

Dr John K. LAWRENCE (Stany Zjednoczone)

Copyright © by the Astronomical Society of the Pacific (A.S.P.), 1978. Druk za zgodą redakcji czasopisma Mercury. A.S.P. jest międzynarodową organizacją astronomów. Bliższe informacje o jej publikacjach można otrzymać listownie pod adresem 1290-24th Avenue, San Francisco, Ca 94 122, U.S.A.

Od tysiącleci astronomowie i filozofowie zadają sobie pytanie, czy przestrzeń rozciąga się w nieskończoność, czy też istnieje jakaś jej granica. Odkąd odkryto rozszerzanie się Wszechświata, przed kosmologią pojawił się także problem czasu; czy miał on początek i czy będzie miał koniec?

W latach dwudziestych, używając 2,5-metrowego teleskopu umieszczonego na Mount Wilson, Edwin Hubble i Milton Humason odkryli, że dalekie galaktyki oddalają się od Ziemi z prędkością proporcjonalną do ich odległości od nas. Gdy śledzimy ten ruch wstecz w czasie, mówi on nam, że cała materia Wszechświata rozprzestrzenia się od jednego zdarzenia o charakterze kataklizmu, zwanego „wielkim wybuchem”, które zaszło około 15 mld lat temu. Wydarzenie to wyznacza chwilę, sprzed której nie dociera do nas żadna informacja. Odkrycie Hubble'a i Humasona oznacza zatem, że w skończonej przeszłości nastąpił pewien rodzaj „stworzenia”.

Dzięki postępowi techniki obserwacyjnej mamy coraz lepsze wyobrażenie o przeszłości. Możemy dzisiaj wykrywać obiekty znajdujące się dalej niż 10 miliardów lat świetlnych. Ponieważ światło nie rozchodzi się natychmiastowo, lecz z prędkością „tylko” 300 000 km/s, spojrzenie w przestrzeń jest również spojrzeniem w przeszłość. Znaczy to, że widzimy te obiekty w bardzo wczesnej fazie rozwoju Wszechświata. Aby zobaczyć „przyszłą historię”, potrzebujemy innego typu przyrządu: ludzkiego umysłu.

Dla przewidywania przyszłości budujemy teoretyczne modele Wszechświata. Zawierają one prawa fizyki w postaci zależności matematycznych. Jeśli uwzględnimy przeszły i obecny stan Wszechświata, to równania powiedzą nam, jak Wszechświat będzie rozwijał się w przyszłości.

Geometria czasoprzestrzeni

Dla modeli kosmologicznych najważniejszymi prawami fizyki są prawa grawitacji. W roku 1916 Albert Einstein opisał grawitację nie jako siłę między masami, lecz jako rzeczywistą deformację geometrii przestrzeni i czasu, w których poruszają się wszystkie ciała. Z tego punktu widzenia orbita planety wokół Słońca nie jest zakrzywioną drogą w „płaskiej” przestrzeni, lecz linią geodezyjną w „zakrzywionej” czasoprzestrzeni.

Jeśli wpływ grawitacji na zachowanie materii w skali kosmicznej jest dominujący i jeśli grawitacja jest własnością geometrii albo „kształtu” czasoprzestrzeni, to narzuca się pytanie, jaki mógłby być „kształt” Wszechświata. Nie interesują nas małe zniekształcenia geometrii przez pojedyncze gwiazdy lub galaktyki, lecz całościowy kształt Wszechświata. W podobnym sensie, abstrahując od istnienia gór i dolin, pytamy, czy Ziemia jest kulą.

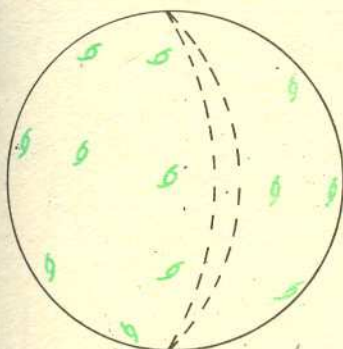
W celu zmniejszenia ilości możliwych „kształtów” do rozsądnej liczby, dokonamy upraszczającego założenia o podstawowej własności Wszechświata. Założenie to nazywa się „zasadą kosmologiczną” i mówi, że geometria Wszechświata, w danym momencie, musi wyglądać tak samo dla wszystkich obserwatorów, niezależnie od ich położenia. Jeśli przyjmiemy to ograniczenie, to pozostają tylko trzy możliwe kształty Wszechświata.

Jednym z możliwych jest kształt wszechświata zamkniętego. Jest on analogiczny do powierzchni kuli, ale z dodanym jeszcze jednym wymiarem (rys. 1). Mówimy, że wszechświat ten ma geometrię trójwymiarowej powierzchni (sfery) czterowymiarowej hiperkuli. Jak widać na rys. 1 taki wszechświat zamyka się w sobie. Zawiera on skończoną „ilość przestrzeni” (jest ograniczony), ale nie ma brzegu. Ponadto jego geometria wygląda tak samo ze wszystkich punktów. Wreszcie zauważmy, że w takim wszechświecie wszystkie linie geodezyjne leżące w jednej płaszczyźnie przecinają się.

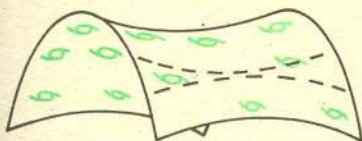
Drugi możliwy kształt jest „otwarty”. Jego dwuwymiarowym odpowiednikiem jest powierzchnia przypominająca kształtem siodło pokazane na rys. 2. Wszechświat ten musi być nieskończenie wielki, aby nie mieć brzegu (który naruszyłby zasadę kosmologiczną, ponieważ obserwatorzy blisko brzegu widzieliby obraz znacznie różniący się od widzianego z dala od brzegu).

W tym wszechświecie istnieją geodezyjne, które leżąc w jednej płaszczyźnie nie przecinają się. Geodezyjne takie rozbiegają się w nieskończoności.

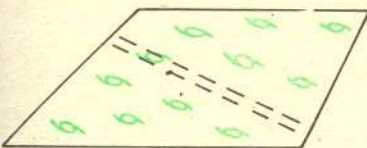
Trzeci przypadek (rys. 3) jest pośredni między dwoma pierwszymi. Geometria takiego wszechświata w ogóle nie jest zakrzywiona, lecz jest „płaska” lub euklidesowa. Musi on być przy tym nieskończenie wielki, aby nie miał brzegu, a odległość między dwiema nie przecinającymi się geodezyjnymi leżącymi w tej samej płaszczyźnie (liniami równoległymi) jest wszędzie taką samą.



Rys. 1. Powierzchnia kuli jest dwuwymiarowym odpowiednikiem zamkniętego wszechświata Friedmana

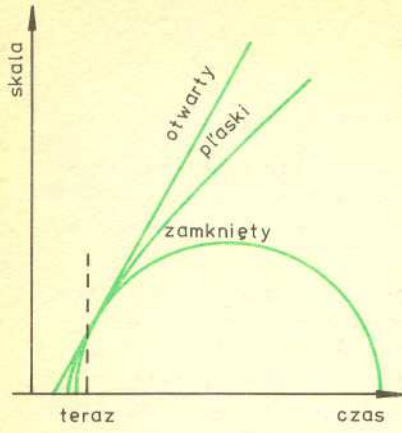


Rys. 2. Dwuwymiarowy odpowiednik otwartego wszechświata Friedmana



Rys. 3. Dwuwymiarowy odpowiednik wszechświata płaskiego

Linie geodezyjne na powierzchni odgrywają analogiczną rolę do prostych na płaszczyźnie. Definicję oraz ciekawe własności geodezyjnych znajdzie Czytelnik w artykule „O powierzchniach i liniach geodezyjnych” (Delta 2/1981).



Rys. 4. Skala wszechświata zmienia się w czasie na różne sposoby, w zależności od użytego modelu Friedmana

Ostatnie eksperymenty wykazują, że neutrina, cząstki uważane dotychczas za bezmasowe, mogą mieć niewielką masę (ok. 0,5 eV). Ich gęstość we Wszechświecie jest tak duża, że nawet znikoma masa wystarczylaby do przekroczenia gęstości krytycznej. Szczegóły znajdzie Czytelnik w artykule „Czego nie wiemy o neutrinach?” (Delta 5/1981).

Kiedy Einstein po raz pierwszy próbował budować modelowe wszechświaty wykorzystując swoją teorię, stwierdził, że nie mogą one trwać w spokoju, lecz muszą rozszerzać się albo zapadać. Wydawało mu się to tak absurdalne, że zmienił swą teorię, aby dopuścić istnienie Wszechświata statycznego. Modele rozszerzającego się Wszechświata zostały potraktowane bardziej poważnie przez matematyka rosyjskiego, Aleksandra Friedmana, który w 1922 r., na krótko przed śmiercią, opublikował swą pierwszą pracę. Dlatego też modele ekspandujących wszechświatów, które będziemy tu rozważać, noszą nazwę modeli Friedmana.

Rozszerzający się Wszechświat

Podczas gdy w Europie rozwijano teorię, amerykańscy astronomowie odkrywali, że Wszechświat rzeczywiście się rozszerza. Praca ta doprowadziła do słynnego artykułu Hubble'a z 1929 r., w którym wykazał, że światło dalekich galaktyk jest „poczerwienione” (ma większą długość fali) o wielkość proporcjonalną do odległości tych galaktyk. To przesunięcie ku czerwieni jest spowodowane oddalaniem się galaktyk od nas, podobnie jak obniża się ton gwizdka lokomotywy oddalającego się pociągu. Jeśli przyjmijemy tę interpretację, to wynika z niej, że żyjemy w którymś z ekspandujących wszechświatów opisanych przez Friedmana. Jeżeli Wszechświat rozszerza się i jeśli występuje wzajemne przyciąganie grawitacyjne całej materii, pojawia się nowe pytanie. Czy Wszechświat będzie ekspandował zawsze, czy też grawitacja spowoduje jego zahamowanie i zapadnięcie się. Odpowiedź na to pytanie zależy od tego, który z wyżej opisanych modeli pasuje do rzeczywistego Wszechświata (trzy możliwe przypadki pokazane są na rys. 4). Według Friedmana kształt Wszechświata nie ulega zmianie, zmienia się jedynie jego całkowity rozmiar albo skala. W momencie wielkiego wybuchu rozmiar wynosił zero, a w chwili obecnej powiększa się. W przypadku Wszechświata zamkniętego osiągnie on maksymalną wielkość, a potem zmaleje do zera. Teoria Einsteina mówi, że jeśli Wszechświat jest zamknięty, gęstość materii musi być większa od krytycznej gęstości równej ok. 10^{-29} g/cm³. Oznacza to, po prostu, że zamknięcie geometrii Wszechświata wymaga pewnej minimalnej masy. Ta krytyczna gęstość jest taka sama, jaka jest potrzebna, aby grawitacyjnie zatrzymać i odwrócić ekspansję. W przypadku Wszechświata otwartego rozszerzanie się nigdy nie ustaje. Przypadek ten zachodzi, kiedy gęstość masy jest mniejsza niż gęstość krytyczna. W przypadku płaskim ekspansja ustaje po nieskończonym czasie, a to wymaga gęstości masy dokładnie równej wartości krytycznej.

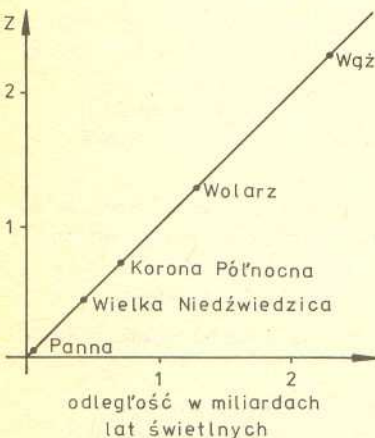
Nie wiadomo jeszcze, który z tych trzech modeli (i czy którykolwiek) opisuje rzeczywisty Wszechświat. Proponowano wiele sposobów wybrania spośród nich właściwego modelu. Jednym z nich jest określenie całkowitej gęstości materii. Ostatnie pomiary, choć nie rozstrzygające, wskazują, że gęstość jest 10 do 100 razy mniejsza niż gęstość krytyczna. Jeśli okazałoby się to prawdą, znaczyłoby, że Wszechświat jest otwarty, nieskończenie wielki i wiecznie ekspandujący.

Diagramy Hubble'a

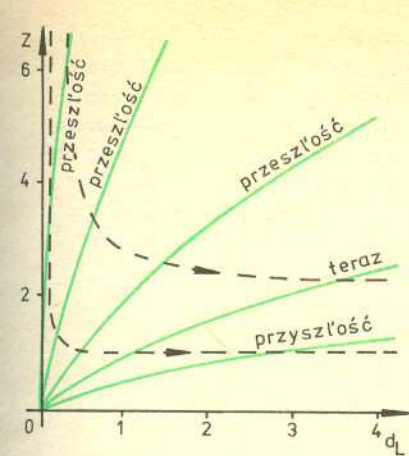
W naszym artykule spoglądaliśmy dotąd na Wszechświat w sposób abstrakcyjny, tak jak byśmy byli poza nim i spoglądali na niego „z zewnątrz”. Zastanówmy się jednak, jak wyglądałoby nasze życie w różnych możliwych wszechświatach w różnych chwilach czasu. Wszechświat widziany od wewnątrz może być w danym momencie scharakteryzowany przez tzw. diagram Hubble'a. Aby uzyskać taki diagram wykonujemy obserwacje dużej liczby galaktyk znajdujących się w różnych odległościach od Ziemi. Każda galaktyka jest reprezentowana na wykresie przez punkt, którego rzędna jest określona przez „poczerwienienie”, a odcięta przez odległość galaktyki od nas. Na niewielkich odległościach galaktyki będą układać się wzdłuż linii prostej zgodnie z odkryciem Hubble'a. Na rys. 5 pokazany jest taki diagram.

Bardzo odległe galaktyki będą się odchylać od linii prostej pokazanej na rys. 5, ponieważ pojawiają się efekty „krzywej geometrii” i zmieniającej się skali Wszechświata. Aby to zrozumieć, musimy przeanalizować pojęcia „poczerwienienia” i „odległości”.

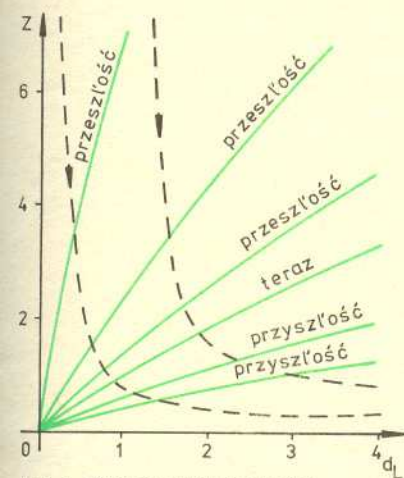
Poczerwienienie jest określone przez liczbę z , która jest stosunkiem wzrostu długości fali w czasie jej podróży na Ziemię do jej początkowej długości. Przesunięcie ku czerwieni zinterpretowaliśmy jako skutek oddalania się galaktyk. Dla naszych obecnych celów wygodniej będzie jednak spojrzeć na to przesunięcie w inny sposób. Kiedy światło biegnie przez przestrzeń, długość jego fali jest określona względem skali Wszechświata. Skoro więc skala zwiększa się lub zmniejsza, długość fali świetlnej również się zmienia. Możemy więc wyrazić z jako wzrost rozmiaru Wszechświata w czasie, gdy światło biegło do Ziemi, podzielony przez rozmiar w momencie, gdy było ono wyemitowane. Jeśli Wszechświat jest większy w chwili obserwacji światła niż był w momencie jego emisji, mówimy, że światło jest „poczerwienione”. Jeśli Wszechświat jest mniejszy w chwili obserwacji niż był w czasie emisji, światło będzie „przesunięte ku błękitowi” (długość jego fali zmniejszy się). Przesunięcie ku błękitowi odpowiada ujemnym wartościom z .



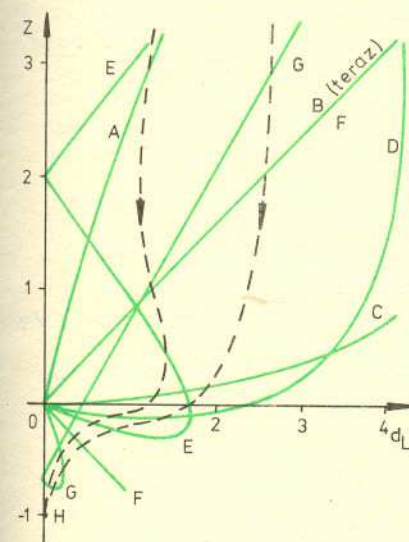
Rys. 5. Diagram Hubble'a przedstawiający przesunięcia ku czerwieni i odległości gromad galaktyk z różnych gwiazdozbiorów



Rys. 6. Diagramy Hubble'a otwartego wszechświata Friedmana w różnych chwilach. Pozioma skala w dziesiątkach miliardów lat świetlnych



Rys. 7. Diagramy Hubble'a płaskiego wszechświata Friedmana w różnych chwilach



Rys. 8. Diagramy Hubble'a zamkniętego wszechświata Friedmana w różnych chwilach

Ważną własnością światła jest fakt, że energia niesiona przez kwant światła (foton) jest odwrotnie proporcjonalna do długości jego fali. A więc poczerwienione światło traci energię, a błękitniejące zyskuje. Wzrost lub zmniejszenie skali Wszechświata powodują również wzrost lub zmniejszenie się odległości między fotonami w wiązce światła, a to pociąga za sobą zmniejszenie lub wzrost natężenia światła, powodując, że dana galaktyka przy obserwacjach fotometrycznych wydaje się ciemniejsza lub jaśniejsza.

Na osi poziomej diagramu Hubble'a odłożone są odległości galaktyk. W praktyce astronomowie używają tzw. „odległości jasnościowych” — d_L . Aby zdefiniować d_L , przypuśćmy, że możemy obserwować w dalekiej przestrzeni galaktykę lub inny obiekt, którego rzeczywistą, własną jasność znamy (kosmologowie obserwatorzy spędzają wiele czasu na poszukiwaniu takich obiektów). Mierzmy potem jasność widomą obiektu widzianego z Ziemi i, porównując obie jasności, możemy obliczyć odległość d_L przy założeniu, że przestrzeń jest płaska. Zapamiętajmy — im ciemniejszy jest obiekt widziany z Ziemi, tym większa jest jego odległość jasnościowa.

W rzeczywistym Wszechświecie zakrzywienie geometrii i zmieniająca się skala wpłyną na pomiar d_L . W zamkniętym Wszechświecie zakrzywienie będzie ogniskować promienie świetlne i powodować, że galaktyki będą wydawały się jaśniejsze, a więc bliższe. We Wszechświecie otwartym — na odwrót. We Wszechświecie rozszerzającym się światło będzie poczerwienione, a więc przyćmione, jak opisano wyżej, powodując, że galaktyki wydawać się będą bardziej oddalone. W zapadającym się Wszechświecie światło będzie przesunięte ku błękitowi, a galaktyki będą wydawać się jaśniejsze i bliższe.

Kilka wykresów

Można obliczyć, jaki jest wpływ tych wszystkich efektów na wygląd diagramów Hubble'a wykonywanych przez astronomów w różnych chwilach w trzech możliwych wszechświatach. Wyniki tych obliczeń pokazane są na rysunkach 6, 7 i 8. Na każdym rysunku linią ciągłą oznaczono krzywe, wzdłuż których układałyby się galaktyki widziane przez astronoma w pewnej konkretnej chwili. Linie przerywane pokazują, jak zmieniałyby się położenia pojedynczych galaktyk na diagramie Hubble'a, jeśli można by było obserwować je przez bardzo długi okres. Te teoretyczne diagramy zawierają obiekty odległe znacznie bardziej niż te, które możemy zaobserwować. Dzisiejszy obserwacyjny diagram Hubble'a, taki jak na rys. 5, zająłby tylko mały prostokąt na każdym z trzech wykresów, odpowiadający małym z i d_L . Zauważmy, że w tym obszarze (i na rys. 5) linie odpowiadające chwili obecnej i oznaczone „teraz” są prawie identyczne we wszystkich trzech typach wszechświata. To właśnie ta zgodność powoduje tak wielkie trudności z określeniem, który model odpowiada rzeczywistemu Wszechświatowi.

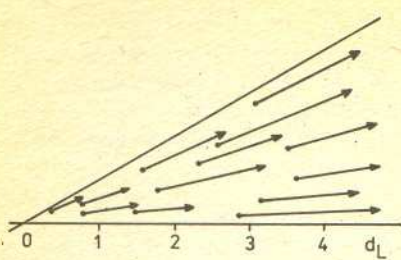
Trzeba podkreślić, że na rys. 6, 7 i 8 zakładamy istnienie pewnych obiektów w bardzo dużych odległościach, a więc, ze względu na skończoną prędkość światła, w bardzo wczesnej fazie rozwoju. W rzeczywistości istnieją pewne przesłanki, aby sądzić, że nie ma obserwowalnych obiektów z przesunięciami ku czerwieni dużo większymi niż $z = 3$. Znaczy to, że obiekty takie musiałyby być widoczne tak, jak wyglądały przed powstawaniem galaktyk. Zakładamy przy tym, że każdy efekt pociemnienia spowodowany przez materię międzygwiazdową możemy zaniedbać lub uwzględnić w poprawkach.

Rys. 6 i 7 przedstawiają wyniki dla wszechświata, odpowiednio otwartego i zamkniętego, przy użyciu tych upraszczających założeń. Wszechświaty te są takie, jak się można było spodziewać, ekspandujące, ale spowalniające. We wczesnych chwilach galaktyki są silnie poczerwienione. Z upływem czasu poczerwienienia zmniejszają się, dążąc w końcu do stałej wartości (zera w przypadku płaskim). Równocześnie galaktyki ciemnieją i ich odległości jasnościowe rosną.

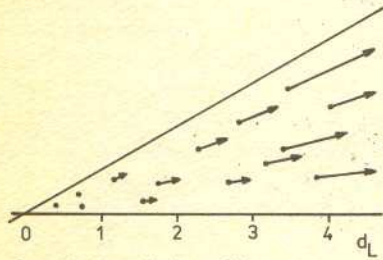
Wszechświat zamknięty

Rys. 8 pokazuje wyniki dla zamkniętego wszechświata Friedmana. Ponieważ wykres ten jest dość skomplikowany, dodano rys. 9, 10, 11 i 12 dla ułatwienia jego interpretacji. Te cztery wykresy ukazują spojrzenie ziemskiego obserwatora w kosmos w różnych chwilach. W każdym przypadku obserwator znajduje się w początku układu współrzędnych. Poczerwienione galaktyki przedstawione są strzałkami skierowanymi od obserwatora, natomiast galaktyki zbliżające się, strzałkami skierowanymi do obserwatora. Im punkt jest dalej od obserwatora, tym większa jest jego odległość jasnościowa; skala odległości jest taka sama, jak na wykresach Hubble'a (z wyjątkiem rys. 12, gdzie skala została powiększona o czynnik 4).

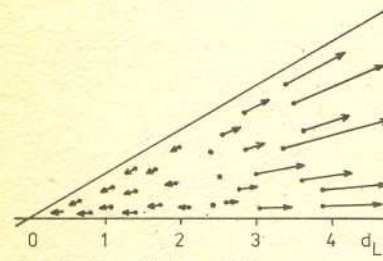
Zanim przyjrzymy się rys. 8 dokładniej, zauważmy, że najbardziej interesujące cechy wszechświata zamkniętego wynikają z dwóch powodów. Po pierwsze, Wszechświat w tym modelu zachowuje się różnie w różnych chwilach, najpierw rozszerzając się, potem zapadając:



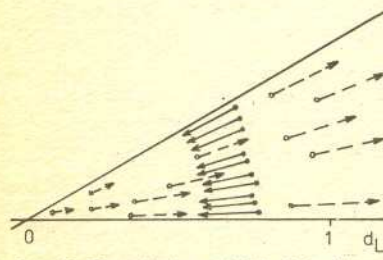
Rys. 9. Zamknięty wszechświat Friedmana w chwili obecnej. Strzałki skierowane na zewnątrz pokazują, że przesunięcia ku czerwieni są proporcjonalne do odległości. Odpowiada to linii B na rys. 8



Rys. 10. Wszechświat zamknięty w momencie osiągnięcia maksymalnych rozmiarów. Odpowiada to linii C na rys. 8



Rys. 11. Wszechświat zamknięty po rozpoczęciu zapadania się. Światło bliskich galaktyk jest przesunięte ku błękitowi. Odpowiada to krzywej D na rys. 8



Rys. 12. Wszechświat zamknięty w chwili, kiedy zapadając się osiąga z powrotem dzisiejsze rozmiary. Skala rysunku została powiększona czterokrotnie w porównaniu z rys. 9, 10 i 11. Galaktyki-widma oznaczone są otwartymi kółkami i przerywanymi strzałkami. Odpowiada to linii F na rys. 8

prędkością, obserwator w pewnej chwili będzie obserwował różne części Wszechświata takimi, jakie były w różnych momentach; im dalej od niego, tym wcześniej w czasie. A więc w fazie zapadania się obserwowane będą w tym samym czasie zarówno efekty ekspansji, jak i zapadania się. W czasie ekspansji natomiast, obserwator widzi wszechświat poczerwieniony, który wygląda bardzo podobnie do wszechświata otwartego lub płaskiego. W momencie, kiedy zamknięty wszechświat osiąga maksymalne rozmiary, obserwator widzi tylko najbliższe galaktyki jako statyczne. Bardziej odległe są ciągle poczerwienione. Podobnie, w fazie zapadania obserwator widzi światło pobliskich galaktyk przesunięte ku błękitowi. Bardziej odległe galaktyki, obserwowane w punkcie zwrotnym, są nie zmienione, a jeszcze dalsze, widziane w trakcie ekspansji, są ciągle poczerwienione. Drugą przyczyną komplikacji w przypadku wszechświata zamkniętego jest sama jego zamkniętość. Powoduje ona, że promienie świetlne opuszczające galaktykę zbiegają się w punkcie „po przeciwnej stronie” wszechświata i tworzą w tym punkcie obraz galaktyki, jak to widać na rys. 14. Ze względu na czas podróży światła, które musi dotrzeć do obserwatora, takie obrazy pojawiłyby się tylko w fazie zapadania.

Pamiętając o tych faktach, możemy przyjrzyć się dokładniej rysunkom. Na rys. 8 krzywa A odpowiada obrazowi wszechświata w momencie wcześniejszym niż chwila obecna. Linia B przedstawia dzisiejszy wygląd wszechświata i ta epoka pokazana jest również na rys. 9. Krzywa C ukazuje wszechświat zamknięty, kiedy osiąga on maksymalną skalę, co pokazane jest również na rys. 10. Dla bliskich galaktyk nachylenie linii C jest równe zeru, ponieważ w tej chwili wszechświat nie ekspanduje. Światło bardziej odległych galaktyk zostało wyemitowane, gdy wszechświat był mniejszy niż w momencie obserwacji, i dlatego jest poczerwienione, zakrzywiając linię C do góry.

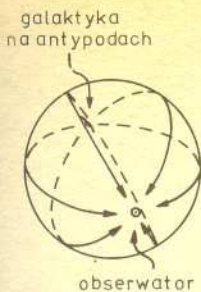
Zapadanie

Krzywa D i rys. 11 obrazują wszechświat po momencie, kiedy zaczął się zapadać. Światło bliskich galaktyk zostało wyemitowane w czasie, gdy wszechświat był większy niż w chwili obserwacji. Natomiast światło galaktyk bardziej odległych zostało wyemitowane, kiedy wszechświat był mniejszy niż w momencie obserwacji, i dlatego jest wciąż przesunięte ku czerwieni.

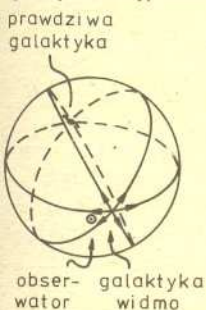
Linia E pojawia się jeszcze później. W punkcie $z = 2$ zakrzywia się ona z powrotem do osi $d_L = 0$. To powtórne zakrzywienie pojawia się właściwie dla wszystkich krzywych poczynając od C, ale przy zbyt dużym z , aby ujawnić się na rysunku. Galaktyka w punkcie, gdzie krzywa dotyka osi $d_L = 0$, jest w zamkniętym wszechświecie w miejscu „przeciwym” do położenia obserwatora; podobnie jak Biegun Południowy na Ziemi dla obserwatora na Biegunie Północnym. Przez analogię będziemy nazywali ten punkt antypodami obserwatora. Światło wyemitowane z antypodów przebyło cały wszechświat dokoła w różnych kierunkach i całe zbiegło się znowu w miejscu, gdzie znajduje się obserwator; podobnie, jak dzieje się to z południkami Ziemi, które wychodzą z Bieguna Południowego w różnych kierunkach i spotykają się znowu na Biegunie Północnym. Ponieważ całe światło wyemitowane przez galaktykę jest odbierane przez obserwatora, mówimy, że odległość jasnościowa wynosi zero.

Inna gałąź krzywej E wychodzi z punktu $d_L = 0$ i $z = 2$ do góry. Galaktyki na tej linii nie są prawdziwymi galaktykami, ale pewnymi obrazami lub galaktykami „widmami”. Obrazy te tworzą się, kiedy światło po przebiegnięciu całego wszechświata zbiega się w antypodach i znowu się rozbiega. Bliski obserwator widzący rozbiegające się światło miałby wrażenie istnienia galaktyki w punkcie wszechświata przeciwnym do rzeczywistej galaktyki, jak to pokazano na rys. 14. Galaktyki-widma nie pojawiają się, dopóki wszechświat nie osiągnie swojej maksymalnej skali, tyle czasu zajmuje najwcześniejszemu światłu pokonanie drogi do punktu antypodalnego. Obserwator, który znalazłby się na antypodach, powiedzmy, kwazara, miałby ciekawy spektakl.

Linia F opisuje późniejszą chwilę, taką, że skala wszechświata jest taka sama w momencie emisji światła na antypodach i jego odbioru przez obserwatora. W tym czasie światło wszystkich „prawdziwych” galaktyk jest przesunięte ku błękitowi. Chociaż nie pokazano tego na rys. 8, to na rys. 12 jest wyraźnie widoczne, że prawie wszystkie galaktyki pojawiają się z takim samym przesunięciem ku błękitowi i w tej samej odległości. Wszystkie galaktyki-widma znajdują się na tej samej linii, na której znajdują się obecnie prawdziwe galaktyki. W tym momencie wszechświat wygląda, w pewnym sensie, jak dzisiaj. Istnieje jednak duża liczba galaktyk o świetle przesuniętym ku błękitowi, których dzisiaj nie widać. Spodziewamy się również, że obrazy galaktyk będą raczej nieostre ze względu na odchylenie promieni świetlnych w różnych małoskalowych polach grawitacyjnych, przez które promienie te przechodziły w czasie podróży dokoła wszechświata.



Rys. 13. Wszechświat zamknięty. Obserwator zobaczy „za chwilę” światło od galaktyki na antypodach.



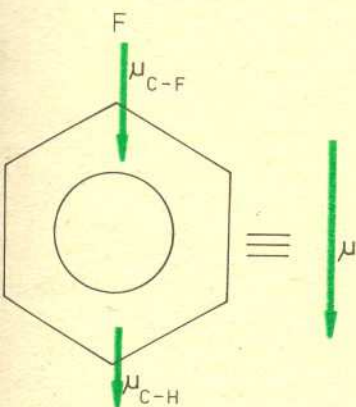
Rys. 14. Wszechświat zamknięty. Galaktyka-widmo pojawia się dzięki zbiegnięciu się promieni światła prawdziwej galaktyki na jej antypodach

Krzywa G odpowiada jeszcze późniejszej chwili. Prawie wszystkie prawdziwe galaktyki są na dolnej części „niebieskiej” pętli tego wykresu. Odpowiada to momentowi, kiedy skala zapadającego się wszechświata osiągnie 0. Przesunięciu $z = -1$ oznacza, że długość fali świetlnej jest przesunięta do zera lub do nieskończonej energii.

Dwie przerywane linie na rys. 8 reprezentują dwie konkretne galaktyki, które są obserwowane przez cały czas ewolucji wszechświata. Ich poczerwienienia cały czas się zmniejszają. Bardziej odległa galaktyka zawsze wydaje się zbliżać, nawet wtedy, gdy wszechświat ekspanduje podczas pierwszej połowy czasu swego życia. Bliższa galaktyka początkowo zbliża się, potem przez pewien czas oddala, a potem znowu się zbliża. Zauważmy, że obie te galaktyki w czasie ekspansji są przesunięte ku czerwieni. Oznacza to, że chociaż galaktyka jest poczerwieniona, a więc oddala się, to obserwowana przez dłuższy czas będzie wydawała się zbliżać. Znaczy to również, że poczerwienione galaktyki na rys. 9, 10, 11 i 12 będą wydawały się poruszać w kierunku przeciwnym, niż pokazują strzałki. Oczywiście wszystkie galaktyki, łącznie z naszą, zakończą swój żywot w punkcie H .

Widać jasno z tych rezultatów, że historia wszechświata zamkniętego charakteryzować się będzie bogactwem zjawisk optycznych. Zjawisk tych pojawia się o wiele więcej, niż można się było spodziewać w oparciu o prosty pogląd przedstawiony na początku. Mimo, że zwykle zadaniem nauki jest sformułowanie prostego, abstrakcyjnego modelu na podstawie wyników obserwacji, czasami zabawniej jest zrobić rzecz odwrotną, jak my tutaj. Mimo, iż trzeba być obiektywnym w rozważaniu obserwacyjnych potwierżeń każdego z trzech możliwych modeli Wszechświata, jest pokusa, aby opowiedzieć się z przyczyn estetycznych za wszechświatem zamkniętym. Z pewnością byłoby najciekawiej żyć w tym wszechświecie mimo nieuniknionego punktu H , który czeka na końcu.

(tłum. Tomasz CHLEBOWSKI)



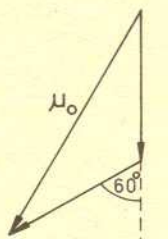
Rozwiązanie zadania F 95.

Związki, o których mowa w zadaniu, mają daleko bardziej złożoną budowę niż prosty układ dwóch jednakowych co do wartości, lecz różniących się znakiem ładunków, zwany dipolem. Jednak w obrębie cząsteczki można znaleźć elementy struktury będące z dobrym przybliżeniem dipolami. We wzorach strukturalnych odpowiadają im wiązania pomiędzy różnymi pierwiastkami. Każdemu z wiązań można więc przypisać pewien moment dipolowy.

W przypadku fluorobenzenu oczekiwać należy momentu dipolowego wzdłuż osi symetrii, będącego sumą momentów wiązań C-H i C-F, gdyż pozostałe momenty znoszą się.

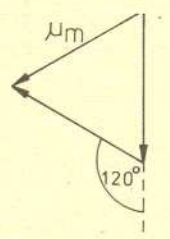
Przyjmijmy teraz założenie, że wprowadzenie drugiego podstawnika nie zmienia wartości momentu od pojedynczego podstawnika oraz nie zakłóca zbytnio symetrii. Moment dipolowy dwufluorobenzenu jest wtedy sumą momentów μ_{C-H} i μ_{C-F} . Otrzymujemy w ten sposób dla

o-dwufluorobenzenu



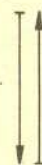
$\mu_o = 1,3 \mu \approx 2,48D$

m-dwufluorobenzenu



$\mu_m = \mu = 1,43D$

p-dwufluorobenzenu



$\mu_p = 0$

Skonfrontujmy nasze wyniki teoretyczne z danymi eksperymentalnymi. W tabeli podane są momenty dipolowe nie tylko dla fluorobenzenu, lecz także dla innych pochodnych benzenu. Wartości momentów podane są jak uprzednio w debajach: $1D = 3,336 \cdot 10^{-30} C \cdot m$.

Jeśli Czytelnik zechciałby wykorzystać przedstawiony w zadaniu model do obliczenia momentów dla trój- i więcej fluoropochodnych benzenu, to może porównać swoje wyniki z danymi eksperymentalnymi, które znajdzie np. w książce A. Chelkowski „Fizyka dielektryków”, Warszawa 1979, PWN, 162 s.

Podstawnik X	μ dla C_6H_5X	μ_o wartość teoretyczna	μ_o wartość eksperymentalna	Błąd oszacowania [%]	μ_m wartość teoretyczna	μ_m wartość eksperymentalna	Błąd oszacowania [%]
F	1.43	2.48	2.38	4	1.43	1.40	2
Cl	1.56	2.70	2.25	20	1.56	1.48	5
Br	1.52	2.63	2.12	24	1.52	1.46	4
I	1.30	2.25	1.69	33	1.30	1.27	2