

Astrolabium

Konkurs astronomiczny

Czas i przestrzeń

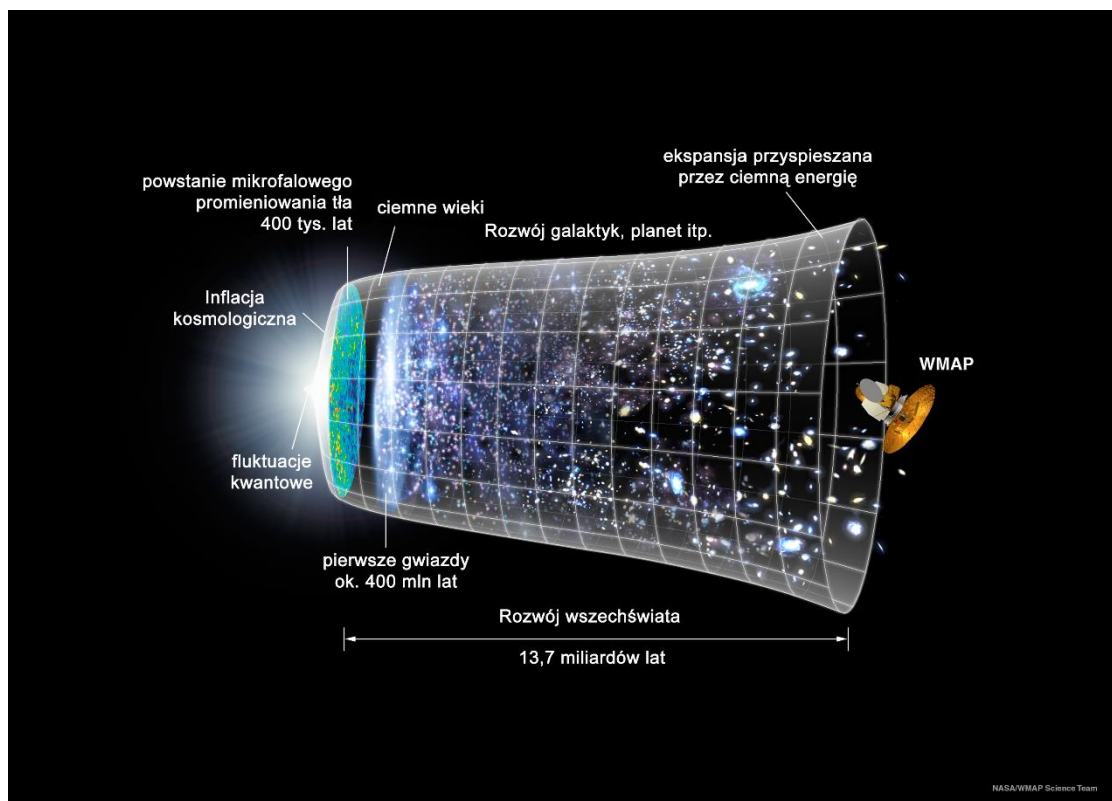


Szkoła średnia
Klasy I – III
Doświadczenie konkursowe 1

Rok 2021

1. Wstęp teoretyczny

Astronomia bada obiekty (gwiazdy, galaktyki) znajdujące się daleko w przestrzeni kosmicznej, czy też, używając innej nazwy, we Wszechświecie. Obiekty te znajdują się tak daleko, że wysyłane przez nie światło, poruszające się z największą możliwą szybkością 299 792 458 metrów na sekundę, potrzebuje wielu lat (czasem nawet milionów lub miliardów), by do nas dotrzeć. Oznacza to, że widzimy te obiekty takimi, jakimi były wiele lat temu. Jakie są obecnie, moglibyśmy sprawdzić dopiero w przyszłości. Dzięki temu, obserwując odległe obiekty w stanie, w jakim były przed milionami czy miliardami lat, możemy odtworzyć w zarysach historię Wszechświata. Przedstawiona jest ona na poniższym rysunku.



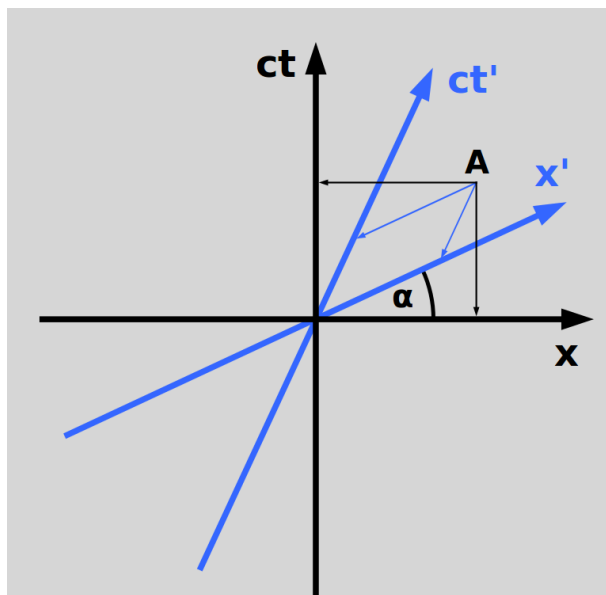
Rysunek 1. Zarys historii Wszechświata. Źródło: Wikipedia¹.

Na początku był tzw. **Wielki Wybuch**, kiedy to powstała materia. Ułamek sekundy później Wszechświat bardzo szybko zwiększył swoje rozmiary w procesie zwanym inflacją. Przez pierwsze 400 000 lat istnienia Wszechświat wypełniał gorący gaz, który emitował promieniowanie ciepłe. Promieniowanie to mogło swobodnie przelatywać przez Wszechświat, aż w końcu dotarło w okolice Ziemi i satelity badawczego WMAP. Ponieważ Wszechświat nadal się rozszerzał (choć znacznie wolniej niż podczas inflacji), zmieniała się również długość tego promieniowania i obecnie widzimy je jako promieniowanie mikrofalowe. Z gazu wypełniającego Wszechświat powstały gwiazdy i galaktyki. Wszechświat

¹[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Big_Bang#/media/File:CMB_Timeline75_polish_version_\(polska_wersja_PL\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Big_Bang#/media/File:CMB_Timeline75_polish_version_(polska_wersja_PL).png)

rozszerzał się coraz wolniej, aż od pewnego momentu rozszerzanie stało się coraz szybsze. To co spowodowało przyspieszenie, nazwano **ciemna energią**. Niestety, wciąż nie znamy natury tej tajemniczej energii.

Nasze postrzeganie czasu i przestrzeni zmieniło się zupełnie odkąd Albert Einstein wprowadził **teorię względności** w celu wytłumaczenia, dlaczego prędkość światła zawsze jest stała.



Rysunek 2. Diagram czasoprzestrzenny Minkowskiego. Źródło: Wikipedia².

Na powyższym rysunku mamy tzw. **diagram czasoprzestrzenny**, wprowadzony przez Hermanna Minkowskiego. Jest to pewien sposób na przedstawienie czasoprzestrzeni. Na pionowej, czarnej osi odłożony jest czas (który możemy pomnożyć przez prędkość światła, uzyskując miarę długości), jaki postrzega pewien obserwator. Na osi x mamy jeden z kierunków przestrzennych. Teraz przyjmijmy, że w punkcie oznaczonym jako A coś się zdarzyło (np. wybuchła supernowa). Ogólnie każdy punkt na diagramie będziemy nazywać **zdarzeniem**. Nasz obserwator może podać, kiedy i gdzie się to coś zdarzyło. Innymi słowy może podać **współrzędne** zdarzenia A w pewnym układzie współrzędnych. Ten układ współrzędnych nie jest jednak jedynym możliwym. Możemy wprowadzić inny układ współrzędnych np. oznaczony na powyższym diagramie za pomocą niebieskich osi ct' oraz x' . Zdarzenie, które w układzie tworzonym przez osie ct oraz x ma jakieś współrzędne, ma zupełnie inne współrzędne w układzie tworzonym przez osie ct' oraz x' , mimo iż jest to dokładnie ten sam punkt.

Einstein zastanawiał się, dlaczego wartość prędkości światła zawsze wynosi tyle samo, nawet dla obserwatorów poruszających się z różnymi prędkościami. Wydawać by się mogło,

² https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Minkowski_diagram_-_asymmetric.svg

że prędkości ruchu powinny się dodawać do lub odejmować od prędkości światła. A co, jeśli obserwatorzy poruszający się względem siebie z różnymi prędkościami różnie postrzegają czas i odległość? Jeśli to różne postrzeganie odbywa się w odpowiedni sposób, możliwe jest, że prędkość światła wynosi zawsze tyle samo.

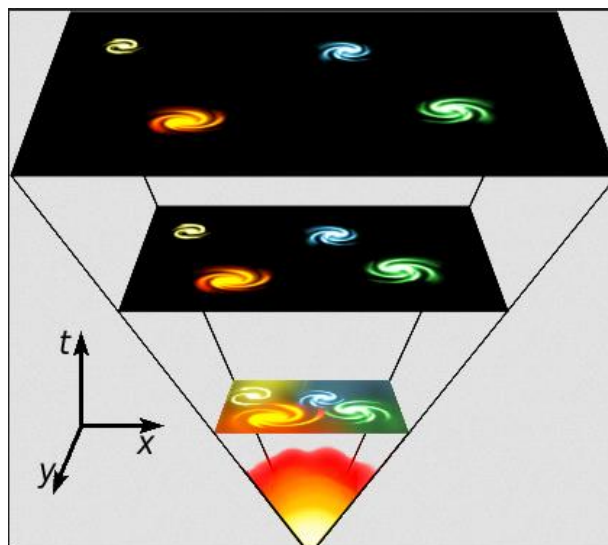
Na powyższym diagramie osie ct' oraz x' nie są narysowane przypadkowo. Są to osie obserwatora, który porusza się względem tego pierwszego w kierunku osi x , w prawo, z prędkością v . Między współrzędnymi ct' , x' oraz ct , x zachodzą następujące związki:

$$ct' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(ct - \frac{x \cdot v}{c} \right)$$

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(x - \frac{v \cdot ct}{c} \right)$$

Opis ten może prowadzić do zaskakujących rzeczy. Jedną z nich jest nierównoczesność zdarzeń dla różnych obserwatorów. Zdarzenia równoczesne, czyli takie które odpowiadają tej samej wartości na osi czasu (ct), położone są na osi x i osiach do niej równoległych. Dla jednego z obserwatorów będzie to oś x , dla drugiego zaś oś x' . Każdy z obserwatorów mógłby powiedzieć, że inne zdarzenia „dzieją się w tej samej chwili”.

Problem odległości we Wszechświecie komplikuje wspomniana już ciemna energia. Odpowiada ona za przyspieszone **rozszerzanie się Wszechświata**, co ilustruje poniższy rysunek:



Rysunek 2. Schemat ekspansji Wszechświata. Galaktyki tkwią ciągle w tych samych punktach przestrzeni, która z czasem się rozszerza, natomiast względem siebie galaktyki się „oddalają”. Źródło: Wikipedia³.

Założmy, że wszystkie galaktyki spoczywają względem siebie w przestrzeni. Jeśli jednak sama przestrzeń się rozszerza, to odległości między galaktykami powiększają się z czasem. To właśnie rozumiemy przez pojęcie rozszerzania się Wszechświata i ucieczki galaktyk.

Ponieważ Wszechświat się rozszerza, zaś my widzimy obiekty, z których światło zostało wyemitowane przed milionami, czy miliardami lat, nie jesteśmy w stanie jednoznacznie podać do nich odległości. Posługujemy się więc jednym parametrem obserwacyjnym i kilkoma miarami odległości. Parametr obserwacyjny to **przesunięcie ku czerwieni** (ang. **redshift**), oznaczane zwykle jako z . Jest to stosunek długości fali odbieranej przez nas do fali wyemitowanej przez źródło. Możemy wyróżnić trzy miary odległości:

- **Odległość jasnościowa** (ang. *luminosity distance*): jasność obiektów spada wraz z odległością. Im dalej od nas znajduje się świecący obiekt, tym słabiej go widzimy. Jeśli wiemy, jak jasny powinien być w określonej odległości, to odległość jasnościowa mówi nam o tym, w jakiej odległości wydaje się on być, jeśli jego jasność jest odpowiednio mniejsza.

- **Odległość rozmiarów kątowych** (ang. *angular size distance*): Podobnie jak w przypadku odległości jasnościowej - jeśli wiemy, jakie rozmiary na niebie miałby obiekt w ustalonej odległości, to odległość rozmiarów kątowych mówi nam, w jakiej odległości wydaje się on być, jeśli jego rozmiary na niebie są odpowiednio mniejsze.

- **Odległość współporuszająca się** (ang. *comoving radial distance*): Jest to odległość między dwoma punktami przestrzeni w jednoczesnym momencie według rachuby obserwatora związanego z pierwotnym gazem we Wszechświecie.

2. Cel doświadczenia

Celem doświadczenia jest zapoznanie się z niejednoznacznością pojęć czasu, równoczesności oraz odległości we Wszechświecie.

3. Opis wykonania doświadczenia

Doświadczenie składa się z dwóch zadań. Jedno dotyczy problemu równoczesności zdarzeń we Wszechświecie, a drugie pomiaru odległości.

Zadanie 1:

Ziemia krąży wokół Słońca z prędkością około 30 km/s, po orbicie eliptycznej, zbliżonej do kołowej. Oznacza to, że co 1/4 roku (kwartał) kierunek prędkości zmienia się o 90 stopni. Co pół roku zaś prędkość Ziemi, w układzie spoczynkowym Słońca, zmienia się o 60 km/s. Wyobraźmy sobie, że istnieje galaktyka położona w płaszczyźnie orbity Ziemi, która w tej chwili znajduje się względem Ziemi w spoczynku. Za pół roku zaś będzie się poruszać względem nas z prędkością 60 km/s (ze względu na ruch Ziemi wokół Słońca).

Jak daleko musi znajdować się ta galaktyka, by za pół roku Obcy z tej galaktyki, który w tej chwili jest z nami „równoczesny”, był równoczesny z bitwą pod Grunwaldem? Wynik podaj w latach świetlnych oraz parsekach (parsek to około $3,086 \cdot 10^{16}$ m \cong 3,26 roku

³ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Universe_expansion2.png

światłnego).

Podpowiedź: Wykorzystaj wzory wiążące ct' z ct oraz x . Za t' przyjmij 0 („chwila obecna”), za t - ile lat minęło od bitwy pod Grunwaldem. Wprowadź te wartości do odpowiedniego równania i wyprowadź związek wiążący x i v .

Zadanie 2:

Do wykonania zadania potrzebny będzie kalkulator kosmologiczny znajdujący się na stronie

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Enter values, hit a button

70 H_0
0.3 Ω_M
1 z
Open Flat
0.7 Ω_{vac}
General

Open sets $\Omega_{vac} = 0$ giving an open Universe [if you entered $\Omega_M < 1$]
Flat sets $\Omega_{vac} = 1 - \Omega_M$ giving a flat Universe.
General uses the Ω_{vac} that you entered.
[Source](#) for the default parameters.

For $H_0 = 70$, $\Omega_M = 0.300$, $\Omega_{vac} = 0.700$, $z = 1.000$

- It is now 13.462 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 5.747 Gyr.
- The [light travel time](#) was 7.715 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 3303.5 Mpc or 10.775 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 151.016 Gpc³.
- The [angular size distance \$D_A\$](#) is 1651.8 Mpc or 5.3874 Gly.
- This gives a scale of 8.008 kpc".
- The [luminosity distance \$D_L\$](#) is 6607.1 Mpc or 21.550 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or $9.461 \cdot 10^{26}$ cm.
1 Gyr = 1,000,000,000 years.
1 Mpc = 1,000,000 parsecs = $3.08568 \cdot 10^{24}$ cm, or 3,261,566 light years.

[Tutorial: Part 1](#) | [Part 2](#) | [Part 3](#) | [Part 4](#)
[FAQ](#) | [Age](#) | [Distances](#) | [Bibliography](#) | [Relativity](#)

See the [advanced](#) and [light travel time](#) versions of the calculator.
[James Schombert](#) has written a [Python version](#) of this calculator.
[Ned Wright's home page](#)

© 1999-2016 [Edward L. Wright](#). If you use this calculator while preparing a paper, please cite [Wright](#)

Umożliwia on obliczenie podanych powyżej miar odległości, wieku Wszechświata itp. w zależności od wprowadzonego przesunięcia ku czerwieni i parametrów kosmologicznych. Na potrzeby tego zadania należy użyć następujących parametrów kosmologicznych: $H_0 = 67.74$, $\Omega_M = 0.309$, $\Omega_{vac} = 0.691$ oraz wybrać przycisk *Flat*. Podane wartości są obecnie przyjmowane na podstawie rezultatów uzyskanych z satelity badawczego Planck. Wpisując różne wartości przesunięcia ku czerwieni z , można uzyskać informacje o odległości obiektu.

Przyjmijmy, że pierwotny gaz wypełniający Wszechświat został wyemitowany 400 000 lat po **Wielkim Wybuchu** (ang. *Big Bang*). Znajdź za pomocą kalkulatora kosmologicznego przesunięcie ku czerwieni oraz podane miary odległości odpowiadające tej epoce. Która z nich jest największa?

Podpowiedzi: wpisz powyższe parametry, a następnie sprawdź wyniki dla różnych wartości przesunięcia ku czerwieni (0.1, 1, 10, 100, 1000...). W oknie odpowiedzi powinno znajdować się następujące zdanie:

It is now 13.721 Gyr since the Big Bang (Obecnie jest 13.721 miliardów lat po Wielkim Wybuchu)

a także wiek Wszechświata na danym przesunięciu ku czerwieni:

The age at redshift z was XXXX Gyr (Wiek Wszechświata dla podanego przesunięcia ku czerwieni wynosi XXXX miliardów lat)
oraz wartości kolejnych miar odległości.