

Pierwsze trzy dekady XX wieku można traktować jako przełomowe dla rozpoznania skali odległości w otaczającym nas świecie. Najpierw odkryto fakt istnienia naszej Galaktyki i oceniono jej rozmiary. Posłużono się tu głównie gwiazdami typu RR Lyrae i cefeidami jako wskaźnikami odległości. Zaraz potem odkryto istnienie innych galaktyk, a odkrycie sprowadzało się do wyznaczenia przybliżonych odległości niektórych, wcześniej bardzo dobrze już znanych mgławic.

Na te sukcesy złożyły się obserwacje głównie trojga astronomów. Pani Henrietta Leavitt odkryła duże ilości cefeid i gwiazd typu RR Lyrae. Harlow Shapley dokonał kalibracji cefeid, tj. ocenił ich rzeczywiste odległości. Wreszcie Edwin Hubble w gruncie rzeczy odkrył galaktyki, a dokładniej – wykazał, że owe mgławice to właśnie ogromne zbiorowiska gwiazd.

Odległości około 25 galaktyk, w których obserwowano cefeidy (a także inne gwiazdy również służące za wskaźniki odległości – gwiazdy nowe czy gorące gwiazdy typu O), wyznaczono stosunkowo łatwo. Sposób na wyznaczanie odległości galaktyk odleglejszych pojawił się z chwilą odkrycia przez Hubble’a zależności między odległościami galaktyk a tzw. przesunięciem ku czerwieni, nazywanym też z angielska *redshiftem*. Zanim jednak podamy tę zależność, spróbujmy przybliżyć samo pojęcie redshiftu.

Kiedy obserwacje spektroskopowe galaktyk stały się normalną praktyką, okazało się, że w spektrogramach tych obiektów dają się wyróżnić pewne charakterystyczne linie widmowe. W wyniku porównywania z widmami laboratoryjnymi dokonano identyfikacji tych linii, tj. ustalono, jakie pierwiastki (lub ich jony) odpowiadają za powstawanie obserwowanych linii w widmach galaktyk. Wnet zauważono, że położenia linii określonych pierwiastków w widmach galaktyk nie odpowiadają ściśle liniom tychże pierwiastków w widmach laboratoryjnych i że są one przesunięte względem oczekiwanych położenia na ogół w stronę fal dłuższych, jak to schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

Pierwsze spektrogramy galaktyk obejmowały zakres optyczny, zatem przesunięcia linii w kierunku fal dłuższych były jednocześnie przesunięciami ku czerwieni (czerwień jest bowiem długofalowym końcem widzialnego zakresu fal elektromagnetycznych). Za miarę przesunięcia ku czerwieni przyjęto parametr z zdefiniowany jako

$$z = \frac{\lambda_G - \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

gdzie λ_G i λ oznaczają długości fal środków

odpowiadających sobie linii w widmie galaktyki i w widmie laboratoryjnym. Okazało się, że różne linie w widmie wybranej galaktyki są tak przesunięte względem ich laboratoryjnych odpowiedników, że $z = \text{const}$. Oznacza to, że jeśli np. linii laboratoryjnej $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ odpowiada w widmie galaktyki linia $\lambda_G = 6030 \text{ \AA}$, to linii $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ odpowiada $\lambda_G = 4020 \text{ \AA}$, a linii radiowej $\lambda = 21 \text{ cm}$ odpowiadałaby $\lambda_G = 21,1 \text{ cm}$. Każda z linii przesunięta jest o inną wartość ($\Delta\lambda$: 30 \AA , 20 \AA , $0,1 \text{ cm}$), ale parametr z jest w każdym przypadku taki sam i dla całego widma wynosi $0,005$. Ta cecha tego parametru z oznacza, że można go wyznaczać na podstawie dowolnej (zidentyfikowanej) linii, niezależnie od tego, czy jest to linia w nadfioletowej, optycznej, radiowej czy w jeszcze innej części widma.

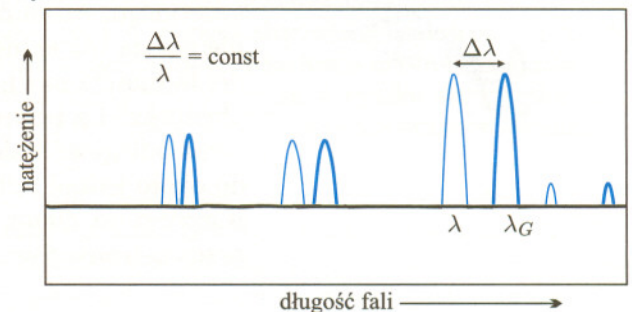
Uważa się, że obserwowane przesunięcia linii w widmach galaktyk powstają (przynajmniej częściowo) w wyniku tzw. efektu Dopplera dla fal elektromagnetycznych. Zjawisko Dopplera polega na tym, że jeśli źródło fal oddala się od obserwatora, to obserwator odbiera fale „rozciągnięte”, zatem obserwowane widmo zostaje przesunięte w stronę fal dłużych, tj. „poczerwienione”. Przy zbliżaniu się źródła obserwator odbierze fale „ściśnięte”, a więc widmo źródła zostanie przesunięte w stronę fal krótkich, „poniebieszczone”. Przesunięcie linii widmowych przy prędkości v wywołane tym zjawiskiem wyraża się wzorem

$$z = \sqrt{\frac{1 + v_r/c}{1 - v_r/c}} - 1,$$

gdzie v_r oznacza radialną składową prędkości źródła względem obserwatora (jest ona dodatnia, gdy źródło się oddala); c jest prędkością światła. W przypadku prędkości radialnych v_r , znacznie mniejszych od c , wzór powyższy przyjmuje prostą, przybliżoną postać $z = v_r/c$.

W 1929 r. Hubble opublikował wyniki pierwszych pomiarów odległości i przesunięć ku czerwieni dla 24 galaktyk znajdujących się nie dalej niż około

Rys. 1



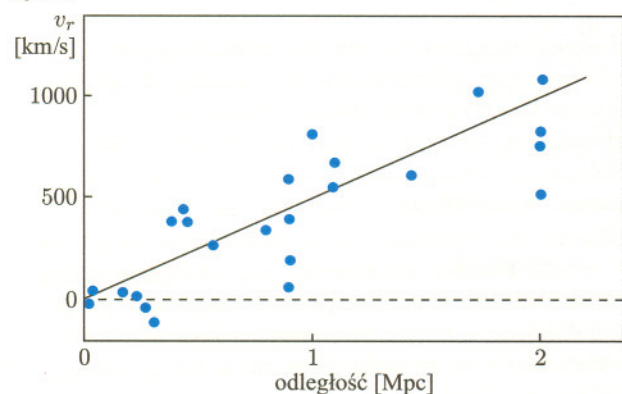
24 Mpc od Ziemi (rys. 2). Zamiast parametru z na osi rzędnych Hubble odłożył prędkości radialne, sugerując tym samym dopplerowską interpretację przesunięć ku czerwieni i przyjmując $v_r = zc$. Wypada zwrócić uwagę na fakt, że Hubble opublikował swój słynny diagram nie tyle w kontekście wyznaczania odległości galaktyk na podstawie zmierzonych przesunięć ku czerwieni, co w kontekście czysto kosmologicznym. W środowiskach ówczesnych fizyków teoretyków i kosmologów istniało bowiem ogromne zapotrzebowanie na jakikolwiek obserwacyjny argument za świeżo wtedy lansowanym modelem Wszechświata ekspandującego.

Linia prosta najlepiej dopasowana do punktów na diagramie ilustruje liniową relację wiążącą odległość galaktyki z jej prędkością radialną (zwaną też prędkością ucieczki), która jest treścią słynnego prawa Hubble'a: $v_r = Hr$. Występującą tu prędkość wyraża się zazwyczaj w km/s, a otrzymuje się ją (gdy $v_r \ll c$) z definicji przesunięcia ku czerwieni, czyli jako $v_r = zc$. Odległość r galaktyk najwygodniej wyraża się w megaparsekach, zatem stała Hubble'a H musi mieć wymiar km/(s·Mpc).

Prawo Hubble'a jest nie tylko wyrazem bardzo ważnego faktu kosmologicznego, lecz – co nas akurat interesuje – jest też narzędziem do określania odległości galaktyk. Wystarczy dla danej galaktyki uzyskać jej widmo odpowiedniej jakości (trzeba jednak zdawać sobie sprawę z tego, że dla otrzymania widma o wymaganej tu jakości potrzebny jest duży teleskop wyposażony w dobrej klasy spektrograf) i zmierzyć jego przesunięcie ku czerwieni na podstawie zidentyfikowanych linii. Niemniej w odniesieniu do bardzo odległych, a więc słabych galaktyk, zarówno procedura otrzymywania, jak i analizy widma może nastroczać sporo kłopotów.

Słabą stroną metody wyznaczania odległości z użyciem prawa Hubble'a jest niepewność co do wartości samej stałej H . Pierwsze wyznaczenie tej stałej dało wartość 500 (można to odczytać z rysunku 2). W wyniku udoskonalenia metod określania odległości galaktyk średnio odległych (np. z użyciem gwiazd supernowych

Rys. 2.



jako wskaźników odległości) ustalono, że stała Hubble'a na pewno zawiera się w przedziale między 50 a 100. Tak duża niepewność jest nie do zaakceptowania przy rozważaniu wielu aspektów astrofizycznych dotyczących galaktyk – co prawda ten przedział niepewności został ostatnio mocno zawężony. Mimo wszystko nadal szuka się innych sposobów określania odległości dalekich obiektów. Już sama jasność widoma galaktyki może być w przybliżeniu wskaźnikiem jej odległości, o ile, oczywiście, znana byłaby jej jasność absolutna (patrz artykuł o świecach standardowych). Tymczasem jasności absolutne galaktyk eliptycznych zawierają się w bardzo szerokich granicach: od $-8,5$ mag dla karłowatych dE, do -25 mag w przypadku olbrzymich cD. Jasności galaktyk spiralnych zawierają się między -17 a -22 mag. W rezultacie bardzo trudno jest ocenić moc promieniowania konkretnej galaktyki i błąd wyznaczenia odległości tą metodą jest ogromny. Podobnie wykorzystuje się rozmiary kątowe galaktyk: odleglejsze powinny być średnio mniejsze kątowo. Trzeba jednak znać skądinąd ich rzeczywiste rozmiary, których rozrzut też jest bardzo duży. Te ostatnie dwie metody stosowane są więc raczej do całych grup galaktyk (czyli statystycznie), a nie do konkretnego obiektu i obarczone są jeszcze większą niepewnością niż metoda z wykorzystaniem prawa Hubble'a. Sprawy pogarszają również rozmaite, zależne od odległości efekty selekcji, których nie daje się uwzględnić przy doborze próbek obiektów. Niemniej jednak odległości wyznaczone na podstawie tego rodzaju wskaźników są dobrze skorelowane z odległościami określonymi z prawa Hubble'a. Fakt ten można uznać za dowód poprawności metody z użyciem przesunięć ku czerwieni.

Jeszcze innym wskaźnikiem odległości, jak pokazali Brent Tully i Richard Fisher, może być wielkość poszerzenia dopplerowskiego linii widmowych galaktyk, np. stosunkowo łatwej do zaobserwowania radiowej linii neutralnego wodoru $\lambda = 21$ cm. Okazało się bowiem, że im galaktyka jest jaśniejsza w sensie absolutnym, tym szybciej rotuje. Szerokość profili linii widmowych galaktyk (ale tylko tych, które są względem obserwatora ustawione bokiem, czyli widać je w przybliżeniu z krawędzi) w pewnej mierze odzwierciedla prędkość ich obrotu. Łatwo się domyślić, że odległości wyznaczone tą metodą też są obarczone dużymi błędami.

Poszukiwanie innych, dokładniejszych metod określania odległości bardzo dalekich galaktyk i ich skupisk jest bardzo pożądane, chociażby dla sprawdzenia zakresu stosowalności prawa Hubble'a, czy też dla ewentualnego zawężenia przedziału nieokreśloności występującej w nim stałej H .