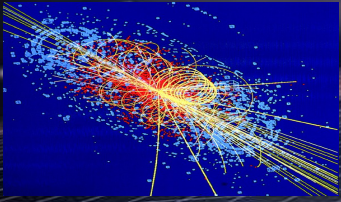


Wszechświat cząstek elementarnych dla przyrodników



WYKŁAD 15

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

12.01.2010

Ciemny Wszechświat

Polecam

- *The Dark Universe* by R. Kolb (Wykłady w CERN (2008))

<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=24743>

- Monty Python - "The Universe Expanding"

<http://www.youtube.com/watch?v=JWVshkVF0SY&NR=1>

Chaos → kosmos

- *Na początku był chaos – ciemna, bezkształtna pustka wypełniona nieuformowaną materią...*
- Słowo (gr.) **kosmos** oznacza porządek, harmonię lub piękno, a zarazem cały świat.
- Kosmologia – nauka o Wszechświecie (Kosmosie) jako całości
- Wszechświat podlega prawom fizyki (*nie było to oczywiste jeszcze wiek temu..*)
- Wszechświat od powstania idei (VI w przed Chrystusem) aż do początku XX w – uważany był jako całość za **statyczny, czyli niezmienny w czasie**
- Wszechświat z definicji – tylko jeden. Równania opisujące go powinny mieć tylko jedno rozwiązanie - istniejący Wszechświat.
- Matematycznie dopuszczamy rozmaite rozwiązania – obserwacja powinna odpowiedzieć, które się realizuje.
- Newton-jako pierwszy zauważył, że oddziaływanie kształtujące Wszechświat to grawitacja
- Inne oddziaływania, decydują o wewnętrznej budowie ciał, są ekranowane, np. oddziaływanie el-mag

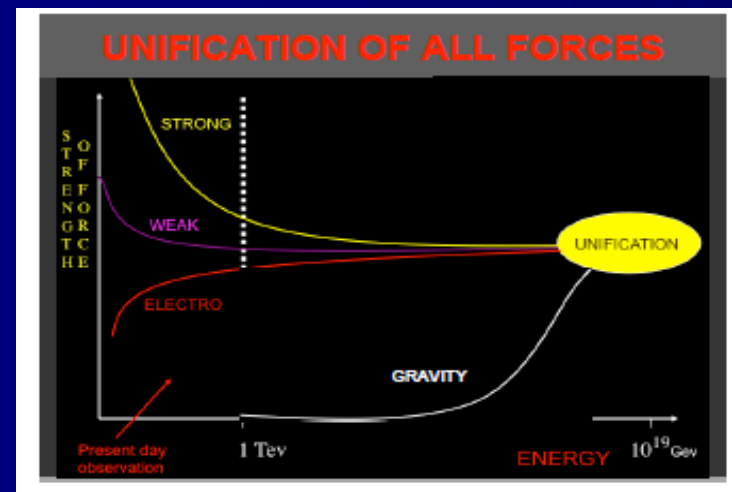
L. Sokołowski- Elementy kosmologii, ZamKor, Kraków 2005;

M. Heller- Ewolucja kosmosu i kosmologii, PWN 1985

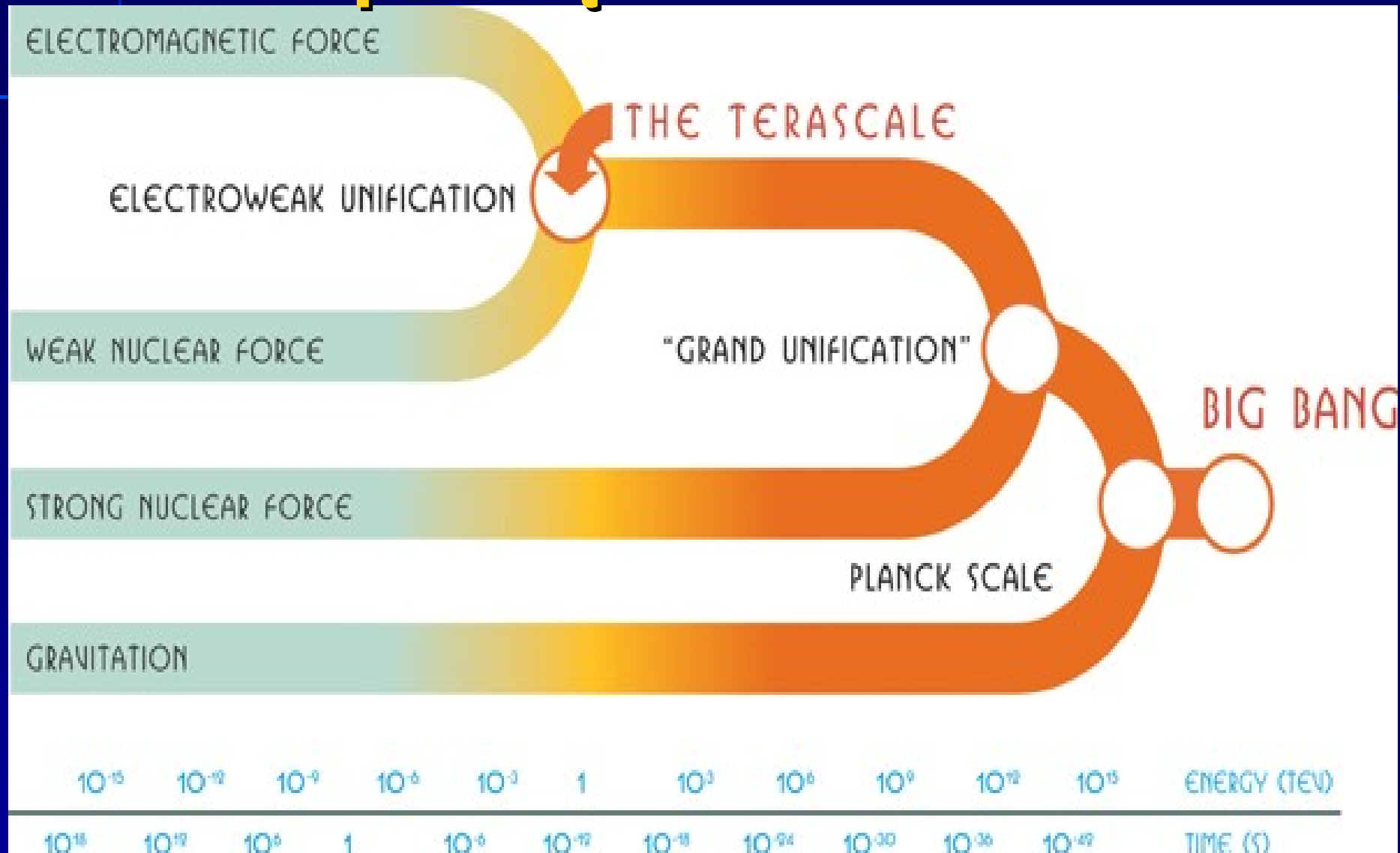
Cząstki a budowa Wszechświata

- Unifikacja oddziaływań dla bardzo dużych energii
- Grawitacją - bardzo słaba dla małych energii (dużych odległości) ale wzmacnia się dla dużych energii → „siła” porównywalna do innych oddziaływań dla (masy) energii Plancka.

Pełna unifikacja sił



UNIFIKACJA z grawitacją a początek Wszechświata



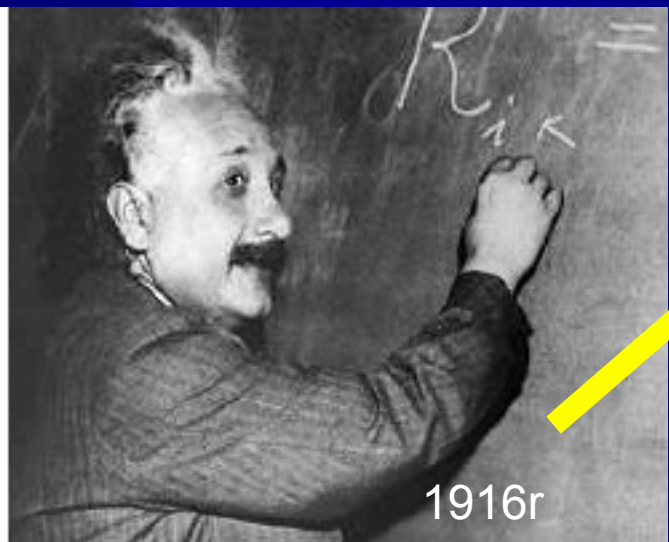
Grawitacja

Newton 1687

Prawo powszechnego ciążenia:

Każda cząstka we wszechświecie przyciąga każdą inną cząstkę siłą proporcjonalną do **iloczynu ich mas** i odwrotnie proporcjonalną do **kwadratu odległości** między nimi.

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$



1916r

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Aby uratować statyczny Wszechświat Einstein dołożył do swoich równań **stałą kosmologiczną** - Λ

Wszechświat jest prosty!

Model kosmologiczny Wszechświata opiera się na 4 kluczowych wynikach doświadczalnych:

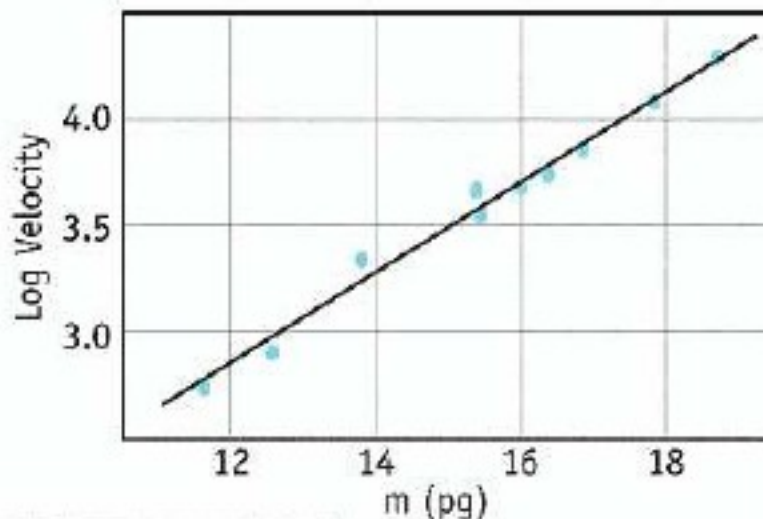
- Prawo Hubble'a – rozszerzanie się Wszechświata
- Obecność kosmicznego mikrofalowego promieniowania relikтового
- Duże rozpowszechnienie lekkich pierwiastków we Wszechświecie
- Występowanie anizotropii w promieniowaniu reliktowym, takich aby mogły się tworzyć struktury typu galaktyk, gromad, supergromad..

Prawo Hubble'a (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

galaktyk

$$v = H \cdot r$$

Obecne pomiary: $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

r - odległość, H - stała Hubble'a

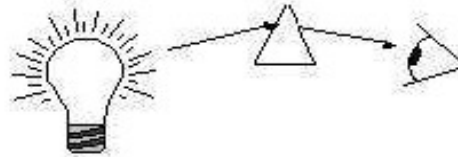
$$1 \text{ Mpc} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Ale jak się mierzy prędkość ucieczki?

Hubble obserwował przesunięcie linii widmowych odległych galaktyk → efekt Dopplera

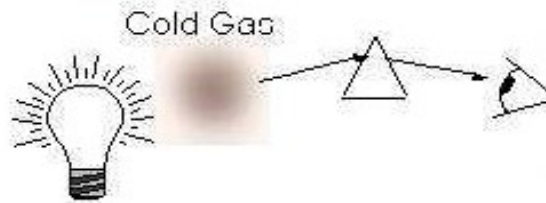
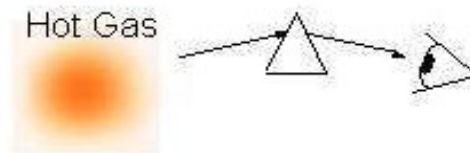
Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.

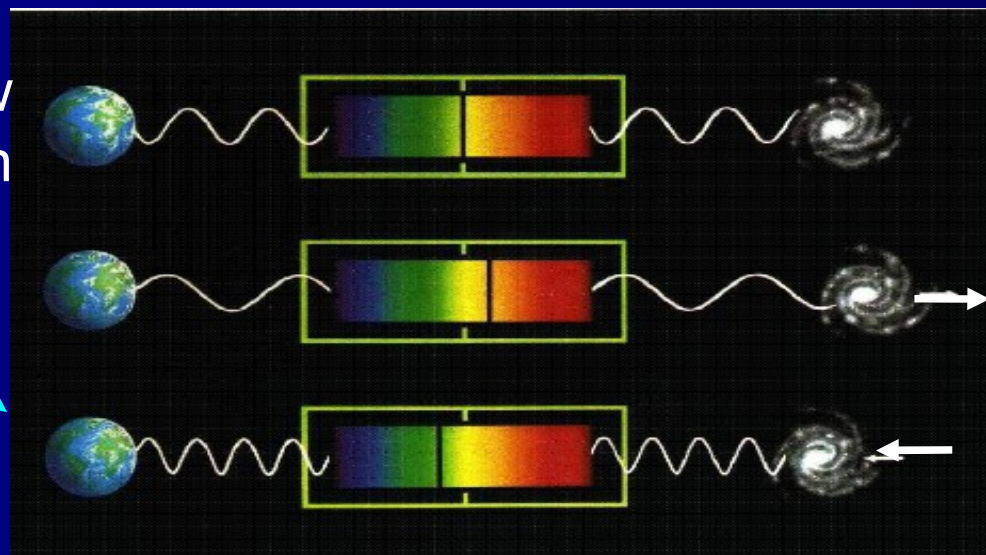


Przesunięcie linii znanych atomów (efekt Dopplera) bo względny ruch źródła i obserwatora

Względna zmiana długości linii

$$z = \Delta\lambda / \lambda$$

obserwuje się $z = 5$!



Kluczowa obserwacja → rozszerzanie się Wszechświata

– Kluczowy parametr → stała Hubble'a

Niech odległość między galaktykami: $r(t) = R(t) r_0$

prędkość oddalania się: $v(t) = \dot{R}(t) r_0$

$R(t)$ - uniwersalny czynnik rozszerzania się Wszechświata, $r(0) = r_0$

$t=0$ oznacza chwilę obecną

Czyli stała Hubble'a $H = \dot{R}(t)/R(t)$ – tempo ekspansji

Wszechświat miał początek (Wielki Wybuch, Big Bang)

Lemaitre 1923, Gamow 1948

a jego wiek t_0 wynosi 13,7 mld lat ($t_0 < 1/H_0$)

Dlatego nocne niebo jest ciemne - w nieskończonym i wiecznym Wszechświecie nocne niebo powinno jasno świecić !

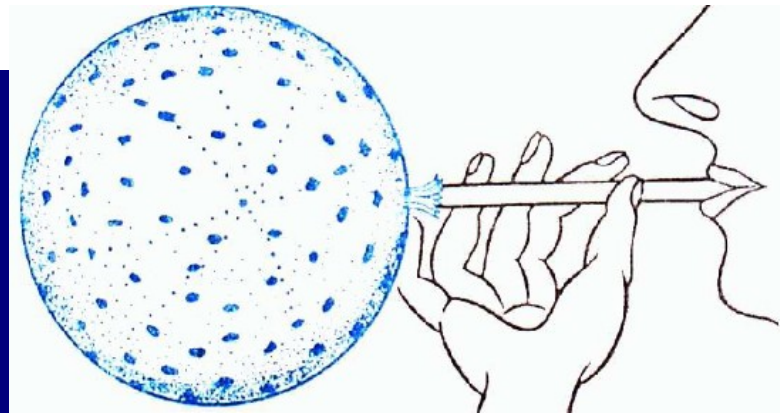
Rozszerzający się Wszechświat

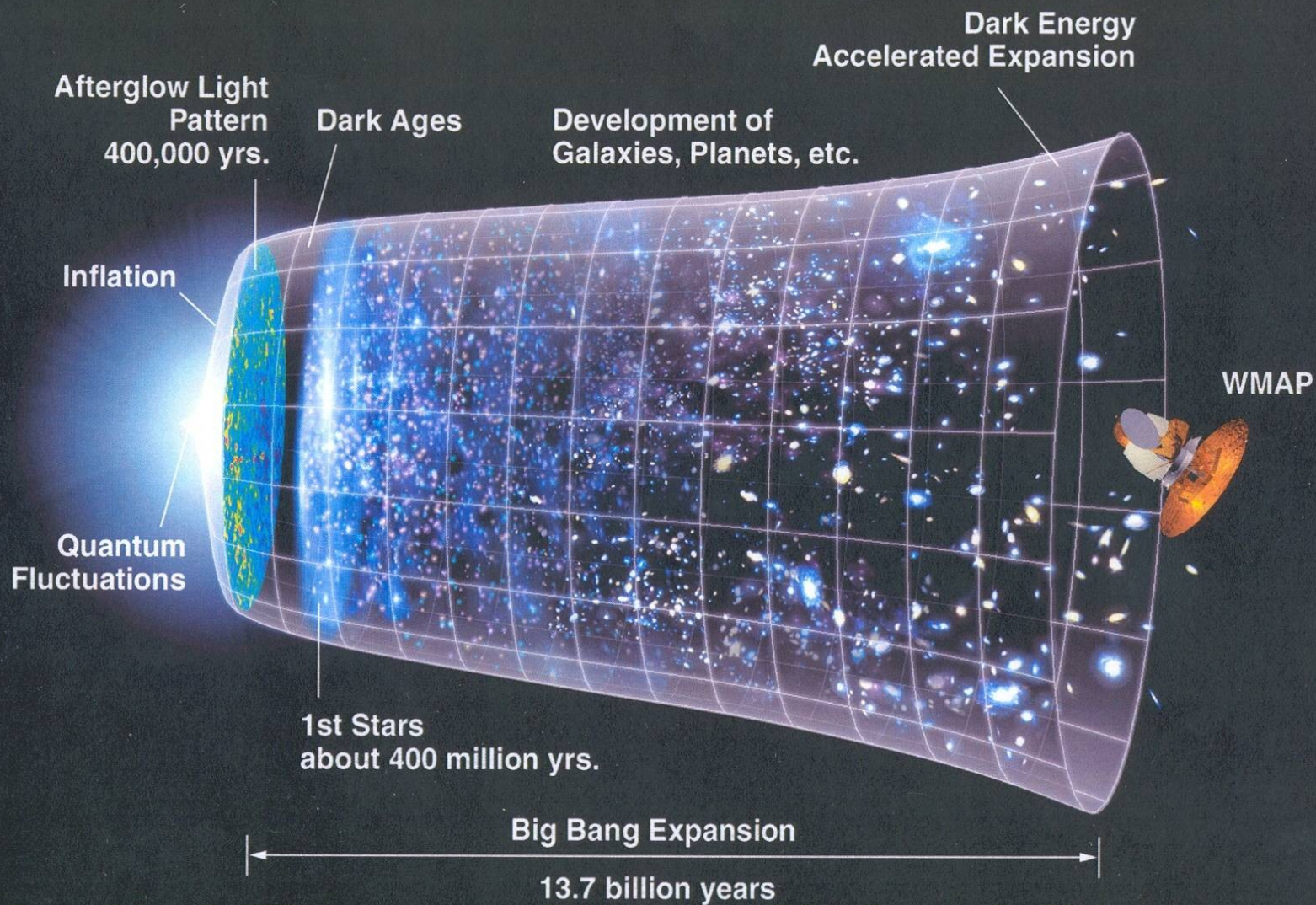
Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur $\Rightarrow$ "skala kosmologiczna"

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** $\Rightarrow$ **materia** jest rozłożona równomiernie

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszone" są poszczególne obiekty.

Żadny punkt nie jest wyróżniony – wszystkie się od siebie oddalają!!





Równania Friedmanna

Ewolucję Wszechświata opisują rozwiązania równań Einsteina Ogólnej Teorii Względności.

Dla jednorodnego i izotropowego rozkładu materii (ρ – gęstość masy (energii)) równanie Friedmanna (1922)

$$H^2 = [\dot{R}(t)/R(t)]^2 = 8 \pi G_N \rho / 3 - K c^2 / R^2 + \Lambda / 3$$

Ustalmy $\Lambda = 0$. K -parametr krzywizny

Dla $K = -1$ – model **otwarty**, nieograniczona ekspansja z prędkością $\dot{R}(t) \rightarrow c$ (dla dużych R)

$K = +1$ – ujemna krzywizna $\rightarrow$ Wszechświat **zamknięty** (będzie się kurczyć)

$K = 0$ – krzywizna zero $\rightarrow$ Wszechświat **płaski** *

* dane preferują

Gęstość krytyczna materii (dla $K = 0$), gdy Wszechświat staje się zamknięty, $\rho_c = 3H_0^2 / (8 \pi G_N)$; ważny parametr $\Omega = \rho / \rho_c$

Ewolucja Wszechświata

Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że przyszłość Wszechświata zależy od gęstości materii ρ .

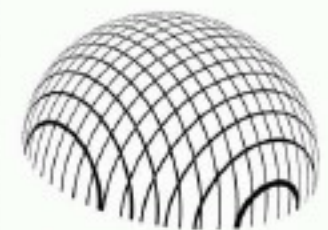
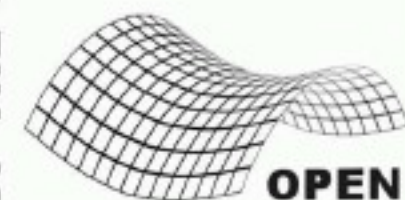
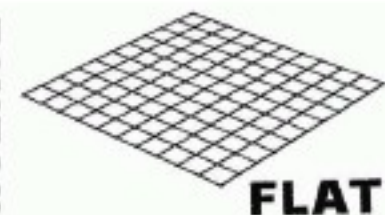
Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

$\rho = \rho_c$ asymptotycznie “zatrzyma” się

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



- Parametr $\Omega = \rho/\rho_c$

Gęstość materii we Wszechświecie



Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia “światlista”

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
⇒ materia “barionowa”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych
⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{ciemna materia !?}$$

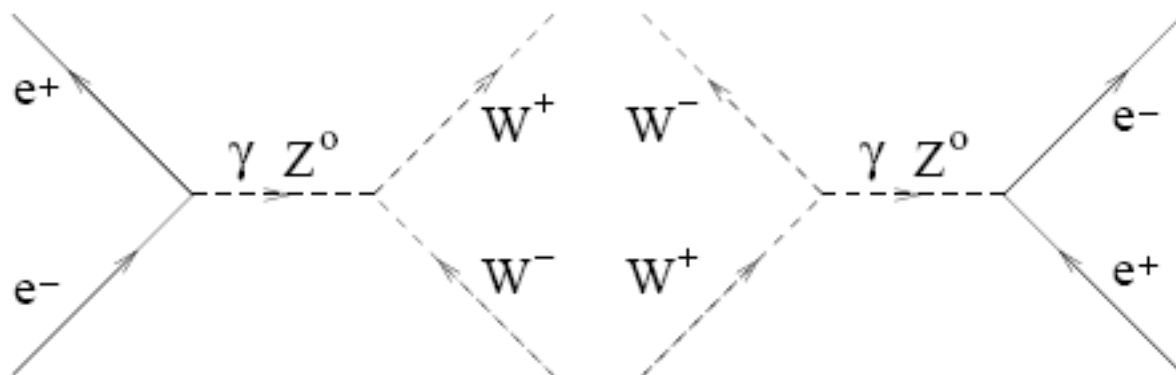
Pierwsze cząstki fundamentalne

Na samym początku **gęstość energii** była bardzo duża.

Na poziomie cząstek oznacza to, że cząstki miały bardzo duże **energie kinetyczne**, znacznie większe od ich mas.

Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

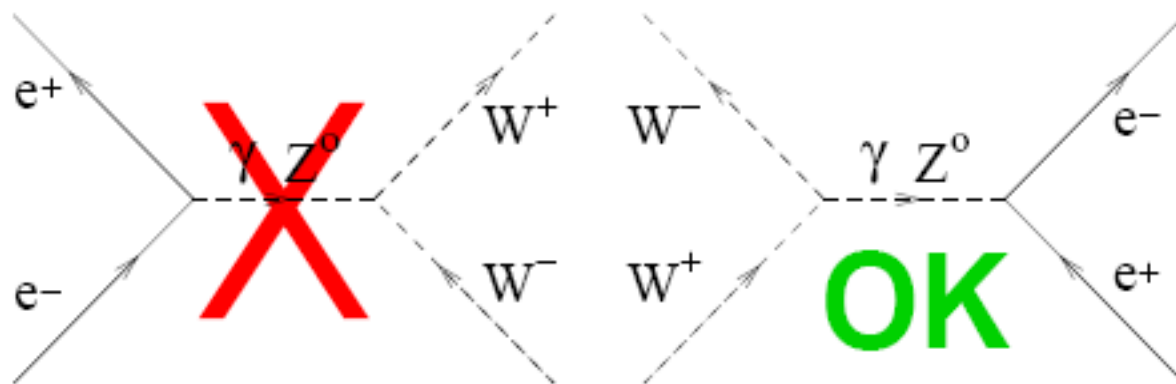
Wszystkie cząstki znajdowały się w **stanie równowagi**, gdyż nieustannie zachodziły procesy **anihilacji i kreacji**.



Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**

Powstają hadrony, jądra i atomy

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony $W^\pm$ i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

Ciemna materia

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5\times$ materia barionowa)

Nie wiemy:

- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

Jednym z głównych kandydatów jest najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP), którą mamy nadzieję odkryć w LHC.

Wiele dowodów na istnienie ciemnej materii

Ciemna materia

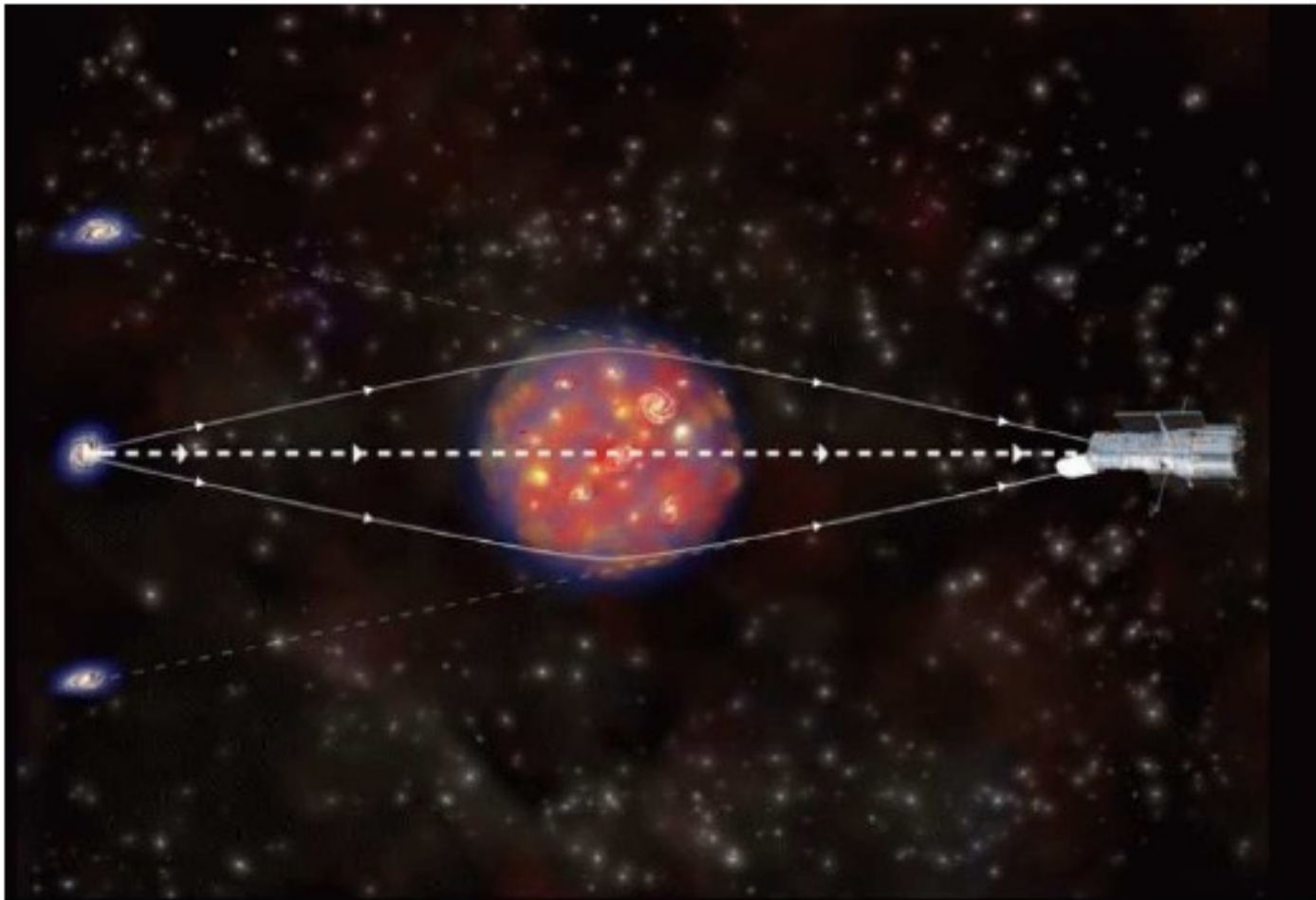
Paweł F. Góra

FOTON 103 (2008)

Pierwszy istnienie ciemnej materii zaproponował szwajcarski astronom, Fritz Zwicky, 1933. W gromadzie galaktyk w gwiazdozbiorze Warkocz Bereniki → galaktyki poruszają się ze zbyt dużymi prędkościami. Coś je napędza. Ale co? Skoro materia ta nie oddziałuje elektromagnetycznie, nie emituje ani pochłania fal elektromagnetycznych w żadnym zakresie, nie świeci, a więc jest „ciemna” stąd nazwa.

Soczewkowanie grawitacyjne

Materia powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.



Zdjęcie z Kosmicznego
Teleskopu Hubble'a

Niebieskie łuki - wielokrotny
obraz odległej galaktyki
położonej za masywną gro-
madą galaktyk.

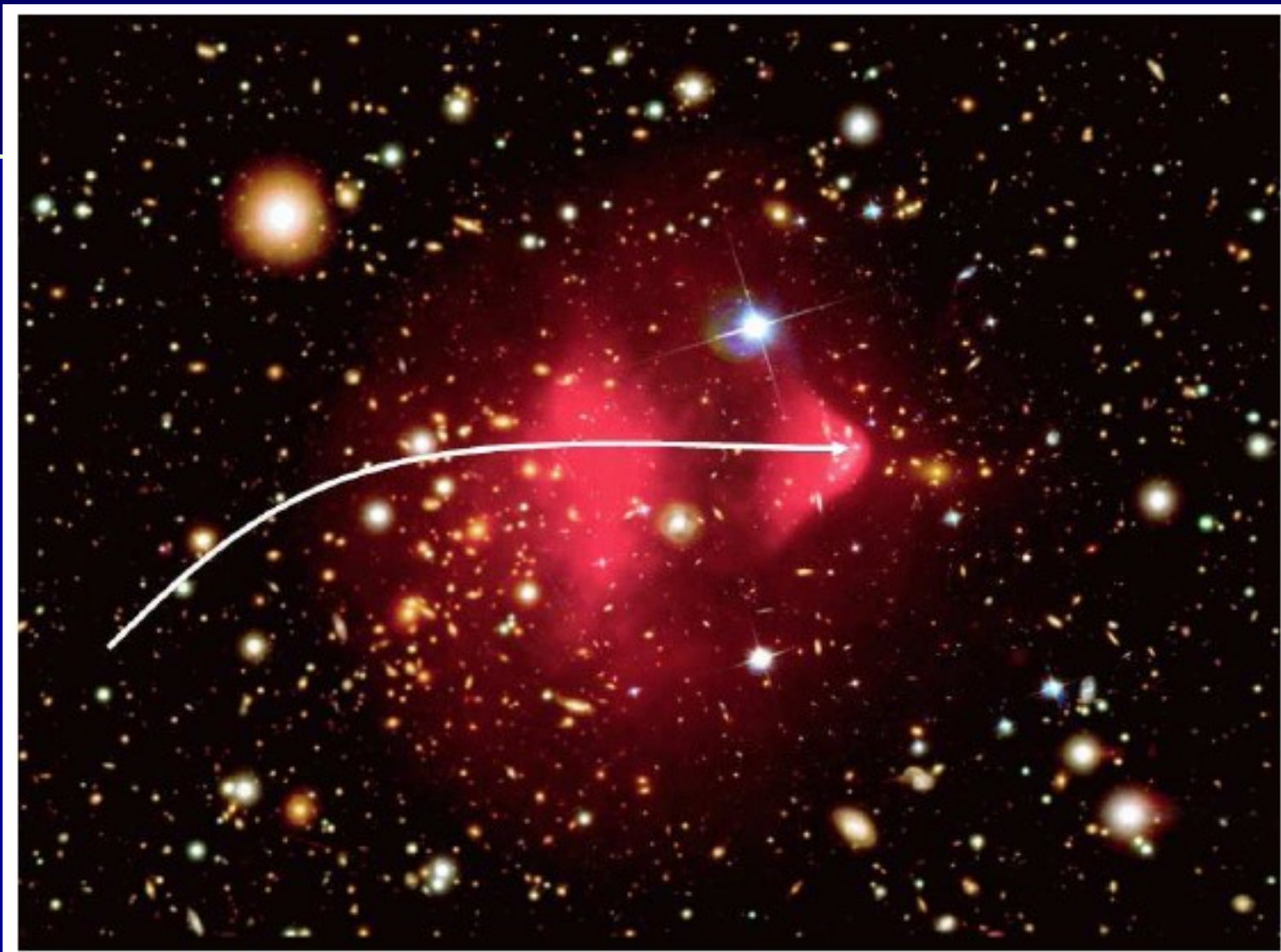


Kosmiczna kolizja - 2006



Zderzenie materii kosmicznej (dwóch gromad galaktyk) – część materii przeszła jak duch bez oddziaływania.. <http://www.astronomia.pl/wiadomosci/index.php?id=1691>

Kosmiczna kolizja cd



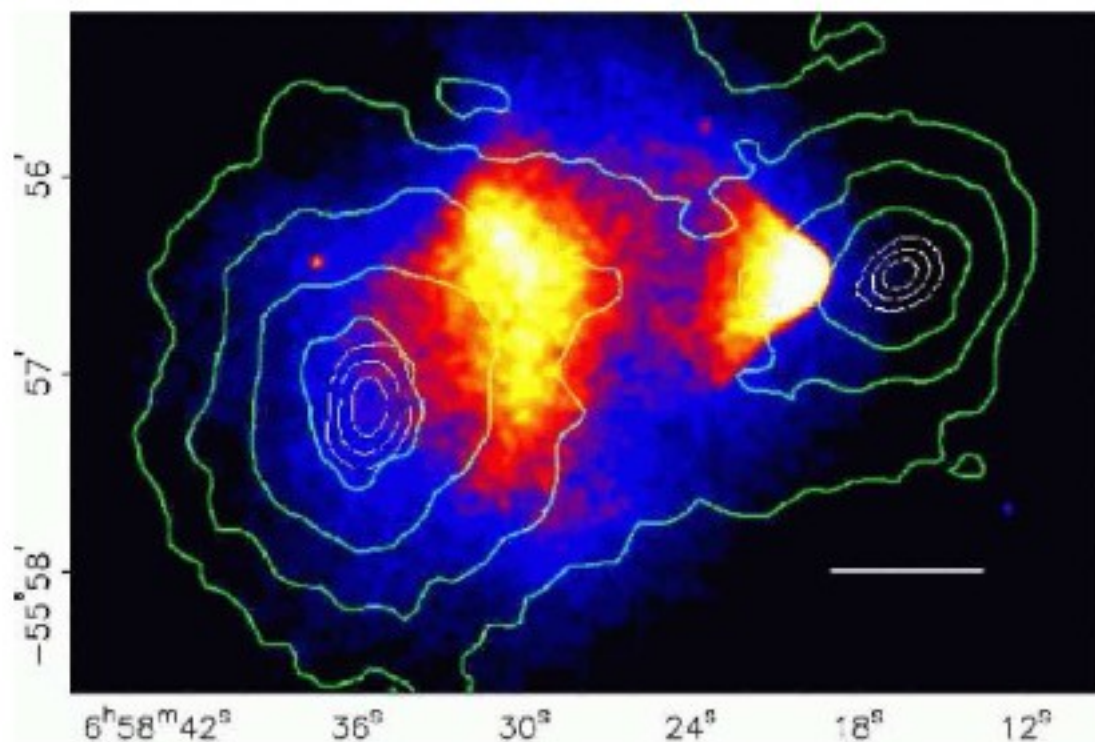
Kolor czerwony – gorący gaz, ta materia zachowuje się normalnie

Kosmiczna kolizja cd

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie.

Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

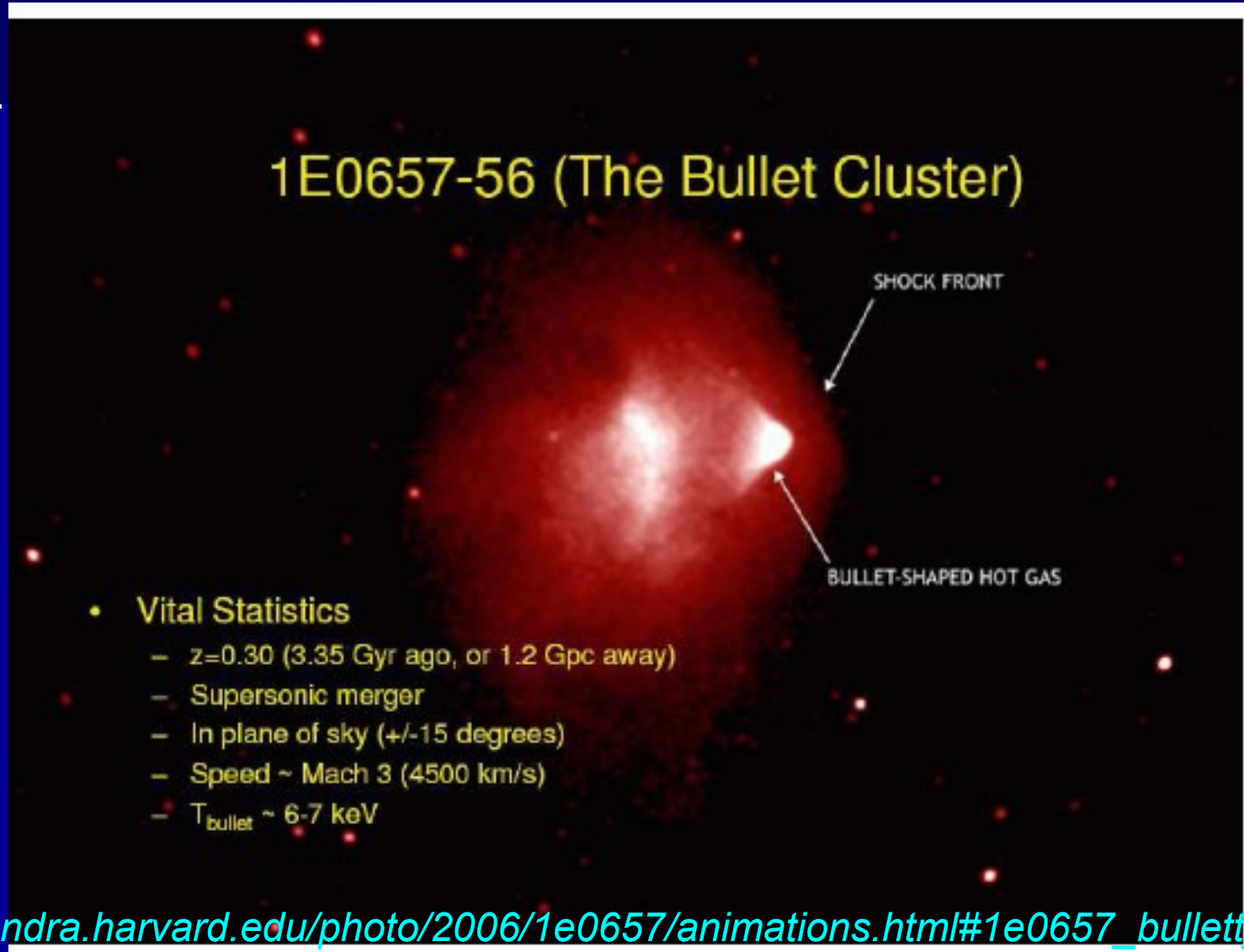
Nie zgadza się z rozkładem materii międzygwiazdnej.



Kosmiczna kolizja – rozkład materii po zderzeniu



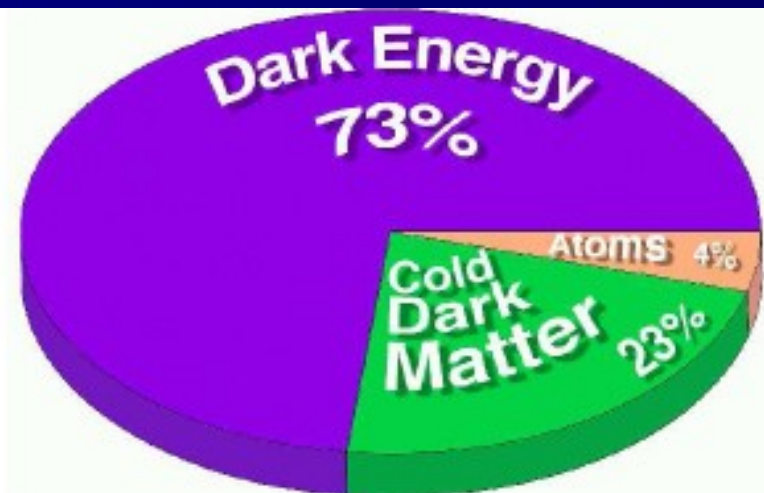
Gromada galaktyk „Pocisk”



Skład Wszechświata

Dziś

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.
- **23%** stanowi **ciemna materia**...
- **73%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną (Λ)



Wszechświat zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej** (!)

Wiek Wszechświata: $T = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$

Cząstki-kosmologia-astrofizyka

(ang. astroparticle physics lub particle astrophysics)

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, kosmologia zbliża się coraz bardziej do fizyki cząstek $\Rightarrow$ astrofizyka cząstek

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- ciemna materia Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. cząstki supersymetryczne)
- ciemna energia Całkowita zagadka...
- asymetria barionowa we Wszechświecie
Wszechświat zbudowany jest z materii
 $\Rightarrow$ jak złamana została symetria materia-antymateria ?
Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...
- cząstki o bardzo wysokich energiach w promieniowaniu kosmicznym, błyski γ , ...

Precyzyjne pomiary kosmologiczne

Precision Cosmology

Już w 1915

"How helpful to us is astronomy's pedantic accuracy, which I used to secretly ridicule!"

Einstein's statement to Arnold Sommerfeld on December 9, 1915 (regarding measurements of the advance of the perihelion of Mercury)



Promieniowanie reliktowe

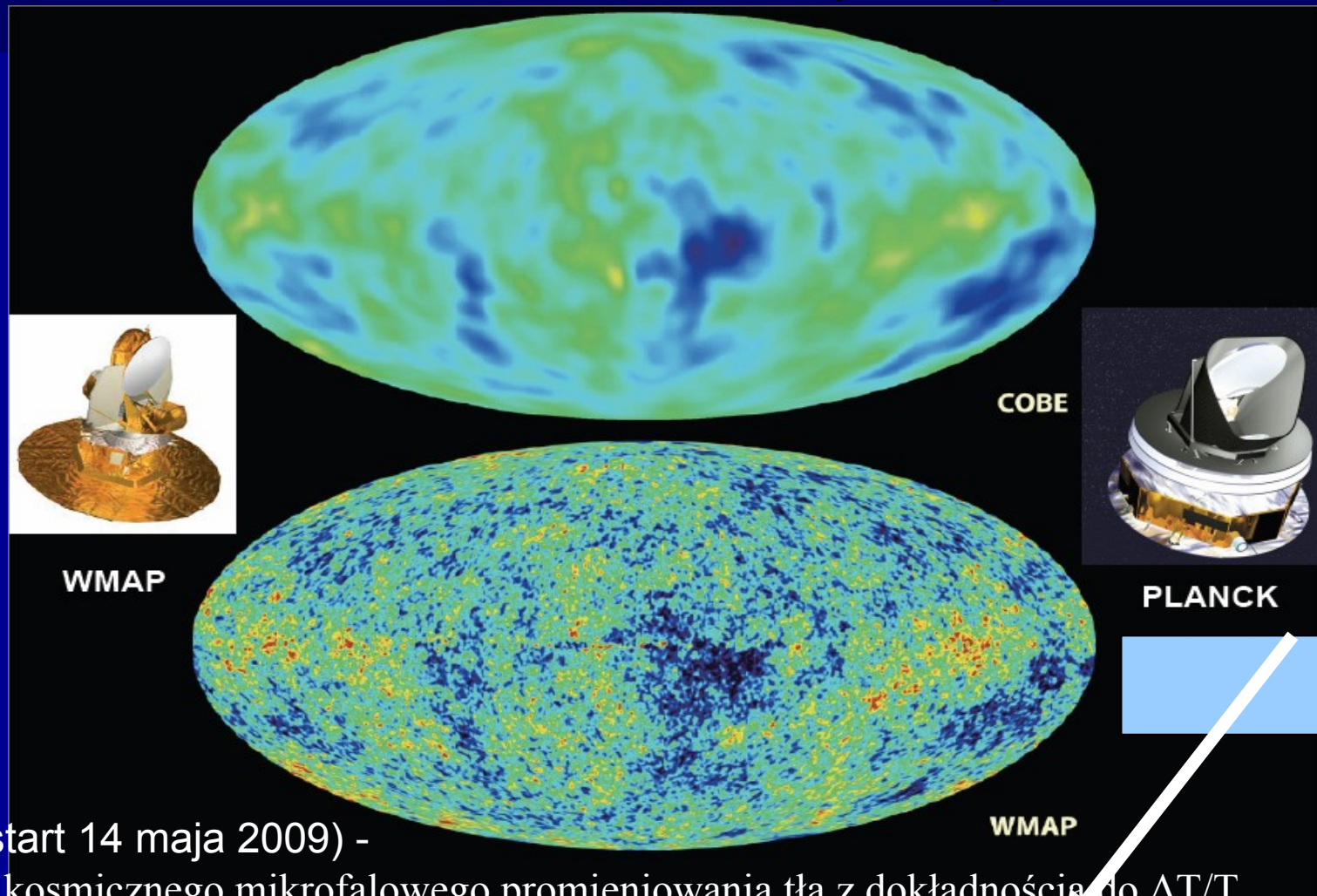
Powinien zostać ślad po Wielkim Wybuchu w postaci promieniowania relikowego- fotonowa „ognista kula”, która w wyniku ekspansji schładza się do temperatury kilku Kelwinów (idea Gamowa 1948)

Odkrycie w 1965r (Penzias i Wilson) izotropowego mikrofalowego promieniowanie tła (reliktu po Wielkim Wybuchu) - rozkład widma jak dla ciała doskonale czarnego o temperaturze $T=2.73\text{ K}$

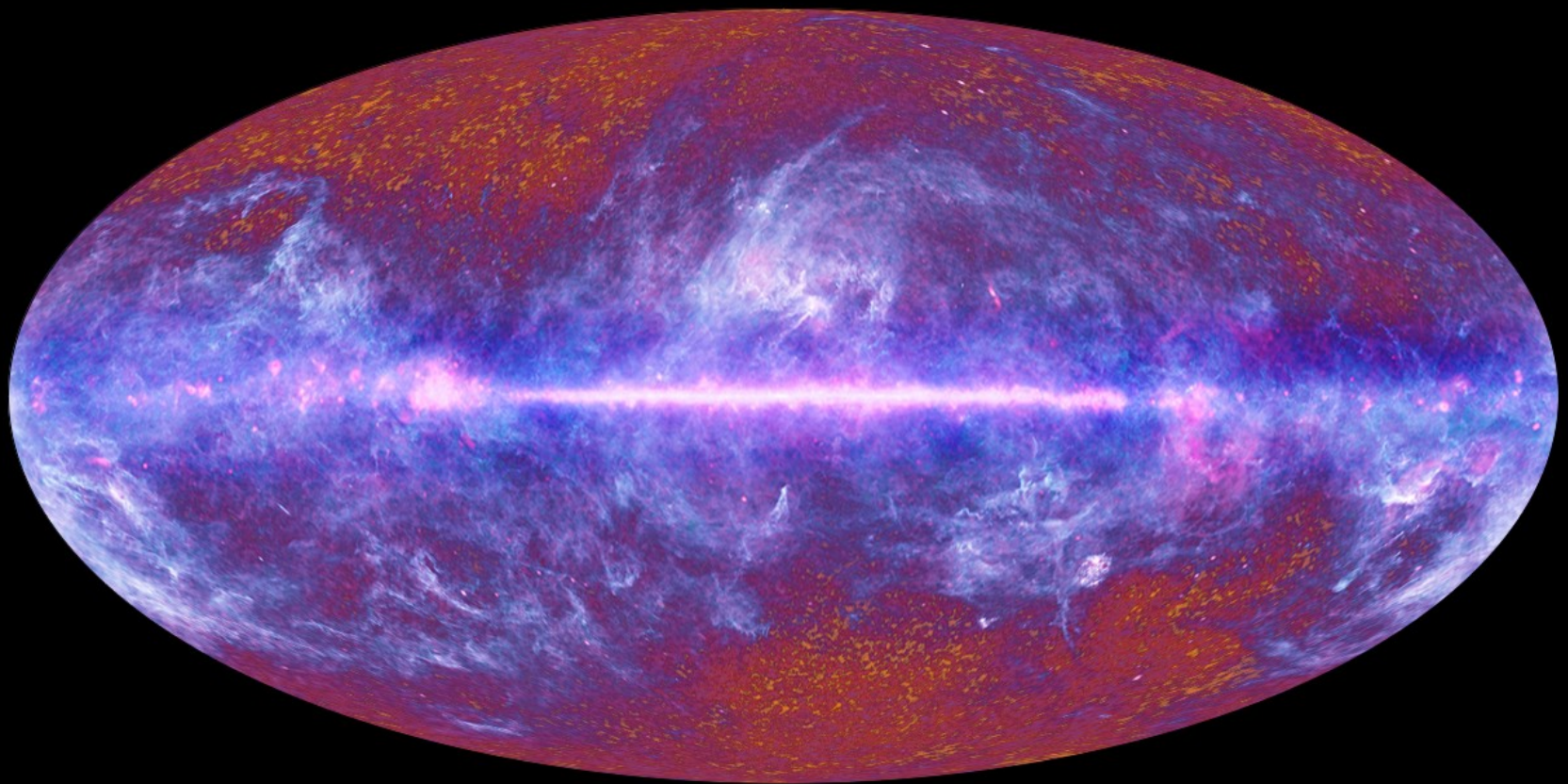
Rozkład kątowy promieniowania nie jest idealnie izotropowy- anizotropia rzędu 10^{-5} związane z fluktuacjami gęstości materii. Takie muszą być, aby zapoczątkować tworzenie się struktur (gwiazd, galaktyk..) we wczesnym Wszechświecie

„Niebo reliktowe”

Różnice temperatur: kolor niebieski niższa, czerwony - wyższa w pomiarach satelitów COBE (1989) i WMAP (2001).



Satelita Planck (start 14 maja 2009) -
pomiar anizotropii kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła z dokładnością do $\Delta T/T = 2 \times 10^{-6}$ i rozdzielczością 5 minut kątowych <http://news.astronet.pl/6533>.



The Planck one-year all-sky survey



[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

1990's: Opening of a new era, which has turned the tide in favour of dark matter: Precision Cosmology



Nobel Prize in
Physics 2006



John Mather

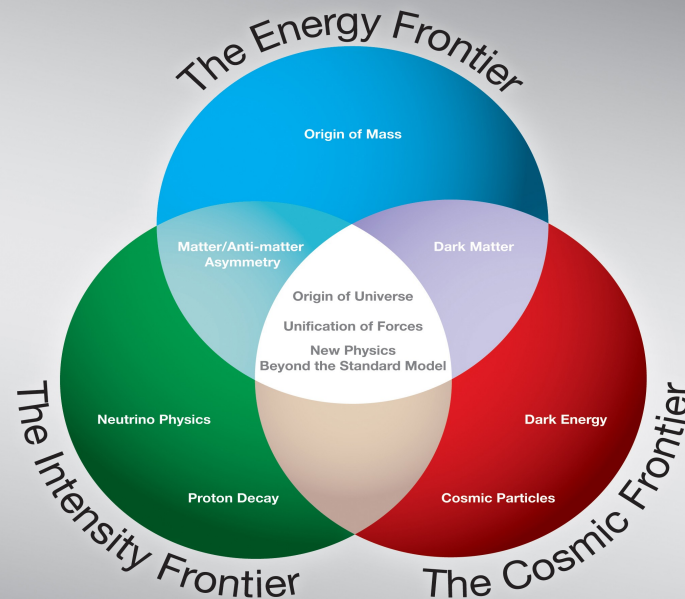
George
Smoot

"... for their discovery of the
blackbody form and anisotropy of
the cosmic microwave background
radiation."



COBE

Fizyka cząstek elementarnych – badania na trzech frontach



Pytania do wykładu 15

Jak Ci się podoba filmik Monty Pythona o rozszerzającym się Wszechświecie? Czy liczby tam podawane są sensowne?

Czego dotyczy prawo Hubble'a?

Ile wynosi dzisiejsza wartość stałej Hubble'a?

Czy stała Hubble'a opisuje tempo ekspansji Wszechświata?

Ile wynosi wiek Wszechświata?

Czy nasz Wszechświat jest płaski?

Ile wynosi wkład ciemnej materii do parametru Ω ?

Kiedy powstają pierwsze jądra atomowe?

Kiedy powstały atomy?

Kto i kiedy jako pierwszy wprowadził ideę ciemnej materii?

Czy soczewkowanie grawitacyjne pomaga w poszukiwaniu ciemnej materii?

Czy więcej dzisiaj jest ciemnej energii czy ciemnej materii?
(Chodzi o wkład do parametru Ω)