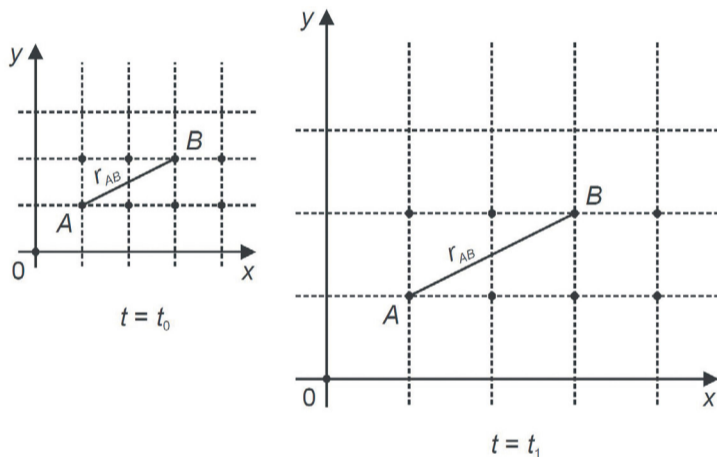


EKSPANSJA WSZECHŚWIATA

W latach dwudziestych XX wieku, mając dostęp do największego w tym czasie teleskopu świata o średnicy zwierciadła 2,5 m, umieszczonego na górze Mount Wilson w Pasadenie, HUBBLE i HUMASON odkryli, że dalekie galaktyki oddalają się od Ziemi z prędkością proporcjonalną do ich odległości od nas. Obserwując odległe galaktyki, zauważyli również, że oddalają się one zarówno od siebie nawzajem, jak i od nas – z prędkością tym większą, im dalej od nas się znajdują. Dostarczyli więc oni pierwszego eksperymentalnego dowodu na ekspansję Wszechświata. Odkrycie to było pierwszym naukowym faktem empirycznym przemawiającym na rzecz słuszności idei ewolucji Wszechświata.

Jak wyobrazić sobie rozszerzanie się Wszechświata? We Wszechświecie nie ma wyróżnionych punktów, w tym jakiegokolwiek jednego miejsca, w którym nastąpił pierwotny Wielki Wybuch inicjujący rozszerzanie. Bardzo użytecznym modelem pogładowym takiego rozszerzania izotropowego (niezależnego od kierunku) jest nakropkowana (galaktyki) powierzchnia balonu gumowego nadmuchiwanego od wewnątrz – jest to dwuwymiarowy model Wszechświata zamkniętego, ilustrujący Wszechświat nieograniczony (bez brzegów i centrum) lecz jednak skończony (skończona „objętość Wszechświata”, skończona liczba galaktyk). Nadymając ów balon, obserwujemy nie tylko powiększanie się jego objętości, ale także systematyczne oddalanie się od siebie poszczególnych kropek. Kosmologowie często porównują rozszerzający się Wszechświat do powłoki powiększającego się balonu. Trzeba jednak pamiętać, że w tym porównaniu powłoka przedstawia wszystkie wymiary naszego Wszechświata. Ekspandujący Wszechświat przypomina taki właśnie balon. Odległości do dalekich galaktyk stale się zwiększają. Oddalanie się galaktyk jest wyrazem rozszerzania się przestrzeni, która jest wytwarzana w trakcie tej ekspansji. To przestrzeń, w której tkwimy razem z galaktykami, rozszerza się, ciągnąc ze sobą wszystko, co się w niej znajduje. Przestrzeń jest tworem dynamicznym: może się rozszerzać, kurczyć lub zakrzywiać, nie będąc zanurzona w dodatkowym wymiarze. Wszechświat nie potrzebuje ani środka ekspansji, ani pustej przestrzeni na zewnątrz, w którą miałby się rozszerzać. Rozszerzając się, nie odbiera swemu otoczeniu dotychczas niezajętego miejsca. Rozszerzająca się przestrzeń unosi galaktyki i z upływem czasu zmienia się jedynie skala odległości przestrzennych (rys. 1). Galaktyki nie opuszczają jednak punktów rozszerzającej się przestrzeni.



» Rys. 1 Ilustracja izotropowego rozszerzania Wszechświata, gdzie $AB = r_{AB} = r$ jest odległością między ustalonymi punktami A i B. „Puchnąca” przestrzeń (obrazowana przez rozszerzającą się siatkę) unosi ze sobą galaktyki

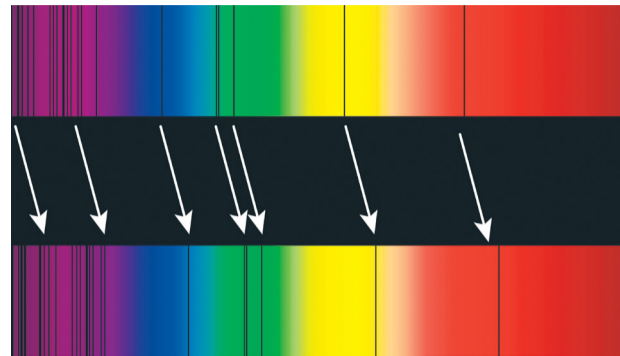
W czasie rozszerzania się Wszechświata zmienia się jedynie skala jego przestrzeni: rosną wzajemne odległości, ale położenia galaktyk w przestrzeni nie zmieniają się. Gdy światło galaktyki przechodzi przez pryzmat, każdy zawarty w nim kolor pojawia się jako pionowa linia o określonej długości fali. HUBBLE stwierdził, że światło docierające do nas z gwiazd w odległych galaktykach różni się systematycznie od światła docierającego z gwiazd pobliskich. W świetle z odległych galaktyk linie widmowe odpowiadające określonym pierwiastkom, są przesunięte w stronę fal dłużych – efekt znany jako *red shift*, przesunięcie ku czerwieni. Jest ono względną zmianą długości fali promieniowania. Wartość liczbowa przesunięcia określa się jako

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie z oznacza przesunięcie ku czerwieni, λ_{obs} jest obserwowaną długością fali promieniowania docierającego do obserwatora, natomiast λ jest długością fali promieniowania charakterystyczną danej linii widmowej (mierzoną przez obserwatora pozostającego w spoczynku względem źródła). Na przykład, długość fali żółtej linii D sodu zmierzona w laboratorium wynosi 589 nm. Gdy zidentyfikujemy tę linię w widmie gwiazdy (lub innego obiektu astronomicznego) i stwierdzimy, że długość fali jest równa 600 nm, wtedy przesunięcie ku czerwieni tego ciała wynosi: $11/589$, a zatem $z = 0,01868$. W przypadku tak małego przesunięcia ku czerwieni, prędkość oddalania jest równa cz , a zatem obserwowany obiekt oddala się z prędkością około 5000 km/s.

Wzór (1) uczy więc, że przesunięcie z jest liczbą, która jest stosunkiem wzrostu długości fali w czasie jej podróży na Ziemię do jej początkowej długości; λ_{obs} jest długością fali odbieranej z galaktyki, natomiast λ oznacza długość analogicznej fali odbieranej od źródła w laboratorium. Obserwacje galaktyk i gromad galaktyk wskazują na ich izotropowe rozmieszczenie przestrzeni. Wielkość z nie zależy od kierunku do danej galaktyki, ale zależy od odległości r , w jakiej dana galaktyka się znajduje; z jest wprost proporcjonalne do r .

Dlaczego parametr z – zdefiniowany równaniem (1) – nazywany jest przesunięciem ku czerwieni? Otóż, oko ludzkie widzi promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali zawartej między 3500 Å i 7000 Å. Fale o długości mniejszej od 4000 Å sprawiają wrażenie barwy fioletowej. Fale o długości ponad 6000 Å widzimy jako czerwień.



» Linie absorpcyjne w widmie optycznym supergromady odległych galaktyk (BAS11) (u dołu), w porównaniu do tych w widmie optycznym Słońca (u góry). Strzałki wskazujące redshift.

» Źródło: wikimedia.org, Georg Wiora

Pomiędzy tymi długościami fal zawarte są wszystkie barwy tęczy, a więc kolejno, licząc od fal najkrótszych do najdłuższych, mamy barwy: fioletową, niebieską, zieloną, żółtą, pomarańczową, czerwoną. Światło białe jest mieszaniną tych wszystkich kolorów. Wiązka światła białego przepuszczona przez szklany pryzmat ulega rozszczepieniu na wszystkie barwy, tworząc widmo. Jeżeli źródło światła oddala się od nas, to długości wszystkich fal ulegają zwiększeniu, czyli całe widmo przesuwają się w stronę barwy czerwonej. Stąd też i nazwa: przesunięcie ku czerwieni. Tempo, w jakim zwiększa się odległość między galaktykami, wynika z prawa HUBBLE'A: prędkość v , z jaką oddala się od nas (obserwatora) galaktyka, jest wprost proporcjonalna do odległości r , jaka tę galaktykę od nas dzieli. Zapisujemy to następująco:

$$v = H r, \quad (2)$$

gdzie H – stała proporcjonalności, zwana stałą HUBBLE'A. Prędkość radialna galaktyki jest liniową funkcją jej odległości. Z prawa HUBBLE'A wyrażonego wzorem (2) wynika, że w danej chwili każde dwie gromady galaktyk, dostatecznie od siebie odległe, oddalają się wzajemnie, przy czym ile razy jest większa ich wzajemna odległość r , tyle razy większa jest ich względna szybkość. Z prawa HUBBLE'A nie wynika, czy w ogóle istniało miejsce wybuchu, ani charakter ruchu galaktyk (jednostajny czy jakkolwiek inny). Prawo HUBBLE'A opisuje uśrednione ruchy galaktyk. Oprócz nich obiekty te wykonują drobne ruchy własne wywołane wzajemnym przyciąganiem grawitacyjnym.

Stać HUBBLE'A jest wielkością stałą przestrzennie, ale zmieniającą się z upływem czasu. Jeżeli uwzględnimy istnienie we Wszechświecie tylko grawitacji hamującej rozszerzanie, to stała HUBBLE'A była w przeszłości większa niż obecnie, a w przyszłości będzie mniejsza. W obecnym Wszechświecie $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} < H < 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ (gdzie $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ km}$ to jednostka odległości używana przez astronomów, $1 \text{ pc} = 3,26$ roku świetlnego).

Odwrotność stałej HUBBLE'A, czyli $T=1/H$ opisuje wiek Wszechświata (czas HUBBLE'A), czyli czas T jaki upłynął od Wielkiego Wybuchu (początku ekspansji).

Odkrycie przez HUBBLE'A przesunięcia ku czerwieni w widmach galaktyk miało pierwszorzędne znaczenie dla nauki: oznaczało przejście od statycznego do ewolucyjnego obrazu Wszechświata. Wszechświat okazał się układem dynamicznym, zmieniającym się w czasie. Prawo HUBBLE'A stanowi podstawę do wyznaczenia odległości r odległej galaktyki, jeśli znana jest z obserwacji wartość względnego przesunięcia linii widmowych to:

$$r = \frac{c}{H} z$$

W przypadku kwazarów otrzymujemy tą drogą olbrzymie odległości sięgające kilka miliardów lat światła!

Interesującym pytaniem pozostaje to, czy ekspansja Wszechświata ulega przyspieszeniu czy spowolnieniu. Obserwacje supernowych przemawiają za przyspieszeniem ekspansji.

Pierwsze hipotezy, że Wszechświat rozszerza się obecnie szybciej niż w przeszłości, opublikowano w 1998 roku. Dwie niezależne grupy fizyków badające supernowe, które eksplodowały 5 mld lat temu, doszły do identycznego wniosku, że Wszechświat rozszerza się coraz szybciej. Wydaje się, że zasadniczego dowodu dostarczyły zdjęcia wykonane przez teleskop HUBBLE'A. Na zdjęciach znaleziono dowód eksplozji supernowej sprzed 10 mld lat. Blask tej eksplozji jest prawie dwukrotnie silniejszy niż oczekiwany, zarówno ze względu na typ gwiazdy, jak i jej odległość od obserwatora.

Gdy doszło do wybuchu supernowej 10 mld lat temu, szybkość rozszerzania się Wszechświata malała na skutek oddziaływań grawitacyjnych. Początkowa ekspansja, wywołana Wielkim Wybuchem, po okresie inflacji (niezwykle szybkim, gwałtownym rozszerzaniu się Wszechświata) była stopniowo spowalniana przez oddziaływania grawitacyjne. Ale kilka miliardów lat później negatywna energia próżni („ciemna energia” lub antygravitacja) pokonała grawitacyjne siły przyciągania. Ekspansja Wszechświata uległa przyspieszeniu. Uzyskane dane zdają się dowodzić istnienia siły przeciwstawnej do grawitacji, a działającej na olbrzymich odległościach. Oznacza to, że jest ona niewidoczna, prawdopodobnie zbyt słaba, aby można ją było zaobserwować w laboratorium. Jednak uwidacznia się w skali Wszechświata, odpychając od siebie wielkie masy galaktyk i ich gromady. W rezultacie szybkość ekspansji Wszechświata rośnie. Pozyskane informacje stawiają też pytanie co do natury siły powodującej wczesne procesy inflacyjne Wszechświata.

Źródło:

Henryk Drozdowski

FIZYCZNY OBRAZ ŚWIATA - Wydawnictwo Naukowe
Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE
CWINT W PARZYNOWIE

ZAPRASZA dzieci, młodzież, studentów, szkoły do
wspólnego odkrywania tajemnic KOSMOSU
Informacje: CWINT-Piotr Duczmal,
pd@ecis.pl, 601-97-70-54

