

Mierzenie Wszechświata

Mgr Jacek

CHOŁONIEWSKI

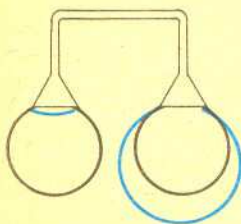


Rozwiązanie zadania F 179. Różnica ciśnień między wnętrzem bańki o promieniu R i otoczeniem jest równa

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R},$$

gdzie σ — napięcie powierzchniowe błony mydlanej.

Wynika stąd, że równowaga układu ma miejsce wtedy, gdy promienie bańek są takie same. Sytuacja przedstawiona w zadaniu odpowiada równowadze niestabilnej. Niewielkie zaburzenie prowadzące do zmniejszenia jednej z bańek spowoduje wzrost ciśnienia w jej wnętrzu i przepływ powietrza do drugiej bańki. Promień bańki będzie malał aż do momentu, gdy przyjmie ona kształt półsfery. Potem zacznie rosnąć. Nowy stan równowagi zostanie osiągnięty, gdy promienie krzywizny bańek ponownie się zrównają (rysunek). Jest to stan równowagi trwałej. Dlaczego?

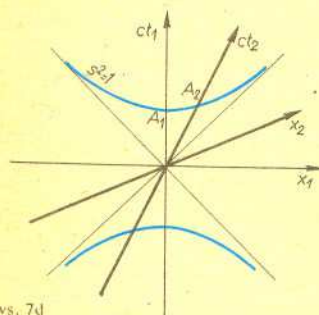


Planety, gwiazdy i galaktyki to trzy podstawowe rodzaje obiektów znajdujących się na niebie. Tematem tego artykułu jest przedstawienie metod, jakie zastosowano do wyznaczania ich rozmieszczenia w przestrzeni.

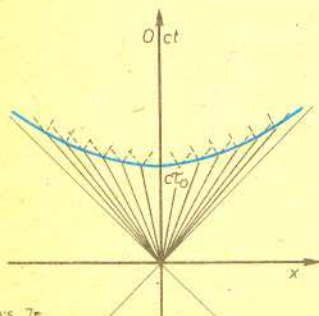
Ziemia wraz z pozostałymi ośmioma planetami krąży wokół Słońca wchodząc w skład Układu Słonecznego. Słońce z kolei jest jedną ze 100 miliardów gwiazd, jakie krążą wokół wspólnego centrum tworząc Galaktykę. Ruchy planet wokół Słońca oraz ruchy gwiazd wokół środka Galaktyki odbywają się w przybliżeniu w płaszczyznach. Przedstawiony wyżej model Układu Słonecznego został podany przez Kopernika w 1543 roku na podstawie analizy ruchów planet na niebie. Podobnie, z obserwacji ruchów własnych i prędkości radialnych gwiazd Lindblad i Oort około roku 1926 wydedukowali kinematykę naszej Galaktyki. W obu przypadkach droga do poprawnego modelu była poprzedzona szeregiem nieudanych prób. Nie powinien dziwić fakt, że daty odkrycia struktury Układu Słonecznego i struktury Galaktyki, mimo że oba układy są kinematycznie podobne, dzieli blisko 400 lat. Obserwowane ruchy gwiazd na niebie, wynikające z ich ruchu galaktocentrycznego są bowiem o wiele mniejsze od ruchów planet. Jest to spowodowane bardzo długim, wynoszącym około 200 milionów lat, okresem obiegu Słońca wokół centrum Galaktyki, podczas gdy okres obiegu Ziemi wokół Słońca wynosi tylko jeden rok.

Model układu planetarnego, który zaproponował Kopernik, wyjaśnia obserwowane ruchy planet na niebie. Ruchy te nie zależą jednak od prawdziwych rozmiarów orbit planetarnych (wyrażonych np. w centymetrach), a jedynie od wzajemnych proporcji tych orbit. Wynika z tego, że analiza samych tylko ruchów planet na niebie nie może dać odpowiedzi na pytanie o rozmiary Układu Słonecznego. Aby je poznać, potrzebna jest znajomość jakiegokolwiek odległości w obrębie tego układu, np. odległości Ziemia-Słońce. Podobnie do wyznaczenia rozmiarów Galaktyki niezbędna jest znajomość odległości do gwiazd, których ruchy na niebie były przedmiotem badań.

Pierwszym sposobem wyznaczania odległości, który zastosowano w astronomii, była tzw. metoda trygonometryczna polegająca na obserwacji danego obiektu z dwóch odległych od siebie punktów i wyznaczeniu jego przesunięcia kąтового na niebie na tle obiektów, o których wiadomo, że są bardzo daleko. Pomiarów odległości do planet, w obrębie Układu Słonecznego, dokonywano z dwóch odległych od siebie obserwatoriów na Ziemi. Do obliczenia odległości konieczna była znajomość rozmiarów kuli ziemskiej i położenia obserwatoriów na niej. Od czasów Kopernika przypisującego Ziemi ruch obiegowy wokół Słońca wiemy, że największa różnica odległości między dwoma punktami obserwacyjnymi, jaką dysponuje człowiek, równa jest rozmiarom orbity ziemskiej. Okazuje się, że jest to odległość bardzo mała w porównaniu z odległością najbliższych nawet gwiazd. Powoduje to, że ich przesunięcie na niebie wynikające z obserwacji z dwóch przeciwległych punktów orbity ziemskiej jest mniejsze od jednej sekundy łuku. Metodę trygonometryczną można więc stosować tylko do najbliższych gwiazd. Pozostała, ogromna liczba gwiazd z powodu swej znacznej odległości od nas „nie reaguje” na ruch orbitalny Ziemi.



Rys. 7d



Rys. 7e

Ponieważ dla 0 kierunek „w prawo” jest równoważny kierunkowi „w lewo”, skale na osiach θ_1 i θ_2 na rysunku 7c powinny być jednakowe. Kwadrat długości wspólnej przeciwprostokątnej trójkątów DAB i BOD jest $DB^2 = x_1^2 + ct_1^2 = x_2^2 + ct_2^2$, a stąd wynika (*).

Możemy teraz przeprowadzić „kalibrację” osi układów współrzędnych. Wybierzmy w czasoprzestrzeni wszystkie zdarzenia, które dzieli od punktu 0 jednostkowy interwał. Współrzędne tych zdarzeń wyznacza równanie $ct_1^2 - x_1^2 = 1$, opisujące dwie gałęzie hiperboli, której asymptotami są linie świata promieni świetlnych (rys. 7d).

Hiperbola w górnej półpłaszczyźnie przecina oś czasu obserwatora θ_1 w punkcie A_1 o współrzędnych $(1, 0)$, czyli wyznacza jednostkę na tej osi.

Dla zdarzenia A_2 współrzędna x_2 równa jest 0. Z niezmienniczości interwału wynika, że $ct_2 = 1$, a więc punkt ten wyznacza jednostkę na osi czasu obserwatora θ_2 .

Możemy teraz porównywać czasy przypisywane zdarzeniom przez różnych obserwatorów. Rysunek 7e przedstawia linie świata pęku jednakowych cząstek, które powstały w chwili $t = 0$ w punkcie $x = 0$. Cząstki mają różne prędkości. Czas życia (czas, który upływa do chwili rozpadu) spoczywającej cząstki wynosi $ct_0 = 1$. Zdarzenia rozpadu cząstek układają się na hiperboli jednostkowej. Z punktu widzenia obserwatora 0 szybkie cząstki żyją dłużej niż wolne. Wynik ten został potwierdzony w wielu eksperymentach.

Czytelnikowi pozostawiamy „kalibrację” osi odległości za pomocą hiperboli $ct_1^2 - x_1^2 = -1$ oraz porównanie wyników pomiarów długości pręta przez dwóch obserwatorów (na podstawie rys. 7d).

(cdn.)

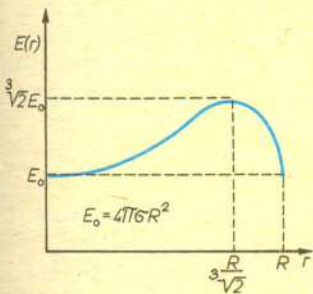


Rozwiązanie zadania F 178. Pomiędzy przypadkowe zderzenia kropli prowadzące do ich połączenia.

Układ kropki — para nasycona jest w równowadze nietrwalej. Jedna z kropli zniknie, a druga zwiększy swą objętość. Prędkość pary nasyconej nad zakrzywioną powierzchnią cieczy maleje ze wzrostem promienia krzywizny. Nielatwa fluktuacja prowadząca do wzrostu jednej z kropli pociąga więc za sobą obniżenie prędkości pary nad jej powierzchnią i skraplanie pary z otoczenia. Ubytek pary uzupełniamy ułatwione parowanie z drugiej kropli. W efekcie jedna z kropli całkowicie znika. Jeśli sumę objętości kropli oznaczyć przez V , promień jednej z nich przez r , to druga ma promień $\sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi} - r^3}$, a energia powierzchniowa obu kropli wynosi

$$E(r) = 4\pi\sigma \left(r^2 + \sqrt[3]{\left(\frac{3V}{4\pi} - r^3\right)^2} \right)$$

gdzie σ — napięcie powierzchniowe cieczy graniczącej z własną parą nasyconą; $r \in \left[0, \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}\right]$. Z wykresu funkcji $E(r)$ widać,



że jednakowym kroplom odpowiada stan równowagi nietrwalej i po pewnym czasie (od czego on zależy?) układ znajdzie się w jednym ze stanów o energii E_0 . Energia wewnętrzna „zarłoczej” kropli i atmosfery wzrasta przy tym o $E_0(3\sqrt{2} - 1)$.

Następnym, niezwykle szeroko stosowanym w astronomii sposobem wyznaczania odległości jest tzw. metoda fotometryczna, wykorzystująca zależność

$$f = \frac{L}{4\pi r^2},$$

gdzie f jest strumieniem promieniowania na powierzchni Ziemi, który podlega bezpośredniemu pomiarowi, L — mocą promieniowania wysyłaną przez dany obiekt, a r — odległością do niego.

Równanie to jest prawdziwe dla ciał promieniujących z taką samą mocą we wszystkich kierunkach, można je więc stosować w odniesieniu do gwiazd i galaktyk, które w przybliżeniu tak właśnie świecą. Gdyby wszystkie gwiazdy miały jednakową moc promieniowania, to wystarczyłoby wyznaczyć odległość do jednej z nich (np. metodą trygonometryczną), na tej podstawie obliczyć jej moc promieniowania L , a odległość do pozostałych gwiazd wyznaczyć według powyższego wzoru. W rzeczywistości jednak gwiazdy promieniają z różną mocą. Metodę fotometryczną można jednak stosować, dzieląc zbiór wszystkich gwiazd na klasy zawierające już obiekty promieniujące jednakowo. Podziału takiego można dokonać biorąc pod uwagę takie cechy gwiazd, jak wygląd ich widma czy okres zmian blasku (dla gwiazd pulsujących), o których wiadomo, że są funkcjami mocy promieniowania. Opisana wyżej metoda posłużyła też do wyznaczania odległości do najbliższych galaktyk w momencie, gdy udało się zaobserwować w nich pojedyncze gwiazdy. Obiektami jaśniejszymi od gwiazd, które można wyodrębnić w galaktykach, są gromady kuliste i obszary świecącego wodoru zjonizowanego. Zakładając, że mają one w przybliżeniu jednakową moc promieniowania, można je również użyć do wyznaczania odległości do galaktyk, w których się znajdują. Wszystkie opisane wyżej metody są jednak skuteczne dla galaktyk względnie bliskich — u obiektów dalszych nie można już odróżnić gwiazd, gromad kulistych czy obszarów świecącego wodoru. Można także zastosować metodę fotometryczną do wyznaczania odległości galaktyk wprost, tzn. dzieląc je na grupy o stałych mocach promieniowania i dalej postępując jak w przypadku gwiazd.

Wyznaczenie odległości do najbliższych galaktyk, które nastąpiło w latach trzydziestych naszego stulecia, było ostatecznym dowodem na to, że są one układami o analogicznej budowie i rozmiarach co nasza Galaktyka. Umieściło to Galaktykę wśród wielu podobnych obiektów stanowiąc kolejną „decentralizację” naszego położenia we Wszechświecie.

Przełomowym momentem z punktu widzenia badania rozmieszczenia galaktyk w przestrzeni było odkrycie oddalania się od nas wszystkich galaktyk z prędkościami proporcjonalnymi do ich odległości

$$v = Hr,$$

gdzie v jest prędkością oddalania się galaktyki, a H — tzw. stałą Hubble’a. Jak wiadomo, fakt ten nie wyróżnia w jakikolwiek sposób naszej Galaktyki. Odkrycie Hubble’a umożliwiło badanie przestrzennego rozkładu galaktyk o wiele bardziej odległych niż poprzednio. Zdjęcie widma, które jest konieczne do znalezienia prędkości (na podstawie efektu Dopplera), można otrzymać nawet dla bardzo odległych galaktyk. Znacząc prędkości można na podstawie powyższego wzoru badać przestrzenne rozmieszczenie galaktyk nie znając nawet stałej Hubble’a.

Wynik takich badań przedstawiono na rysunku. Jak widać, galaktyki w naszym otoczeniu nie są rozmieszczone równomiernie, lecz tworzą wyraźne skupisko zwane Supergromadą *Virgo* od łacińskiej nazwy gwiazdozbioru Panny, w którym widzimy większość galaktyk należących do tego skupiska. Supergromada *Virgo* jest tworem o nieregularnym, spłaszczonym kształcie z dość wyraźnym centrum o zwiększonej liczbie galaktyk. Istnienie na rysunku obszaru, w którym nie ma galaktyk, ograniczonego dwiema przecinającymi się prostymi, wynika z zasłaniania go przez pył leżący w płaszczyźnie naszej Galaktyki. Tak więc na rysunku nasze położenie znajduje się w punkcie przecięcia się tych prostych. Widzimy zatem, że jesteśmy raczej na peryferiach tego ogromnego skupiska galaktyk zwanego Supergromadą *Virgo*.

Badania jeszcze bardziej odległych galaktyk wykazały istnienie innych podobnych supergromad.

Pora na podsumowanie. Wyznaczanie rozmieszczenia przestrzennego planet, gwiazd i galaktyk odbywało się i odbywa dwoma sposobami. Pierwszy z nich to znajdowanie odległości do poszczególnych obiektów metodą trygonometryczną, wykorzystującą własności geometryczne przestrzeni, lub fotometryczną — korzystającą z praw rozchodzenia się światła. Drugi sposób polega na braniu pod uwagę udziału planet w ruchu heliocentrycznym, gwiazd w ruchu dookoła centrum Galaktyki oraz ekspansji galaktyk.

Czyli, uogólniając, polega on na wykorzystaniu systematycznych, uporządkowanych ruchów ciał niebieskich.

Obie metody uzupełniają się. Należy jednak podkreślić, że jedynie pierwszy sposób może dostarczać informacji o skali odległości we Wszechświecie. Za pomocą drugiego sposobu można co prawda efektywnie badać wzajemne rozmieszczenie planet, gwiazd czy galaktyk, lecz bez dodatkowych informacji otrzymujemy obraz o nieznanym skali.

