

Wszechświat w mojej kieszeni



*Ciemna energia*



Alain Blanchard  
Université Paul Sabatier,  
Tuluza

## Prawo Hubble'a-Lemaître'a

Wkrótce po Wielkiej Debacie 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 Siecią (zob. TUIMP 13), galaktyki oddalają się od siebie z prędkością proporcjonalną do ich wzajemnej odległości. Prędkość tego oddalania zależy od grawitacji. 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.

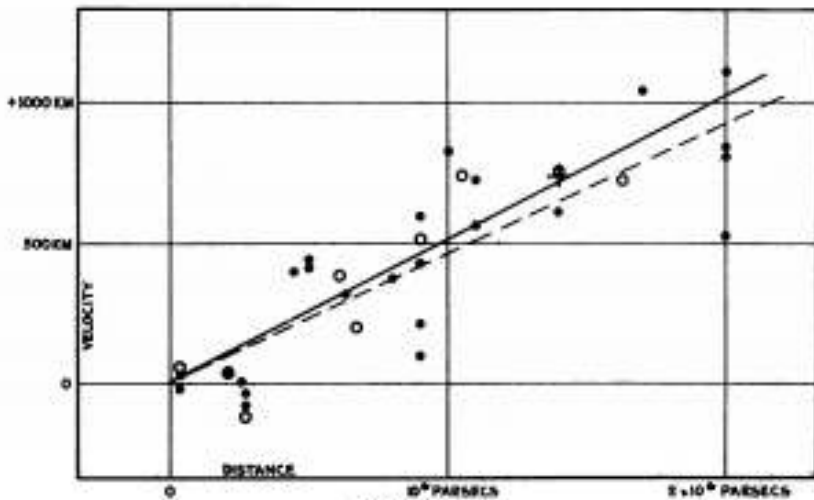


FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

1 Mpc jest równy 3 milionom lat świetlnych

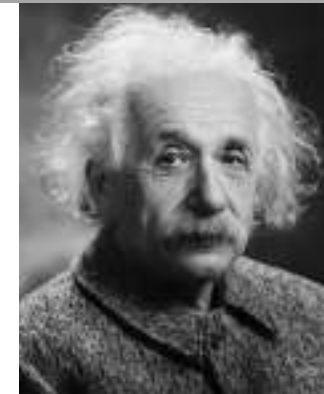
Oryginalny diagram Hubble'a (Hubble, 1929).

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 Henriettę Leavitt (zob. TUIMP 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

# Przyszłość Wszechświata



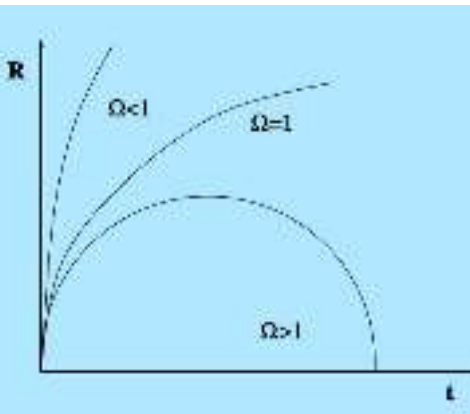
Albert Einstein

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

Einstein nie był jednak zadowolony z pierwszej wersji swojej teorii, ponieważ nie dawała się ona pogodzić ze statycznym, czyli nierozszerzającym się Wszechświatem. Dlatego w 1917 roku wprowadził do niej nowy składnik, **stałą kosmologiczną  $\Lambda$**  (grecka litera Lambda). Był to początek sagi, która teraz, ponad sto lat później, osiągnęła być może swój szczyt...

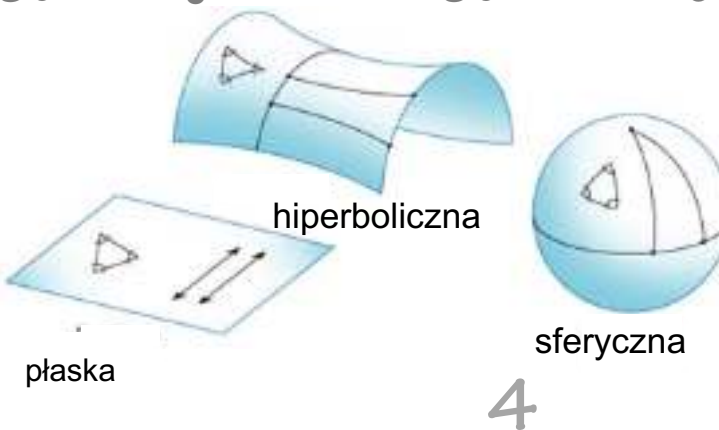
Ewolucja promienia Wszechświata w funkcji czasu dla różnych wartości gęstości materii  $\Omega$ .

[https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu)



Prędkość galaktyk wynikająca z ekspansji Wszechświata 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 Wszechświat 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 ( $\Omega = 1$ ).

Różne geometrie Wszechświata odpowiadają różnym wartościom  $\Omega$ . (źródło: Tom Dunne)





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 młodszy od Ziemi, chyba że przyjęłoby 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.

## 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 poczynił istotną uwagę, wówczas przeoczoną: stałą kosmologiczną, traktowaną wcześniej jako dodatkowy składnik geometrycznej części równań Einsteina, można równie dobrze przypisać ciśnieniu i gęstości płynu. Tym płynem miałyby być **próżnia kosmiczna**.

# Kwantowa próżnia



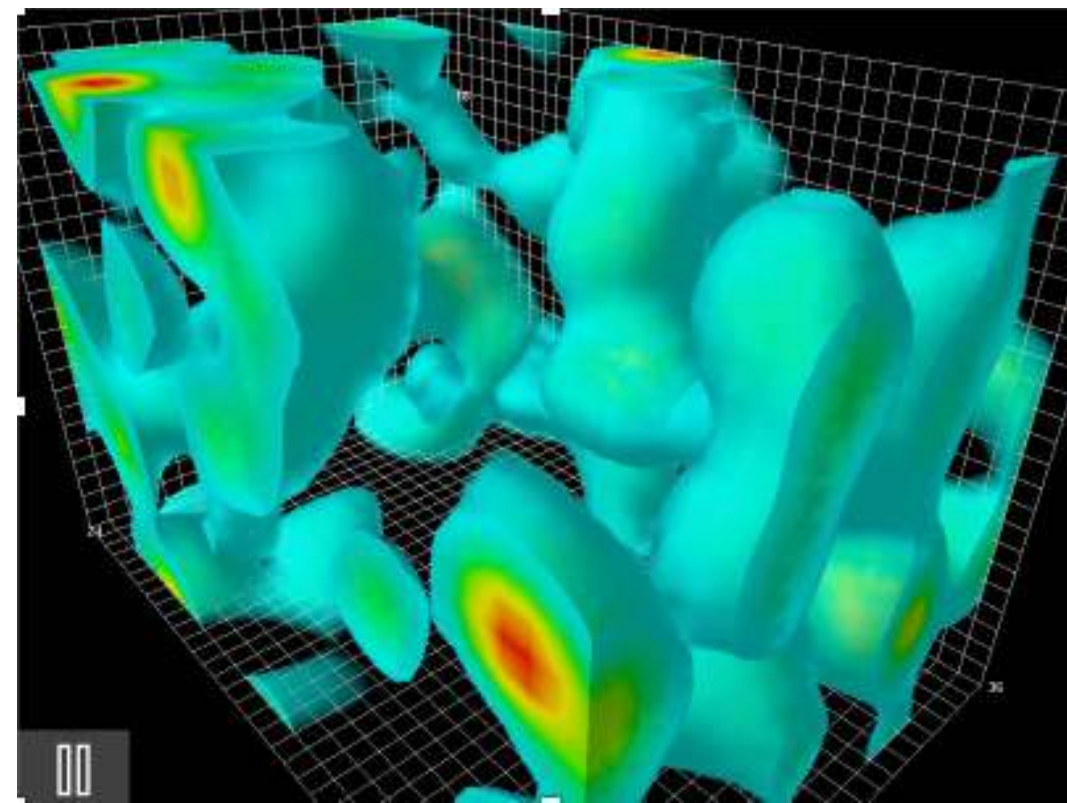
Wolfgang Pauli

Jakow Zeldowicz

Steven Weinberg

Trzech spośród największych fizyków XX wieku zajęło się zagadnieniem **próżni kwantowej**. Zwrócili oni uwagę na niewiarygodnie dużą wartość gęstości próżni przewidywaną przez teorię kwantową w porównaniu z wartością wynikającą z obserwacji. Wartość przewidywana przez teorię kwantową jest około  $10^{120}$  razy\* większa. Jest to najbardziej nietrafione oszacowanie rzędu wielkości w całej fizyce oraz kolejne zagadnienie, które mogło pozostać w lamusie fizycznych ciekawostek uznanych za bezużyteczne.

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



<https://physicscommunication.ie/nothing-matters-how-the-study-of-vacuum-energy-is-proving-catastrophic>

Przejdź na tę stronę, aby zobaczyć animację

Zgodnie z mechaniką kwantową próżnia nie jest całkowitą pustką. Jest raczej ciągłym rojeniem się cząstek i antycząstek, które bez przerwy pojawiają się i znikają.

Próżnia musi więc mieć niezerową gęstość.



Adaptacja z NOIRLab DES collaboration

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 zdumiewający, ponieważ oznacza, że w skali całego Wszechświata **gravitacja działa jak siła odpychająca**.

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 młodszy. 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**.

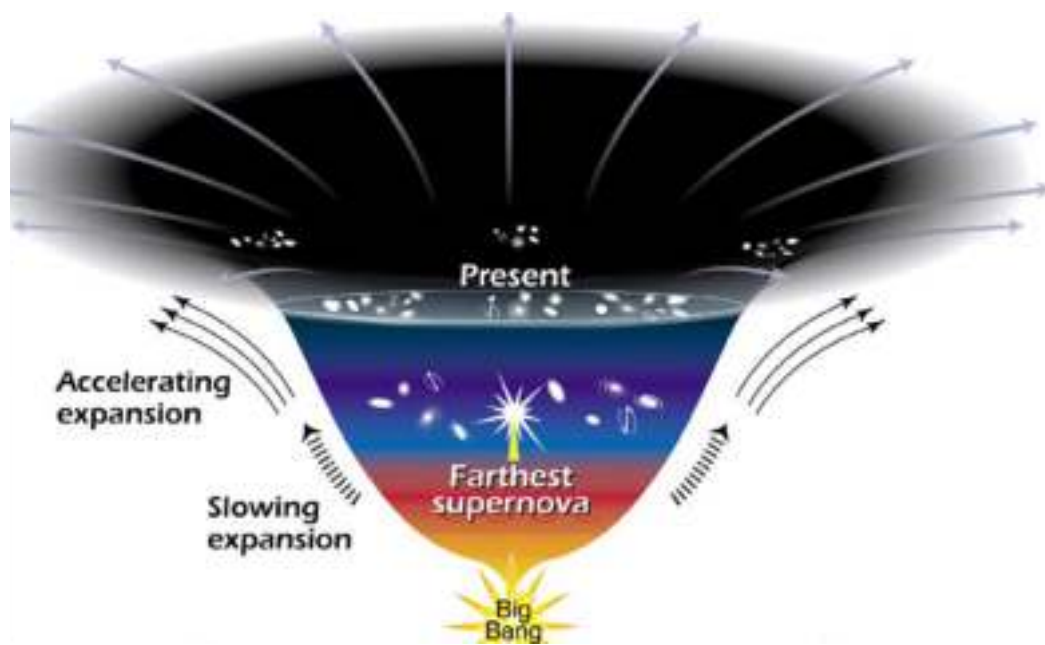


Diagram przedstawiający przyspieszoną ekspansję Wszechświata.

Autor: Design Alex Mittelman, Coldcreation

Próby wyjaśnienia przyspieszającej ekspansji Wszechświata doprowadziły do powstania wielu różnorodnych teorii. Ich szczegółowy opis jest matematycznie trudny.

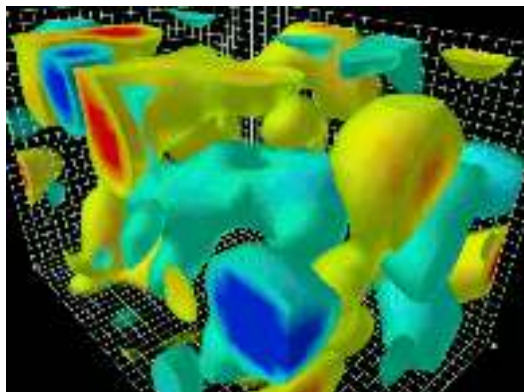
Innym możliwym rozwiązaniem jest modyfikacja einsteinowskiej teorii grawitacji. Można to zrobić na wiele sposobów, trudno jednak uniknąć naruszenia jednego lub kilku spośród licznych, dobrze potwierdzonych przewidywań ogólnej teorii względności. Wreszcie, oba podejścia można też łączyć na różne sposoby...

## 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 co 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 Wszechświata, oddziałujący z jego pozostałą częścią głównie przez grawitację. Jego gęstość może zmieniać 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.

# Quiz

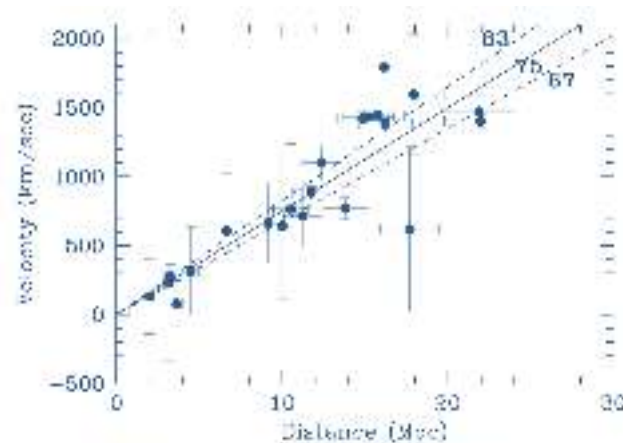


# Odpowiedzi



Reprezentacja  
kwantowej próżni

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



(Freedman et. al 2001)

Wskaż, który  
obrazek  
przedstawia:

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

Różne geometrie przestrzeni

Źródło: MARK GARLICK

/SCIENCE PHOTO



Odpowiedzi na odwrocie

# Wszechświat w mojej kieszeni Nr 4-1

Ta książeczka została napisana w 2024 roku przez Alaina Blancharda z Université Paul Sabatier (Tuluza, Francja) i zweryfikowana przez Stana Kurtza z IRyA (Meksyk).

## Zdjęcie na okładce:

Darth Vader z serii Gwiezdne Wojny to postać, która „przeszła na ciemną stronę Mocy”. Sam Wszechświat podlega nieznannej sile, której tajemnicze pochodzenie nazwano „Ciemną Energią”.



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

Tłumaczenie: Broniek Rudak

TUIMP Creative Commons

