

dotadniej, to jest temu, co dotychczas jest najbardziej zagadkowe i na co dopiero dalsze badania nad promieniami kanałowymi, w ostatnich czasach tak świetnie prowadzone przez Thomsona, rzuca może światło. Thomson pokazał, że jego teoria mogłaby wytłumaczyć niestałość budowy atomowej, występującą w pewnych przypadkach, oraz wyrzucanie cząstek β , ale większą trudność sprawia wyjaśnienie, czemu w innych razach rozkład atomu połączony jest z wyrzucaniem cząstek α .

Zasadnicze zjawiska promieniotwórczości tworzą punkt wyjścia teorii Starka o budowie atomu z „archionów”. Przeciwnie Rutherford, w świeżo ogłoszonej pracy, opartej na zjawiskach absorpcji promieni α i β , wyluszcza teorię, że atomy są złożone z silnego naboju centralnego (dodatniego) i dokoła niego w przestrzeni kulistej równomiernie rozmieszczonego naboju przeciwnego.

Nowe trudności podnoszą się, jeżeli chcemy wytłumaczyć zjawiska absorpcji i dyspersji światła. Z góry możnaby przypuścić, że wszystkie elektrony brać będą udział w drganiach elektromagnetycznych; później zdawało się, że liczba elektronów odpowiadających na drgania elektromagnetyczne w gazach jest pewną niewielką wielokrotnością ciężaru atomowego. Nowsze badania wykazały, że w licznych przypadkach liczba „elektronów dyspersyjnych” jest bezporównania mniejsza niż liczba atomów, tak że na tysiące albo dziesiątki tysięcy atomów przypada tylko jeden elektron dyspersyjny.

Która z różnych dróg rozumowania tu nakreślonych okaże się najwłaściwsza, jak dojdziemy do syntezy łączącej wszystko w całkowity obraz struktury atomu, dzisiaj przesądzać nie możemy. Daje nam to wiarę w powodzenie tych usiłowań, że widzimy przed sobą drogi wiodące do postępu; badania nad rozpraszaniem promieni α i β oraz badania promieni kanałowych wydają się tu zwłaszcza obiecujące.

IV. LICZBA I WIELKOŚĆ CZĄSTECZEK I ATOMÓW.

Wiadomości Matematyczne, tom XVII, str. 315–329; 1913. (W języku niemieckim: Scientia, tom XIII, pp. 27–44, 1913).

Fizyka nowoczesna jest nauką ścisłą: stara się ona prawa przyrody eksperymentalnie poznane ująć ilościowo w możliwie dokładną formę matematyczną i, stosownie do tego, uznaje tylko takie teorie fizyczne za uzasadnione, które nadają się do dokładnego liczbowego sformułowania i do skontrolowania przez dokładną zgodność matematyczną wyników z prawami przyrody, poznanymi ilościowo. Dlatego fizyk dzisiejszy odczuwa pewien niesmak, gdy słyszy zdanie, że filozofowie greccy Leukippos i Demokritos, lub rzymianin Lukrecjusz, są twórcami teorii atomistycznej. To, co wiadomo o atomistyce starożytnych i o późniejszych jej interpretacjach, wydaje mu się fantastycznym rojeniem, albowiem nie dostrzega tam właśnie tego, co jest najistotniejsze w teorii fizycznej: mianowicie stwierdzenia zgodności ilościowej z formą liczbową praw przyrody. O tem wcale nie można było myśleć tak długo, dopóki fizyka miała tylko surowy charakter jakościowy.

Zapewne atomistyka, jako doktryna filozoficzna, sięga w przeszłość więcej niż dwa tysiące lat, ale jako ścisła teoria fizyczno-chemiczna liczy zaledwie jedno lub dwa stulecia. Wprawdzie Daniel Bernoulli (1738) wykrył w sposób genialny, że prawo Boyle'a odwrotnej proporcjonalności ciśnienia gazu do objętości przez gaz zajmowanej daje się objaśnić bardzo prosto przez założenie, że gazy składają się z małych cząsteczek, poruszających się prostoliniowo; lecz poważniejsze i ogólniejsze dowody, zniewalające do przyjęcia atomistyki, znaleziono znacznie później.

Przedewszystkiem wymienić tu należy, oczywiście, odkrycie przez Daltona (1808) prawa podstawowego chemji, t. j. prawa

wielokrotnych stosunków w związkach chemicznych. Prawo to byłoby faktem zupełnie zagadkowym i niepojętym, gdyby cząsteczki (molekuły) związków chemicznych nie składały się z całkowitych wielokrotności rozmaitych rodzajów atomów jednorodnych. Dzięki Daltonowi atomistyka stała się fundamentem chemii i na tem stanowisku nigdy istotnie nie została zachwiana. Odtąd chemicy nie przestawali nigdy myśleć atomistycznie, nawet i wtedy, gdy przed dwoma dziesiątkami lat ujawnił się ze strony filozofów i fizyków przemijający wprawdzie lecz potężny prąd przeciwny atomistycy.

Dalsze ważniejsze poparcie hipotezie atomistycznej struktury materji dało odkrycie w r. 1784 przez Haüy'ego prawo podstawowe kryształografji, tak zwane prawo wskaźników wymiennych, według którego parametry powierzchni kryształu są prostymi całkowitymi wielokrotnościami pewnych jednostek podstawowych. Znaczenie tego prawa poznał w całej pełni dopiero Bravais w r. 1849; dziś jeszcze fizycy poświęcają temu przedmiotowi zbyt mało uwagi, jakkolwiek prawo stwierdza *ad oculos*, że materja jest zbudowana z cząstek oddzielnych.

W dziedzinie fizyki właściwej atomistyka znalazła pożądane uzupełnienie i poparcie w zasadzie zachowania energii, która wyjaśniła się bezpośrednio z przypuszczenia, że ciepło polega na ruchu cząsteczkowym i że ilość ciepła odpowiada energii kinetycznej tego ruchu. Na zlanie się atomistyki z tem wyobrażeniem polega dzisiejsza teoria kinetyczno atomistyczna, po raz pierwszy ściśle sformułowana w latach 1857—1860 w pracach Clausiusa i Maxwella i zastosowana do wyjaśnienia matematycznego prawa Boyle'a i Charles'a dla gazów. W tem stadium była już wtedy atomistyka teorią dobrze uzasadnioną, która sprowadzała szereg podstawowych praw przyrody z rozmaitych dziedzin wiedzy sposobem najprostszym i matematycznie dokładnym do założenia, że materja składa się z cząstek oddzielnych. Lecz była jeszcze — rzecz można — teorią tylko jakościową, dopóki brakło jej najistotniejszej cechy ilościowej, mianowicie wyobrażenia o wielkości i liczbie tych cząstek.

Jest rzeczą osobliwą, że zwykła chemja, operująca wciąż atomami, których masy względne jaknajdokładniej wyznacza, których ugrupowanie w cząsteczce bada, nie daje punktu oparcia dla obliczenia bezwzględnej wielkości atomów. Dla chemika praktycznego jest rzeczą obojętną, jak wielka jest masa atomu; przyjmuje on masę atomu wodoru za jedność, zna masy względne innych atomów

w stosunku do masy atomu wodoru i liczy te, t. zw. „ciężary atomowe“, wystarczają mu do obliczenia składu związków chemicznych i do kontrolowania wzorów chemicznych. Fizyków zaprzętała zawsze myśl uzupełnienia teorii atomistycznej przez wyznaczenie tych danych podstawowych, lecz zjawiska procesów termodynamicznie odwracalnych nie dawały im możliwości dokonania tego zadania. Należy zauważyć, że wszystkie wspomniane zjawiska odbywałyby się w sposób całkowicie identyczny, niezależnie od wielkości bezwzględnej atomów. Przebiegałyby one np. zupełnie tak samo, gdyby atomy były dowolnie małe, nawet nieskończenie małe, ale zato w liczbie nieskończonej; można by niejako wyobrazić sobie atomistykę, która pozornie tylko różniłaby się od teorii ciągłości materji. Lecz istnieje inna klasa zjawisk, w których wielkość atomów i ich liczba pośrednio odgrywa rolę, są to mianowicie termodynamicznie nieodwracalne zjawiska dyfuzji, przewodnictwa ciepła i tarcia wewnętrznego, których teorię z tego stanowiska rozwinął w części Clausius, w części zaś Maxwell. Myśl, że teoria matematyczna tych procesów umożliwia obliczanie wielkości atomów lub cząsteczek, pierwszy powziął — zdaje się — fizyk wiedeński Loschmidt, który w sławnej rozprawie „Zur Größe der Luftmoleküle“ (Sprawozdania Akademji Wiedeńskiej, 1865) bliżej myśli tę rozwinął.

Metoda obliczenia polega na założeniu, uważanem wówczas za oczywiste, że cząsteczki gazu zachowują się jak kule stałe sprężyste. Myśl zasadniczą Loschmidta można sobie przedstawić w sposób następujący. Jeżeli mówimy, że przestrzeń jest wypełniona powietrzem, to znaczy w rzeczy samej, że największa część tej przestrzeni jest pusta, że cząsteczki tlenu i azotu zajmują w niej istotnie tylko objętość niewielką, którą wyznaczyć można przybliżenie, gdy powietrze przez ściskanie i oziębianie sprowadzimy do stanu ciekłego. Cząsteczki wtedy, według Loschmidta, są prawie w zetknięciu wzajemnem, gdy w stanie gazowym znajdowały się we względnie znacznych od siebie odległościach. Liczbę cząsteczek można łatwo wyznaczyć z objętości w stanie zagęszczenia, gdybyśmy znali ich wielkość. Tę wielkość obliczyć można z tak zwanej średniej drogi swobodnej w stanie gazowym, t. j. z długości dróg prostoliniowych, przebieganych przez cząsteczki gazu pomiędzy dwoma kolejnymi spotkaniami. Bardzo proste rozważanie podobieństwa geometrycznego uczy nas, że wielkość ta, przy danem wypełnieniu przestrzeni, ale różnych rozmiarach kulistych cząsteczek, musi być proporcjonalna

do średnicy cząsteczki. Z drugiej strony łatwo widzieć, w jaki sposób proces dyfuzji (jakoteż i dwóch innych wyżej wspomnianych zjawisk) zależeć musi właśnie od wielkości dróg średnich, albowiem dyfuzja, t. j. powolne mieszanie się dwóch gazów, musi odbywać się tem szybciej, im dłuższe są drogi przebiegane przez cząsteczki gazu pomiędzy każdymi dwoma spotkaniami. A więc wynika z powyższego, że przy danym wypełnieniu przestrzeni (i przy danej temperaturze, bo od niej zależy prędkość ruchu) dyfuzja — i podobnie przewodnictwo oraz tarcie wewnętrzne — w gazach musi odbywać się tem różniej, im większe są cząsteczki gazowe, tem powolniej, im one są mniejsze. Do tegoż wniosku i do wartości współczynnika proporcjonalności prowadzą dokładne wzory matematyczne Clausiusa i Maxwella. Jest to zresztą rys charakterystyczny nie tylko zjawisk wspomnianych, ale i innych zjawisk cząsteczkowych termodynamicznie nieodwracalnych (np. przewodnictwa elektrycznego w gazach, w elektrolitach), że prędkość ich przebiegu jest związana wprost z wielkością i liczbą cząsteczek. W ten sposób Loschmidt, kombinując dwie wielkości eksperymentalnie wyznaczone: objętość zagęszczenia i współczynnik tarcia wewnętrznego (zamiast którego możnaby wziąć stałą dyfuzji), otrzymał $1.18 \cdot 10^{-7}$ cm jako wielkość średnicy cząsteczki powietrza. Ponieważ cząsteczki tlenu i azotu są dwuatomowe, przeto daje to zarazem rząd wielkości ich atomów.

Obliczenie to uważano początkowo za bardzo hypotetyczne, jakkolwiek liczba otrzymana nie była wcale nieprawdopodobna, gdyż w każdym razie leży znacznie niżej granicy bezpośredniej podzielności materji, przynajmniej do dziś dnia stwierdzonej i przez środki czysto mechaniczne osiągalnej. Wykazują to np. następujące dane. Złoto malarskie używane do złocenia wyrabia się w tak cienkich warstwach, że (dla zielonawego światła) jest prawie przezroczyste; grubość jego wynosi wtedy 10^{-6} cm, ale według Faradaya przy pomocy walcowania można tę grubość zmniejszyć do 5.10^{-7} cm. Najcieńsze nitki kwarcowe, wyrobione przez Boya, miały tak małą grubość, że w mikroskopie nie były już dostrzegalne. Istnieją prawdopodobnie bakterje, których wielkość leży poniżej granicy wyraźnej widzialności w mikroskopie, t. j. poniżej 2.10^{-6} cm. We wprowadzonych od lat dziesięciu ultramikroskopach, granicę (niewyraźnej już) widzialności posunęto jeszcze niżej. Siedentopf i Zsigmondy przy pomocy ultramikroskopu stwierdzili w szkle złotem

rubinowem istnienie ziarenek złotych rzędu wielkości 5.10^{-7} cm. Grubość baniek mydlanych (według Drudego, Reinolda i Ruckera, Johannotta) można zmniejszyć do granicy: od 17.10^{-7} cm do 6.10^{-7} cm.

Wszystkie te wartości graniczne godzą się bardzo dobrze z wyobrażeniami atomistycznymi, jeżeli cząstki składające materję są — jak podaje Loschmidt — wielkości rzędu milionowej części milimetra. Lecz nie stanowią one właściwego stwierdzenia wyników Loschmidta, wskazują tylko, że wyniki te są dopuszczalne, leżą bowiem poniżej granicy danej przez bezpośrednie doświadczenie.

Granice niższą dopuszczalnej wielkości cząsteczek dały, jak się zdaje, prace Lorda Kelvina; w kilka lat później¹⁾ niż Loschmidt zwrócił on uwagę na rozmaite zjawiska, jak np. elektryzowanie przez zetknięcie i zjawiska włoskowate, które prowadziłyby do sprzeczności pomiędzy należycie ustalonymi prawami fizyki, gdyby materja, dzielona na cząstki wielkości rzędu 10^{-8} cm, miała jeszcze takie same własności, jak w stanie masywnym. Nie może to uchodzić za obliczenie wielkości atomów w rozumieniu poprzednim, lecz tylko za ocenę jakościową obszaru ich działania. Byłoby łatwo wyobrazić sobie ośrodek doskonale ciągły, wyposażony w siły pewnego rodzaju, podobny do ośrodka, przyjętego przez Laplace'a w teorii włoskowatości, który w cienkich warstwach zachowywałby się inaczej niż w stanie masywnym. Z tego samego powodu podobne oceny, podane przez innych autorów, nie stanowią właściwego rozwiązania naszego zadania.

Przez długi czas myśl, wyłożona przez Loschmidta, stanowiła jedyną metodę obliczania wielkości cząsteczek; poprawiano jej stosowanie z jednej strony przy pomocy danych eksperymentalnych, odnoszących się do zjawisk związanych z długością średnią dróg cząsteczek, z drugiej zaś przez dokładniejsze obliczenie objętości zajmowanej przez cząsteczki. Co do tego punktu należy przypuścić, że i w cieczach cząsteczki nie wypełniają całkowicie całej przestrzeni, że otacza je jeszcze pewna swobodna dziedzina, w której poruszać się mogą. Jest przeto postępowaniem właściwszem zastąpić „objętość zagęszczenia“ Loschmidta przez wielkość b równania

¹⁾ [W liście do Joule'a, ogłoszonym w *Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester* 1862, Lord Kelvin podał już pierwszy zarys wspomnianego rachunku; por. *Popular Lectures and Addresses*, Vol. I, 1889, p. 177. *Przyp. wyd.*]

van der Waalsa, dającą się wyznaczyć eksperymentalnie, która to wielkość, jak wynika z wyvodu tego równania, wyraża czterokrotną objętość istotnie zajmowaną przez cząsteczki. Inne metody podali Dorn i Exner, posługując się stałą dielektryczną gazów i związanym z nią współczynnikiem optycznego załamania. Połączyli oni to z teorią dielektryków Clausiusa i Mossotti'ego, która uważa atomy za kule przewodzące, ułożone w próżni; na podstawie tej hipotezy, pozwala ona obliczyć współczynnik wypełnienia przestrzeni ze stałej dielektrycznej.

Wynik tych prób udoskonalenia rachunku nie był całkowicie zadowalający; jakkolwiek rozmaite sposoby obliczania prowadziły do liczb podobnego rzędu wielkości, różnice wszakże były znacznie większe niż wypadaby mogło z błędów doświadczenia. O. E. Meyer w znanym dziele „Kinetische Gastheorie“ (1899) poddaje ten przedmiot wyczerpującemu rozbirowi i oblicza według różnych metod (Loschmidta, Dorna, Exnera, van der Waalsa) wartości średnicy cząsteczek, które np. dla wodoru wahają się pomiędzy 3.10^{-7} a $0.14.10^{-7}$ cm. Jeszcze bardziej niepokojąca jest różnica związanych z tem liczb cząsteczek, te bowiem (przy danej średniej długości drogi) są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu średnicy, a zatem stosownie do metody obliczania zmieniałyby się w stosunku 1:400. O. E. Meyer z pomiędzy tych różnych liczb wybrał, bez należytego uzasadnienia, jako wartości najprawdopodobniejsze: $0.2.10^{-7}$ cm na wielkość średnicy cząsteczki, $n=6.10^{19}$ na liczbę cząsteczek, zawartych w centymetrze sześciennym gazu, które to liczby na wiarę jego powagi przyjmowano powszechnie aż do lat ostatnich.

Jak przedstawia się pytanie z dzisiejszego stanowiska nauki? Metodzie obliczenia Loschmidta wypada uczynić bardzo poważne zarzuty, które obniżają jej wyniki do poziomu grubej oceny. Nie ulega przedewszystkiem oddawna wątpliwości, że wzory, stosowane przez O. E. Meyera i Clausiusa do obliczenia drogi średniej z dyfuzji, zostały wyprowadzone niewłaściwie. Wprawdzie forma ich ogólna jest słuszna, ale wartość współczynników liczbowych w niej zawartych nie jest po dziś dzień znana dokładnie. Boltzmann wykazał jasno braki rachunków leżących u podstawy tych obliczeń, ale, pomimo wielkich wysiłków, ten znakomity teoretyk nie zdołał owych obliczeń udoskonalić. I po dziś dzień obliczenia, w których zakłada się, iż cząsteczki zachowują się jak kule sprężyste,

nie są ściśle wykonane, a nawet najnowsze prace Langevina i Jeansa nie rozstrzygają ostatecznie trudności. Z drugiej strony, wspomniana teoria Clausiusa-Mossotti'ego zachowała tylko interes historyczny: dziś jest rzeczą zupełnie pewną, że cząsteczki i atomy nie są elektrycznie przewodzące.

Ale znacznie donioślejszy jest zarzut natury zasadniczej. Czy cząsteczki i atomy mają wogóle objętość niezmienną? Niespecjaliści przywykli do wyobrażania ich sobie w postaci ziaren sztywnych i stałych; ale fizycy dzisiejsi są odmiennego zdania. Przedewszystkiem wiemy dziś, że tak zwane atomy nie są bynajmniej niepodzielniemi cząstkami jednorodnej materji (cokolwiek rozumielibyśmy przez te słowa), lecz mają skomplikowaną budowę wewnętrzną; dowodzą tego zjawiska rozpadu promieniotwórczego i promieniowania widmowego. Byłoby tedy a priori zupełnie prawdopodobne, że granica, do której mogą zbliżać się do siebie dwa twory podobne, granica, określająca wielkość pozornie nieprzenikliwej objętości własnej, zależy od ciśnienia, które popycha atomy ku sobie, może też od temperatury, panującej w układzie i t. p. Można by oczekiwać, że atomy, spotykające się z większą prędkością, zbliżają się środkami swemi bardziej niż gdyby poruszały się ku sobie z prędkością mniejszą. Istotnie, już przed laty czterdziestu Stefan doszedł do takiego wniosku z pomiarów zmiany lepkości gazów w zależności od temperatury. Uderzające potwierdzenie znajdują te wyobrażenia w nowych doświadczeniach nad pochłanianiem promieni α przez materję; według tych doświadczeń cząstki α , t. j. atomy helu, dodatnio naelektryzowane i wyrzucane z olbrzymią prędkością około 20.000 km na sekundę, przenikają poprzez wiele setek atomów substancji materialnej (np. złota), nie doznając wyraźnego odchylenia od swej drogi prostoliniowej.

Z tego wszystkiego zdaje się wynikać, że wielkość pozornie nieprzenikliwych jąder atomowych zależy od okoliczności zewnętrznych, w których zostały obserwowane, że ta wielkość, naprzykład dla tej samej substancji, może być różna w stanie gazowym i ciekłym. Nadto hipoteza postaci kulistej jest oczywiście dowolna i przynajmniej dla cząsteczek wieloatomowych z pewnością nieuzasadniona.

Tym sposobem nie tylko słuszność metody obliczania Loschmidta została zachwiana, ale okazuje się nadto, że problemat musi być sformułowany sposobem odmiennym. Punktem zasadniczym atomi-

styki jest pytanie, dotyczące liczby atomów, zawartych w oznaczonym quantum substancji. Jest to pojęcie jasno określone, niezależne od pytania co do natury atomów. Dopiero znając tę liczbę, można badać, w jakiej mierze okoliczności zewnętrzne wpływają na objętość, przypadającą atomowi lub cząsteczce i jak wielka jest ona w warunkach normalnych.

Od czasów Loschmidta podano do rozwiązania tych pytań szereg innych metod, przy których pomocy obliczono wielkość średnicy atomu na 10^{-7} do 10^{-8} cm. Niektóre z tych metod są bardzo interesujące i wielce pomysłowe, ale nie przynoszą one rzeczywistego postępu, gdyż najczęściej opierają się na podstawie bardziej jeszcze niepewnej, bardziej związanej z rozmaitymi hipotezami, aniżeli metoda Loschmidta; wszystkie one podlegają przytoczonym wyżej poważnym zarzutom. Dopiero w ostatnich kilku latach pojawiły się niektóre prace, odpowiadające wyłożonemu wyżej racjonalnemu postawieniu problemu; rzucają one nowe światło na kwestię i pozwalają wyznaczyć bezpośrednio liczbę cząsteczek. Przede wszystkim należy tu wymienić niektóre metody, które można podciągnąć pod wspólny punkt widzenia. Polegają one na obserwacji stanów równowagi termodynamicznej i odsłaniają przytem pewne anomalje, sprzeczne ze zwykłą termodynamiką a dające się wyjaśnić na podstawie przypuszczenia, że liczba cząsteczek jest skończona. Teorię owych anomalij wyłożyli Einstein i Smoluchowski, przyczem w pewnym przypadku teoria ta styka się z dawniejszymi pracami Lorda Rayleigh; zasługa eksperymentalnego wykonania pracy przypada głównie Perrinowi. Nie wchodząc w szczegóły, które zaprowadziłyby nas zbyt daleko, ograniczamy się do wymienienia następujących metod tego rodzaju:

1. Obserwacje ruchu cząsteczkowego Browna;
 2. Zjawiska opalescencji w gazach;
 3. Rozmieszczenie cząstek emulsji pod wpływem siły ciężkości.
- Ostatnia metoda jest teoretycznie najprostsza oraz najbardziej wydoskonalona pod względem eksperymentalnym, o niej też pomówimy nieco szczegółowiej.

Myśl jej zasadnicza jest następująca. Gdybyśmy potrafili wytworzyć sztucznie cząsteczki o rozmiarach, wymierzyć się dających, lub o masach, dających się zważyć bezpośrednio, gdybyśmy z drugiej strony umieli wyznaczać ich ciężar cząsteczkowy (w stosunku do atomów wodoru) według zwykłych metod chemiczno-fizycznych,

problem byłby rozwiązany, albowiem posiadalibyśmy sposób obliczenia bezwzględnego ciężaru atomu wodoru, a przeto i wyznaczenia liczby atomów, zawartych w danej ilości substancji. W pewnej mierze jest to rzecz wykonalna. Jeżeli np. rozmieszcimy w wodzie gumigutę, której używa się jako żółtej farby malarskiej, utworzy ona emulsję. Według teorii kinetycznej, cząstki zawieszone w cieczy, jak owe widzialne w mikroskopie ziarna gumiguty, z których składa się emulsja, powinny w pewnej mierze zachowywać się, jak gdyby były cząsteczkami gazu: mają tę samą energię kinetyczną i wywierają odpowiednie ciśnienie osmotyczne. Wiadomo, że już dawniej van't Hoff na podstawie doświadczeń Pfeffera wykażał, że cząsteczki ciała rozpuszczonego wywierają takie ciśnienie osmotyczne, jak gdyby tworzyły ośrodek gazowy, bez względu na naturę substancji rozpuszczającej. To samo musi zachodzić dla cząstek dowolnie wielkich, ponieważ wielkość cząstek pozostaje bez wpływu na ważność tego związku.

Jeżeli przeto pozostawimy emulsję jedynie wpływowi siły ciężkości, cząstki zawieszone nie opadną po pewnym czasie całkowicie na dno, jak dawniej. Jak się zdaje, ogólnie sądzono, lecz na dnie naczynia utworzą warstwę grubości skończonej, o gęstości stopniowo malejącej od dołu do góry, warstwę dającą się porównać z gazową atmosferą ziemską. W pierwszym przypadku działanie ciężkości cząstek, w drugim ciężkość cząsteczek powietrza, która, gdyby działała sama, byłaby cząstki ku dnu sprowadziła, zostaje skompensowana przez nieustający ruch cząsteczkowy, tak że ostatecznie rozkład cząsteczek jest kompromisem pomiędzy dwiema temi przeciwnymi dążnościami. Różnica obu przypadków jest tylko ilościowa, albowiem wielkie stosunkowo cząstki emulsji podlegają sile ciężkości w stopniu wyższym niż cząsteczki powietrza. Gdy więc atmosfera ziemską dopiero na wysokości 5600 m ma gęstość równą połowie gęstości u poziomu morza, według spostrzeżeń Perrina, przeciwnie, w emulsji gumigutowej, której ziarna miały w średnicy 0.0009 mm, liczba ziaren, zawartych w danej objętości, opadała do połowy przy każdorazowym wzniesieniu o 0.003 mm. Te dwie liczby 5600 m i 0.003 mm są miarą wysokości atmosfery powietrznej i atmosfery gumigutowej, gromadzącej się na dnie naczynia i dają zarazem sposób wyznaczenia względnego ciężaru tych ziaren (cząstek gumigutowych) w stosunku do ciężaru cząsteczek wodoru, na zasadzie twierdzenia ogólnego, że wysokość ta dla różnych gazów

musi być odwrotnie proporcjonalna do ich ciężarów cząsteczkowych. W naszym przypadku należy zresztą wprowadzić jeszcze poprawkę, gdyż ciężkość ziaren gumigutowych jest pozornie zmniejszona skutkiem parcia hydrostatycznego. Z drugiej strony łatwo obliczamy ciężar bezwzględny tych ziaren z ich rozmiarów, a stosunek tych liczb daje czynnik, przez który należy pomnożyć ciężar chemiczny atomowy lub cząsteczkowy, gdy chcemy otrzymać ciężar bezwzględny atomów lub cząsteczek, wyrażony w gramach. Według wyników pomiarów Perrina wynosi on $1/7.10^{22}$, skąd odwrotnie wypływa, że gram wodoru zawiera 7.10^{22} atomów. To jest liczba podstawowa, którą należało wyznaczyć. Wykonanie praktyczne pomiarów, będących podstawą tego obliczenia, wymaga przewyciężenia pewnych trudności technicznych, jak np. otrzymania emulsji o dokładnie równych ziarnach, dokładnego wyznaczenia ich wielkości, przeliczenia wielkiej liczby ziaren w dokładnie wymierzonym poziomie, ale to wszystko można osiągnąć stosunkowo prostymi sposobami przy pomocy kilku zręcznych pomysłów. Perrin miał tem większe zaufanie do liczby otrzymanej przez siebie i swoich współpracowników (Dąbrowskiego, Chaudesaigues), że zgadzają się z nią bardzo dobrze wartości otrzymane z obserwacji ruchu Browna.

Zanim przejdziemy do dalszego omówienia wyników powyższego wyznaczenia, przedstawimy jeszcze w krótkości najnowszą metodę, która polega na innych zasadach. Metoda ta współzawodniczy z tamtą pod względem prostoty i przewyższa ją, być może, pod względem dokładności. Wiadomo, że w elektrolizie potrzeba przejścia ilości elektryczności wynoszącej 96513 kulombów, by wydzielił się gram wodoru (lub innego jonu jednowartościowego). Jednowartościowe jony wodoru powstają przez odszczepianie jednego elektronu od chemicznego atomu wodorowego; są to więc atomy obdarzone jednym elementarnym ładunkiem elektrycznym. Gdyby więc znany był ładunek elektronu, to dość byłoby podzielić przezeń liczbę powyższą, aby otrzymać liczbę atomów, zawartych w gramie wodoru. Dokładność tej metody zależy tylko od dokładności wyznaczenia ładunku elektronowego. W tym względzie uczyniono w dwóch ostatnich latach nadzwyczajny postęp: metodą doświadczalną, której idea zasadnicza pochodzi od Sir J. J. Thomsona i H. A. Wilsona, amerykański fizyk Millikan przekształcił do tego stopnia, że nie tylko pozwoliła na obliczenie z wielką dokładnością praw-

dziwego ładunku elektronowego, lecz nadto stwierdziła w sposób uderzający atomistyczno-elektronową strukturę elektryczności.

Za pomocą rozpylacza Millikan otrzymuje bardzo małe kropelki oliwy, które z powodu swej małości przez czas długi mogą być zawieszone w powietrzu i przytem wiążą ze sobą, od czasu do czasu, to jeden to drugi z pomiędzy jonów dodatnich lub ujemnych, zawsze w powietrzu obecnych. Taką kropelkę umieszcza w dziedzinie pomiędzy dwiema poziomo ustawionymi płytami kondensatora i obserwuje przy pomocy lunety prędkość spadania kropelki pod wpływem ciężkości. Z prędkości tej, przy pomocy znanego wzoru, podanego przez Stokesa, obliczyć można średnicę kropelki, której nie można by wymierzyć bezpośrednio z powodu jej małości. Następnie nadaje się płytom kondensatora oznaczoną różnicę potencjału, tak że kropelka pozostaje pod wpływem skombinowanym swego ciężaru i siły działającej na jej ładunek elektryczny. Jeżeli idzie np. o cząstkę naładowaną ujemnie, to, nadając płytce górnej odpowiedni potencjał dodatni, można sprawić, że wzniesie się ona pod działaniem pola elektrycznego. Z odpowiedniej prędkości oblicza się łatwo wartość siły elektrycznej, działającej na kropelkę, w stosunku do jej ciężaru, a stąd znów wartość ładunku elektrycznego. Warunkiem koniecznym powodzenia tego doświadczenia jest uniknięcie jakiegokolwiek prądu powietrza, a warunek ten był w doświadczeniach Millikana spełniony tak dokładnie, że ta sama kropelka mogła być obserwowana przez kilka godzin w polu widzenia lunety, przyczem spadała i podnosiła się setki razy.

Pomiary Millikana doprowadziły do wyniku, że ładunki elektryczne kropelek są dokładnie wielokrotnościami całkowitemi wartości, wynoszącej $4.89.10^{-10}$ jednostek elektrostatycznych¹⁾. Były one to dodatnie, to ujemne; wynosiły cztery, pięć, aż do siedemnastu quantów elementarnych, ale w kilku tysiącach prób ani razu nie było ładunku różnego od powyższych, t. j. ładunku, który byłby mniejszy od tego quantum lub zawierał jego ułamek. Stanowi to dowód, że elektryczność istnieje tylko — że tak powiemy — w odłamach wielkości stałej, którą nazywamy ładunkiem „elementarnym“ lub ładunkiem „elektronu“. Godna podziwu jest subtelność i dokładność tej metody. Któż uważałby dawniej za możliwe wykonać pomiary bezpośrednie ładunków pojedynczych elektronów! Jak wo-

¹⁾ [Według nowszych pomiarów, $4.774.10^{-10}$ jedn. el.-stat.; *przyp. wyd.*]

bec tego beznadziejna byłaby myśl zbudowania wagi, na której możnaby ważyć pojedyncze atomy! Okazuje się tu znów wyższość metod mierniczych, odnoszących się do wielkości elektrycznych, ponad metodami, tyjącącymi się innych wielkości fizycznych. Istnieje zresztą jeszcze szereg innych, równie interesujących metod obliczania ładunku elementarnego, które wszakże ustępują opisanej pod względem dokładności.

Powróćmy do naszego pierwotnego problemu. Ponieważ znamy już ładunek elementarny, według powyższego otrzymujemy od razu liczbę atomów, zawartych w gramie wodoru, mianowicie $N = 5.9 \cdot 10^{23}$. Jak widzimy, rząd tej wielkości zgadza się z liczbą Perrina $N = 7.10^{23}$, otrzymaną na innej drodze, ale pozostaje pewna niezupełnie wyjaśniona różnica. Dopóki doświadczenia te nie będą powtórzone przez innych obserwatorów, trudno będzie orzec, która z dwóch liczb zasługuje na większe zaufanie. Na razie należałoby liczbę Millikana uważać za bliższą prawdy, gdyż raczej w doświadczeniach Perrina możnaby podejrzewać istnienie pewnych źródeł błęd. Uczynimy może najlepiej, przyjmując na razie liczbę $N = 6.3 \cdot 10^{23}$, odpowiadającą pomiarowi ruchu Browna, dokonany przez Zanggera i zarazem bardzo bliską wartości $N = 6.2 \cdot 10^{23}$ wyprowadzonej przez Plancka z teorii promieniowania. Właściwego dowodu ta ostatnia zgodność stanowi nie może, gdyż teoria Plancka jest zbudowana na elementach hypotetycznych jeszcze niezupełnie wyjaśnionych, ale bądź co bądź ta zgodność podnosi prawdopodobieństwo, że wybór nasz jest uzasadniony. W każdym razie widzimy, że teoria atomistyczna wydoskonaliła się znacznie w naszych czasach pod względem ilościowym. Pytanie, jak wielka jest liczba atomów w danym quantum substancji, zostało doprowadzone do pewnego rozwiązania. Przed pięćdziesięciu laty nie miano żadnej podstawy, by odpowiedzieć na to pytanie, przed laty piętnastu wahano się pomiędzy wyborem liczb $3 \cdot 10^{24}$ i $6 \cdot 10^{21}$, dziś zaś idzie już tylko o różnicę niewielu odsetek w podanej wyżej wartości na N .

Wartość ta stanowi klucz do szeregu ważnych wniosków natury zasadniczej. Przedewszystkiem widzimy, że należy podzielić chemiczne ciężary atomowe przez liczbę $6.3 \cdot 10^{23}$, aby otrzymać prawdziwy ciężar atomów w gramach. Najmniejsza materjalna, elektrycznie obojętna cząstka, atom wodoru, waży tedy $1.6 \cdot 10^{-24}$ gramów. Aby te liczby lepiej zrozumieć, pomyślimy, że kropla deszczu za-

wiera tyle atomów, ile wynosi liczba kropeł wody, z których składa się Morze Śródziemne.

Są to jednak, jak dziś wiemy, nie najmniejsze z istniejących wogóle cząstek; atomy mają budowę bardzo skomplikowaną. Ich części składowe stają się widoczne dopiero wtedy, gdy budowa rozpada się w ruinę; taki proces nazywamy „przeobrażeniem promieniotwórczym” atomu, obserwujemy go w substancjach promieniotwórczych. Są to, jak wiadomo, elektrycznie dodatnie cząstki α wielkości atomu helu i cząstki ujemne β , identyczne z elementarnymi cząstkami elektryczności ujemnej, zwanymi „elektronami”. Muszą istnieć jeszcze mniejsze od cząstek α cząstki elektrycznie dodatnie, gdyż dodatni jon wodorowy waży tyle ile czwarta część atomu helu ($He = 4$); lecz natura tych dodatnich cząstek nie jest nam dotąd bliżej znana.

Masę elektronów ujemnych znamy dokładnie. Można, jak to pierwszy wykazał J. J. Thomson, obliczyć ją z odchylenia się promieni katodowych w polu magnetycznym; wynosi ona $\frac{1}{1836}$ masy atomu wodoru. Elektrony te występują tylko jako cząstki naładowane ujemnie; za najmniejszą dotychczas znaną cząstkę nieelektryczną, za cząstkę najmniejszą tego, co nazywamy materją, musimy jeszcze zawsze uważać atom wodoru. Z tej podstawowej wielkości otrzymujemy dalej prostym sposobem liczbę cząsteczek, zawartych w jednostce objętości dowolnego gazu w normalnych warunkach (w temperaturze 0° i pod ciśnieniem 760 mm). Albowiem cząsteczki wodoru są, jak wiadomo, dwuatomowe; jeżeli tedy połowę gęstości wodoru pomnożymy przez N , otrzymamy liczbę cząsteczek, przypadającą na 1 cm^3 , mianowicie $2.8 \cdot 10^{19}$, t. j. prawie połowę wartości, przyjętej przez O. E. Meyera. Wiadomo, że liczba ta, według prawa Avogadra, jest stała dla wszystkich gazów. Kto lubi wielkie liczby, niechaj obliczy, ile cząsteczek zawiera atmosfera ziemska, albo z ilu mniej więcej atomów składa się nasz układ słoneczny. W pierwszym przypadku znajdzie liczbę rzędu wielkości 10^{44} , w drugim 10^{60} . Jest to oczywiście zabawka dość bezpożyteczna, gdyż nie mamy właściwego zrozumienia dla takich liczb. Ale godzi się zauważyć, że w najmniejszej objętości, dostrzegalnej gołym okiem — t. j. w sześciu o krawędzi 0.1 mm — w warunkach normalnych, zawiera się nie mniej niż $3 \cdot 10^{13}$ cząsteczek gazu. Okoliczność ta jest wielkiej wagi ze względu na atomistyczno-kinetyczną interpretację twierdzeń termodynamiki; według tego po-

głędu twierdzenie o entropji jest twierdzeniem o prawdopodobieństwie, uzasadnionem statystycznie, które stosuje się tylko z takim przybliżeniem jak prawo wielkich liczb. W rzeczy samej w praktyce makroskopijnej mamy zatem zawsze do czynienia z tak olbrzymimi liczbami cząsteczek, że prawo wielkich liczb istotnie musi być ważne z wielką dokładnością. Natomiast w metodach obserwacji „mikroskopijnych“ mogą w pewnych okolicznościach zachodzić odchylenia od przebiegu oczekiwanego według twierdzeń zwykłej termodynamiki; w istocie: tego rodzaju odchylenia stanowią właśnie podstawę wyżej wspomnianych lub opisanych metod wyznaczania liczb cząsteczek (ruch Browna, opalescencja, rozmieszczenie cząstek emulsji). Musimy odmówić sobie bliższego rozwinięcia tu bardzo interesującego związku pomiędzy termodynamiką i twierdzeniami rachunku prawdopodobieństwa, ponieważ rzecz ta przekroczyłaby granice niniejszego studjum.

Z pozyskanego tym sposobem nowego punktu widzenia można dziś podjąć na nowo pytanie o wielkości atomów. Przy użyciu stałej *b* van der Waalsa wypadają na wielkość średnicy cząsteczek wodoru, argonu, kryptonu, powietrza i t. p. wartości 5.10^{-8} do 7.10^{-8} cm więc niebardzo odbiegające od liczb Loschmidta. Lecz nie rozstrzyga to bynajmniej przytoczonych wyżej pytań zasadniczych. Cóż oznacza taka „średnica“? Czy objętość atomu nie ma być raczej uważana za sferę działania sił odpychających, jak to naprzykład przyjmował Maxwell w swych późniejszych pracach nad teorią kinetyczną gazów? W tej Maxwellowskiej teorii gazów, zbudowanej na hipotezie o siłach odpychających cząsteczkowych, odwrotnie proporcjonalnych do 5-ej potęgi odległości, nie występuje ani pojęcie drogi średniej swobodnej, ani pojęcie prawdziwej średnicy cząsteczki. Można równie dobrze powiedzieć, że cząsteczki Maxwella mają objętość zero (jeżeli przez to rozumiemy bezwzględnie nieprzenikliwą objętość jądra) albo też, że mają objętość nieskończenie wielką, jeżeli za objętość uważamy sferę działania sił odpychających, które przecież, ściśle biorąc, w tym przypadku sięgają do nieskończoności.

Specjalne prawo działania cząsteczkowego w hipotezie Maxwella było oczywiście założeniem prowizorycznem, wybranem z pewnych powodów matematycznych i nikt poważnie nie wierzył w jego rzeczywistość; tkwi w niem wszakże myśl godna uwagi i trwałej wartości, mianowicie: przypuszczenie przejścia przestrzen-

nie ciągłego dla własności charakterystycznych materji zamiast przejścia nieciągłego na powierzchni cząsteczek.

Czy należy atomistykę budować w sensie teorii ciągłości, czy też teorii nieciągłości? A priori jedno i drugie jest równie możliwe. Albo też, czy należy kombinować oba założenia, przyjmując dla atomów właściwą materjalną objętość jądra, otoczonego pewną sferą przyciągania, jak to czynią np. Sutherland i Kleeman w swych interesujących spekulacjach? Aby móc o tem powiedzieć coś określonego, należałoby przedewszystkiem wiedzieć dokładnie, w jaki sposób pozorna średnica atomu, t. j. najmniejsza odległość dwóch spotykających się atomów, zależy od ich prędkości i od innych ewentualnych okoliczności.

Odpowiedź ostateczna na te wszystkie pytania leży jeszcze w dalekiej przyszłości. Pytania te wiążą się oczywiście z zagadnieniem o szczegółach wewnętrznej budowy atomów i znajdują rozwiązanie dopiero w połączeniu z rozwiązaniem analogicznych pytań, dotyczących natury elektronów. Zaledwie fizyka przez rozwiązanie jednego pytania podstawowego atomistyki zdołała umocnić podstawy nowoczesnego poznania przyrody, już staje przed oszałamiającem mnożstwem nowych zagadek. Dobrze, że tak jest; inaczej byłaby nauką martwą.