

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN --- POLONIA

VOL. VII, 4

SECTIO AA

1952

Z Zakładu Fizyki Doświadczalnej Wydziału Mat.-Fiz.-Chem. U. M. C. S. w Lublinie
Kierownik: prof. dr Stanisław Ziemecki

Armin TESKE

Metodologiczny aspekt badań nad ruchami Browna

**Методологический аспект исследований
над броуновским движением**

**Methodologische Betrachtungen zur Brownschen
Bewegung**

Przegląd chybionych wysiłków i dawnych błędów wykraczać będzie poza ramy kronikarskie, jeżeli nasuwa się przypuszczenie, że za niepowodzeniami kryje się pewien związek nacjonalny. Z tego punktu widzenia rozpatrywane są niżej ruchy Browna, które tak długo prowadziły na manowce nie tylko teoretyka, lecz także eksperymentatora. Istotnie, pomyłki wiążą się w tym przypadku z zagadnieniem natury metodologicznej, mianowicie z kwestią jednostki właściwej; nieco światła pada przy tym na metodę indukcyjną.

Rozpoczynamy od przeglądu historycznego.

„Podziwiać można, że Lucretjusz (De Rerum Natura) przewidział i opisał to zjawisko, którego nie mógł oglądać“. Te słowa Perrina¹⁾ dotyczą właśnie ruchów Browna, owych nieregularnych ruchów, jakie wykonują drobne ciała pływające w cieczach lub gazach. Uwaga Perrina może istotnie wzbudzić podziw dla starożytnego autora, budzi jednak i inne uczucie, uczucie zdziwienia. Oto dzięki wynalezieniu mikroskopu zaobserwowanie przewidzianego zjawiska staje się możliwym, jest ono przedmiotem skrupulatnych badań, lecz przyczyny jego pozostają niejasne dla kilku generacji uczonych.

¹⁾ „Les Atomes“, str. 83 (1948).

Kogo okoliczności te zachęca do bliższego zaznajomienia się z historią ruchów Browna, ten spotka się z nową niespodzianką. Stwierdzi on, że rozmaici eksperymentatorzy znani skądinąd z talentu i skrupulatności wciąż na nowo dochodzili do sprzecznych rezultatów.

Odlóżmy więc na razie pytanie, czy istotnie wzmianki u Lukrecjusza są dostatecznie jasne, by datować historię ruchów Browna od ukazania się „De Rerum Natura“; historia ta daje wiele do myślenia i bez perspektywy sięgającej do czasów rzymskich.

To, co dziś nazywamy ruchami Browna, stało się znane wśród uczonej publiczności począwszy od roku 1828, tj. od ukazania się rozprawy Roberta Browna w *Philosophical Magazine*. O właściwym zrozumieniu tego zjawiska zdecydowały jednak dopiero prace Einsteina i Smoluchowskiego — rok 1906. Przez osiemdziesiąt lat interpretacja (i nie tylko interpretacja, o czym bliżej będzie mowa) była sporna. Weźmy pod uwagę „ciężar statystyczny“ tych osiemdziesięciu lat: należą one do wieku XIX i częściowo nawet XX. Zbytecznym jest podkreślać eksperymentalne i teoretyczne walory nauk przyrodniczych w tym okresie. Zresztą założenia teoretyczne, konieczne do zrozumienia ruchów Browna, były właśnie znane wiele dziesiątków lat przed pracami Einsteina i Smoluchowskiego. Nie brakło też autorów, którzy mniej lub więcej jasno formułowali dzisiejszy punkt widzenia. Jednakże spośród np. 5-ciu prac ogłoszonych o ruchach Browna w ostatnim dziesięcioleciu XIX wieku, tylko jedna zawiera (w ogólnych zarysach) pogląd obecny. Jest nią praca Meade Bache. W pracy tej spotykamy jednak charakterystyczne zastrzeżenie, świadczące o dziwnej chwiejności stanu badań; autor twierdzi, że ruch Browna uwidacznia się tylko w wodzie — jest to rok 1894!

Sam fakt, że upłynął prawie wiek, nim kwestię wyprowadzono na czyste wody, nie zmusza jeszcze do dopatrywania się czegoś niezwykłego. Znamy zagadnienia o historii równie długiej lub dłuższej. Istnieje jednak pewna różnica. W sporze np. o naturę światła sytuacja wyjaśniała się w miarę odkrywania nowych faktów doświadczalnych. Były tam momenty dramatyczne — pomyślmy o demonstracjach Fresnela przed Komisją Akademii Paryskiej. Nowe fakty decydowały. W porównaniu z tym niewielką będzie przesadą, jeżeli powiemy, że obserwatorzy ruchów Browna oglądali właściwie wciąż to samo

zjawisko. A jednak wracali na nowo do pytań przeważnie rozstrzygniętych już przez jednego z poprzedników, często już przez samego Browna.

Brown początkowo sądził, że ów nieregularny ruch drobnych ciałek, jaki oglądał pod mikroskopem, jest objawem życia. Przypuszczenie to nasuwało się tym bardziej, że pierwsze obserwacje poczynił on na pyłku pewnej rośliny (pyłek *asclepiadaceae*). Przekonał się jednak rychło, że pyłki po przegotowaniu wykazują ten sam ruch. Stwierdził dalej, iż sadze z londyńskich kominów, węgiel kamienny, skamieniałe drzewo, byleby tylko dostatecznie rozdrobnione, zachowywały się podobnie. Decydującym krokiem było przejście do substancji nieorganicznych. Brown miał nawet osobliwy pomysł wypróbowania kawałka granitu odlupanego od egipskiego sfinksa. I rozarty sfinks poruszał się pod mikroskopem nie inaczej, niż granit zwykły, który nie był nigdy czczony.

Wynikiem dwóch rozpraw Browna (1828 i 1829) było stwierdzenie, że żaden z następujących czynników nie jest przyczyną ruchu: 1) prądy w cieczy, 2) parowanie, 3) wzajemne oddziaływanie poruszających się ziarenek, 4) ich niestala równowaga w cieczy, 5) działanie kapilarne, 6) tworzenie się gazowych substancji, np. małych pęcherzyków powietrza.

By dać obraz sumiennej pracy Browna przytoczę jeden z jego eksperymentów. Brown potrząsał dużą kroplę wody, w której znajdowały się zawieszona ciałka, z olejkim migdałowym, nie mieszającym się z wodą. Woda rozdrabnia się wtedy na małe kropelki. Niektóre z nich były tak małe, że zawierały tylko jedno zawieszona ciałko. Ruch jego trwał jednak nadal — w ten sposób Brown uzasadnił punkt 3-ci. Warto też wspomnieć, że Brown wymienia wielu poprzedników, m. in. *Leeuwenhoek*, *Spallanzani* i współczesnych sobie *Drummonda* (1814) i *Bywatera* (1819).

Już następna praca ogłoszona w tej materii (*Muncke*, 1829, 1830) podawała w wątpliwość rezultaty Browna. Jako domniemane przyczyny *Muncke* wymienia prądy w cieczy wywołane nierówną temperaturą i nierównomiernym parowaniem, w przeciwieństwie do punktów 1 i 2.

Ułatwimy może czytelnikowi mniej obeznanemu z tematem orientację, poświęcając kilka słów dzisiejszemu pogładowi. Punktem wyj-

ścia jest założenie, nie ulegające zresztą wątpliwości, że ciecz nie jest ośrodkiem ciągłym, lecz składa się z cząsteczek. Wyobraźmy sobie teraz ziarenko znajdujące się w cieczy. Cząsteczki cieczy poruszają się, będą zatem uderzać w ziarenko i wprawią je w ruch tym wyraźniejszy, im mniejsze jest ziarenko. Cząsteczka nadbiegająca np. z lewej strony popchnie je w prawo, cząsteczka uderzająca od spodu podniesie je i w ten sposób ziarenko będzie się przesuwać „to tu, to tam, na wszystkie zewsząd strony“, by użyć słów *L u k r e c j u s z a*. Obraz ten urzeka swoją prostotą, nie należy jednak sądzić, że jest on w równym stopniu przekonywający, choć się to na pierwszy rzut oka może wydaje. Kryją się tu niemałe trudności i dopiero po wyjaśnieniach *S m o l u c h o w s k i e g o* możemy być pewni, że nie błądzimy wiążąc ten obraz z ruchami *B r o w n a*. Co do ilościowej strony zjawiska wiadomo dziś, że ruch zależy jedynie od trzech czynników: od temperatury, od lepkości cieczy i od promienia ziarnka (zakładamy, że nie różni się ono zbytnio od kulki).

B r o w n był botanikiem i charakter pierwszych jego doświadczeń (pyłek roślinny) był może powodem, że fizycy początkowo nie zwracali uwagi na odkryte przezeń zjawisko. Dopiero od połowy XIX wieku badania przechodzą w ręce fizyków. *R e g n a u l d* znajduje (1858), że intensywność ruchu zależy od padającego światła. Sądził więc, że ziarenka ogrzewają się pod wpływem światła; oddając następnie ciepło powodują prądy w cieczy, które je unoszą. Zestawmy z tym od razu, zaniechawszy porządku chronologicznego, rezultaty otrzymane przez *G o u y ' a* (1888). Są one całkiem odmienne. Zmiana natężenia światła w granicach od 1 do 1000 nie miała żadnego wpływu na intensywność ruchu.

Pierwszym, który wypowiedział pogląd, że ruch molekularny cieczy jest przyczyną ruchów *B r o w n a*, był *C h r. W i e n e r*. Jednakże poglądy jego były chwiejne. Przyjmował z drugiej strony zachodzenie prądów w cieczy o przekroju odpowiadającym rozmiarom zawieszonych ciałek. Doświadczenia jego wykazały dalej, iż ruch *B r o w n a* jakoby zależy od barwy padającego światła; czynnikiem wpływającym na ruch miał być składnik czerwony. *M e a d e B a c h e* wrócił do tego zagadnienia w r. 1894 otrzymując wynik całkowicie negatywny.

Od roku 1870 uwaga badaczy skierowana była na zjawiska elektryczne jako na ewentualne przyczyny ruchów *B r o w n a*. Punktem wyjścia było spostrzeżenie, że dodanie substancji zwiększających przewodnic-

two wody hamuje ruch (koagulacja). Rzecznikiem tezy o przyczynach elektrycznych był głównie St. Jevons. W związku z tym Ramsay poruszył na nowo zagadnienie, którym zajmował się już Brown i stwierdził, że ziarenka zawiesiny nie oddziałują na siebie, co musiałyby mieć miejsce, gdyby nosiły ładunki elektryczne. Ale w tym samym niemalże roku, w którym ukazała się praca Ramsaya (1892), inny autor C. Fuchs znajduje, iż oddziaływanie takie zachodzi; przyciąganie ma jakoby być wynikiem sił kohezji, odpychanie — adhezji cieczy. Dodajmy jeszcze, że według Quinckego (1898) ruch Browna nie wystąpi, jeżeli ciecz i otoczenie mają tę samą temperaturę i że według obserwacji Naegeliiego (1879) rozmiary ziarenek nie (!) wpływają na intensywność ruchu.

Na zakończenie tego przeglądu, w którym ze względu na cele artykułu pominięto cenne prace Carbonelle'a, Delsaulx, Bodaszewskiego i Gouya, jeszcze kilka słów o oryginalnej teorii Cantoniiego. Punktem wyjścia było prawo Dulonga i Petita wiążące ciężary atomowe i ciepła właściwe dwóch substancji według wzoru:

$$m_1 c_1 = m_2 c_2.$$

Przy pomocy tej zależności Cantoni stworzył teorię tłumaczącą ruch Browna przez różnicę ciepł właściwych. Doświadczalną podstawą była jego (błędna, a w każdym razie mylnie interpretowana) obserwacja, iż ziarenka srebra wykazują żywszy ruch niż ziarenka miedzi, te zaś żywszy od żelaza oraz fakt, że ciepła właściwe tych substancji wzrastają w tej samej kolejności od srebra do żelaza. Obserwacje Cantoniiego są jeszcze jednym dowodem zdradliwości tematu — że Cantoni miał wprawę w eksperymentach nad ruchami Browna, o tym świadczy jego uprzednia praca poświęcona pytaniu, czy istotnie ruch ten trwa nieustannie. Wytworzywszy cienką warstwę zawiesiny między dwiema szkiełkami pokrywkowymi, mógł wykazać, że ruch nie ustał nawet po upływie roku.

Spróbujmy jednak rozpatrzyć zagadnienie systematycznie za pomocą wskazówek, jakie daje metodologia. Zaobserwowaliśmy nowe zjawisko, szukamy jego przyczyn. To stadium badań stanowi, idąc za klasyfikacją W. F. Głagolewa¹, pierwszy i drugi stopień rozu-

mowania indukcyjnego. Ściągające naszą uwagę zjawisko α (spośród $\alpha \beta \gamma \dots$) zachodzi przy działaniu szeregu czynników A, B, C..., czyli

$$A B C — \alpha \beta \gamma.$$

Chodzi teraz o eliminację czynników obojętnych i tych, które stanowią względnie trwałą ramę, jakkolwiek mogą nie być obojętne. W konkretnych przypadkach orientujemy się zwykle jako tako pod obu względami. Mamy na ogół uzasadnione podejrzenie, że tylko te i te czynniki mogą wchodzić w grę jako możliwe przyczyny. Które z nich są prawdziwymi przyczynami — tego dochodzimy z pomocą np. kanonu zgodności:

$$A B C — \alpha \beta \gamma$$

$$A B C — \alpha \beta \gamma,$$

kanonu różnicy:

$$A B C — \alpha \beta \gamma$$

$$B C — \beta \gamma \text{ itd.}$$

Przykładem zastosowania tych kanonów może być przytoczony eksperyment *Browna* (potrząsanie kropli wody, zawierającej zawieszane ziarnka, z olejkim migdałowym). *Brown* liczył się z możliwością, że przyczyną ruchu (zjawiska α) jest oddziaływanie wzajemne ziarenek, B. Usunął więc czynnik B, dobierając warunki eksperymentu tak, że miał przed sobą tylko jedno ziarnko (inne ziarnka były w stosunkowo dużej odległości). Ruch trwał — znaczy to, że B nie jest jego przyczyną. W podobny sposób *Brown* starał się wyeliminować szereg innych czynników. Jednakże opinia co do prawdziwości tych eliminacji była podzielona. Zdawało się kilkakrotnie, że usiłowania idące w kierunku przeciwnym zostały uwieńczone sukcesem i że prawdziwą przyczyną jest jeden z czynników odrzuconych przez *Browna*. Kiedy zaczęto jeszcze myśleć o przyczynach natury elektrycznej, o procesach chemicznych, o ruchu molekularnym, liczba czynników $A B C \dots$, między którymi nie umiano dokonać przekonującego wyboru, stała się jeszcze większa. Dobrą ilustracją do stanu badań nad ruchami *Browna* przed ukazaniem się prac *Einsteina* i *Smoluchowskiego* jest list *Feliksa Exnera* do *Smoluchowskiego* pisany w roku 1900: „Cieszy mnie bardzo — czytamy o ruchu *Browna* — że uważa Pan, iż jest on dostępny dla teoretycznego wykorzystania, gdyż dotychczas zawsze słyszałem, że nie wiadomo,

co z nim począć. Ja w ubiegłych latach daremnie łamałem sobie głowę, jak się zabrać do tej historii²⁾“.

Jak wiadomo, podane schematy indukcyjne odpowiadają metodom stosowanym w naukach tzw. ścisłych tylko w pewnej, raczej wstępnej fazie badań. Dopiero przy ujęciu ilościowym dotykamy właściwego nerwu tych nauk. Zbliża się do tego Millowski kanon zmian towarzyszących, według którego czynnik A pociąga za sobą jako stałe następstwo α , jeżeli przy zmianie A zmienia się α :

$$A_1 B C \text{ — } \alpha_1 \beta \gamma$$

$$A_2 B C \text{ — } \alpha_2 \beta \gamma$$

W naukach przyrodniczych nadaje się tej regule nieco inny sens; nie tylko chodzi o stałe następstwo, lecz o wykrycie zależności i znalezienie rodzaju zależności, jej ilościowej strony. Dopiero znając rodzaj zależności interesującego nas zjawiska od szeregu czynników, czujemy się w posiadaniu kryterium pozwalającego uznać, że to i to jest przyczyną. Twierdzimy np., że ruchy Browna spowodowane są przez ruch molekularny ośrodka. Tak, gdyż sposób zależności ruchów Browna od temperatury; promienia ziarnka i od lepkości oraz jego niezależność od innych czynników jest w zgodzie z tym twierdzeniem. W praktyce nauk przyrodniczych mamy więc szereg ogniw pośrednich. Promień ziarnka na pewno nie jest przyczyną ruchu, ale zależność natężenia ruchu od promienia może być cenną wskazówką.

Jeżeli z tego punktu widzenia wrócimy do historii naszego zagadnienia i zapytamy, jakie zależności ilościowe znaleziono przed Seddigem i Perrinem, to wypada odpowiedzieć słowami, których Smoluchowski użył w tym samym związku: „w ogóle — czytamy u niego — żadnych dokładniejszych badań nad tym zjawiskiem nie wykonano, mimo, że każdy przyrodnik obserwował je odtąd tysiące razy²⁾. Zwróćmy uwagę na to, iż nie chodzi teraz o interpretację, o domysły natury teoretycznej, chodzi o wyniki obserwacji. Oto przykłady:

Zależność natężenia ruchu Browna od promienia ziarnka — Naegeli: nie; Exner: tak; od barwy padającego światła — Wiener: tak; Meade Bache: nie.

²⁾ Z monografii autora o M. Smoluchowskim, która ukaże się w P. W. N.

Nie umieściłem w tym zestawieniu innych sprzecznych twierdzeń dotyczących np. pytania, czy ruch zależy od różnicy temperatur między cieczą i otoczeniem (Quincke: tak; Exner: nie) ze względu na rolę momentów teoretycznych; pominąłem też sprawę oddziaływania wzajemnego ziarenek (C. Fuchs: tak; Brown oraz Ramsay: nie) i spostrzeżenie Cantonięgo wskazujące, iż zachodzi jakoby zależność od ciepła właściwego ziarenek.

Czy wolno przypisać ten pod każdym względem niezadowolający stan rzeczy trudnościom eksperymentalnym lub po prostu pomyłkom? Pomyłki, niestety, zdarzają się w nauce. Przytoczymy przykład z lat ostatnich. W roku 1946 V. F. Hess stwierdził, że natężenie promieni γ wysyłanych przez granit jest po dwakroć większe niż wypada z zawartości potasu, toru i uranu w granicie. Poświęcił on tej sprawie dalszą pracę rozpatrując cały szereg procesów jądrowych jako ewentualne przyczyny tego zjawiska. Rzecz rozwiązała się w sposób nieoczekiwany. Hess opierał się na wyniku Graya i Tarranta, że 1 g potasu równoważny jest $1,6 \cdot 10^{-11}$ g radu. Okazało się, że liczba ta jest za niska o cały rząd wielkości. Jednakże nie w tym zawiera się właściwa pomyłka Graya i Tarranta. Podając swój wynik autorzy ci podają zarazem, że liczba ich jest w zgodzie z uprzednimi badaniami Behouneka i cytują jego wynik jako $1,3 \cdot 10^{-11}$. Tymczasem Behounek³ znalazł $1,3 \cdot 10^{-10}$. Podobnie jawną pomyłką jest twierdzenie Meade Bache, że ruchy Browna zachodzą tylko w wodzie.

Jednakże w przypadku ruchów Browna niepowodzenia były zbyt liczne i zbyt długo trwające i raczej nasuwa się myśl, że badania obarczone były czymś w rodzaju błędu systematycznego. Jakież on mógł być, ten błąd systematyczny? Spójrzmy jeszcze raz na kanony indukcyjne. Od Browna do Einsteina wysilek badających skierowany był wyłącznie na czynniki ABC... Chodziło np. o znalezienie takiego A spośród ABC, by jego zmiana pociągała za sobą zmianę natężenia ruchu α :

$$A_1 - \alpha_1$$

$$A_2 - \alpha_2$$

Co do następnika α , nie miano wątpliwości — był to przecież ruch oglądany pod mikroskopem. Tymczasem tu właśnie kryła się zasadzka.

Za miarę ruchu uważano oczywiście prędkość i w ten sposób mierzono wielkość złudną. Dopiero kiedy Einstein szczęśliwym posunięciem znalazł wzór na ruch tego rodzaju, sprawa się wyjaśniła. Okazało się, że właściwym miernikiem jest przesunięcie w ciągu określonego czasu (dokładniej — średni kwadrat przesunięcia). Gdyby bowiem prędkość lub jej średnia wartość była wielkością charakterystyczną, droga musiałaby być proporcjonalna do czasu, wzór Einsteina natomiast pokazuje, że jest ona proporcjonalna do pierwiastka z czasu. Wypiszemy to wyraźnie. Oznaczając prędkość przez v , czas przez t , otrzymujemy na drogę:

$$s = vt \text{ lub } s^2 = v^2 t^2$$

i po przejściu do wartości średnich:

$$\overline{s^2} = \overline{v^2 t^2}. \quad (\text{I})$$

Wzór Einsteina natomiast brzmi:

$$\overline{s^2} = Ct. \quad (\text{II})$$

W badaniach przed Einsteinem stosowano wzór (I), prawdziwy jest wzór (II). Wzory te prowadzą do wyników sprzecznych, chyba że t ma wartość stałą, np. równą 1. Zgodność między obserwacjami mogła więc zachodzić tylko, jeżeli wszyscy obserwatorzy notowali położenie ziarnka po upływie tego samego czasu, np. po upływie sekundy. Rozumie się, że tak nie było. To było jednym z powodów owych rozbieżności i braku zdecydowanych wyników w badaniach nad ruchami Browna przed r. 1906. Objąsnimy sytuację na przykładzie. Przypuśćmy, że obserwujemy ruch Brownowski pewnego ziarnka. Przypuśćmy, że promień ziarnka, że temperatura i lepkość cieczy są tak dobrane, iż wielkość C równa jest jedności. Ze wzoru (II) możemy wyliczyć $\overline{s^2}$; np. po jednej sekundzie $\overline{s^2}$ wyniesie 1. Ponieważ wzór Einsteina jest prawdziwy, tę samą wartość otrzymamy z pomiarów. Obserwator nie znający wzoru Einsteina znalazłby wartość podstawiał do (I), by wyliczyć prędkość. W naszym przykładzie

$$\overline{s^2} = 1, \quad t = 1,$$

$$\text{zatem } \overline{v^2} = 1. \quad (\text{III}).$$

Przypuśćmy teraz, że inny obserwator bada to samo ziarnko w tych samych warunkach. Przypuśćmy jednak, że notuje on położenie ziarnka

nie co sekundę, lecz co 2 sekundy. Ze wzoru Einsteina można przewidzieć rezultat jego pomiarów. Otrzyma on, że $\overline{s^2} = 2$. Stąd biorąc pod uwagę, że $t = 2$, obserwator znajduje z równania (1), że

$$\overline{v^2} = 1/2, \text{ por. (III).}$$

Obserwacje były poprawne, zjawisko to samo, ale wyniki są sprzeczne.

Zastąpienie równania (I) przez (II) ma cechy paradoksu. Dlaczego nie wolno nam charakteryzować ruchu (w którym średnio biorąc nie ma przyspieszenia) przez prędkość? Odpowiedź brzmi: To, co widzimy, patrząc na ziarnko Browna, nie jest wcale prawdziwym ruchem ziarnka. Widzimy tylko wypadkową szybko po sobie następujących „kroków“, wywoływanych przez fluktuację uderzeń, zbyt drobnych, by można je dojrzeć oddzielnie; dopiero ich przewaga w pewnym kierunku daje dostrzegalne przesunięcie³⁾. Ze względu na zachodzenie ruchów wstecznych przesunięcie nie jest proporcjonalne do czasu, lecz odpowiada wzorowi Einsteina — Smoluchowskiego (który zresztą staje się fałszywy dla czasów zbyt małych). Jest interesujące, że Einstein jeszcze w roku 1905 wyprowadził wzór charakterystyczny dla ruchów Browna, jednakże bez wyraźnej intencji zastosowania go do tego zjawiska, tak, iż Perrin mógł powiedzieć, że Einstein podał teorię zjawiska, o którego istnieniu nie wiedział. Słowa Perrina zawierają pewną przesadę — Einstein wspomina o ruchach Browna w owej rozprawie, waha się jednak, czy jego wzór odnosi się do tego zjawiska. Dopiero w pracy z r. 1906 stawia sprawę wyraźnie.

Rzucmy jeszcze okiem na badania późniejsze, podjęte po wyjaśnieniu sytuacji. W przeciwieństwie do okresu poprzedniego rysują się dość wyraźnie pewne linie rozwojowe. Główna z nich prowadzi od eksperymentalnego potwierdzenia wzoru Einsteina do realizacji idei Smoluchowskiego o ruchach Browna ciał makroskopowych. Równocześnie zakres badań rozszerza się, obejmuje ruch brownowski ładunków elektrycznych przewodnika, dotyczy granicy czułości przyrządów pomiarowych itd. Nowe sposoby obserwowania, jak np. swoista

³⁾ W roku 1938 E. Kapplerowi (Ann. d. Psys. 31, 377 (1938)) udało się wykonać doświadczenie nad ruchami Browna, w którym mógł zaobserwować prawdziwy ruch; ciałkiem badanym było zwierciadelko zawieszzone na cienkiej nitce kwarcowej grubości kilku dziesiątych mikrona.

metoda fotograficzna, zastosowana przez Wawilowa i Brumberga⁴ w roku 1932, rozszerzają badania i kontrolują nowymi środkami dawniejsze eksperymenty. Nie znaczy to, że wszystkie prace dawały teraz wyniki zgodne. Jako przykład podamy pracę przypominającą badania Regnaulda. W r. 1927 i 1935 V. Pospisil⁵ znalazł, że powiększenie natężenia światła zwiększa średni kwadrat przesunięcia o kilkanaście procent. Fürth i Zimmermann⁶ (1935) wykazali, że rezultaty te były błędne. Autorzy ci potwierdzili jednak inny wynik Pospisila, dotyczący wpływu światła spolaryzowanego. Wykryło więc nowy czynnik, ale odkrycie to nie obaliło rezultatów poprzednich — uzupełniło je.

Zajrzyjmy teraz do dzieła Lukrecjusza. Urywek, który wchodzi w grę, znajdujemy w księdze drugiej (str. 54 i 55 polskiego wydania, 1923). Czytamy o tajnych ruchach materii, o niewidzialnych ciosach, spadających na ciała, o zmianie drogi „to tu, to tam, na wszystkie zewsząd strony“ i z wielką wyrazistością powstaje przed nami ów obraz, z pomocą którego i dziś wprowadzamy początkującego, objaśniając ruchy Browna. Pewne sprostowanie jest jednak konieczne. Lukrecjusz w ten sposób tłumaczy ruch ciałek „wichrzących“ w promieniach słonecznych (a więc zjawisko dostrzegalne w przeciwieństwie do uwagi Perrina). Obraz pyłków tańczących w słońcu miał swoją tradycję w historii atomistyki. Znajdujemy wzmiankę u Arystotelesa, że myśl o atomach nasunęło Leucypowi właśnie to zjawisko. Piękno jego musiało pociągać Lukrecjusza, wróżącego sobie wieniec sławy poetyckiej i z podziwem czytamy jego opis, jednak ruch pyłków widzialnych gołym okiem ma inne przyczyny niż ruch Browna.

Wróćmy jednak do tematu głównego. Niepowodzenia, a zwłaszcza sprzeczne wyniki, w ciągu tylu lat prześladowujące badania nad ruchami Browna, wiążą się z błędnym, jakkolwiek z całą oczywistością się narzucającym, obiorem „jednostki właściwej“. Zagadnienia tego rodzaju są rozpatrywane w metodologii nauk. Jednak nie omówiono bodajże w tej dyscyplinie⁴⁾ dotychczas przykładu, w którym wybór niewłaściwej miary w tak zdradliwy sposób prowadził na manowce uczonego, fałszując wyniki eksperymentów i zaslaniając charakter ca-

⁴⁾ Fizykowi jest oczywiście (od prac Einsteina i Smoluchowskiego) dobrze znane, że nie prędkość charakteryzuje ruchy Browna, lecz średni kwadrat przesunięcia.

lego zjawiska. Pomyślmy dla porównania o zagadnieniu, co jest miarą powinowactwa chemicznego⁵⁾. W tym przypadku, a do pewnego stopnia także w słynnym sporze Leibniza i szkoły Decartes'a co do „siły“ ruchu, kwestia miary była kwestią jawną — w przypadku ruchów Browna wystąpiła w postaci zamaskowanej. Zasluguje na uwagę, że rozwiązanie otrzymano w sposób pośredni. Znalezione je nie myśląc właściwie o ruchach Browna. Zasluguje dalej na uwagę, że znalezienie miary dla danego zjawiska było zarazem ujawnieniem jego prawdziwych przyczyn. Jeżeli bowiem miarą ruchu jest nie prędkość, lecz przesunięcie w określonym czasie (właściwie średni kwadrat przesunięcia), wiemy zarazem, że mamy do czynienia ze zjawiskiem podlegającym prawom statystycznego nakładania się elementów. Mamy tu piękny przykład powiązania stron na pozór odrębnych: mierzeniu, jeżeli ma być skuteczne, towarzyszyć musi teoretyczne rozjaśnienie, choć na pierwszy rzut oka mogłoby się здаwać, że pomiar jest czynnością niezależną, czynnością, która może być izolowana. Istotnie poprawny pomiar pozostanie poprawnym, lecz minie się z celem, jeżeli mierzący nie ma właściwego — by użyć znanych słów P a w ł o w a — „ogólnego wyobrażenia o przedmiocie“.

LITERATURA

1. G ł a g o l e w W. F. — O widach induktywnych umozakluczeni. Filosofskie Zapiski. Ak. Nauk SSSR, III, 180—207 (1950), w szczególności str. 194.
2. S m o l u c h o w s k i M. — Pisma, tom III, str. 21.
3. G l e d i t s c h i G r a f. — Phys. Rev. 72, 640 (1947), oraz H e s s V. F. — Phys. Rev. 72, 609 (1947) i 73, 916 (1948).
4. W a w i ł o w i B r u m b e r g. — Zschr. f. Phys. 73, 11 (1932).
5. P o s p i s i l V. — Ann. d. Phys. 23, 259 (1935).
6. F ü r t h i Z i m m e r m a n n. — Ann. d. Phys. 24, 183 (1935).
Zestawienie najważniejszych prac dotyczących teorii ruchów Browna czytelnik znajdzie w artykule Chandrasekhara, ogłoszonym w Rev. of Mod. Phys. 15, 87 (1943) i w Izdat. Inostr. Lit. M—L, 1947; pewien wybór w pracy autora „Ruchy Browna ciał promieniotwórczych“, Ann. U.M.C.S., vol. IV, 1, 1 (1949).

⁵⁾ Według Berthelota miało nią być ciepło wyzwalone przy reakcji, od van't Hoffa przyjmujemy, że jest nią praca otrzymana, jeżeli proces prowadzimy izotermicznie, na drodze odwracalnej.

Jeżeli chodzi o historię tego zagadnienia, por. G. L. de Haas-Lorentz „Die Brownsche Bewegung und einige verwandte Erscheinungen, Braunschweig, 1913, a także M. Smoluchowski „Zarys kinetycznej teorii ruchów Browna“, Pisma, tom I, str. 490.

Р Е З Ю М Е

В настоящей работе автор подвергает обсуждению поводы, вследствие которых броуновское движение оставалось загадкой в течение многих десятков лет. Не прения по интерпретации этого загадочного явления являются исходной точкой для настоящего доклада, а тот факт, что наблюдения и экспериментальные исследования постоянно приводили к противоречивым результатам. Все эти неудачи связаны с проблемой методологического характера, а именно с вопросом соответственной единицы, и кроме того бросают некоторый свет на применение индуктивных методов.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit enthält eine Darlegung der Gründe, die das Wesen der Brownschen Bewegung in so eigentümlicher Weise verschleiert haben. Nicht der Streit um die Interpretation der Erscheinung bildet den Ausgangspunkt der Darstellung, sondern die Tatsache, dass die experimentellen Untersuchungen vor dem Jahre 1906 immer wieder zu widersprechenden Ergebnissen geführt haben. Diesen Misserfolgen liegt eine methodologische Frage zu Grunde, nämlich das Problem des wahren Masses. Ein gewisses Licht fällt dabei auf die induktive Methode.

