on w sobie nic ostatecznego i nieodwołalnego: ciało, uchodzące dziś za pierwiastek, przestanie być nim jutro, skoro jakiś chemik, szczęśliwszy od swych poprzedników, potrafi je rozszcześcić: potaż, soda, które były pierwiastkami dla L a v o i - s i e r a, stały się ciałami złożonemi, począwszy od prac D a v y ' e g o. Tożsamo zachodzi z jakościami pierwszymi, dopuszczalnymi w Fizyce. Nazywając je p i e r w s z e m i (prostemi), nie przesadzamy bynajmniej ich nieprzywiedlności z natury; wyznajemy tylko, że nie potrafimy ich sprowadzić do jakości prostych. Ale redukcya ta, której nie możemy dokonać dziś, może stać się jutro faktem spełnionym. Świecenie naprzykład przedstawia się na początku Optyki, jako jakość pierwsza; ale blizkim, być może, jest już dzień, w którym zatryumfuje ostatecznie teoria elektromagnetyczna światła, a wtedy świecenie sprowadzi się do szybkich zmian innej jakości, mianowicie polaryzacji dielektrycznej i utraci swoją godność jakości pierwszej.

Liczba jakości pierwszych, dopuszczalnych w Fizyce, powinna być tak nieznaczna, jak tylko pozwalają na to nasze dzi-

siejsze wiadomości, podobnie jak liczba pierwiastków w Chemii jest możliwie najmniejsza przy dzisiejszym stanie naszych środków analizy. Ta ostatnia liczba przekracza 80 i rośnie wciąż przez odkrywanie nowych pierwiastków. Nie należy przeto dziwić się, że lista jakości pierwszych jest długa, i że odkrycia fizyków powiększają ją od czasu do czasu przez dołączanie nowej jakości.

Teorie Fizyki mechanicznej chciały być podstawą wyjaśnień świata materialnego w mniemaniu, że po pod pozorami i jakościami, które odkrywa nam doświadczenie, docierają do wewnętrznej budowy ciał i odsłaniają nam ostatni powód ich własności. Rozumie się, że Fizyka nowoczesna nie może mieć takich uroszczeń. Gdy jakąś własność zalicza do rzędu jakości pierwszych, czyni akt skromności: nie chce wcale wyjaśniać, przyznaje się tylko do swej niemocy w wyjaśnianiu. Podstawiając symbol liczbowy zamiast jakości, odkrytej przez doświadczenie, nie dodaje żadnego nowego dowodu do dowodów, dostarczonych przez doświadczenie, podobnie jak mowa, wyrażając pewną ideę, nie zbogaca jej treści. Rachunki, którym poddać można stopień temperatury, nie powiedzą nam o naturze wewnętrznej jakości, którą ten stopień wyobraża, nic więcej ponad to, czego uczy nas uważne badanie naszych wrażeń lub danych spostrzeżenia. Nowa Fizyka matematyczna nie usiłuje bynajmniej wnikać w poznanie jakości cielesnych głębiej popod analizę faktów doświadczenia: słowem jest ona F i z y k a; nie jest zaś ani F i l o z o f i ą p r z y r o d y, ani K o s m o l o g i ą, ani wreszcie gałęzią M e t a f i z y k i.

Jeżeli Fizyka teoretyczna zrzuca się wyjaśnienia świata materialnego, jakąż więc jest jej rola i jej przedmiot? Wzory, które podstawia zamiast praw doświadczalnych, wyrażać będą te prawa w sposób nadzwyczaj dokładny i szczegółowy; wskazania narzędzi pozwolą, w każdym przypadku szczególnym, podstawiać, zamiast liter, występujących w takim wzorze, wartości liczbowe, odpowiadające własnościom badanych ciał konkretnych. Po tem podstawieniu, stosowanie prawa ogólnego do przypadku szczególnego dokonywa się ze ścisłością i drobiazgowością, którą ogranicza jedynie stopień dokładności narzędzi. Wreszcie wzory te zgeścić się dają w małej liczbie zasad bardzo ogólnych, z których wy-

prowadzić je można przy pomocy dedukcyj Analizy i rachunków Algebry. Porządek logiczny naszych wiadomości w Fizyce będzie systemem, którego użytek jest łatwy i pewny: pozwoli on fizykowi znajdować szybko, bez błędu i bez opuszczeń wszystkie prawa, od których zależy rozwiązanie danego zagadnienia.

Zmysły nasze chwytają jedynie powierzchnię rzeczy; powierzchnia ta pokrywa głębię, która bezwzględnie pozostanie zawsze niezbadana. Głębi tej prawdopodobnie nie mogliśmy nawet rozumieć, gdyby jakaś Inteligencja wyższa chciała nam ją odsłonić, pojawiwszy zaś, nie potrafilibyśmy tego wyrazić, gdyby trzeba było ją dać poznać komu innemu. Byłoby to zresztą bez pożytku dla nas, albowiem środki działania, odpowiadające naszym środkom poznawania, nie pozwalają nam zmieniać istoty ciał, jak nie pozwalają jej pojmować. Przedmiotem Fizyki nie jest bynajmniej odkrycie tej istoty; cel jej jest skromniejszy i zarazem praktyczniejszy. Celem tym jest wspomaganie naszej działalności w opanowywaniu świata materii, w urabianiu go, aby dał się przystosowywać do potrzeb naszych; polega on na postępowaniu i subtylizowaniu narzędzi, przy pomocy których kształtujemy ciała, na urozmaicaniu tych narzędzi, aby każde z nich było lepiej przystosowane do swego zadania, wreszcie na klasyfikowaniu ich metodycznym, aby ręka fizyka mogła w każdej chwili, bez prób próżnych i bez zwłoki, uchwycić to, co jest mu w pracy potrzebne.

2. O porównaniu pomiędzy teorią a doświadczeniem; o przemianie przygotowanej.

Trzy różne dziedziny stają równocześnie przed umysłem fizyka.

Pierwszą jest *d z i e d z i n a f a k t ó w d o ś w i a d c z e n i a*; fakty te, wytworzone w świecie zewnętrznym, stwierdzają zmysły fizyka; jego zdolność uogólniania i indukcji daje mu poznać ich prawa.

Drugą jest *d z i e d z i n a t e o r y i*; jest to zespół wielkości i symbolów, których własności algebraiczne zostały określone; następują one w układzie twierdzeń i wzorów, wyprowadzonych logicznie z malej liczby postulatów zasadniczych.

Dziedzina teorii ma za przedmiot dostarczenie opisu symbolicznego, s c h e m a t u, możliwie rozległego, zupełnego i szczegółowego, dziedziny faktów doświadczenia. Aby teoria nie była mową, pozbawioną znaczenia, prostą grą wzorów, trzeba, aby pewien klucz ustanawiał odpowiedniość pomiędzy symbolem a rzeczywistością, pomiędzy znakiem a rzeczą oznaczoną; trzeba wzory teoretyczne przetłumaczyć na fakty doświadczenia. Nauka tego klucza doprowadza do trzeciej dziedziny, której znajomość narzuca się fizykowi, do dziedziny narzędzi i procesów mierzenia.

Ileż to ważnych uwag możnaby przyczynić o stosunkach wzajemnych pomiędzy temi dziedzinami¹⁾! Wskażemy tylko niektóre z nich, wybierając te, które zasadniczo potrzebne są do zrozumienia nowej Mechaniki.

Uwagi te dotyczą praw, przewodniczących rozwojowi teorii ścisłej.

Materyałami, z których ta teoria jest zbudowana, są z jednej strony symbole matematyczne, służące do przedstawiania różnych ilości i różnych jakości świata fizycznego, z drugiej postulatory ogólne, będące zasadami teorii. Z tych materiałów ma ona wznieść budowlę logiczną; winna zatem z całą skrupulatnością strzedz praw, które Logika stawia każdemu rozumowaniu dedukcyjnemu, z drugiej zaś strony strzedz prawideł, które Algebra przepisuje dla wszelkiego działania matematycznego.

Symbole matematyczne, którymi posługuje się teoria, mają znaczenie tylko w warunkach dobrze określonych; definicya tych symboli — to zarazem wskazanie tych warunków. Poza temi warunkami teoria nie czyni nigdy użytku z symbolów. Tak np. przez samą definicyę, temperatura bezwzględna, może być tylko dodatnia, masa ciała niezmienna; we wzorach swych teoria nigdy nie nada temperaturze bezwzględnej wartości zero lub ujemnej, nigdy w rachunkach swych masy nie będzie poczytywała za zmienną.

¹⁾ P. Duhem, Quelques réflexions au sujet de la Physique expérimentale (Rev. des Questions scientifiques 2 série t. III, 1894)

Zasadami teorii są postulaty, t. j. twierdzenia, które wolno jej wysłowić według upodobania, byleby nie zachodziła sprzeczność ani pomiędzy częściami jednego twierdzenia, ani pomiędzy dwoma różnymi twierdzeniami. Lecz raz założywszy te postulaty, teoria strzedz ich winna z zazdrosną ścisłością. Jeżeli naprzykład uczyniła zasadę zachowania energii podstawą swych rozumowań, to musi wyrzec się wszelkiego zdania, będącego z zasadą tą w niezgodzie.

Prawidła te całym ciężarem swej doniosłości narzucają się budującej się teorii fizycznej; jedno tylko uchybienie uczyniłoby teorię niedorzeczną i zniewoliłoby nas do odrzucenia jej. Ale zato one jedne wystarczają. **W biegu swego rozwinięcia** teoria fizykalna jest wolna w wyborze drogi, według upodobania, z zastrzeżeniem unikania jakiegokolwiek sprzeczności logicznej; w szczególności zaś nie ona ma potrzeby liczenia się z faktami doświadczenia. Ale inaczej rzecz się ma, gdy **teoria doszła do całkowitego rozwinięcia**. Gdy budowla dosięgnęła szczytu, wtedy koniecznie porównać należy ogół faktów doświadczenia z ogółem twierdzeń, stanowiących wnioski z tych długich dedukcyj; należy, przy pomocy przyjętych metod mierzenia, upewnić się, że pierwszy zbiór znajduje w drugim swój obraz dostatecznie podobny, symbol dostatecznie dokładny i zupełny. Jeżeli zgoda pomiędzy wynikami teorii a faktami doświadczenia nie ujawnia się z dostatecznym przybliżeniem, teoria może być uważana za zbudowaną logicznie, ale mimo to musi być odrzucona, albowiem sprzeciwia się jej doświadczenie: jest ona fizykalnie fałszywa.

To porównanie wyników teorii z faktami doświadczenia jest niezbędne, bo jedynie kontrola obserwacji może dać teorii wartość fizyczną. Ale kontrola ta dotyczy wyłącznie wyników teorii, albowiem one tylko chcą być obrazem rzeczywistości; nie podlegają jej postulaty, będące punktem wyjścia teorii, ani twierdzenia pośrednie, przez które przechodzimy od postulatów do wyników.

Gdy więc w ciągu dedukcyj, przy pomocy których wysnuwamy teorię, poddajemy wielkości, do których ta teoria się stosuje, działaniom algebraicznym i rachunkowi, nie pytamy, czy te

działania i te rachunki mają z n a c z e n i e f i z y k a l n e; albo mówiąc jaśniej, nie pytamy, czy stosowanie procesów mierzenia pozwoliłoby przetłómaczyć je na język konkretny, oraz czy przetłómaczone, odpowiadałyby one faktom rzeczywistym lub możliwym. Stawiać takie pytania, jest to mieć zupełnie błędne pojęcie o budowie teorii fizycznej.

Dotykamy tu zasady tak ważnej i równocześnie tak subtelnej w pojmowaniu, że niechaj wolno nam będzie zatrzymać się i wyjaśnić myśl naszą na przykładzie.

J. Willard Gibbs badał teoretycznie dysocjację gazu złożonego doskonałego na jego pierwiastki, będące także gazami doskonałymi. Otrzymał on wzór, wyrażający prawo równowagi chemicznej w łonie takiego układu. Wzór ten chcę rozważyć. W tym celu, pozostawiając niezmiennem ciśnienie, któremu podlega mieszanina gazowa, rozważam temperaturę bezwzględną, występującą we wzorze i zmieniam ją od 0 do $+\infty$. Jeżeli temu działaniu matematycznemu zechcemy przypisać znaczenie fizykalne, powstanie moc trudności i zarzutów. Żaden termometr nie może nam wyznaczyć temperatury poniżej pewnej granicy, żaden temperatur dostatecznie wysokich; symbol, który nazywamy t e m p e r a t u r ą b e z w z g l ę d n ą, nie daje się, przy pomocy będących w rozporządzeniu naszym metod mierzenia, przetłómaczyć na coś mającego znaczenie konkretne, o ile jego wartość liczbowa nie pozostaje zawarta pomiędzy pewnem maximum a pewnem minimum. Zresztą, w temperaturach dostatecznie niskich, symbol, który Termodynamika nazywa g a z e m d o s k o n a ł y m, nie jest obrazem nawet przybliżonym żadnego gazu rzeczywistego.

Te trudności i inne, których wyliczenie zajęłoby zbyt wiele czasu, znikają, gdy uwzględnimy powyższe uwagi. W konstrukcyi teorii rozbiór, o którym dopiero co była mowa, stanowi tylko ogniwo pośrednie i nie ma racyi szukania w nim sensu fizykalnego. Dopiero wtedy, gdy rozbiór ten doprowadza do szeregu twierdzeń, które mamy poddać kontroli faktów, pytamy, czy w granicach, w których temperatura bezwzględna daje się przełożyć na wskazówki termometryczne konkretne, w których pojęcie gazu doskonałego urzeczywistniają prawie obserwowane przez nas płyny, pytamy, czy wtedy wyniki naszego rozbioru zgadzają się z wynikami doświadczeń.

Te zasady wyświetlają nam pojęcie, odgrywające rolę zasadniczą w całym rozwoju Fizyki teoretycznej, mianowicie pojęcie przemiany (modyfikacji) przygotowane j.

W schemacie matematycznym, przy pomocy którego Fizyka teoretyczna stara się wyobrazić rzeczywistość, układ materyalny, stanowiący przedmiot badania, przedstawiony jest przez cały orszak wielkości matematycznych, które są miarą różnych elementów ilościowych, albo odpowiadają rozmaitym jakościom. Pomiędzy temi wielkościami są takie, które przez samą definicyę nie nadają się do żadnej zmiany; tak naprzykład masa ciała określonego, ładunek elektryczny przewodnika izolowanego nie mogą się zmieniać. Inne znów, przeciwnie, mogą zmieniać swą wartość. Są takie, których zmiany nie są poddane żadnemu ograniczeniu, wynikającemu z definicyi, tak np. bez sprzeczności z definicyą natężenia namagnesowania, można w punkcie ośrodka magnetycznego nadać temu natężeniu wszelką wielkość i wszelki kierunek. Są i takie, których zmienność jest ograniczona przez pewne warunki połączenia, wypływające z samej definicyi. Warunki te mogą być nierównościami: w łonie masy wody zamarzającej i nie zawierającej żadnej cząstki lodu, masa lodu może zwiększać się, ale nie może się zmniejszać. Warunki te mogą być także równościami: w układzie, zawierającym węglan wapnia, wapno i gaz węglowy, zachodzi stosunek niezmienny pomiędzy masą wapna i masą gazu węglowego, które mogą zjawiać się równocześnie, albo znikać równocześnie.

Nadać wielkościom zmiennym, charakteryzującym stan układu, zmiany nieskończenie małe, na które zezwalają warunki połączenia—jest to nadać układowi materyalnemu przemianę (modyfikacyę) przygotowaną.

Tak więc przemianą przygotowaną jest zmiana nieskończenie mała położenia ciał ruchomych i postaci ciał odkształcalnych; jest nią także nieskończonostkowe podniesienie lub obniżenie temperatury, zmiana nieskończonostkowa wielkości i kierunku magnesowania w każdym punkcie masy żelaza; zmiana nieskończonostkowa rozdziału elektryczności na przewodniku, stopienia elementarnej masy lodu, ścinanie się lub ulatnianie elementu masy wody, nieskończe-

nie mała dysocjacja ciała złożonego, wytworzenie związku nie-
skończenie małych ilości dwóch ciał.

Stosowanie tych przemian przygotowanych jest wybiegiem rozumowania, jest postępowaniem rachunkowym, nie ma więc potrzeby, aby przemiana elementarna miała znaczenie fizykalne. Biorę pod danem ciśnieniem i w temperaturze danej mieszaninę tlenu, wodoru i pary wodnej. Przez te wyrazy mogą rozumieć dwie rzeczy różne. Po pierwsze, rozumieć mogą mieszaninę konkretną trzech płynów rzeczywistych, zamkniętych w pewnym zbiorniku szklanym lub porcelanowym w połączeniu z manometrem, pochodzącym z witryn pracowni, ogrzaną przez palniki gazu lub w piecyku z rewerberem. Po drugie, rozumieć mogą układ schematyczny symbolów i wielkości, obraz układu konkretnego; w tym układzie schematycznym tlen, wodór, para wodna nie są już płynami bez barwy i zapachu, zawartymi w zbiorniku, lecz grupami liter O, H, H²O, którym towarzyszy orszak liczb, przedstawiających ich wagi cząsteczkowe, ich masy, gęstości, temperaturę układu, ciśnienie, któremu on podlega i t. d. Być może, że w łonie układu konkretnego, wziętego w warunkach doświadczenia, które przedstawiają pewne wartości temperatury, ciśnienia, pewien skład mieszaniny gazowej, woda nie daje się rozłożyć żadnym ze znanych sposobów, ale niemniej mam prawo w łonie układu schematycznego zmniejszać wartości liczbowe masy, przypisywanej symbolowi H²O i powiększać w odpowiednim stosunku wartości liczbowe mas, przypisywanych symbolom H i O; działanie to nie ma żadnego znaczenia fizycznego, ale nie sprzeciwia się pojęciom oderwanym symbolów H, O, H²O, definicyjom różnych wielkości charakteryzującym je; jest ono zmianą przygotowaną.

3. Równowaga i ruch.

Pojęcie przemiany (modyfikacji) przygotowanej legło u podstaw Mechaniki L a g r a n g e'a, jak jest u podstaw Nowej Mechaniki; lecz o ileż jest ono ogólniejsze w drugiej niż w pierwszej! Jedyne przemianami przygotowanymi, jakie znała Mechanika L a g r a n-

g e'a, były zmiany postaci i położenia różnych części układu; Mechanika nowa rozważa wiele innych zmian.

I pojęcie przemiany rzeczywistej, którą odtąd nazywać będziemy r u c h e m, doznało takiego samego rozszerzenia, jak pojęcie przemiany przygotowanej.

Jedynym ruchem, znanym w dawnej Mechanice, był ruch, przez który ciało zajmuje różne miejsca w czasach różnych, t. j. r u c h m i e j s c o w y, mówiąc językiem filozofów perypatetyków.

Nowa Mechanika nie ogranicza się na badaniu ruchu miejscowego: bada ona i inne rodzaje ruchów, których różnorodność rozszerza pojęcie ruchu, tak jak je pojmował A r y s t o t e l e s¹⁾. Oczywiście, zajmuje się ona i ruchem miejscowym, zmianami miejsca i postaci; ale zajmuje się także zmianami, skutkiem których rozmaite jakości ciała powiększają się i zmniejszają w swem natężeniu, skutkiem których ciało rozgrzewa się i oziębia, magnesuje lub odmagnesowuje. Zajmuje się również temi zmianami stanu fizycznego, przez której pewien zespół własności jakościowych lub ilościowych znika, aby ustąpić miejsce innemu zespołowi; takimi są np. topnienie lodu, ulatnianie się wody, przekształcanie się fosforu białego na fosfor czerwony. Zmiany te będą dla niej r u c h a m i; Scholastyka byłaby je nazwała r u c h a m i a l t e r a c y j n e m i.

Badanie tych ruchów nie wypełnia wszakże całej dziedziny, którą Nowa Mechanika chce poddać swym prawom; zajmuje się ona także zmianami, w których zespół substancyj znika, a zjawia się inny zespół substancyj; zmianami, które perypatetycy uważaliby za p s u c i e się (korupcyja) i t w o r z e n i e (generacyja), a które my dziś nazywamy r e a k c y a m i c h e m i c z n e m i. Nowa Mechanika nie zadawała się rolą M e c h a n i k i f i z y k a l n e j; jest ona jeszcze M e c h a n i k ą c h e m i c z n ą.

Rozszerzenie pojęcia ruchu wywołuje rozszerzenie pojęcia przeciwnego, t. j. pojęcia r ó w n o w a g i. Układ w równowadze będzie to nie tylko układ, nie doznający żadnej zmiany konfiguracji i położenia; będzie to układ, którego różne części nie ogrze-

¹⁾ Patrz wyżej, I, 1, 2.

wają się i nie oziębiają, układ, w którym rozkłady elektryczny i magnetyczny pozostają niezienne, który nie podlega topieniu, krzepnięciu, ulatnianiu, w którego łonie nie powstaje żadna reakcja chemiczna. Tak więc Mechanika ta będzie nauką nie tylko o równowadze konfiguracji, ale i o równowagach cieplnej, elektrycznej, magnetycznej, chemicznej. Pojęcie tak uogólnione równowagi stanowi przedmiot nowej Statyki.

Takimi są duch i zakres nowej Mechaniki, stanowiącej Naukę o równowadze i ruchu, pojmowanych w szerszym znaczeniu, według Arystotelesa; obecnie szerokimi rysami opiszemy jej rozwój.

4. Zachowanie energii.

Nowa Mechanika opiera się nie na kontemplacji spekulacyjnej i metafizycznej nad istotą rzeczy, lecz na konieczności praktycznej oddziaływania na ciała świata zewnętrznego i modyfikowania ich według potrzeb naszych. Ten jej charakter wykazuje się przedewszystkiem w metodzie, jaką posługuje się, stosując pierwszą swoją zasadę, *Zasadę zachowania energii*.

W łonie danego układu materialnego możemy przez usiłowania nasze wytworzyć pewną przemianę lub pomódz tej przemianie; możemy ciało przesunąć, rzucić je z pewną prędkością, odkształcić, połamać lub potłuc; przez tarcie możemy je ogrzać lub naelektryzować. Przeciwnie, możemy użyć usiłowań naszych, aby przeszkodzić przekształceniu układu; możemy powstrzymać ciało w ruchu, zwolnić jego ruch, przeszkodzić mu w przekształcaniu. Mówimy wtedy, że wykonaliśmy pewną robotę, że uskuteczniłszy pewną pracę. Ogniwa pośrednie psychiczne i fizyologiczne, przez które usiłowania nasze wytworzyły przemianę w świecie zewnętrznym, są więcej lub mniej ukryte przed umysłem naszym, lecz skutek tych usiłowań ujmują jasno nasze zmysły.

Doświadczenie codzienne uczy nas, że działanie nasze własne zastąpić może ciało lub zbiór ciał, nadających się do wytworzenia lub podtrzymania przemiany, którą wytwarzamy lub

której pomagamy, do zatamowania przemiany, którą tamujemy sami. Tak więc w ciągu wieków człowiek własne działanie zastępował działaniem innych ludzi, potem pracą zwierząt, wreszcie pracą machin nieożywionych, coraz bardziej skomplikowanych. Zamiast kruszyć samemu ziarno tłuczkiem w młódcierzu, kazał niewolnikom obracać kamień młyński lub zaprzęgał do niego zwierzęta, później zaczął używać wiatraków lub młynów wodnych. Zamiast podnosić ciężary siłą ramion, zaprzęgał woły do sznura, nawiniętego na wał, później począł używać kołowrotu parowego lub hydraulicznego. Zamiast rzucać pociski ręką, spożytkowywał napięcie cięciwy lub wybuch prochu.

Pierwszym przedmiotem Mechaniki jest właśnie poznanie, jakie to różne ciała mogą zastąpić naszą czynność osobistą dla pobudzenia lub przeszkodzenia przemianie; jakie maszyny mogą zastąpić robotników przy wykonywaniu pewnej pracy. Pracę, której dokonalibyśmy byli sami, działając na układ ulegający przekształceniu, uważamy jako dokonaną przez ciało lub zespół ciał, którymi zastąpiliśmy siebie samych lub innych ludzi.

To pojęcie pracy, wykonanej przez ciała obce układowi w czasie, gdy układ ten doznaje pewnej przemiany, rozciągamy na przypadek, w którym przemiana, jakiej uległ układ, jest tej natury, że nasze działanie osobiste nie mogłoby ani jej pomódz, ani przeszkodzić, t. j. na przypadek reakcji chemicznej. Praca, dokonana przez te ciała obce, ocenia się jakby praca, której dokonałby robotnik, inaczej niż my zbudowany i zdolny pomódz lub przeszkodzić przekształceniu układu, w tym stopniu, jak to czynią ciała obce.

Na zasadzie powyższego powiedzieć możemy, że gdy układ materialny przekształca się w obecności ciał obcych, uważamy te ciała jako biorące udział w przekształceniu, wywołujące to przekształcenie, wspierające lub tamujące je; ten udział nazywamy pracą, wykonaną w czasie przemiany układu przez ciała obce układowi.

Jaka jest natura tego udziału i w jaki dokonywa się sposób? Jest to problemat trudny, którego rozwiązanie zdaje się przekraczać granice rozumu ludzkiego. Ale problemat ten o z w i ą z k u s u b s t a n c y j jest przedmiotem Metafizyki, nie zaś Fizyki.

Fizyka nie kusi się bynajmniej o wyjaśnienie zagadnienia; skromniejsza w swych dążeniach, usiłuje jedynie stworzyć wyrażenie matematyczne, mające być symbolem tego udziału, tej pracy; wyrażenie to buduje ona z elementów, zaczerpniętych, ze skutku wytwarzanego przez ciała obce, bo jeżeli natura działania jest ciemna, co skutek za to jest jasny i uchwytny dla obserwacyi.

W celu zbudowania symbolu matematycznego pracy, którą ciała obce układowi wykonywają w ciągu przemiany tego układu, nie można stosować rozumowania. Z jakich więc zasad wyjść mamy?

Poddamy się przewodnictwu tego, co w znaczeniu etymologicznem słowa nazwać można indukcją; zaznaczymy cechy, które najnaturalniej przyznać można temu pojęciu pracy i postaramy się nadać symbolowi matematycznemu cechy analogiczne. Nie wchodząc w szczegóły tych indukcji ¹⁾, wskażemy tylko stadya zasadnicze.

Droga ta prowadzi nas najprzód do tego, że pracę, której ciała obce układowi dokonywają w ciągu przemiany układu, przedstawiamy przez przyrost, jakiego w przemianie tej doznaje pewna wielkość bezwzględnie niezależna od natury ciał obcych; wielkością tą jest energia cała układu.

Energia całkowita zależy od elementów dwojakiego rodzaju, obu właściwych przekształcającemu się układowi i nie pozostających w żadnym związku z ciałami obcymi, wpływającymi na przekształcenie.

Elementami, zachodzącymi w energii całkowitej, są po pierwsze: liczby mierzące własności ilościowe lub odpowiadające własnościom jakościowym; zespół tych liczb określa to, co nazywamy stanem układu.

Elementami, zachodzącymi w energii całkowitej, są powtórnie: wielkość i kierunek prędkości, ożywiającej każdy punkt układu

¹⁾ Szczegóły ten znaleźć może czytelnik w naszej pracy: „Commentaire aux principes de la Thermodynamique“, część I, rozdz. 1 (Journal de Mathématiques pures et appliquées (6), t. VIII, 1892).

w jego ruchu miejscowym; elementy te wyznaczają ruch miejscowy układu w chwili uważanej.

Na podstawie bardzo prostego przypuszczenia rozdzielamy pracę, wykonaną w ciągu przemiany, na dwa wyrazy. Jeden z nich zależy od zmiany w stanie układu, nie zależy zaś od ruchu miejscowego, ani od zmiany, jakiego ruch ten doznaje. Wyraz drugi zależy od ruchu miejscowego i jego zmiany, ale nie zależy wcale od stanu układu i zmian tegoż. Odpowiednio do tego, i energia całkowita rozdziela się także na dwa wyrazy: jeden zależy jedynie od stanu układu, a nie zależy od jego ruchu miejscowego; drugi zależy tylko od ruchu miejscowego i nie zależy wcale od stanu. Pierwszy wyraz winien słusznie mieć nazwę energii stanu; nazywamy go energią wewnętrzną lub potencjalną; wyraz drugi nazywa się energią kinetyczną lub aktualną.

W każdym z rozdziałów Fizyki wyznaczamy za pomocą szczególnych hipotez postać, jaką przypisać należy energii wewnętrznej układów, w tym rozdziale rozważanych; forma zaś energii kinetycznej, przeciwnie, nadaje się do wyznaczenia ogólnego.

Przedewszystkiem łatwo widzieć, jaka jest suma energii kinetycznych każdego z elementów materialnych nieskończenie małych, na które układ w myśli podzielić się daje; a ta uwaga upraszcza znakomicie wyznaczenie.

Weźmy dwa elementy materialne różne i ze stanu spoczynku rzućmy je z jednakową prędkością; wykonaliśmy w ogólności dwie prace różne. Jest rzeczą naturalną pomyśleć, że stosunek tych dwóch prac jest niezależny od wspólnej prędkości, nadanej dwóm elementom; stosunek ten, zależny jedynie od natury tych dwóch elementów, nazywa się stosunkiem mas elementów. Masa elementu materialnego jest więc proporcjonalna do pracy, którą wykonać trzeba, aby pchnąć go z określoną prędkością.

Wprowadziwszy tym sposobem w formie bardzo naturalnej pojęcie masy, widzimy, że energia kinetyczna elementu jest iloczynem masy tego elementu przez funkcję jego prędkości; funkcja ta jest jedna i ta sama dla wszystkich pomyśleć się dających elementów materialnych. Wyzna-

czenie tej funkcji pozwoli nam otrzymać wyrażenie energii kinetycznej.

Możnaby próbować — i byłaby to hipoteza najprostsza — przyjęcia, że ta funkcja jest wprost proporcjonalna do prędkości; próba ta doprowadziłaby do zbudowania Mechaniki, która w swych rysach istotnych byłaby Dynamiką kartezyańską. Pamiętny upadek tej Dynamiki ostrzega, byśmy na tę drogę nie wstępowali. Jest rzeczą naturalną tedy zwrócić się do pomysłu *Leibniza* i uważać funkcję niewiadomą, jako proporcjonalną do kwadratu prędkości. Energia kinetyczna, całkowicie wyznaczona, staje się tożsamą z tem, co dawna Mechanika nazywała siłą żywą.

Weźmy teraz układ odosobniony; nie istnieje wtedy żadne ciało obce układowi, a więc w każdej przemianie tego układu praca, wykonana przez ciała obce, jest zerem; innymi słowy: w każdej przemianie układu odosobnionego energia całkowita układu zachowuje wartość niezmienną. Otóż jesteśmy już w posiadaniu pierwszej zasady nowej Mechaniki, mianowicie zasady zachowania energii.

Wysłowienie tej zasady razi tych, którzy w pewnikach Mechaniki chcą widzieć prawa doświadczalne uogólnione, którzy pierwszym postulatом chcą przypisywać znaczenie fizyczne; w Przyrodzie bowiem nie istnieje żaden układ odosobniony. Nasz zarzut taki nie niepokoi. My wiemy, że zasady Fizyki teoretycznej są tylko prawidłami; przy ich pomocy nadajemy określoną formę schematom matematycznym, które chcemy zbudować. Nie ma wcale konieczności, aby postulaty te miały znaczenie fizyczne; jedynie ostatnie ich wyniki zgadzać się winny z faktami. Otóż, o ile nie podejmujemy żadnego porównania ze światem zewnętrznym, o ile pozostajemy w dziedzinie schematu matematycznego oderwanego, możemy pojąć doskonale układ, zawierający wszystkie ciała badane, poza którym nie istnieje żadne ciało obce, t. j. układ odosobniony w przestrzeni czystej.

5. Praca i ilość ciepła.

Aby wszakże nasz schemat matematyczny nie pozostał bezpłodnym, musimy go rozszerzyć i nie ograniczać go przez rozważanie jedynie układu odosobnionego.

Jeżeli weźmiemy, z jednej strony, układ materyalny, którego przemiany badać chcemy, z drugiej zaś strony wszystkie ciała, których obecność zdaje się być nieobojętna ze względu na te przemiany, możemy uważać zespół tych dwóch układów wzajemnie niezależnych, jako tworzący jeden układ odosobniony w przestrzeni; do tego układu odosobnionego możemy zastosować zasadę zachowania energii.

Siła żywa układu zespolonego jest sumą sił żywych składających go układów niezależnych; lecz energia wewnętrzna układu zespolonego nie jest równa sumie energii wewnętrznych, jakie miałyby oba układy niezależne, gdyby każdy z nich był odosobniony w przestrzeni: jest ona równa tej sumie powiększonej o wyraz, który nazwać można energią wzajemną dwóch układów.

Istnienie tej energii wzajemnej znaczy, że własności każdego z dwóch układów, postawionego przy drugim, nie są te same jak wtedy, gdyby ten układ istniał sam w tymże stanie; że obecność każdego z nich nie jest obojętna dla drugiego.

Ta energia wzajemna zależy od stanu i od położenia pierwszego układu, t. j. od zmiennych niezależnych, α, β, \dots , ten stan i to położenie określających; zależy także od stanu i położenia drugiego układu, t. j. od zmiennych niezależnych α', β', \dots , określających ten stan i to położenie.

Wyobraźmy sobie, że przemiana przygotowana zachodzi w zespole naszych dwóch układów i tak, że zmienne α, β, \dots otrzymują przyrosty nieskończonostkowe $\delta\alpha, \delta\beta, \dots$, zmienne zaś α', β', \dots przyrosty nieskończonostkowe $\delta\alpha', \delta\beta', \dots$. Energia wzajemna dwu układów doznaje zmniejszenia, będącego sumą dwu wyrazów; pierwszy z nich jest postacią $A\delta\alpha + B\delta\beta + \dots$, drugi postaci $A'\delta\alpha' + B'\delta\beta' + \dots$; wielkości $A, B, \dots, A', B', \dots$ zależą od stanu naszych dwóch układów i ich położenia wzajemnego.

Suma $A\delta a + B\delta a + \dots$ jest tem, co nazywamy pracą przygotowaną działań, wywartych przez ciała zewnętrzne na układ badany; podobnież suma $A''\delta a' + B'\delta\beta' + \dots$ jest pracą przygotowaną działań, które układ badany wywiera na ciała zewnętrzne.

Zatrzymajmy się na chwilę nad temi pojęciami, odgrywającymi główną rolę w rozwoju nowej Mechaniki.

Układy, któremi zajmowała się dawna Mechanika, są całkowicie określone przez ich postać i położenie; zmienne, określające stan tych układów, są wyłącznie geometryczne. Zastosujmy poprzednie wyrażenie do takich układów: suma $A\delta a + B\delta\beta + \dots$ stanie się, podług Mechaniki Lagrange'a, pracą przygotowaną wszystkich sił zewnętrznych, działających na układ; A będzie siłą zewnętrzną uogólnioną, odpowiadającą zmiennej niezależnej a ; jeżeli a przedstawia długość, A będzie siłą w znaczeniu elementarnem słowa; jeżeli a przedstawia kąt, A będzie momentem siły i t. d.

Własności układów, któremi zajmujemy się obecnie, nie dają się całkowicie sprowadzić do figury i położenia różnych ich części; pomiędzy zmiennymi, określającymi stan tych układów, są takie, które nie przedstawiają ani długości, ani kątów, ani pól, ani objętości, ani nic geometrycznego, lecz jakości fizyczne: temperatury, ładunki elektryczne, natężenia namagnesowania. Jeżeli a przedstawia taką zmienną, A nie będzie już siłą uogólnioną w znaczeniu, jakie jej nadaje Mechanika Lagrange'a; będzie to wielkość zupełnie innej natury, mająca z siłą uogólnioną tę tylko cechę wspólną, że jej iloczyn przez przyrost nieskończonostkowy zmiennej a przedstawia pracę. Jeżeli na przykład a jest momentem magnetycznym, A będzie w kierunku tego momentu składową pola magnetycznego zewnętrznego. O takiej wielkości mówić będziemy, że przedstawia ona wplyw zewnętrzny, odnoszący się do zmiennej fizycznej a , a te siły uogólnione i wpływy obejmujemy nazwą wspólną działań (akcyj).

Tu, podobnie jak i w Mechanice Lagrange'a, działania ciał obcych określonych na układ, nie są całkowicie oznaczone; zmieniają się one, gdy zmieniamy grupę zmiennych, służących do przedstawienia stanu układu; tylko praca, którą działania te wyko-

nywają w danej przemianie przygotowanej, zachowuje wartość niezmienną.

Przemiana przygotowana, która dostarczyła już nam definitywnych działań zewnętrznych, wywieranych na układ, daje nam jeszcze inne pojęcie zasadnicze, mianowicie ilości ciepła, które układ wywiązuje w takiej przemianie. Dochodzimy do tego nowego pojęcia, stosując zasadę zachowania energii do naszej przemiany przygotowanej. Co należy przez to rozumieć?

W wysłowieniu zasady zastosowania energii występuje przyrost siły żywej układu; przyrost ten ma znaczenie tylko w przemianie rzeczywistej; przemiana przygotowana nie dokonywa się w czasie, nie sprawia żadnej zmiany w siłę żywej układu; znaczy to, że w swej formie pierwotnej zasada zachowania energii nie stosuje się do przemian przygotowanych. Ale wolno nam tak uogólnić tę zasadę, aby stosowała się do tych przemian, a swobodę naszą ogranicza jedyny warunek, mianowicie: nowa zasada powinna nam odtworzyć pierwotną, skoro przemiana przygotowana stanie się rzeczywistą.

Otóż wiemy, że w przemianie rzeczywistej praca sił bezwładności równa się zmniejszeniu siły żywej. Jeżeli więc weźmiemy jakieś twierdzenie, odnoszące się tylko do przemian rzeczywistych, bo zawierające wyrazy: zmniejszenie siły żywej; jeżeli wyrazy te zastąpimy wyrazami praca sił bezwładności, otrzymamy nowe wysłowienie, dające się stosować do przemian przygotowanych i obejmujące w sobie wysłowienie pierwotne jako przypadek szczególny.

Za pomocą tego postępowania rozszerzamy zasadę zachowania energii do przemian przygotowanych i dochodzimy do twierdzenia następującego. W każdej przemianie rzeczywistej lub przygotowanej układu odosobnionego praca sił bezwładności jest równa przyrostowi energii wewnętrznej.

Weźmy nasz układ odosobniony, utworzony przez połączenie dwóch układów niezależnych i obliczmy dla przemiany przygotowanej, nadanej temu układowi, sumę pracy sił bezwładności i zmniejszenia energii wewnętrznej, sumę, której wartość

winna być zerem. Suma ta składać się będzie z sześciu wyrazów, z których trzy pierwsze są:

1-o, praca sił bezwładności, przyczepionych do układu pierwszego;

2-o, praca działań, wywartych przez drugi układ na pierwszy;

3-o, zmniejszenie energii wewnętrznej układu pierwszego.

Trzy drugie wyrazy analogiczne do trzech pierwszych otrzymujemy, przedstawiając role pierwszego i drugiego układu.

Suma tych sześciu wyrazów jest zerem, lecz w ogólności nie jest niem ani suma trzech pierwszych, ani suma trzech ostatnich.

Suma trzech pierwszych jest, na mocy definicji, ilością ciepła, które wywiązuje układ pierwszy w biegu rozważanej przemiany; suma trzech ostatnich jest ilością ciepła, wywiązanego w tejże przemianie przez układ drugi; te dwie wielkości są równe i znaków przeciwnych.

Według tej definicji, gdy układ doznaje jakiegokolwiek przemiany, rzeczywistej lub przygotowanej, praca przygotowana działań zewnętrznych, zwiększona o pracę przygotowaną sił bezwładności, daje sumę równą przyrostowi energii wewnętrznej, zwiększonej o ilość ciepła, które ten układ wywiązuje. Jeżeli mamy do czynienia z przemianą rzeczywistą, twierdzenie to zamienia się na następujące: Przyrost energii całkowitej układu równa się nadmiarowi pracy działań zewnętrznych ponad ilość ciepła, wywiązanego przez układ.

Twierdzenie to jest dokładnem wysłowieniem prawa równoważności pracy i ilości ciepła ¹⁾. Prawo to występuje tu jako wniosek z zasady zachowania energii, oraz definicji pracy i ilości ciepła.

To określenie czysto algebraiczne ilości ciepła zrazi, być może, niejednego, który dziwić się będzie, że używamy słów:

¹⁾ Patrz wyżej III, Teorye mechaniczne ciepła i elektryczności, rozdz. 2 Teorya mechaniczna ciepła.

ilość ciepła, oznaczając przez nie sumę wyrazów, tworzeniu których pojęcia ciepła i zimna są całkiem obce. Zdziwienie to nie jest bezzasadne, albowiem nazwa: ilość ciepła, powszechnie używana, jest źle dobrana i może sprowadzać przykre zamieszanie; stwierdza to historia Fizyki.

Lecz jeżeli definicya poprzednia razi brakiem jakiegobądź związku logicznego pomiędzy pojęciem ilości ciepła, jak je rozumie fizyk, a pojęciem, które dają nam nasze dostrzeżenia, wyraża mowa zwykła, gdy używa wyrazu ciepło, to bynajmniej nie ta definicya zerwała ten związek logiczny; zerwała je w samych początkach Fizyka doświadczalna w dniu, w którym akademicy florenccy stwierdzili, że ogrzewając lód, topimy go bez ogrzewania. Od owego dnia datuje rozróżnienie pomiędzy temperaturą, stanowiącą przekład na język Fizyki pojęć empirycznych ciepła i zimna, a ilością ciepła; badania kalorymetryczne Blacka, Crawforda, Lavoisiera i Laplace'a, oraz pojęcie ciepła utajonego wyłobiły tę różnicę, która z każdym dniem stawała się głębsza.

Prawdą jest tedy, że definicya ilości ciepła nie zapożycza niczego od percepcyi ciepła i zimna; ale z drugiej strony byłoby niedopuszczalne, by tak określona wielkość pozostawała bez żadnego związku z tem, co Fizycy mierzą kalorymetrem. Związek ten, na szczęście, daje się ustanowić bez trudności¹⁾: zasady, któreśmy wyłożyli, stwierdzają, że kalorymetr mierzy istotnie to, co nazwaliśmy ilością ciepła; definicya tej ilości czyni więc zadość prawidłu Rankine'a; jej wnioskiem prawie bezpośrednim jest metoda mierzenia tak określonej wielkości.

Dwa pojęcia pracy i ilości ciepła są w ciągłym użytku w nowej Mechanice, której rozwój kreślimy; można więc słusznie nazwać tę Mechanikę Termodynamiką; można też wraz z Rankinem nadać jej nazwę Energetyki, albowiem pojęcie energii jest źródłem, z którego wypływa. Nie będziemy tu

¹⁾ Ustanowienie tego związku i rozwinięcie matematyczne tego rozdziału znajduje się w naszej pracy: „Commentaire aux principes de la Thermodynamique“, część I, rozdz. III (Journ. de Math. pures et appliq (4), t. VIII, 1892).

rozstrzygali na korzyść zwolenników tej lub tamtej nazwy: „Simus faciles in verbis“ mawiał Gauss.

6. Przemiana odwracalna.

Dotąd mówiliśmy o własnościach rozważanych układów, nie czyniąc pomiędzy nimi żadnego rozróżnienia; wszystkie one odgrywały jednakową rolę; litery α, β, \dots , które oznaczają wielkości zmienne, mające własności te przedstawiać, mogły być zarówno długościami jak i kątami, temperaturą jak i natężeniem namagnesowania.

Jest liczba, symbol jakości fizycznej, temperatura który odtąd odgrywać ma rolę odrębną i całkiem wyjątkową; rolę tę nadała mu zasada, którą odkrył Sadi-Carnot, zmodyfikował zaś i udoskonalił Clausius, jest to jedna z podstaw nowej Mechaniki.

W wysłowieniu tej zasady posługiwać się będziemy dziwnym wyrażeniem: *przemiana odwracalna*; wyrażenie to oznacza jedno z najbardziej subtelnych pojęć Termodynamiki. Przede wszystkim więc zajmiemy się rozbiorem tego pojęcia.

Przekształcenia, zachodzące rzeczywiście w świecie fizycznym, nie są nigdy odwracalne.

Oto gaz, zawarty w rurze, zamkniętej tłokiem, na którym znajduje się ciężar. Jeżeli ten ciężar jest dość znaczny, tłok zagłębi się, gaz zgęści; działania zewnętrzne, które tu przedstawia ciężar cisnący na tłok, wykonają pracę dodatnią; wywiąże się pewna ilość ciepła. Jeżeli przeciwnie ciężar, cisnący na tłok, jest za słaby, tłok podniesie się, gaz się rozszerzy, praca sił zewnętrznych będzie ujemna, układ pochłonie ciepło. Przy odpowiednim urządzeniu można otrzymać albo pierwszą grupę zjawisk, albo też drugą. Lecząc usiłować obciążyć tłok tak, aby on mógł równie dobrze opadać jak i podnosić się, aby gaz mógł już to zgęszczać się, już to rozszerzać; aby odbywało się dowolnie już to wywiązywanie, już to pochłanianie ciepła, jest to oczywiście usiłowanie chimeryczne. Układ dany, umieszczony w warunkach danych, przekształca się koniecznie w zwrocie określonym; nie przekształca się

zaś dowolnie w zwrocie jednym jak i w przeciwnym; rozumiana dosłownie, przemiana odwracalna jest niedorzecznością,

Słowa te atoli mogą pozyskać znaczenie jasne, ale przez wybieg następujący:

Umieszczając odpowiedni ciężar na tłoku cisnącym na gaz, możemy sprawić, że tłok się pogłębi; przy mniejszym nieco ładunku tłok może się jeszcze pogłębić; aby tłok zaczął się obniżać, potrzeba, aby obciążenie było nieco większe od tego ciężaru, który gaz mógłby utrzymać w równowadze. Podobnie, aby tłok mógł się podnieść, wystarcza, aby unosił na sobie ciężar nieco mniejszy niż ten, przy którym gaz znajduje się w równowadze. Możemy tedy wziąć dwa ciężary, różniące się od siebie tak mało, jak się podoba, i obrąć je w ten sposób, że jeden z nich zmuszać będzie tłok do opadania, drugi pozwoli mu podnosić się; pomiędzy temi dwoma ciężarami znajduje się ciężar, utrzymujący tłok w równowadze.

Układ dany, w otoczeniu danem, podlega przemianie, której zwrot jest ściśle określony; ale można wybrać okoliczności zewnętrzne w ten sposób, aby nieskończonostkowa zmiana tych warunków była dostateczna do odwrócenia zwrotu zmiany stanu, przez nie wyznaczonego; potrzeba na to, aby ciała, któremi układ jest otoczony, różniły się nieskończenie mało od tych, które utrzymują go w równowadze.

Czemże więc jest ostatecznie przemiana odwracalna układu? Jest to przemiana czysto idealna; szereg ciągły stanów równowagi, przez które układ przechodzi kolejno w umyśle fizyka; ten szereg stanów równowagi jest linią graniczną wspólną dwóm szeregom przemian rzeczywistych, z których jedne odbywają się w jednym zwrocie, inne w zwrocie przeciwnym.

Nie wszystkie atoli układy abstrakcyjne, do których ucieka się Fizyka w celu przedstawienia świata materii bezwładnej, nadają się do przemian odwracalnych.

Niść metaliczna, napięta przez ciężar, znajduje się w równowadze; powiększamy ciężar napinający, niść przedłuża się z pewną szybkością i dochodzi do nowego stanu równowagi; nowe związk-

szczenie obciążenia wytwarza nowe wydłużenie i tak dalej. Na tablicy zapiszmy szereg użytych obciążeń i tuż obok zapiszmy długości, jakich nabywała nić w równowadze pod wpływem każdorazowego obciążenia.

Rozpocznijmy ten szereg doświadczeń, poczynając od tego samego stanu początkowego, ale używając w każdym doświadczeniu obciążenia mniejszego, niż w przypadku poprzedzającym. Otrzymamy nową tablicę, w której występować będą liczniejsze i bliższe sobie wzajemnie niż na pierwszej tablicy, stany równowagi.

Podajmy trzecią, czwartą seryę z obciążeniami wciąż mniejszemi; otrzymane tablice dążyć będą do pewnej tablicy granicznej. Tablica ta, gdyby ją można było utworzyć, przedstawiałaby szereg obciążeń, rosnących w sposób ciągły, i obok niego szereg długości, rosnących również sposobem ciągłym; każda z tych długości byłaby długością nici, utrzymującej się w równowadze przy obciążeniu, obocznie napisanem. Otrzymalibyśmy tym sposobem szereg ciągły stanów równowagi i ten szereg ciągły, przebieżony w zwrocie rosnących długości, byłby formą graniczną szeregu doświadczeń, w ciągu których nić wydłużała się rzeczywiście.

Weźmy teraz nić w ostatnim ze stanów równowagi, do którego doprowadziły ją próby poprzednie i zmniejszając stopniowo obciążenie, pozwólmy jej kurczyć się, póki nie dojdzie do długości pierwotnej. Im słabsze będą kolejne zmniejszania obciążenia, tem powolniejsze będzie kurczenie się nici. Postępując tak samo jak przy wydłużeniach, będziemy mogli utworzyć szereg ciągły stanów równowagi nici i szereg ten, przebieżony w zwrocie zmniejszających się długości, przedstawiać będzie formę graniczną szeregu rzeczywistych kurczeń.

Porównajmy powstałe tym sposobem dwa szeregi równowagi. Nie są one zupełnie identyczne: jednemu i temu samemu obciążeniu odpowiada w drugim szeregu długość nici większa niż w pierwszym; wyrażamy to, mówiąc, że wyciąganie udzieliło nici trwałego wydłużenia. Nasze dwa szeregi przemian rzeczywistych, o różnych zwrotach, wyciągania i kurczenia się, nie mają wspólnej linii granicznej; nić, która doznaje wydłużeń trwałych, nie może podlegać przemianie odwracalnej.

Mechanika, której rozwój przedstawić chcemy, czyni ciągle użytek z pojęcia przemiany odwracalnej; bada ona wyłącznie układy, dla których wszelki szereg ciągły stanów równowagi jest przemianą odwracalną; przez to przestaje być ona Mechaniką zupełnie ogólną, a staje się badaniem pewniejszej, lubo rozległej, kategorii układów materialnych; poza dziedziną, którą chce poddać pod swoje prawa, pozostawia ona jeszcze wiele ciał, mianowicie te, które mogą doznawać przemian trwałych. Jeżeli w dalszym ciągu będziemy mogli zbudować Mechanikę, obejmującą w sobie twierdzenia o równowadze i ruchu takich ciał¹⁾, będzie to uogólnienie Mechaniki ciaśniejszej, o której teraz mówimy, przez założenie hipotez i zasad odmiennych od tych, które teraz wypowiadamy.

Jakiż może być użytek tego pojęcia czysto idealnego i fikcyjnego, które wyrażają słowa „przemiana odwracalna“ w tej ograniczonej dziedzinie, w której się zamykamy. Co oznacza ściśle frazes: takie a takie twierdzenie jest tylko prawdziwe dla przemiany odwracalnej? Znaczenie tego frazesu jest następujące: właściwie mówiąc, twierdzenie, o którym mowa, nigdy nie jest prawdziwe; nie istnieje żadna przemiana rzeczywista, do której możnaby ją stosować z całą ścisłością; ale błąd, popełniony przy stosowaniu tego twierdzenia do zmiany stanu, jest większy lub mniejszy; jest tem mniejszy, im mniejsze jest zakłócenie warunków zewnętrznych zmieniającego się układu, potrzebne do odwrócenia zwrotu tej zmiany; twierdzenie w mowie będące jest tem mniej odległe od prawdy, im działania, którym podlega układ, są bliższe tych działań, przy których pozostawałby w równowadze.

Zasada Carnota i Clausiusa jest prawdziwa tylko dla przemian odwracalnych; wnioski, jakie wyprowadzamy z tej zasady, własności, które pozwala nam odkryć w układzie, nie są nigdy ściśle dokładne, jeżeli układ istotnie przekształca się; lecz im bardziej znikomemi będą przyczyny, sprawiające to przekształcenie,

¹⁾ O tej Mechanice będzie mowa później.

tem wnioski te będą bliższe prawdy, a te własności tem mniej różnić się będą od własności, które odkrywa nam doświadczenie; do układu zaś w równowadze twierdzenia te będą się stosowały dokładniej; a własności te należeć doń będą w całej pełni. Pojęcie przemiany odwracalnej służyć może do zbudowania Statyki.

7. Zasada Carnota i temperatura bezwzględna.

Jeżeli zasadę zachowania energii można odnieść do instynktu, który zmusza nas do oddziaływania na świat zewnętrzny i modyfikowania go odpowiednio do naszych potrzeb, to a fortiori stosuje się do zasady Sadi Carnota. Jest faktem historycznym, że myśl tej zasady nasunęło jej autorowi rozmyślanie nad maszynami ogniowymi i pragnienie podania zupełnie ogólnej tych maszyn teorii. Rozmyślanie to w szczególności doprowadziło Sadi Carnota do obmyślenia szeregu działań, które dziś nazywamy cyklem Carnota.

Układ opisuje cykl, gdy podlega szeregowi działań, które doprowadzają go napowrót do stanu początkowego; gdy wszystkie te działania są odwracalne, cykl sam jest odwracalny. W biegu cyklu układ może już to wywiązywać, już to pochłaniać ciepło. Załóżmy, że te wymiany ciepła pomiędzy układem i ciałami obcymi zachodzą jedynie w dwóch okolicznościach: po pierwsze, gdy wszystkie ciała składające układ są doprowadzone do pewnej temperatury θ ; powtórnie, gdy też ciała są doprowadzone do innej temperatury θ' , wyższej od θ . Cykl będzie wtedy cyklem Carnota, opisanym pomiędzy dwiema temperaturami granicznymi θ i θ' .

Pomijamy tu hipotezy, postawione przez Sadi Carnota; nie zgadzały się one z zasadą zachowania energii; a dla tego to Clausius, później Thomson zmodyfikowali je i postawili dwa postulaty, dziś powszechnie przyjęte.

Postulat Clausiusa można wypowiedzieć tak: Aby układ, opisujący cykl odwracalny Carnota, po-

chłaniał ciepło wtedy, gdy został doprowadzony do niższej z dwóch temperatur, potrzeba, aby działania zewnętrzne, którym podlega w ciągu cyklu, dawały pracę całkowitą dodatnią.

Postulat Thomsona ma formę podobną i brzmi: Jeżeli działanie zewnętrzne, pod wpływem których układ pozostaje, wykonywają pracę całkowitą ujemną w ciągu odwracalnego cyklu Carnota, wtedy układ koniecznie wywiązuje ciepło w czasie pozostawania w niższej z dwóch temperatur granicznych,

Z tych dwóch postulatów wyprowadzamy pewien zbiór wniosków, które stanowią razem twierdzenie Carnota¹⁾.

Gdy układ opisuje odwracalny cykl Carnota, wtedy ilość ciepła wywiązanego w czasie, gdy temperatura osiąga jednej z dwóch temperatur granicznych, jest znaku przeciwnego z ilością ciepła, którą wywiązuje w czasie, gdy dochodzi do drugiej temperatury granicznej: jeżeli w pierwszym razie wywiązuje ciepło, to w drugim pochłania je, i odwrotnie. Wartość bezwzględna ilości ciepła, ujawniających się w tym procesie, są w pewnym stosunku do siebie; wielkość tego stosunku nie zależy ani od natury ciał, opisujących cykl Carnota, ani od formy szczególnej przemian cykl ten składających, ani, rozumie się, od skali termometrycznej, na której odczytujemy temperatury θ i θ' ; zależy wyłącznie od dwóch natężeń ciepła, którym na podstawie wyboru właściwego termometru, odpowiadają liczby θ i θ' . Jeżeli zmienimy termometr, wartości liczbowe temperatur, odpowiadających tym samym natężeniom ciepła, zmieniają się, lecz wartość stosunku pozostaje niezmienna.

Innymi słowy: do każdego natężenia ciepła można dobrać odpowiednią liczbę; liczba ta jest zawsze dodatnia; jest ona tem większa, im większe jest natężenie ilości ciepła, której odpowiada; pozwala nam tę liczbę tę przyjąć za temperaturę i szereg liczb tak

¹⁾ Definicję tę podaje większość traktatów Fizyki; myśmy nadali jej formę, jak sądzę, zupełnie ścisłą w naszej książce „*Traité élémentaire de Mécanique chimique fondée sur la Thermodynamique*“, Livre I, chap III, t. I, p. 56 Paryż 1897.

określonych uważać za skalę termometryczną. Odpowiedniość pomiędzy każdą z tych liczb i natężeniem ciepła nie jest związana z wyborem specjalnego termometru, tak że temperatura w ten sposób określona zasługuje na nazwę temperatury bezwzględnej. Stosując tę nazwę, możemy poprzednie twierdzenie wypowiedzieć w formie następującej: Gdy układ opisuje odwracalny cykl Carnota, wartości bezwzględne ilości ciepła, wywiązanego i pochłoniętego w czasie, gdy osiąga jednego lub drugiego z granicznych natężeń ciepła, pozostają do siebie w stosunku temperatur bezwzględnych, tym natężeniom ciepła odpowiadających.

Jeszcze jedno twierdzenie pozwala nam wykończyć to pojęcie tak zasadnicze temperatury bezwzględnej. Wymaga ono rozważania tych płynów, które fizycy nazywają gazami doskonałymi i określają przy pomocy dwóch cech następujących: ścisłości, która w temperaturze stałej podlega prawu Mariotte'a, oraz energii wewnętrznej, która pozostaje stała, gdy gaz pozostaje jednakowo ciepły. Istotnie, z twierdzenia Carnota wypływa wniosek następujący: Za temperaturę bezwzględną, przyjęć można temperaturę termometru gazowego o podziałce stustopniowej, powiększoną o odwrotność współczynnika rozszerzalności tego gazu.

To twierdzenie uzupełnia definicyę temperatury bezwzględnej, zgodnie z regułą, podaną przez Rankine'a; albowiem daje zarys postępowania, które pozwala nam mierzyć temperaturę bezwzględną. Nie przez to oczywiście, że istnieje w Przyrodzie gaz doskonały, który możnaby wprowadzić do zbiornika, aby z niego zrobić termometr. Albowiem gaz doskonały jest pojęciem, zbudowanym całkowicie w umyśle naszym; nie ma on w sobie więcej rzeczywistości konkretnej, niż je posiada ciało stałe doskonale nieodkształcalne, o jakim mówi Mechanika elementarna. Lecz jeżeli niema w Przyrodzie ciał sztywnych, istnieją za to ciała mało się odkształcające, gdy temperatura i działania zewnętrzne nie przekraczają pewnych granic. Do tych ciał twierdzenia Mechaniki elementarnej stosują się przybliżenie i poza rzeczonymi granicami. Podobnie w rzeczywistości konkretnej nie-

napotyamy żadnego gazu doskonałego; lecz niektóre gazy rzeczywiste, o ile nie są zbyt ściśnięte lub zbyt oziębione, dają się przedstawić przybliżenie przez schemat, przez proste zestawienie elementów matematycznych, nazwane gazem doskonałym. Z tych to gazów można zbudować termometry, dające temperaturę bezwzględną. Wyznaczenie temperatury bezwzględnej jest możliwe tylko wtedy, gdy warunki doświadczenia pozostają w pewnych granicach i w tych granicach jest ono tylko przybliżone. Te cechy są wspólne wszystkim stosowanym w Fizyce sposobom mierzenia.

VI. STATYKA OGÓLNA I DYNAMIKA OGÓLNA.

1. Potencjał wewnętrzny i Statyka ogólna.

Widzieliśmy, że rozważanie przemian odwracalnych może posłużyć do ustanowienia twierdzeń Statyki; w rzeczy samej, z twierdzenia Carnota można wyprowadzić własności ogólne układów, będących w równowadze.

Tem w rozważaniu ważnem jest wprowadzenie pewnych zmiennych specjalnych, zwanych zmiennymi normalnymi, do przedstawienia własności układu. Temperatura należy zawsze do kategorii tych zmiennych, lecz występuje w roli szczególnej; zmienne te są, w rzeczy samej, obierane tak, że w przemianie przygotowanej, w której zmienia się sama temperatura, gdy każda z innych zmiennych zachowuje swą wartość, różne części układu pozostają nieruchome i działania zewnętrzne nie dokonywają żadnej pracy.

Zachodzi pytanie, czy własności jakiegobądź układu dadzą się przedstawić przez takie zmienne. Otóż, tak nie jest. Płyn, rozszerzający się przy podniesieniu temperatury, lecz mający ściśliwość równą zeru w temperaturze stałej, nie mógłby być okre-