

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of yellow and orange filaments and nodes against a dark blue background. The filaments represent the large-scale structure of the universe, with nodes indicating regions of high density and galaxy clusters.

# Тъмната страна на Вселената

L. Litov



# План



- Пространство, време и материя
- Материя
  - ✓ Стандартен модел
  - ✓ Тъмна материя
- Пространство – време
- Единство на пространство-време и материя
- Търсене на тъмна материя на LHC
- Заключение



# Пространство, време и материя



## ➤ Основни хипотези

- ✓ Пространството, времето и материята са се родили едновременно
- ✓ Невидимата за нас част от Вселената има същите свойства, като наблюдаемата
- ✓ Модел на „Големия взрив“

## ➤ Въпроси

- ✓ От какво е съставена материята?
- ✓ Какви са свойствата на пространство – времето?
- ✓ Как се е развивала Вселената?
- ✓ Защо е такава?

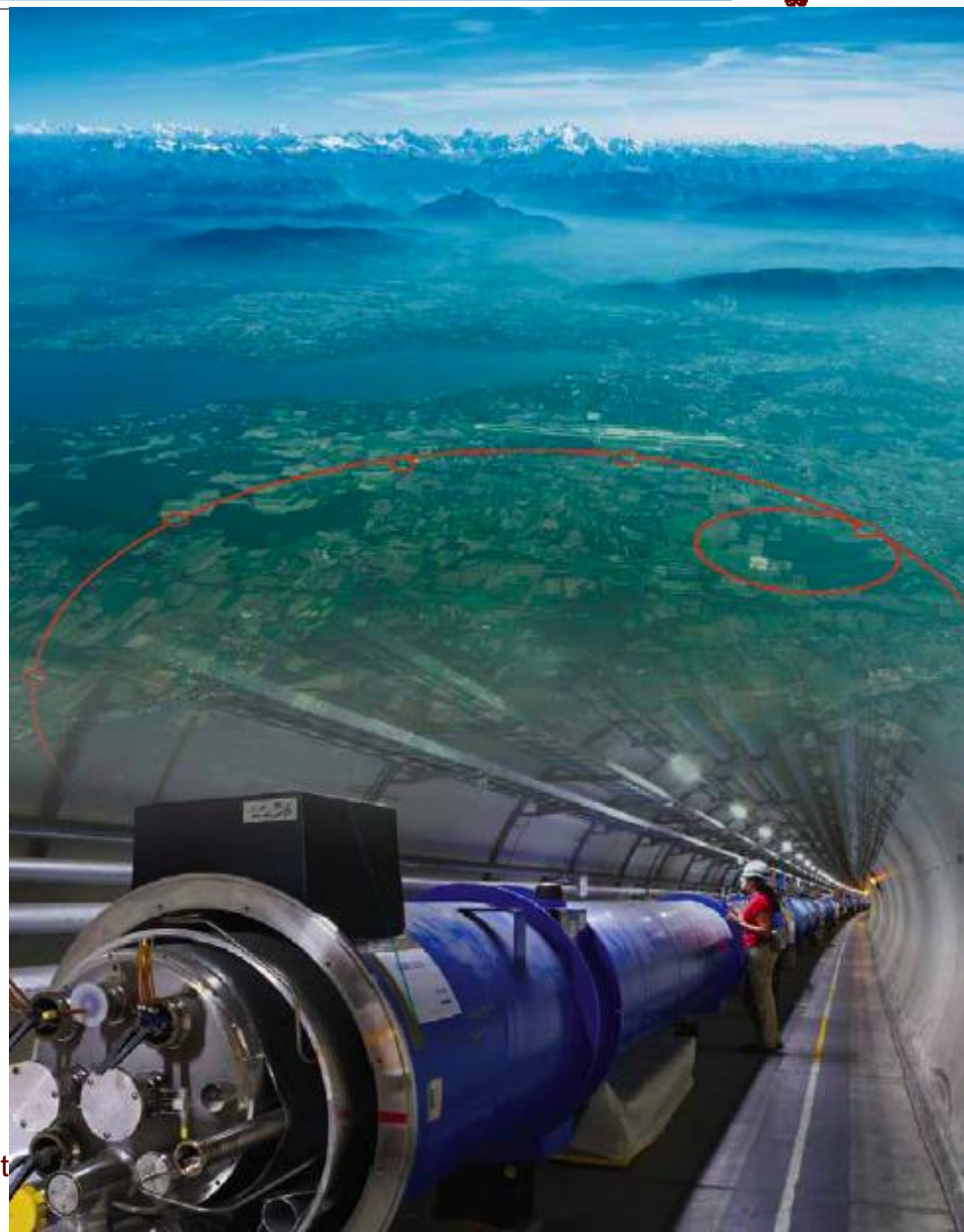


# Материя

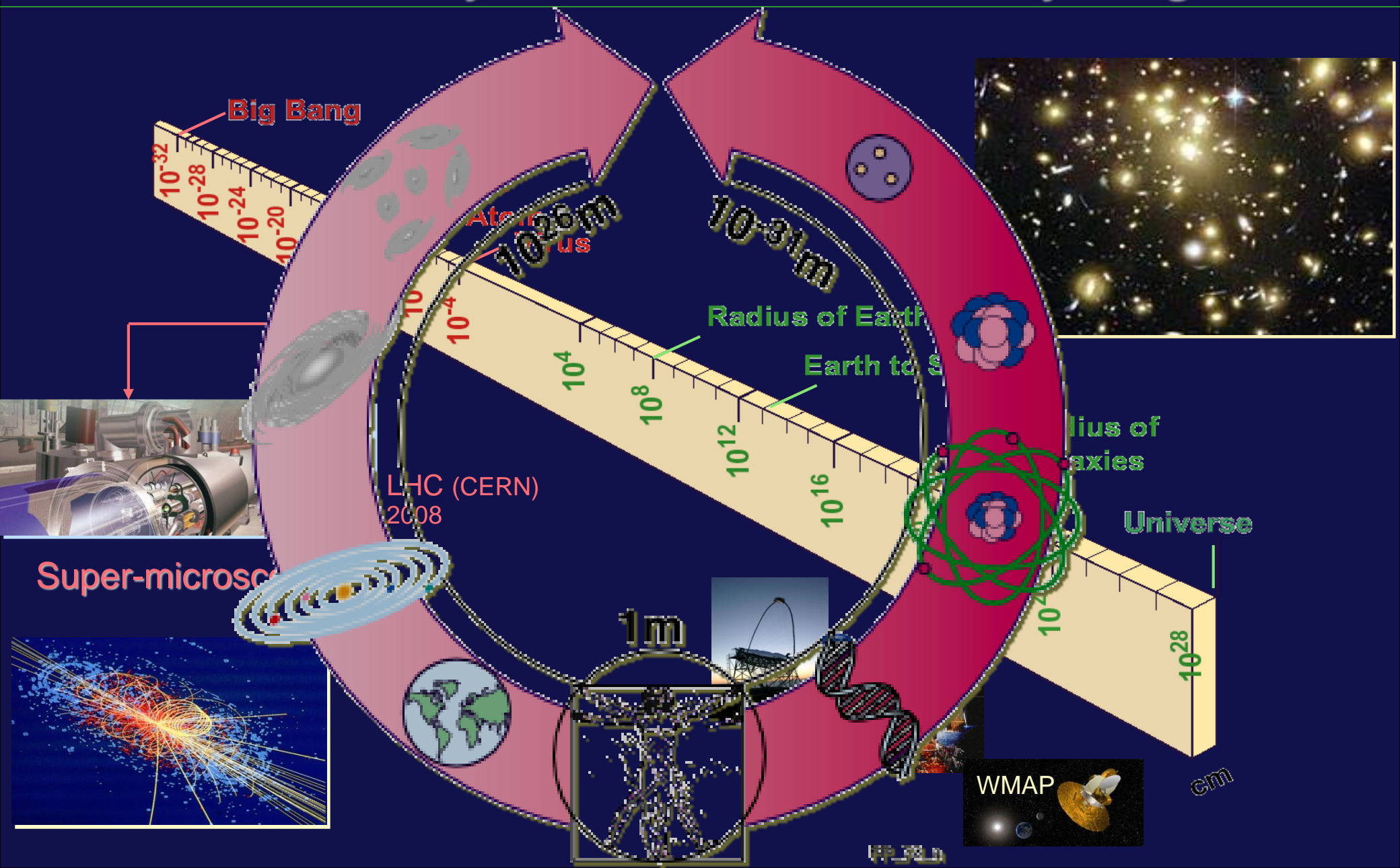
Трябва да отговорим на два  
фундаментални въпроса

-Кои са елементарните  
съставлящи на материята?

-Кои са фундаменталните  
сили контролиращи  
тяхното поведение ?



# From the infinitely small to the infinitely large



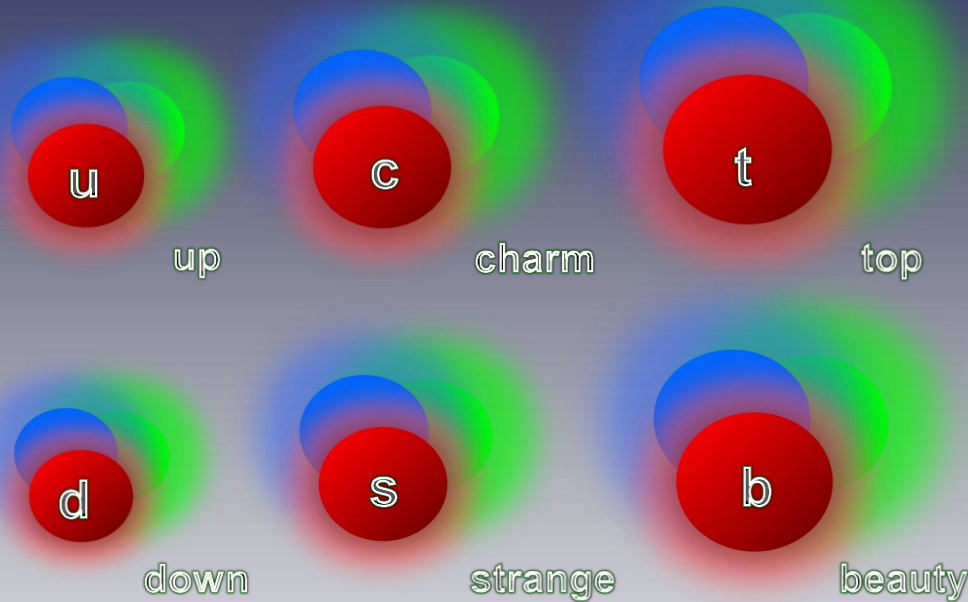


# Стандартен модел



1-st generation      2-nd generation      3-rd generation

quarks

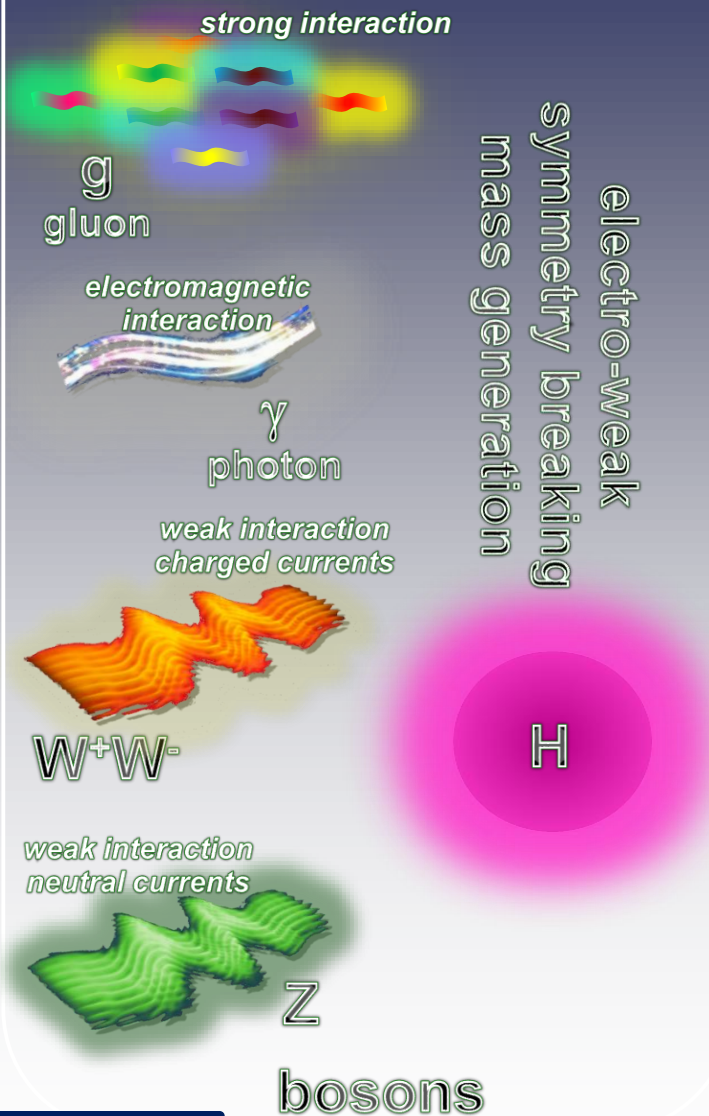


leptons



fermions

force carriers



bosons

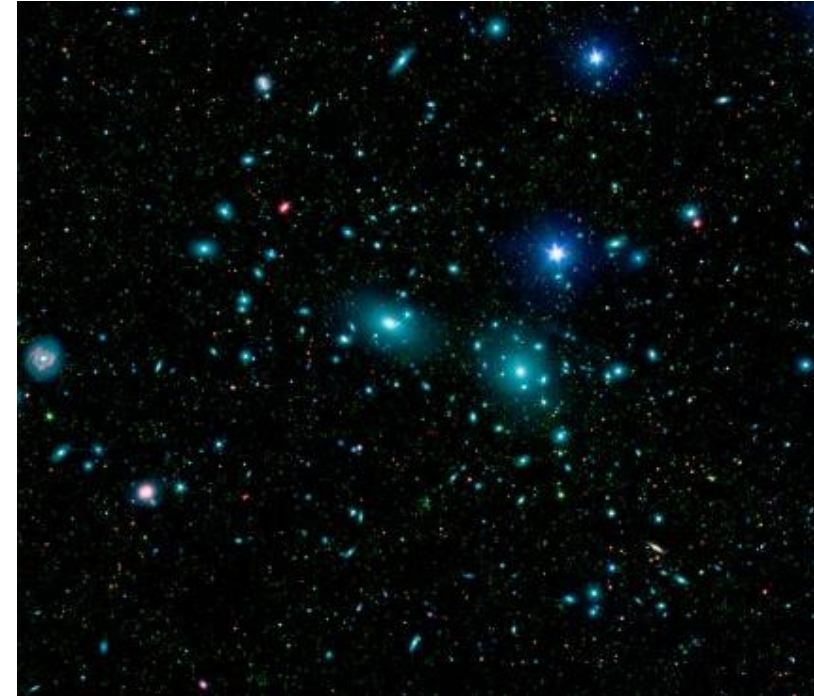




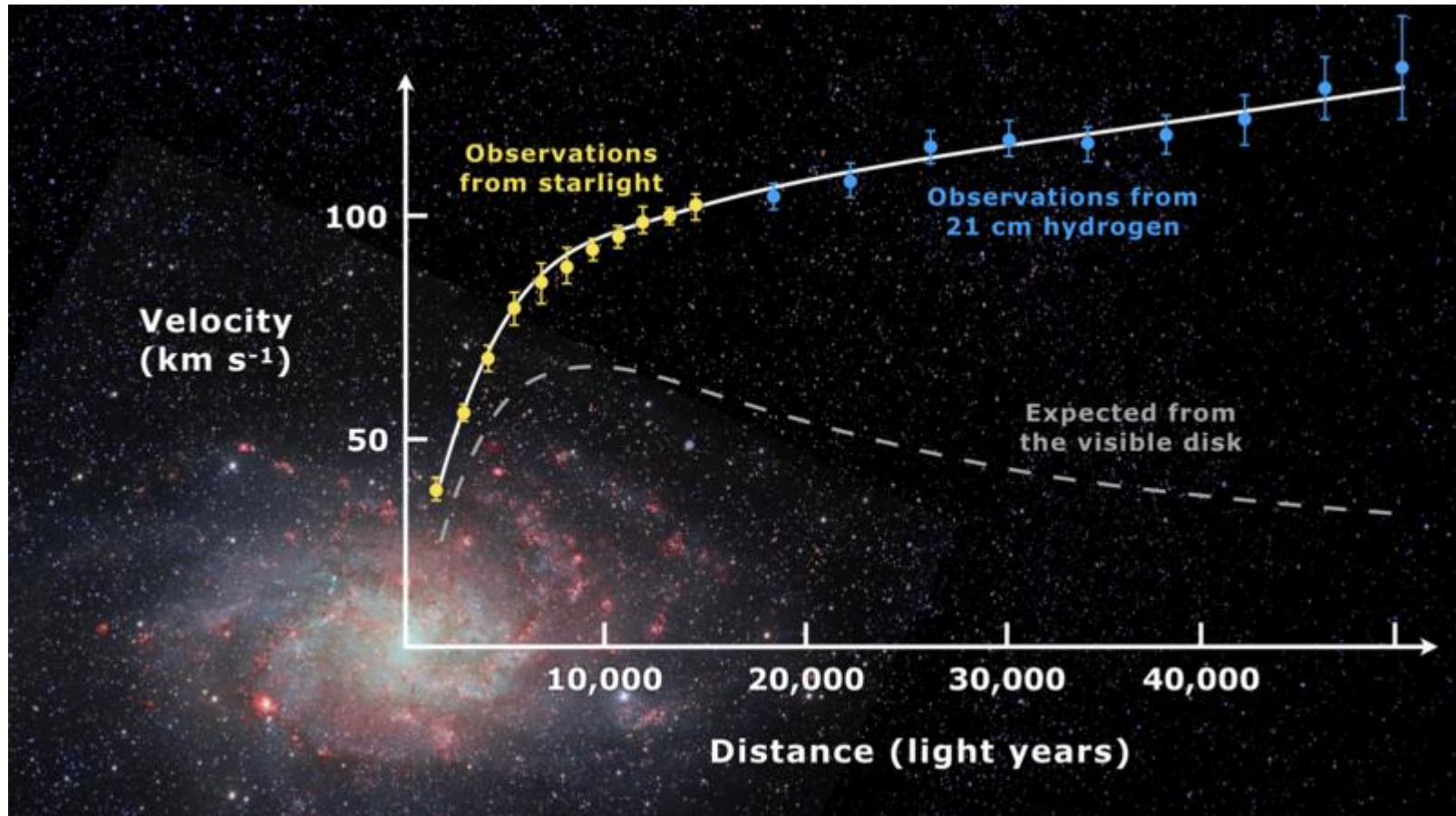


# Тъмна материя

- Лорд Келвин – 1884
  - ✓ Дисперсия на скоростите на звездите
- Анри Поанкаре – 1906
  - ✓ "dark mater", or "matière obscure,,
- Фриц Цвики – 1933
  - ✓ Изследва движението на галактиите в клъстера Coma
- Вера Рубин, Кент Форд – 1980
  - ✓ оптични криви на въртене

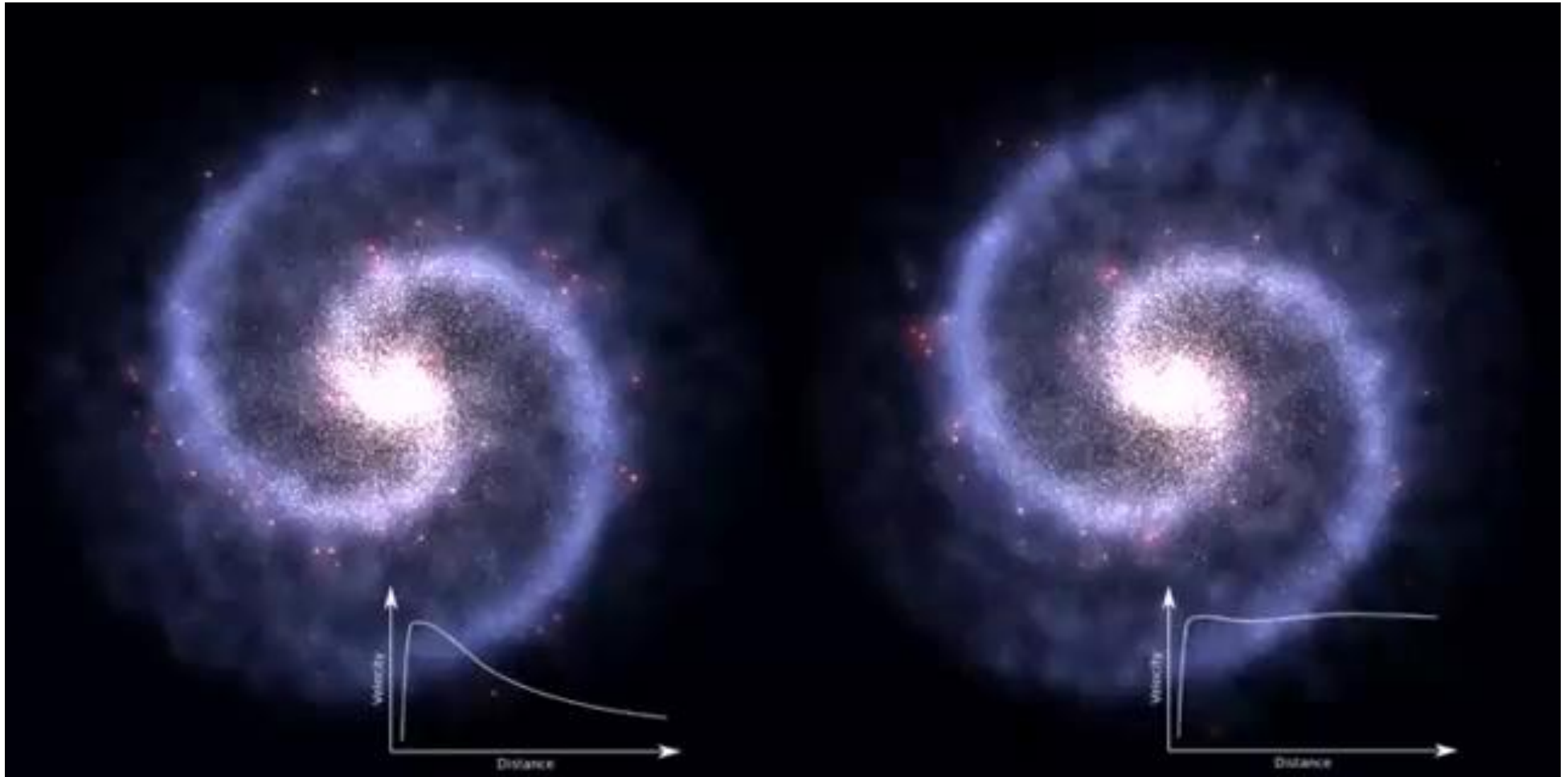


**Coma clyster**



[arXiv:astro-ph/9909252](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9909252)

Спирална галактика Messier 33



**Галактика без и с тъмна материя**

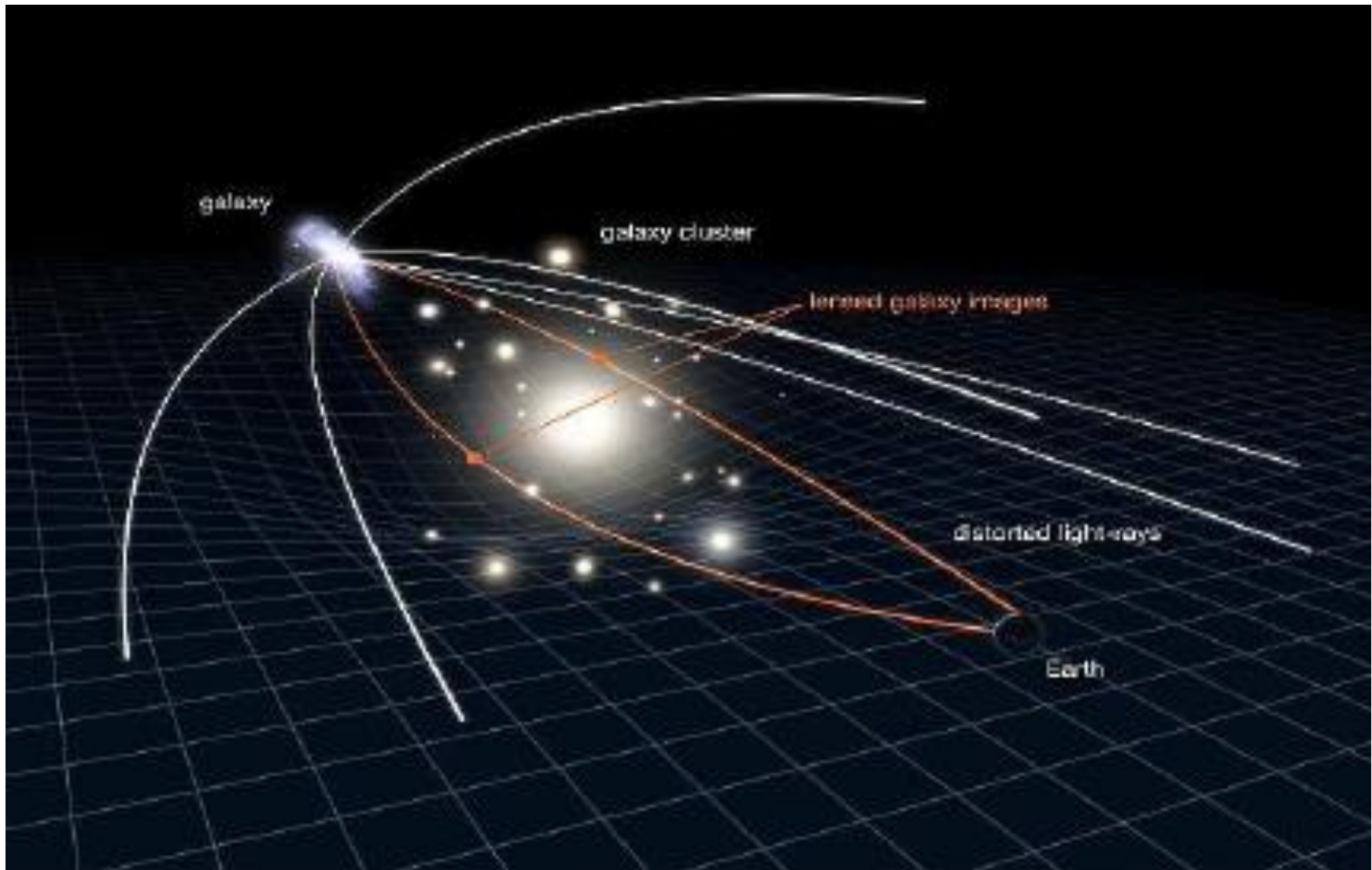


**Близки и отдалечени галактики**

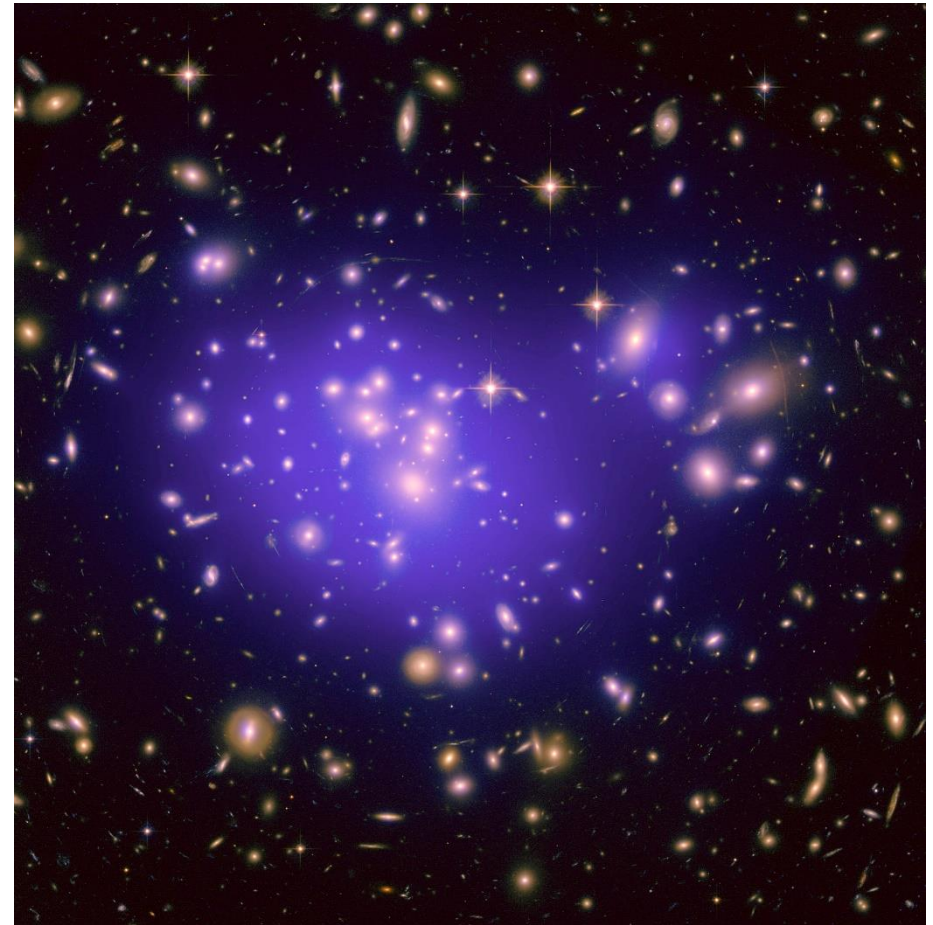
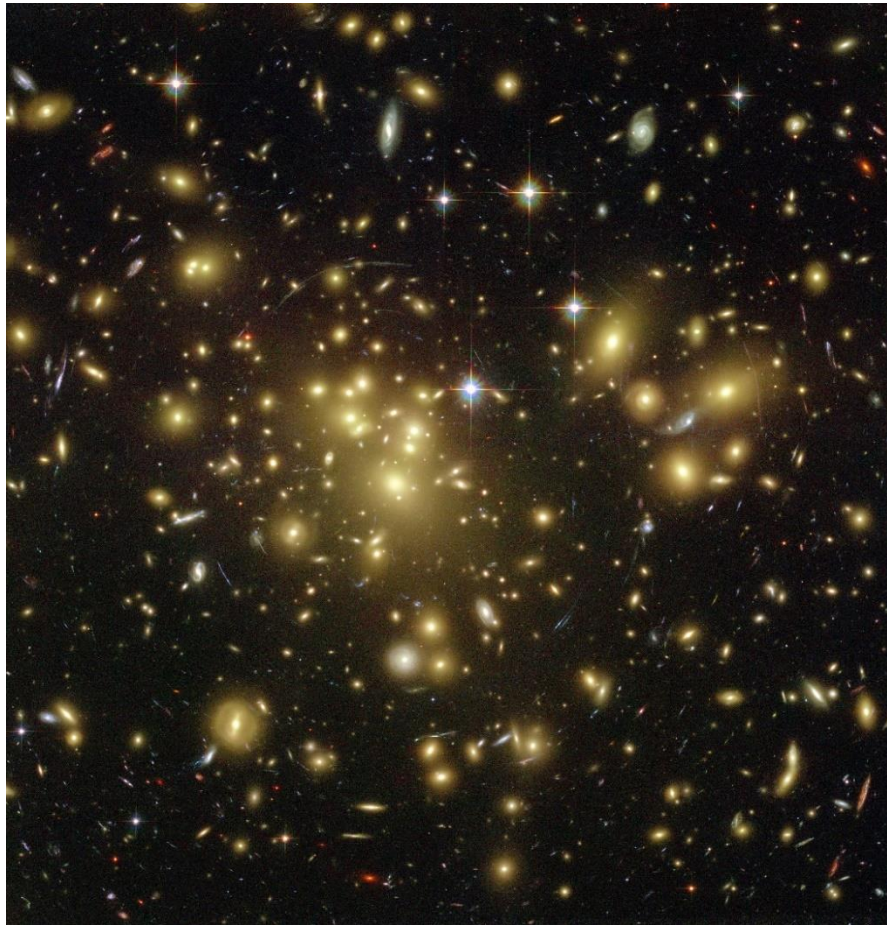
- Измерва се дисперсията на радиалните скорости (звезди, галактики)
- Използва се теорема на вириала

$$\langle T \rangle_{\tau} = -\frac{1}{2} \langle V_{\text{TOT}} \rangle_{\tau}.$$

- Измерва се доплерово уширение на линиите
- Дава долна граница за масата на галактиката или клъстера
- Потвърждава съществуването на тъмна материя



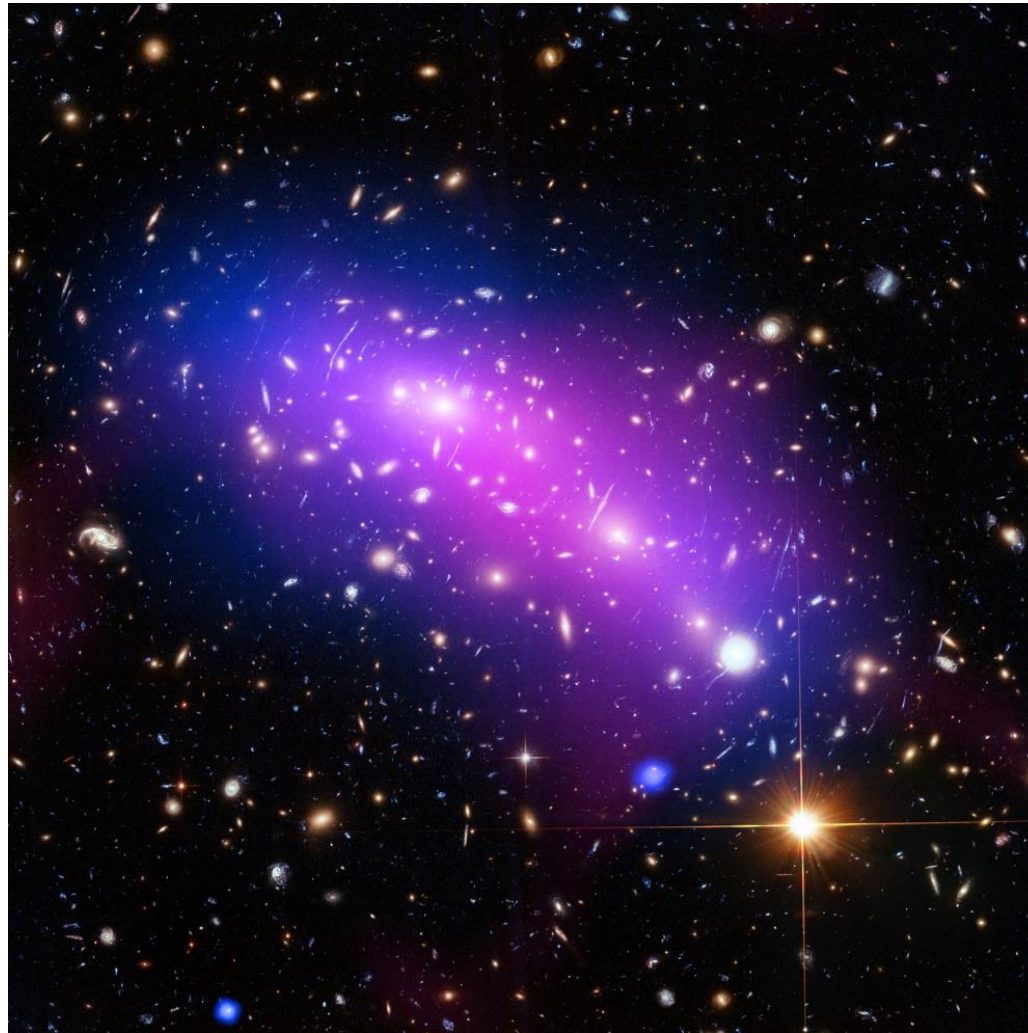




Hubble space telescope

[Abell 1689.](#)

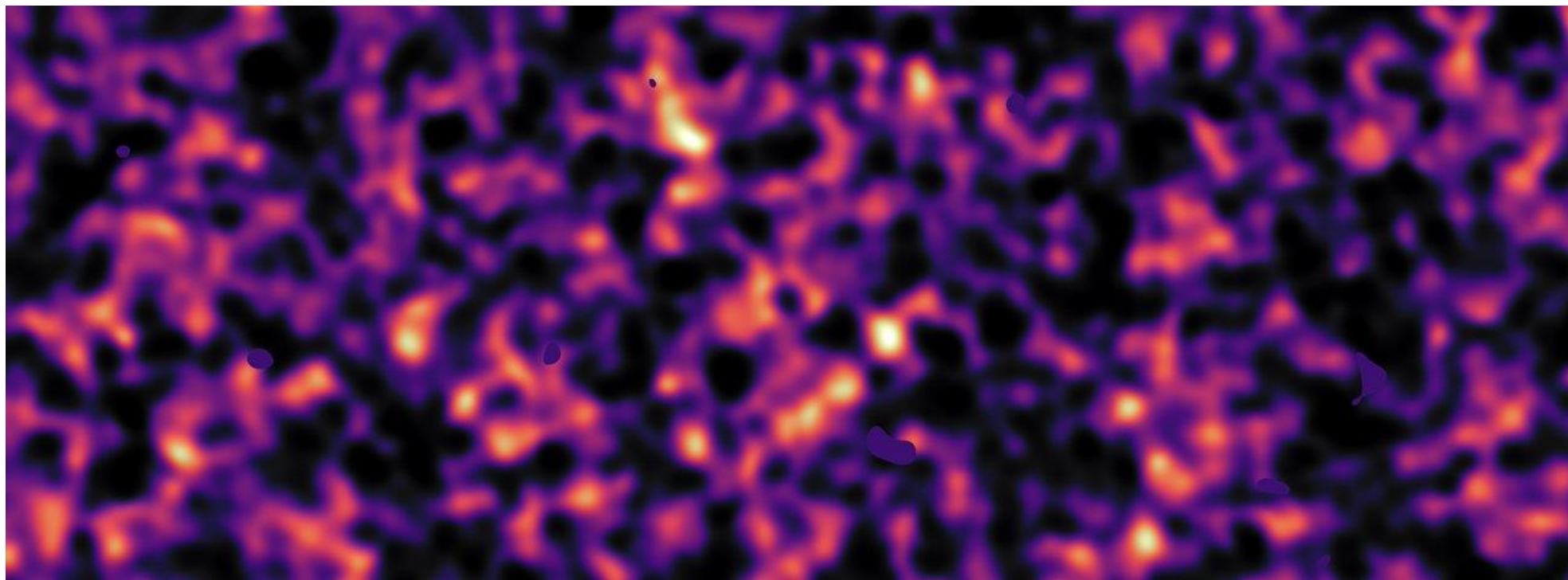
<http://www.spacetelescope.org/images/heic1014a/>



[arXiv:1702.04348](https://arxiv.org/abs/1702.04348)

MACS J416.1-2403

The dark side of the Universe



**KiDS** изследване

MNRAS 000, 1–49 (2016)

3 милиона галактики

до 6 милиарда светлинни години

Площ 420 x пълна луна (1% от небесната сфера)

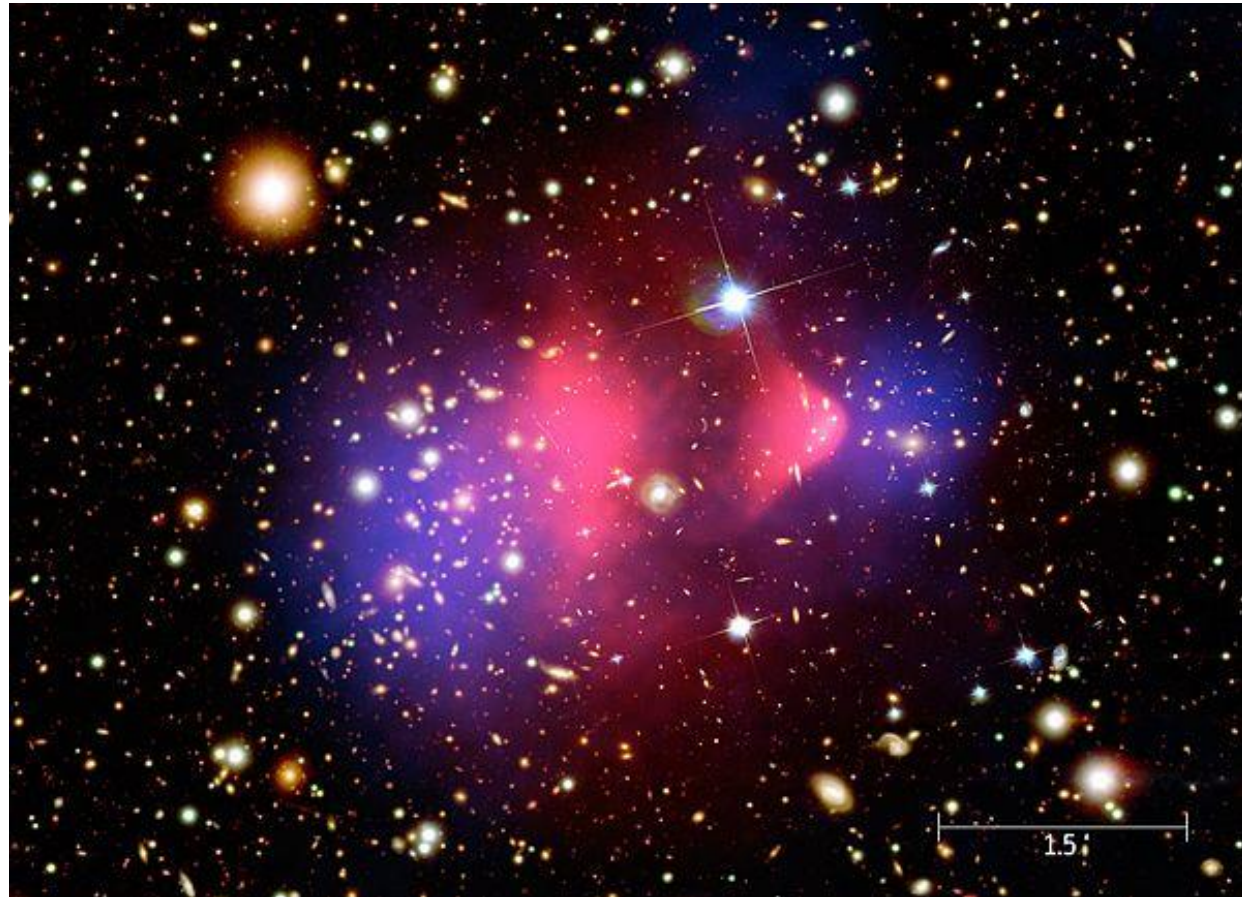
- Приемаме, че Вселената е хомогенна
- Малки нееднородности, около които се формират звезди, галактики и т.н.
- Ера доминирана от радиация (фотони, неутрино)
  - ✓ Взаимодействат с барионната материя (протони, неутрони, електрони)
  - ✓ Заличават тези нееднородности
- Тъмната материя не взаимодейства с радиацията
- Запазва структурата на нееднородностите
- Барионната материя следва тъмната (потенциал на привличане)



<http://spacetelescope.org/images/heic0701b/>

**3d карта на тъмната материя-  
9 x Луни ,  $z = 0 - 1$**

- **Вулет** клъстер
- Два галактични купа
- Звезди
  - ✓ слабо гравитационно забавяне
- Газ
  - ✓ Електромагнитно взаимодействие, силно забавяне
- **Тъмна материя**
  - Само гравитационно взаимодействие



## □ Видима материя

### ➤ Барионна материя

- ✓ Протони, неутрони
- ✓ Леки елементи
- ✓ електрони

### ➤ Радиация

- ✓ Фотони
- ✓ неутрино

### ➤ Описва се от Стандартния модел

- ✓ Кварки, лептони, преносители на взаимодействия

## □ Тъмна материя

- Съставлява **84,25 %** от материята



# Пространство-време

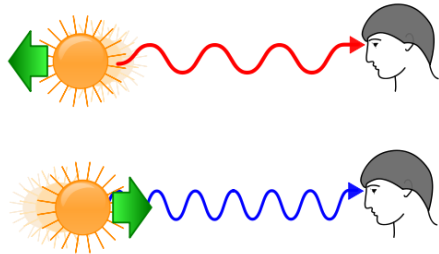


## □ Пространство времето е

- Четиримерно - едно времево и три пространствени измерения
- Еднородно
- Изотропно

## □ Следствия

- Всеки физически обект в него се характеризира с **маса и спин**
- Закон за запазване на енергията
- Закон за запазване на импулса
- Закон за запазване на ъгловия момент



## Ефект на Доплер

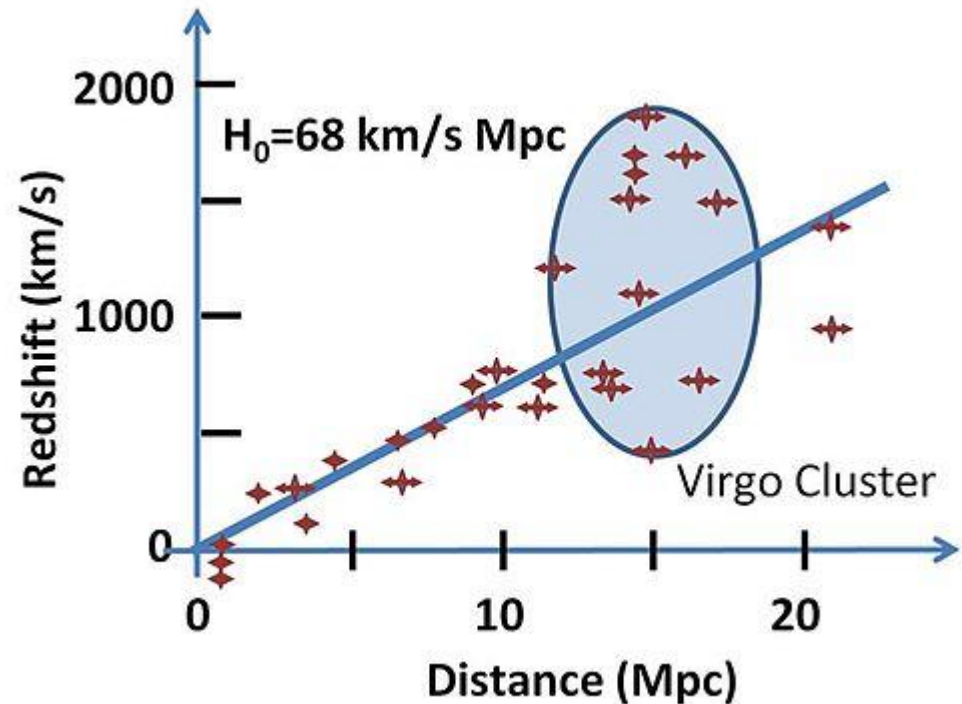
Отдалечаващ се обект – червено

Приближаващ се обект – синьо

Измервайки отместването - скорост

## Закон на Hubble

Линейна зависимост между разстоянието до галактиката и червеното отместване



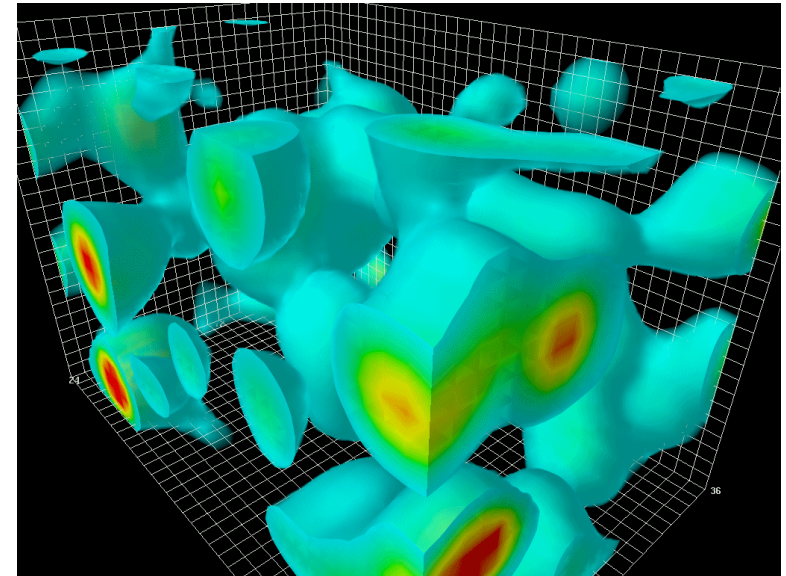
**Вселената се разширява!**

- Как се определя разстоянието между два обекта
- Решение на уравненията на Айнщайн
- Метрика на Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW)

$$ds^2 = a(t)^2 ds_3^2 - c^2 dt^2$$

- $ds_3^2$  зависи от кривината  $k$
- $a(t)$  – скалиращ фактор
- $d(t) = a(t) d(t_0)$
- Разстоянието между два неподвижни един спрямо друг обекта се променя с времето

- Въведена от Айнщайн
- Генерира тъмната енергия
- Вакуумна енергия – плътност на енергията на вакуума
  - ✓ От  $E = mc^2$  - маса, която може да генерира гравитационно взаимодействие
  - ✓ Генерира отрицателно налягане равно на плътността на енергията
- Обяснение
  - ✓ КТП – квантови флуктуации на вакуума





# Пространство-време и материя

- Космологична константа –  $\Lambda$
- обикновена материя (барионна + радиация)
- Тъмна материя

$a(t)$  – може да се измери

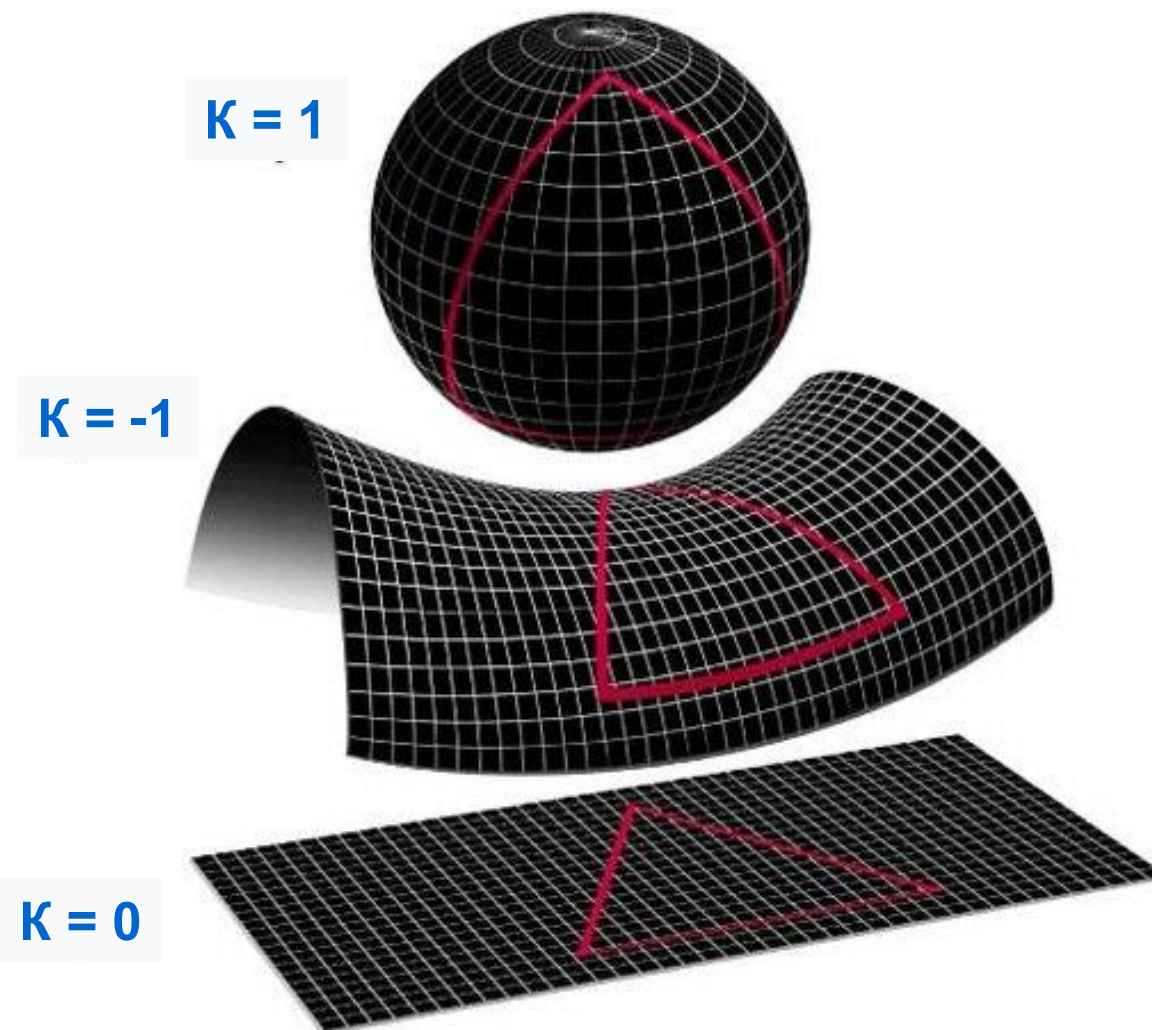
$$\frac{1}{a(t_{\text{em}})} = 1 + z.$$

Изменението на  $a(t)$

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \text{ параметър на Hubble}$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3},$$

$\rho$  – плътност на материята (материя + радиация)



Въвежда се критична плътност –  $k=0$ ,  $\Lambda = 0$

$$\rho_{\text{crit}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.878\,47(23) \times 10^{-26} \text{ h}^2 \text{ kg m}^{-3},$$

Редуцирана константа на Hubble

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$$

дефинираме

$$\Omega_x \equiv \frac{\rho_x(t = t_0)}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{8\pi G \rho_x(t = t_0)}{3H_0^2}$$

$x$  - бозонна материя, тъмна материя, радиация (фотони, рел. неутрино), тъмна енергия (космологична константа)

$$H(a) = H_0 \sqrt{\Omega_m a^{-3} + \Omega_{\text{rad}} a^{-4} + \Omega_\Lambda}$$



Днес

$$\Omega_{\text{rad}} \sim 10^{-4}$$

Получаваме

$$a(t) = (\Omega_m / \Omega_\Lambda)^{1/3} \sinh^{2/3}(t/t_\Lambda)$$

където

$$t_\Lambda \equiv 2 / (3H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda}) ;$$

- Граница между забавящо се и ускоряващо се разширение

$$a = (\Omega_m / 2\Omega_\Lambda)^{1/3}$$

- Режим на разширение на Вселената зависи
  - ✓ Плътноста на материята
  - ✓ Стойността на космологичната константа

## □ Етапи

### ➤ Ера доминирана от радиацията

- ✓ Фотони и релативистки неутрина
- ✓ От инфлацията до  $\sim 47\,000$  г.
- ✓ Забавящо се разширение

$$a(t) \propto t^{1/2}.$$

### ➤ Ера доминирана от материята

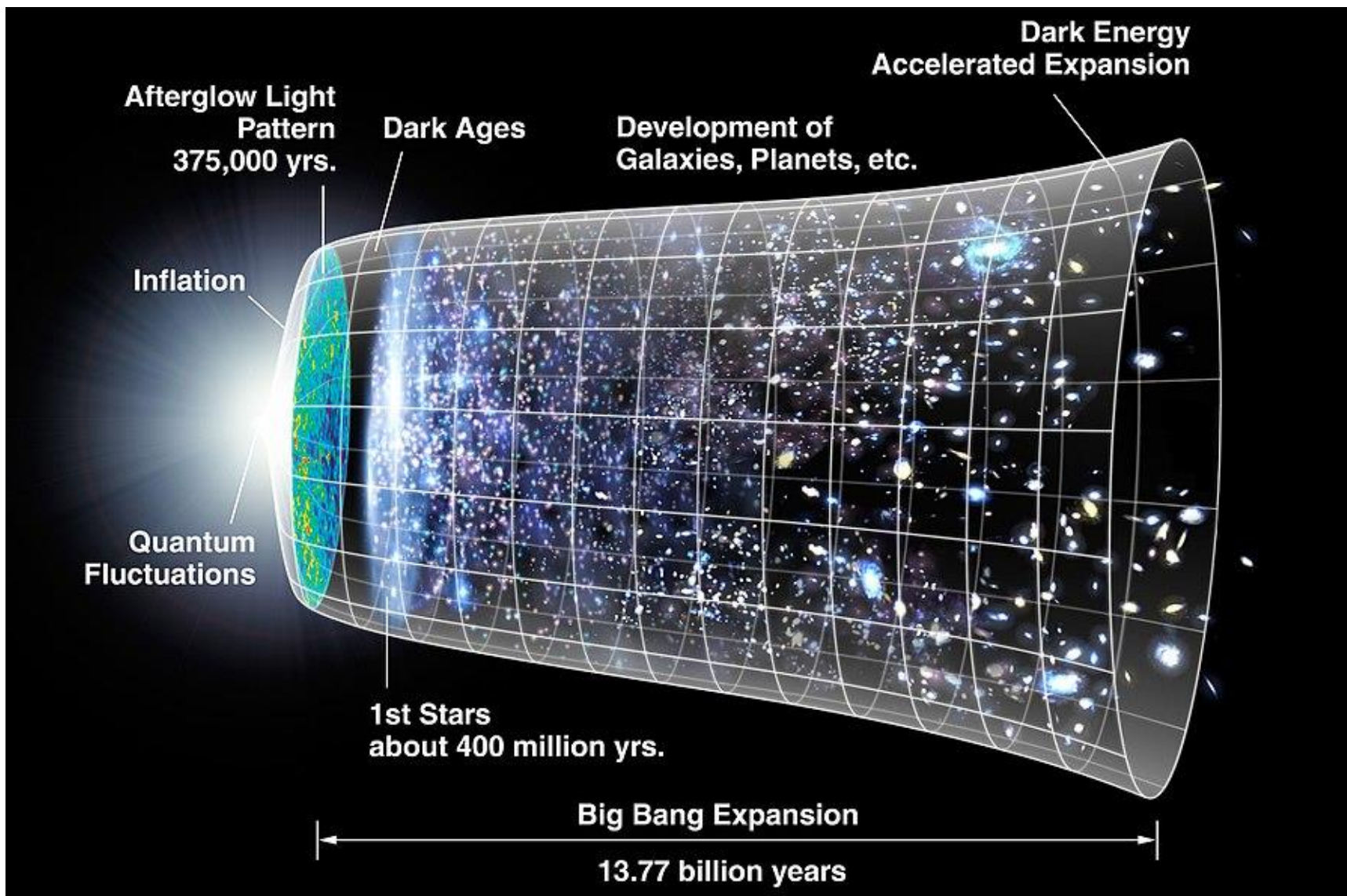
- ✓ 47 000 до 9.8 милиарда г.
- ✓ Забавящо се разширение
- ✓ Реликтово излъчване – 377 000 г.
- ✓ Прозрачна Вселена

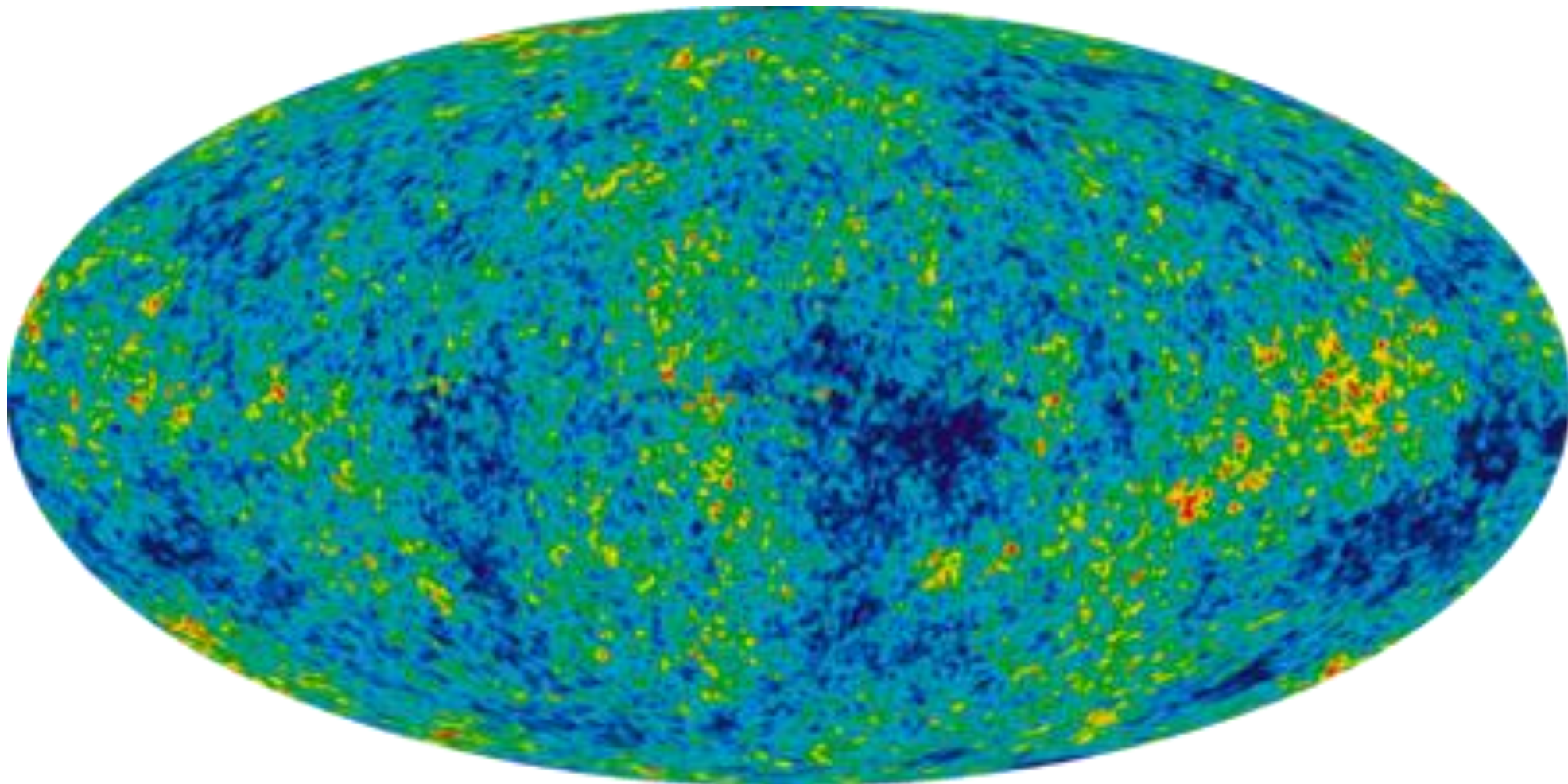
$$a(t) \propto t^{2/3}$$

### ➤ Ера доминирана от тъмната енергия

- ✓ От  $9.8 \times 10^9$  г.
- ✓ Ускоряващо се разширение

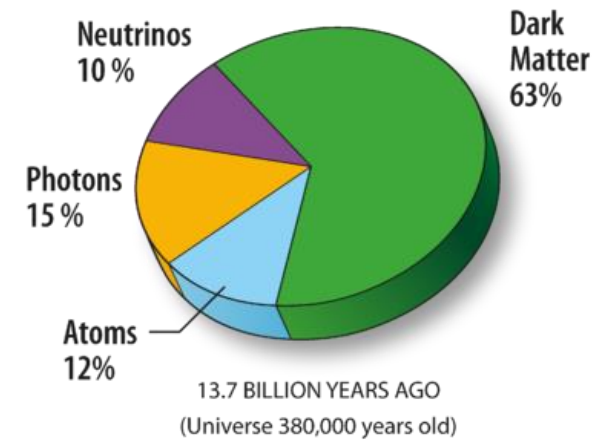
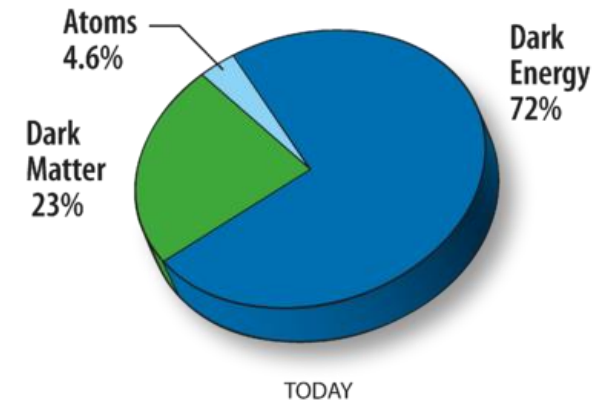
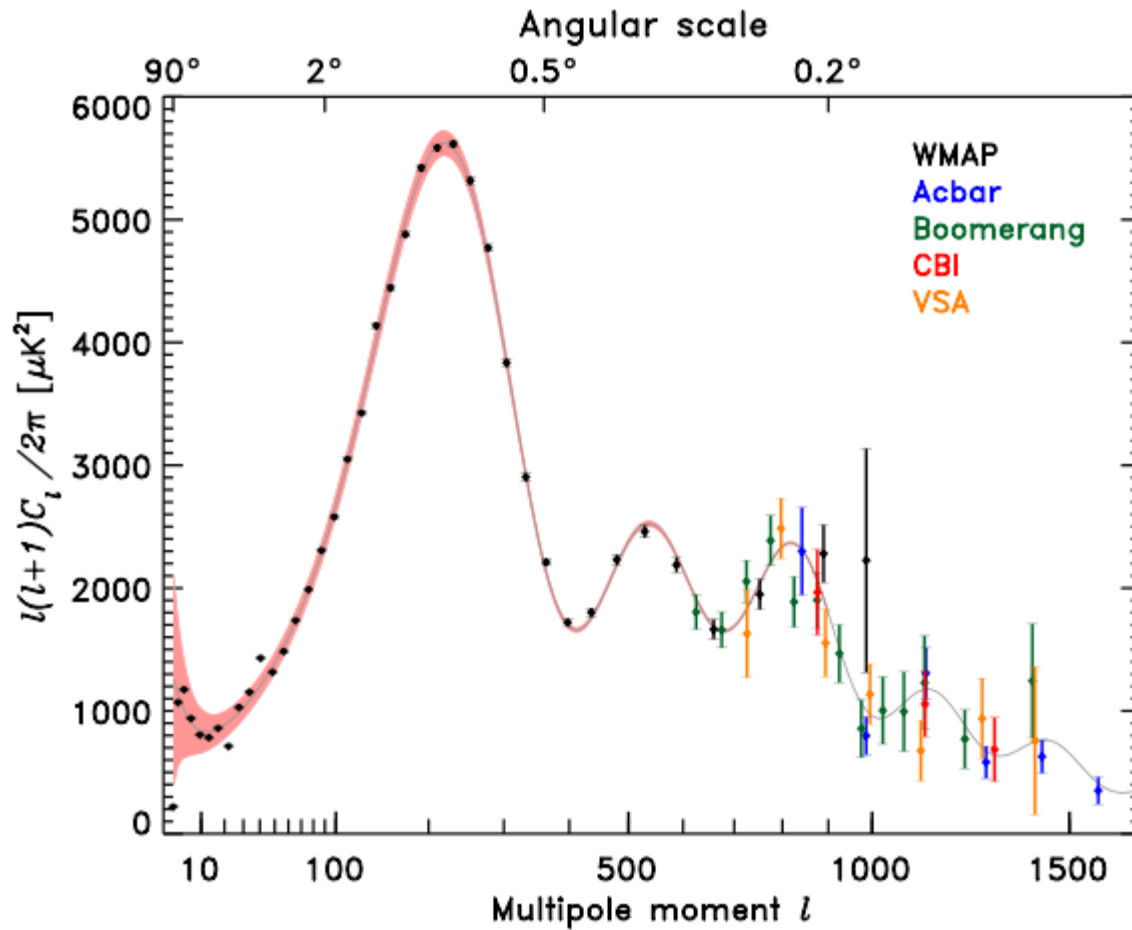
$$a(t) \propto \exp(Ht)$$





$T \sim 2.8 \text{ K}$

**Нееднородности  $\sim 1/100\,000$**



- ❑ Супернови от тип Ia
  - Бели джуджета в двойна система
  - Избухват при фиксирана маса
  - Изхвърлят едно и също количество светлина
  - Стандартна свещ за измерване на разстояние
- ❑ Измерва се паралелно и червеното отместване
- ❑ Вселената се разширява ускоряващо се



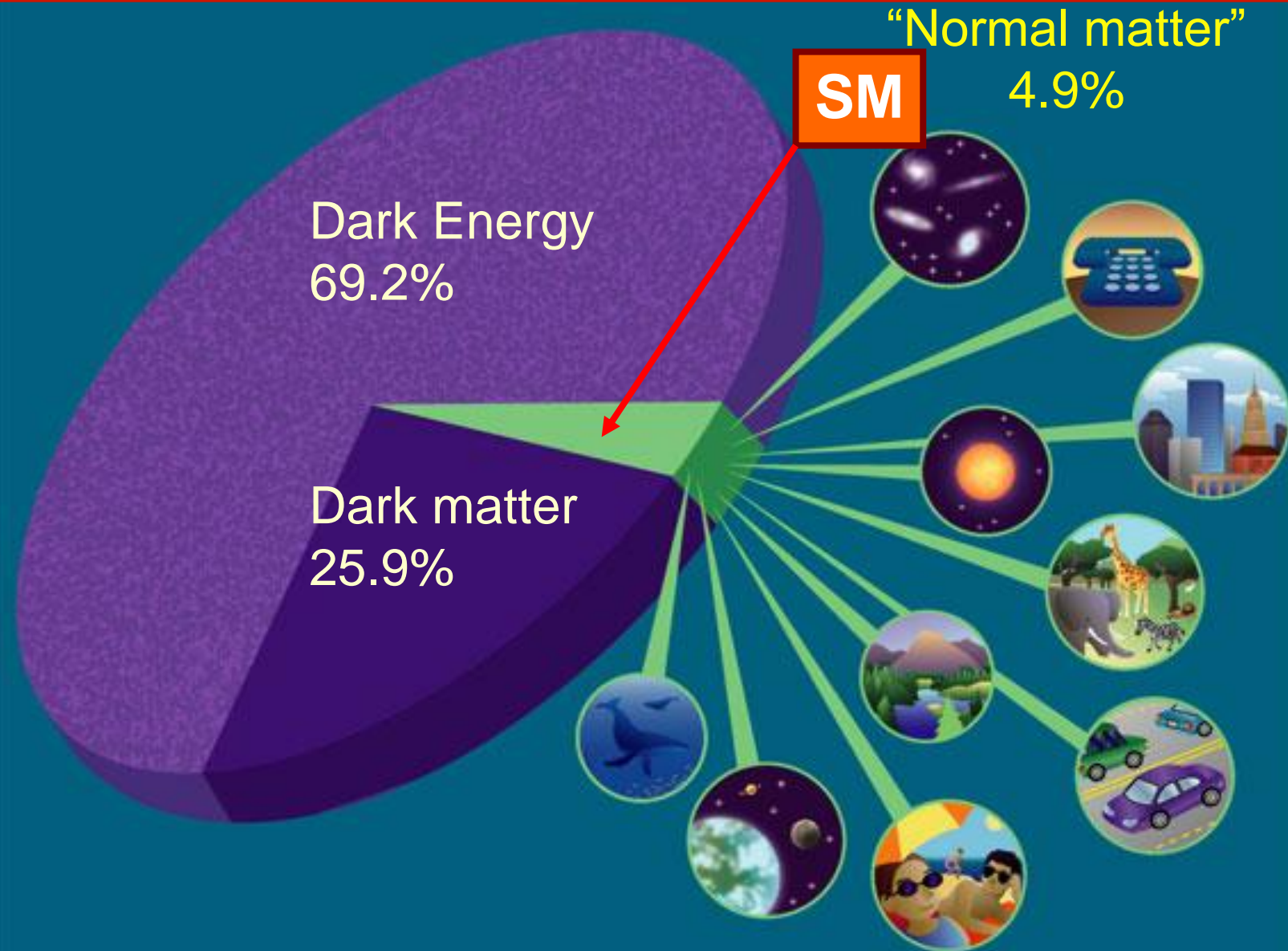


# Lambda-CDM параметри



<a href="#">Hubble constant</a>	$H_0$	$67.74 \pm 0.46 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Baryon density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_b$	$0.0486 \pm 0.0010$ <sup>[e]</sup>
Dark matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_c$	$0.2589 \pm 0.0057$ <sup>[f]</sup>
Matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_m$	$0.3089 \pm 0.0062$
<a href="#">Dark energy</a> density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_\Lambda$	$0.6911 \pm 0.0062$
<a href="#">Critical density</a>	$\rho_{\text{crit}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
Age at decoupling	$t_*$	$377700 \pm 3200 \text{ years}$
<a href="#">Age of the universe</a>	$t_0$	$13.799 \pm 0.021 \times 10^9 \text{ years}$
Total density parameter	$\Omega_{\text{tot}}$	$1.0023 \pm 0.0056$ $-0.0054$

# Какво е съдържанието на Вселената ?

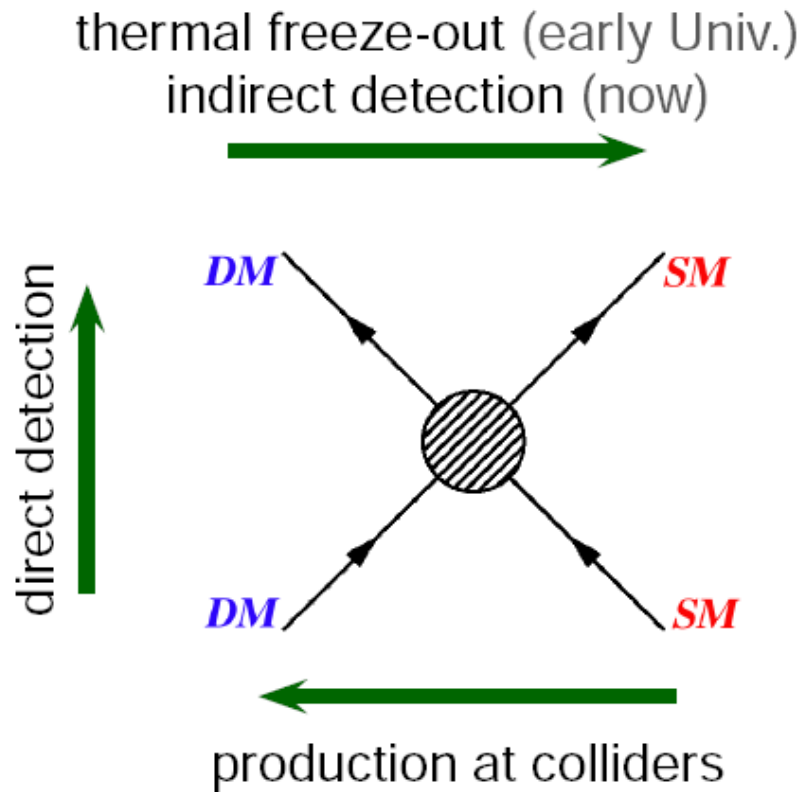




# От какво е съставена тъмната материя

# Как може да се наблюдава тъмна материя

.....Ако взаимодействия поне сабо с частиците от *SM*  
 (но може и да не сме късметлии)



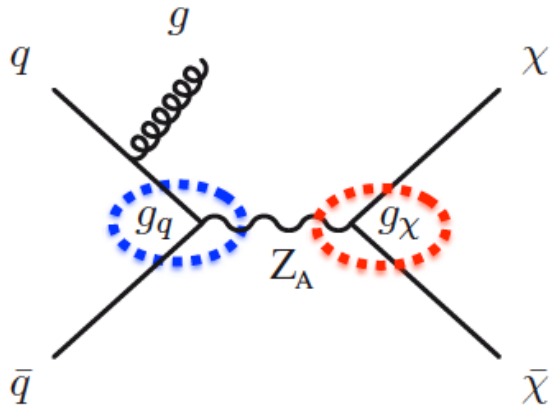
- **индиректно: DM аниhilация**  
 Pamela, Fermi, AMS,  
 IceCube
- **директно: DM-нуклонно  
 разсейване**
  - ✓ Детектори с течни благородни газове
    - ✓ LUX, XENON
  - ✓ Криогенни твърдотелни детектори
  - ✓ SuperCDMS, CRESST
- **Раждане в колайдери**
- **Как можем да получим  
 сигнал от „невидим“ обект?**



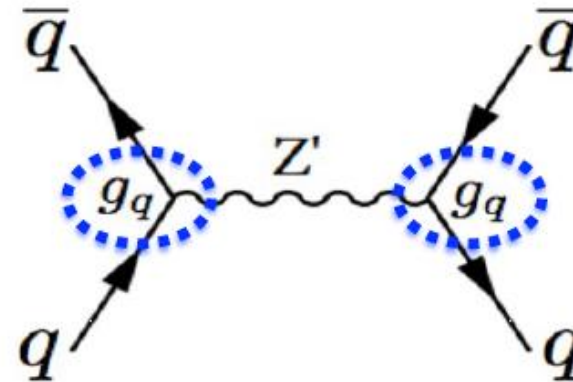
- ✓ LHC Run 1 (до 2012): DM интерпретация в рамките на ефективни полеви модели
  - ✓ Контактни взаимодействия, валидни ако масата на преносителя  $\gg$  предадения импулс
  - ✓ 7 и 8 TeV енергия
  - ✓ Невалидни при голям трансфер на енергия

- LHC Run 2 (2015 – 2018): използване на опростени модели
  - 13 TeV енергия
    - → възможност за голям предаден импулс
    - → EFT стават неадекватни
  - Експлицитно дефинирани преносители
  - Набор от модели

**Моно- $\chi$  сигнал**  
**SM  $\rightarrow$  преносител  $\rightarrow$  DM**



**Видим (резонанс) сигнал**  
**SM  $\rightarrow$  преносител  $\rightarrow$  SM**

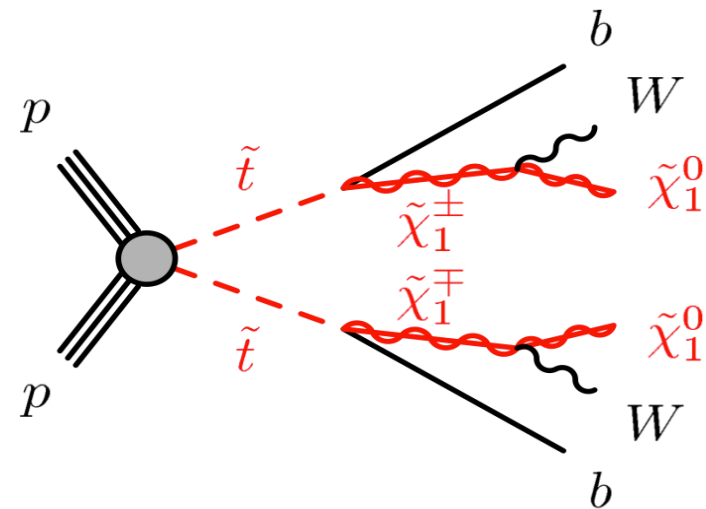
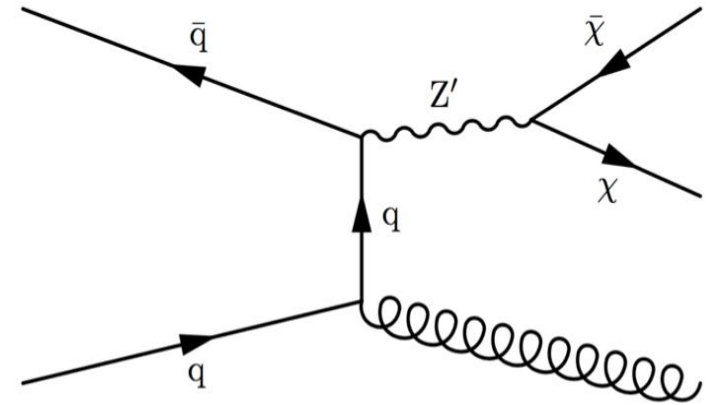


**mono-jet, mono-photon, mono-Z,  
 mono-W, mono-H**

**dijet, ditop, dilepton  
 резонанси**

Define simplified model with (minimum) 4 parameters		DM		Consider comprehensive set of diagrams for mediator	
Mediator mass ( $M_{\text{med}}$ )	DM mass ( $M_{\text{DM}}$ )	Dirac fermion	Scalar - real	Vector	Axial-vector
$g_q$	$g_{\text{DM}}$	Majorana fermion	Scalar - complex	Scalar	Pseudoscalar

- Директно раждане на DM двойка
  - ✓ Сигнал само от излъчване в начално състояние (ISR)
  - ✓ “Mono-Jet” сигнал
  - ✓ or Mono-Photon, Mono-V, (Mono-Z, Mono-W), Mono-Higgs, Mono-Top и т.н.
- Раждане на тъмна материя в каскадни разпади
  - ✓ Суперсиметрия със съхраняване на R-четността

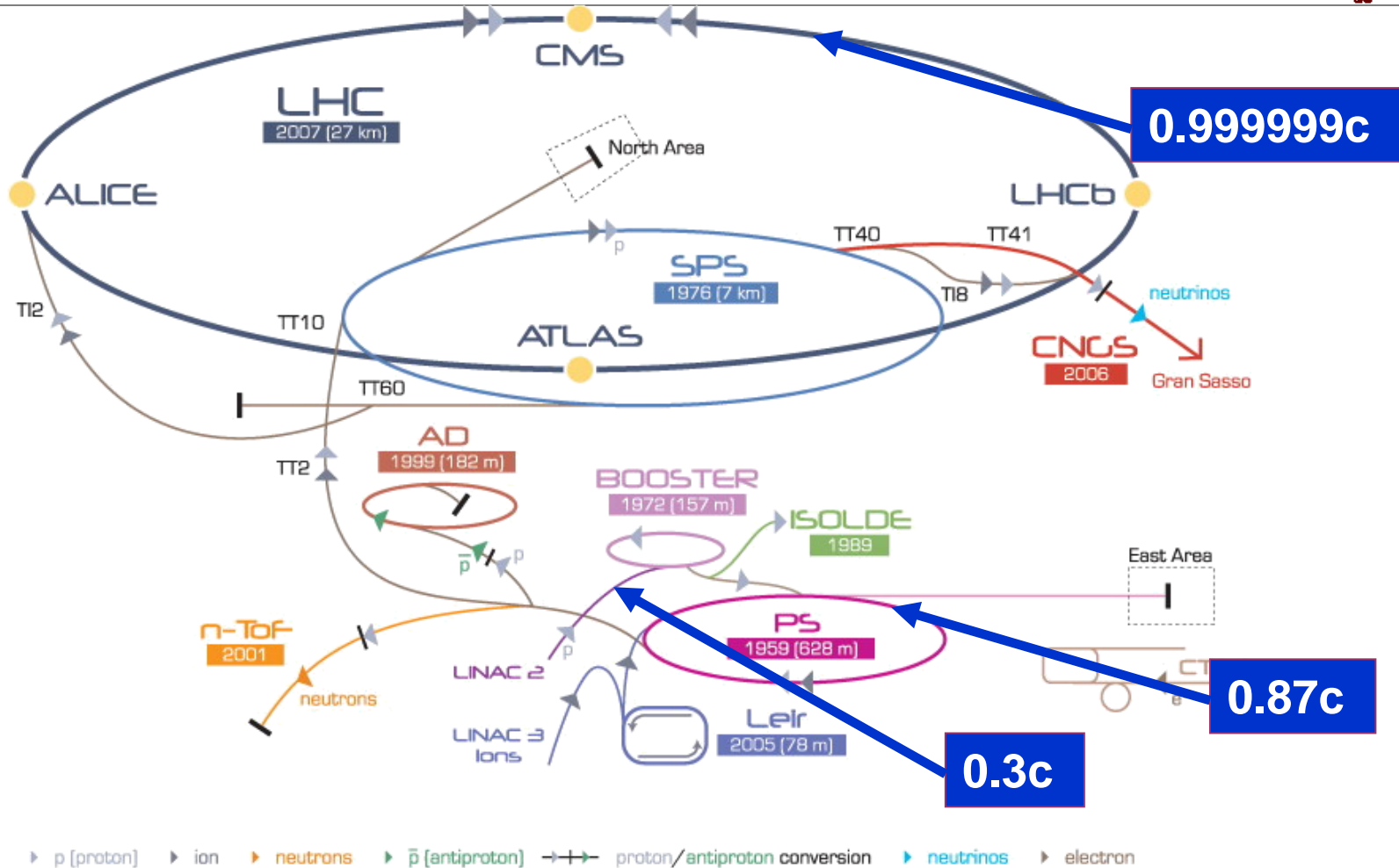




# LHC и експеримента CMS



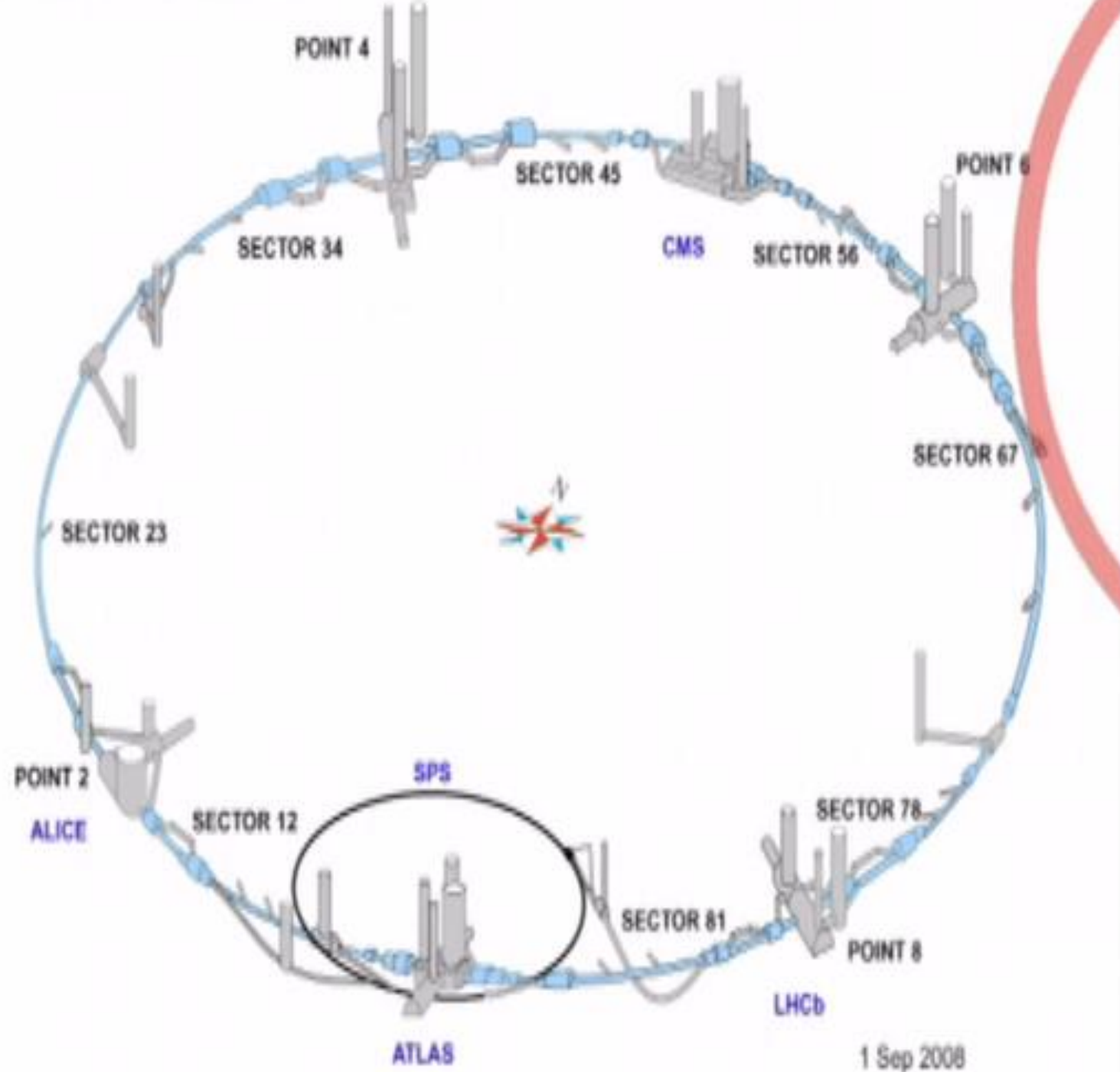
# Accelerator complex at CERN



LHC Large Hadron Collider    SPS Super Proton Synchrotron    PS Proton Synchrotron

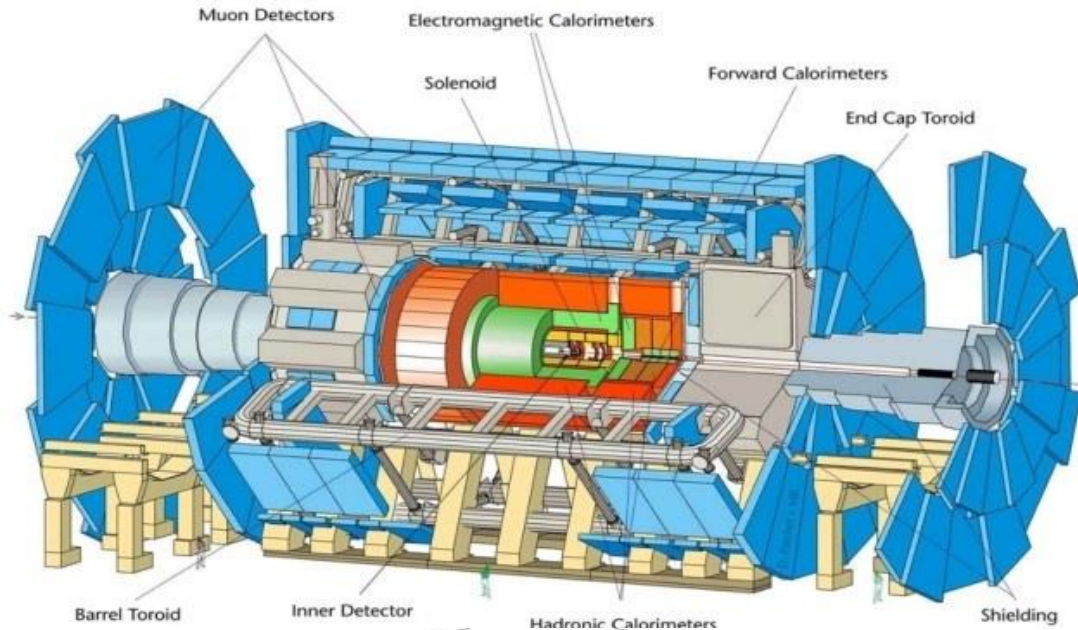
AD Antiproton Decelerator    CTF3 Clic Test Facility    CNCS Cern Neutrinos to Gran Sasso    ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring    LINAC LINear ACcelerator    n-ToF Neutrons Time Of Flight





# ATLAS, CMS, ALICE and LHCb

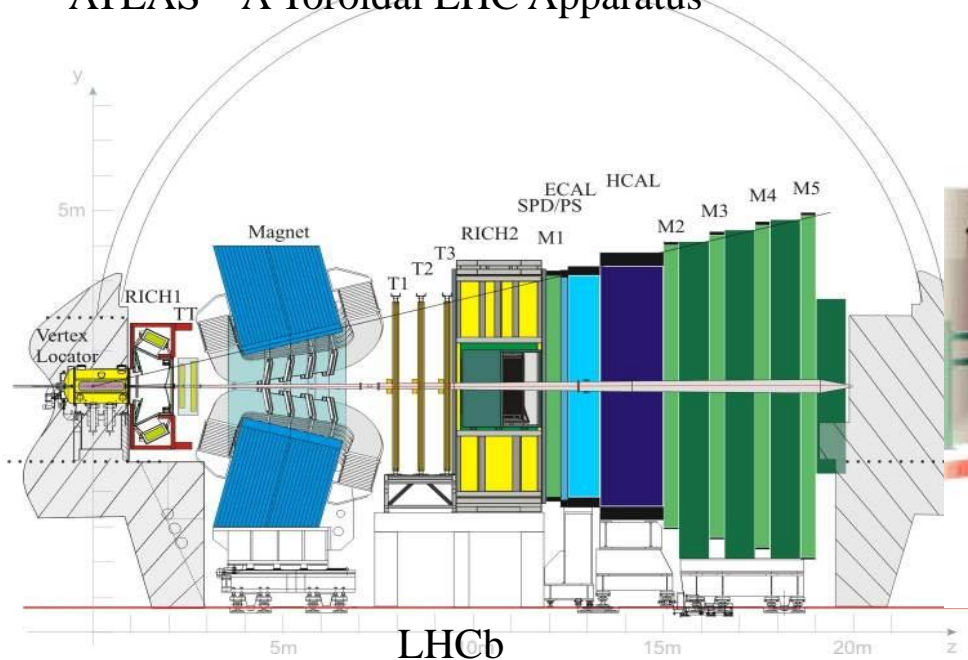


ATLAS – A Toroidal LHC Apparatus



Total Weight : 14,500 t  
 Overall diameter : 14.60 m  
 Overall length : 21.60 m  
 Magnetic field : 4 Tesla

CMS – Compact Muon Solenoid



LHCb



ALICE – A Large Ion Collider Experiment  
 Sofia, 4 April, 2019

# CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

## SILICON TRACKERS

Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

## SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

## MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

## PRESHOWER

Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

## FORWARD CALORIMETER

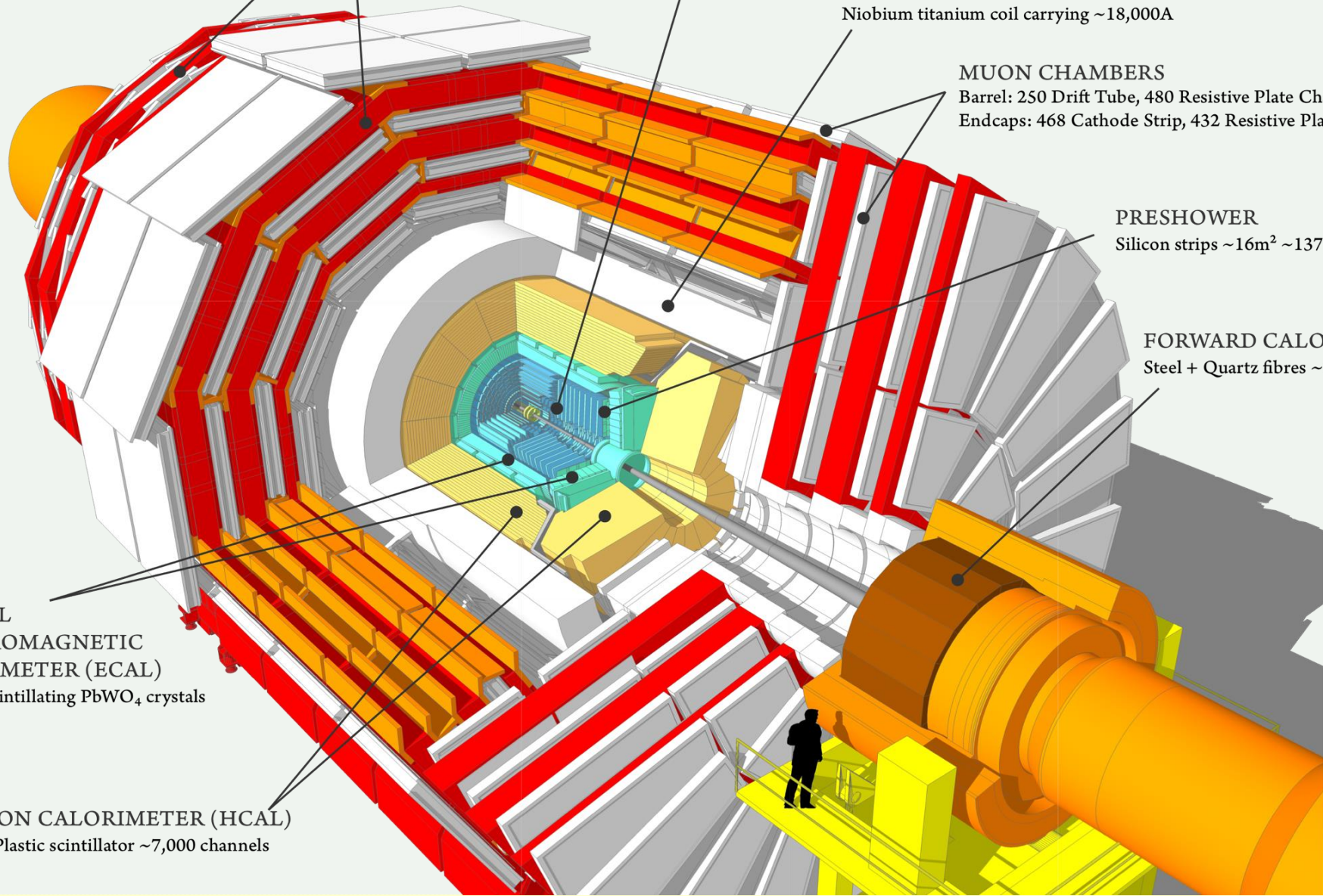
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

## CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

## HADRON CALORIMETER (HCAL)

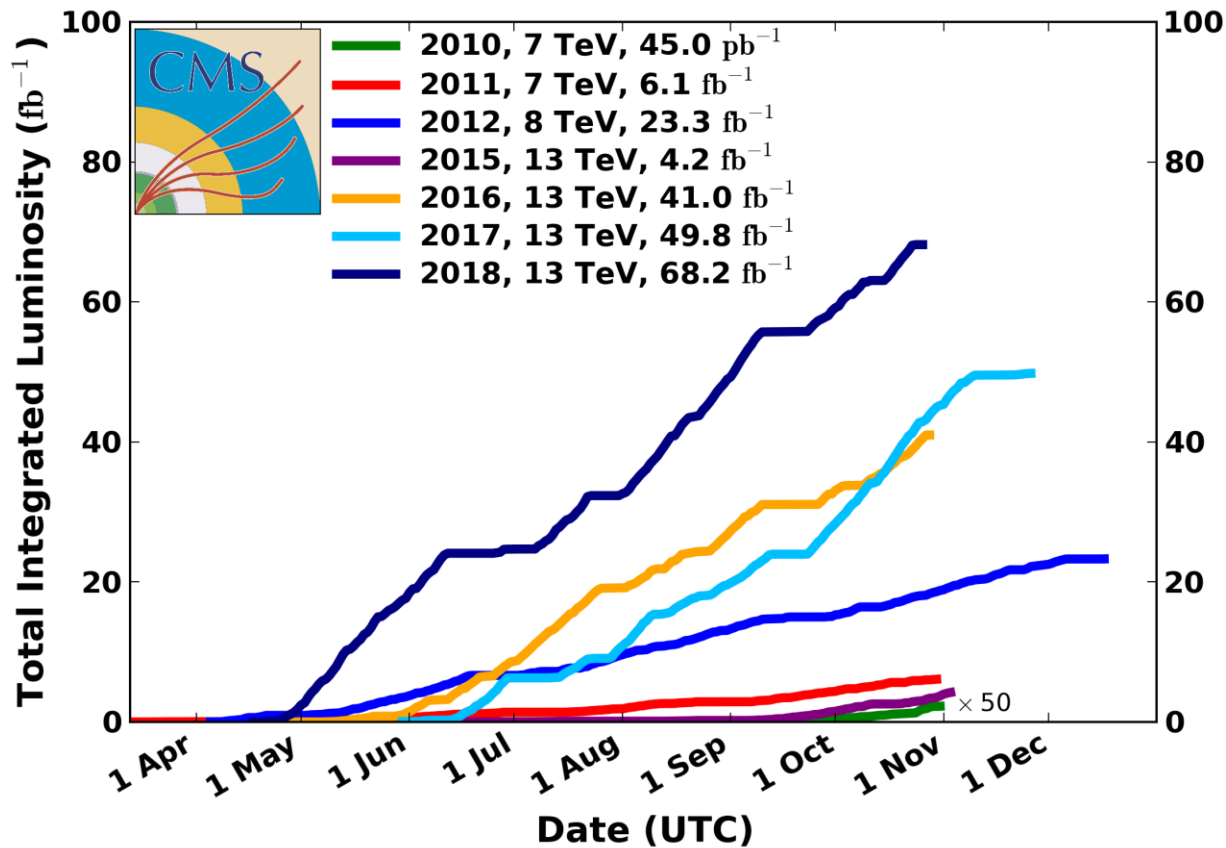
Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels



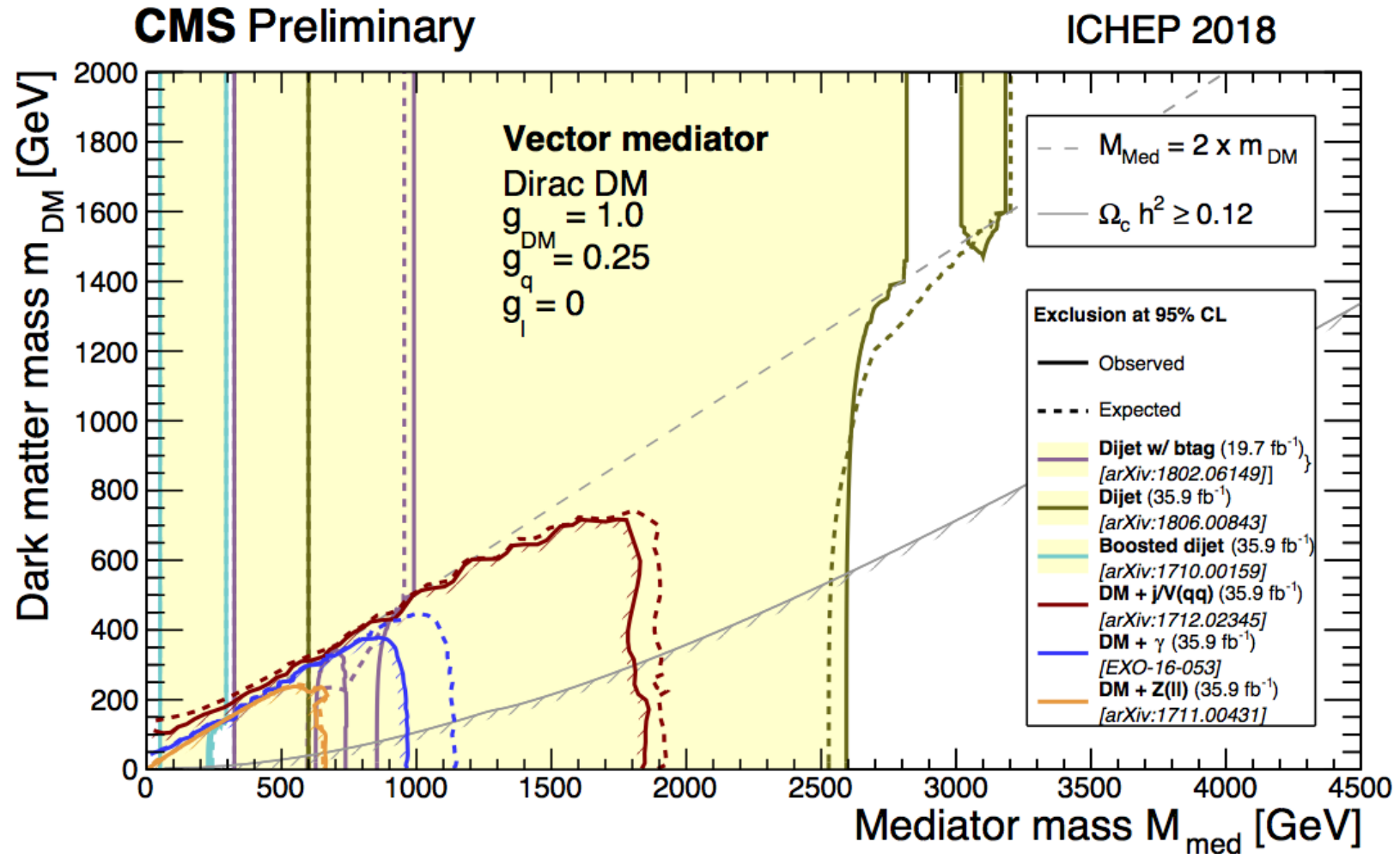
## Excellent performance of LHC

### CMS Integrated Luminosity Delivered, pp

Data included from 2010-03-30 11:22 to 2018-10-26 08:23 UTC

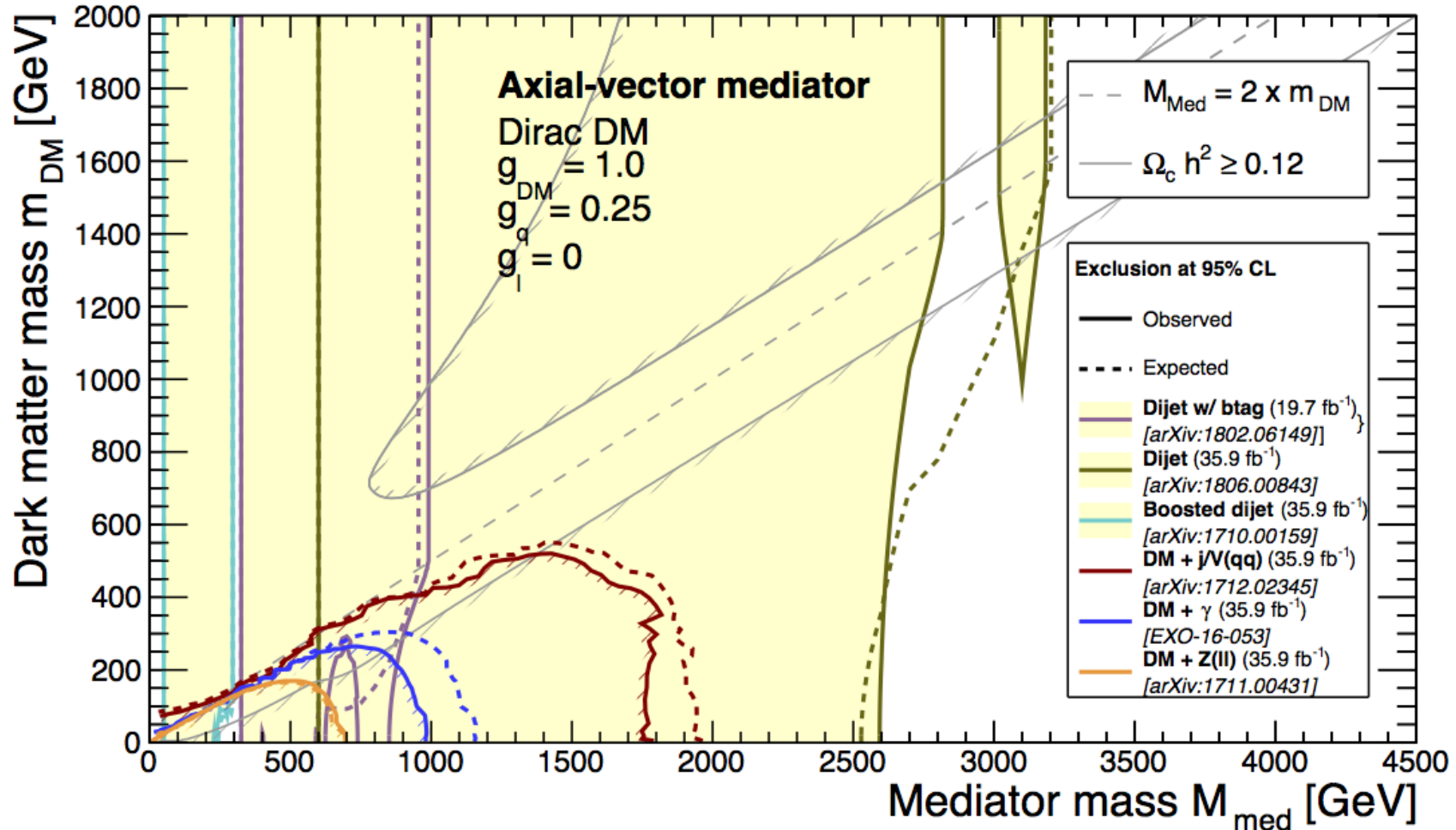


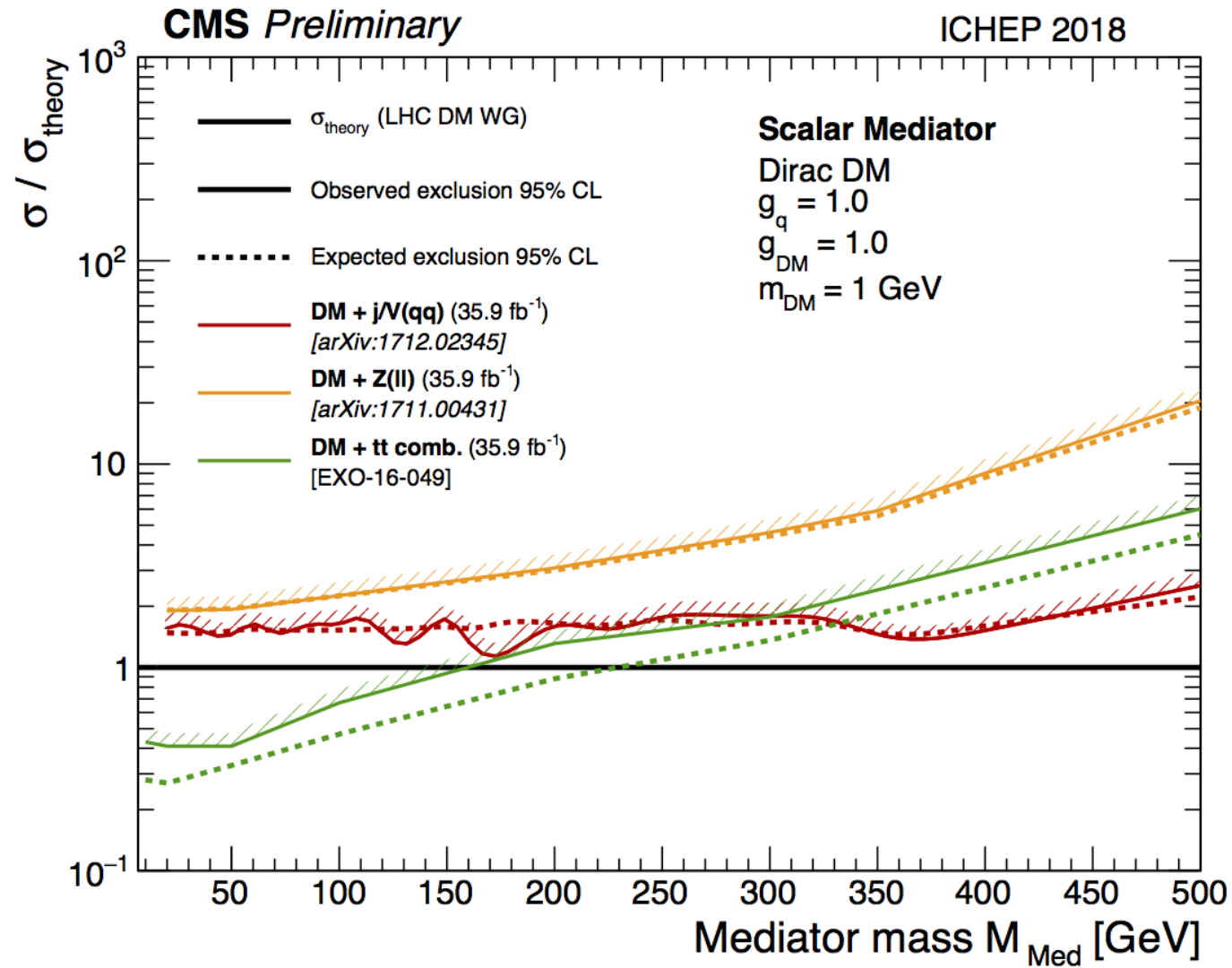
# Search for DM at LHC

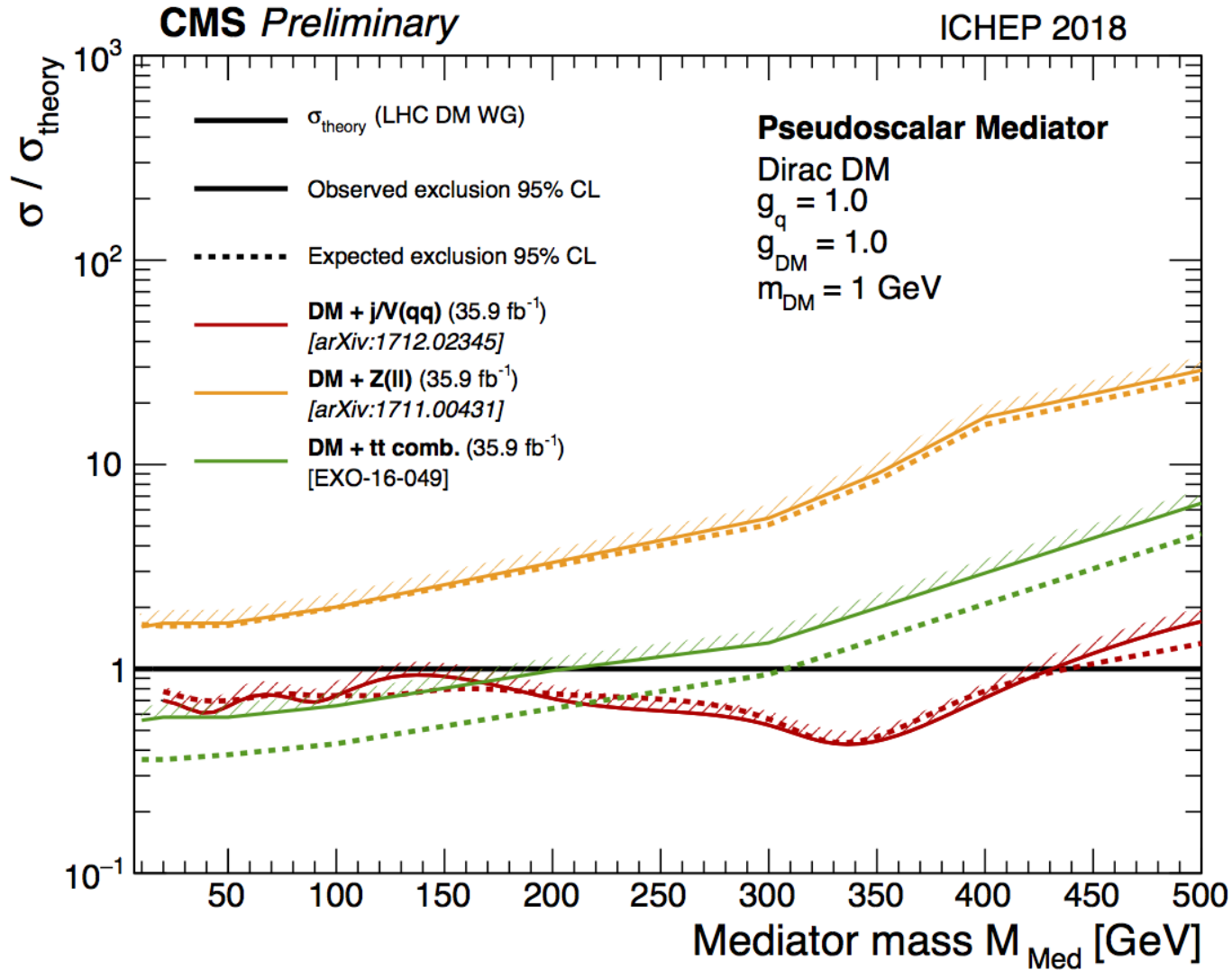


CMS Preliminary

ICHEP 2018









## □ Тъмна материя

- Съставлява 84,25 % от материята във Вселената
- Определяща роля за разширението на Вселената в периода 47000 –  $9.8 \times 10^9$  г.
- Определяща роля за формирането на звезди, галактики и галактични купове
- Участва в гравитационни взаимодействия
- Нямаме указание за участие в други видове взаимодействия
- Не е известно от какви частици е съставена
- Провеждат се множество експерименти за търсене на други нейни взаимодействия и определяне на структурата и.

## □ Тъмна енергия

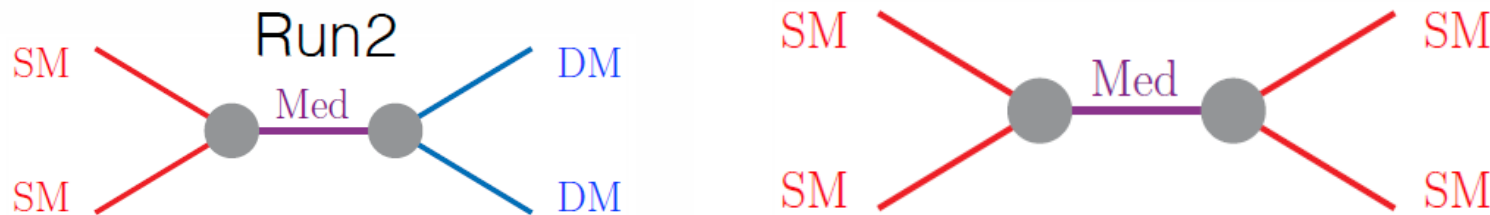
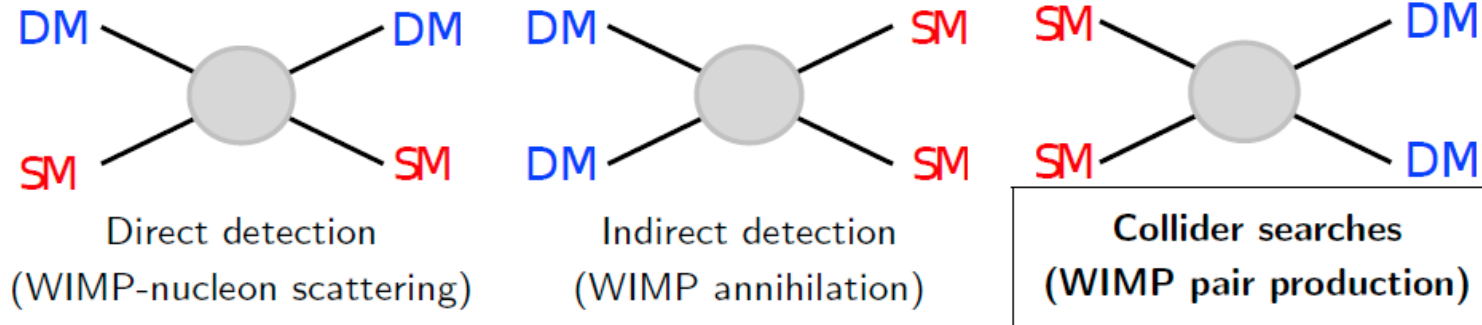
- Доминираща във Вселената – 69 % от съдържимото и
- Определя ускоряващото се разширение на Вселената в периода след  $9.8 \times 10^9$  г.
- Нейният източник
  - ✓ Космологична константа  $\Lambda \sim 2. \times 10^{-35}$
  - ✓ Скаларно поле запълващо Вселената (Quintessence)





*Благодаря за вниманието!*

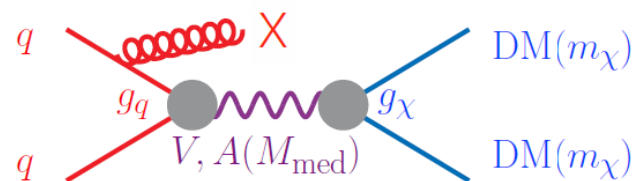
## Assuming DM is WIMP



## DM interpretation with mediator interaction

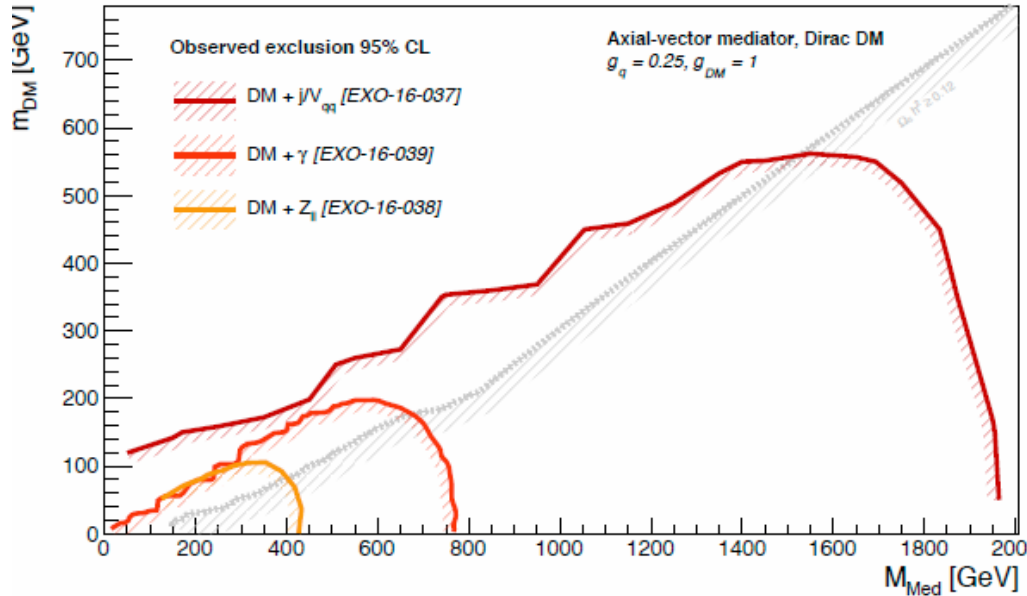
$E_{T}^{\text{miss}}+X$  a.k.a. Mono-X

- X from ISR jet, b, t,  $\gamma$ , W, Z



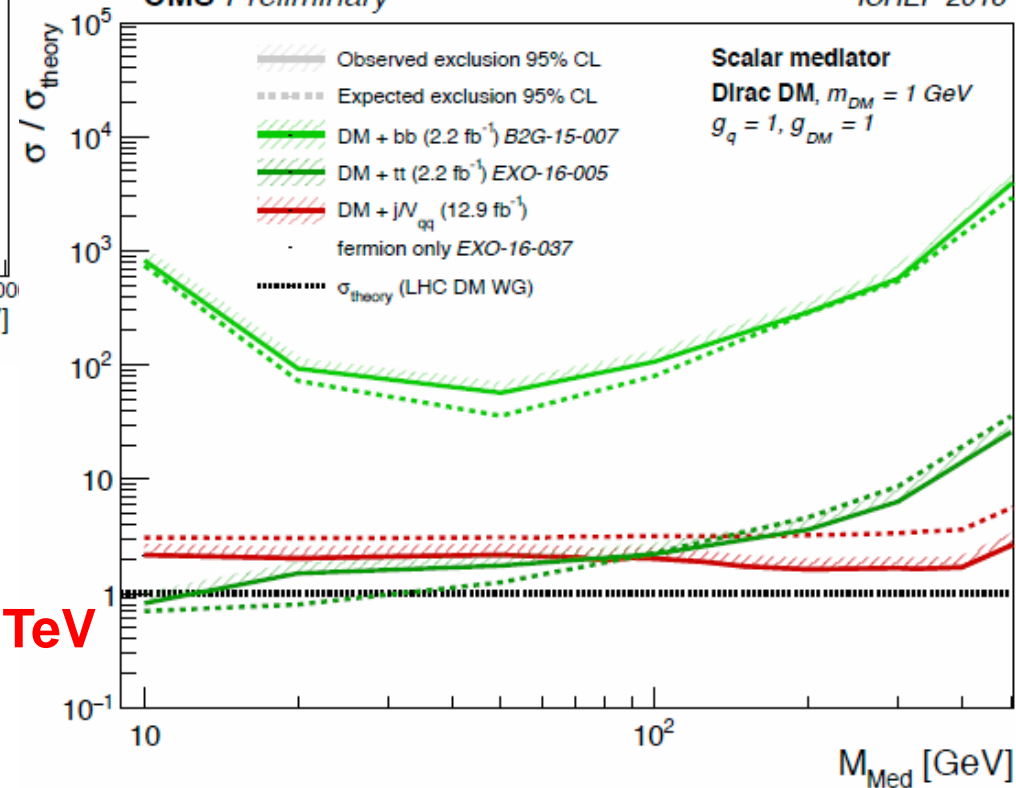
CMS Preliminary

Dark Matter Summary ICHEP 2016



CMS Preliminary

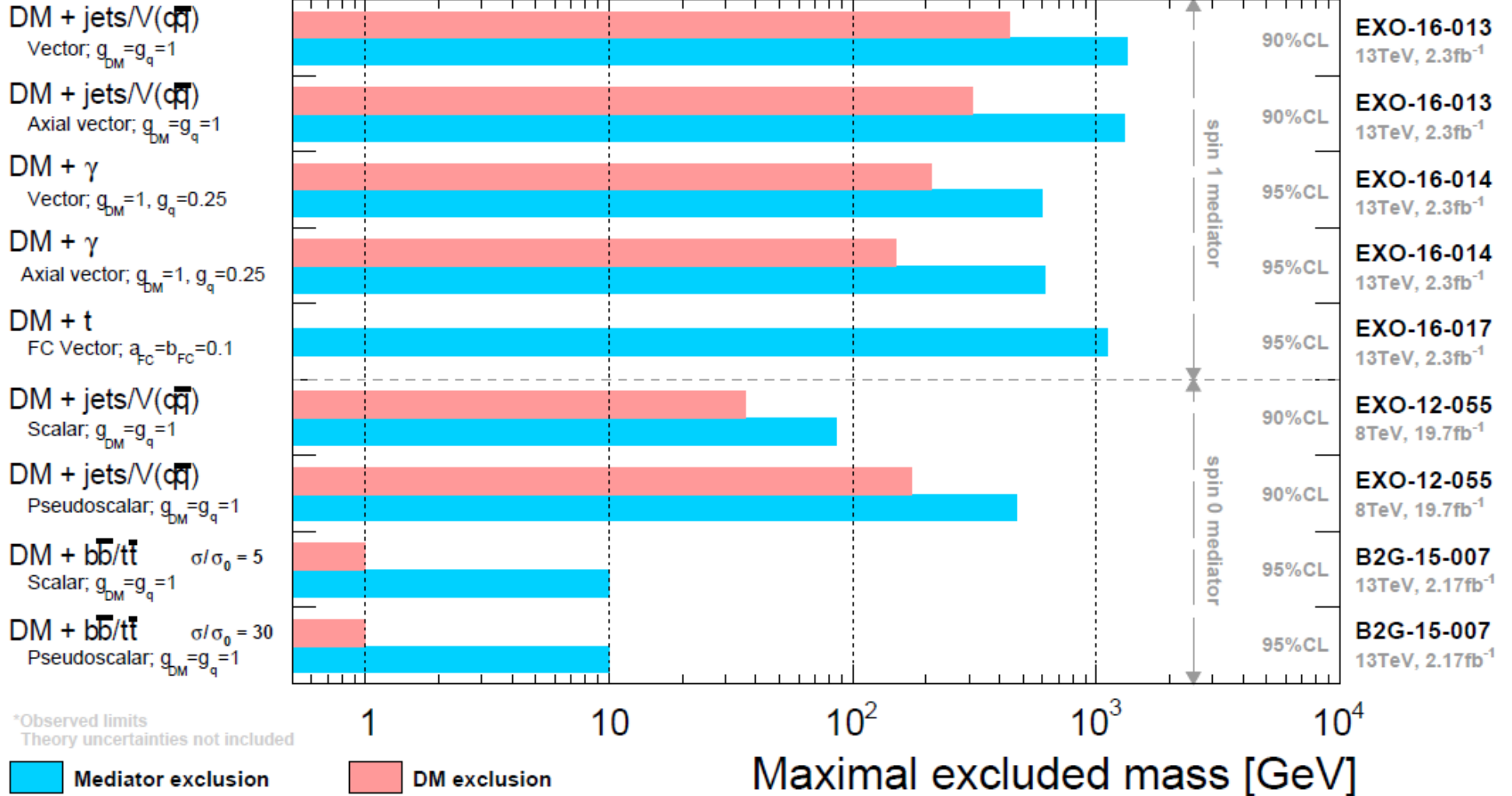
ICHEP 2016



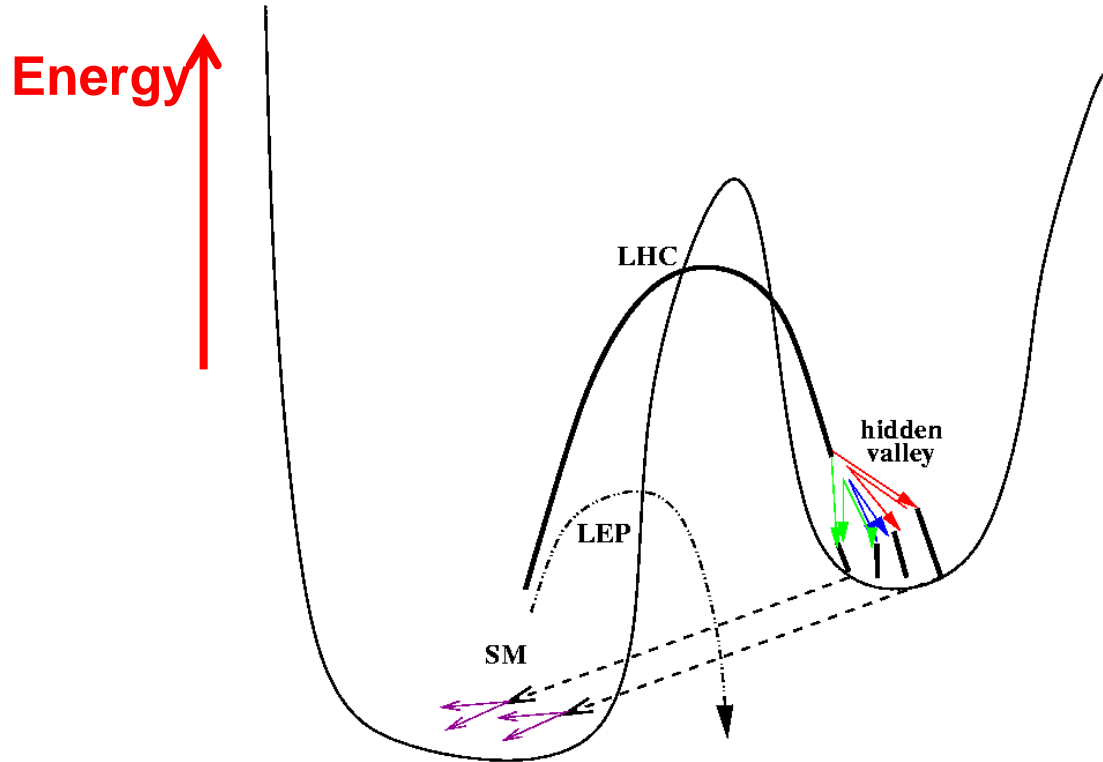
**No significant excess observed**  
**Exclusion of DM mass up to 500 GeV**  
**Exclusion of mediator mass up to 1.95 TeV**

CMS Preliminary

Dark Matter Summary\* - June 2016



# Hidden valley models



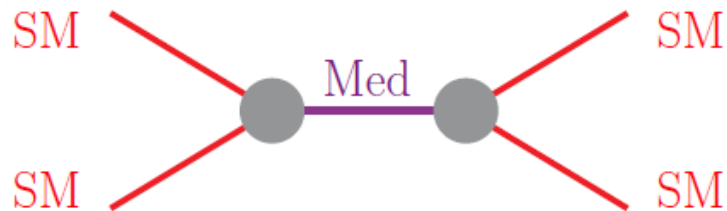
**Observable sector  
SM**

**Particles  
Charged Under  
SM and HV**

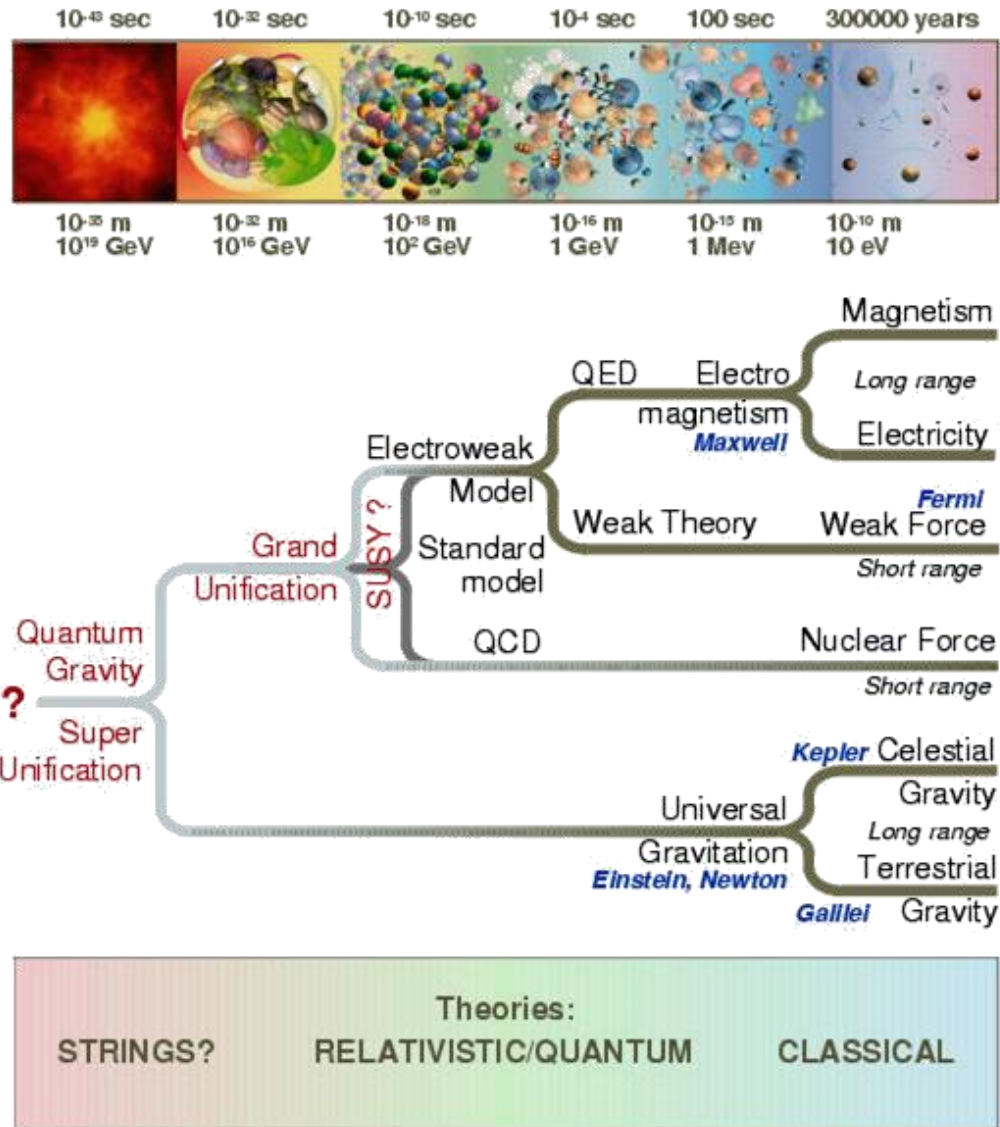
**Hidden sector  
 $G_v$  with  $v$ -matter**



- **spin-independent**
  - ✓ *scalar or vector coupling*
  - ✓ scattering cross section: amplitude proportional to number of nucleons (i.e., mass of nucleus)
- **spin-dependent**
  - ✓ *axial-vector or pseudo-scalar coupling*
- **very different sensitivities in direct-detection experiments**
  - ✓ may differ by about six orders of magnitude

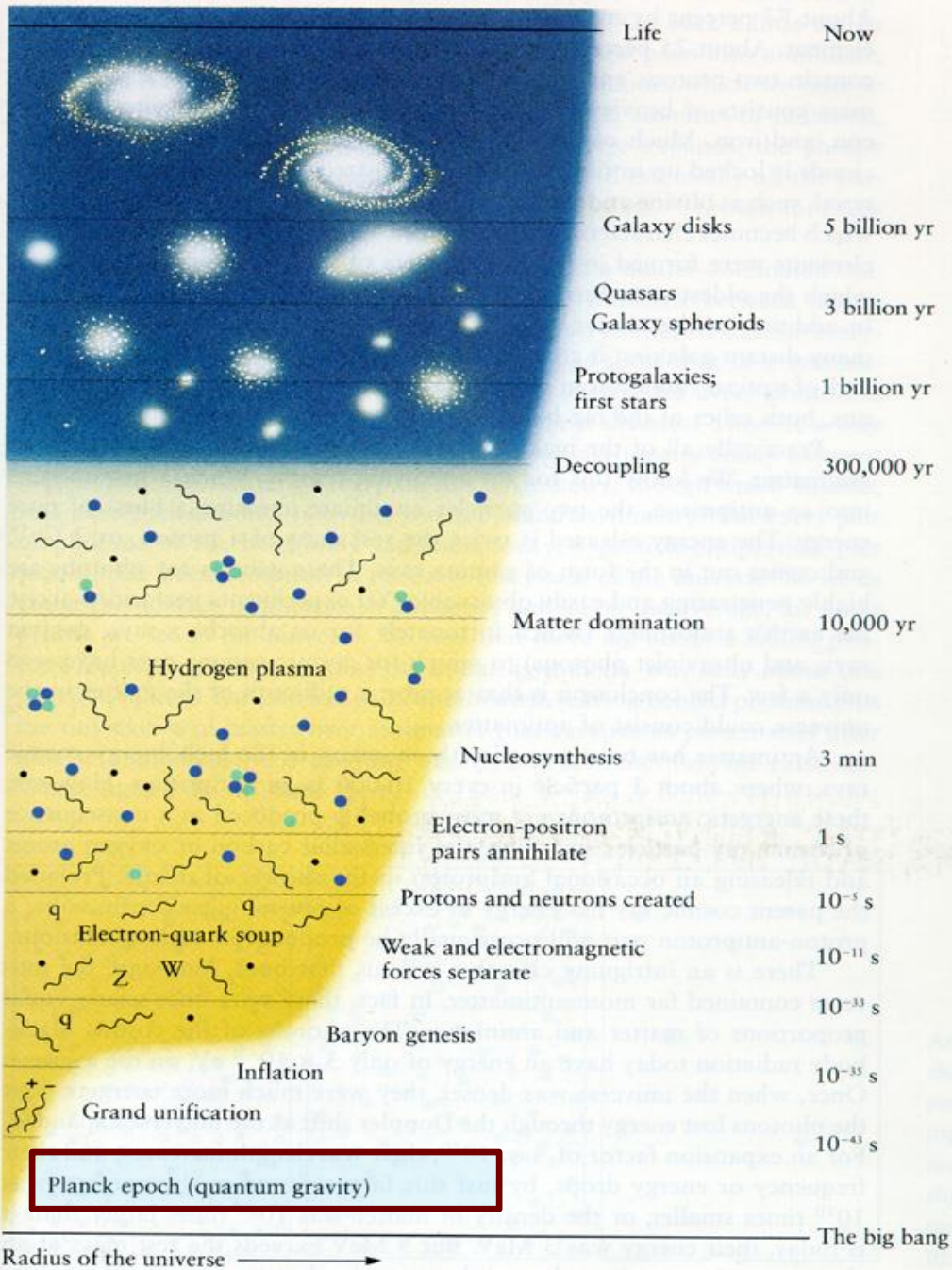


# Единно описание на взаимодействията



# Кратка история на Вселената

# A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

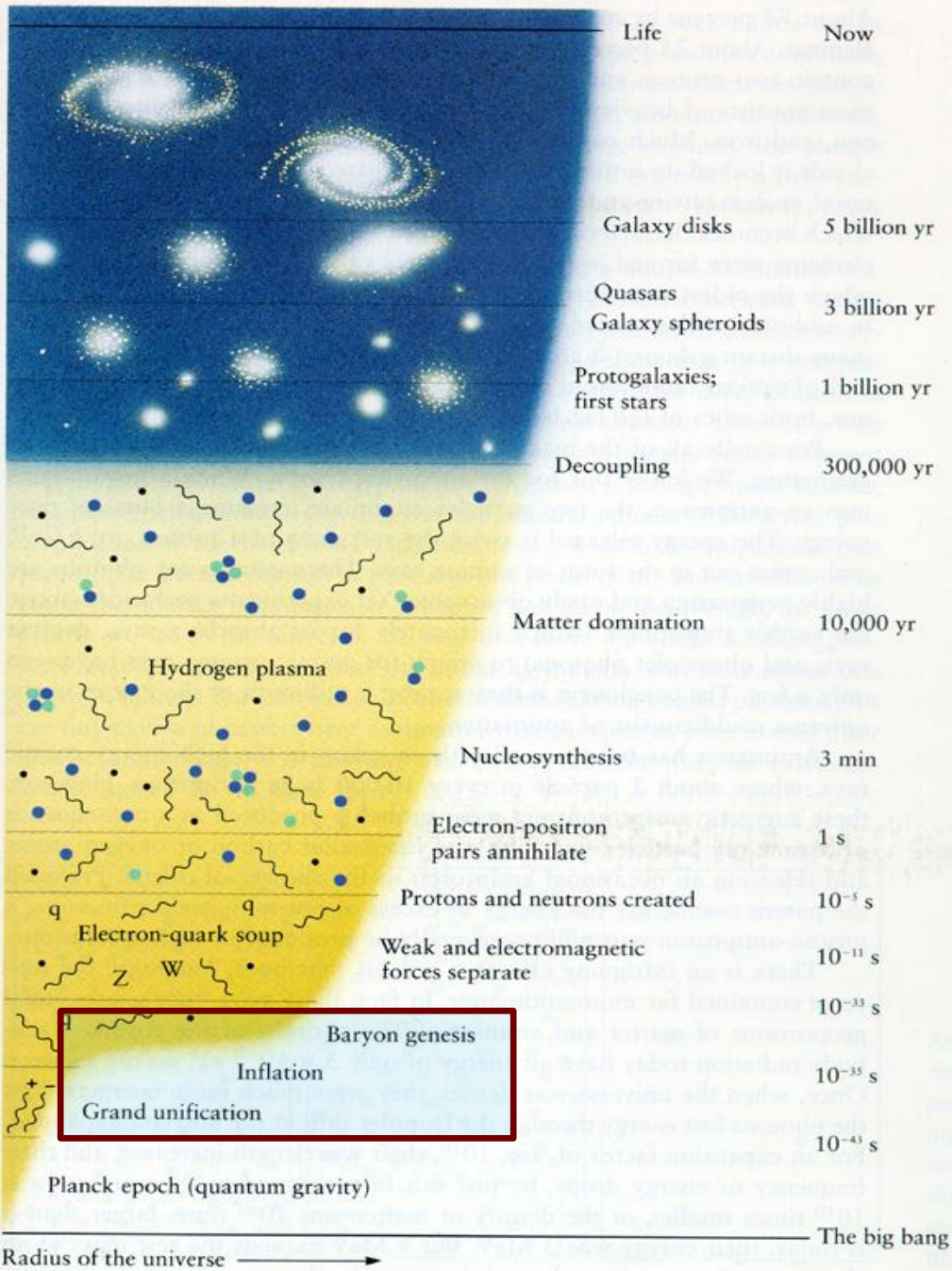


**В началото Вселената е била наистина гореща, ама много гореща!**

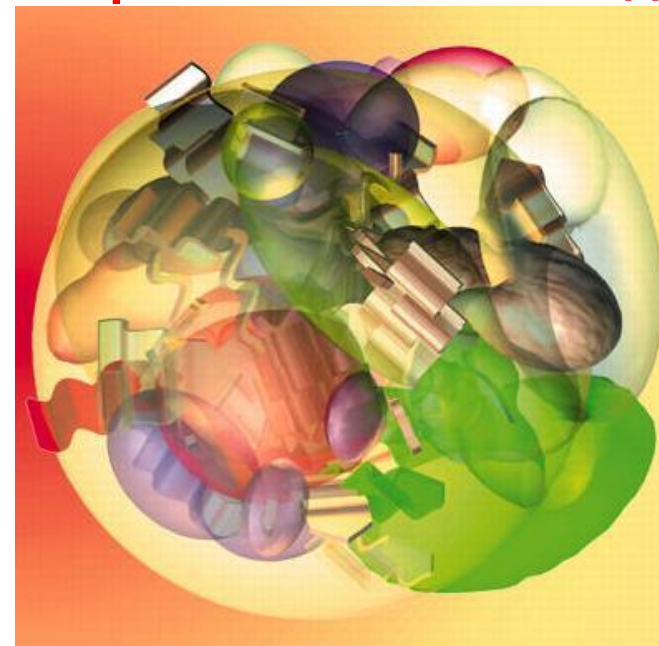


- $t < 10^{-43}$  сек
- Квантова гравитация
- $10^{-43}$  сек ( $10^{19}$  GeV,  $10^{32}$  K,  $10^{-34}$  m)
- Гравитацията се отделя
- Първо нарушение на симетрията

# A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

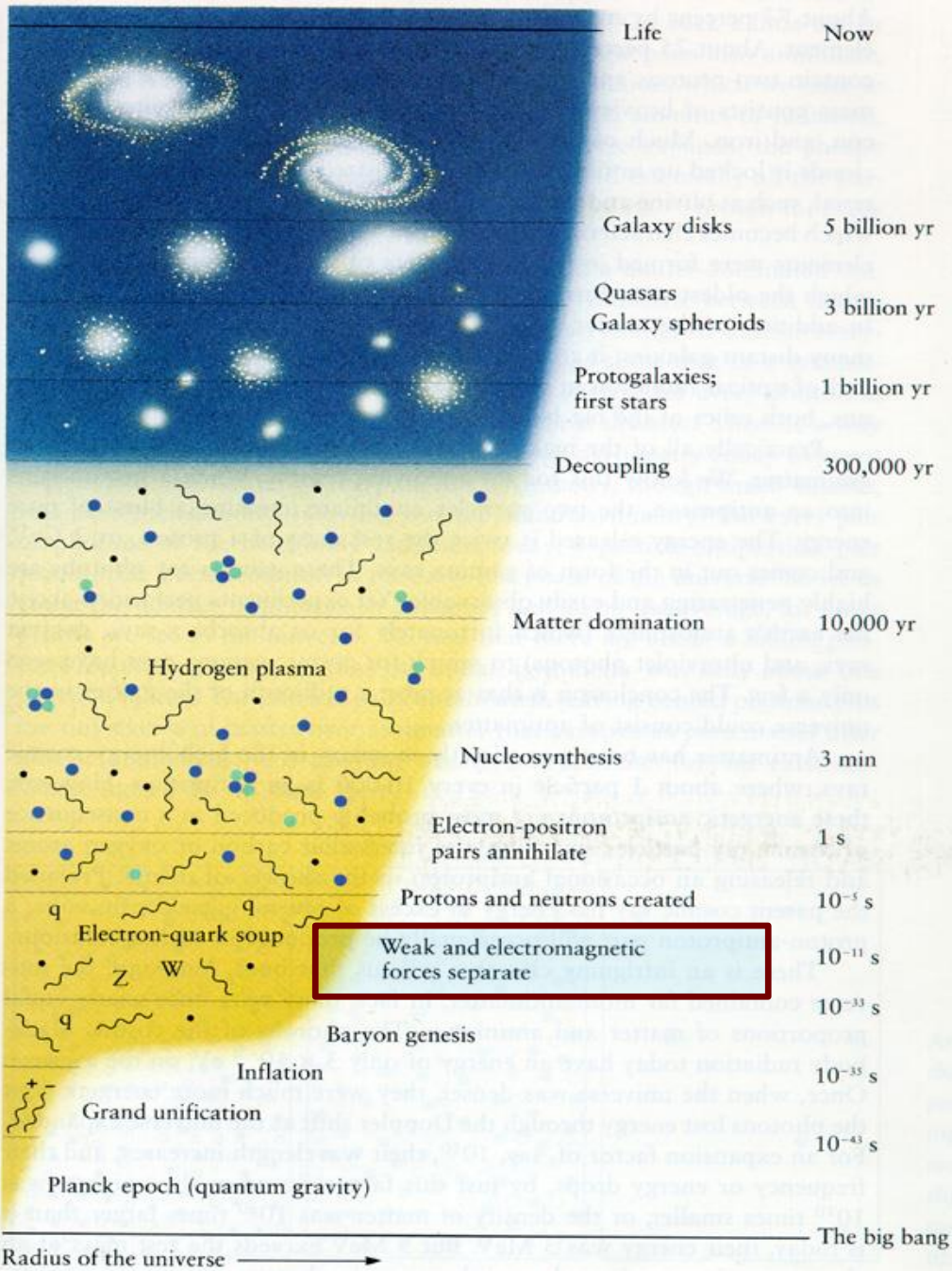


## 10<sup>-35</sup> с. Ера на Великото обединение

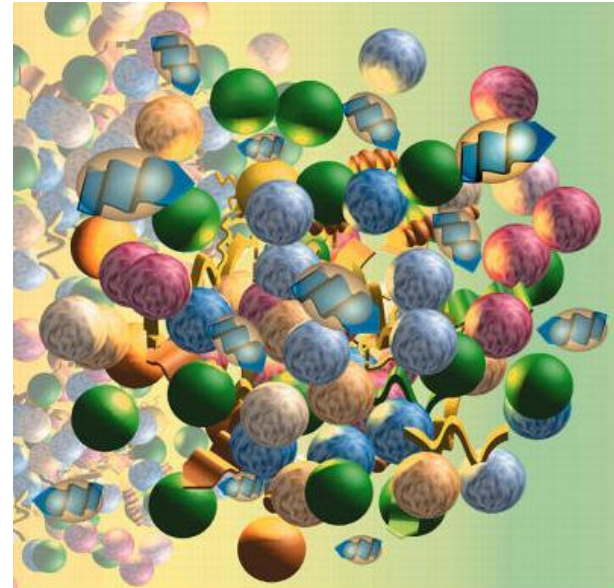


- 10<sup>-35</sup> сек ( $10^{16}$  GeV,  $10^{27}$  K,  $10^{-32}$  m)
- Инфляция – 10<sup>-35</sup> – 10<sup>-32</sup> с.
- Увеличение на размера  $10^{50}$
- Наблюдаемата Вселена – 3 м.
- 10<sup>-32</sup> с. - Силните взаимодействия се отделят
- Асиметрия между материя и антиматерия ( $10^{-9}$ )
- Кварк-глюонна плазма

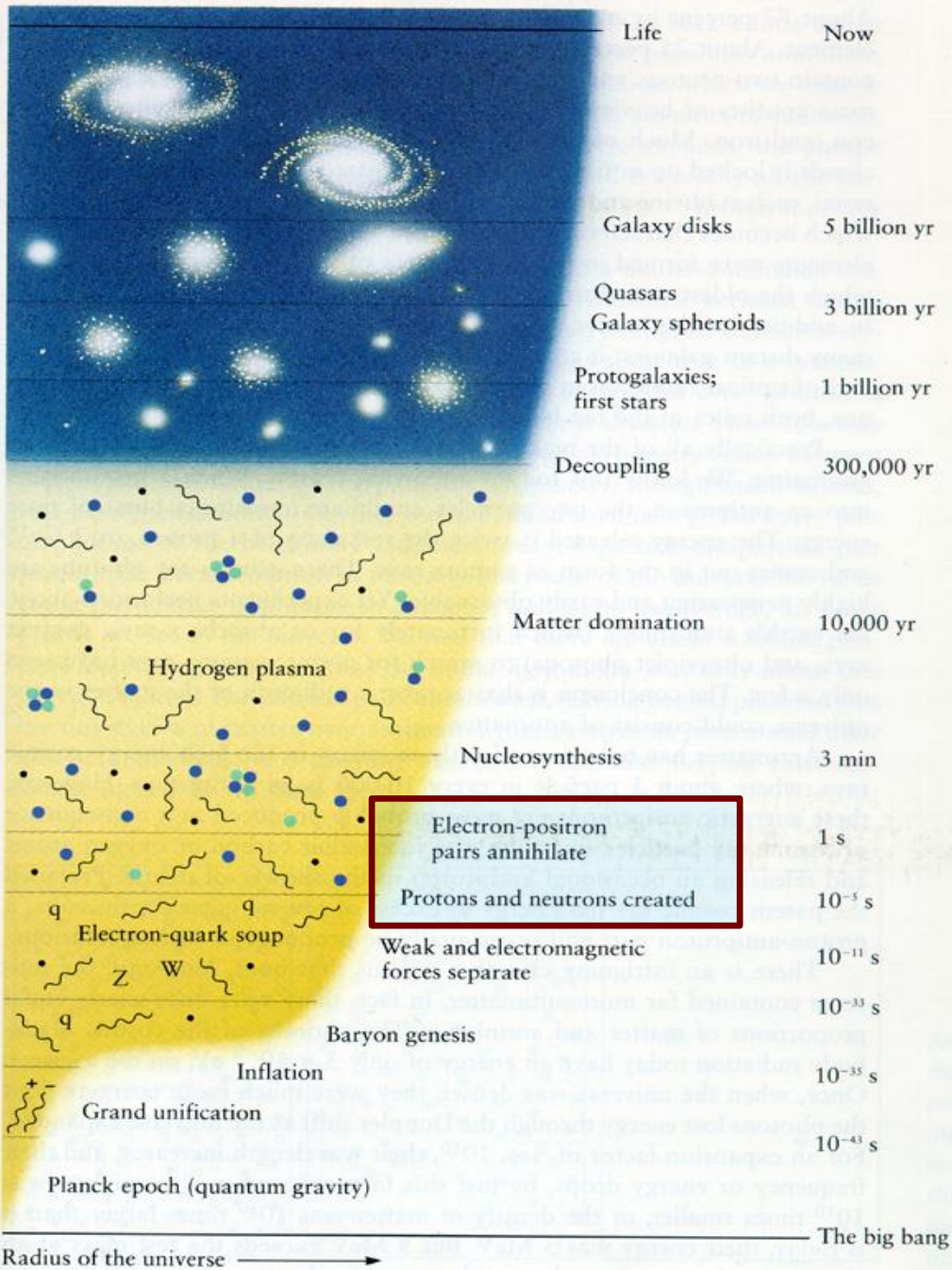
# A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



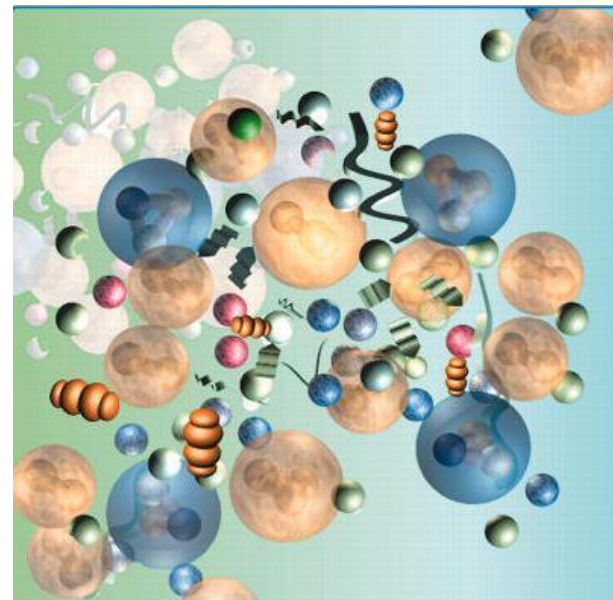
## $10^{-10}$ с. Електрослаба Ера



- $10^{-10}$  сек (100 GeV,  $10^{15}$  K,  $10^{-18}$  m)
- Слабите взаимодействия се отделят от ЕМ
- Кварките и антикварките анихилират
- Лек превес на материя
- W и Z – бозоните се разпадат
- Всички масивни частици се разпадат
- Енергията на фотоните спада под 1 GeV

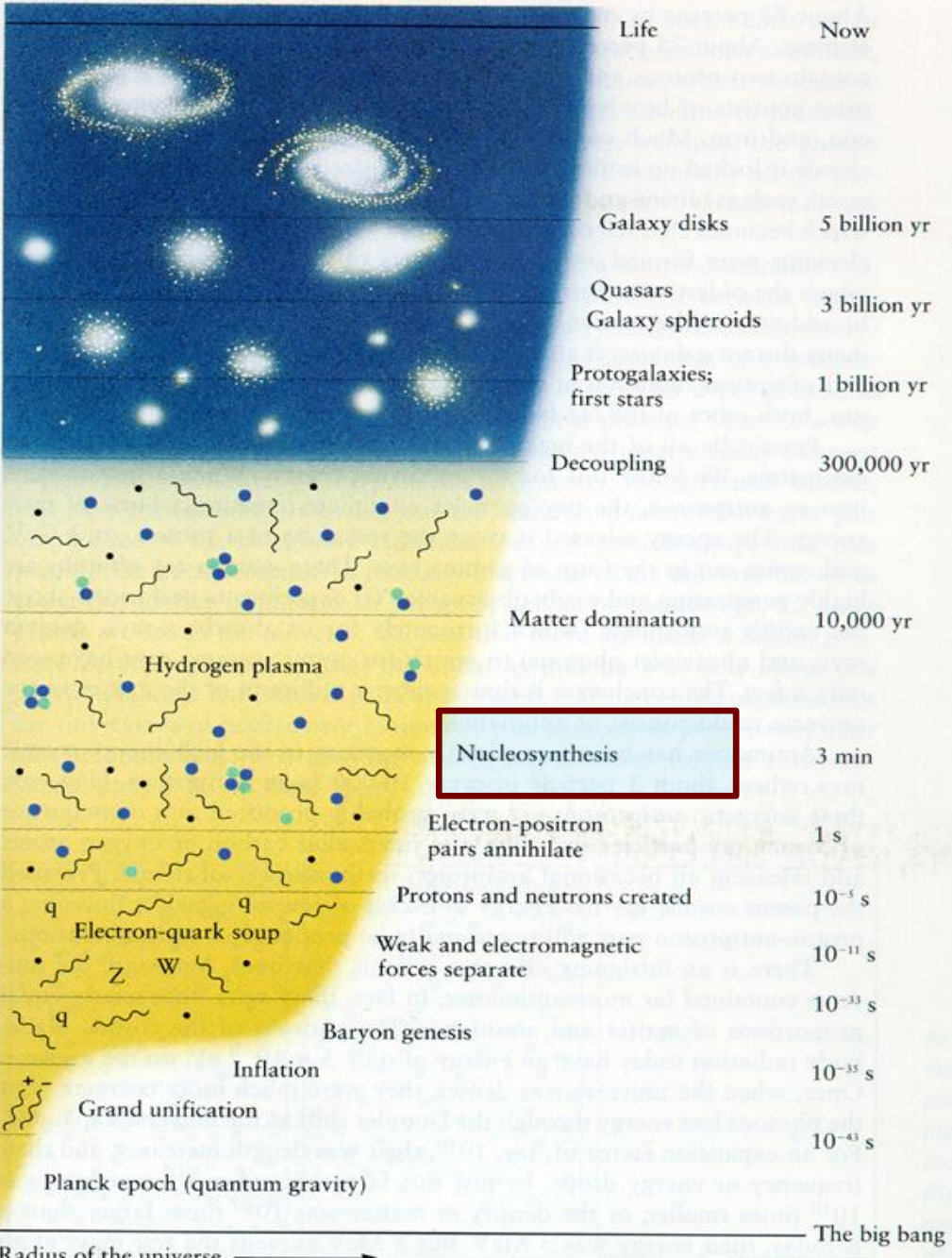


## 10<sup>-4</sup> с. Протони и Неутрони

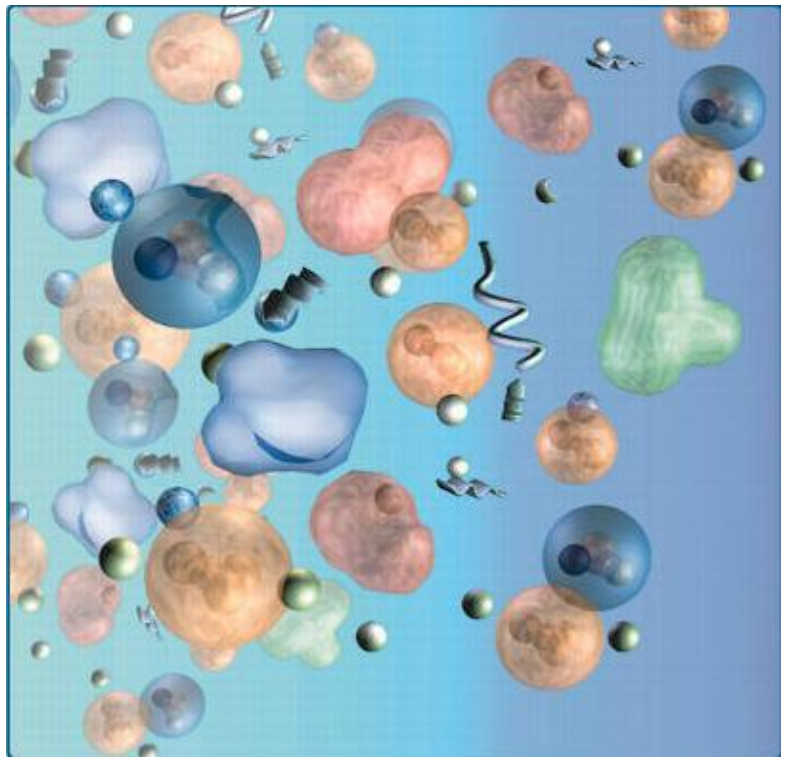


- 10<sup>-4</sup> сек (1 GeV, 10<sup>13</sup> K, 10<sup>-16</sup> m)
- Спира аниhilацията на qq
- Кварките се свързват в протони и неутрони p=uud, n=udd n/p = 50:50
- 1 сек (1 MeV, 10<sup>10</sup> K, 10<sup>-15</sup> m)
- Неутрината престават да взаимодействат
- e<sup>+</sup> e<sup>-</sup> – аниhilират, остават само e<sup>-</sup>
- n/p = 25: 75 n → p e ν

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



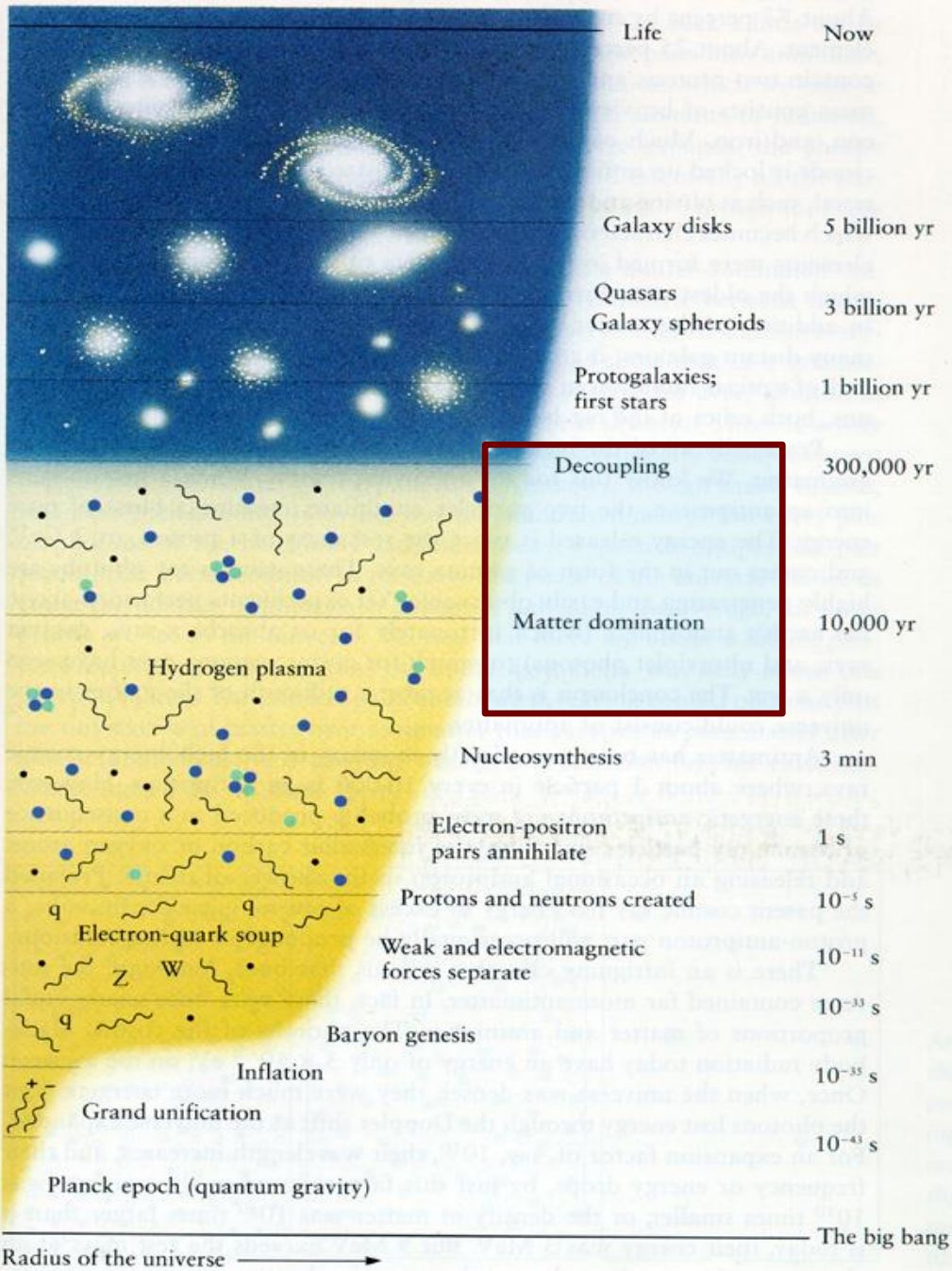
100 с. Формиране на ядра



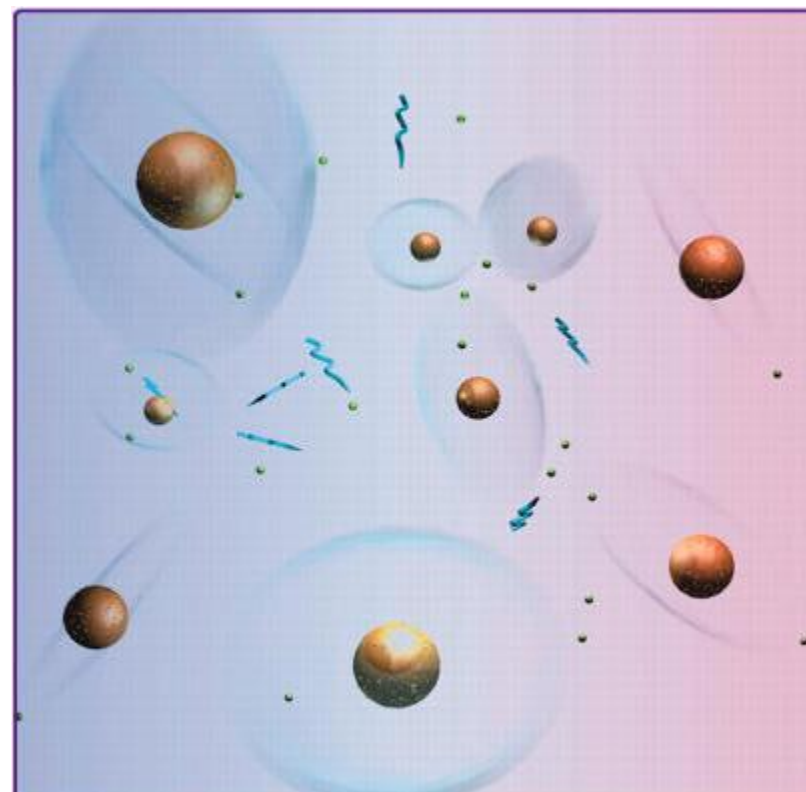
- 3 мин ( $0.1 \text{ MeV}$ ,  $10^9 \text{ K}$ ,  $10^{-12} \text{ m}$ )
- Формиране на He ядра
- Неутроните се захващат в ядрата
- Останалите се разпадат  $n/p = 13: 87$
- Вселената се състои от  $H/He = 75:25$
- Електронен газ



# A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

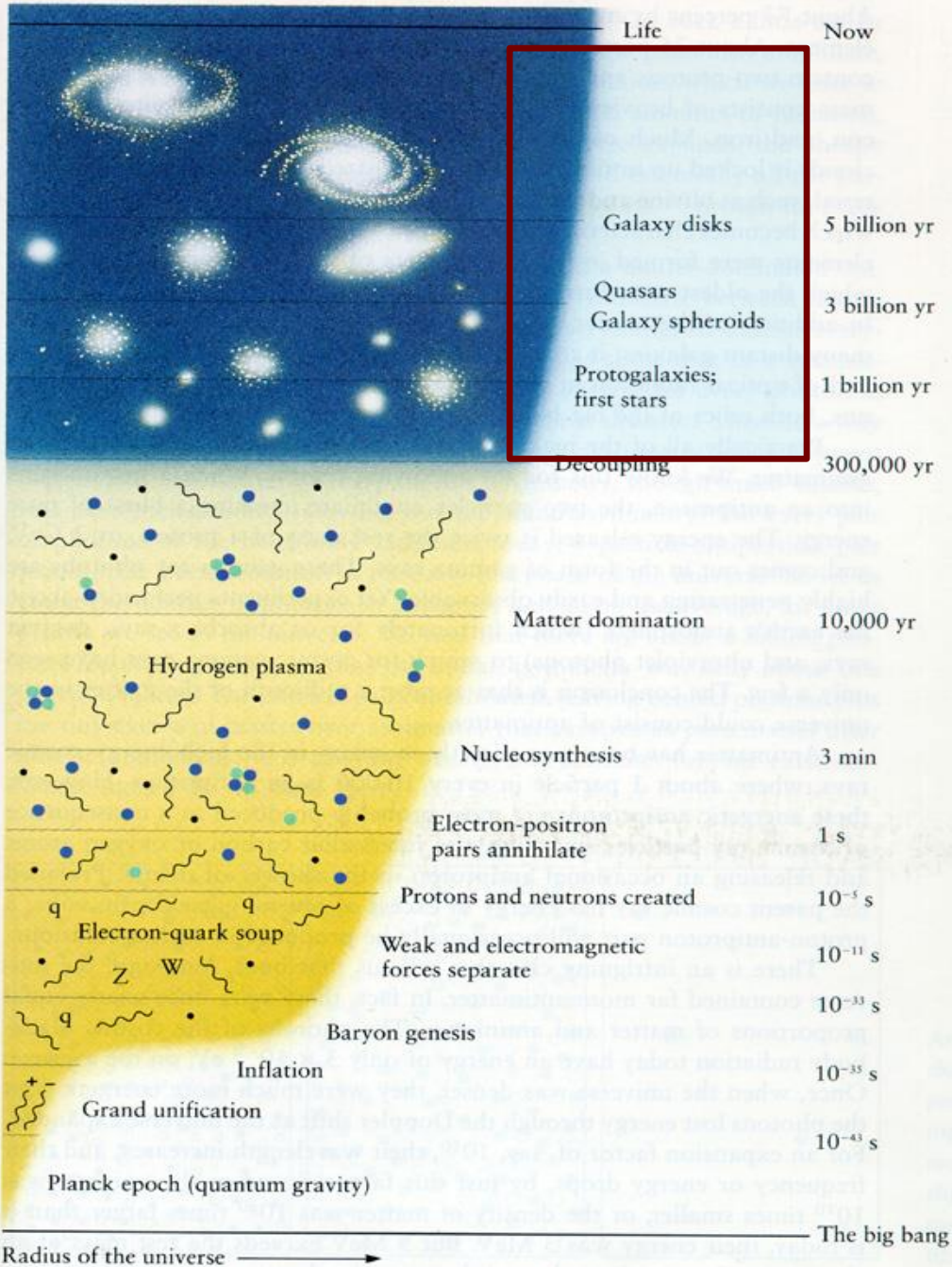


## 300 000 г. Атоми и светлина



- 300 000 г. ( $0.5$  eV,  $6000$  K,  $10^{-10}$  m)
- Формиране на H, He, Li атоми
- Фотоните не се поглъщат от атомите
- Прозрачна Вселена (реликново излъчване)

# A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

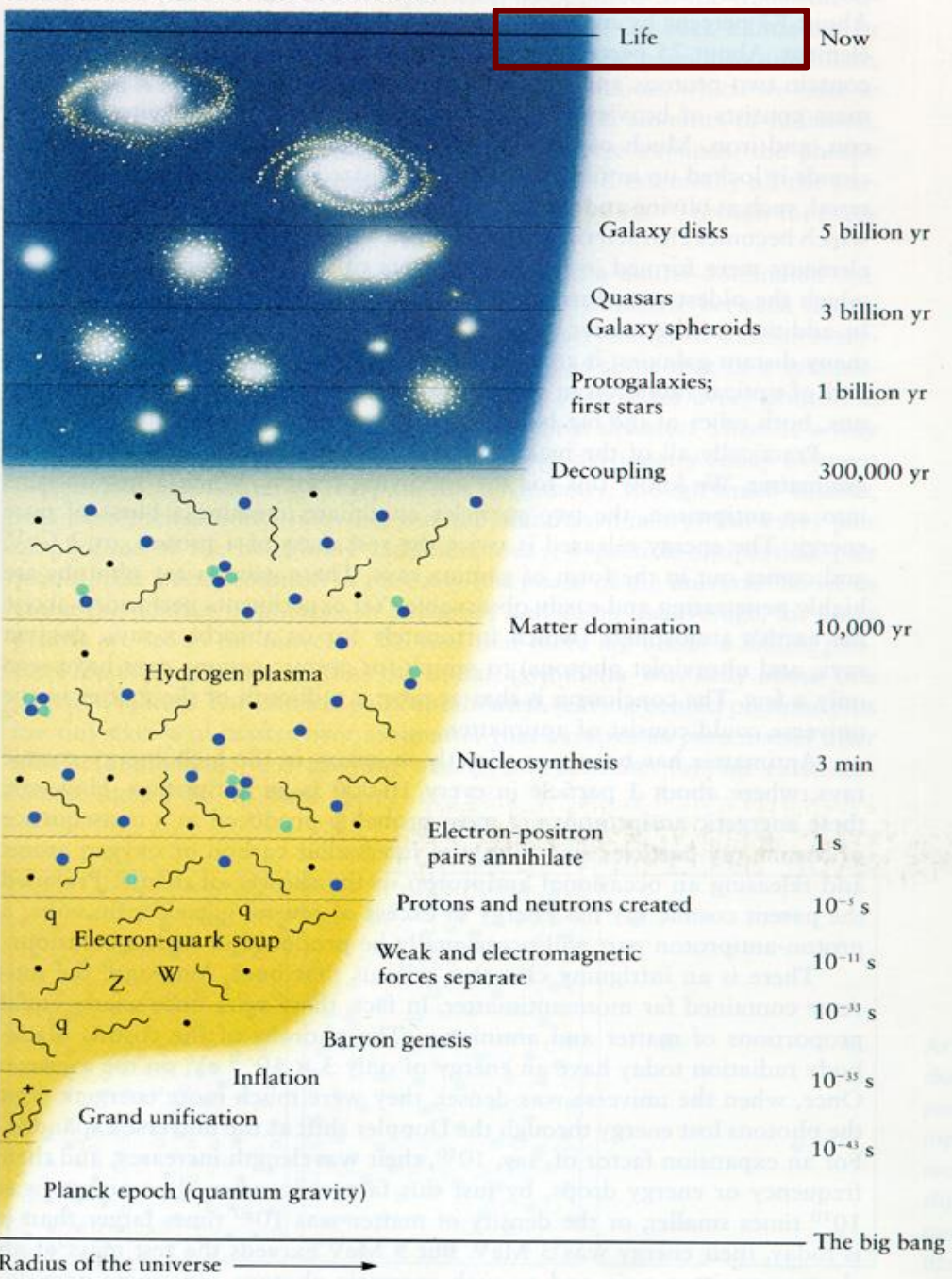


## 10<sup>9</sup> г. Формиране на галактики

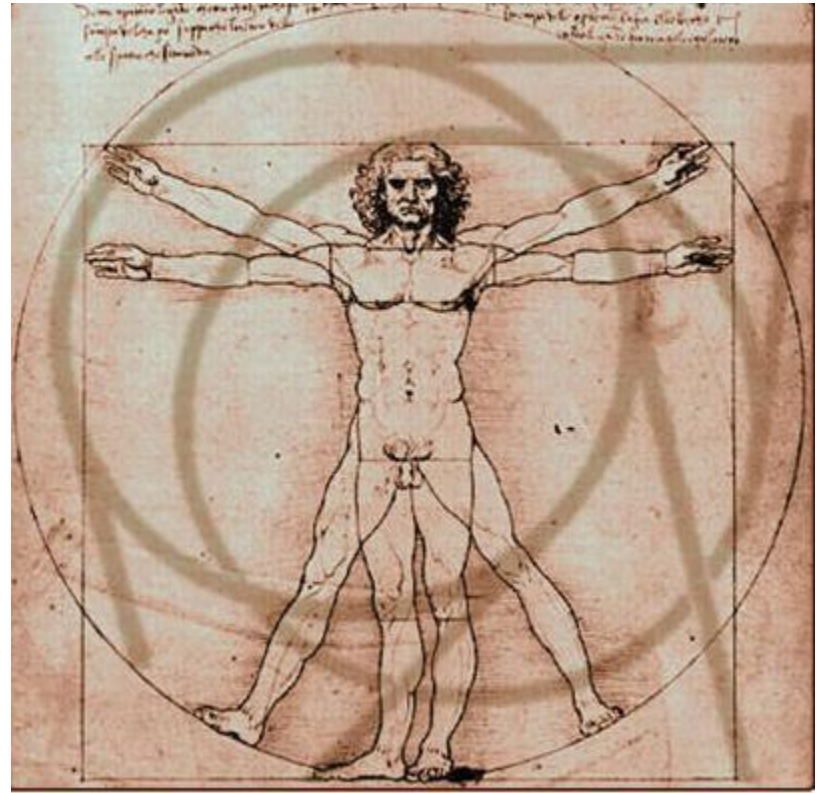


- 10<sup>9</sup> г. 18 К
- Локални флуктуации – звезди и галактики
- Синтез на тежки ядра – С - Fe
- Разпространение на тежки елементи - свръхнови

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



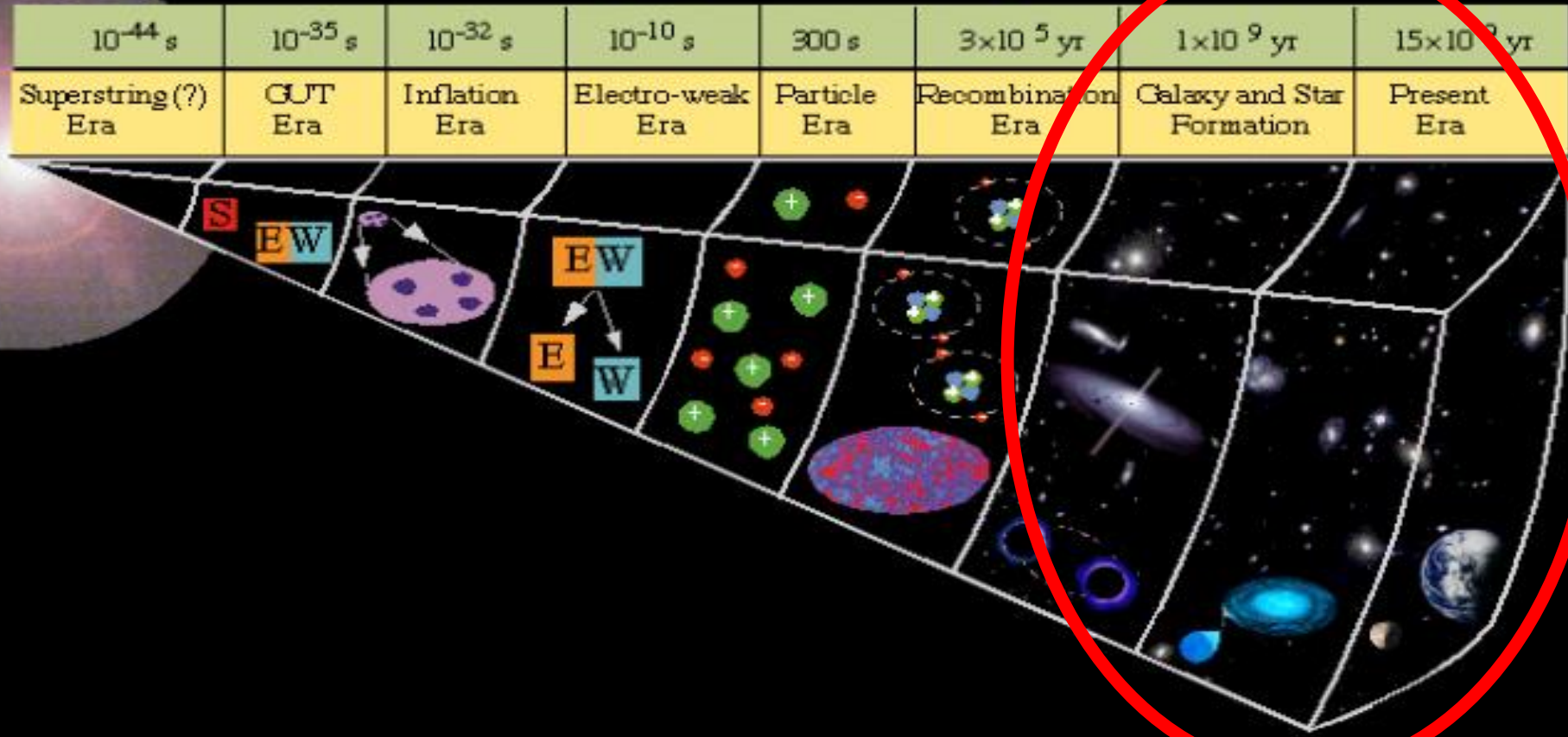
**14x10<sup>9</sup> г. Днес**



- 14x10<sup>9</sup> г. 3 К
- Атоми, молекули, хора
- Задават въпроси
- Кои са фундаменталните съставлящи на материята?
- Как те взаимодействат по между?

## Big Bang

Time →



**Наблюдаема информация от измервания с телескопи**



# Goal of the experiment



## □ Physical objects reconstructed

- Tracks of charged particles
- photons
- Electrons
- Hadron jets
- Missing energy
- Muons

## □ Goals

- Precise test of SM
  - measurement of its parameters
  - search for deviations from the SM predictions
- New physics
  - New particles
  - New phenomena