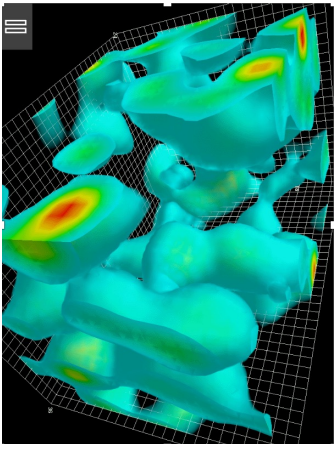


Zgodnie z mechaniką kwantową próżnia nie jest całkowicie pustką. Jest raczej ciągłym rojeniem się cząstek i antycząstek, które bez przerwy pojawiają się i znikają. Próżnia musi więc mieć niezzerową gęstość.

<https://physicscommunication.ie/holting-matters-how-the-study-of-vacuum-energy-is-proving-cosmology>
Przejdź na tę stronę, aby zobaczyć animację



8

* $10^{20} = 10 \times 10 \times 10 \dots \times 10$, powtarzając mnożenie 120 razy. 9

Kwantowa próżnia

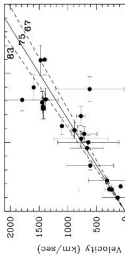
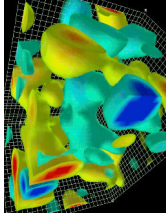


Wolfgang Pauli Jakob Zeldowicz Steven Weinberg
Trzech spośród największych fizyków XX wieku zajęło się zagadnieniem **próżni kwantowej**. Zwrócili oni uwagę na niewątpliwie dużą wartość gęstości próżni przewidywaną przez teorię kwantową w porównaniu z wartością wynikającą z obserwacji. Wartość przewidywana przez teorię kwantową jest około 10^{20} razy* większa. Jest to najbardziej niertrafne oszacowanie rzędu wielkości w całej fizyce oraz kolejne zagadnienie, które mogło pozostać w lamusie fizycznych dziełach uznanych za bezużyteczne.

Wszehświat w mojej kieszeni



Alain Blanchard
Université Paul Sabatier,
Tuluza



Wskaź, który obrazek przedstawia:

- Różne geometrie przestrzeni
- Reprezentacja kwantowej próżni
- Diagram Hubble'a



Odpowiedzi na odwrócić

Quiz

3

Ciemna energia

Stała kosmologiczna wprowadzona przez Einsteina jest z teoretycznego punktu widzenia bardzo sztuczna. Gęstość próżni kwantowej przewidywana przez kwantową teorię pola przewyższa wartość wynikającą z obserwacji o najmniej 120 rzędów wielkości.

Dlatego zaproponowano wiele innych wyjaśnień przyspieszonej ekspansji, określanych wspólnie jako **„ciemna energia”**.

Najprostszą formą ciemnej energii jest kwintesencja. To hipotetyczny składnik Wszehświata, oddziałujący z jego pozostałą częścią głównie przez grawitację. Jego gęstość może zmniejszać się w czasie albo zachowywać się podobnie do stałej kosmologicznej, zależnie od potencjału rządzącego jego ewolucją. W 2024 roku kolaboracja DESI ogłosiła przesłanki wskazujące na możliwość istnienia takiej ewoluującej ciemnej energii.

13

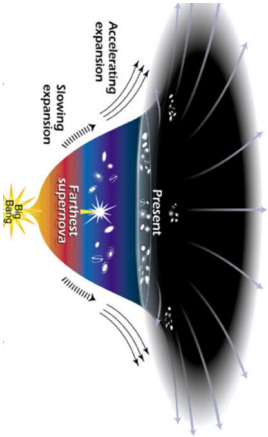


Diagram przedstawiający przyspieszoną ekspansję Wszehświata. Autor: Design Alex Mittenham, Coldcreation
Próby wyjaśnienia przyspieszającej ekspansji Wszehświata doprowadziły do powstania wielu różnorodnych teorii. Ich szczegółowy opis jest matematycznie trudny.

Innym możliwym rozwiązaniem jest modyfikacja einsteinowskiej teorii grawitacji. Można to zrobić na wiele sposobów, trudno jednak uniknąć naruszenia jednego lub kilku spośród liczących, dobrze potwierdzonych przewidywań ogólnej teorii względności. Wreszcie, oba podejścia można też łączyć na różne sposoby...

12

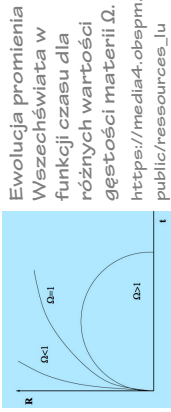
Przyszłość Wszehświata



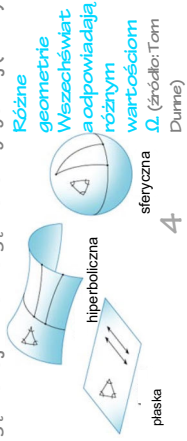
Ekspansję Wszehświata najlepiej opisuje **ogólna teoria względności**, opublikowana przez Alberta Einsteina w 1915 roku. Zgodnie z tą teorią geometria przestrzeni jest powiązana z gęstością Wszehświata.

Einsteina nie był jednak zadowolony z pierwszej wersji swojej teorii, ponieważ nie dawała się ona pogodzić ze statycznym, czyli nierozszerzającym się Wszehświatem. Dlatego w 1917 roku wprowadził do niej nowy składnik, **stałą kosmologiczną Λ** (grecka litera Lambda).

Był to początek sagi, która teraz, ponad sto lat później, osiągnęła być może swój szczyt... 5



Prędkość galaktyk wynikająca z ekspansji Wszehświata znana jest z obserwacji. Nie znamy jednak siły grawitacyjnego oddziaływania materii, ponieważ zależy ona od jej gęstości. Jeśli gęstość jest wystarczająco duża ($\Omega > 1$), ekspansja zatrzyma się, a Wszehświat zacznie się kurczyć. Jeśli gęstość jest zbyt mała ($\Omega < 1$), siła grawitacji nie zdoła powstrzymać ekspansji, i ta będzie trwać wiecznie. Przypadek graniczny między tymi dwiema możliwościami zachodzi wtedy, gdy gęstość jest równa gęstości krytycznej ($\Omega = 1$).



4

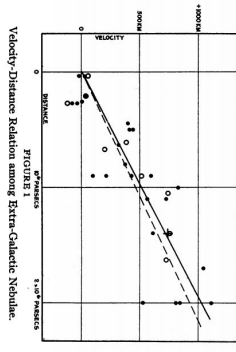
3

+

Oryginalny diagram Hubble'a (Hubble, 1929). Przedstawia on zmierzoną prędkość V oddalania się galaktyk w zależności od ich odległości D . Odległość tę wyznaczono na podstawie zależności okres-jasność dla cefeid, odkrytej kilka lat wcześniej przez Henrietteę Leavitt (zob. TULiMP 15).

Zależność $V = H_0 \times D$ nazywana prawem Hubble'a-Lemaître'a, radykalnie zmieniła nasze wyobrażenie o Wszechświecie.

Wartość H_0 , czyli stałej Hubble'a, początkowo szacowano na około 500 km/s na Mpc, a na początku lat 60. XX wieku na około 100 km/s na Mpc. Obecne oszacowania wynoszą około 73 km/s na Mpc. **2**



1 Mpc jest równy 3 milionom lat świetlnych

Natura Lambdy



Odkrycie ekspansji Wszechświata sprawiło, że stała kosmologiczna, za zgodą samego Einsteina, trafiła do lamusa fizycznych ciekawostek uznanych za bezużyteczne.

Jednak w 1931 roku Lemaître przeocznął istotną uwagę, wówczas przeoczoną: stała kosmologiczna, traktowaną wcześniej jako dodatkowy składnik geometrycznej części równań Einsteina, można równie dobrze przypisać ciśnieniu i gęstości płynu. Tym płynem miałyby być **próżnia kosmiczna**.

7



Różne geometrie przestrzeni
Źródło: MARK GARLUCK
/SCIENCE PHOTO

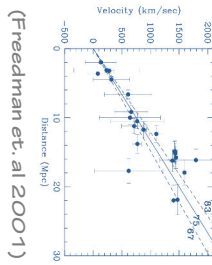
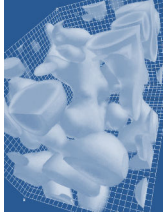


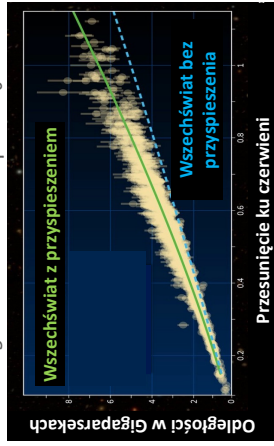
Diagram Hubble'a z obserwacji Cefeid w odległych galaktykach za pomocą Kosmicznego Teleskopu Hubble'a.



Reprezentacja kwantowej próżni

Odpowiedzi

Diagram Hubble'a dla supernowych



Do tego badania wybrano supernowe typu Ia. Które mają bardzo regularną jasność, dzięki czemu można je wiarygodnie wykorzystywać do wyznaczania odległości.

Współczesna wersja diagramu Hubble'a, oparta na obserwacjach **supernowych typu Ia**, pokazała, że ekspansja Wszechświata przyspiesza. Odkrycie to przyniosło Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 2011 roku Saulowi Perlmutterowi, Brianowi P. Schmidtowi i Adamowi G. Riessowi. Wynik ten jest zaskakujący, ponieważ oznacza, że w skali całego Wszechświata **gravitacja działa jak siła odpychająca**. **10**

Tłumaczenie: Erynek Rudak
TULiMP Creative Commons



Aby dowiedzieć się więcej o tej serii tematycznej
przedstawionych w tej książeczce odwiedź stronę
<http://www.tulimp.org>



Przyspieszona ekspansja

W 1998 roku dwa zespoły badające diagram Hubble'a dla odległych supernowych dokonały odkrycia, które zrewolucjonizowało kosmologię i fizykę fundamentalną. Supernowe te są tak odległe, że ich wykryte światło zostało wyemitowane wtedy, gdy Wszechświat był znacznie młodszymi. Dzięki temu można porównać tempo ekspansji Wszechświata w tamtej epoce z jego tempem obecnym.

We Wszechświecie zdominowanym przez materię tempo ekspansji powinno maleć. Tymczasem diagram Hubble'a dla supernowych pokazał, że **tempo ekspansji Wszechświata rośnie**.

11

Wkrótce po Wielkiej Debatie w 1925 roku, która doprowadziła do uznania, że poza naszą Galaktyką istnieją także inne galaktyki, Edwin Hubble zaobserwował, iż prędkości oddalania się tych galaktyk są proporcjonalne do ich odległości. Georges Lemaître zinterpretował to zjawisko jako skutek rozszerzania się Wszechświata.

Rozszerzanie się Wszechświata nie jest łatwe do zrozumienia. Jeśli pominiemy indywidualne ruchy galaktyk związane z Kosmiczną Siatką (zob. TULiMP 15), galaktyki oddalają się od siebie z prędkością proporcjonalną do ich wzajemnej odległości. Prędkość tego oddalania zależy od gravitacji. Można to porównać do kamienia rzuconego w górę: jeśli jego prędkość początkowa jest mała, kamień wznosi się, a potem spada. Jeśli jest wystarczająco duża, to - pomijając wpływ atmosfery - kamień będzie oddalał się bez końca. **5**

Prawo Hubble'a-Lemaître'a



Albert Einstein i Georges Lemaître

W 1948 roku Georges Lemaître zbudował pierwszy model kosmologiczny opisujący wczesną fazę istnienia Wszechświata, nazwany „pierwotnym atomem”. Był to przodek Wielkiego Wybuchu.

Lemaître zauważył, że przy prędkości ekspansji zmierzonej przez Hubble'a Wszechświat musiałby być młodszymi od Ziemi, chyba że przyspieszył się istnienie stałej kosmologicznej. Argument ten nie przekonał Einsteina, który po odkryciu ekspansji Wszechświata porzucił ideę stałej kosmologicznej.

Przy znanej dziś wartości stałej Hubble'a rozbieżność między wiekiem Wszechświata a wiekiem Ziemi i tak znika. **6**