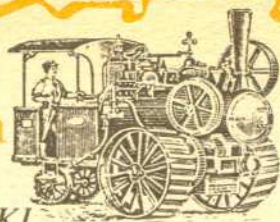


# Pole czy materia



Doc. dr Michał ŚWIĘCKI

W XIX wieku powstała idea, która oprócz swych ogromnych, znanych sukcesów zawiera wciąż niedocenioną szansę zbudowania podstaw fizyki na zupełnie nowym zestawie pojęć i przyrządów. Ideą tą jest elektrodynamika Maxwella-Faradaya i związana z nią koncepcja pola fizycznego.

Podstawą pierwszej w ogóle teorii fizycznej, mechaniki newtonowskiej, jest pojęcie siły. Siła jest przyczyną wszelkich przyspieszeń ciał. Na znanych już w XVII wieku prawach sił (prawo ciężenia, prawo sprężystości, prawo tarcia) oparto też budowę podstawowych przyrządów mechanicznych. Siła, której źródłem było z definicji jakieś ciało zewnętrzne, musiała działać w kierunku od albo do tego źródła. Nie było bowiem żadnego niematerialnego przekaźnika sił, który mógłby zmienić ten podstawowy kierunek. Fakt ten był szczególnie drastyczny dla siły powszechnego ciężenia, która będąc, jak trzeba, siłą przyciągającą, musiała przy tym działać natychmiastowo na kosmiczne nawet odległości. Niepokoiło to samego Newtona, ale nie widać było żadnego powodu, żeby w systemie mechaniki wprowadzić jakiegokolwiek zmiany. Przeciwnie, system ten dostarczał wciąż nowych dowodów swej doskonałości. Przypomnijmy choćby XIX-wieczną już historię odkrycia Neptuna.

Mechanika Newtona miała pewną ważną własność. Zasady dynamiki wraz z jedną znaną siłą elementarną, siłą powszechnego ciężenia, tworzyły system zwarty. Można było wyobrazić sobie Wszechświat złożony jedynie z doskonale sztywnych ciał pozbawionych struktury wewnętrznej i Wszechświat taki działałby ściśle według praw Newtona. Zresztą strukturę wewnętrzną ciał wyobrażano sobie podobnie — jedynie siły wiążące ciała nie miały być podobne do grawitacji, miały działać nie poprzez próżnię, ale raczej za pomocą pewnych niejasnych więzów materialnych. I wprawdzie znano już pewne zjawiska elektryczne i magnetyczne, ale mało kto interesował się nimi poważnie.

Dlatego odkrycie w 1785 r. ścisłych praw rządzących oddziaływaniem ładunków elektrycznych i biegunów magnetycznych stanowiło istotny przełom w fizyce. Prawa Coulomba okazały się zupełnie podobne do prawa ciężenia, choć odkryte siły mogły być również odpychające. Prawa te zostały oczywiście sformułowane w oparciu o mechaniczne przyrządy pomiarowe (waga skręceń), zaś nowe siły zostały wprowadzone jako pewnego rodzaju odstępstwa od praw sił uprzednio znanych. Trzeba było tylko wprowadzić niegrawitacyjne źródła sił elektrycznych. Tak powstała ścisła definicja ładunku elektrycznego. I chociaż pojawił się on dla wyjaśnienia niezgodności znanych praw sił z obserwacjami, to system mechaniki wcale przy tym nie ucierpiał. Pojawił się jedynie nowy problem mechanicznego wyjaśnienia istoty ładunku. Tej sprawie w gruncie rzeczy były poświęcone XIX-wieczne badania zjawisk elektromagnetycznych.

Badania te zaczęły się od katastrofy. Oersted odkrył siłę oddziaływania magnesu i przewodnika z prądem elektrycznym,

która nie była ani odpychająca, ani przyciągająca. Działała w kierunku prostym do kierunku źródła. W tej sytuacji należało albo zburzyć doskonały system mechaniki newtonowskiej, albo założyć, że siły elektromagnetyczne mają jakiś nieznaną nośnik materialny. Wybrano, jak wiemy, to drugie rozwiązanie, a ów nośnik nazwano *polem*.

Od tego czasu właśnie pole (elektryczne, magnetyczne, a także grawitacyjne) było źródłem siły, a źródła dotychczasowe (ładunki, masy) jedynie pole to wytwarzały i ulegały jego działaniu. Faraday tak silnie wierzył w realność pola, że rozpoczął doświadczenia, których istotą był nie ruch ładunków i magnesów, ale wytwarzanych przez nie pól. W ten sposób odkryto zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Wreszcie Maxwell ułożył równania dla pola elektromagnetycznego, z których wynikało, że pola te mogą się poruszać zupełnie niezależnie od jakichkolwiek ładunków i magnesów. Hertz wkrótce odkrył te tzw. fale elektromagnetyczne doświadczalnie i zbadał falowe ich własności.

Okazało się zresztą, że zjawiska elektromagnetyczne wyjaśniają ogromną ilość niepowiązanych uprzednio faktów i własności materii. Na początku XIX wieku, dzięki doświadczeniom Younga runęła newtonowska, korpuskularna teoria światła. Światło okazało się, zgodnie z niemożliwą dotychczas teorią Huygensa, falą. Odkryto też chemiczne działanie światła, a co więcej stwierdzono, że nie tylko światło, ale i krótkofalowy, niewidoczny kraniec poza jego widmem wywiera wpływ chemiczny na chlorek srebra. Badania te doprowadziły do powstania pierwszej fotografii, tzw. dagerotypu. Zidentyfikowano też działanie ciepłe długofalowego pozawidzialnego krańca. Oba rodzaje promieniowania niewidzialnego, zwane odąd ultrafioletowym i podczerwonym wykazywały wszystkie typowe dla światła własności przy odbiciu, załamaniu, interferencji i dyfrakcji.

W tym czasie znane już były prace Faradaya dowodzące istnienia pewnych związków pomiędzy światłem i zjawiskami elektromagnetycznymi (skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła w polu magnetycznym). Dlatego, kiedy Maxwell udowodnił, że pojawiające się w jego równaniach fale elektromagnetyczne muszą poruszać się z prędkością światła, stało się jasne, że wszystkie rodzaje promieniowania to po prostu nic innego tylko fale elektromagnetyczne. Pod koniec stulecia odkryto jeszcze jeden rodzaj tych fal — promienie X (Roentgena).

W ciągu tych samych lat fizycy nabrali też przekonania, że cała struktura wewnętrzna materii może być wyjaśniona przez przyjęcie założenia, że jej elementy są obdarzone ładunkiem elektrycznym. Pierwsze sugestie tego typu znajdują się już w pracach Volty nad budową ogniwa i Faradaya nad zjawiskiem dysocjacji elektrolitycznej. Pod koniec XIX wieku Lorentz stworzył konsekwentną teorię budowy materii opartą na tym założeniu i wyjaśniającą podstawowe elektromagnetyczne i optyczne własności ciał. Do wyjaśnienia pozostała jedynie struktura elementów składowych materii, atomów.

Tak wielkie sukcesy elektrodynamiki i ugruntowany już poprzednio sukces mechaniki w naturalny sposób prowadziły do prób połączenia tych teorii. Od samego zresztą początku fizycy badający elektromagnetyzm przedstawiali go w terminach zapożyczonych z mechaniki. Faradayowskie linie sił były bardzo mechaniczne i składały się z rozłożonych w sposób ciągły centrów sił elektrycznych i magnetycznych. Konsekwentnie też Faraday był przeciwnikiem korpuskularnej teorii budowy samej materii, którą również uważał za pewien ciągły rozkład centrów sił.



Mechaniczna siła miała być jedynym podstawowym pojęciem przyszłej teorii. Faradayowi nie udało się rozwinąć dalej tej koncepcji materii bez materii. Tym bardziej że coraz więcej faktów przemawiało na korzyść teorii kinetyczno-molekularnej. Maxwell był już jej gorącym zwolennikiem i współtwórcą. To nie materia miała być według niego polowa, ale pole materialne. Fale elektromagnetyczne powinny, zdaniem Maxwella, rozchodzić się w doskonale sprężystym ośrodku materialnym — eterze — złożonym pewnie z cząsteczek. Rozpoczęły się bezskuteczne prace nad zbudowaniem modelu takiego ciała sprężystego, które przenosiłoby jedynie fale poprzeczne.

Nie należy się dziwić wysiłkom poświęconym konstrukcji modelu eteru. W równaniach Maxwella ciała materialne były źródłami pola elektromagnetycznego, które z kolei działało siłą na inne ciała materialne. Występowała dwoistość pojęć, którą należało oczywiście usunąć. Faraday proponował usunąć materię, Maxwell — pole. Żaden z nich nie proponował usunięcia siły.

Wzór na siłę musiał być dopisany do równań Maxwella. Podobnie jak i równania dynamiki Newtona. Bez tego elektrodynamika stawała się pozbawiona jakiegokolwiek sensu fizycznego. Na pojęciu siły było też oczywiście oparte działanie wszelkich przyrządów elektrycznych i magnetycznych.

Konieczność dopisania równań mechaniki do równań pola brała się między innymi z liniowości równań Maxwella. Wynika z niej, że pole, którego źródłem są dwa ładunki elektryczne, jest równe sumie pól wytworzonych przez każdy z ładunków oddzielnie. Fakt ten jest jednak prawdziwy jedynie dla ładunków nieruchomych umocowanych przy pomocy pewnych sił zewnętrznych. Ładunki swobodne muszą poruszać się i to niejednostajnie pod wpływem wzajemnego oddziaływania (za pośrednictwem pola), sumaryczne pole staje się zmienne w czasie, pojawia się promieniowanie i zasada dodawania pól przestaje mieć jakikolwiek związek z rzeczywistością. Dzięki dopisaniu równań dynamiki elektrodynamika pozbawiona sił zewnętrznych staje się więc teorią nieliniową. Przy czym nie jest to nieliniowość ani w równaniach mechaniki, ani teorii pola. Bierze się ona jedynie ze wzoru na siłę wywieraną przez pole elektromagnetyczne na ładunki i prądy elektryczne. Fakt ten niewątpliwie niepokoił Maxwella. Okazało się, że słusznie.

Nieliniowe sprzężenie mechaniki i elektrodynamiki jest źródłem pewnej istotnej niespójności teorii. Okazuje się bowiem, że uzyskana przy okazji nieliniowość równań dynamiki prowadzi do słabego naruszenia pierwszej jej zasady. Naładowana elektrycznie pojedyncza cząstka powinna sama się przyspieszać, a w konsekwencji również promieniować. Narusza to między innymi zasadę zachowania energii. Prawda, że naruszenie to jest bardzo słabe i może mieć znaczenie jedynie dla zjawisk wewnątrzatomowych. Niemniej jednak elektrodynamika wraz z mechaniką przestają być systemem zwartym w sensie

newtonowskim. Nie może istnieć świat działający jedynie w oparciu o ten system.

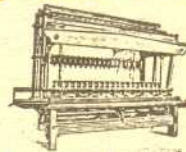
Wybiegnijmy nieco poza wiek XIX. Postawił on przed fizykami podstawowy problem wyeliminowania z teorii albo pojęć mechanicznych, albo polowych. Zagadnienie to stało się zresztą wkrótce znacznie bardziej drastyczne. Praca Einsteina z 1905 r. pozbawiła fizyków resztek nadziei na istnienie materialnego eteru. Równocześnie zatriumfowała też kinetyczno-molekularna teoria materii, a nawet światło okazało się mieć czasami własności korpuskularne. W tej sytuacji Einstein poszedł faradayowską drogą teorii niematerialnego pola i wyeliminował przy okazji również newtonowskie pojęcie siły. Pole sił grawitacyjnych zostało zastąpione przez własności zakrzywionej przestrzeni, równania pola okazały się nieliniowe, zaś równania ruchu mogły być z nich po prostu wyprowadzone. Równania dynamiki Newtona, jak i samo pojęcie siły grawitacyjnej stały się dobrymi, w warunkach ziemskich, przybliżeniami równań dla przestrzeni. Niestety, nie można było opierając się o pierwotne dla teorii Einsteina pojęcia związane z krzywizną przestrzeni zbudować odpowiednich przyrządów fizycznych. „Siły” grawitacyjne są na to za słabe, a żadnych innych oddziaływań nie udało się dotychczas zgeometryzować.

W tej sytuacji fizyka XX wieku poszła zupełnie inną drogą. W czasie badania własności atomu szybko odkryto istotne odstępstwa od elektrodynamiki. Nazwano je oddziaływaniami silnymi i słabymi. Oddziaływania te bada się oczywiście za pomocą klasycznych przyrządów elektromagnetycznych, w których pojęcie siły spełnia podstawową funkcję. Powiedzieliśmy, że pojęcie to jest raczej zewnętrzne w elektromagnetycznej teorii pola niematerialnego. Co więcej, zgodnie z XVII-wiecznymi już kanonami fizyki przyrządy muszą działać w sposób przez nas kontrolowany. Tylko wtedy bowiem przeprowadzone doświadczenia mogą być nazwane pomiarami. Kontrolujemy więc siły działające w przyrządach elektromagnetycznych używanych do badania zjawisk atomowych, a więc takich, dla których elektrodynamika nie jest systemem zwartym. I to właśnie przez wprowadzenie do niej sił. Dla takich zjawisk siła nie może być uważana w ogóle za wewnętrzne pojęcie teorii. Nic więc dziwnego, że własności zarówno elektromagnetycznych zjawisk atomowych, jak i oddziaływań wylamujących się jawnie z elektrodynamiki okazały się statystyczne. Wtedy kanonizowano pojęcie zewnętrznego w stosunku do teorii przyrządu klasycznego. Tak powstała mechanika kwantowa i kwantowa teoria pola, teorie, które po prostu nie istnieją bez przyrządów pomiarowych. Tak też wykorzystano spuściznę, jaką pozostawił XIX wiek. Faraday, który nie znał matematyki i nie rozumiał prac Maxwella, wymyśliłby może coś lepszego. Gdyby na przykład zdążył wykorzystywać po swojemu oczywistą własność linii sił, których osobliwym punktem skupienia były ładunki. Dla Maxwella ładunki były źródłem pola, a nie jego własnością. Reszta historii jest tego prostą konsekwencją.

E. T. Bell w swojej książce „Men of Mathematics” przytacza następującą anegdotkę o Kelvinie. Miał on kiedyś zapytać klasę: „Czy wiecie, kto to jest matematyk?”. Podszedł do tablicy i napisał na niej

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}.$$

Wskazując palcem na to, co napisał, zwrócił się do klasy: „Matematyk to ktoś, dla kogo to jest oczywiste tak jak to, że dwa i dwa daje cztery”.



Znany matematyk angielski, wybitny specjalista z teorii funkcji i analitycznej teorii liczb, John Littlewood (1885—1977) widzi tę sprawę inaczej. W swej książeczce „A mathematician's miscellany” (jest przekład rosyjski) napisał:

„Wiele rzeczy nie jest w ogóle dostępnych intuicji, na przykład wartość całki  $\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$ ”.