



КОСМОЛОГИЯ

Даниела П. Кирилова

Институт по Астрономия с НАО

Българска Академия на Науките, София, България

УВОД

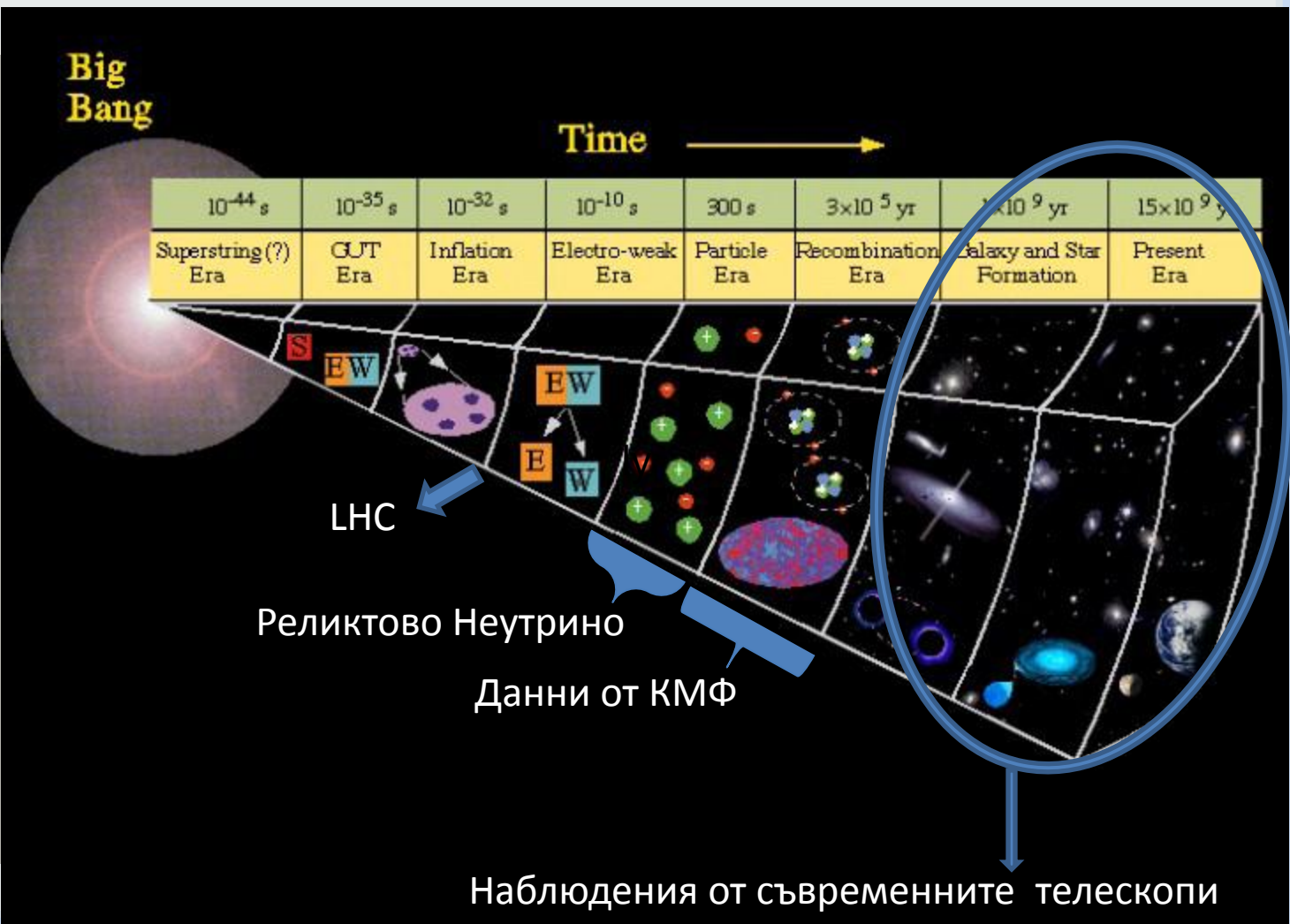
Космологията изучава физичните характеристики и еволюцията на Вселената като цяло. Най-широко възприетият модел днес, Λ CDM, наричан Стандартен Космологичен Модел, базира се на множество съвременни наблюдателни данни .

Λ CDM представлява съвременна версия на модела на Големия Взрив.

Вселената като единно цяло е физична система със свои особени свойства, които не се свеждат към сумата от свойства на населяващите я астрономични тела. Те се проявяват в явления на най-големи пространствено-времеви мащаби, като например еднородност и изотропия на Вселената на големи мащаби, разбягването на галактиките и др.

Вселената е най-големия по мащаб обект на науката.

Космологията разполага с единствен екземпляр, достъпен за изследване (наблюдения, не експеримент).



Кратка история на космологията

Основополагащи открития в съвременната космология:

1915 Създаване на ОТО от Алберт Айнщайн.

1917 Космологичен модел на Айнщайн – неизменна, статична, идеално симетрична Вселена.
Въвеждане на космологична константа (модифицира ОТО).

1917 Космологичен модел на де Ситер – Вселена с вакуум

1922-24 **Фридманов модел на разширяващата се Вселена.**

Александър Фридман предсказва космологичното разширение и му прави пълно математическо описание. *“О кривизне пространства”* 1922 : модел на динамична затворена Вселена (с положителна кривина).

“Мир как пространство и време” 1923: Освен стационарен тип, могат да съществуват променлив тип Вселени – кривината на пространството се мени с времето (нараства или осцилира) .

“О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной” 1924. Анализ на динамиката на Вселената, в случай на пространство на Лобачевски.

1927 Lemaître модел на разширяваща се Вселена, отчитащ червеното отместване

"Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques"

1931 *"The expanding Universe"* 1946 *"L'Hypothèse de l'atome primitif"*

1932 Айнщайн и де Ситер развиват фридмановската космология за случай на плоско, евклидово пространство.

- 1917 измерване на червени отмествания на “мъглявини” Весто Слайфер
[разбягване на мъглявините](#)
- 1924 наблюдение на звезди в спирални мъглявини Едуин Хъбъл
по цефеиди определя разстоянията до “мъглявините” NGC 6822, M31 и M33 и
показва че те са галактики, [Вселена от галактики](#)
- 1929 измерване на червени отмествания на мъглявини от Едуин Хъбъл &
Милтон Хюмасон и разстояния до тях от Хъбъл, зависимост скорост-разстояние
[разширяваща се Вселена](#)
- 1946 Георги Гамов: [концепция за гореща разширяваща се Вселена – Големия Взрив](#)
предсказание на КМФ и наличие на леки елементи синтезирани в КН
- 1948 Херман Бонди, Томас Голд & Фред Хойл: стационарна Вселена – множество
наблюдателни тестове
- 1965 Пензиас & Уилсън [откритие на КМФ](#), възраждане на модела на гореща Вселена
- 1992 РЕЛИКТ, COBE [откритие на анизотропията на КМФ](#). Богата наблюдателна база:
дълбоки обзори CfA, IRAS, 2dF, SDSS, големи телескопи, HST, X-ray, γ -ray, IR
- 1998 SN – [разширение с ускорение](#)
- 2001- WMAP , прецизна космология: космологични параметри, физични параметри
- 20?? - [златен век на космологията: ТВ, ТЕ, бариогенезис, инфлация](#)

ПЛАН

Увод: Кратка история на космологията.
Особености.

Структура и ЕИ на Вселената:

Мястото ни във Вселената.

Крупномащабна структура. ЕИ.

Динамика и геометрия на Вселената:

Уравнения на Фридман

Хъбболово разширение

Температурна история: Основни събития

Реликти от ранния горещ стадий

Състав на Вселената. Свидетелства за ТЕ и ТВ.


Температурна история. Основни събития.

Формиране на космичен неутринен фон
Синтез на леките елементи във Вселената
Формиране на космичен микровълнов фон

Детектиране на КМФ
Основни характеристики на КМФ
Детектиране на анизотропията на КМФ

Особености

- Основен източник на информация – наблюдения

в целия електромагнитен спектър и отвъд него неутрино от \ast , , SN, космични лъчи: e , p , тежки ядра, античастици..

- Наблюдения в миналото

Поради крайната скорост на светлината, на движение на частиците,

наблюдавайки отдалечени обекти, всъщност наблюдаваме миналото на Вселената!

 - 1 с,  - 8 м 23 с, Галактиката - 10 000 г, М31 - 2 млн г, най-далечни г-ки - млрд. г

КМФ – 13.3 млрд г. КНФ ~ 1 с от началото, ЛНС ~ 10^{-12} с

- Огромни времеви, пространствени, енергийни мащаби

История на Вселената: Велико обединение (10^{-35} s) -- Днешна епоха ($1.4 \cdot 10^{10}$ y)

10^{15} GeV - 0.0003 eV

- Мултидисциплинарна наука - В непосредствена връзка с Физика, Математика, Астрофизика, Физика на частиците, КТП ...

Многоцветно изображение от космичния телескоп Хъбъл на 7500 галактики илюстриращо галактичната еволюцията

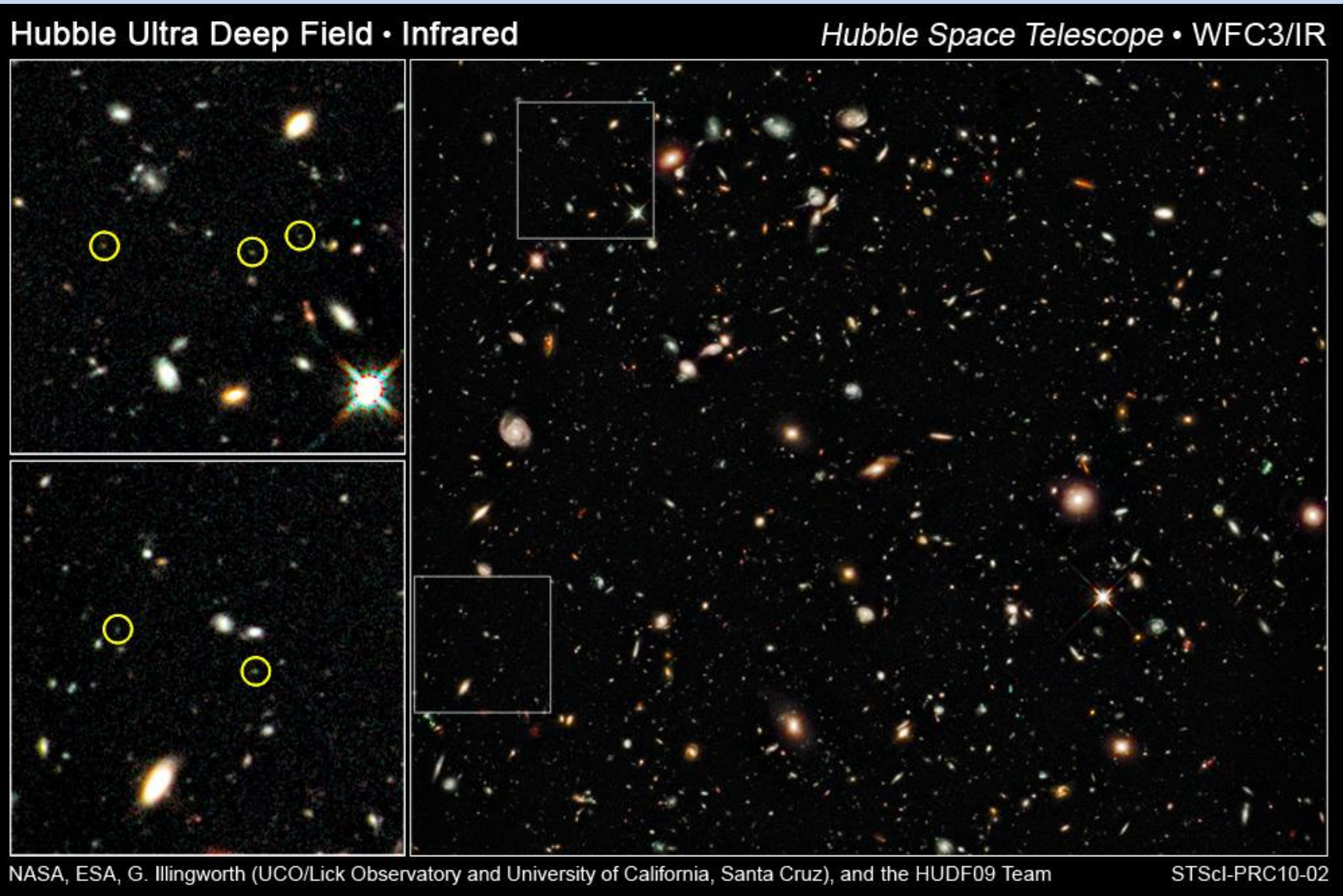
96 орбити - за оптичните изображения на ШК и 104 орбити за изображенията на РК в и близката инфрачервена област.



Изображение съставено от снимки направени през 2009 от Широкоъгълната камера 3 на КТХ и през 2004 от Развитата камера за изследвания на КТХ. То комбинира широк диапазон от цветове от ултравиолетов, през видимия диапазон до инфрачервената област. Най-близките галактики видими на изображението на преден план са излъчили наблюдаваното излъчване преди около милиард години. Най-далечните галактики, малките червени слаби петънца, се виждат каквито са били преди 13 млрд г, или около 650 млн години след Големия Взрив. Изображението е 10 arcmin. Наблюдавани са галактики от 27 звездна величина. (250 млн пъти по-слаби от видимите с просто око)

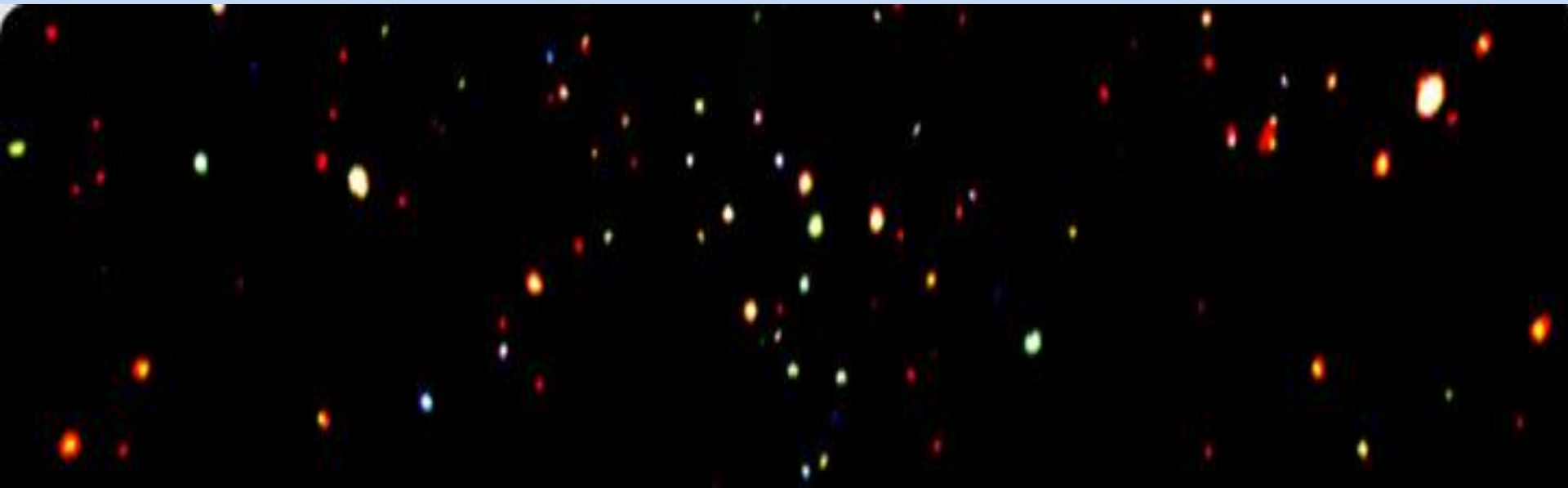
Ултравиолетовото излъчване е от горещи, млади звезди в галактиките, в които протича звездообразване. Оранжевото излъчване е от масивни

Част от Вселената преди 12 милиарда години.



Най-дълбокото получено до сега изображение от Hubble Space Telescope. Най-слабите и червени обекти са галактики на $\sim 12.9 - 13.1$ млрд светлинни години - първични галактики. Те са малки по размер и "сини" – указание за дефицит на тежки елементи и следователно за отсъствие на почервяване дължащо се на тях.


Наблюдения в миналото: Най-далечни наблюдавани галактики



Изображение от NASA's Chandra рентгеновата обсерватория на най-далечните наблюдавани галактики. Точковите изображения са X-лъчи от свръхмасивни ЧД в центровете на галактиките, които са на етап на формиране и още не съдържат светещи звезди или са толкова далеч, че светлината им е погълната от прах.

Особености



- Основен източник на информация – наблюдения

в целия електромагнитен спектър и отвъд него неутрино от *, , SN, космични лъчи: е, р, тежки ядра, античастици..

- Наблюдения в миналото

Поради крайната скорост на светлината, на движение на частиците,

наблюдавайки отдалечени обекти, всъщност наблюдаваме миналото на Вселената!

 - 1 с,  - 8 м 23 с, Галактиката - 10 000 г, М31 - 2 млн г, най-далечни г-ки - млрд. г

Електромагнитно лъчение може да стигне до нас само от епохи по-късни от 380 000 г.

Преди това Вселената е била непрозрачна за лъчението.

Стандартен космологичен модел

Теоретични и наблюдателни основи

Основни предположения

1. Универсална приложимост на физичните закони
2. Еднородност хомогенност
3. Изотропия

Космологичен принцип: Вселената е еднородна и изотропна на големи мащаби. Всички пространствени точки и направления са равнозначни.

Съществуват различни независими наблюдателни свидетелства, получени основно при изследване на процеси на взаимодействие на лъчението с веществото, за справедливостта на КП.

Еднородността и изотропията е глобално свойство на Вселената, касаещо нейната цялостна еволюция.

Наблюдателни основи на СКМ

- Разширение на Вселената

Наблюдаваното разбягване на галактиките свидетелствува за разширение на Вселената. SN наблюдения свидетелствуват за разширение с ускорение.

- Разпространеност на леките елементи

Свидетелство за ранен горещ и плътен стадий на Вселената с условия подходящи за нуклеосинтез.

- Космичен микровълнов фон

Остатъчното лъчение от горещия стадий на Вселената, предоставя указания и за днешната Вселена, доминирана от космологична константа и студено тъмно вещество.

- Структури във Вселената на малки мащаби
еднородност и изотропия на големи мащаби

$$H_0, q_0, \Omega_i (\Omega_0, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_B, \Omega_\gamma, \Omega_\nu, \dots), t_0, T_0, P(k), C_l$$

Стандартен Космологичен Модел

$$H_0, q_0, \Omega_i (\Omega_0, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_B, \Omega_\gamma, \Omega_\nu, \dots), t_0, T_0, P(k), C_l$$



Структура и еднородност и изотропия на Вселената

Мястото ни във Вселената

Структурите на Вселената

Еднородност и изотропия на Вселената:

наблюдения в X, UV, I, оптичния и радио диапазона
на лъчение от близки и далечни галактики, квазари, купове и свръхкупове от галактики,
както и на реликтовото микровълново лъчение

Мащаб на еднородността и изотропията

Еволюция на космологичните идеи относно Вселената и мястото ни в нея

Птоломеев геоцентричен модел

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



В преобладаващата част от съществуването на нашата цивилизация се е вярвало, че Земята е в центъра на мирозданието.

Древните гърци вярвали че Земята е център на Космоса.

- **Геоцентрична система**

Ptolemy of Alexandria

Almagest 150 CE

Земята е сфера, в центъра на космоса, тя не се движи.

Обаче Аристотел; 310–230 BC

хелиоцентричен модел

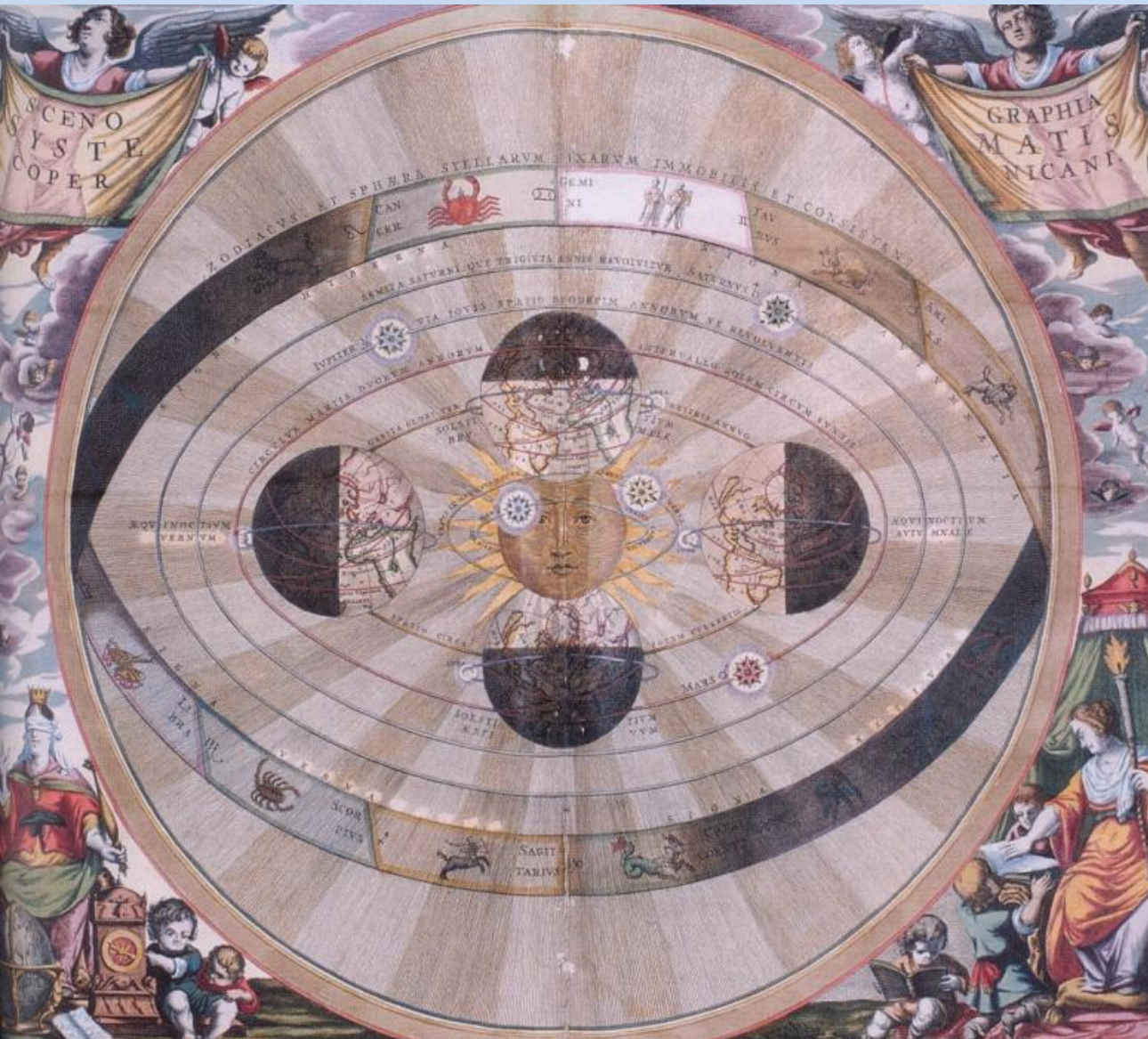
"Greek Copernicus"

Бируни XI CE

хелиоцентричен модел

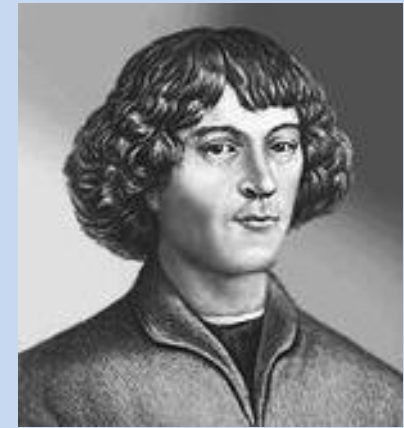
16 в. представа за Птоломеевия геоцентричен модел

Коперник възражда хелиоцентричната система,
която преди него е в забора цели **1800 г.**



Хелиоцентричен модел

- Слънцето е център на Вселената.
- Видимото движение на Слънцето е резултат от земното въртене



1543 Коперник

On the Revolutions of the Celestial Spheres

Принцип на Коперник:
Местоположението на Земята с
нищо не се отличава.
**Земята не е център на
Вселената!**

Scenographia systematis copernicani, 1660

Еволюция на космологичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство

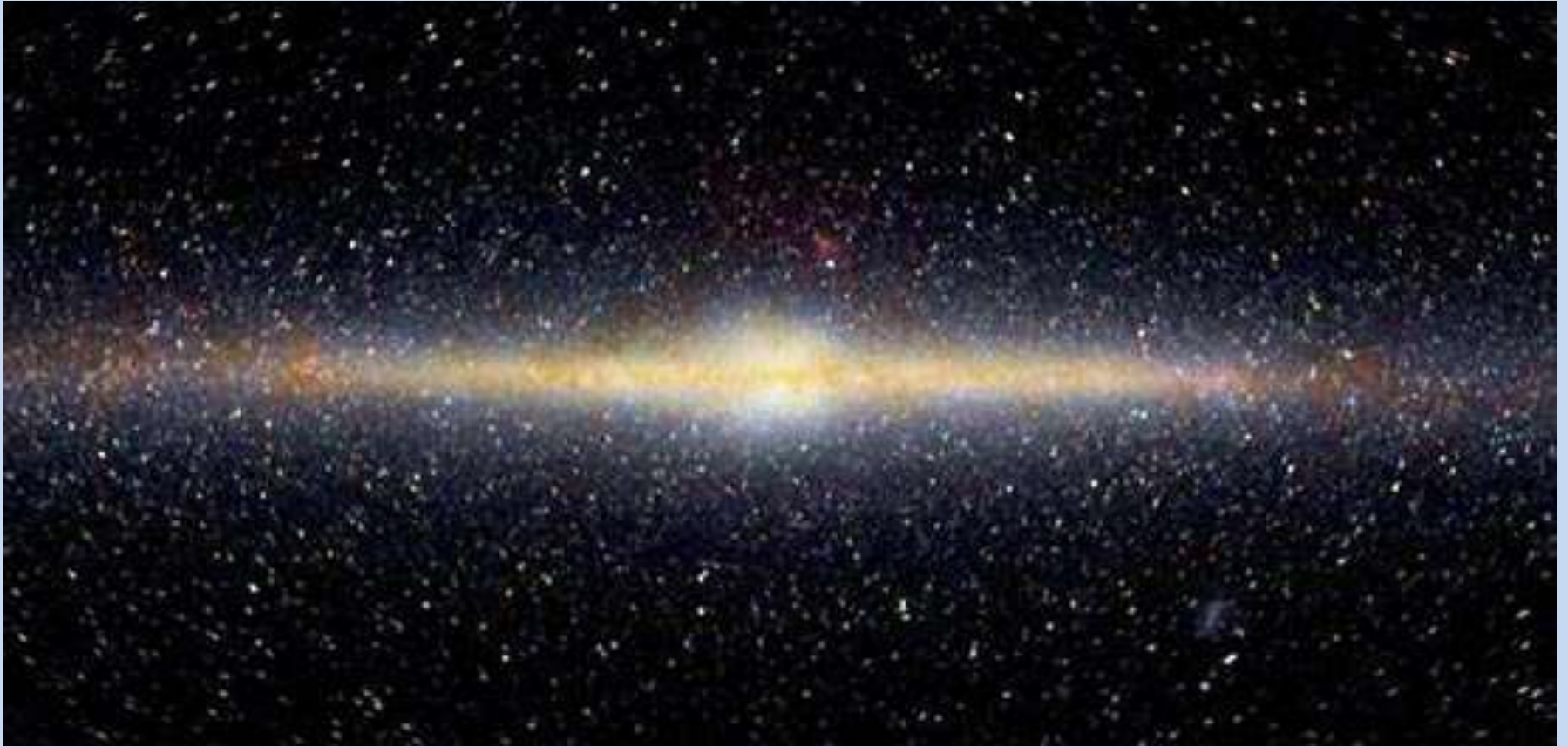
- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)

Herschels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1780

1915 Shapley: **Слънцето е на разстояние $2/3$ от Галактичния център**

(Галактиката се счита все още център на Вселената) 1900

Нашата Галактика – Млечния път



Снимка от космоса в инфрачервени лъчи

Нашата галактика съдържа стотици милиарди звезди, с маси 0.1-20 от слънчевата. Тя е типична Sb галактика. Слънцето е на 8 крс от центъра и.

В космологията структурата на галактиките не е съществена, галактиките се приемат за точкови обекти.

Еволюция на космولوجичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство

- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)

Herschels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1700

1915 Shapley: **Слънцето е на разстояние $2/3$ от Галактичния център:** **Слънчевата система не е в центъра на Галактиката,** а в покрайнините и.

Галактиката се счита все още център на Вселената - 1900

Еволюция на космولوجичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство

- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)

Herschels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1700

1915 Shapley: **Слънцето е на разстояние 2/3 от Галактичния център:** **Слънчевата система не е в центъра на Галактиката**, а в покрайнините и.

Галактиката се счита все още център на Вселената - 1900

Shapley-Curtis дебат: Дали спиралните мъглявини са в Галактиката или са извънгалактични обекти? Вселена от галактики не от равномерно разпределени звезди?

Вселената не е еднородна на галактични мащаби.



Хъбъл Е. 1924:

М31 е извънгалактичен обект

W. Baade: звезди

в центъра на М31 .

MW е типична г-ка

При наблюдения с

космическия телескоп

GALEX в

ултравиолетови лъчи се

изявяват различни

структури:

в синьо се виждат

младите горещи звезди в

спиралните ръкави,

в оранжево са показани

по-старите и по-студени

звезди в галактичното

ядро на М 31.

ГАЛАКТИКАТА АНДРОМЕДА 2.5 милиона светлинни години

Гигантската галактика Андромеда, видима с невъоръжено око в съзвездието Андромеда е най-голямата галактика в Местната група, в която **Млечният път е втори по големина**. Нашата галактика, Млечният път, се приближава към Андромеда с над 100 км/с и след милиарди години двете галактики ще се слоят.

Еволюция на космولوجичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство

- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)

Hershels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1700

- 1915 Shapley: **Слънцето не е в центъра на Галактиката.**

(Галактиката се счита все още център на Вселената) 1900

Shapley-Curtis дебат: *Дали спиралните мъглявини са в Галактиката или са извънгалактични обекти? Вселена от галактики не от равномерно разпределени звезди?*

Еволюция на космологичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство

- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)

Herschels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1700

- 1915 Shapley: **Слънцето не е в центъра на Галактиката.**

(Галактиката се счита все още център на Вселената) 1900

Shapley-Curtis дебат: *Дали спиралните мъглявини са в Галактиката или са извънгалактични обекти? Вселена от галактики не от равномерно разпределени звезди?*

Да, спиралните мъглявини са галактики. Вселена от галактики.

Вселената не е еднородна на извънгалактични мащаби

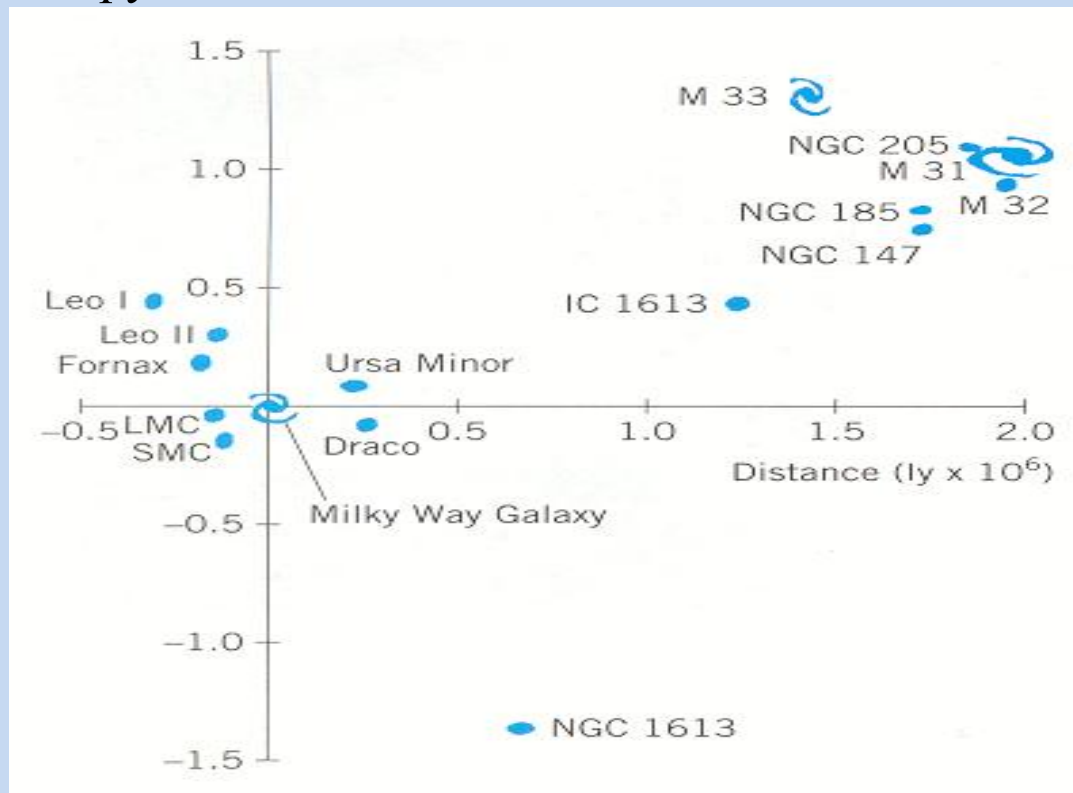
на групи от галактики

Хъбъл Е. 1924:

Нашата Галактика не е уникална, съществуват множество други.

Вселена от галактики!

По цефеиди определя разстоянията до “мъглявините” NGC 6822, M31 и M33 и показва че те са галактики – звездни конгломерати, като нашата.



Нашата Галактика се намира в малка група от галактики наречени Местна група галактики с обем няколко кубични Мрс. Големия Магеланов облак – най-близка галактика до нас.

В космологията структурата на галактиките не е съществена, галактиките се приемат за точкови обекти.

Еволюция на космولوجичните идеи

- **Нютонов модел на статична Вселена:** равномерно разпределени звезди в безкрайното пространство
- Звездите са групирани в дископодобни структури (Млечен път)
Herschels откриват дисковата структура (Слънцето все още се смята в центъра на г-ката) 1700
1915 Shapley: **Слънцето не е в центъра на Галактиката.**
(Галактиката се счита все още център на Вселената) 1900
- 1923 - 25 Хъбъл изследва “мъглявините” NGC 6822, M31 и M33 и доказва извънгактичната им природа. **Нашата Галактика не е цялата Вселена.**
- Бааде: **Вселената се състои от галактики.**
- Галактиката не е център на Вселената, даже не е център на Местната група галактики.

Еволюция на космологичните идеи

- 1917 – А. Айнщайн добавя в гравитационните уравнения космологичната константа, за да бъде възможен **статичен модел на Вселената**. ЕИС Вселена.
- 1923 – А. Фридман предлага решения позволяващи **нестатична Вселена**.
- 1929 - Hubble измерва разстоянията до галактики и заедно с **Milton L. Humason** разширява изследването на **Vesto M. Slipher's** относно червените премествания на галактиките. През 1929 Hubble публикува **v-d** на галактиките, указващо на **систематично разбягване на галактиките** от нашата със скорост пропорционална на разстоянието.
- 1965 КМФ откритие – **горещ ранен стадий на Вселената**
- изследвания на **крупномащабната структура и ЕИ на големи мащаби**

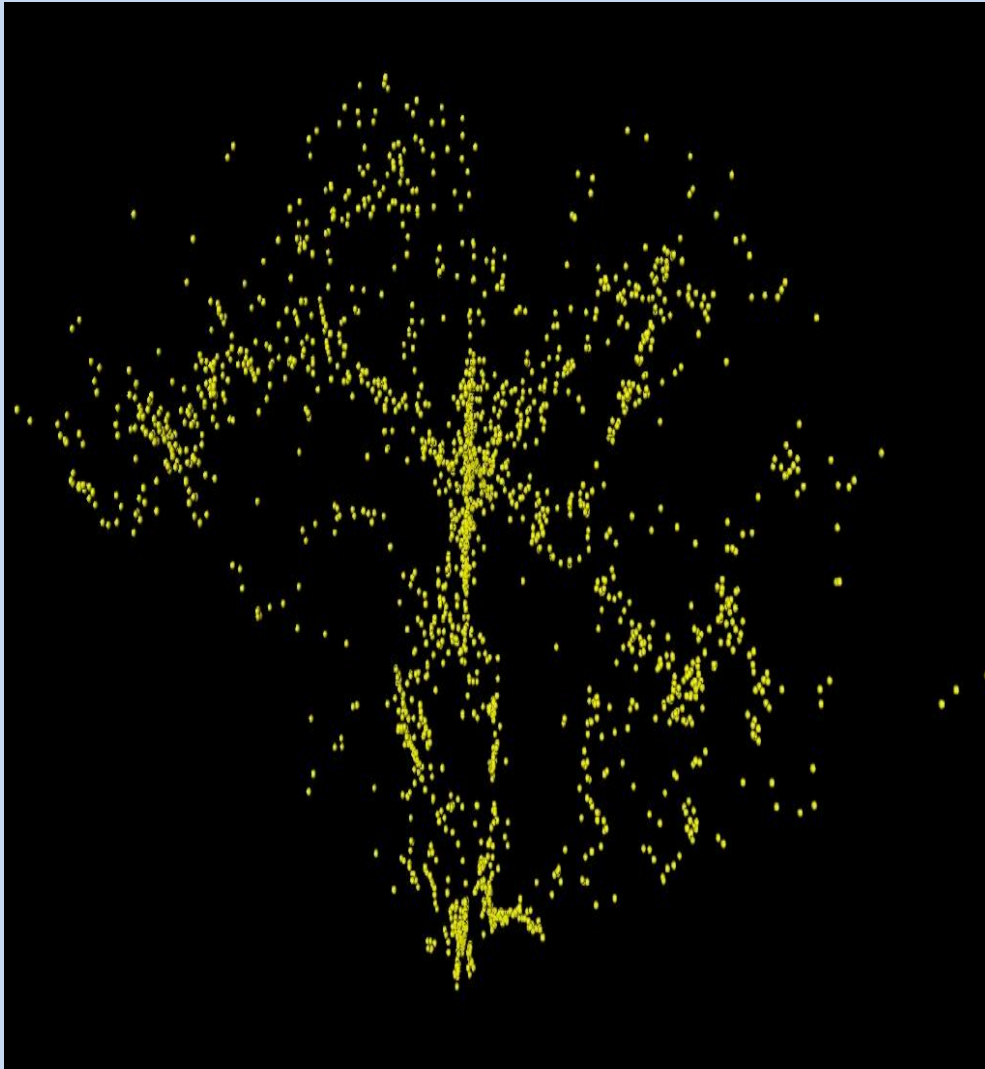
Вселената не е еднородна на мащаби на купове от галактики



Abell 1689, 2 млрд ly от Земята в съзвездието Дева.

Куповете от галактики са най-големите гравитационно свързани стабилни с-ми.
Местната група от галактики се намира в купа Дева.

Вселената е еднородна на мащаби по-големи
от свръхкупове от галактики.



Крупномащабна Структура

Куповете се групират в свръхкупове, свързани с филаменти и стени от галактики, между които има големи празнини ~ 50 Мрс. Свръхкуповете са най-големите структури във Вселената.

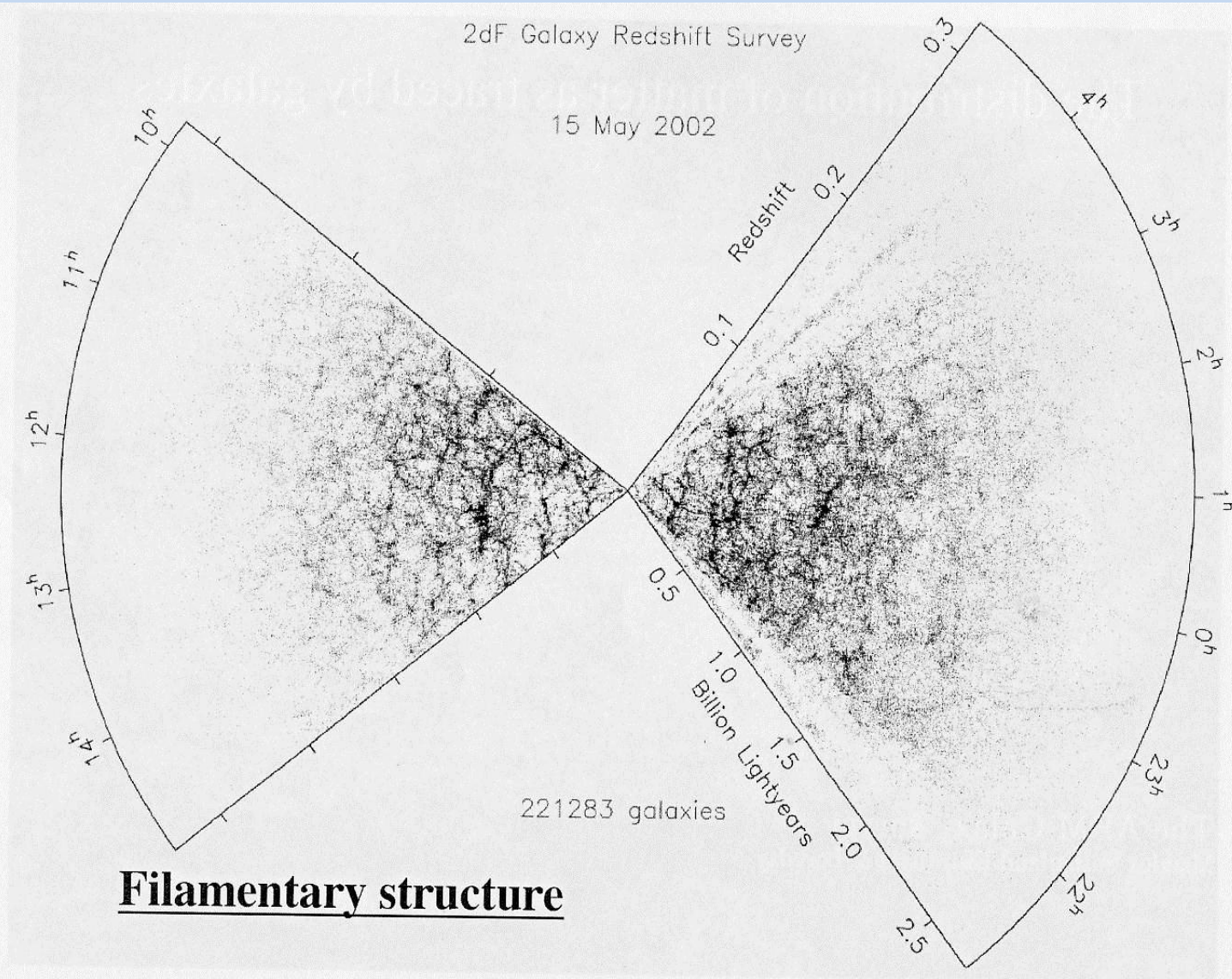
Карта на галактични координати в тясна ивица по измерения на червено отместване, получена от изследванията на червените отмествания.

Радиус - 200 Мрс.

Center for Astrophysics redshift survey

[Figure courtesy Lars Christensen]

Клетъчна крупномащабна структура на Вселената



Sloan Digital Sky Survey

Небесния обзор СЛОУН



Apache Point Observatory in the Sacramento Mountains of New Mexico. The Sloan Digital Sky Survey's 2.5-meter telescope on the left, the monitor telescope, used for calibrations, inside the small dome to the right of center.

SDSS използва 2.5-м телескоп в Apache Point, New Mexico, снабден с 2 мощни инструмента:

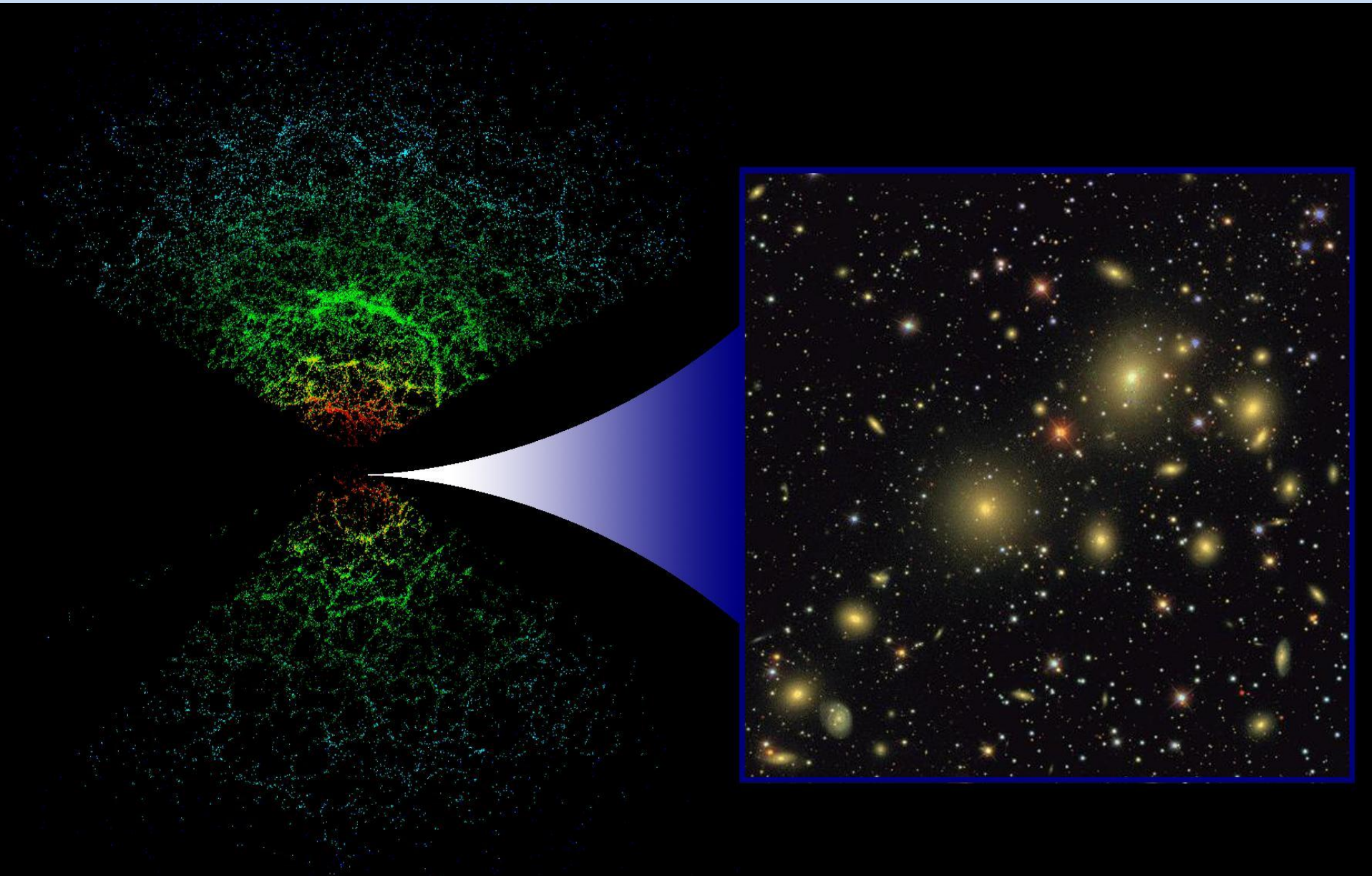
120-мегапиксела камера получаваща моментни изображения на 1.5 квадратни градуса (8 пъти площта на пълната луна),
двойка спектрографи получаващи спектри на 600 галактики и квазари при едно наблюдение.

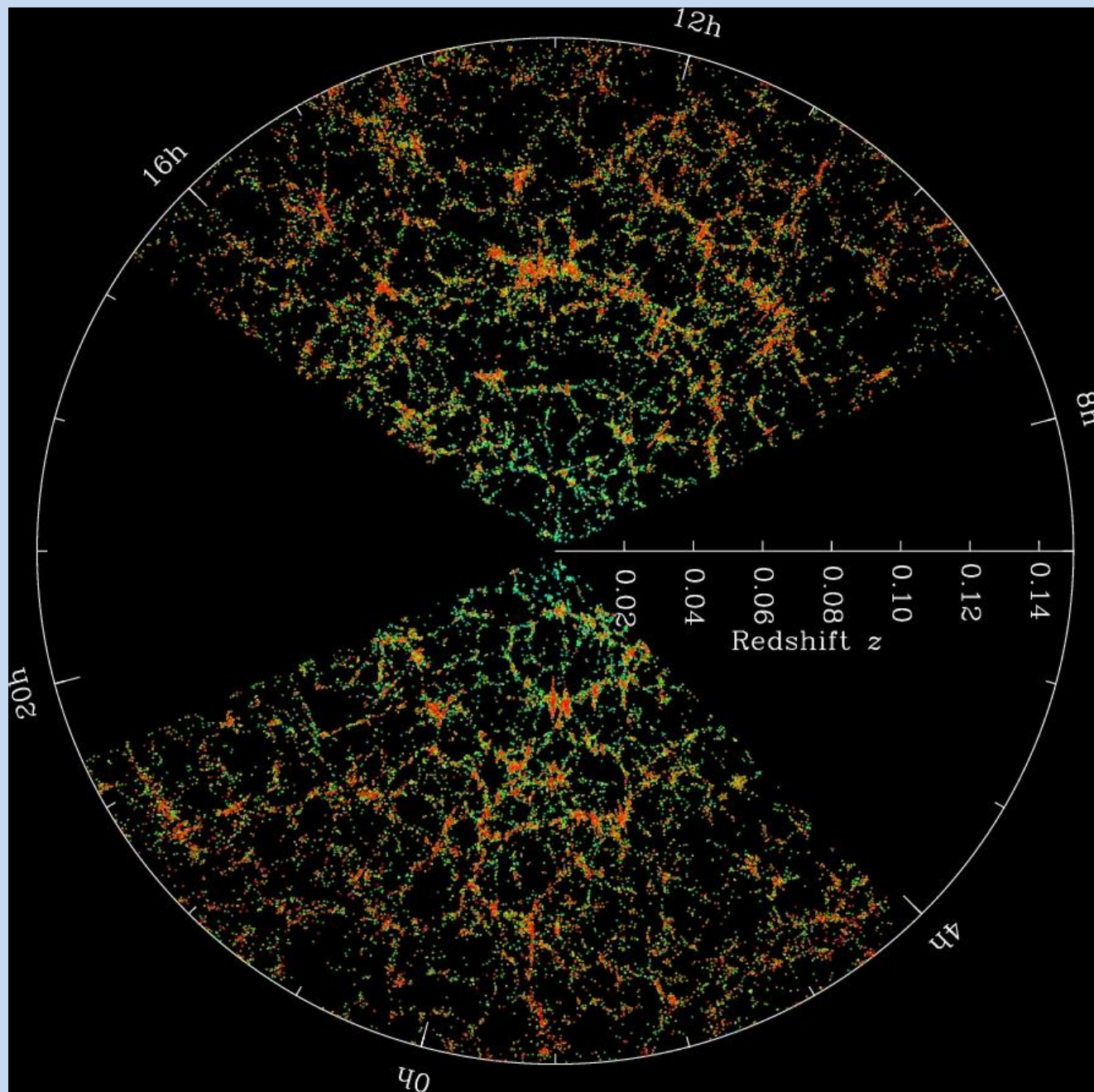
SDSS е най-амбициозния астрономичен обзор правен до сега. През 8 години на изследване (SDSS-I, 2000-2005; SDSS-II, 2005-2008), той получава дълбоки, многоцветни изображения на повече от 1/4 от небесната сфера и създава 3-d карти съдържащи повече от 930,000 галактики и 120,000 квазари.

[SDSS-III](#), е програма съдържаща 4 нови обзора използващи приборите на SDSS, която стартира 2008 и ще продължи до 2014. Тя ще получи дълбоки изображения на повече от четвърт от небето и 3 мерни карти на милиони галактики и квазари.

[The Sloan Supernova Survey](#) carried out repeat imaging of the 300 square degree southern equatorial stripe to discover and measure supernovae and other variable objects. In the course of three 3-month campaigns, the supernova survey discovered nearly 500 spectroscopically confirmed Type Ia supernovae, which are being used to determine the history of the accelerating cosmic expansion over the last 4 billion years.

Обзорът Слоун (Slone Digital Sky Survey) изследва $\frac{1}{4}$ от небето, съдържа милион галактики и квазари. 2D изображения на г-ки (вдясно), след определяне на разстоянията по спектъра им 3D карта (вляво) с дълбочина 2 млрд ly. Представени са 66,976 галактики .





Разрези през SDSS

3-d карта на разпределението
на галактиките.

Земята е в центъра, всяка точка
представя галактика.

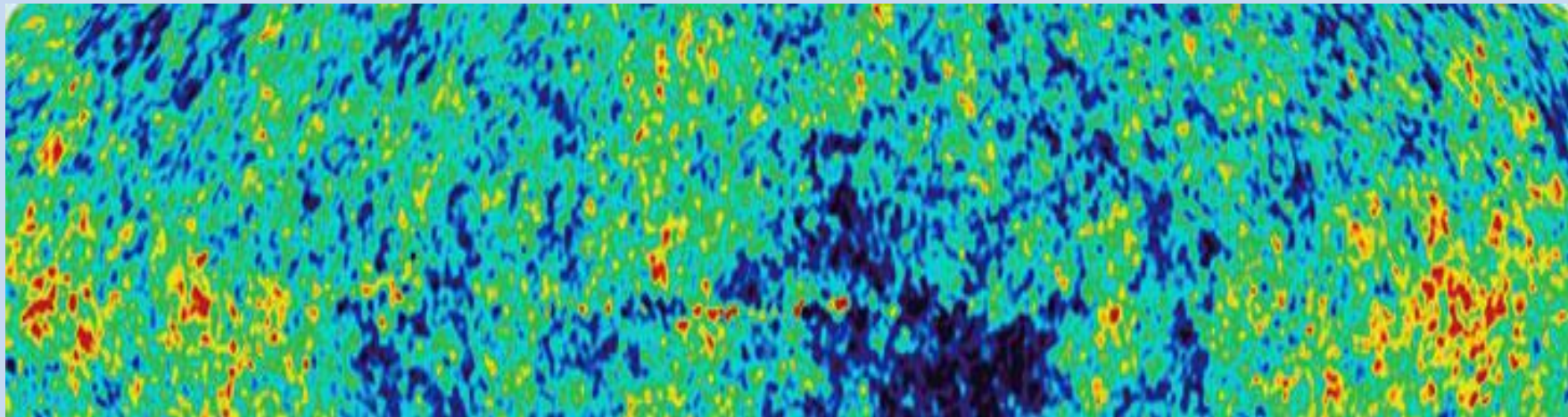
Галактиките са с цветове
според възрастта на звездите
в тях: по-червените и по-силно
скупчени точки показват г-к
по-стари звезди.

Външният кръг е на разстояние
2 милиарда светлинни г-ни.

Представени са галактики
между -1.25 и 1.25 градуса
деклинация.

*Credit: M. Blanton and
the Sloan Digital Sky Survey.*

Изотропия и преди 13.7 милиард години

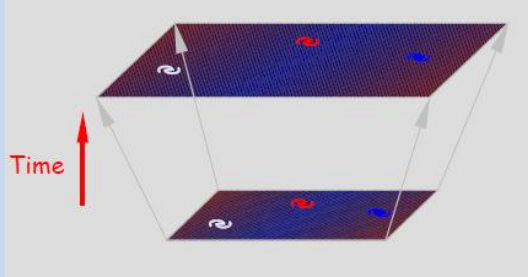


Това широкоъгълно изображение на почти цялото небе, на NASA's WMAP , показва най-далечното достъпно ни излъчване. То е също и най-старото: Това излъчване е било излъчено 380 000 г след Големия Взрив и е пропътувало до нас 13.7 млрд години.

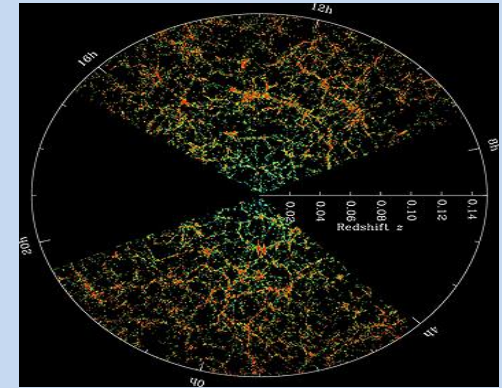
В тази „бебешка“ снимка на Вселената, червените и жълтите петна са райони, които са само с една милионна част от градуса по-горещи от сините и черните зони. Тази малка разлика е достатъчна да послужи за начални зародиши за формиране на галактиките от безформения газ изпълващ някога Вселената.

КМФ, реликтовото лъчение от Големия Взрив, е с една и съща температура във всички направления. Този факт подкрепя тезата, че веществото излъчило това лъчение е било разпределено равномерно и изотропно.

Еднородност и изотропия



- ✓ Еднородно и изотропно разширение на Вселената
Хъбъл и Хюмасон 1929



- ✓ Съвременните обзори 2dF, Sloan Digital Sky Survey, изследват обеми \sim Gpc. Свръхкуповете и празнините са най-големите известни структури.

При размери $>100-200$ Mpc Вселената е еднородна.

- ✓ КМФ: RELIKT, COBE, WMAP установиха изключително висока изотропия на КМФ, т.е. веществото на Вселената е била изотропно и преди 14 млрд години!

Космологичния принцип има наблюдателно потвърждение.

Той е точен на големи мащаби >200 Mpc (mlns г-ки)..

Глобално свойство, валидно по време на цялата еволюция.

Мястото ни във Вселената не е уникално!

Вселената е еднородна и изотропна

на големи мащаби.



Снимка на Вселената на 380 000 г.

Реликтовото лъчение от Големия Взрив, е с една и съща температура във всички направления. Този факт подкрепя тезата, че веществото излъчило това лъчение е било разпределено равномерно и изотропно.

- КМФ изследвания – характеристики на Вселената с 5% точност!
- Изследване на съставните компоненти на Вселената – ТВ и ТЕ доминират

Съвременните наблюдателни данни указват на съществуването на поне 4 компонента на Вселената:

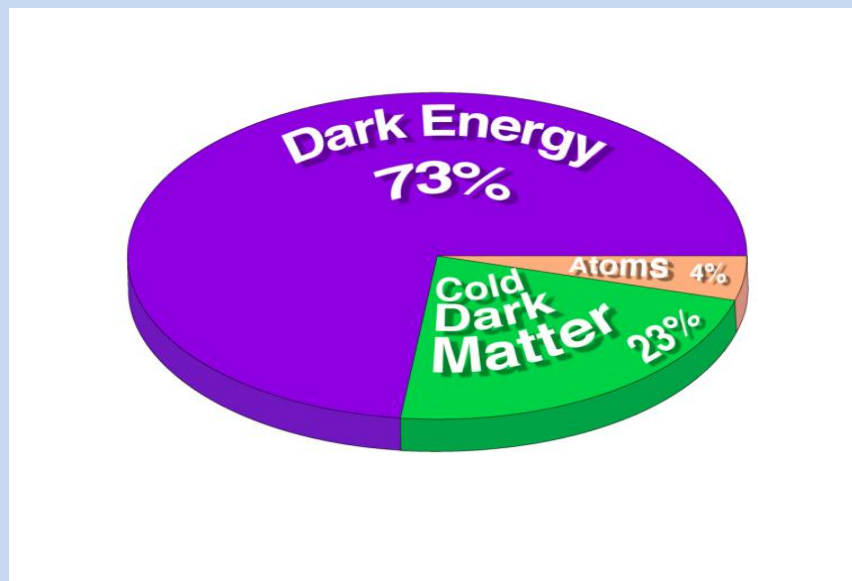
Лъчение /релативистки частици/

Барионно вещество

(обичайното ни вещество, р и n)

Тъмно хладно вещество (Скрита маса)

Тъмна енергия



- 4% - H+He, 0.0025% тежки елементи, 0.8% звезди, 0.005% КМФ
- ~23% - тъмно вещество, ~ 73% тъмна енергия
- Веществото, от което се състоим ние, планетите, звездите е незначителна съставляваща компонента на Вселената !

Съвременните изследвания на структурите във Вселената и КМФ резултати: Вселената изглежда по един и същ начин, независимо от точката на наблюдение.

Мястото ни във Вселената **не е уникално!**

Веществото, от което се състоим ние, планетите, звездите **е незначителна** съставляваща компонента на Вселената !

**хомогенна & изотропна, разширяваща се
Вселена, доминирана от ТВ и ТЕ,
с горещ ранен стадий**

Метрика на Робертсон-Уокер

В случай на валидност на Космологичния принцип метриката на пространство-времето може да се запише в най-общ вид :

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

Известна като метрика на Робертсон-Уокер (Robertson-Walker).

$R(t)$ – мащабен фактор

$c = 1$, индекс на кривината $k = +1, -1, 0$ затворена, отворена, плоска геометрия

r, θ, ϕ - полярни координати в съпътстваща КС $(3) R = 6k / R^2(t)$

Еднородността и изотропията на Вселената позволяват да опишем геометрията и еволюцията на Вселената посредством 2 космологични параметра, k - отчитащ пространствената кривина и $R(t)$ – мащабен фактор описващ разширението на Вселената.

Еднородна изотропна Вселена се описва с краен брой параметри – скорост на разширение, плътност, кривина, ... зависещи само от t , свързани посредством уравненията на ОТО.

При $k=0$ физическото разстояние е $d = R(t)r$

скорост = космологична + пекулярна $v = r\dot{R} + R\dot{r} = Hd + Rv_p$

Хъбблов параметър $H = \dot{R}(t) / R(t)$

$$1 + z = R(t_0) / R(t)$$

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$$

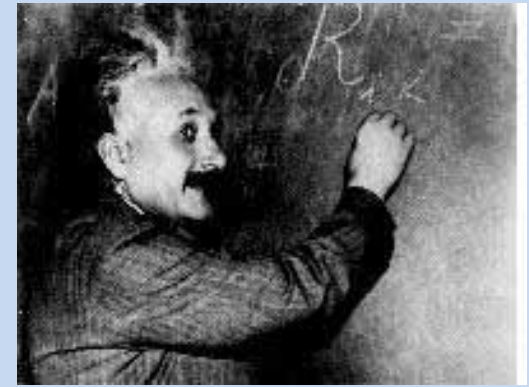
почервяване на светлината

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R(t_0)}{R}$$

Динамика на Вселената

Теория и наблюдения

Теоретични основи



- Обща теория на относителността

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$



тензор на енергията-импулса

тензор на Ричи - функция на метриката и производните и

Кривината на пространство-времето се определя от енергията и импулса на материята в него.

В общия случай да се намери решение на уравненията на ОТО е невъзможно. Съществуват решения в случая на специални симетрии.

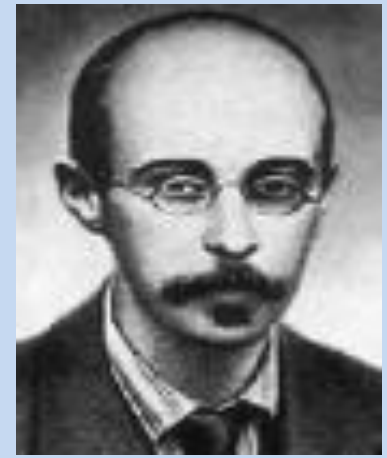
- 1917 решение на Айнщайн

Космологичен модел на Айнщайн – неизменна, статична, идеално симетрична Вселена. Въвеждане на космологична константа

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

- 1917 Космологичен модел на де Ситер – Вселена с вакуум
- 1922 Фридманови решения

Теоретични основи



- Фридманово решение **Нестационарна Вселена**

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Кривината на пространството k се определя от плътността на енергията

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p),$$

$$\Omega = 1 + k / H^2 R^2$$

$$\Omega = \frac{8\pi G}{3H^2} \rho$$

Гравитира не само масата, но и налягането!

Важна модификация: при $p < -1/3\rho$

води до анти-гравитация и ускорено разширение

$$q_0 = - \left. \frac{R\ddot{R}}{\dot{R}^2} \right|_0 = \frac{1}{2}\Omega_m + \Omega_r + \frac{(1+3w)}{2}\Omega_v \quad w \equiv \frac{p}{\rho}.$$

$$\Omega < 1$$

$$\Omega = 1$$

$$\Omega > 1$$

$$k < 0.$$

$$k = 0.$$

$$k > 0.$$

Плътността определя геометрията

Според Λ CDM, който е в най-добро съответствие с наблюдателните данни

$$\Omega_{\text{total}} \sim 1.0$$

$$\rho_C \equiv 3H_0^2 / 8\pi G = 1.88 \times 10^{-26} h^2 \text{ kg m}^{-3}$$

6 атома H/m³

Стойността на H днес се нарича константа на Хъбъл.

H описва скоростта на разширение и може да се определи чрез наблюдения

$$\begin{aligned} H &\equiv 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \\ \Rightarrow H^{-1} &= 9.78 h^{-1} \text{ Gyr} \\ &= 2998 h^{-1} \text{ Mpc} . \end{aligned}$$

Тензора на енергията-импулса на идеален газ е

$$T_{\mu}^{\nu} = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \end{pmatrix}$$

$$\rho = \rho_M + \rho_R + \rho_{\Lambda} + \rho_w + \dots$$

Диференцирайки уравнението на Фридман и изваждайки уравнението на движение се получава уравнение за запазване на енергията-импулса

$$T_{\mu}^{\nu}{}_{;\nu} = 0$$

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + p)$$

$$dE + p dV = T dS$$

Фридмановото разширение на идеален газ е изоентропийно $dS=0$.

Релация между мащабния фактор и температурата в разширяващата се Вселена:

$$R(t) \sim 1/T$$

Теоретични основи

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

- ОТО

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p),$$

За да бъдат решени уравненията е необходимо да се укаже състава на Вселената и уравнението на състояние на всяка компонента

$$w \equiv \frac{p}{\rho}.$$

$$\rho \propto R^{-3(1+w)}$$

- Физика, Астрофизика, Астрономия, Термодинамика, КТП,

Gamow, Lemaitre, Peebles, Zeldovich, Novikov, Dolgov, Linde, Turner, Kolb

Възможни уравнения на състоянието на различни компоненти:

$p_R = \rho_R/3$	лъчение	$w = 1/3$	$\rho_R \sim R^{-4}$
$p_M = 0$	прах	$w = 0$	$\rho_M \sim R^{-3}$
$p_k = -\rho_k/3$	струни	$w = -1/3$	$\rho_k \sim R^{-2}$
$p_V = -\rho_V$	вакуум	$w = -1$	$\rho_V \sim R^0$

$$w = -0.967^{+0.073}_{-0.072}$$

Геометрия на Вселената при $\Lambda=0$!

Фридмановото уравнение може да се интерпретира в Нютоновата механика:

Уравнение за запазване на енергията за пробни частици в гравитационен потенциал:

$$\frac{1}{2} \dot{r}^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{kr_0^2}{2}.$$

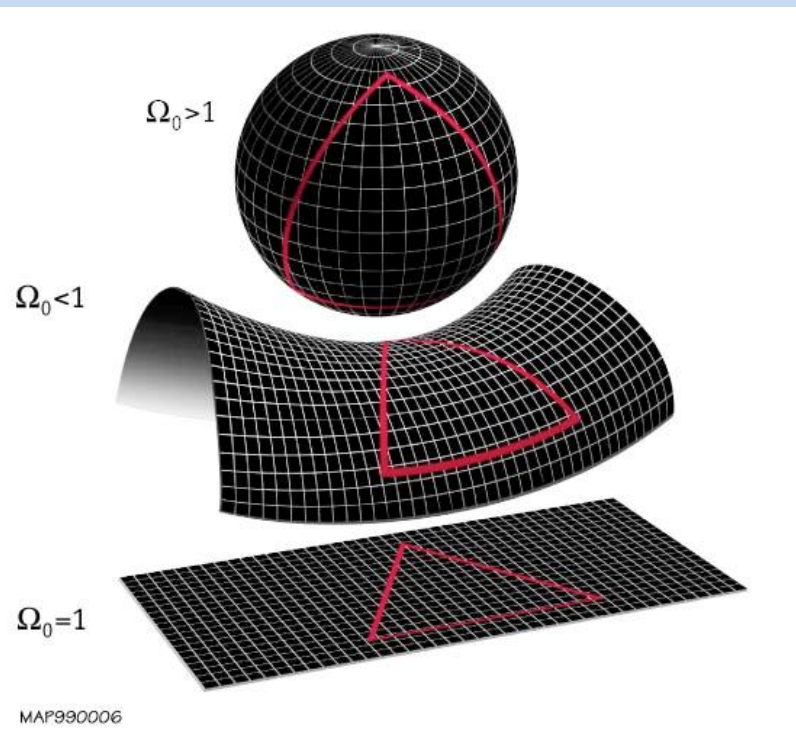
$$M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$$

$k=1$ отрицателна енергия на връзката, свиване, надкритична плътност

$k=-1$ положителна , разширение, подкритична плътност

$k=0$ критична плътност, разширение

Три възможни случая определящи типа геометрия на Вселената :



$\rho > \rho_{cr}$ Сферична: затворена Вселена, крайна но пространствено безгранична и с крайно време на съществуване.

$\rho < \rho_{cr}$ Хиперболична: отворена, безкрайна в пространството и времето, но криво пространство.

$\rho = \rho_{cr}$ Плоска: отворена Вселена, с Евклидова геометрия, безкрайни пространство и време.

При $\Lambda=0$ геометрията и еволюцията на Вселената са свързани.

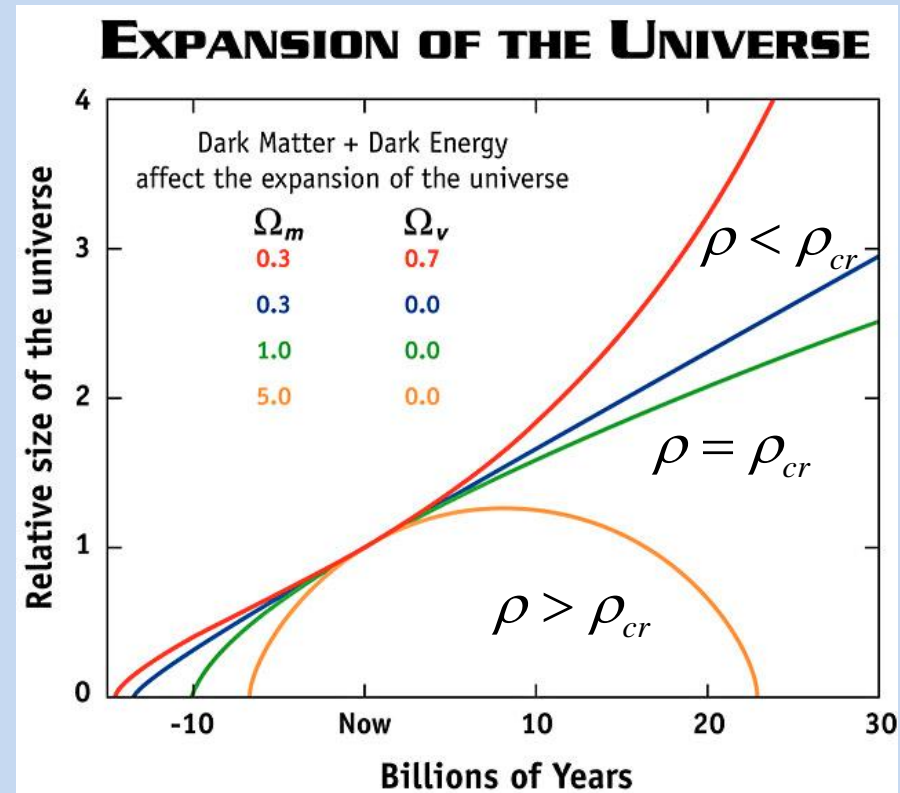
Сферична: затворена Вселена, ще колапсира, крайна но пространствено безгранична и с крайно време на съществуване.

Хиперболична: отворена, разширява се със забавяне, безкрайна в пространството и времето.

Плоска: отворена Вселена, разширяваща се, с Евклидова геометрия, безкрайни пространство и време.

Качествена характеристика на изменението на разширението е параметър на забавяне:

$$q_0 = - \left. \frac{R\ddot{R}}{\dot{R}^2} \right|_0 = \frac{1}{2}\Omega_m + \Omega_r + \frac{(1+3w)}{2}\Omega_v .$$

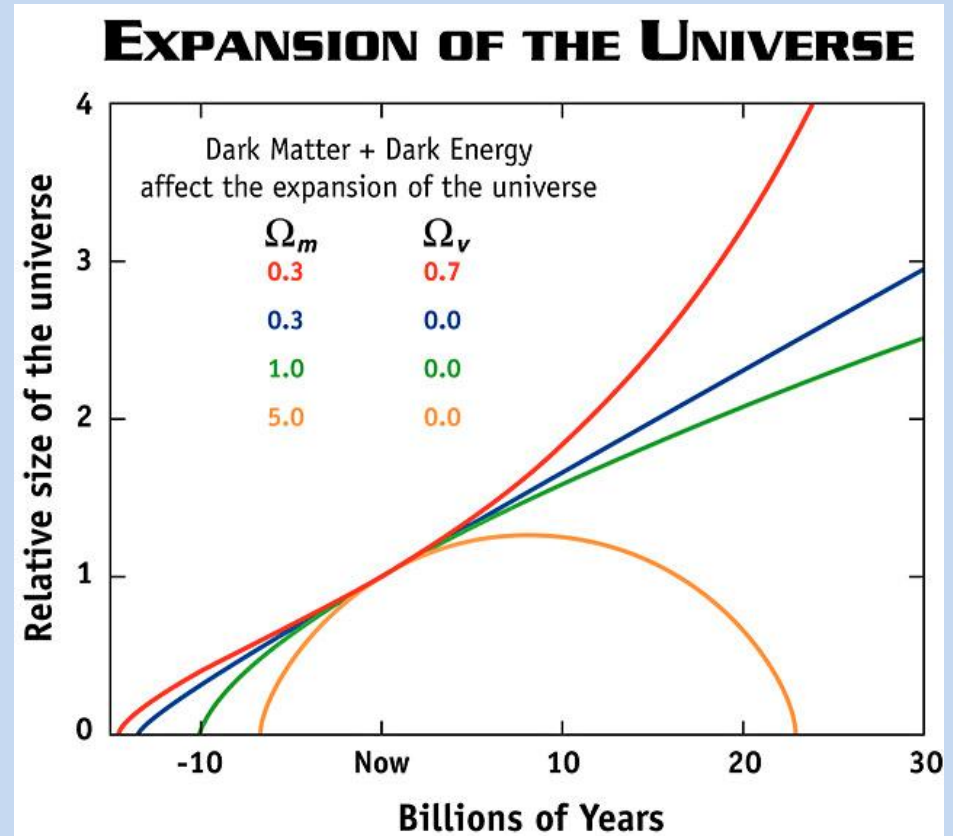
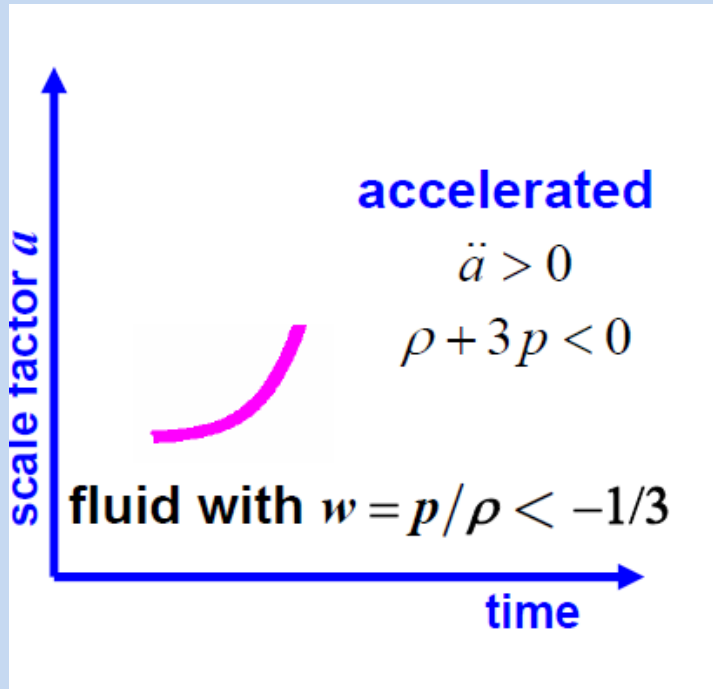


Наличието на вакуумна енергия драматично може да измени съдбата на Вселената:

При $\Lambda < 0$ независимо от знака на κ , Вселената ще колапсира.

При големи стойности на космологичната константа (по-големи от Айнщайновата и стойност, необходима да спре разширението или свиването) даже затворена Вселена би се разширявала вечно.

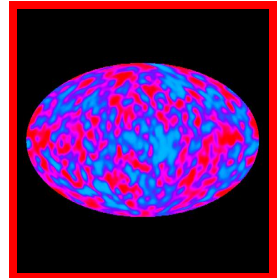
При $\Lambda \neq 0$ съдбата на Вселената **не е** свързана с геометрията.



$$q_0 = - \left. \frac{R\ddot{R}}{\dot{R}^2} \right|_0 = \frac{1}{2}\Omega_m + \Omega_r + \frac{(1+3w)}{2}\Omega_v .$$

Вселена с голям процент материя във вид на тъмна енергия, причиняваща ускорено разширение

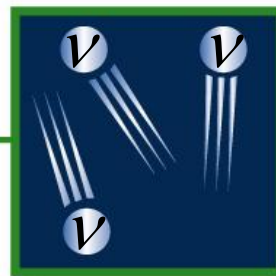
Наблюдения: Съвременната Вселена се разширява с ускорение.



лъчение:
0.005%



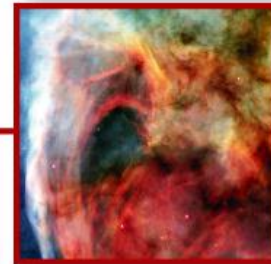
тежки елементи:
0.025%



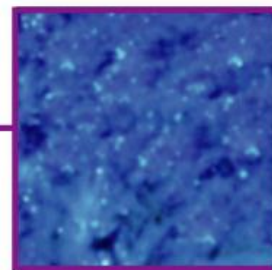
неутрино:
0.1%- 0.02%



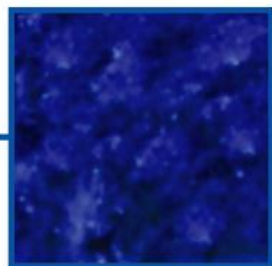
звезди:
0.5%



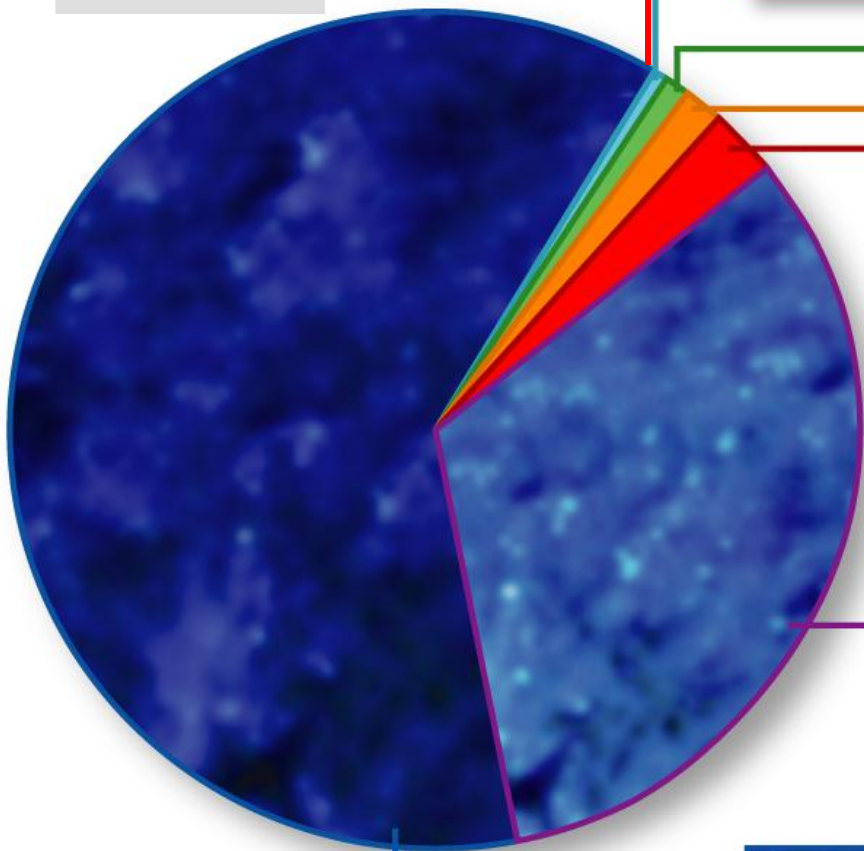
H & He:
газ 4%



студено ТВ:
22%



тъмна енергия (Λ):
73%



Стадий на доминиране на лъчението – RD стадий :

Термодинамични релации за плътността на енергията, ентропията и на частиците и температурата:

$$dE + p dV = T dS$$

$$\rho = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4,$$

$$n = \frac{\zeta(3)}{\pi^2} (g_B + \frac{3}{4}g_F) T^3,$$

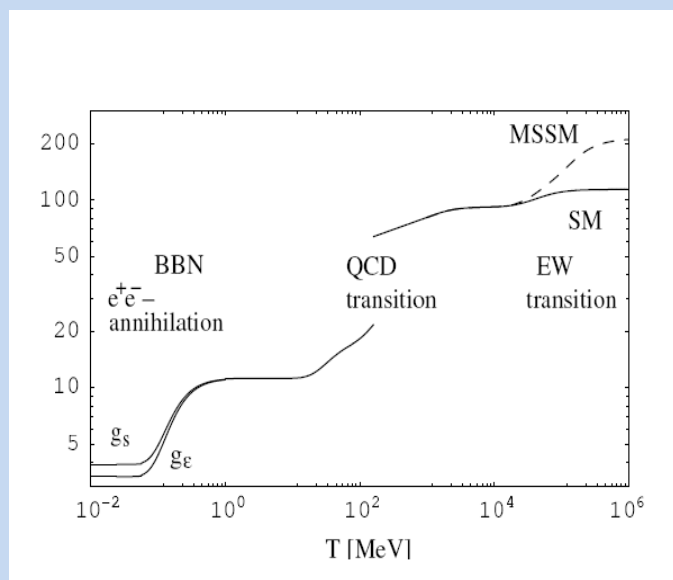
$$S = \frac{2\pi^2}{45} g_* T^3$$

$$g_* = \sum_{i=\text{bosons}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{j=\text{fermions}} g_j \equiv (g_B + \frac{7}{8}g_F)$$

$$\rho_r = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \rho_\gamma$$

Релациите са следствие от интегриране на разпределенията на Bose-Einstein и Fermi-Dirac:

$$\frac{g}{(2\pi)^3} \int \frac{d^3q}{e^{q/T} \pm 1} q^a$$



Зависимост на релативистките степени на свобода от T.

Основни закони на разширение

$$R(t) \propto t^{2/[3(1+w)]}$$

Стадий на доминиране на лъчението: $R(t) \propto t^{1/2}$; $H = 1/2t$.

Стадий на домириране на веществото: $R(t) \propto t^{2/3}$; $H = 2/3t$.

Стадий на доминиране на космологичната константа : $H = \text{const}$ $R(t) \propto e^{\sqrt{\Lambda/3}t}$

В миналото Вселената е била по-плътна

$$\rho \propto R^{-3(1+w)} \quad \text{и по-гореща } T \sim 1/R(t).$$

Космологична сингулярност $T, \rho, H \rightarrow \infty$

СКМ предсказва наличие на реликтово лъчение от ранния горещ стадий – КМФ детектиран!

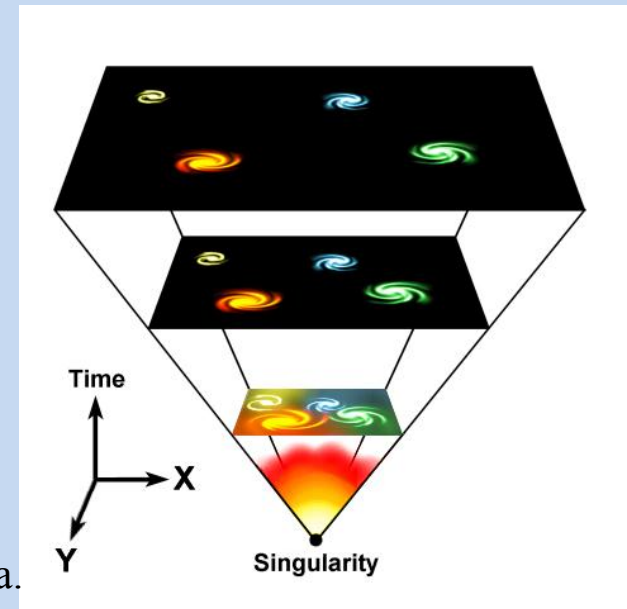
Наблюдателни свидетелства за гореща Вселена:

- Обилие на леките елементи

Свидетелство за ранен горещ и плътен стадий на Вселената.

- Космичен микровълнов фон

Остатъчното лъчение от горещия стадий на Вселената.



Големия Взрив

Съвременната Вселена – разширение с ускорение.

Наблюдателни основи на СКМ

- **Разширение на Вселената**

Наблюдаваното разбягване на галактиките свидетелствува за разширение на Вселената. SN наблюдения свидетелствуват за разширение с ускорение.

- **Разпространеност на леките елементи**

Свидетелство за ранен горещ и плътен стадий на Вселената.

- **Космичен микровълнов фон**

Остатъчното лъчение от горещия стадий на Вселената.

- **Структури във Вселената**

$$H_0, q_0, \Omega_i (\Omega_0, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_B, \Omega_\gamma, \Omega_\nu, \dots), t_0, T_0, P(k), C_l$$

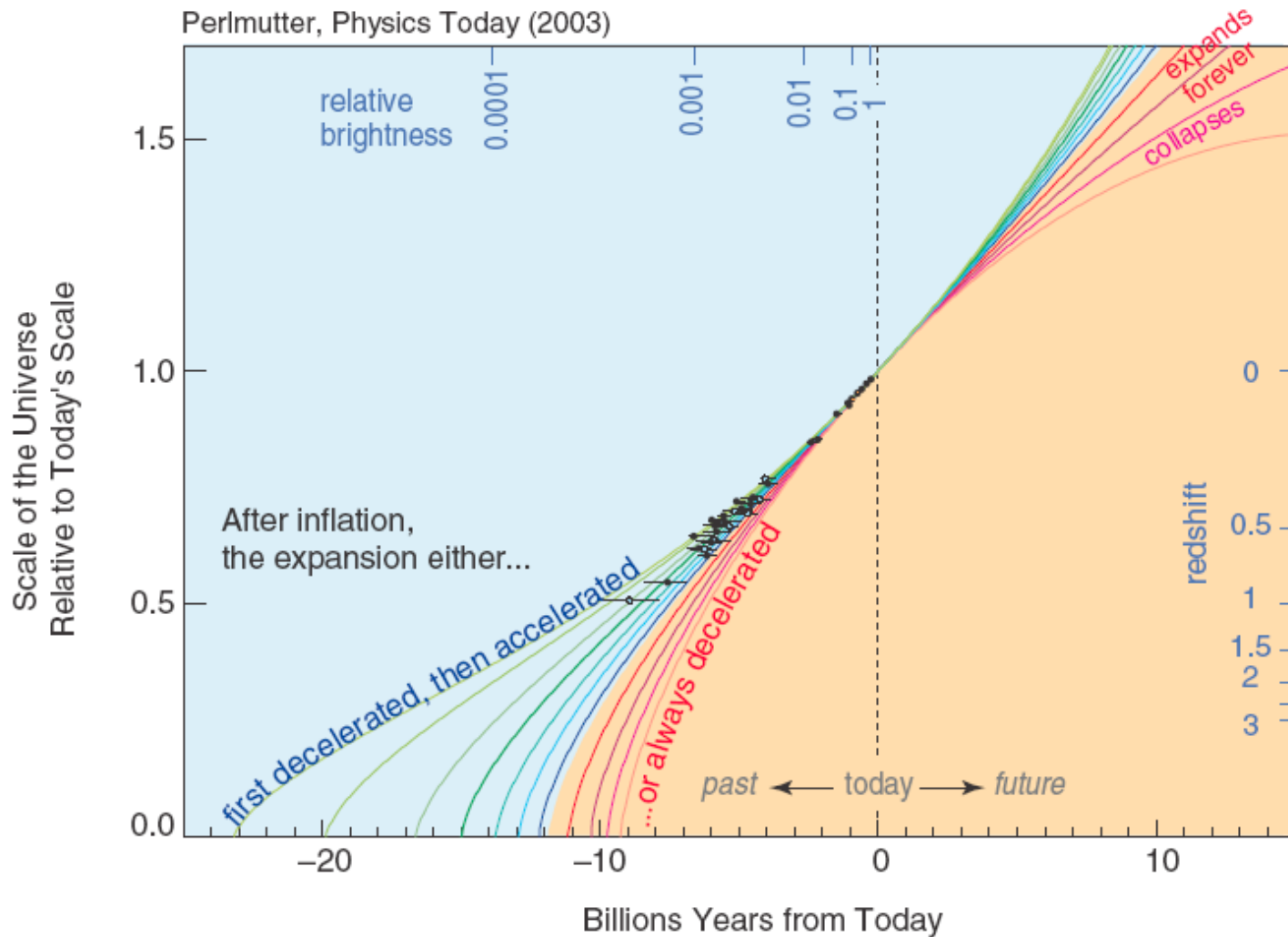
Разширение на Вселената

Наблюдателни резултати

Наблюдения:
Вселената днес се
разширява с ускорение.

Expansion History of the Universe

Perlmutter, Physics Today (2003)



Определяне на разстояния:

Ако знаем абсолютната звездна величина M и измерим видимата, Можем да определим разстоянието по формулата:

$$m - M = 5 \log d - 5$$

d - фотометрично разстояние

$$[d] \text{ parsec} \quad m \sim -2.5 \log f \quad M \sim -2.5 \log L$$

Стълбица на разстоянията: предположение че цефеидите ,

RR Lyrae, SN имат същите свойства в другите галактики.

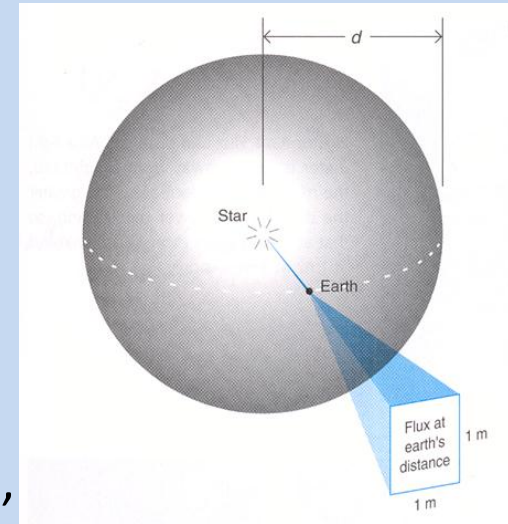
Предположенията са подкрепени от еднаквите спектри и криви на блясъка.

променливи звезди: до 20 Мpc;

SN I (известна максимална светимост на тези обекти),

най-ярки Sc I спирални галактики,

Tully-Fisher зависимост, между ротационната скорост на спиралните галактики и светимостта им (M- HI ширина) : до 400 – 600 Мpc.



$$L = 4\pi d^2 f$$

Cepheid:

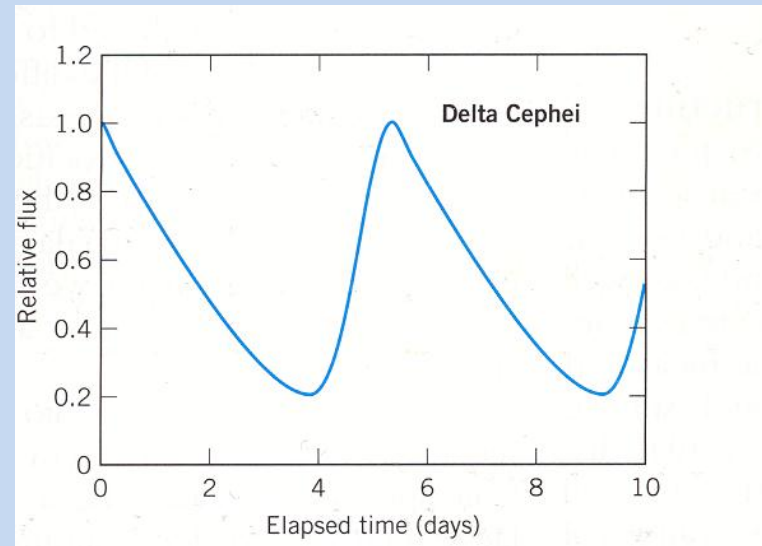
Classical cepheids (Population I):

P: 5 - 10 d.

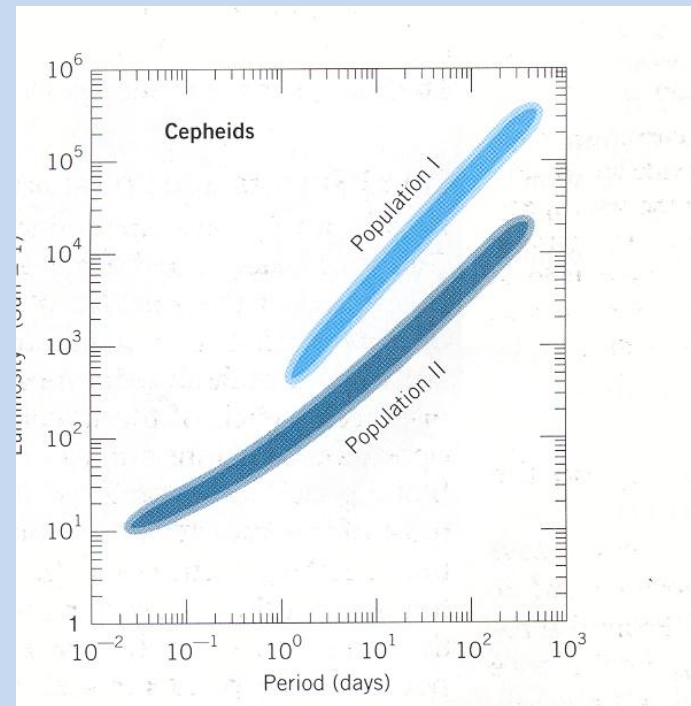
Population II cepheids: 12 - 20 d

RR Lyrae: $P \sim 12$ h

Population II $L \sim 100 L_{\odot}$.



P-L зависимость за Цефеидите



Скорости на галактиките

$$z \equiv \frac{\lambda_d - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c}$$

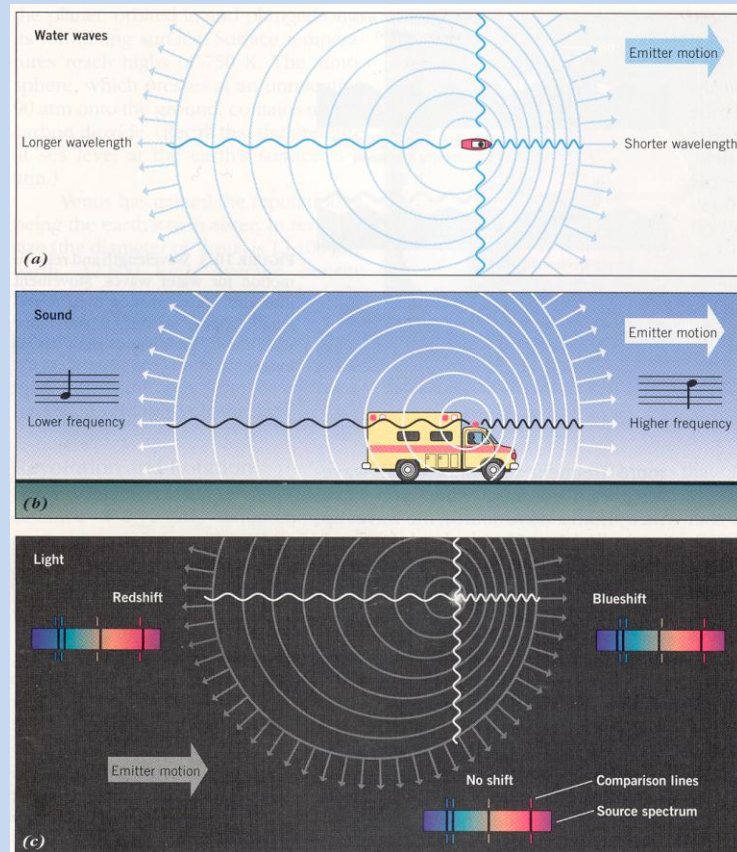
при $z < 0.2$,

иначе

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

Отдалечаване на обекти, както и космологичното разширение, води до червено отместване z .

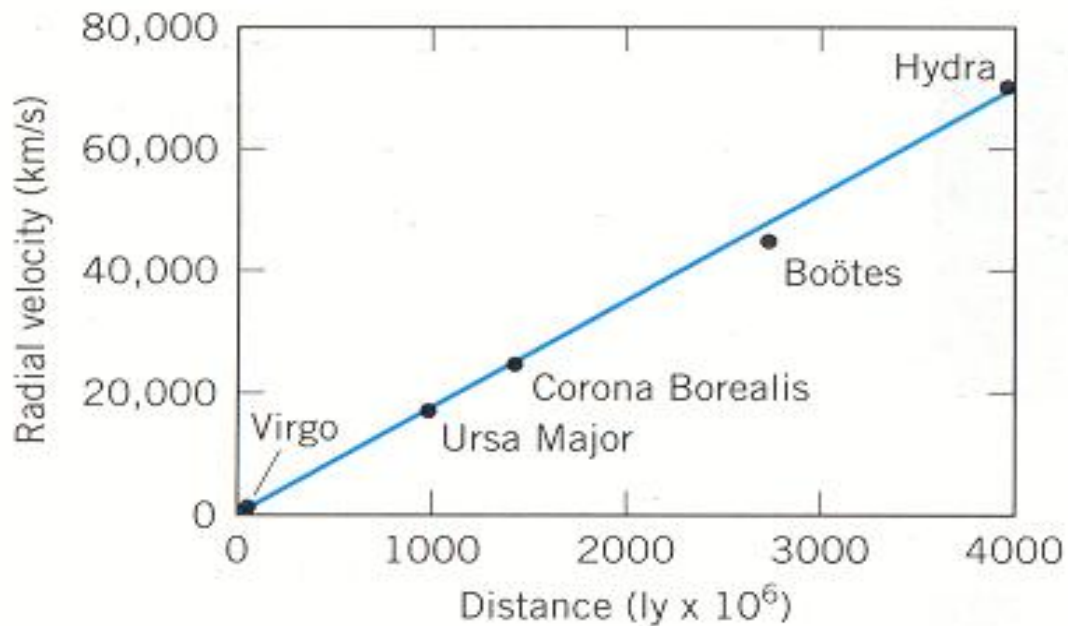
Космологичното червено отместване не е изцяло резултат от Допрелов ефект, а по-скоро се интерпретира като смесица от Доплеров ефект и гравитационно червено отместване.



Разширение на Вселената

1912-1917 Slipher: отдалечаване на спиралните мъглявини

1920's- Hubble: зависимост между скоростта на разбягване от разстоянието



Закон на Хъбъл

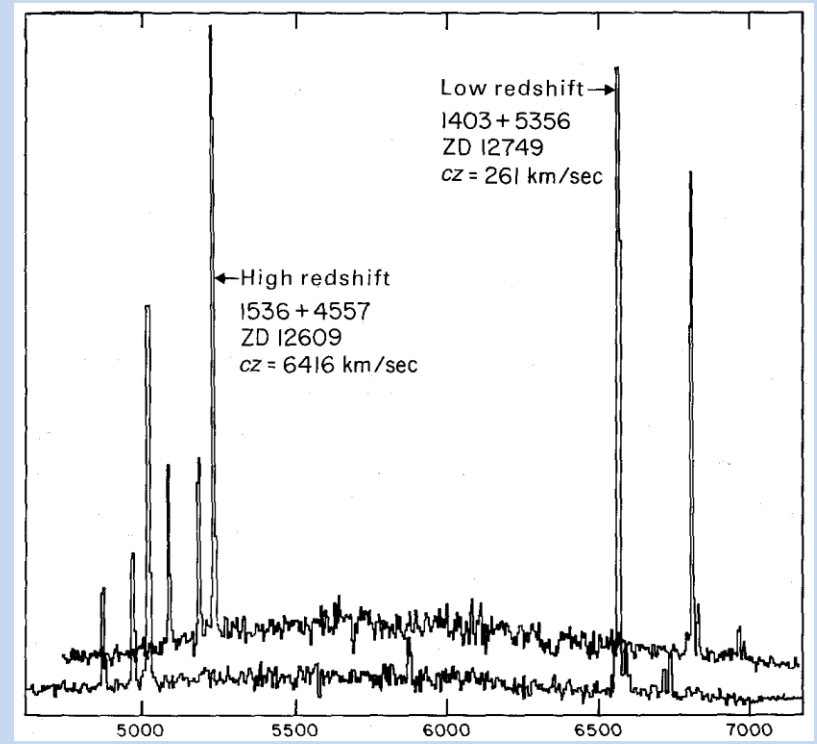
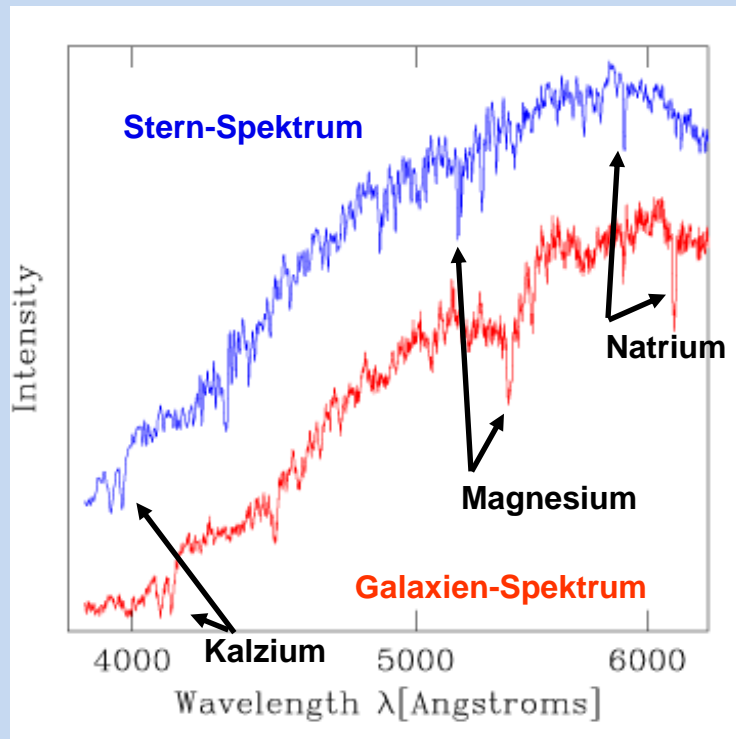
$$v \sim cz = H_0 d$$

Скоростта на разбягване расте с разстоянието.

$$z \equiv \frac{\lambda_d - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c}$$

Спектроскопия на галактиките

Heute
↑



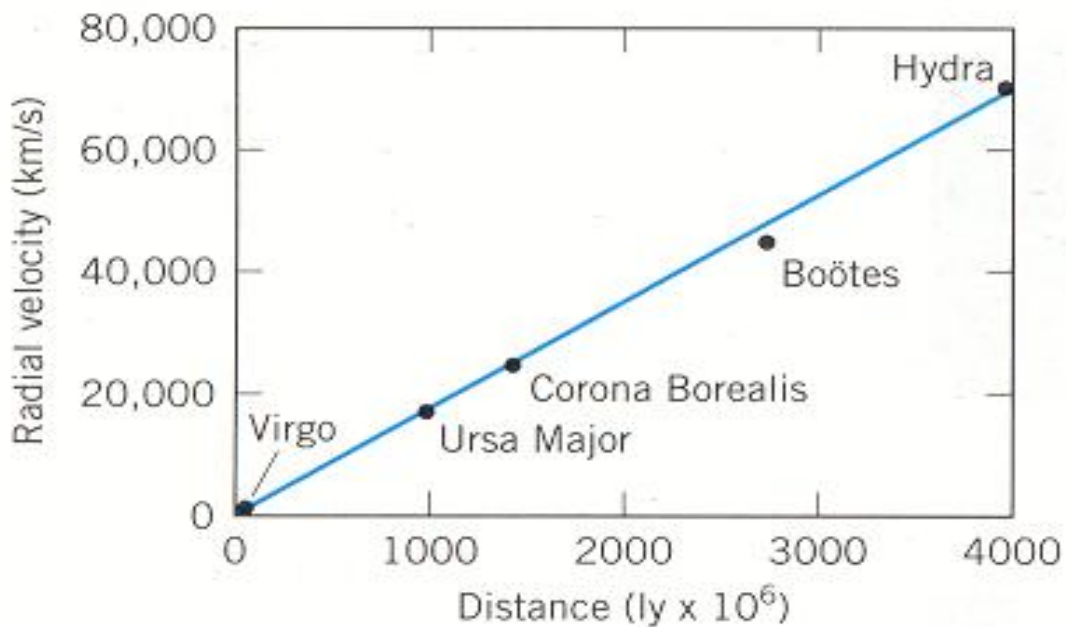
$V_{\text{Galaxy}} \sim 12000 \text{ km/s}$



Разширение на Вселената

1912-1917 Slipher: отдалечаване на спиралните мъглявини

1920's- Hubble: зависимост между скоростта на разбягване от разстоянието



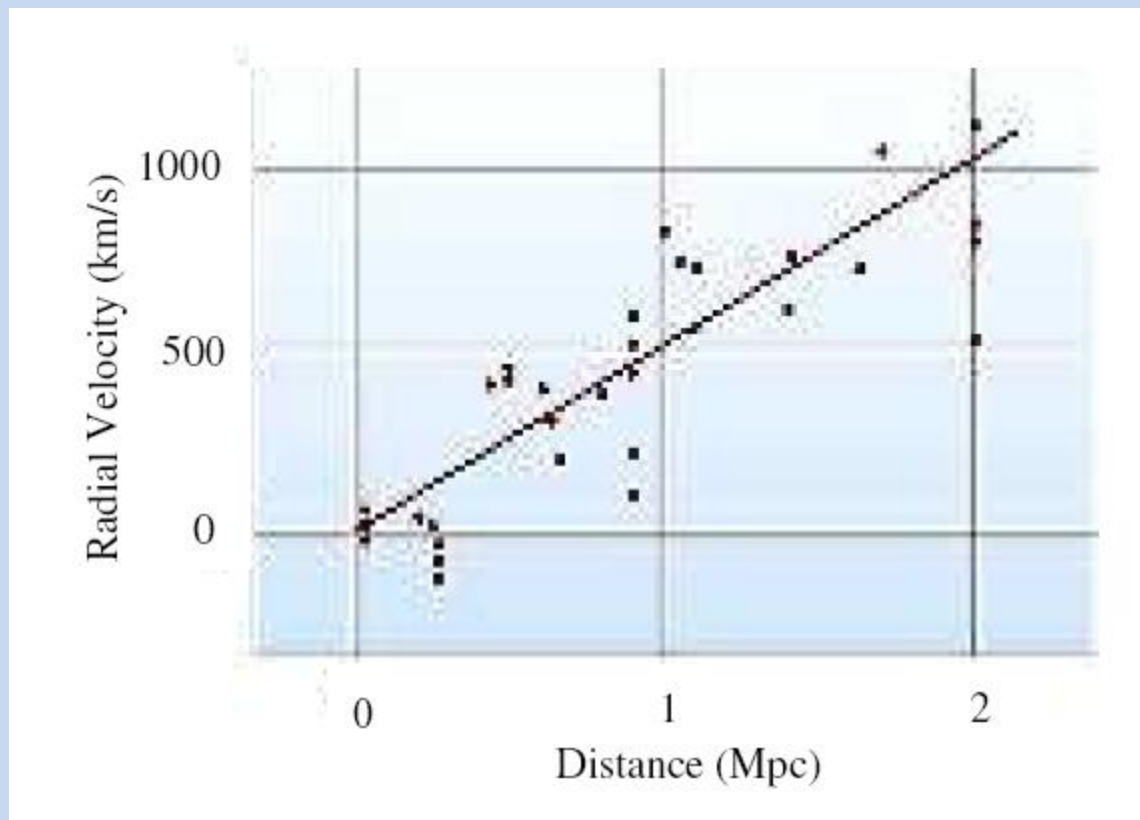
Закон на Хъбъл

$$v \sim cz = H_0 d$$

Скоростта на разбягване расте с разстоянието.

$$z \equiv \frac{\lambda_d - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c}$$

Оригинална Хъбълова диаграма



From the Proceedings
of the National Academy of Sciences
Volume 15 : March 15, 1929 : Number 3

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By Edwin Hubble

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington
Communicated January 17, 1929

.....

.....The results establish a roughly linear relation between velocities and distances among nebulae

..... The outstanding feature, is the possibility that the velocity-distance relation may represent the de Sitter effect, and hence that numerical data may be introduced into discussions of the general curvature of space. In the de Sitter cosmology, displacements of the spectra arise from two sources, an apparent slowing down of atomic vibrations and a general tendency of material particles to scatter. the linear relation found in the present discussion is a first approximation representing a restricted range in distance.

Разширение на Вселената

$$cz = H d$$

$$H_0 = 100 \cdot h \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

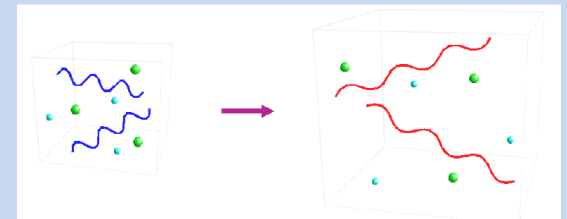
v [km/s], d [Mpc], $0.4 < h < 1.0$

Законът съответствува на еднородно разширение (ρ , T намаляват)

- Разширение на пространството, не на обектите в него.
- Плътноста на веществото намалява обратно пропорционално на обема, лъчението – по-бързо, поради намаляване и на енергията на фотоните. Обаче, $\rho_{\text{vac}} \propto a^0 = \text{constant}$

$$\rho_M \propto a^{-3}$$

$$\rho_R \propto a^{-4}$$



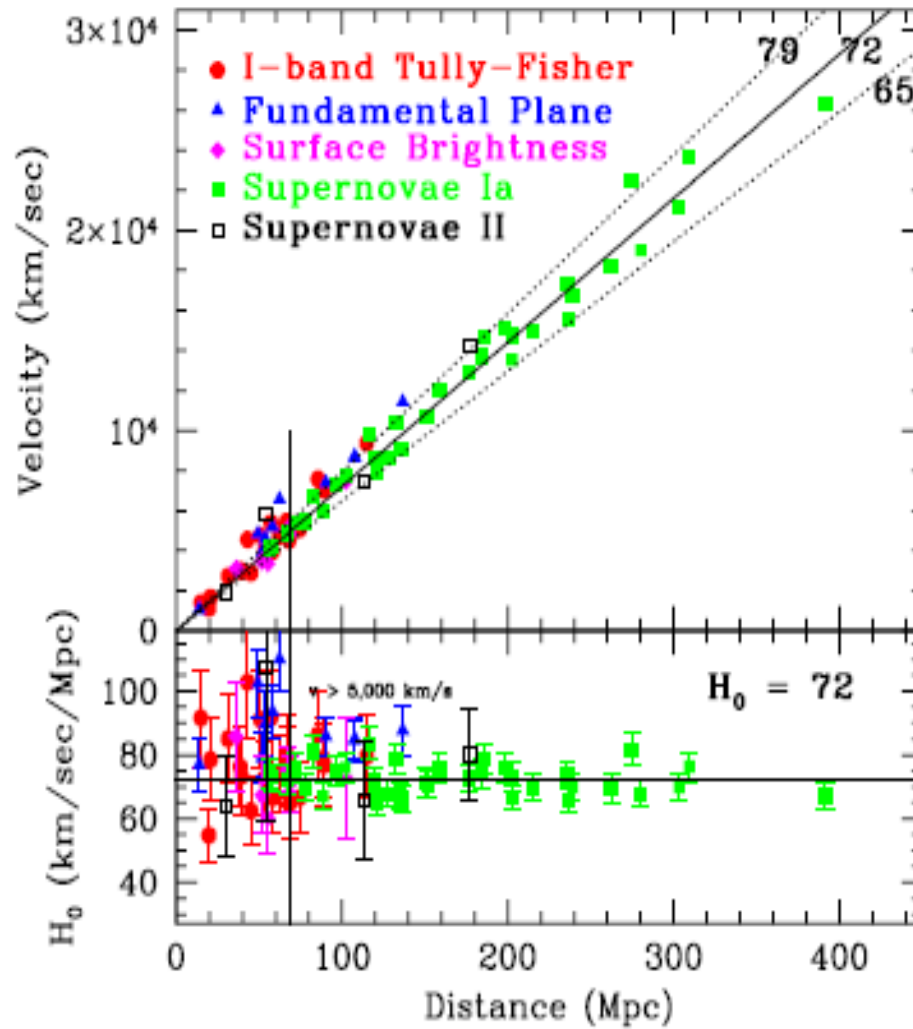
- Не се отнася за гравитационно свързани системи.
- Приложим е за космологични скорости по-големи от пекулярните.
- $d = 3000h^{-1} z$ Mpc
- $d_H(t) = 3t = 2/H(t)$ at MD, $d_H(t) = 2t = 1/H(t)$ at RD
- Хъбълова възраст на Вселената $1/H_0$
- $H(t)$
- Ако $\rho(t) \propto H(t)$ в момент t , то $\dot{\rho}(t)$, $\dot{H}(t)$ (т.е. една ...)
- Използува се за определяне на разстояния до далечни галактики по измерено z

$$H \equiv 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$\Rightarrow H^{-1} = 9.78 h^{-1} \text{ Gyr}$$

$$= 2998 h^{-1} \text{ Mpc} .$$

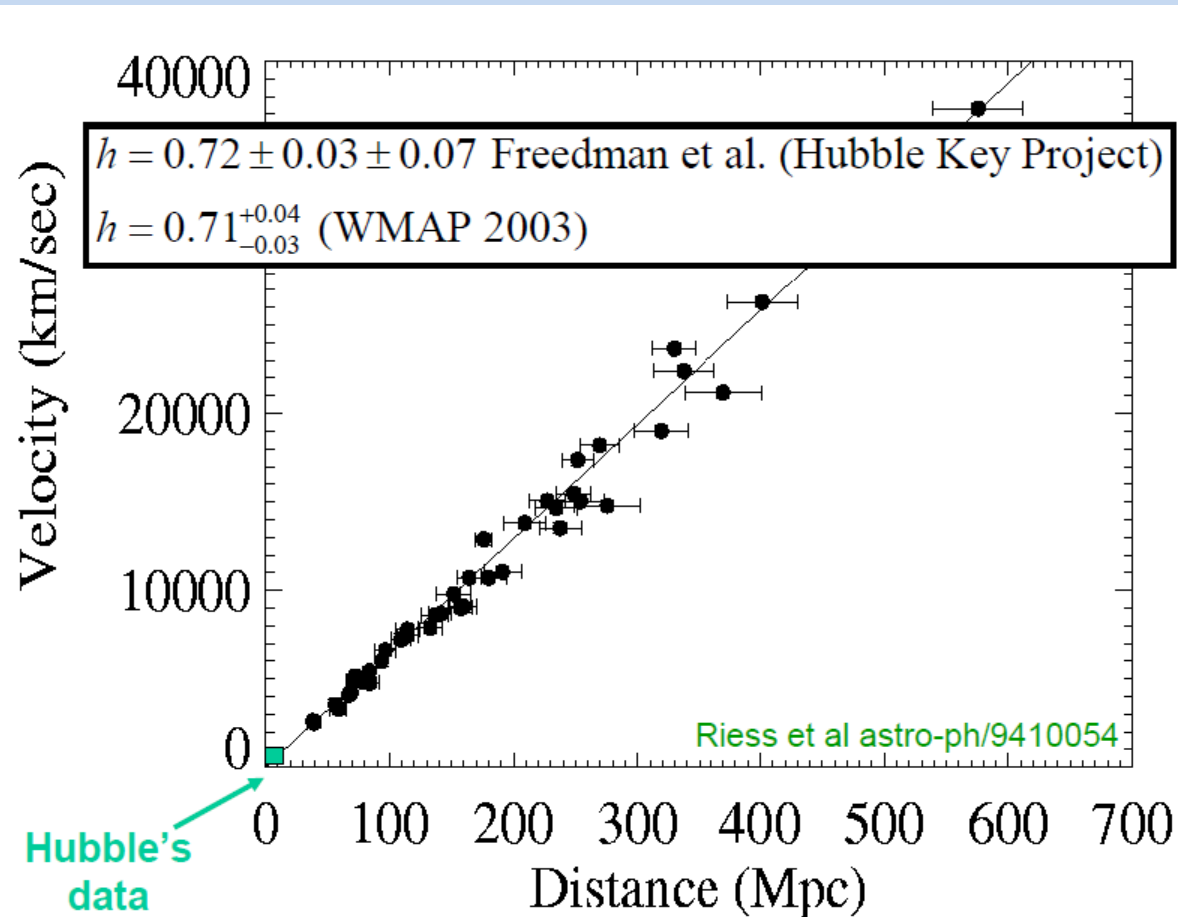
Съвременни диаграми на Хъбъл



Определяне на Хъббловата константа

Един от ключовите проекти на Космичния телескоп Хъбъл е определянето на разстояния до близки галактики и определянето на Хъббловата константа.

$$\begin{aligned}
 H_0 &= 72 \text{ km/sec/Mpc} \\
 &\approx (10^{10} \text{ years})^{-1} \\
 &\approx (10^{18} \text{ sec})^{-1} \\
 &\approx (10^{28} \text{ cm})^{-1} \quad (c = 1) \\
 &\approx 10^{-33} \text{ eV}
 \end{aligned}$$



WMAP5: $H = 72 \pm 3$. (km/sec)/Mpc

$$H_0 = 72 \pm 3 \text{ (statistical)} \pm 7 \text{ (systematic)} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

от наблюдения на ХКТ на 240 цефеиди: $H_0 = 74 \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

$$\text{WMAP + BAO + SN + ...} = 70.4 \pm 1.3 \text{ (km/sec)/Mpc}$$

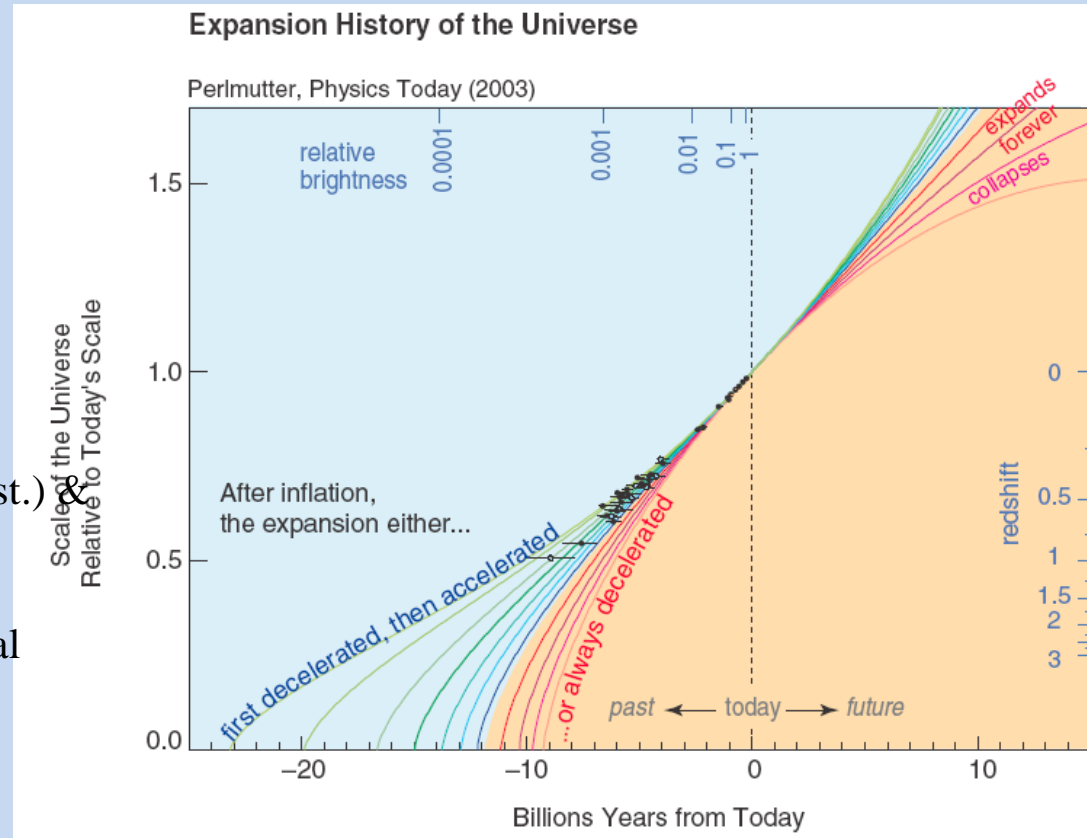
Ускорено Разширение

Чрез наблюдения на скоростта на галактиките при различни d астрономите установяват как се е разширявала Вселената в различните епохи

2 изследвания “SN cosmology project”
“ High z SN search team”
на Adam Riess (Space Telescope Science Inst.) &
Brian Schmidt (Mount Stromlo Observatory)

Saul Perlmutter (Lawrence Berkeley National Laboratory)

откриват ускорено разширение, т.е. наличие на тъмна енергия TE, с поведение на Λ .



Комбинираните данни от KTX и WMAP определят скоростта на разширение с точност 3%!

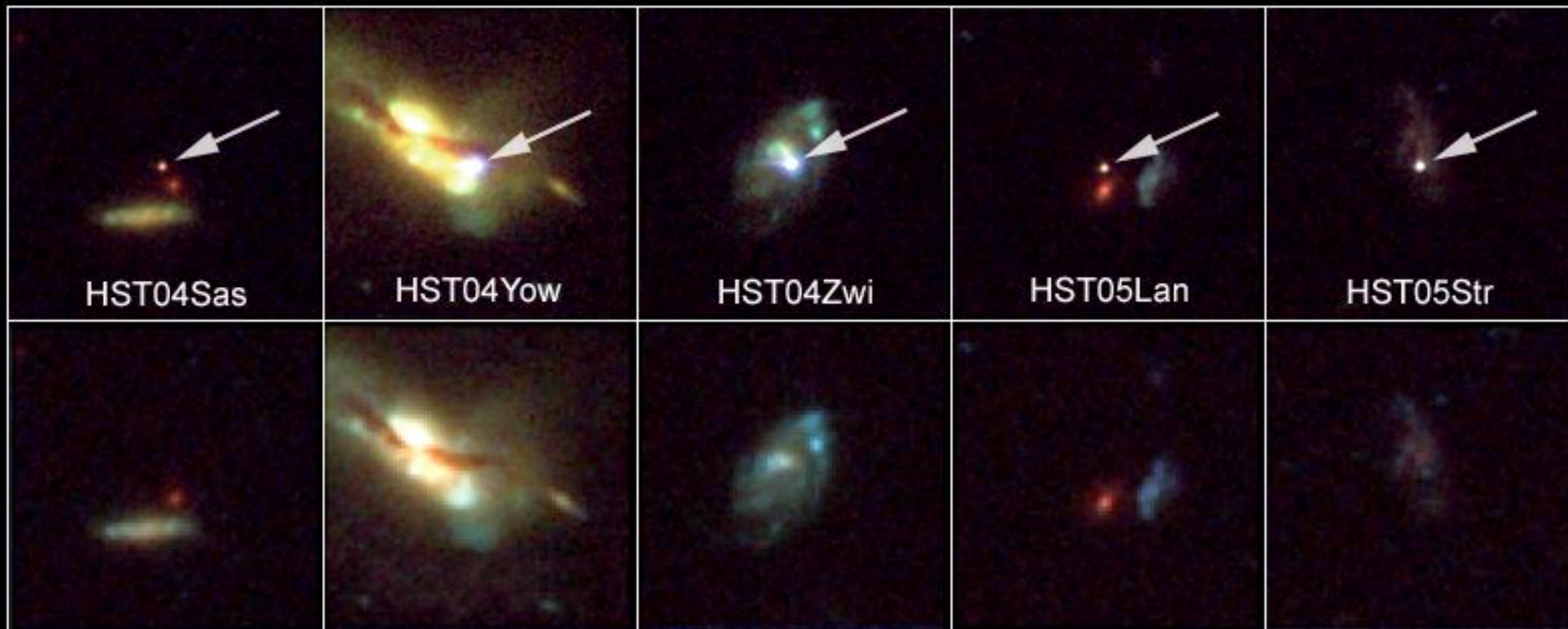
Сега разполагаме с данни от 300 SN Ia “Union sample”

HST, SN и TE

Hubble наблюденията за първи път указват, че тъмната енергия е присъствувала през голяма част от историята на Вселената

Host Galaxies of Distant Supernovae

HST • ACS/WFC

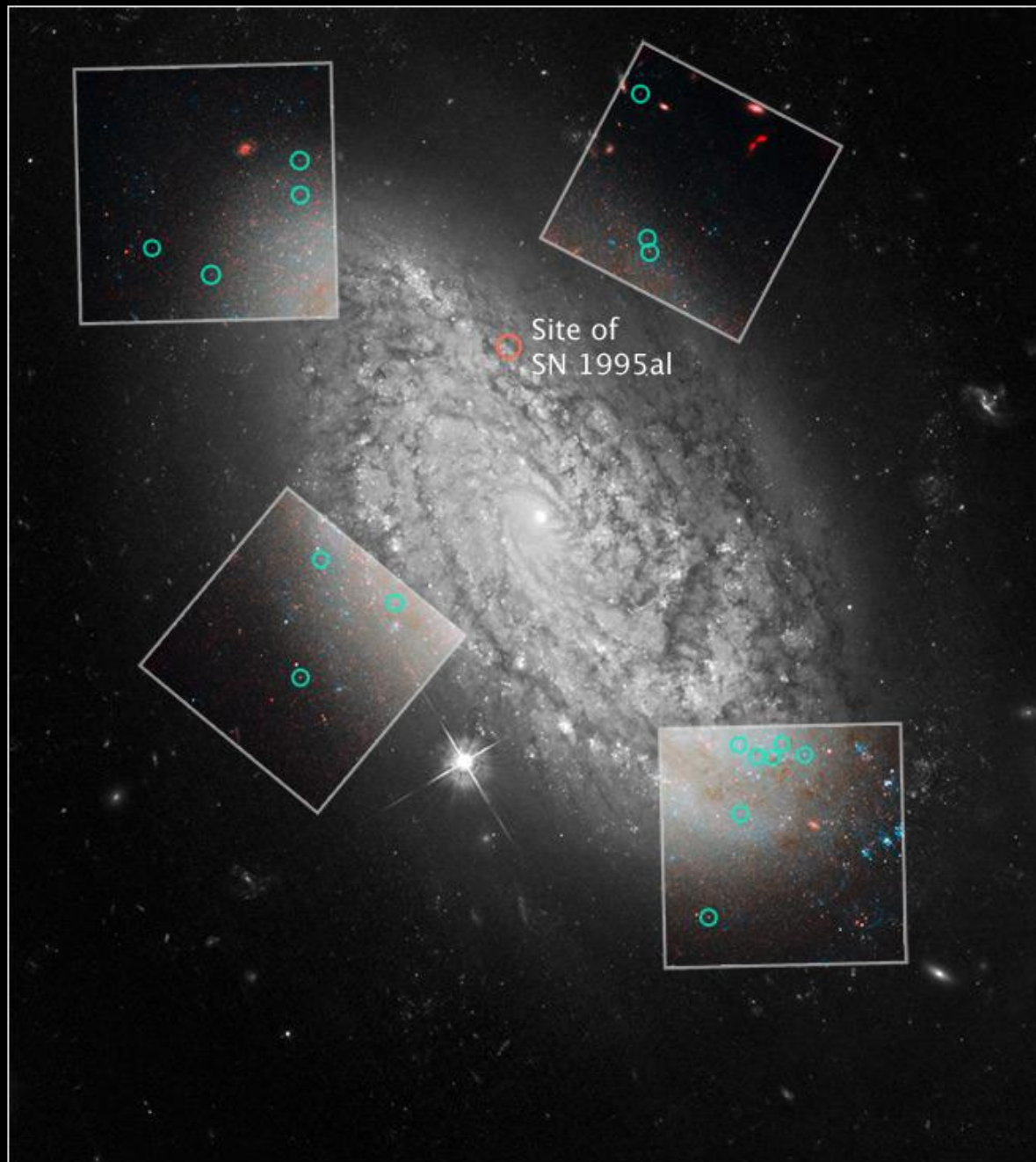


NASA, ESA, and A. Riess (STScI)

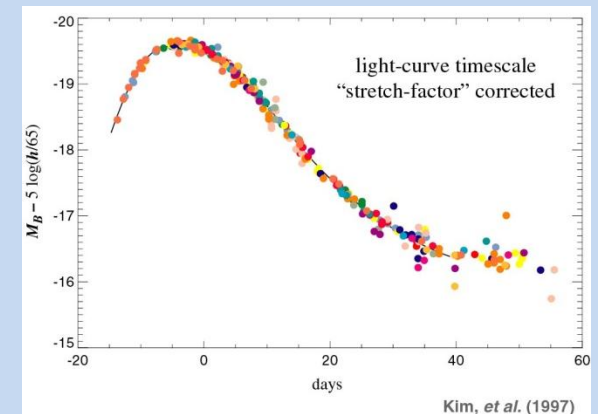
STScI-PRC06-52

Снимки от Hubble Space Telescope, показващи 5 свръхнови и техните галактики. Те са избухнали преди 3.5 и 10 милиарда години. Само Хъбъл телескопът може да ги измери защото поради тяхната отдалеченост са много слаби за изучаване от наземни телескопи.

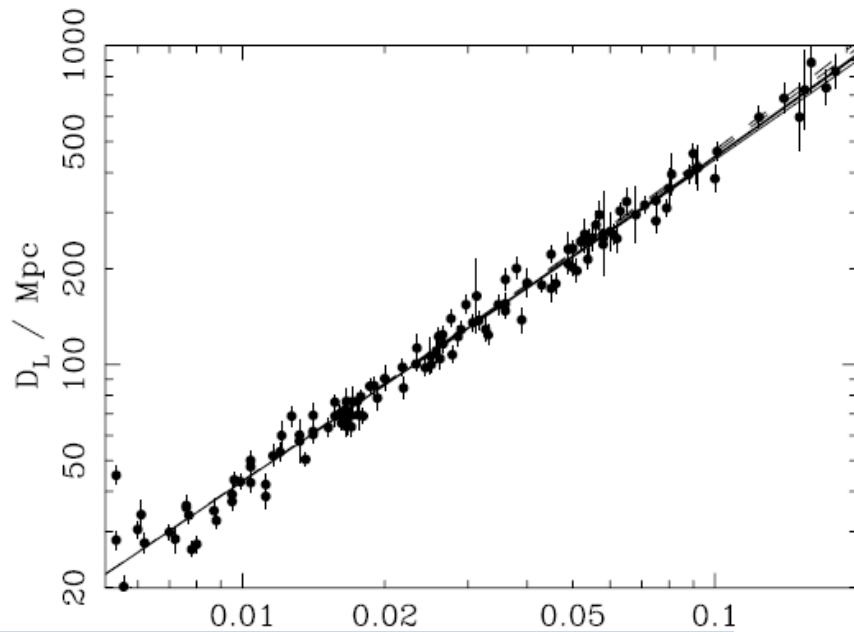
Изображение от космичния телескоп Hubble на галактиката NGC 3021.



Направени са прецизни измерения на цефеидите (в зелените кръгчета) в галактиката, по които са определени разстоянията, използвани за по-нататъшна калибровка на SN Ia 1995.



Изображенията в квадратчетата са получени с инфракрасната камера и Многообектния спектрометър Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer (NICMOS).



• Анализът на свръхновите при големи червени отмествания позволиха и първите сериозни тестове на геометрията на Вселената.

- SNIa позволяват измерване на разстоянията с 5% точност. Данните от тях + тези за Цефеидите от телескопа Хъбъл са определящи за съвременното значение на H_0 .

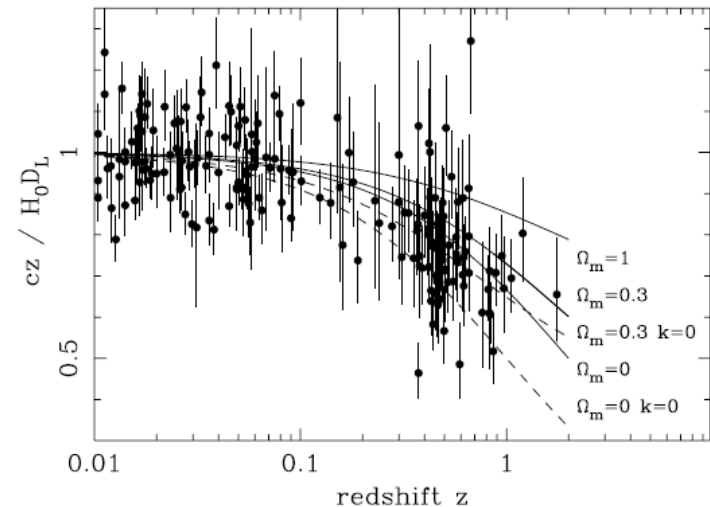
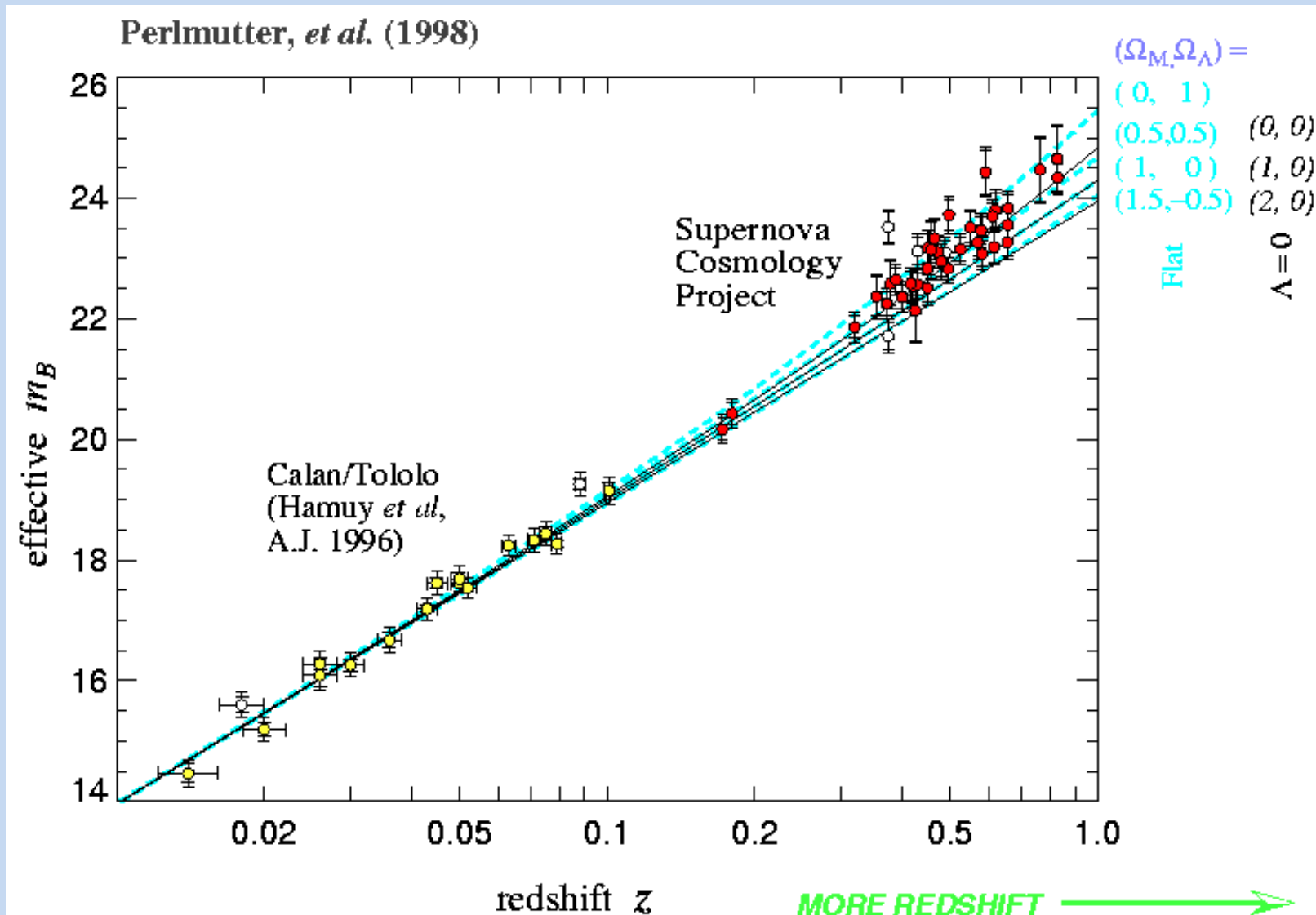
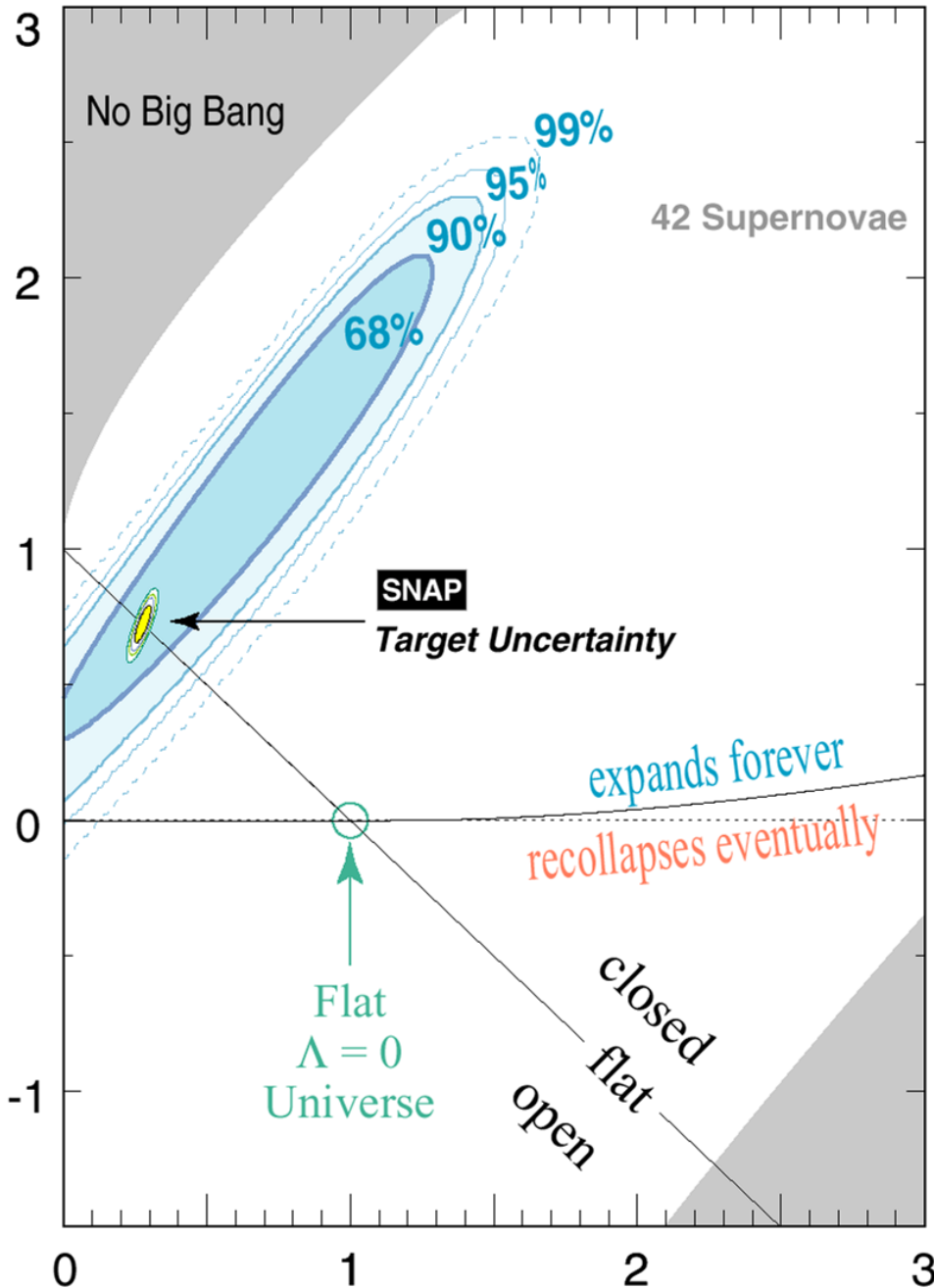


Figure 19.1: The type Ia supernova Hubble diagram [20–22]. The first panel shows that for $z \ll 1$ the large-scale Hubble flow is indeed linear and uniform; the second panel shows an expanded scale, with the linear trend divided out, and with the redshift range extended to show how the Hubble law becomes nonlinear. ($\Omega_r = 0$ is assumed.) Comparison with the prediction of Friedmann-Lemaître models appears to favor a vacuum-dominated Universe.

Хъбълова диаграма по SNIa

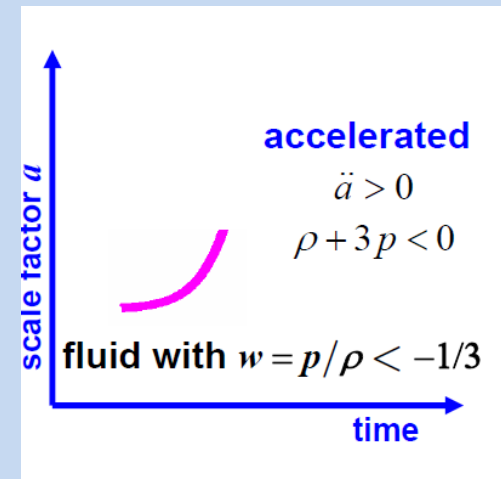


Преди около 5 милиарда години Вселената започва да ускорява разширението си - разширявайки се все по-бързо и по-бързо.



Обичайното вещество гравитира.
 Антигравитация изисква наличие на
 необичайна среда с $P < 0$ и

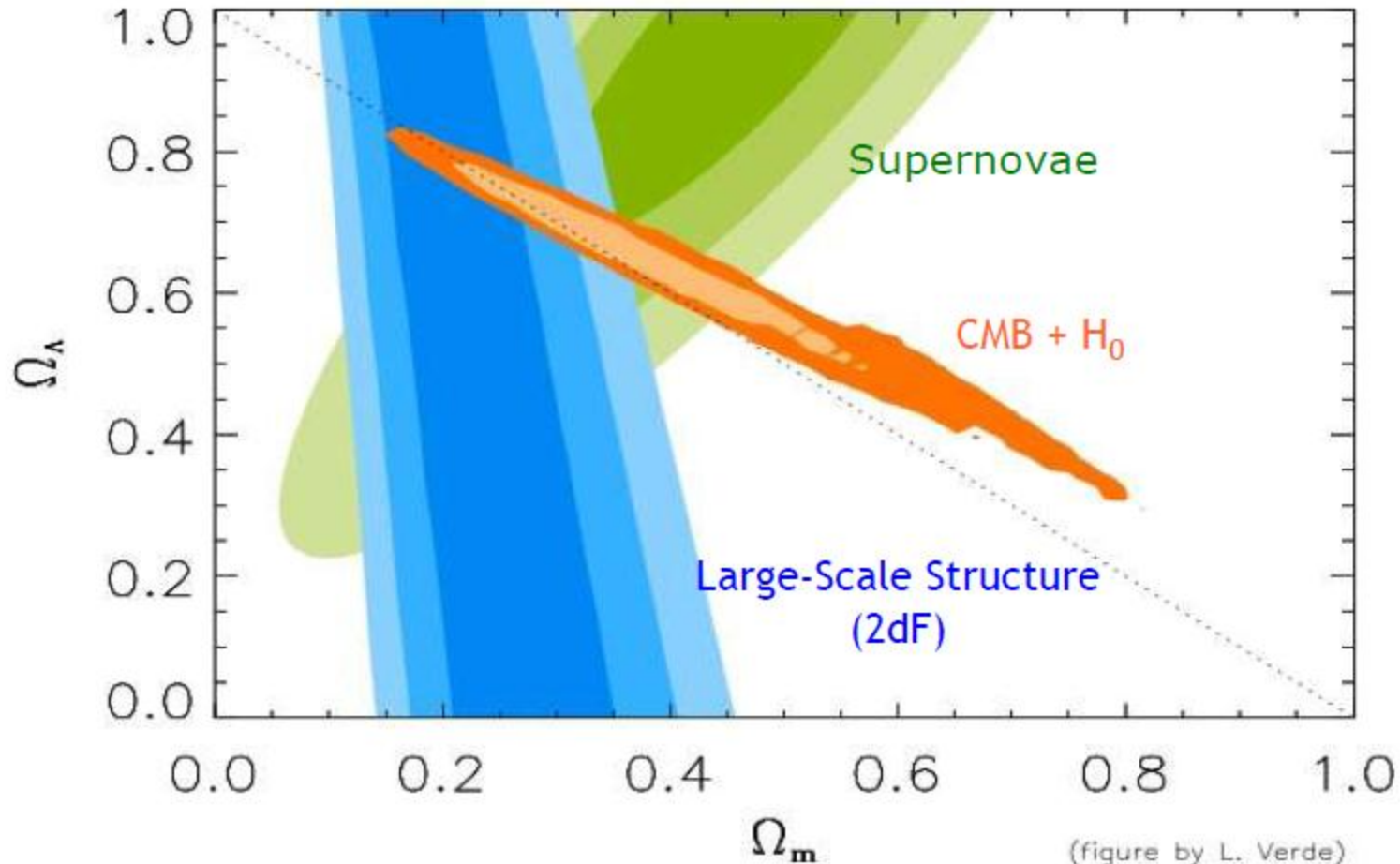
$p/\rho = \omega < -1/3$ разширение с
 ускорение



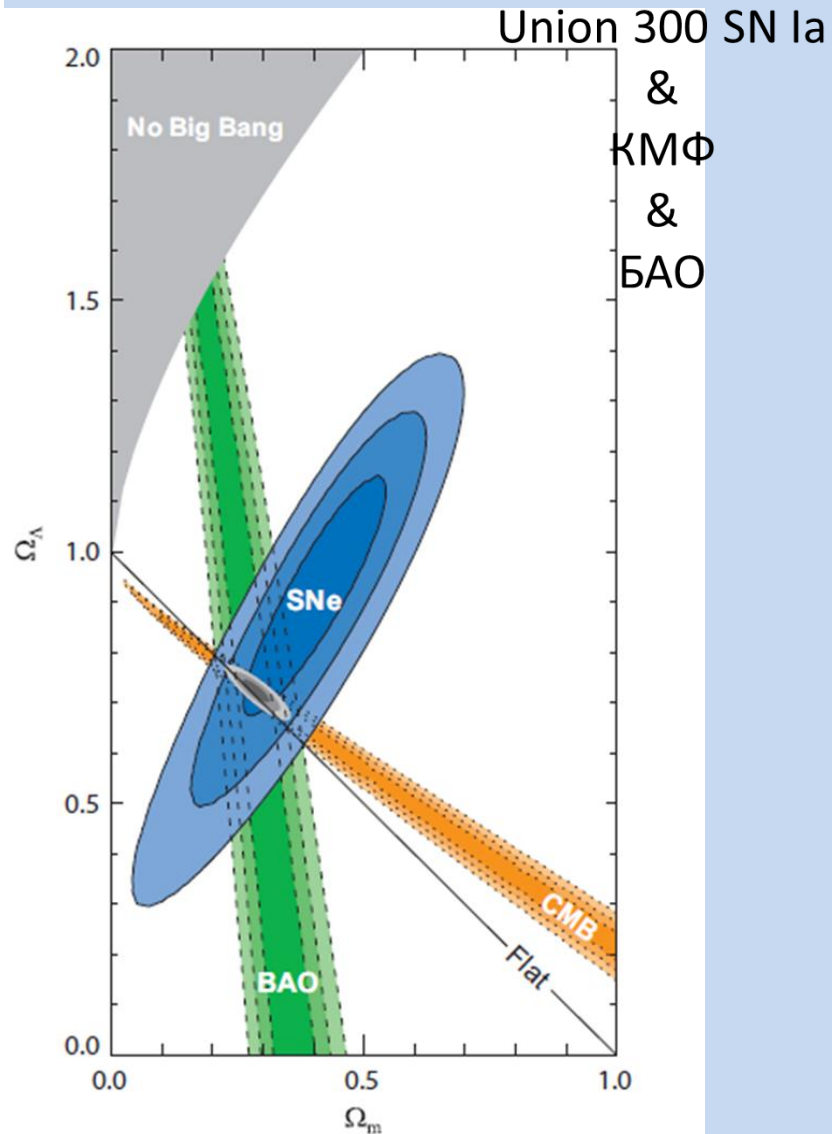
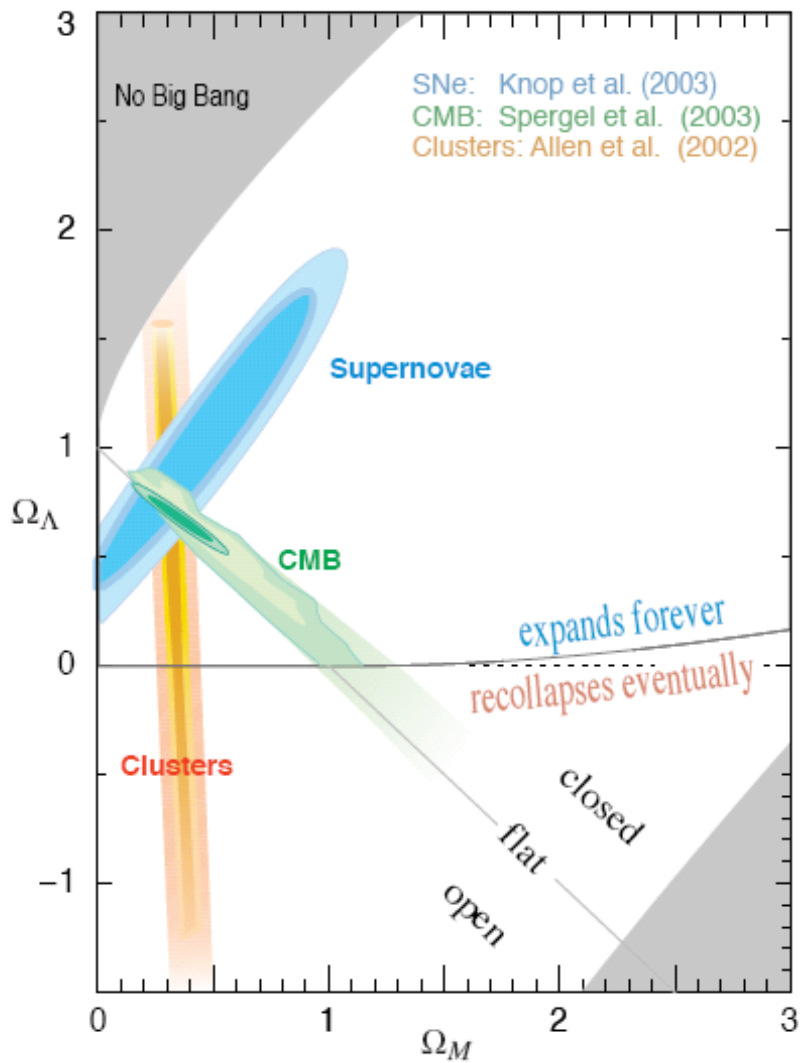
- космологична константа
- ненулева енергия на вакуума
- систематични ефекти
-

Съгласие на независими данни

$$\Omega_M \sim 0.3, \Omega_\Lambda \sim 0.7$$



Комбинираните резултати
от свръхнови (Hubble ST), КМФ (WMAP) и галактични купове
указват на съществуването на ТВ и ТЕ:



21.1: This shows the preferred region in the Ω_m - Ω_Λ plane from the combination of supernovae data in Ref. 18, and also the complementary results from the combination of Clusters of the Galaxy Cluster...

Възраст на Вселената

Хъбълова възраст на Вселената:

Приемайки постоянна скорост на разширение v , за разстоянието d м/у г-ки

$$d = v \cdot t \quad \longrightarrow \quad t = d/v = d/Hd \quad t = 1/H_0$$

За плоска Вселена състояща се от вещество, възрастта се определя от:

$$2/(3 H_0)$$

За Вселена с много ниска плътност:

$$1/H_0$$

За Вселена съдържаща ТЕ, възрастта може да е по-голяма.

В случай на обща плътност по-малка от 1:

$$H_0 t_0 \simeq \frac{2}{3} (0.7\Omega_m + 0.3 - 0.3\Omega_v)^{-0.3}$$

$$H_0 t_0 = \frac{2}{3\sqrt{\Omega_v}} \ln \frac{1 + \sqrt{\Omega_v}}{\sqrt{1 - \Omega_v}} \quad (\Omega_m < 1)$$

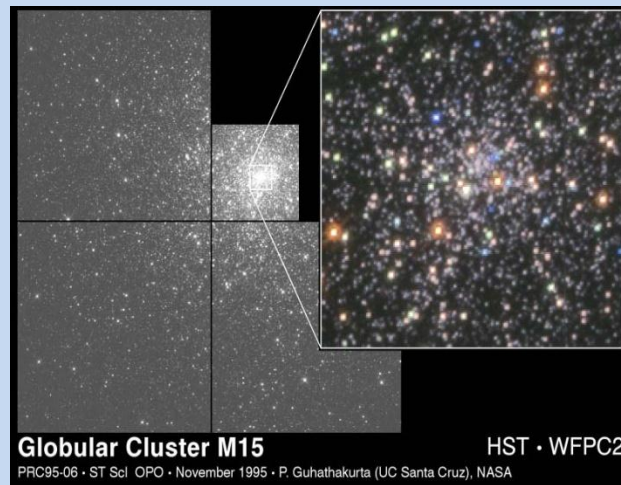
Възраст

КМФ флуктуациите, както и образуването на структурите зависят от плътността, състава и скоростта на разширение.

$$H_0 t_0 \simeq \frac{2}{3} (0.7\Omega_m + 0.3 - 0.3\Omega_v)^{-0.3}$$

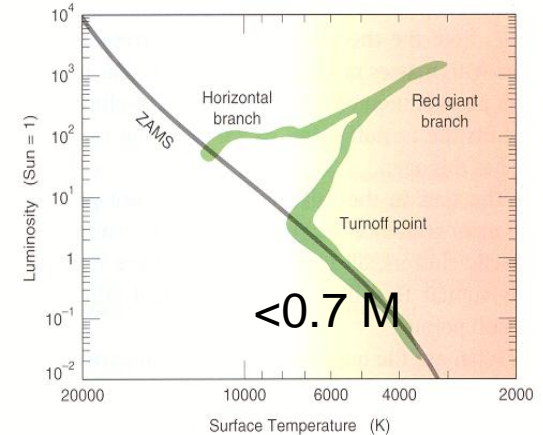
WMAP +CMB експериментите (ACBAR и CBI), определят възрастта на Вселената с точност 1%: 13.73 милиарда години (0.12 млрд. г.)

Рекорд отличен в рекордите на Гинес!



$L \propto M^4$

H-R diagram for globular clusters



Резултатът е в съгласие с възрастта определена от изследвания на структурите, в съгласие с възрастта на кълбовидните купове (11-13 млрд.г.).

Възраст на Вселената - 13.7 милиарда години

Какво знаем за Вселената

На малки мащаби Вселената се състои от различни структури: галактики, групи и купове от галактики. Куповете се групират в свръхкупове, свързани с филаменти и стени от галактики, между които има големи празнини ~ 50 Мрс. Свръхкуповете са най-големите структури във Вселената.

Мястото ни във Вселената **не е** уникално!

По наблюдения в X, UV, I, оптичния и радио диапазона на лъчение от близки и далечни галактики, квазари, купове и свръхкупове от галактики, както и на реликтовото микровълново лъчение е установена ЕИ на Вселената при мащаби > 200 Мрс.

Космологичен принцип: Вселената е еднородна и изотропна на големи мащаби. Всички пространствени точки и направления са равнозначни.

Еднородността и изотропията на Вселената позволяват да опишем геометрията и еволюцията на Вселената посредством 2 космологични параметра, k - отчитащ пространствената кривина и $R(t)$ – мащабен фактор описващ разширението на Вселената.

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

Уравненията на Фридман, следващи от уравненията на ОТО в случай на ЕИ, предсказват *нестационарност* на Вселената.

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p),$$

Плътноста на енергията определя геометрията.

Гравитира не само масата, но и налягането!

В зависимост от пълната плътност на Вселената съществуват три възможни случая геометрия на Вселената: затворена, отворена и плоска.

При $\Lambda=0$ геометрията и еволюцията на Вселената са свързани, при $\Lambda \neq 0$ не са.

Законите на разширение според Фридмановата космология са:

РД: $R(t) \propto t^{1/2}; \quad H = 1/2t$; ВД: $R(t) \propto t^{2/3}; \quad H = 2/3t$.

Ранния стадий на Вселената е бил по-плътен и по-горещ: $\rho \sim R^{-4}$ $T \sim 1/R(t)$
СКМ предсказва наличие на реликтово лъчение от ранния горещ стадий.

Комбинираните резултати от свръхнови (Hubble ST), КМФ (WMAP) и галактични купове указват на съществуването на тъмно вещество и тъмна енергия.

Наблюдателните данни указват на следния състав на Вселената: лъчение - 0.005%, неутрино - 0.1%- 0.02%, бариони – 4.6%, ТВ - 22%, ТЕ - 73%.

$$R(t) \propto e^{\sqrt{\Lambda/3}t}$$

$$V \sim cz = H d$$

Законът на Хъбъл, потвърден от множество съвременни наблюдателни данни указва на нарастване на скоростта на разбягване с разстоянието, т.е. на *разширение на Вселената*. Не се отнася за гравитационно свързани системи. Свързан е с разширение на пространството, не на обектите в него. Приложим е за космологични скорости по-големи от пекулярните. Законът съответствува на еднородно разширение.

Комбинираните данни от KTX и WMAP определят скоростта на разширение с точност 3%!

$$\text{WMAP +BAO+SN+ ...} H = 70.4 \pm 1.3 \text{ (km/sec)/Mpc}$$

SN I данни указват на ускорено разширение. Тя представлява 73% от пълната плътност. Антигравитацията изисква наличие на необичайна среда с $P < 0$. Наричаме я тъмна енергия.

Анализът на свръхновите при големи червени отмествания позволиха и първите сериозни тестове на геометрията на Вселената - указват на плоска Вселена.

Наблюдателни свидетелства за горещ стадий на доминиране на лъчението са наблюдаваните обилия на леките елементи и реликтовия микровълнов фон.

$$\text{На РД стадия } t \sim 1/gT^2 \quad H \sim g^{1/2} T^2 \quad \rho \sim gT^4 \quad S \sim gT^3 .$$

WMAP +CMB експериментите (ACBAR и CBI), определят възрастта на Вселената с точност 1%: 13.7 милиарда години.

Вселената е

еднородна и изотропна на големи мащаби

плоска, с пренебрежима кривина

разширява се с ускорение от 5 млрд години

доминирана от ТЕ с характеристики на Λ

Благодаря за вниманието!

