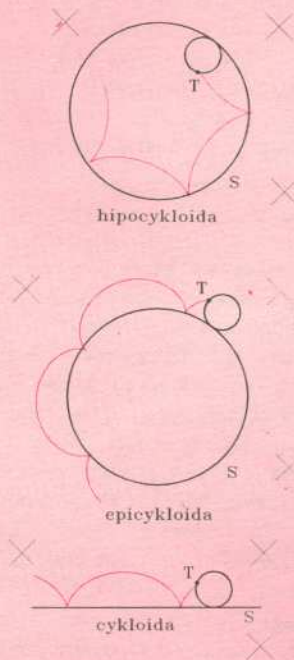


Próżnia nie jest pusta

Stanisław MRÓWCZYŃSKI

Szczególnymi przypadkami rulet są krzywe, które powstają w wyniku toczenia się okręgu po okręgu. Nazywają się one **krzywymi cykloidalnymi**. Jeśli okrąg T toczy się po wewnętrznej stronie okręgu S (tak, jak w przypadku „magicznego krążka”), to każdy punkt sztywno związany z okręgiem T wykreśla krzywą zwaną **hipocykloidą**. Jeśli T toczy się po zewnętrznej stronie S , dostajemy **epicykloidę**. Jeśli T toczy się po prostej (która może być traktowana jako okrąg o nieskończeniu dużym promieniu) dostajemy **cykloidę**.



Rys. 4

Wszystkie krzywe, które powstają za pomocą „magicznego krążka”, są hipocykloidami. Łatwo wyobrazić sobie analogiczne zestawy służące do kreślenia epicykloid i cykloid.

Wszystkie krzywe cykloidalne mogą występować w trzech odmianach: **skróconej, zwyczajnej i wydłużonej**, w zależności od tego, jak punkt P kreślący krzywą położony jest względem okręgu T . Jeżeli P leży wewnątrz okręgu T , dostajemy odmianę skróconą (jak w „magicznym krążku”), jeżeli na okręgu – zwyczajną, jeżeli na zewnątrz – wydłużoną.

Epicykloidy i hipocykloidy wszystkich trzech odmian zwane są też **trochoidami**.

Pojęcie próżni gra podstawową rolę w kwantowej teorii pola – teorii, która na obecnym etapie poznania struktury materii dostarcza najbardziej podstawowego opisu dynamiki wszelkich układów fizycznych. W powszechnym rozumieniu próżnia to stan doskonalej pustki. Jednak „pustka” jest trudna do określenia w terminach fizycznych, więc w kwantowej teorii pola przyjmuje się, że próżni odpowiada stan o zerowej energii (dokładniej: o najniższej energii, gdyż energia jest zwykle określana z dokładnością do stałej addytywnej) i zerowych ładunkach: elektrycznym, leptonowym, barionowym itd. Na pierwszy rzut oka takie określenie zdaje się właśnie odpowiadać pustce, lecz dokładniejsze jego rozważenie pokazuje, że w próżni może jednak „coś” być.

Poniżej przedstawię bardzo uproszczony klasyczny (tzn. niekwantowy) model, który jednak opisuje pewne cechy realnej próżni. Wyobraźmy sobie parę złożoną z elektronu (e^-) i pozytonu (e^+). Ponieważ pozyton jest antycząstką elektronu, całkowite ładunki pary – elektryczny i leptonowy, są równe zeru. Od czasu zapisania słynnej formuły $E = mc^2$ wiadomo, że masa jest równoważna energii, a zatem wydaje się, że istnienie pary e^+e^- wymaga dostarczenia energii odpowiadającej, co najmniej, dwóm masom elektronu. Jednak elektron i pozyton mają przeciwne ładunki elektryczne przyciągają się, więc energia ich elektromagnetycznego oddziaływania jest ujemna i może skompensować energię potrzebną na generację mas. W układzie środka masy pary, gdzie pęd elektronu jest przeciwny do pędu pozytonu, żądanie zerowej całkowitej energii pary wygląda następująco

$$(1) \quad 2\sqrt{m^2 + p^2} - \frac{e^2}{r} = 0,$$

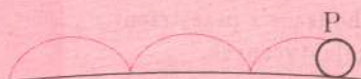
gdzie m jest masą elektronu, p jego pędem, e zaś ładunkiem elementarnym; r jest odległością między elektronem i pozytonem. Przyjęliśmy tutaj często stosowany w fizyce teoretycznej układ jednostek, w którym prędkość światła c i stała Plancka \hbar są równe jedności. Widzimy, że dla dowolnie dużego p istnieje rozwiązanie równania (1), gdyż człon odpowiadający elektrostatycznemu oddziaływaniu może być dowolnie duży.

Przedstawione rozumowanie pokazuje, że przestrzeń wypełniona parami e^+e^- , które w teorii pola nazywa się parami *wirtualnymi*, może odpowiadać stanowi o zerowej energii i ładunku, choć nie jest „pusta”. W teorii pola próżnię można wyobrażać sobie właśnie jako układ pojawiających się i znikających par, każda złożona z cząstki i antycząstki.

cykloida skrócona



cykloida zwyczajna



cykloida wydłużona



Rys. 5

Z równania (1) wynika, że maksymalna odległość między elektronem i pozytonem równa

$$(2) \quad r_{max} = \frac{e^2}{2m},$$

jest osiągnięta wtedy, gdy $p = 0$. Po podstawieniu wartości masy i ładunku elektronu otrzymujemy $r_{max} = 1,4 \cdot 10^{-13}$ cm. Wielkość ta jest bardzo mała, lecz odpowiada właśnie charakterystycznej skali długości w świecie cząstek elementarnych...Przypomnę, że promień protonu równy jest w przybliżeniu 10^{-13} cm. Oczekujemy więc, że istnienie w próżni par wirtualnych może wpływać na pewne zjawiska fizyczne. I tak się dzieje w istocie.

Gdy pole elektromagnetyczne rozchodzi się w próżni wypełnionej parami e^+e^- , jest ono zmodyfikowane w stosunku do sytuacji, w której pole rozchodzi się w idealnej „pustce”. (Ostatnie słowo ujęte jest w cudzysłów, gdyż, jak wynika z przeprowadzonego rozumowania, pojęcie pustki nie ma dobrego sensu fizycznego.) Dzieje się tak dlatego, że pole elektryczne indukuje moment elektryczny wirtualnej pary – średnie położenia elektronu i pozytonu nie pokrywają się, gdyż pole elektryczne działa w przeciwnych kierunkach na obdarzone przeciwnymi ładunkami elektron i pozyton. Tak więc próżnia polaryzuje się, czyli zachowuje się jak ośrodek dielektryczny.

Efekty wynikające z polaryzacji próżni są bardzo małe. Aby uzmysłowić sobie, jak małe, porównajmy momenty elektryczne pary wirtualnej i typowej molekuly. Charakterystyczny promień d molekuly wynosi 10^{-8} cm, więc moment elektryczny molekuly będzie rzędu $e \cdot d$, gdzie e jest ładunkiem elementarnym. Moment elektryczny wirtualnej pary będzie rzędu $e \cdot r_{max}$. A zatem moment pary jest sto tysięcy razy mniejszy niż moment typowej molekuly. Pomimo to efekty polaryzacji próżni są obserwowane doświadczalnie.

Atom wodoru – układ elektronu i protonu związanych przyciągającym potencjałem Coulomba, jest opisywany przez mechanikę kwantową, na gruncie której pokazano, że tylko pewne wartości energii atomu są dozwolone. Wartości te, zwane poziomami energii atomu wodoru, mierzone są z ogromną precyzją. Okazuje się, że fakt istnienia wirtualnych par w próżni, a co za tym idzie, efekt polaryzacji próżni, prowadzi do przesunięcia poziomów energetycznych, na skutek modyfikacji potencjału działającego między elektronem i protonem. Potencjał ten przy wzroście odległości zmniejsza się szybciej niż $1/r$, ponieważ pole elektryczne jest w próżni, jak i w innych ośrodkach dielektrycznych, ekranowane. Wspomniane przesunięcia poziomów energetycznych atomu wodoru zostały zmierzone i doskonale zgadzają się z wynikami teorii.

Ciekawi przedstawiciele rodziny cykloid

Niektóre krzywe cykloidalne wyróżniają się szczególnie ciekawymi własnościami. Wśród epicykloid są to kardioida i nefroida, a wśród hipocykloid – deltoid i asteroida (rys. 6). Własności nefroidy ($r/R = 1/2$) wykorzystuje się w urządzeniach optycznych, a kardioidy ($r/R = 1$) w urządzeniach optycznych, mimośrodowych i w przekładniach zębatych. Deltoid ($r/R = 1/3$), zwany też trójkątem Steinera, jest figurą, w której obszarze można obrócić odcinek o długości $2r$ o kąt pełny. Początkowo sądzono, że jest on najmniejszą spośród figur o tej własności, ale okazało się, że można znaleźć taką figurę o dowolnie małej powierzchni. Asteroida ($r/R = 1/4$) natomiast słynna jest jako obwiednia odcinka o długości $R/2$, którego końce ślizgają się po dwóch prostopadłych prostych.

Najbardziej jednak interesująca jest chyba cykloida, którą zajmiemy się później.

Wśród trochoid dużą popularnością cieszą się rozety trochoidalne i ślimaki Pascala. Rozety (rys. 6) są to trochoidy, dla których odległość punktu kreślącego od środka toczącego się koła wynosi $r + R$. Interpretowane są też jako trajektorie punktu poruszającego się w sposób harmoniczny (tam i z powrotem) po prostej obracającej się ze stałą prędkością wokół środka wahań punktu. Ślimaki Pascala natomiast są to epitrochoidy, dla których $r = R$ (czyli kardioidy zwyczajne, skrócone i wydłużone). Wchodzą one w skład trysektry. Za pomocą cyrkla, linijki i szablonu trysektry można dokonać podziału dowolnego kąta na trzy równe części (wiadomo, że za pomocą jedynie cyrkla i linijki nie jest to możliwe). Kształt ślimaków Pascala nadaje się też mimośrodom w semaforach, dzięki czemu prędkość ruchu ramienia semafora jest maksymalna w środkowej fazie ruchu,



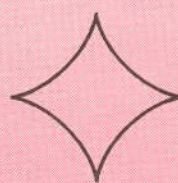
kardioida



nefroida



deltoid



asteroida



rozeta