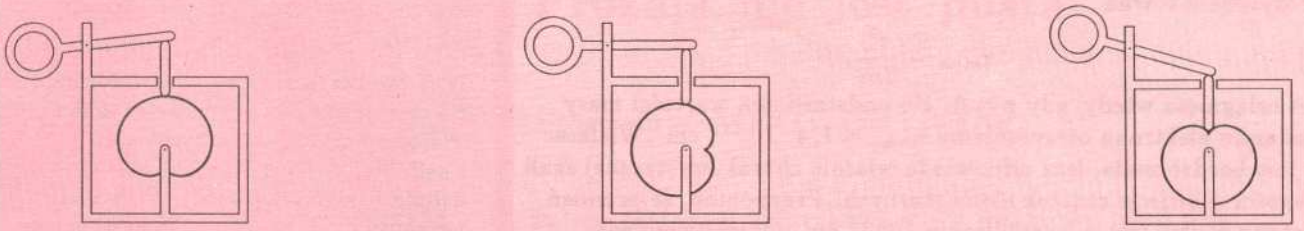


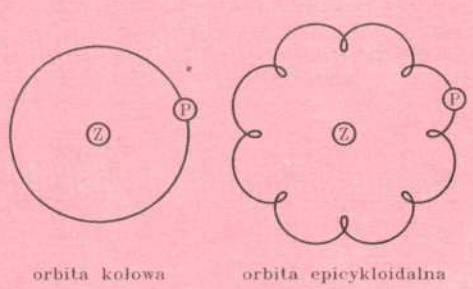
Rys. 7

a minimalna w początkowej i końcowej. Tego rodzaju płynność ruchu zabezpiecza urządzenie przed szybkim zużyciem oraz ułatwia przezwyciężenie siły bezwładności i siły tarcia w chwili rozruchu.

Historia krzywych cykloidalnych

Krzywymi cykloidalnymi interesowano się już od dawna. Już Arystoteles (384–332 p.n.e.) zajmował się różnymi paradoksami dotyczącymi toczenia się koła po prostej. Później Apoloniusz (około 262–200 p.n.e.) dla celów astronomicznych badał właściwości ruchu złożonego z ruchów kilku okręgów wzajemnie związanych. Opierając się na jego wynikach Hipparch (około 190–około 125 p.n.e.) wprowadził do opisu ruchu planet orbity epicykloidalne.

Za czasów Hipparcha przeważnie sądzono, że planety poruszają się wokół Ziemi z jednostajną prędkością po orbitach kołowych. Przeczyły temu jednak obserwacje, które wykazały, że niektóre planety (np. Mars i Wenus) w nieustannym ruchu z zachodu na wschód poruszają się raz wolniej, raz szybciej, ponadto co jakiś czas cofają się nieco na zachód, wykonują pętlę i dalej biegną ku wschodowi. Wprowadzenie orbit epicykloidalnych umożliwiło wytłumaczenie tego zjawiska, ponieważ epicykloidy wydłużone mają pętle, na których, oczywiście, zachodzi ruch wsteczny.



orbita kołowa orbita epicykloidalna

Rys. 8

Czy próżnia jest pusta?

Zaprezentowany w tym numerze artykuł S. Mrówczyńskiego *Próżnia nie jest pusta* pobudził redakcję *Delty* do ożywionej dyskusji, u piszącego zaś te uwagi wywołał gwałtowny sprzeciw. Wobec niemożności pogodzenia stanowisk dwóch reprezentantów fizyki w redakcyjnym gronie postanowiliśmy – idąc za sugestią Naczelnego – zaprezentować poglądy obydwu stron. A zatem: NIE ZGADZAM SIĘ Z PREZENTOWANYM MODELEM ZJAWISK ZACHODZĄCYCH W PRÓŻNI. Zanim przystąpię do wyłuszczania powodów mego sprzeciwu, chciałbym najpierw wyjaśnić, jak w ogóle możliwa jest sytuacja, w której sposób opisu zjawiska fizycznego zależy od widzimisię osoby opisującej: wszak fizyka pretenduje do miana nauki ścisłej. Otóż kluczem do zrozumienia jest tu słowo „model", świadomie użyte przeze mnie w wyróżnionym zdaniu, a pojawiające się także w drugim akapicie tekstu mego (miejmy nadzieję – chwilowego) adwersarza.

Czym jest model? Fizyka badając naturę nie jest na ogół w stanie sprostać jej złożoności. Skazana jest na maksymalne upraszczanie okoliczności i sprowadzanie zjawisk do warunków laboratoryjnych. Ale nawet wówczas, aby ująć opis rzeczywistości w kluby pojęć matematycznych, trzeba uciec się do pewnej idealizacji, konstrukcji myślowej, która oddaje jedynie najistotniejsze cechy badanego. Ta konstrukcja to właśnie model. Spotykamy się z nim już od początków nauczania fizyki. Modelem obiektu materialnego, którego rozmiary są małe w porównaniu z zakresem jego ruchu, jest punkt materialny. Modelem ciężarka bujającego się na cienkiej nitce jest wahadło matematyczne. Znamy model gazu doskonałego, model atomu Bohra-Rutherforda i wiele, wiele innych. Z założenia model nie pretenduje do roli pełnego opisu modelowanego zjawiska: albo oddaje tylko pewne jego cechy (model wahadła matematycznego opisuje ruch ciężarka, ale nie mówi nic np. o jego własnościach cieplnych), albo może być stosowany tylko w pewnych, ściśle sprecyzowanych warunkach (model punktu materialnego opisuje ruch Ziemi wokół Słońca, ale nie jej ruch dobowy). Ponieważ w wielu przypadkach nie jest oczywiste, jakie cechy rzeczywistości są istotne dla przebiegu zjawiska, a jakie nie, więc zbudowanie poprawnego modelu nie jest bynajmniej proste – **fizyka jest sztuką odrzucania tego, co mniej ważne**. I właśnie w tym miejscu wkracza do fizyki pewna dowolność indywidualnego osądu; spory o słuszność tego czy innego modelu są charakterystyczne dla dziedzin fizyki znajdujących się w trakcie tworzenia.

Cóż wiec mam do zarzucenia modelowi próżni przedstawionemu przez Staszka Mrówczyńskiego? Otóż, moim zdaniem, poprawny model nie może być wewnętrznie sprzeczny, a model, o którym mowa, kryterium tego nie spełnia. Po pierwsze, równanie (1) nie jest prawdziwe! Założenie, które legło u podstaw równania (1), że elektrony i pozytony oddziałują na siebie siłą Coulomba jest słuszne jedynie w przypadku statycznym, a nie wówczas, gdy obydwie cząstki krążą wokół siebie z prędkością bliską prędkości światła. W tym przypadku zagadnienie staje się niezmiernie skomplikowane i w ogólności – nierozwiązywalne. Zastrzeżenia dotyczące równania (1) nie są jednak decydujące. Równanie to, jak i wynikający z niego wzór (2) dadzą się utrzymać, jeśli znaki równości zastąpić równościami przybliżonymi lub równościami co do rzędu wielkości.

Znacznie poważniejszy jest następujący fakt: opisany stan nie jest stanem próżni, gdyż jego energia nie jest najniższa z możliwych. Co więcej, nie jest to stan stabilny. Istotnie, elektron i pozyton poruszają się z niezerowymi przyspieszeniami i – jak zwykle w takich przypadkach – tracą energię promieniując fale elektromagnetyczne, by po bardzo krótkim czasie spaść na siebie. Gdybyśmy jednak obeszli i tę trudność postulując istnienie pewnych dozwolonych orbit (nie podlegających klasycznemu prawu promieniowania) tak, jak w modelu Bohra atomu, to musielibyśmy wziąć jeszcze pod uwagę i to, że równanie typu (1) określa jedynie wkład do energii pochodzący od energii oddziaływania elektronu i pozytonu. Tymczasem w bilansie energii musimy uwzględnić także energie zawarte w polach elektrycznych wytworzonych przez obydwa ładunki. Energie te są nieskończenie duże i fakt ten prowadzi nas do nieuniknionego wniosku, że poprawnym stanem próżni w fizyce klasycznej jest stan pozbawiony jakichkolwiek obiektów materialnych – absolutna pustka.

Inaczej jest jednak w fizyce kwantowej, w szczególności, jeśli odwołać się do kwantowej teorii pola. Tutaj cząstki są jedynie wzbudzeniami wszechobecnych pól kwantowych, których usunąć się po prostu nie da, nawet ze stanu o najniższej możliwej energii. Co więcej, jedno z podstawowych praw fizyki kwantowej, zasada nieoznaczoności, mówi nam, że pola kwantowe nigdy nie mogą być w doskonałym bezruchu, lecz muszą one fluktuować. Fluktuacje te kreują pary cząstka – antycząstka. Dzieje się to jednak na bardzo małych odległościach. Możemy się o tym przekonać wypisując zasadę nieoznaczoności w postaci

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar$$

(Δp i Δx to nieoznaczoności pędu i położenia). Dla pary wykreowanej przez pole kwantowe nieoznaczoności pędu i położenia muszą być rzędu samych wielkości i wobec faktu, że $\Delta p \sim p \sim mc$, znajdujemy charakterystyczny rozmiar pary

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{mc},$$

co w przypadku elektronu daje liczbę rzędu 10^{-11} cm (porównaj z $r_{max} \sim 10^{-13}$ cm w modelu klasycznym). Zauważmy, że przy tym opisie, stworzenie pary elektron-pozyton narusza – niewzruszone zdawałoby się – zasady zachowania energii i pędu. Dzieje się to jednak nie tylko na bardzo małych odległościach, ale również przez bardzo krótki czas (przypomnijmy zasadę nieoznaczoności dla energii, $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$). Natura oszukuje więc samą siebie, a udaje się jej to, gdyż jest niesłychanie zręczną oszustką.

Kwantowa próżnia jawi się jako stan niezwykle niespokojny. W każdym jej milimetrze sześciennym rodzą się wciąż i nieomal natychmiast giną niezliczone ilości wirtualnych par. Podobnie jednak, jak w modelu klasycznym, ich krótkotrwałe istnienie prowadzi w obecności zewnętrznego pola elektrycznego do pojawienia się efektów polaryzacyjnych. I ten właśnie fakt opisywał poprawnie (choć tylko na poziomie jakościowym) model Staszka Mrówczyńskiego. By nie być zupełnie gołosłownym, przytoczę wzór na potencjał ładunku punktowego otrzymany w kwantowej teorii pola

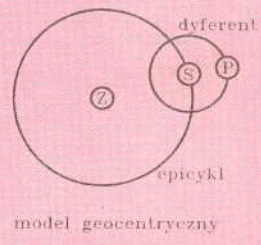
$$(*) \qquad \Phi(r) \simeq \frac{e}{r}\left(1 + \frac{e^2}{4\sqrt{\pi}} \frac{e^{-2mr}}{(mr)^{3/2}}\right) \quad \text{dla} \quad r \ll \frac{1}{m}$$

(przyjąłem tu jednostki, dla których $\hbar = c = 1$).

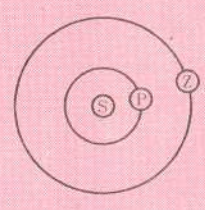
Czy próżnia jest więc pusta? Na pewno jest tak pusta, jak to tylko możliwe. Ale prawdziwa odpowiedź na to pytanie nie jest jednoznaczna i zależy od sposobu opisu oddziaływania. Przyjmując wzór (*) za prawo podstawowe doszlibyśmy zapewne do przekonania, że próżnia jest zupełną pustką. W pewnym sensie możemy więc mówić wymiennie albo o prostym oddziaływaniu, albo o prostym stanie próżni. Pierwszy sposób opisu rzeczywistości wydaje się być dużo bardziej płodny poznawczo i z tego powodu skłonni jesteśmy uznać, że próżnia jednak pusta nie jest.

Paweł KRAWCZYK

Dzisiaj wiadomo, że planety krążą wokół Słońca, a nie odwrotnie, orbity zaś mają kształt elips, a nie kół. Gdyby planety krążyły wokół Słońca po torach kołowych, to model Hipparcha byłby idealnie poprawny. No, bo jeśli za punkt odniesienia przyjąć Ziemię, wówczas Słońce wraz z planetą, którą ma na swojej orbicie, wirują wokół Ziemi (rys. 9) i wtedy ruch planety istotnie jest ruchem złożonym z ruchu po orbicie wokół Słońca (zwanej deferentem) i ruchu Słońca po orbicie wokół Ziemi (zwanej epicyklem). Oba te ruchy złożone razem dają ruch po epicykloidzie, co będzie jeszcze wyjaśnione później.



model geocentryczny



model heliocentryczny

Rys. 9

Nad ulepszeniem modelu Hipparcha pracował Ptolemeusz (około 85–165). Wprowadzając mnóstwo dodatkowych epicykli stworzył model systemu planetarnego tak dokładny, że przetrwał on ponad 16 stuleci, aż do czasu heliocentrycznego systemu Kopernika (1473–1543). Ale nawet Kopernik uległ magii krzywych cykloidalnych. Gdy pierwotny jego model, zakładający orbity kołowe w ruchu planet wokół Słońca okazał się niezbyt dokładny, zdecydował się powrócić do orbit cykloidalnych, często też z wielką liczbą epicykli. Dopiero Kepler (1571–1630) uwolnił system planetarny Kopernika od krzywych cykloidalnych, zastępując je elipsami.

Kopernik posługując się krzywymi cykloidalnymi odkrył ciekawą ich własność. Mianowicie można znaleźć taki stosunek promieni r/R, że krzywa cykloidalna będzie swoim kształtem przedstawiała okrąg – orbitę planety, a nawet odcinek – tor ruchu komety. Wystarczy wziąć „magiczny krążek", dla którego $R = 2r$.