

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.

Тъмна материя

L. Litov



План



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

➤ 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?

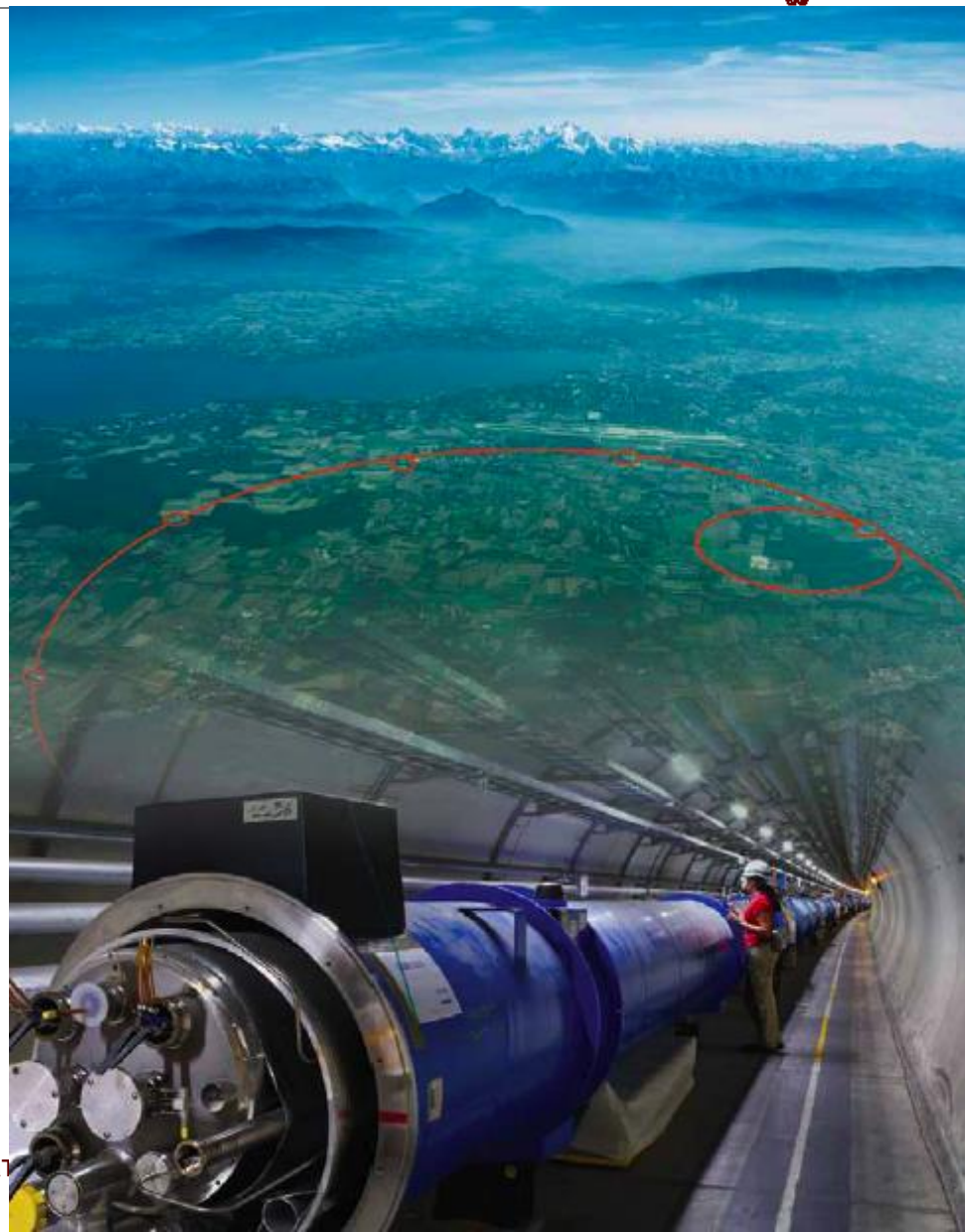


Материя

Трябва да отговорим на два
фундаментални въпроса

-Кои са елементарните
съставлящи на материята?

-Кои са фундаменталните
сили контролиращи
тяхното поведение ?

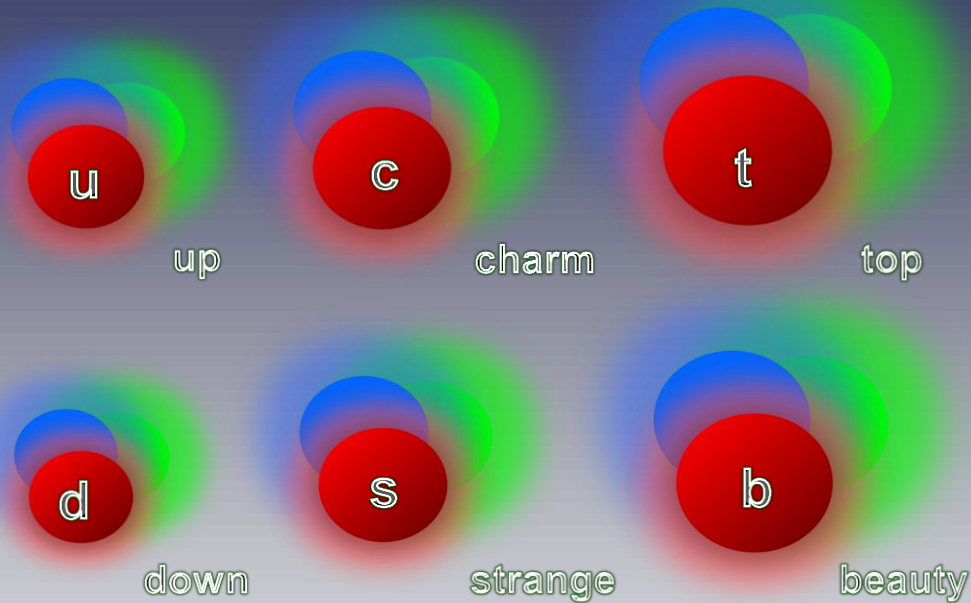


Стандартен модел

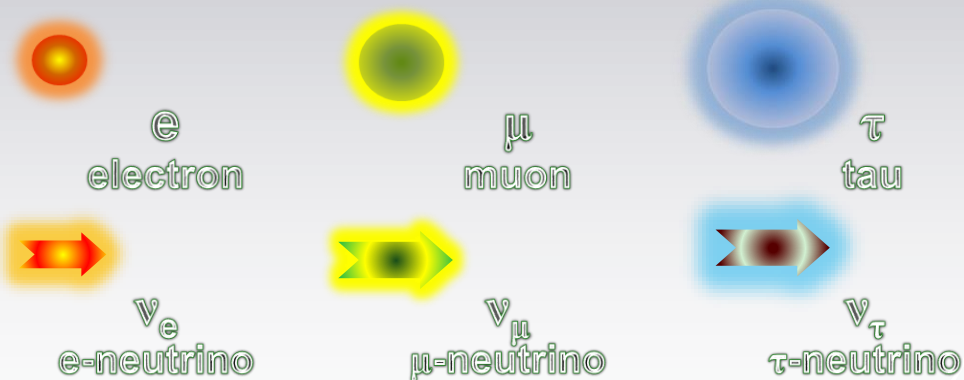


1-st generation 2-nd generation 3-rd generation

quarks

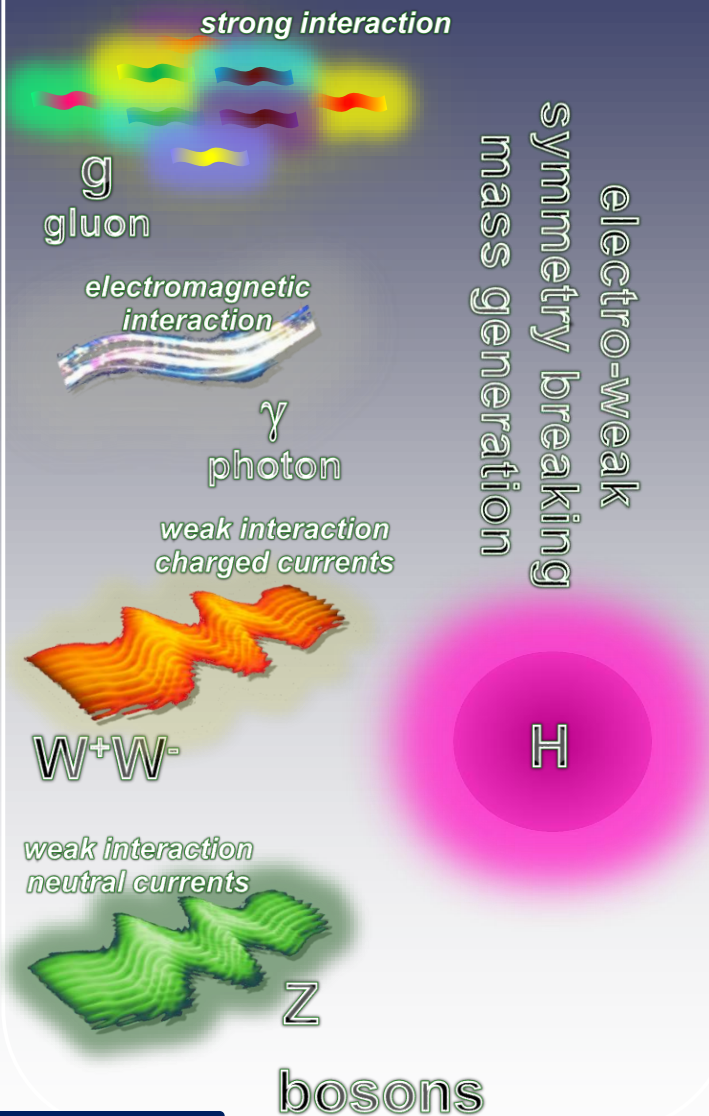


leptons



fermions

force carriers



bosons

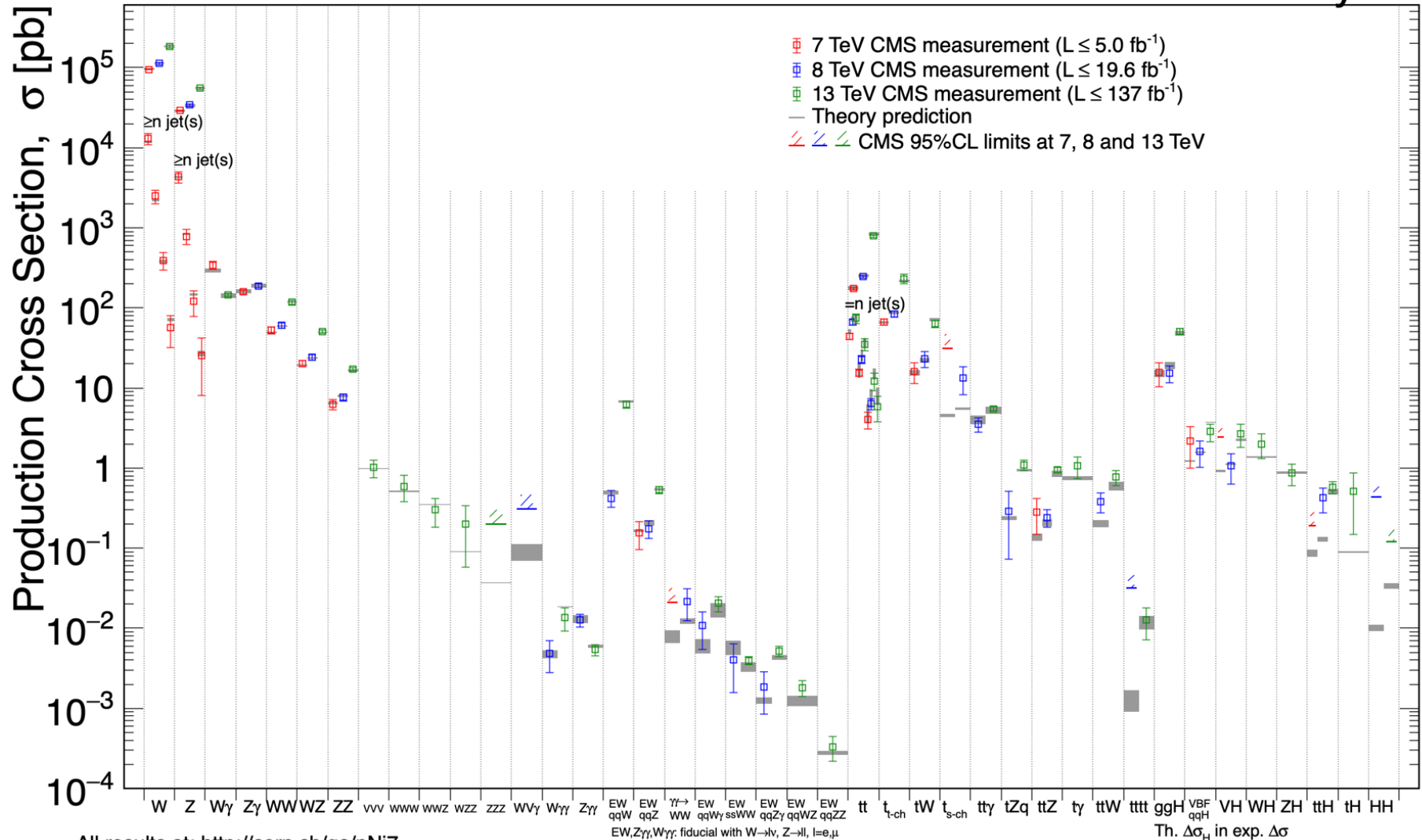


Прецизна проверка на СМ



June 2021

CMS Preliminary



All results at: <http://cern.ch/go/pNj7>
L. Litov

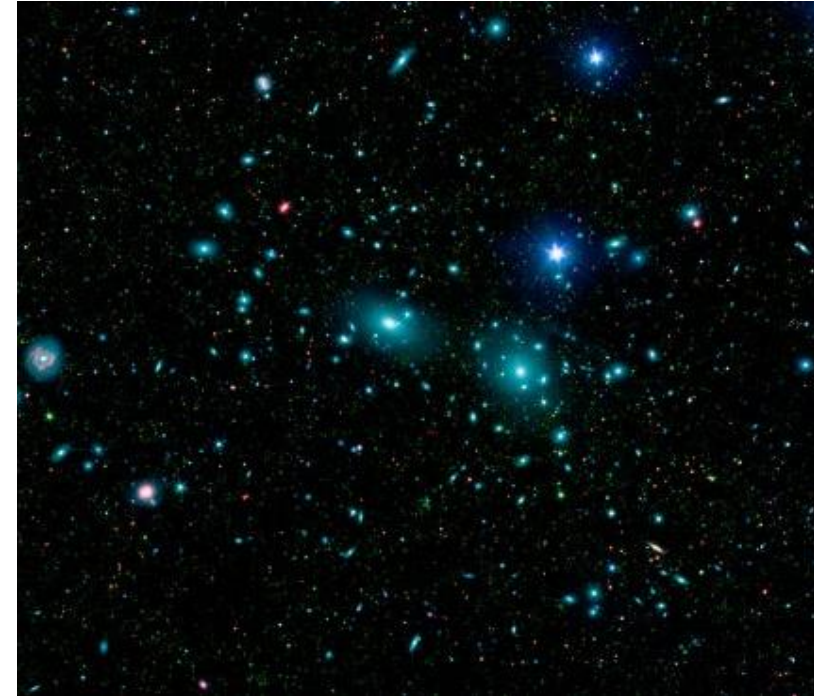
Темна материя

Sofia, 2 June 2022

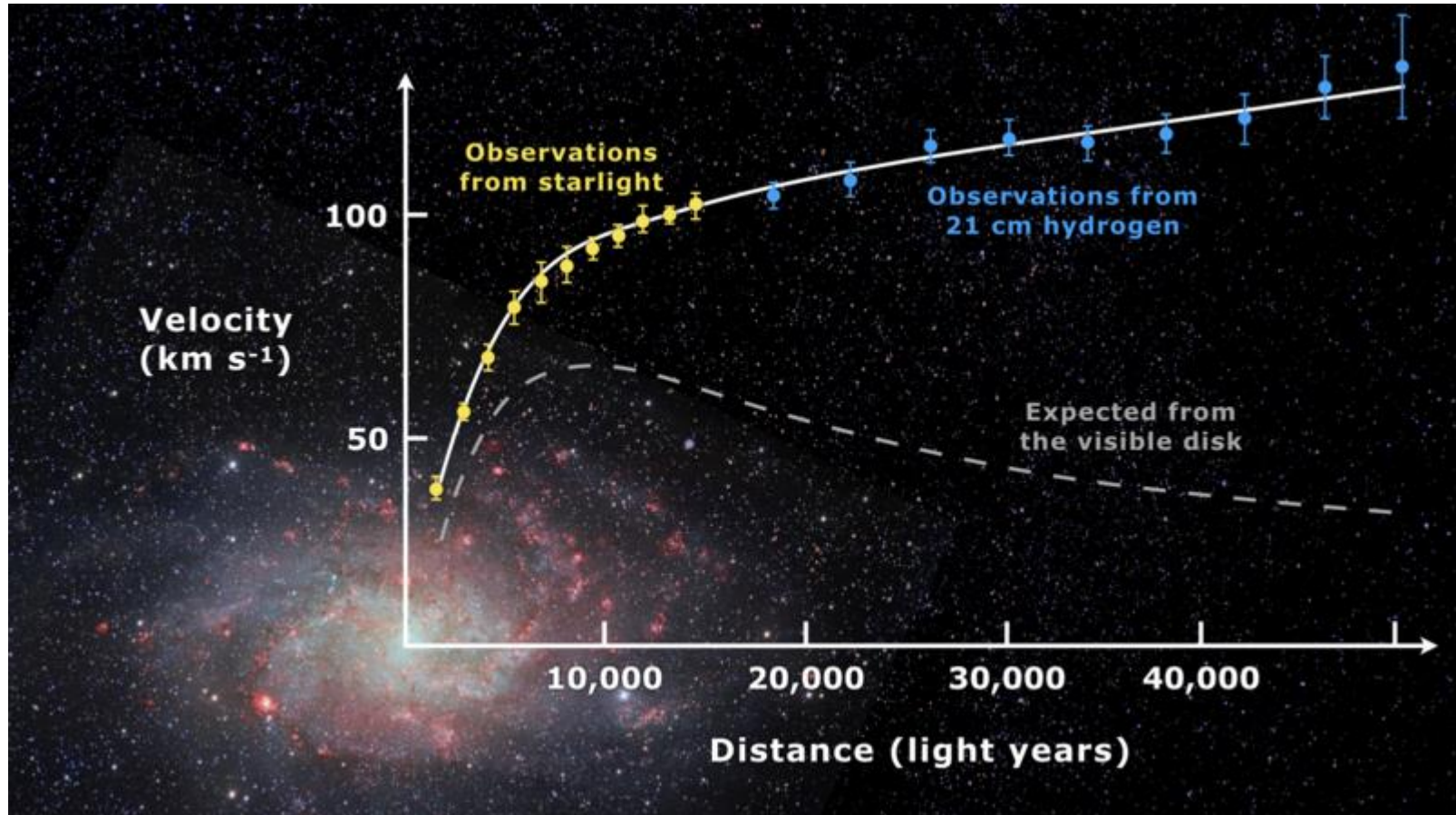


Тъмна материя

- 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

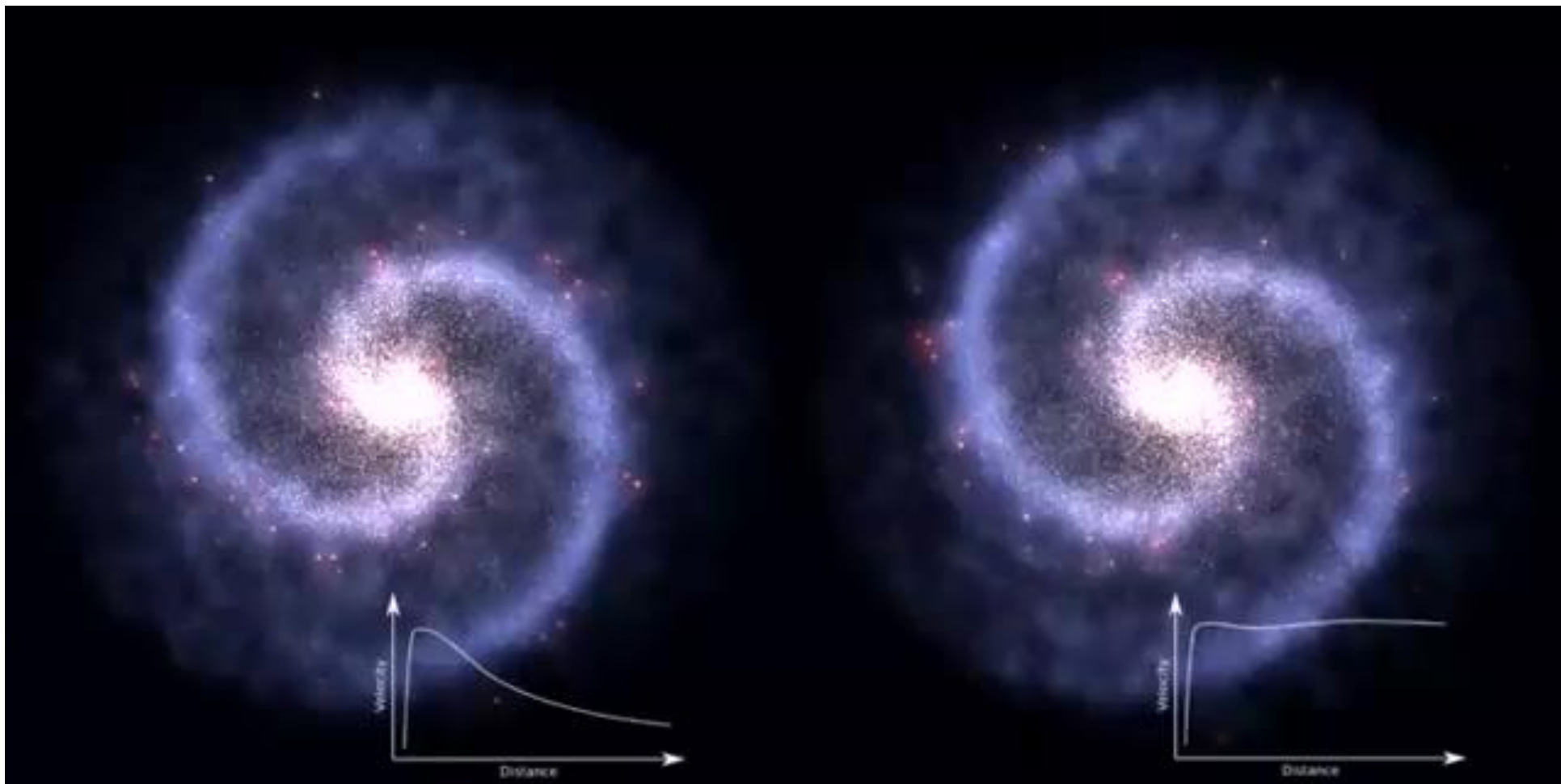


Coma cluster



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

Спирална галактика Messier 33



Галактика без и с тъмна материя

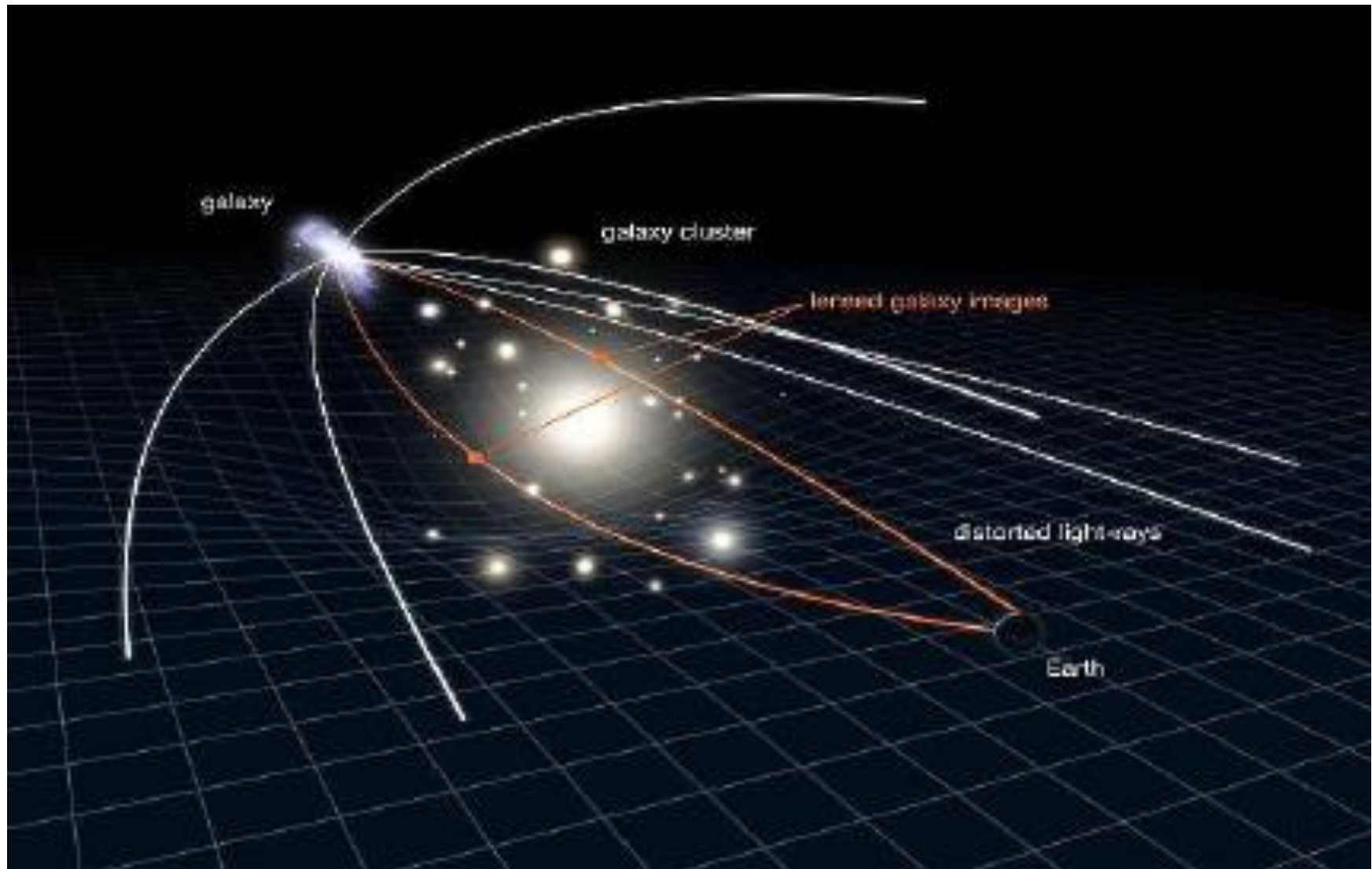


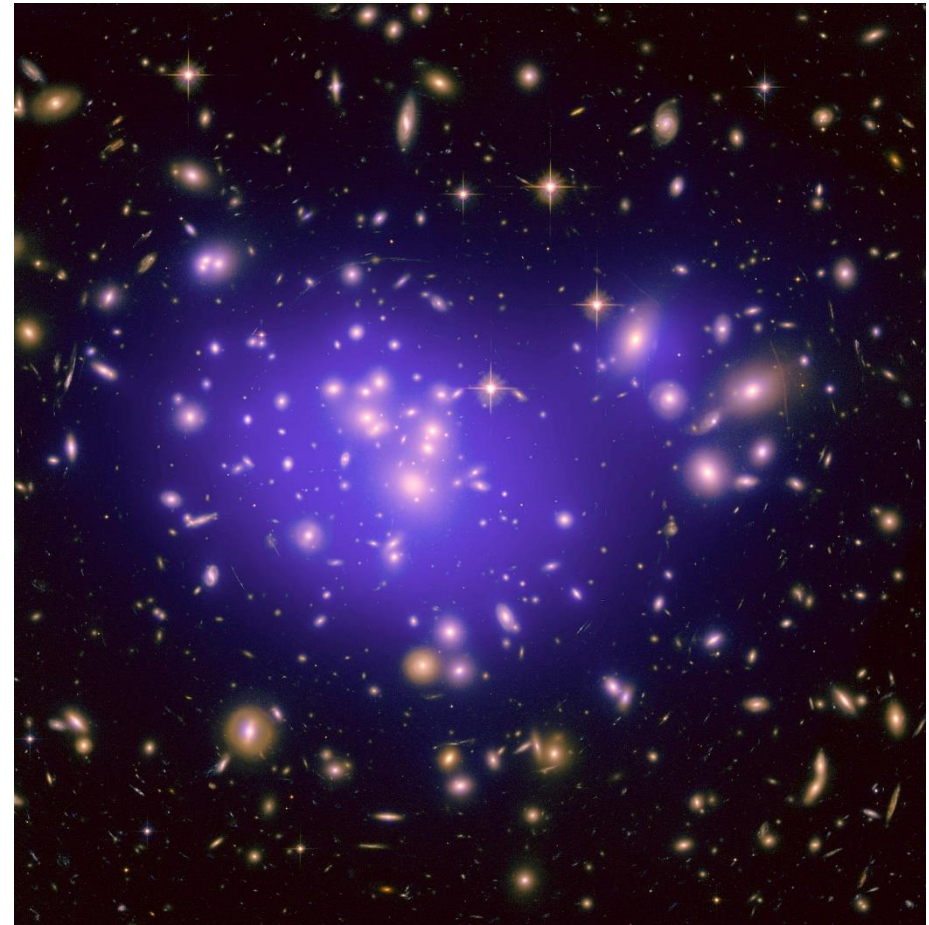
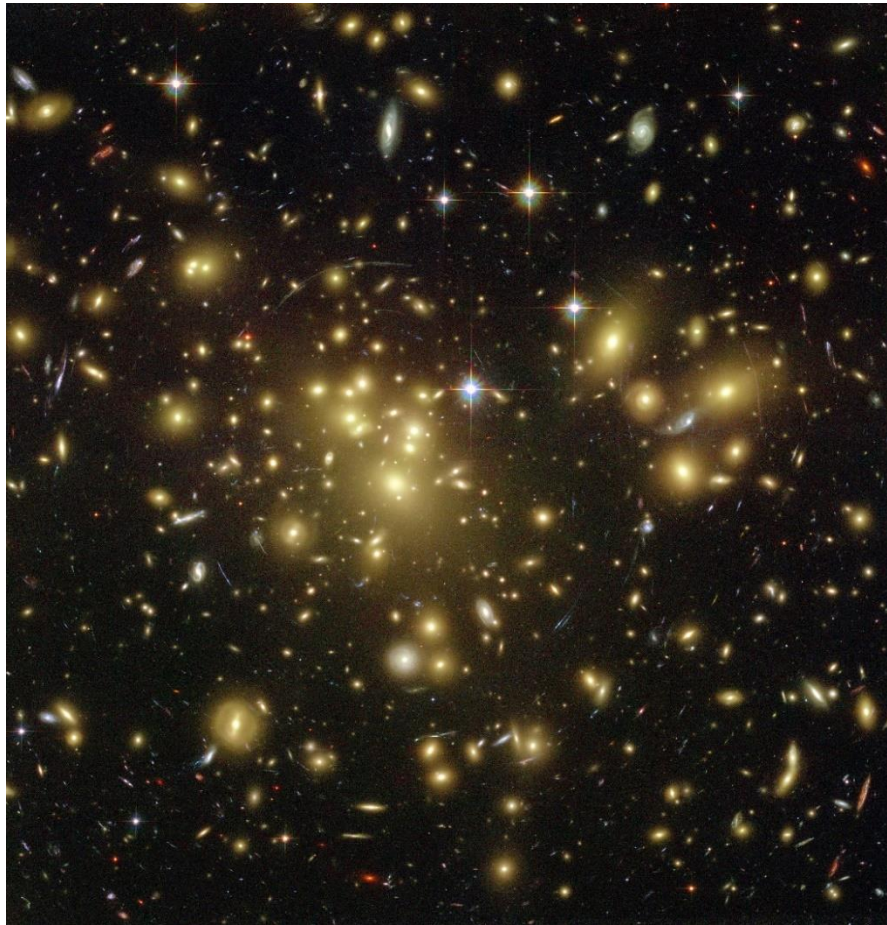
Близки и отдалечени галактики

- 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/>

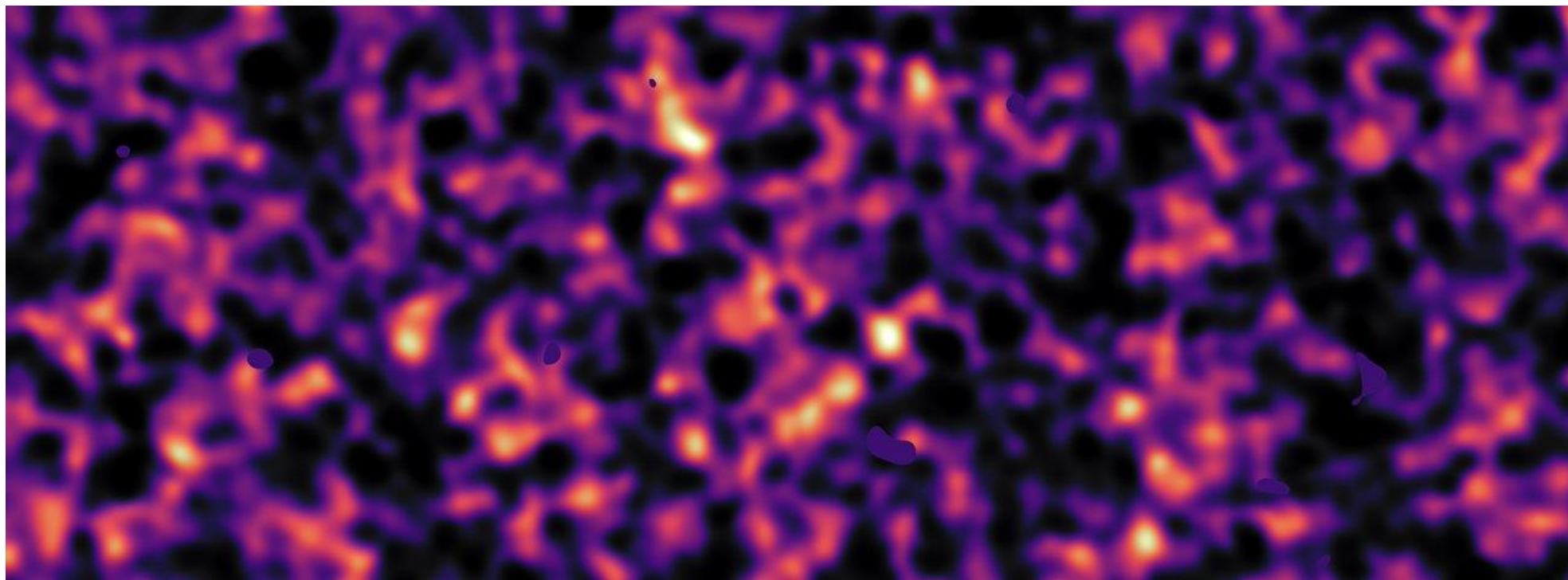


[arXiv:1702.04348](https://arxiv.org/abs/1702.04348)

MACS J416.1-2403

Тъмна материя

- 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)



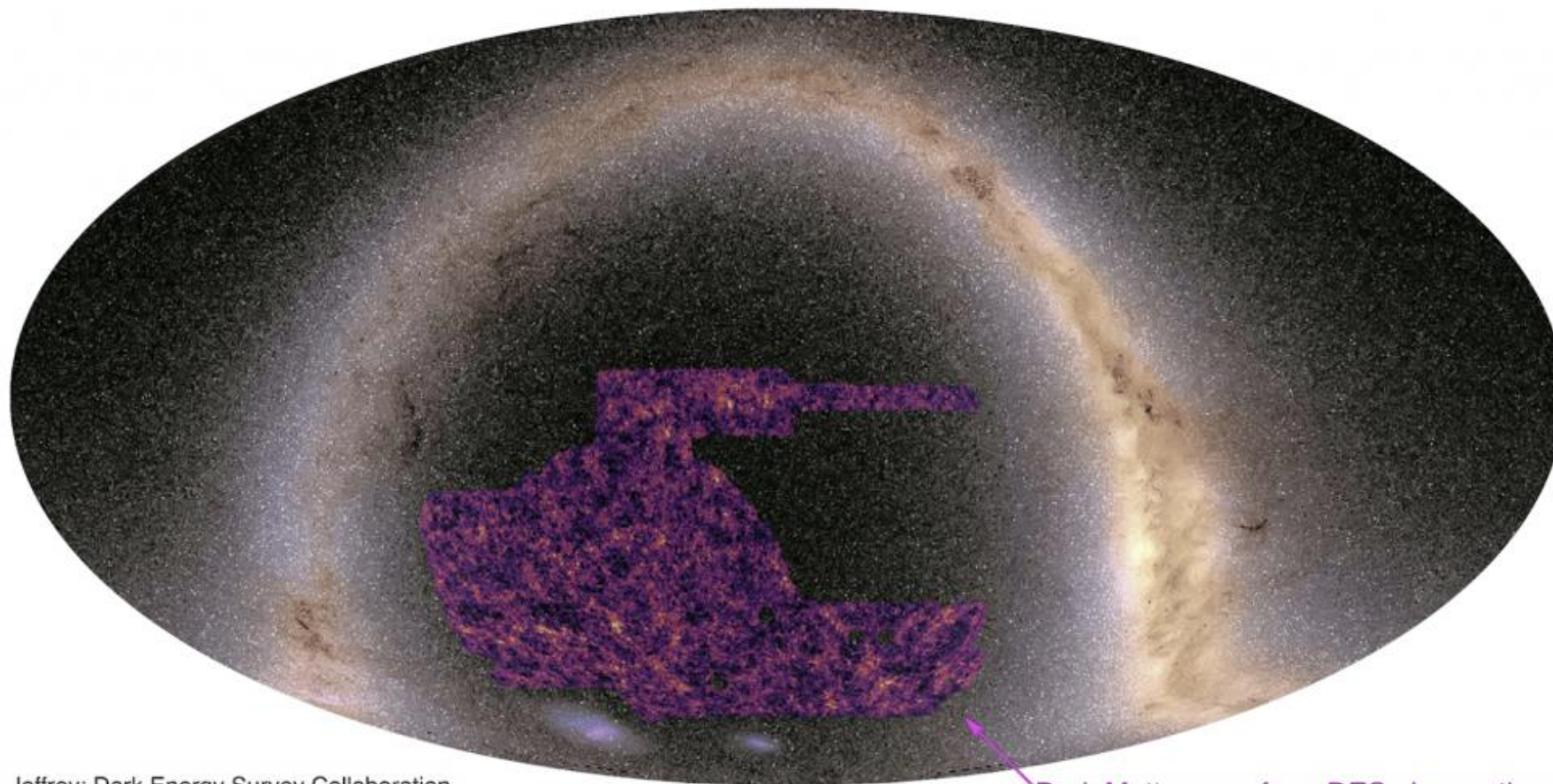
KiDS изследване

MNRAS 000, 1–49 (2016)

3 милиона галактики

до 6 милиарда светлинни години

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

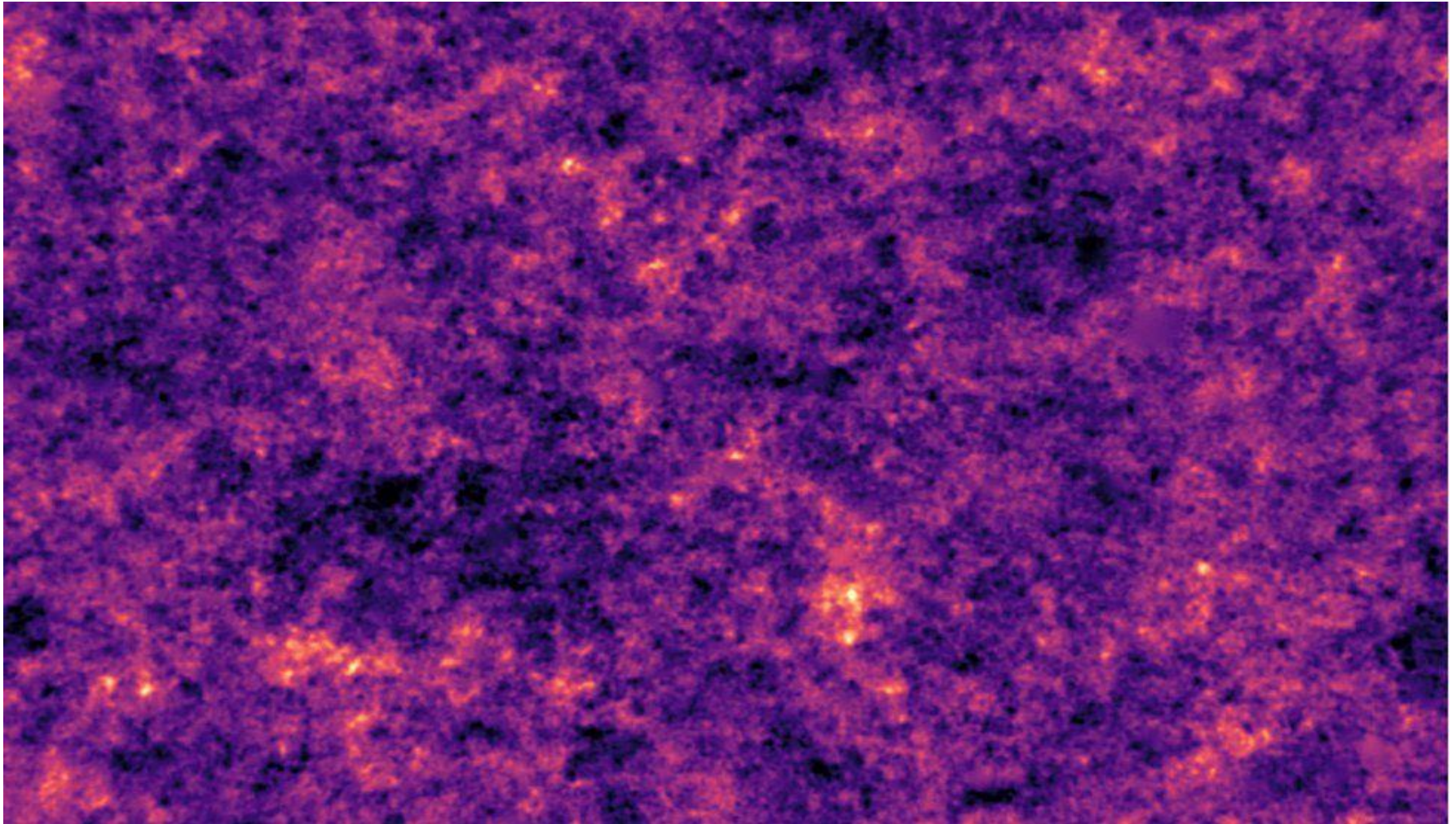


N. Jeffrey; Dark Energy Survey Collaboration

Dark Matter map from DES observations

Dark Energy Survey Collaboration 2021
100 million galaxies

Разпределение на тъмната материя



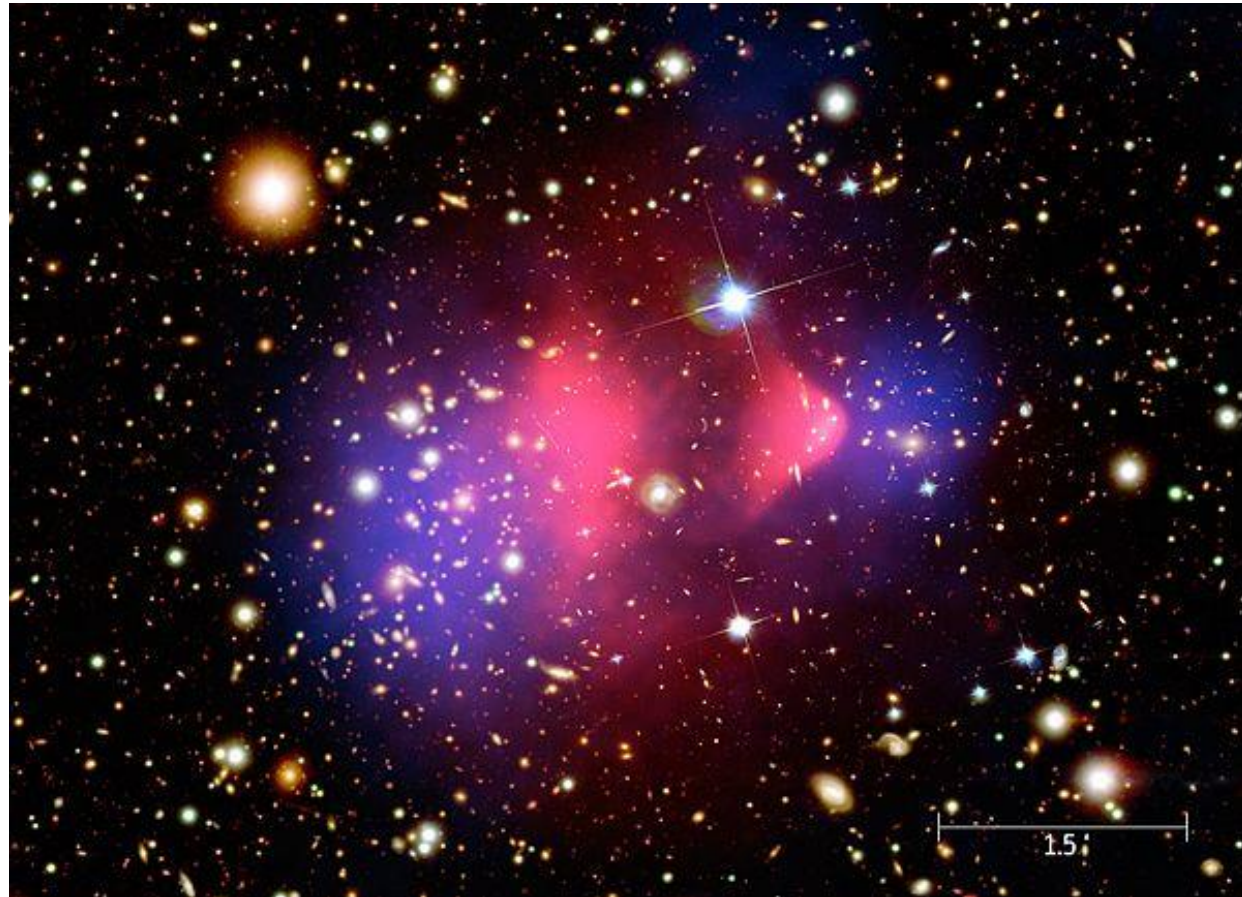
Dark Energy Survey Collaboration 2021 - 100 million galaxies



<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



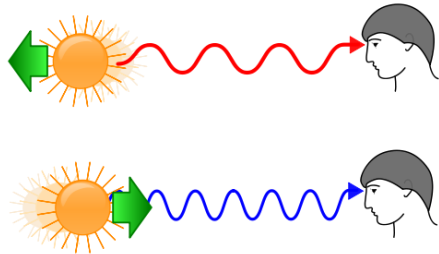
Пространство-време

□ 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

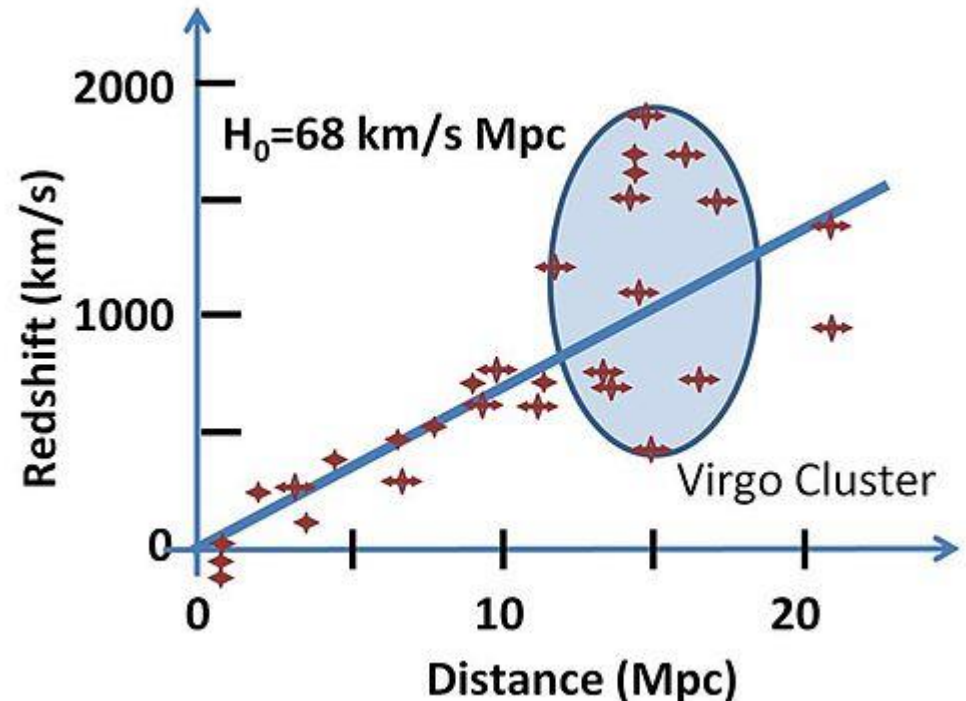
Отдалечаващ се обект – червено

Приближаващ се обект – синьо

Измервайки отместването - скорост

Закон на Hubble

Линейна зависимост между разстоянието до галактиката и червеното отместване



Вселената се разширява!

□ 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

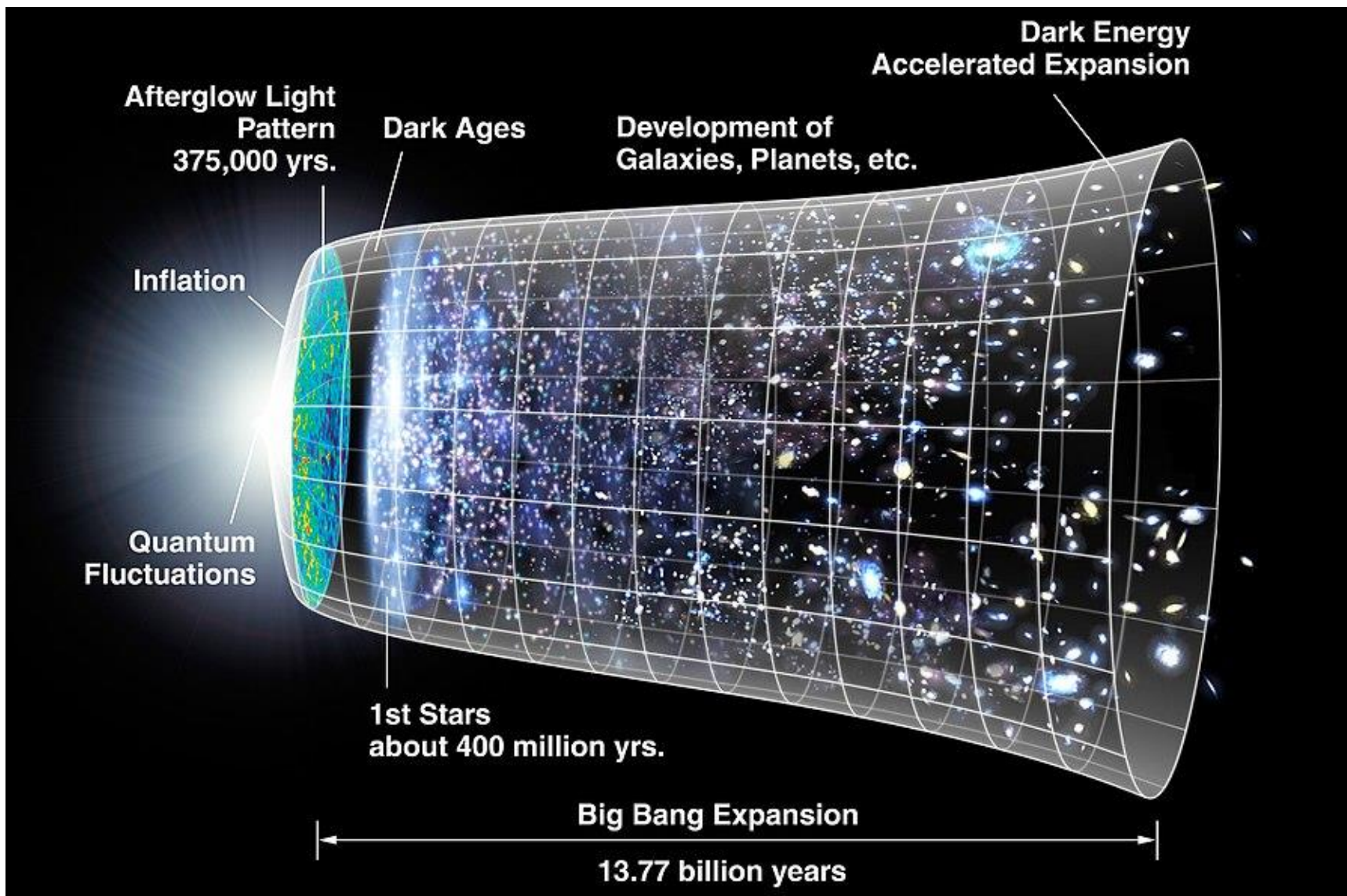
$$a(t) \propto t^{2/3}$$

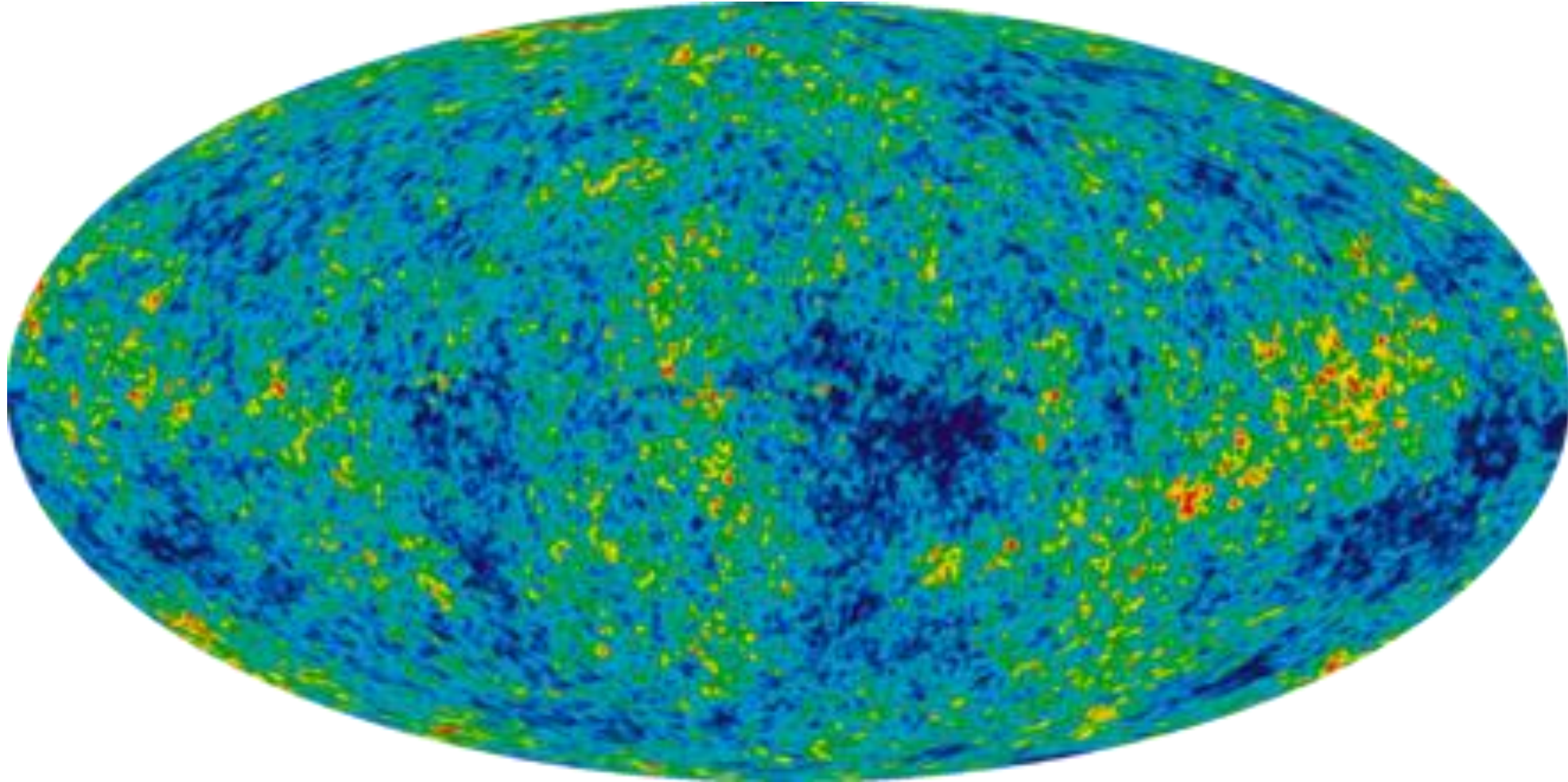
➤ Ера доминирана от тъмната енергия

- ✓ От 9.8×10^9 г.
- ✓ Ускоряващо се разширение

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

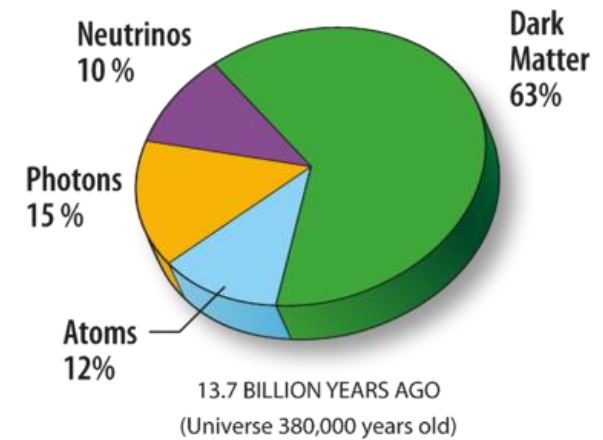
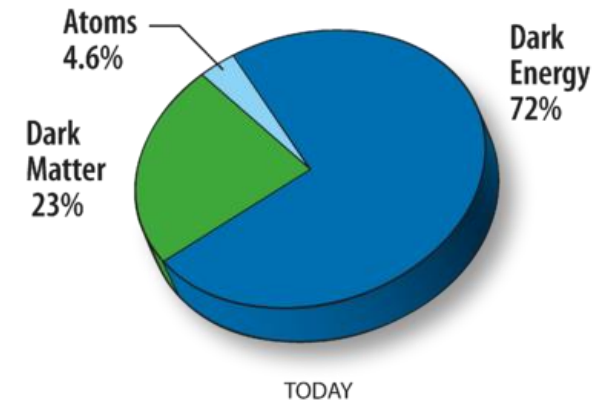
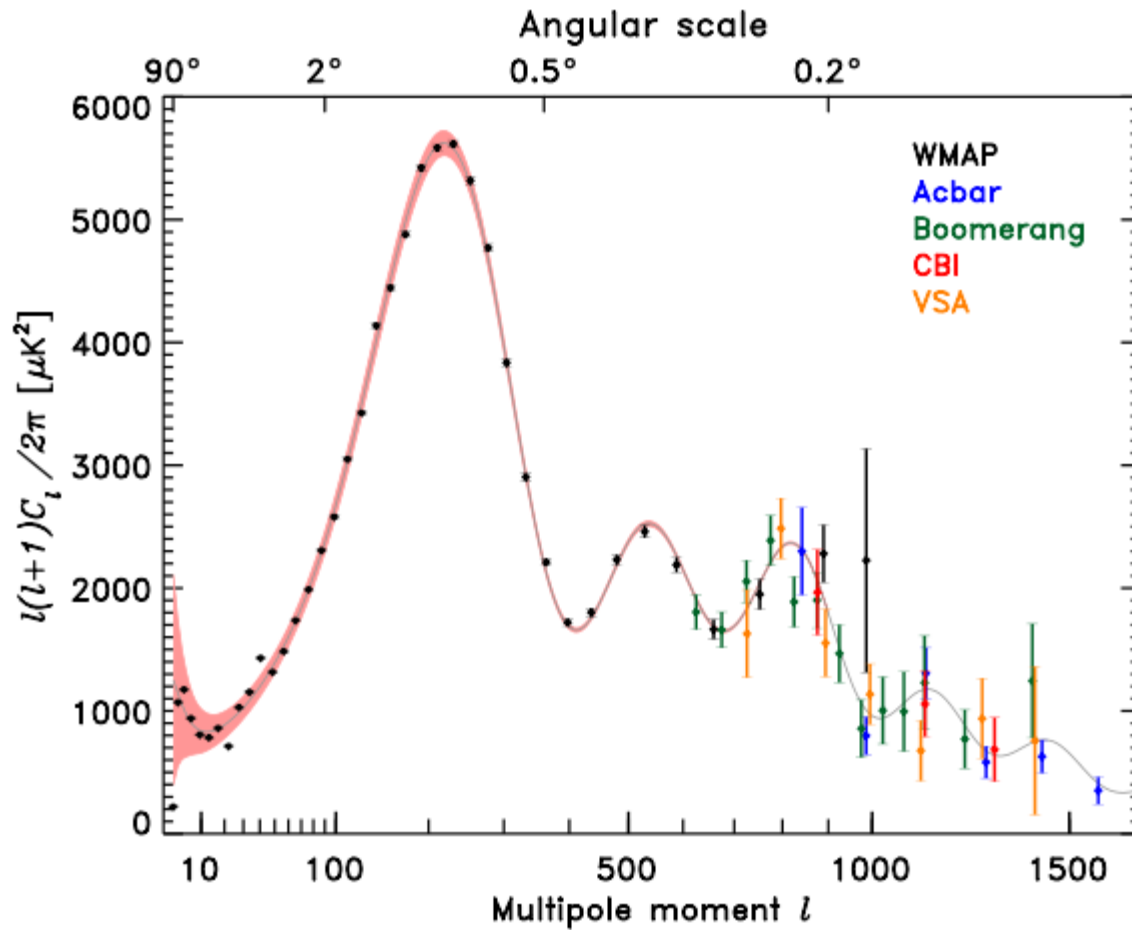
Разширяваща се Вселена



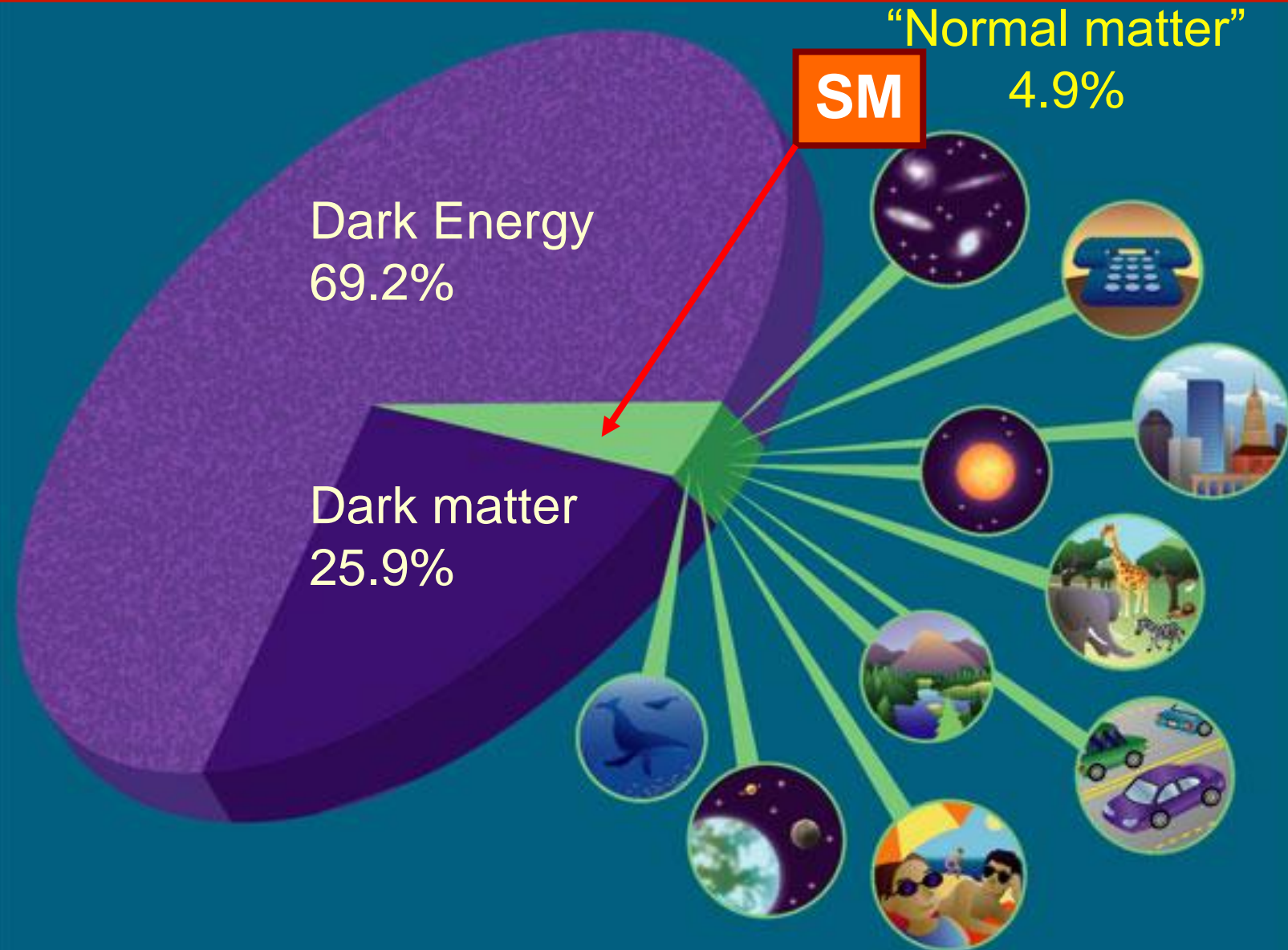


$T \sim 2.8 \text{ K}$

Нееднородности $\sim 1/100\,000$



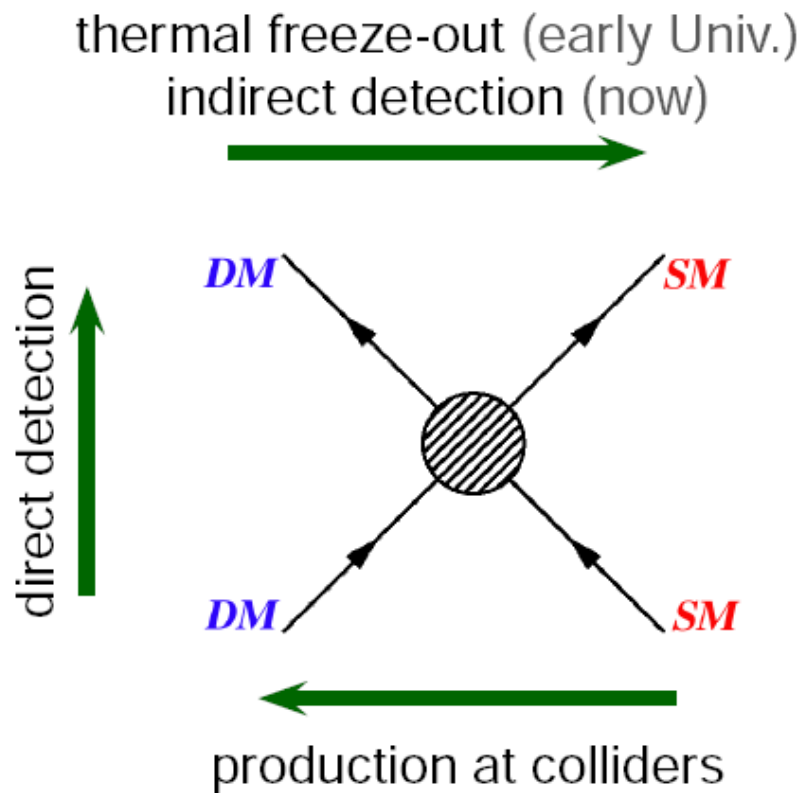
Какво е съдържанието на Вселената ?



От какво е съставена тъмната материя

.....Ако взаимодействия поне слабо 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**

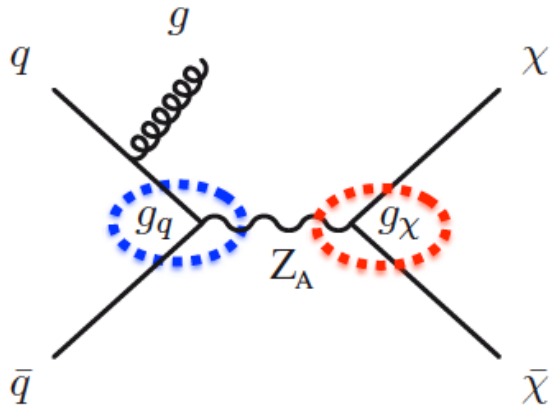
➤ **Как можем да получим
 сигнал от „невидим“ обект?**



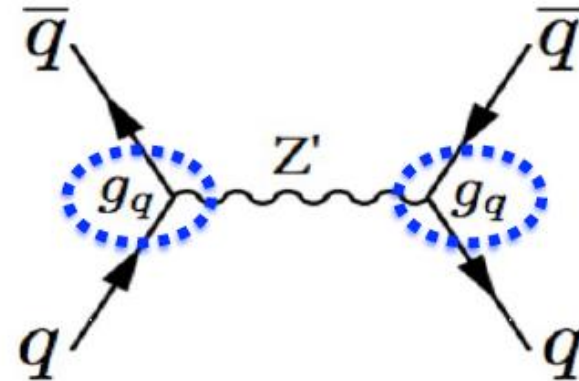
- ✓ LHC Run 1 (до 2012): DM интерпретация в рамките на ефективни полеви модели
 - ✓ Контактни взаимодействия, валидни ако масата на преносителя \gg предадения импулс
 - ✓ 7 и 8 TeV енергия
 - ✓ Невалидни при голям трансфер на енергия

- 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- χ сигнал
SM \rightarrow преносител \rightarrow DM



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

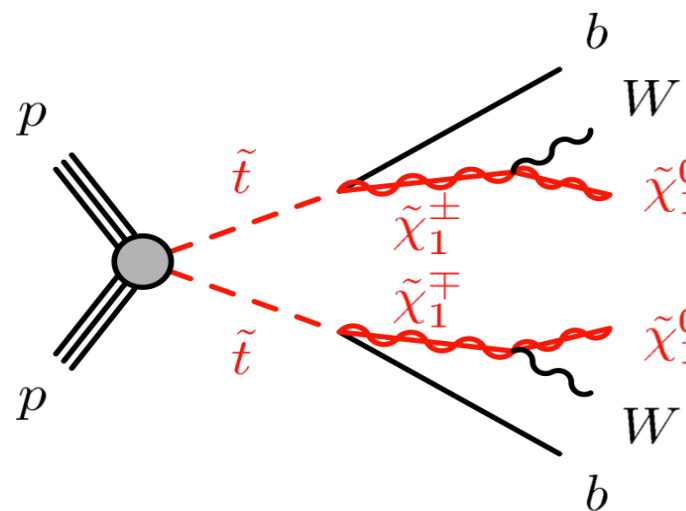
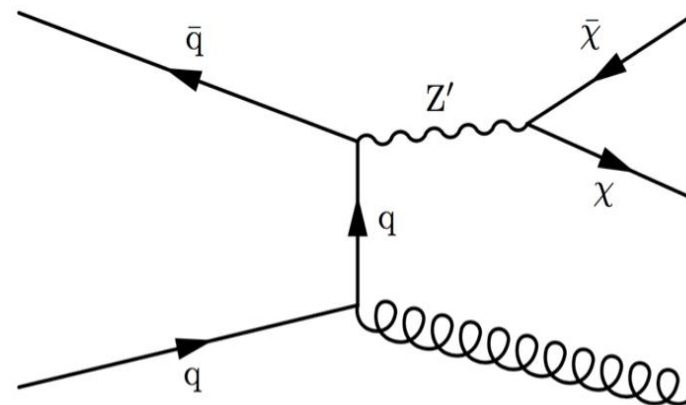


**mono-jet, mono-photon, mono-Z,
 mono-W, mono-H**

**dijet, ditop, dilepton
 резонанси**

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

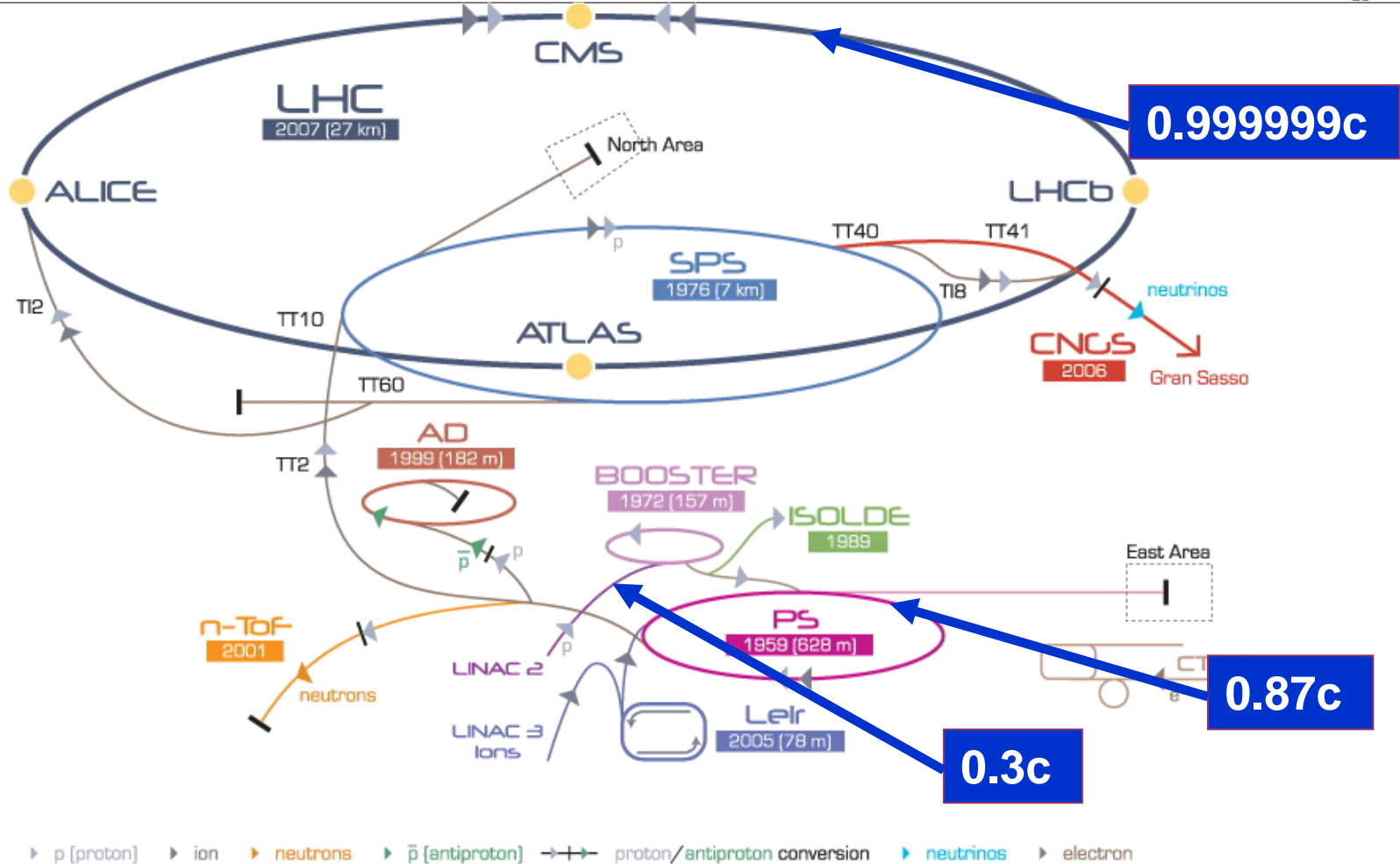




LHC и експеримента CMS



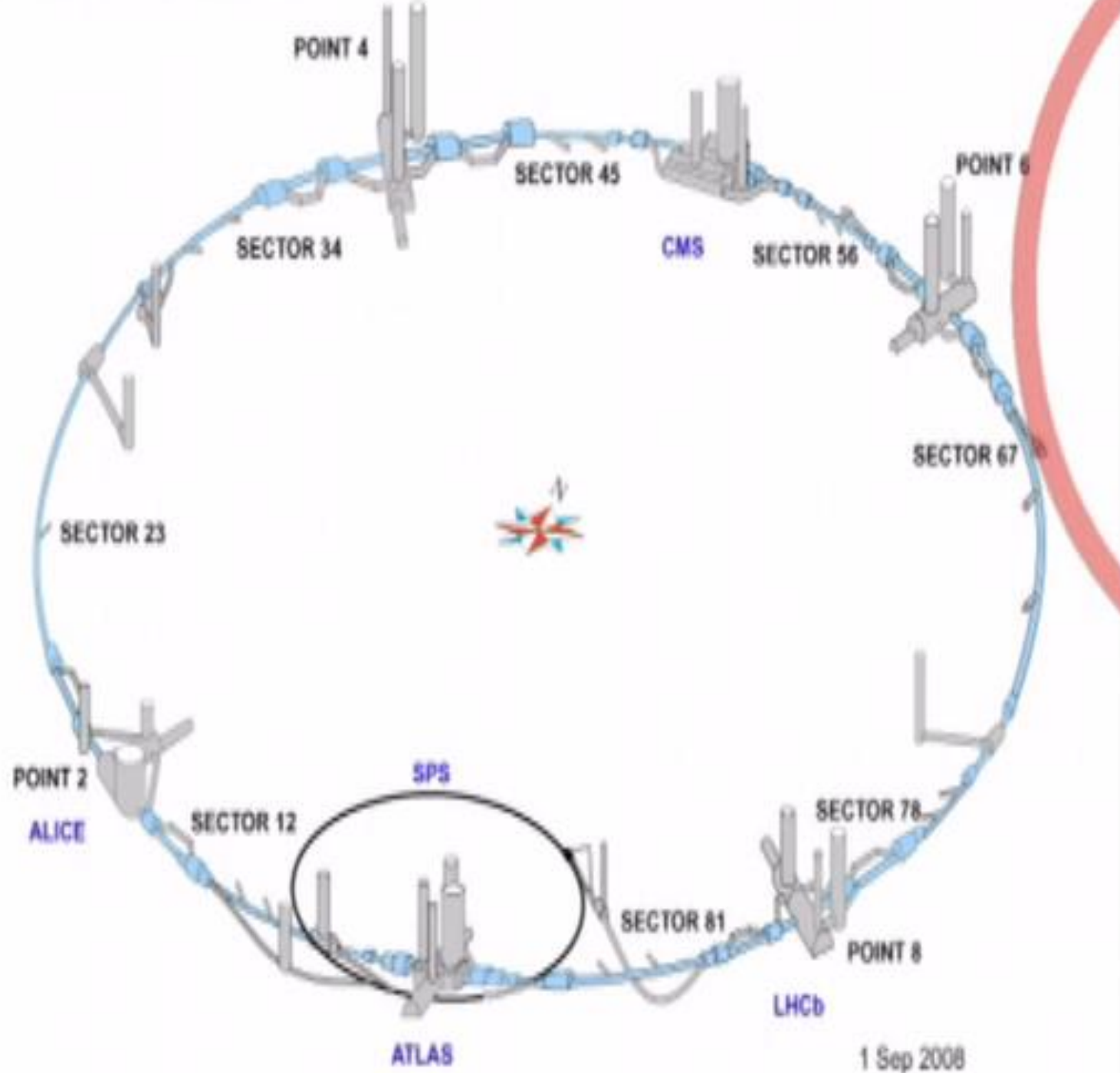
Accelerator complex at CERN



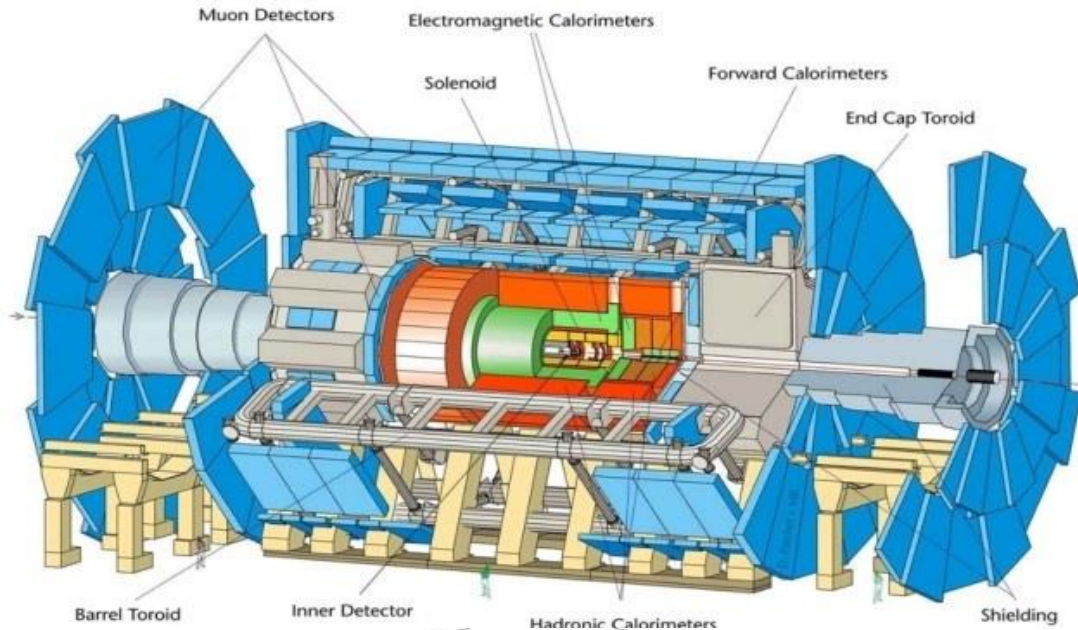
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

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

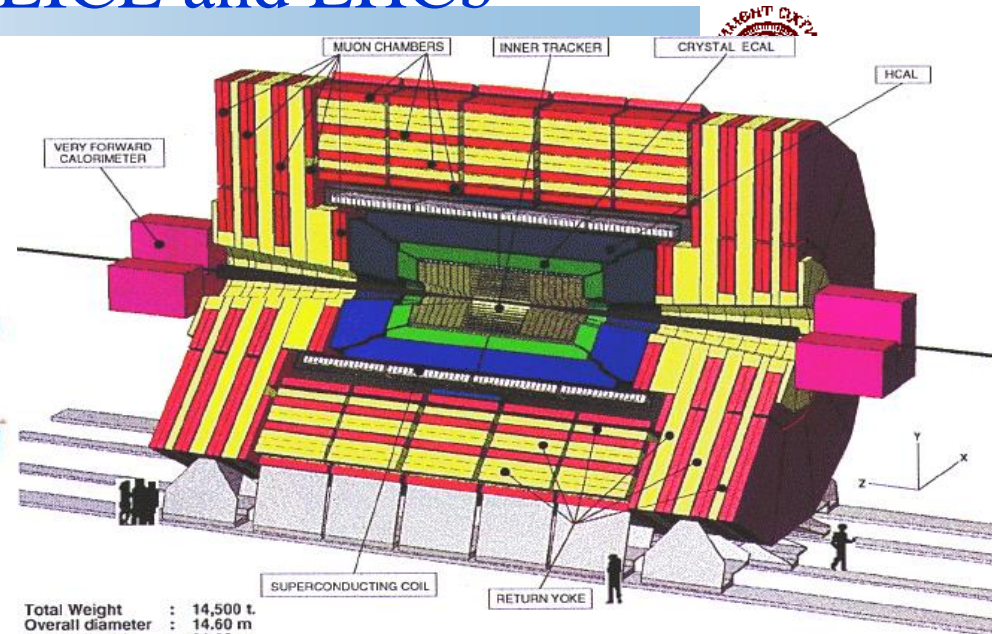
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



ATLAS, CMS, ALICE and LHCb

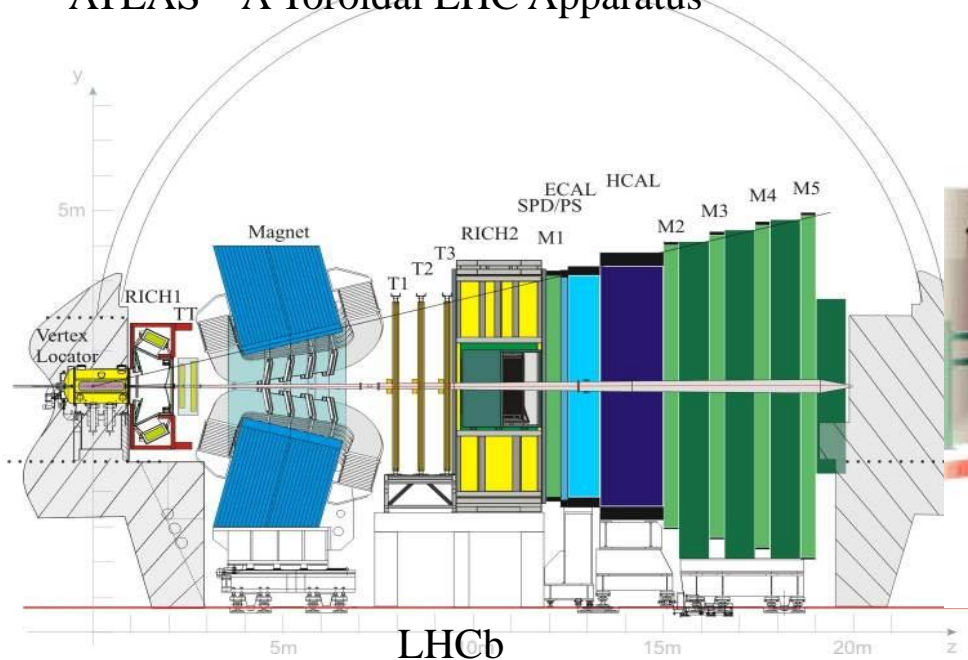


ATLAS – A Toroidal LHC Apparatus



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

CMS – Compact Muon Solenoid



LHCb



клария

ALICE – A Large Ion Collider Experiment

Sofia, 2 June 2022

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 $\sim 18,000\text{A}$

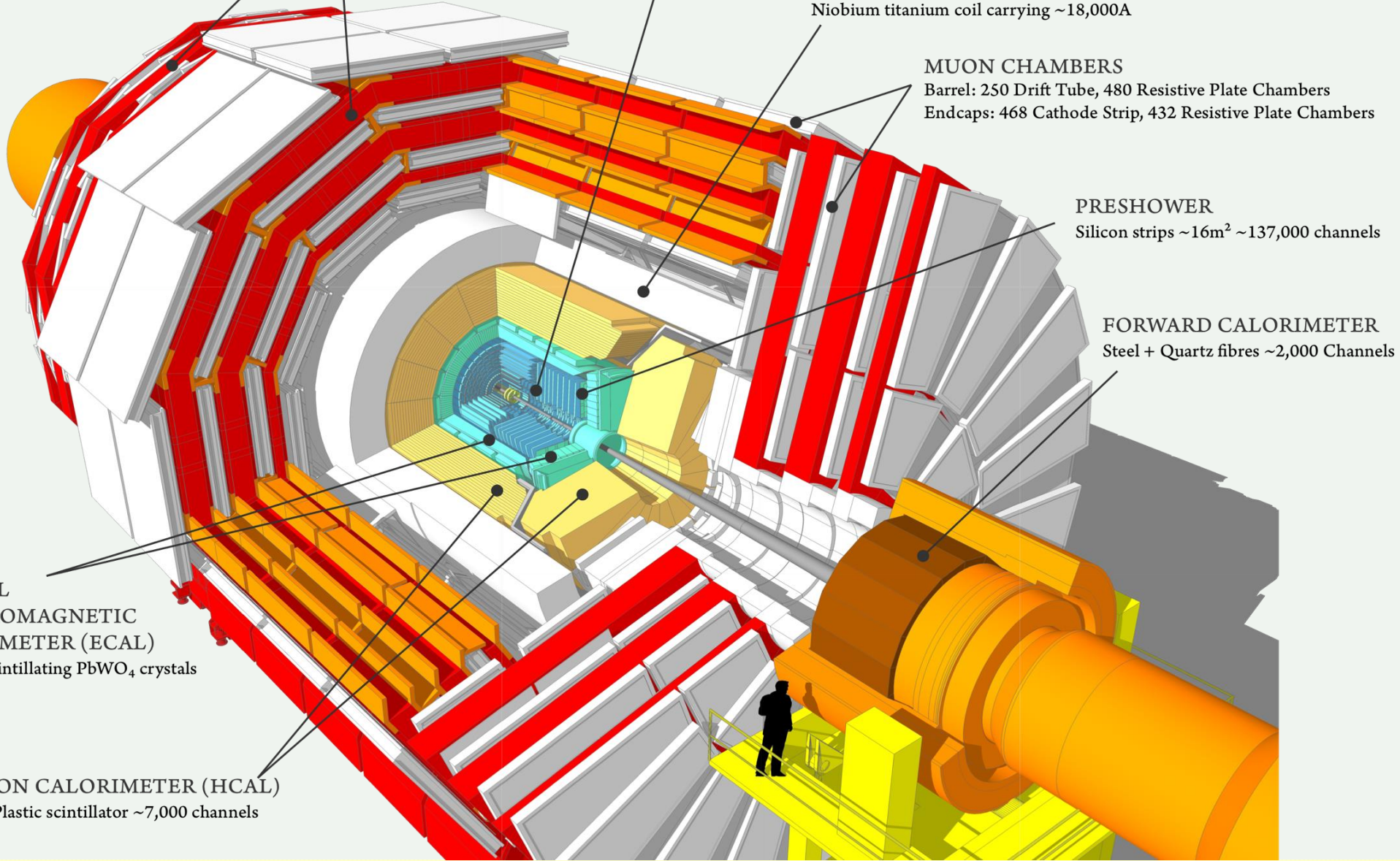
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

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 PbWO_4 crystals

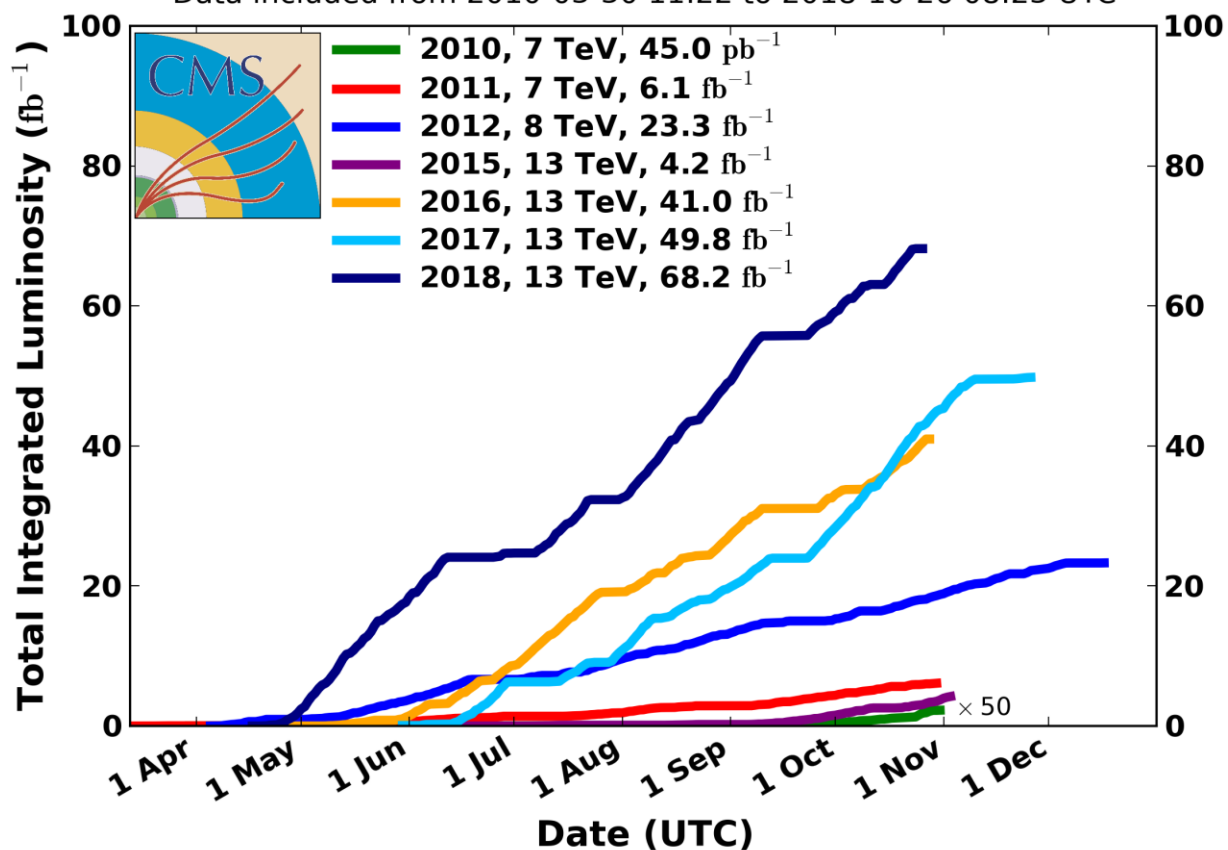
HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



Excellent performance of LHC

CMS Integrated Luminosity Delivered, pp

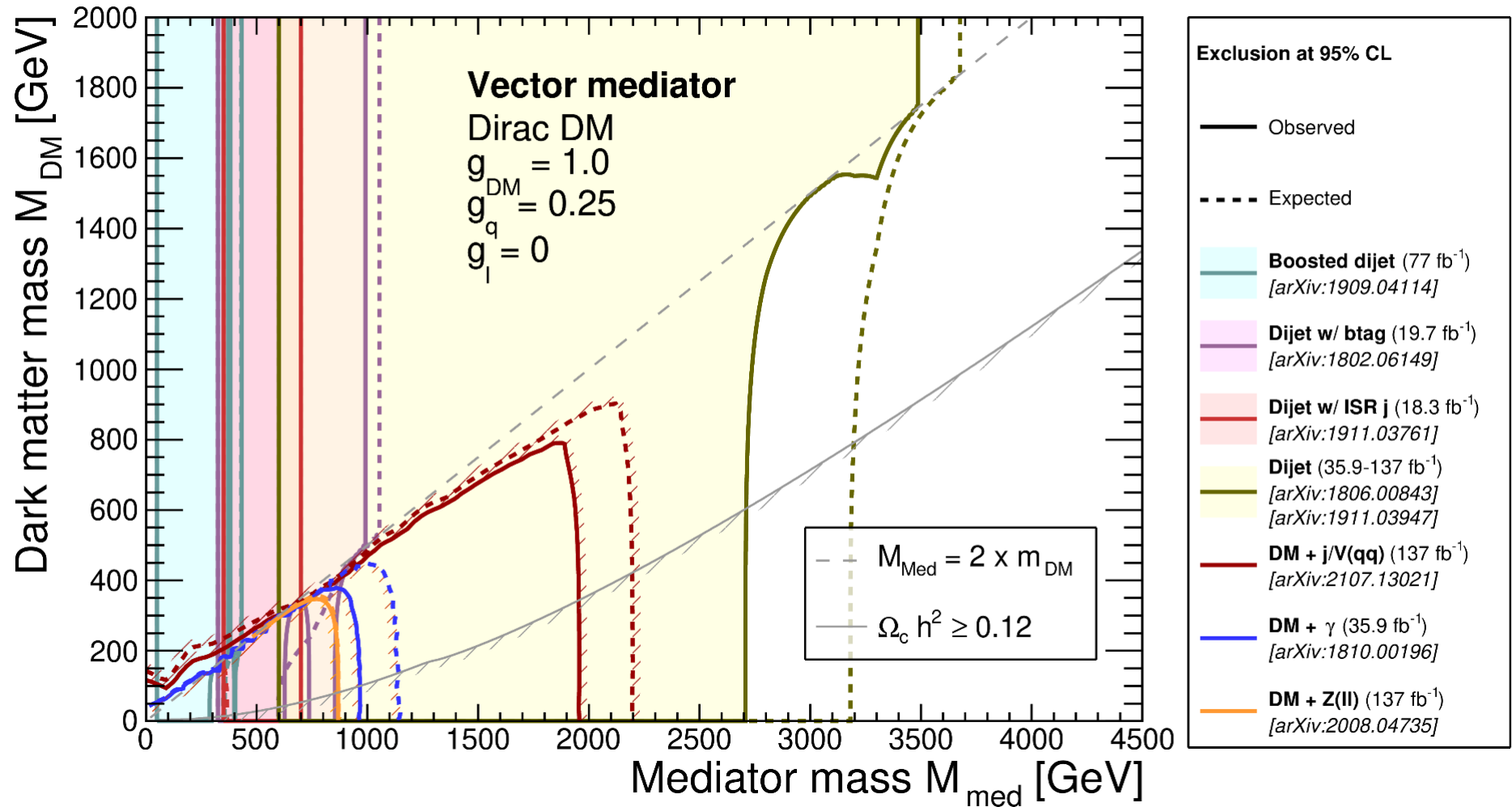
Data included from 2010-03-30 11:22 to 2018-10-26 08:23 UTC



Search for DM at LHC

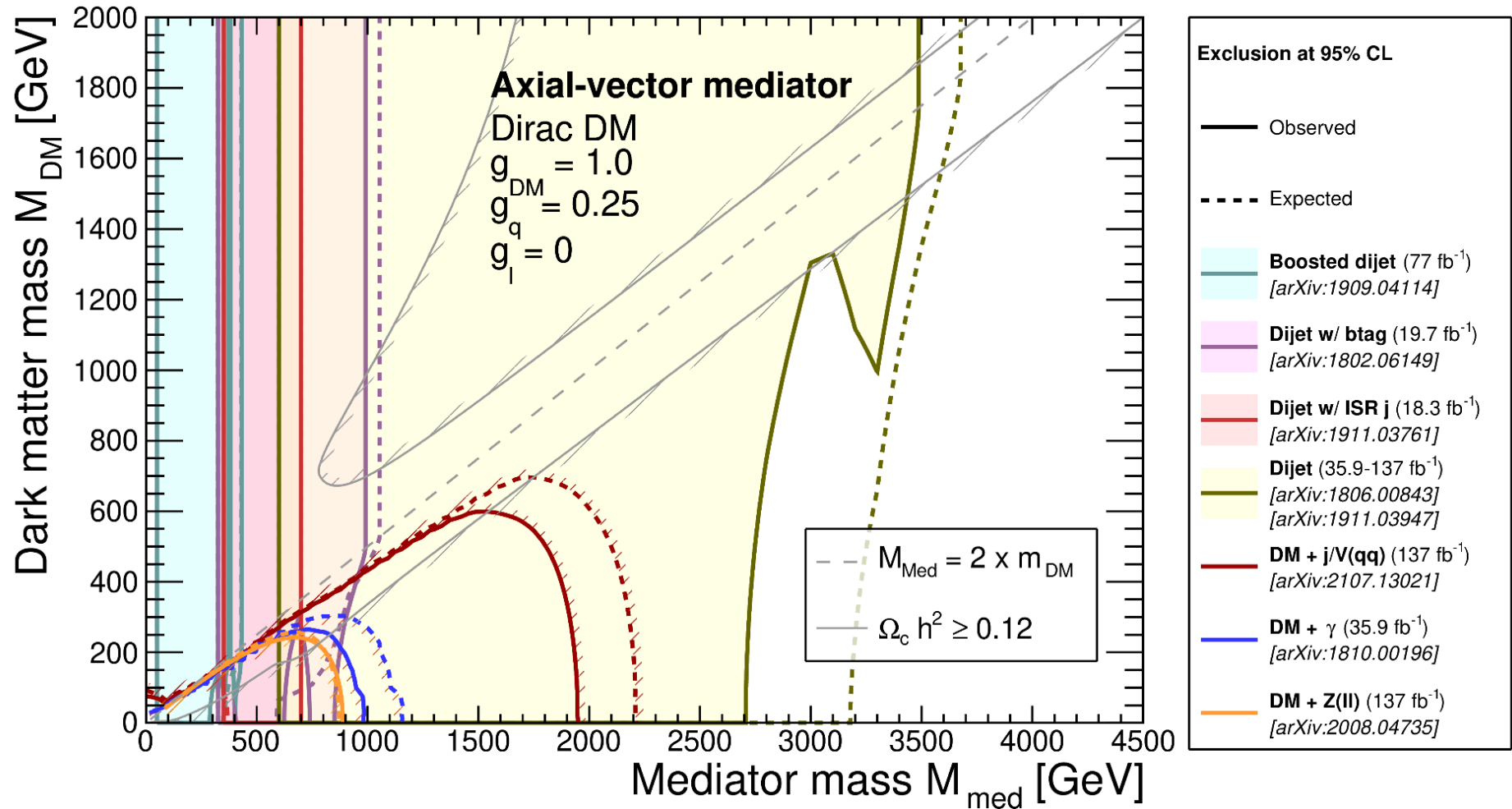
CMS Preliminary

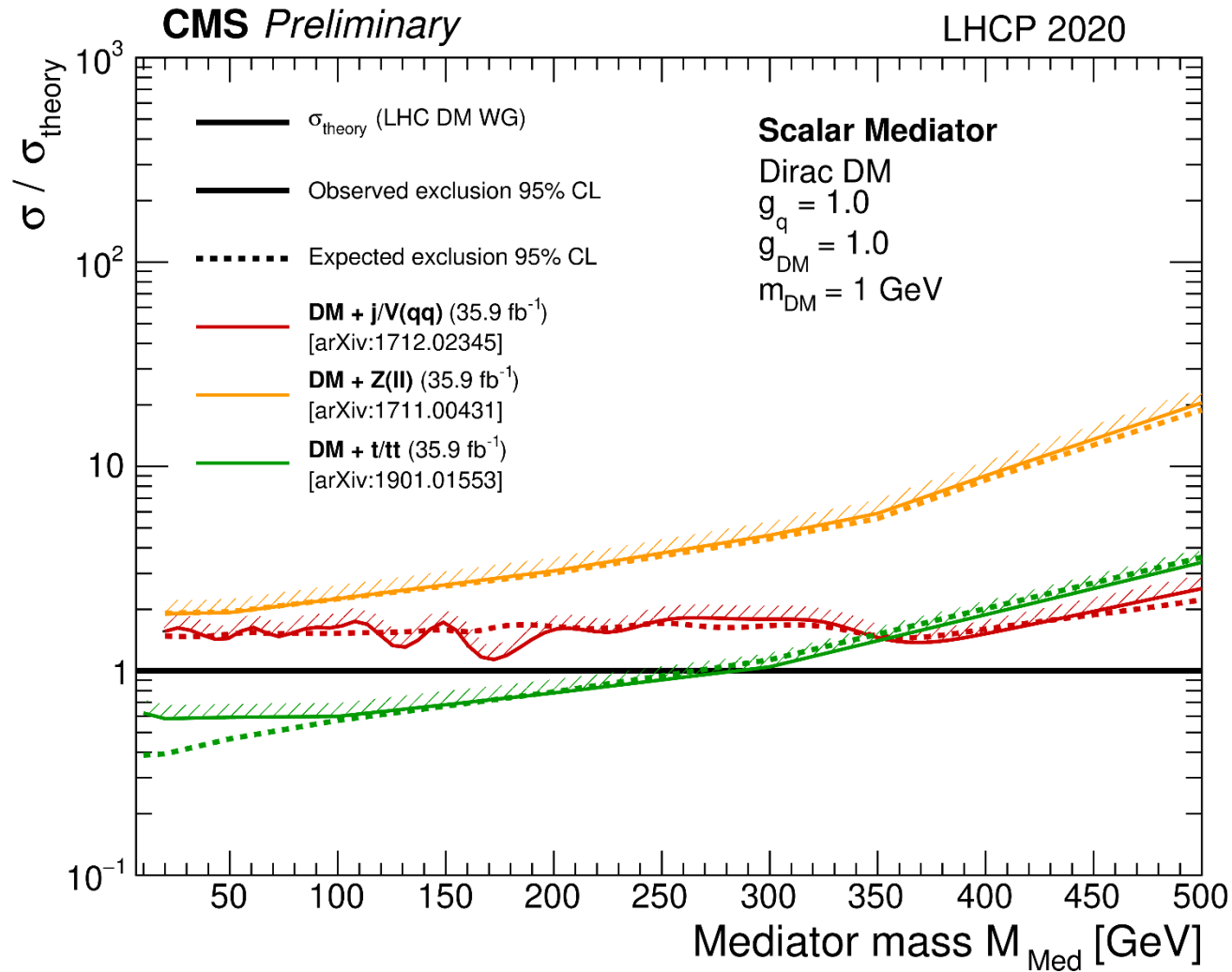
Moriond 2022

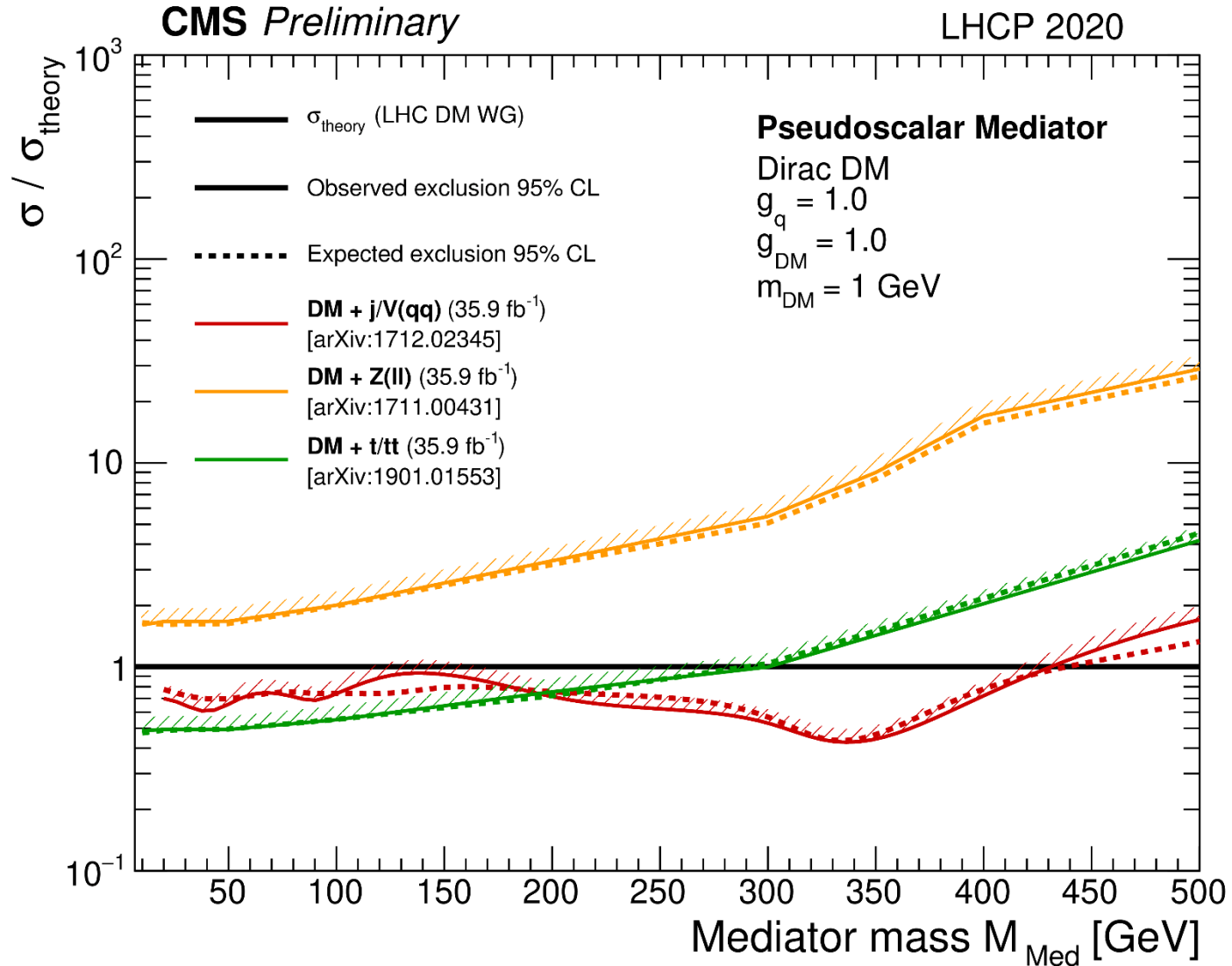


CMS Preliminary

Moriond 2022







□ Тъмна материя

- Съставлява 84,25 % от материята във Вселената
- Определяща роля за разширението на Вселената в периода 47000 – 9.8×10^9 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.

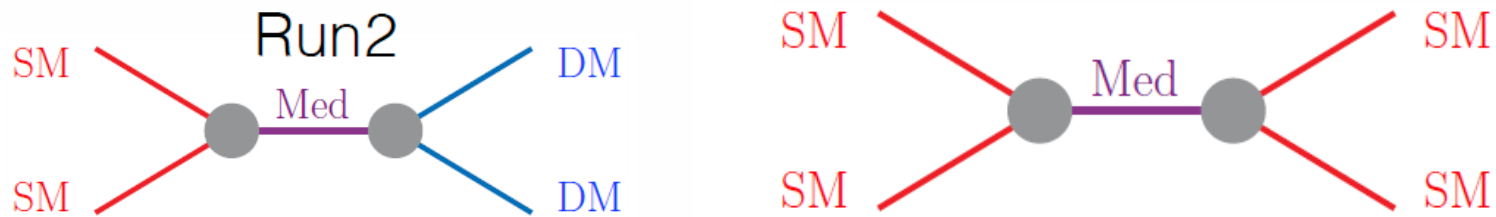
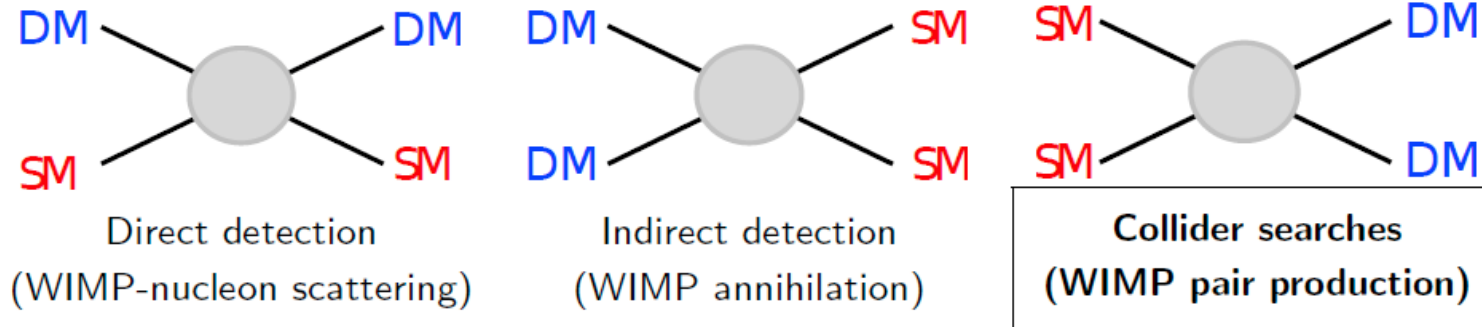


Thank you!



Благодаря за вниманието!

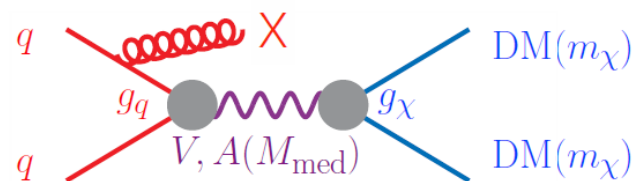
Assuming DM is WIMP



DM interpretation with mediator interaction

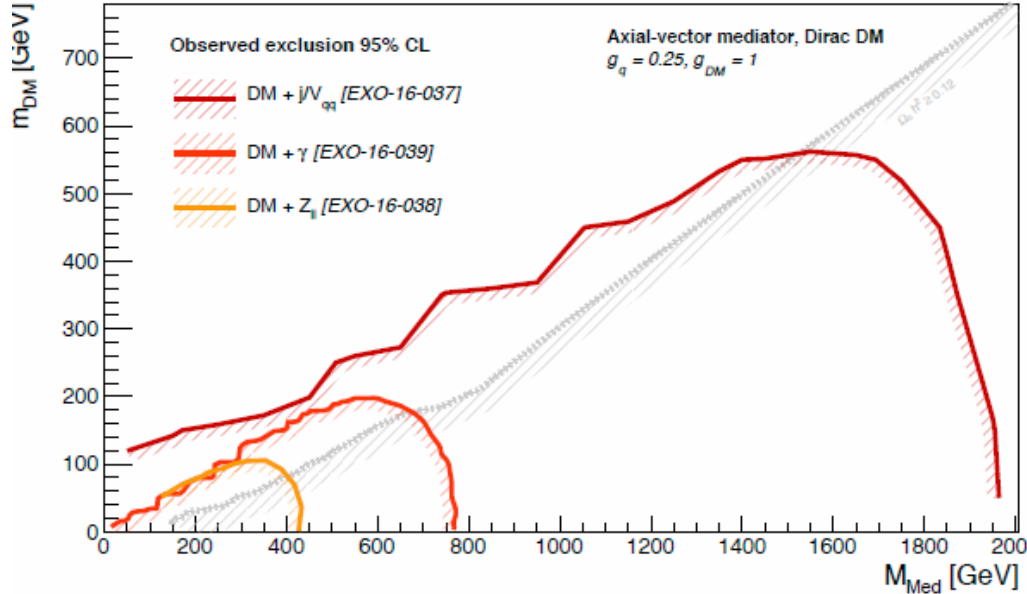
$E_{T}^{\text{miss}} + X$ a.k.a. Mono-X

- X from ISR jet, b, t, γ , W, Z



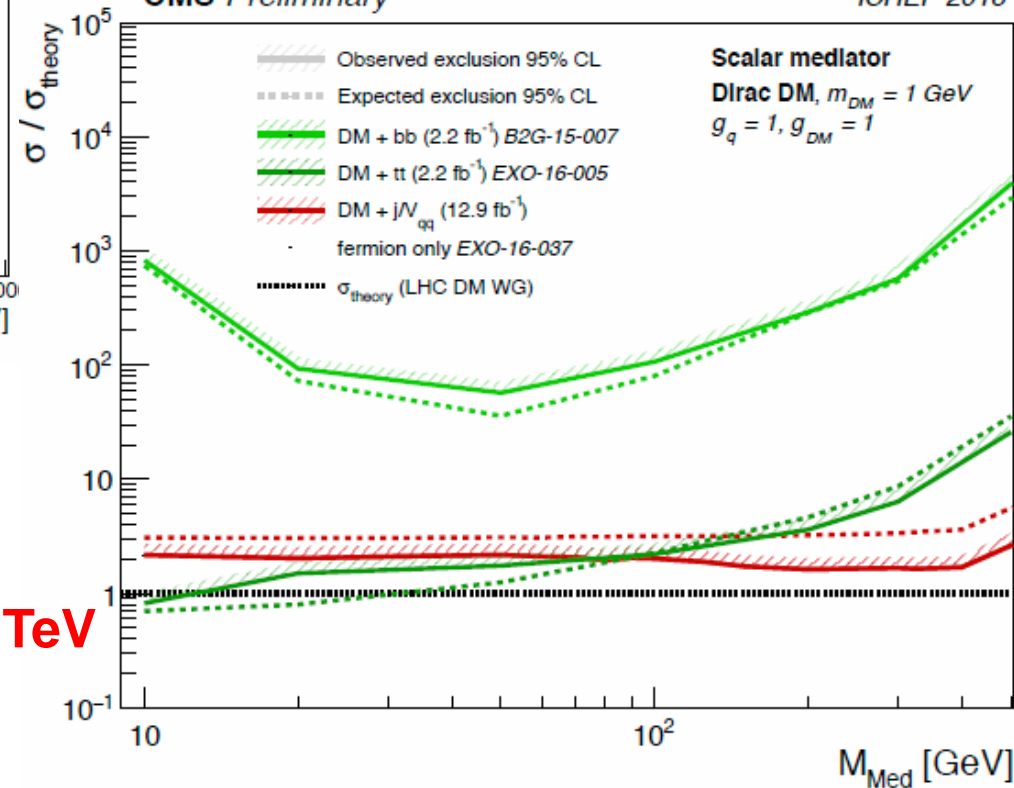
CMS Preliminary

Dark Matter Summary ICHEP 2016



CMS Preliminary

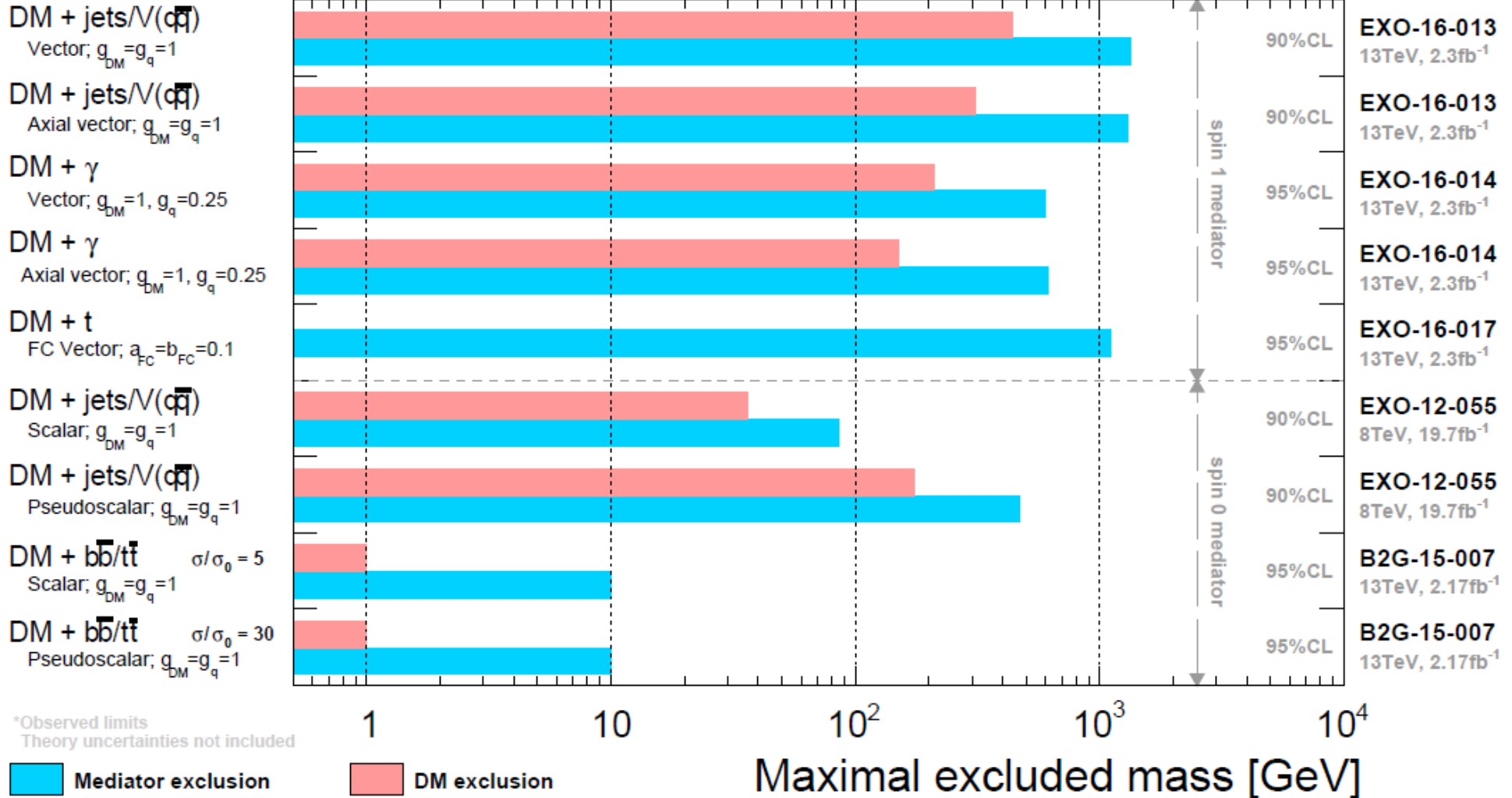
ICHEP 2016



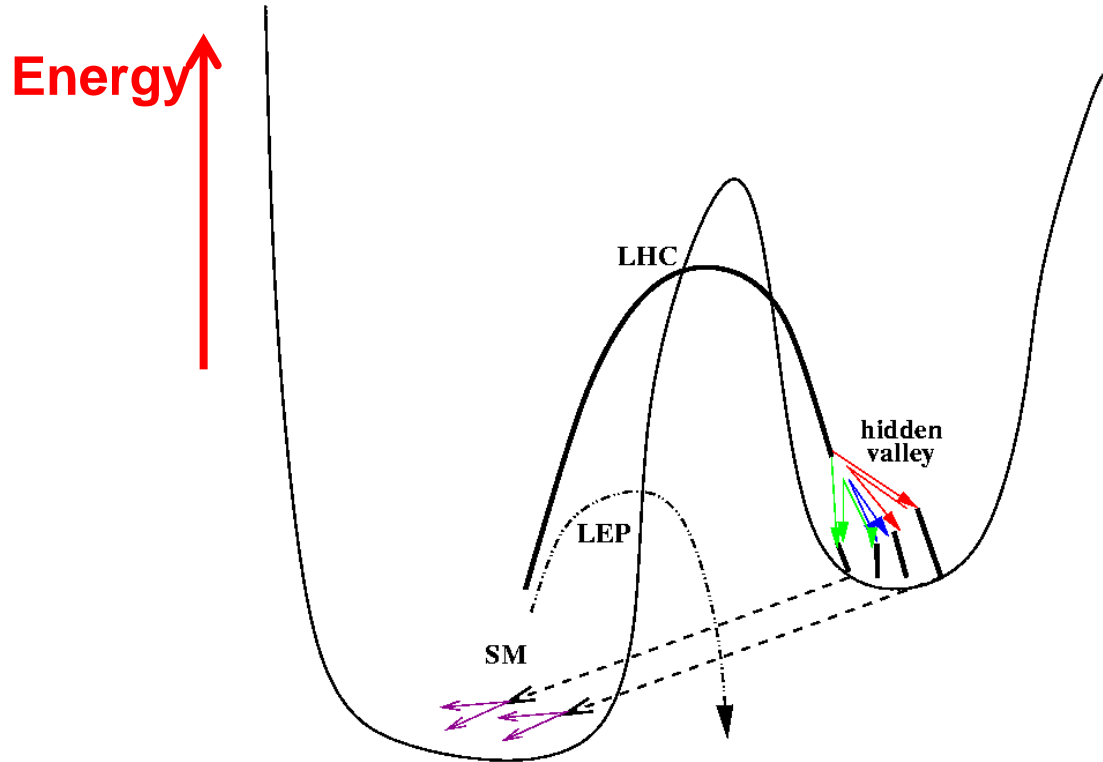
No significant excess observed
Exclusion of DM mass up to 500 GeV
Exclusion of mediator mass up to 1.95 TeV

CMS Preliminary

Dark Matter Summary* - June 2016



Hidden valley models

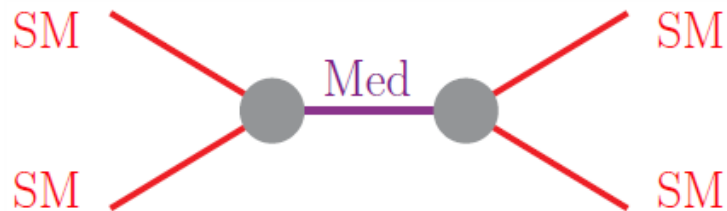


**Observable sector
SM**

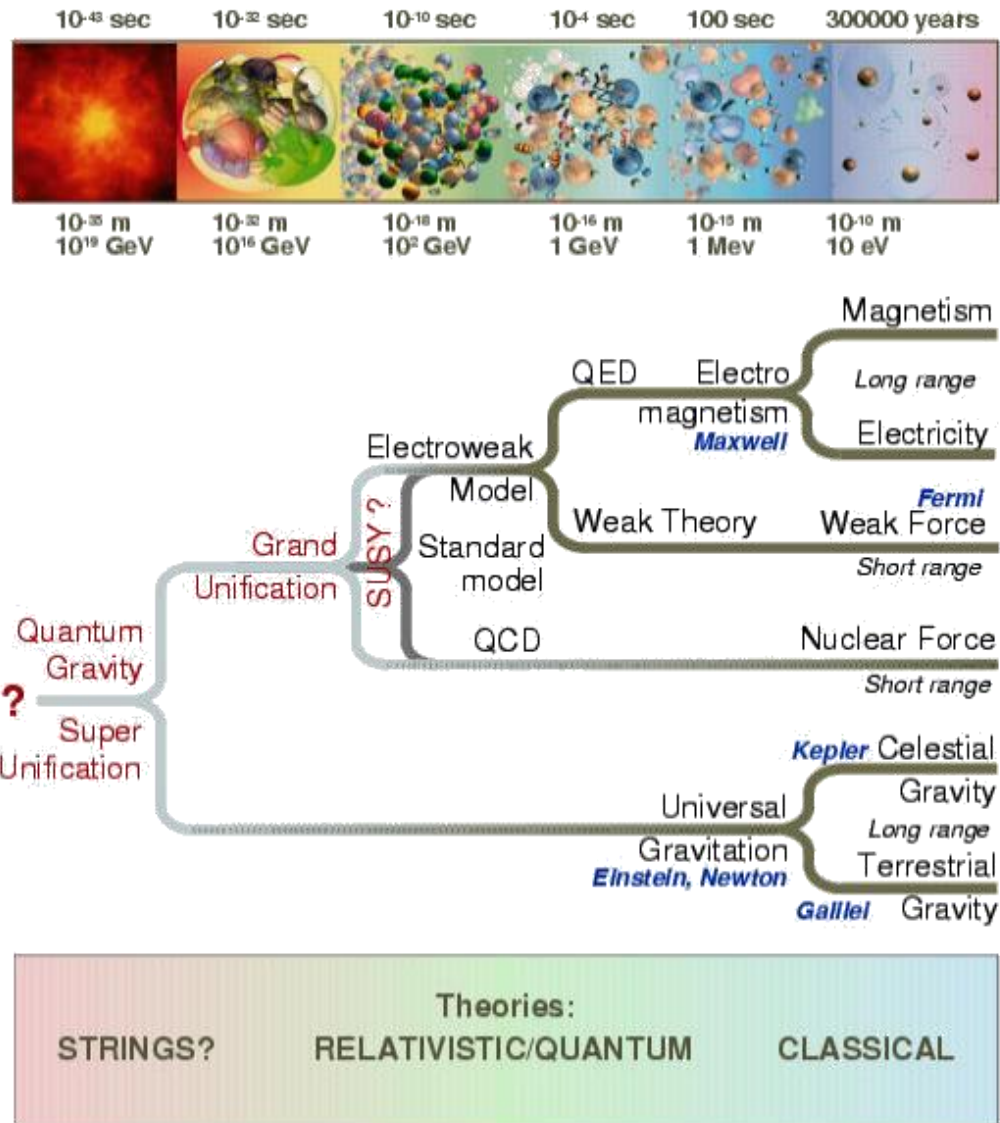
**Particles
Charged Under
SM and HV**

**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

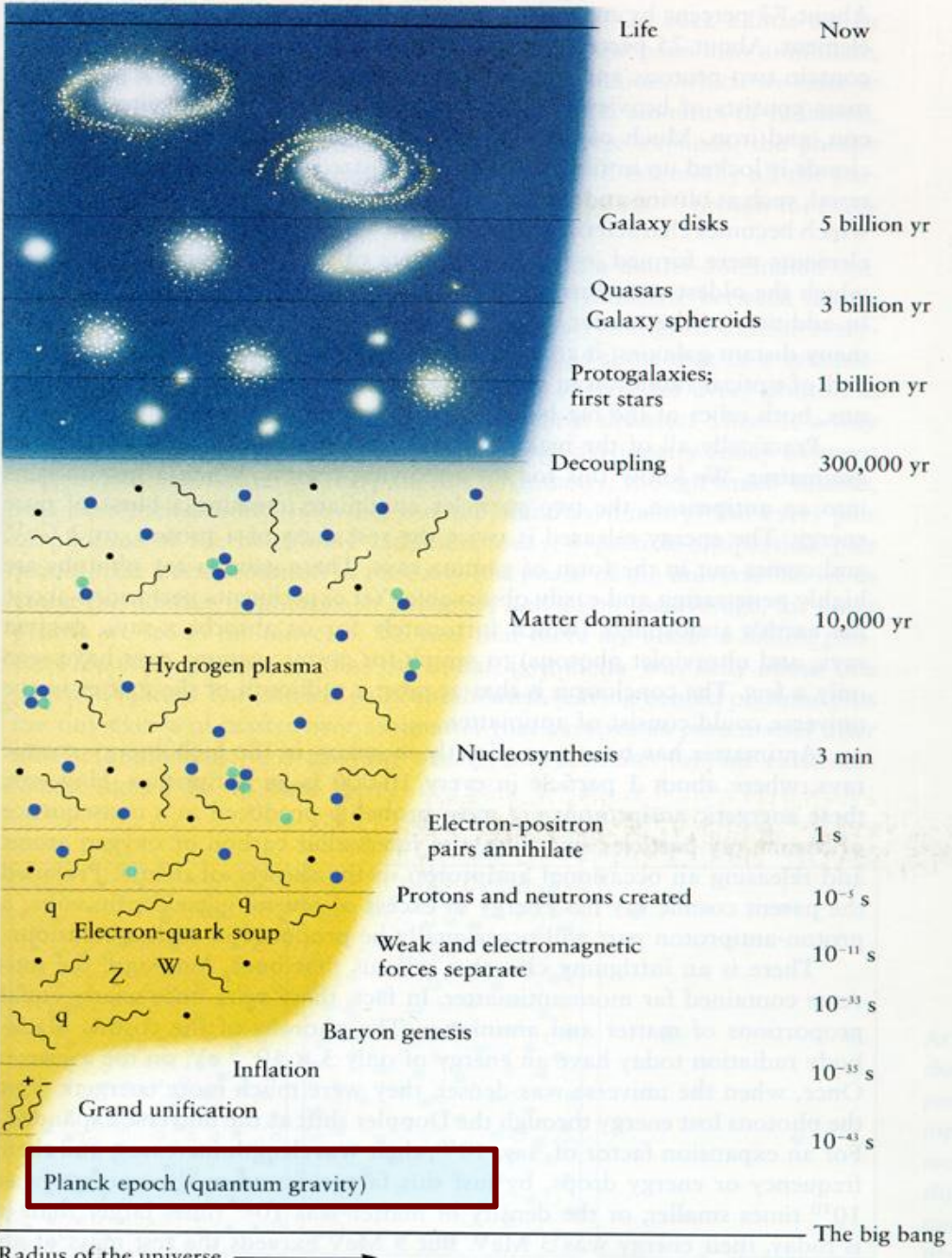


Единно описание на взаимодействията

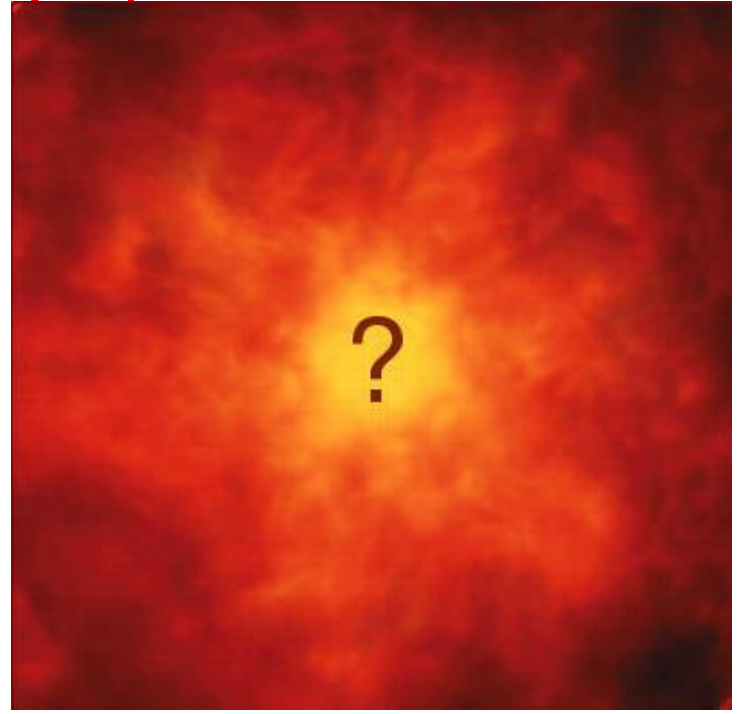


Кратка история на Вселената

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

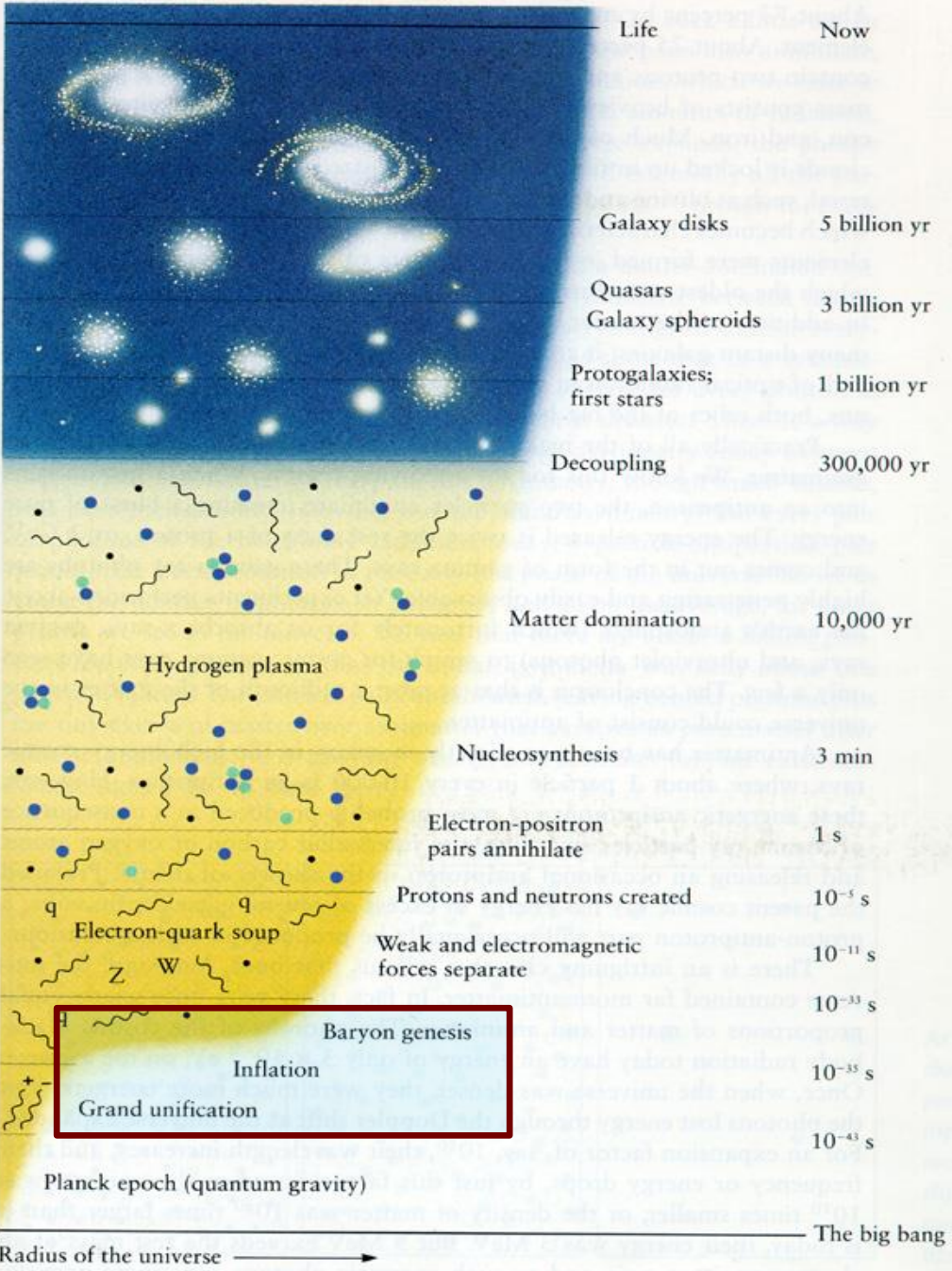


В началото Вселената е била наистина гореща, ама много гореща!

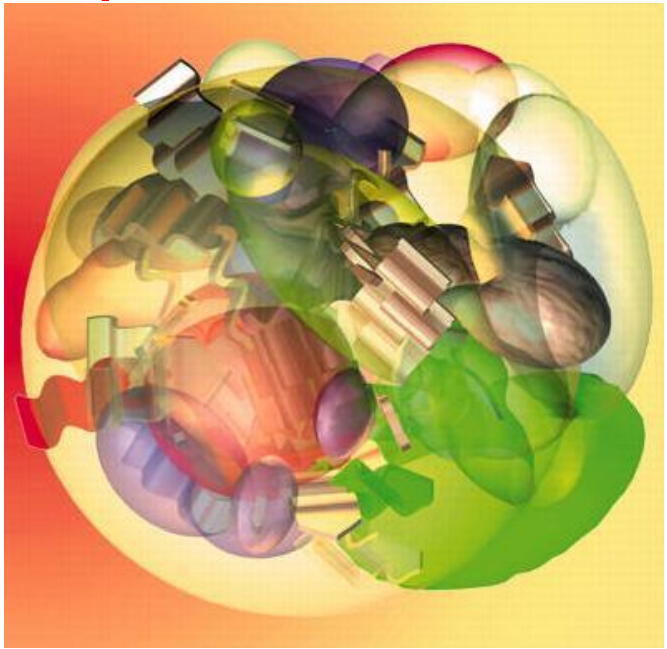


- $t < 10^{-43}$ сек
- Квантова гравитация
- 10^{-43} сек (10^{19} GeV, 10^{32} K, 10^{-34} m)
- Гравитацията се отделя
- Първо нарушение на симетрията

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

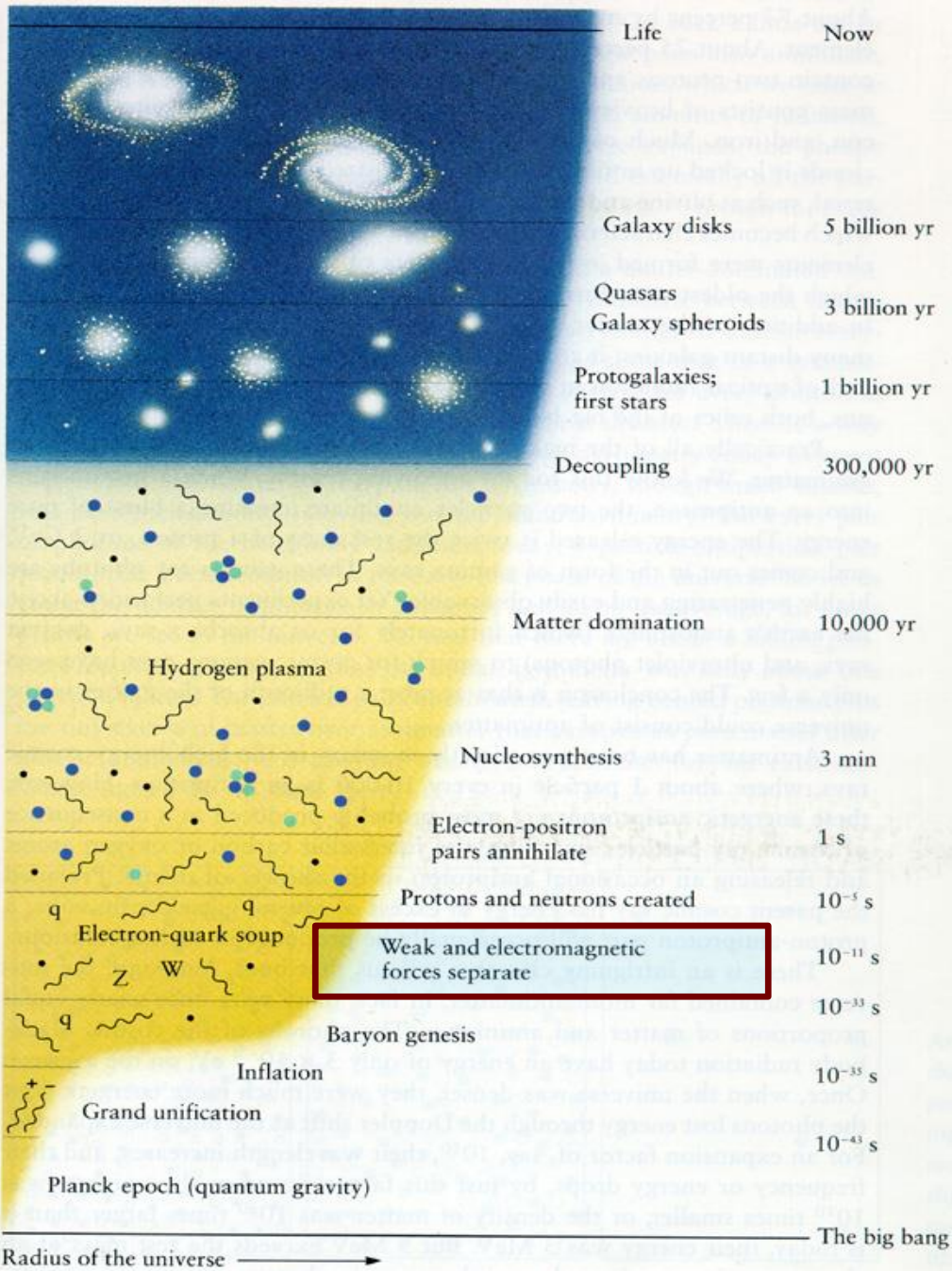


10⁻³⁵ с. Ера на Великото обединение

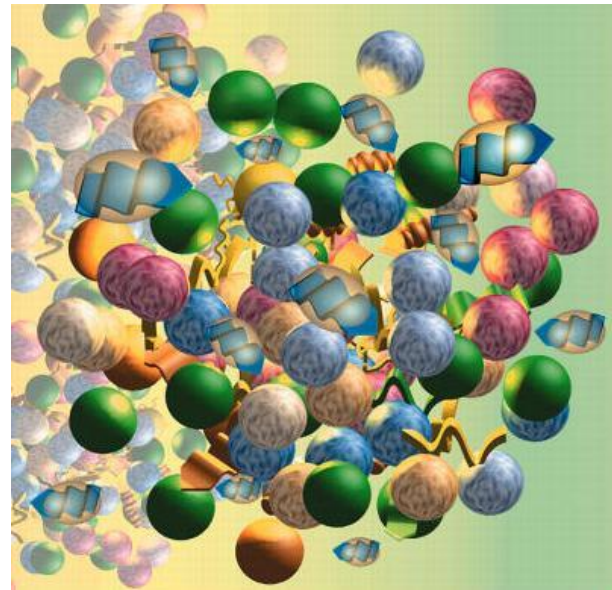


- 10⁻³⁵ сек (10¹⁶ GeV, 10²⁷ К, 10⁻³² m)
- Инфляция – 10⁻³⁵ – 10⁻³² с.
- Увеличение на размера 10⁵⁰
- Наблюдаемата Вселена – 3 м.
- 10⁻³² с. - Силните взаимодействия се отделят
- Асиметрия между материя и антиматерия (10⁻⁹)
- Кварк-глюонна плазма

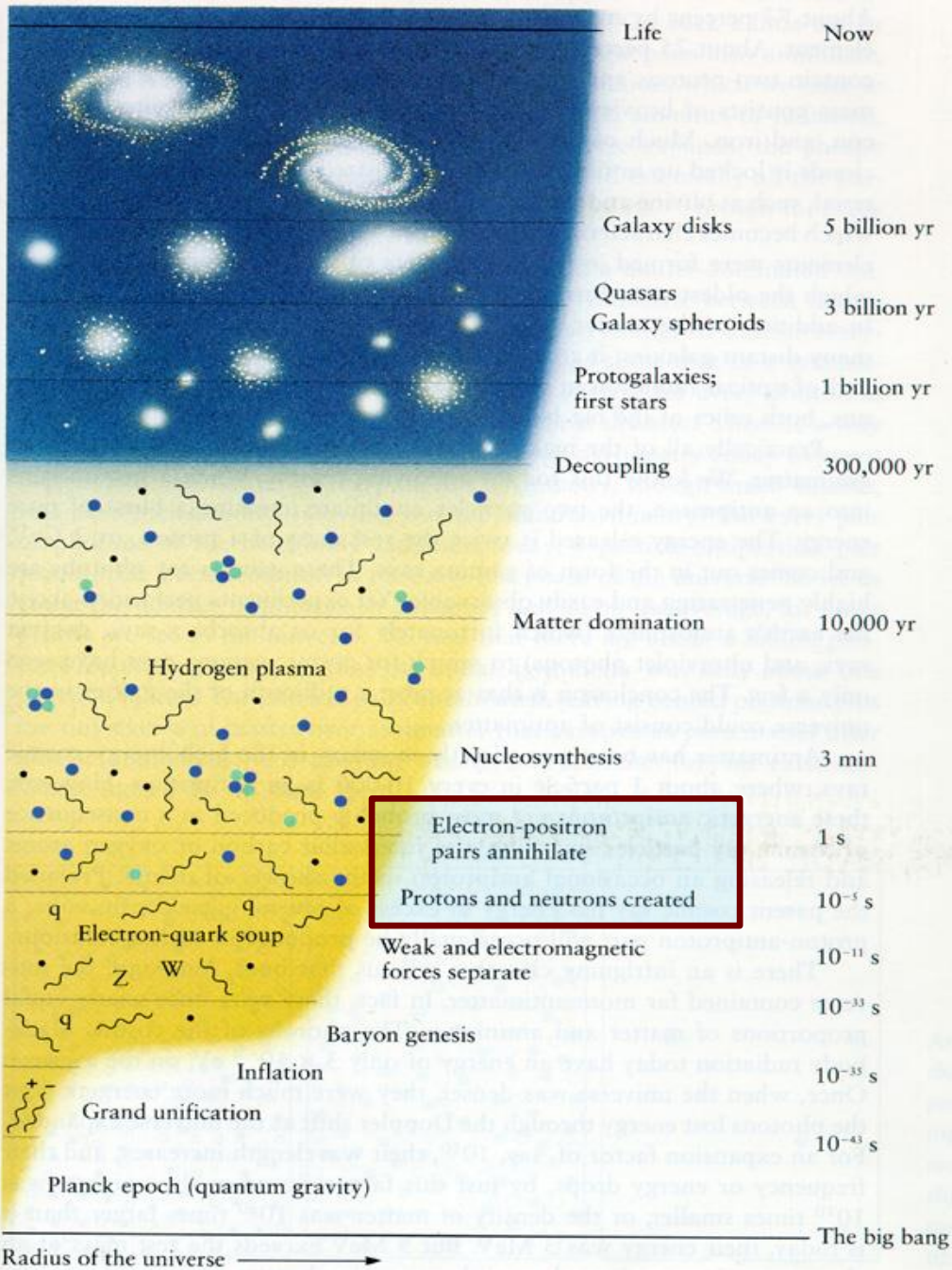
A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



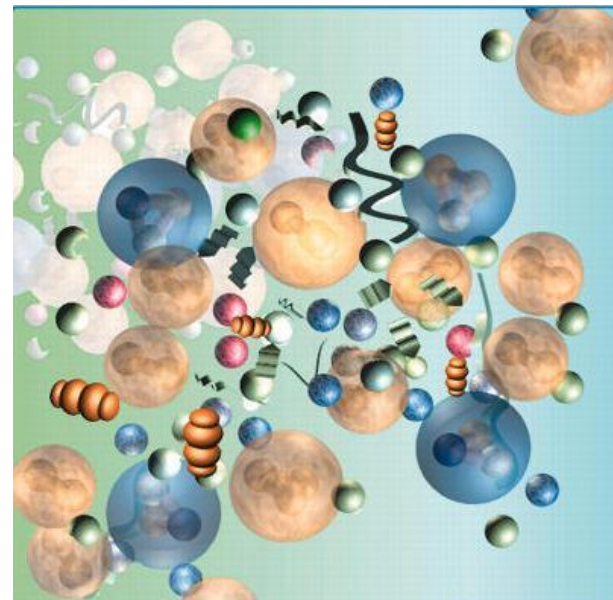
10⁻¹⁰ с. Електрослаба Ера



- 10⁻¹⁰ сек (100 GeV, 10¹⁵ К, 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

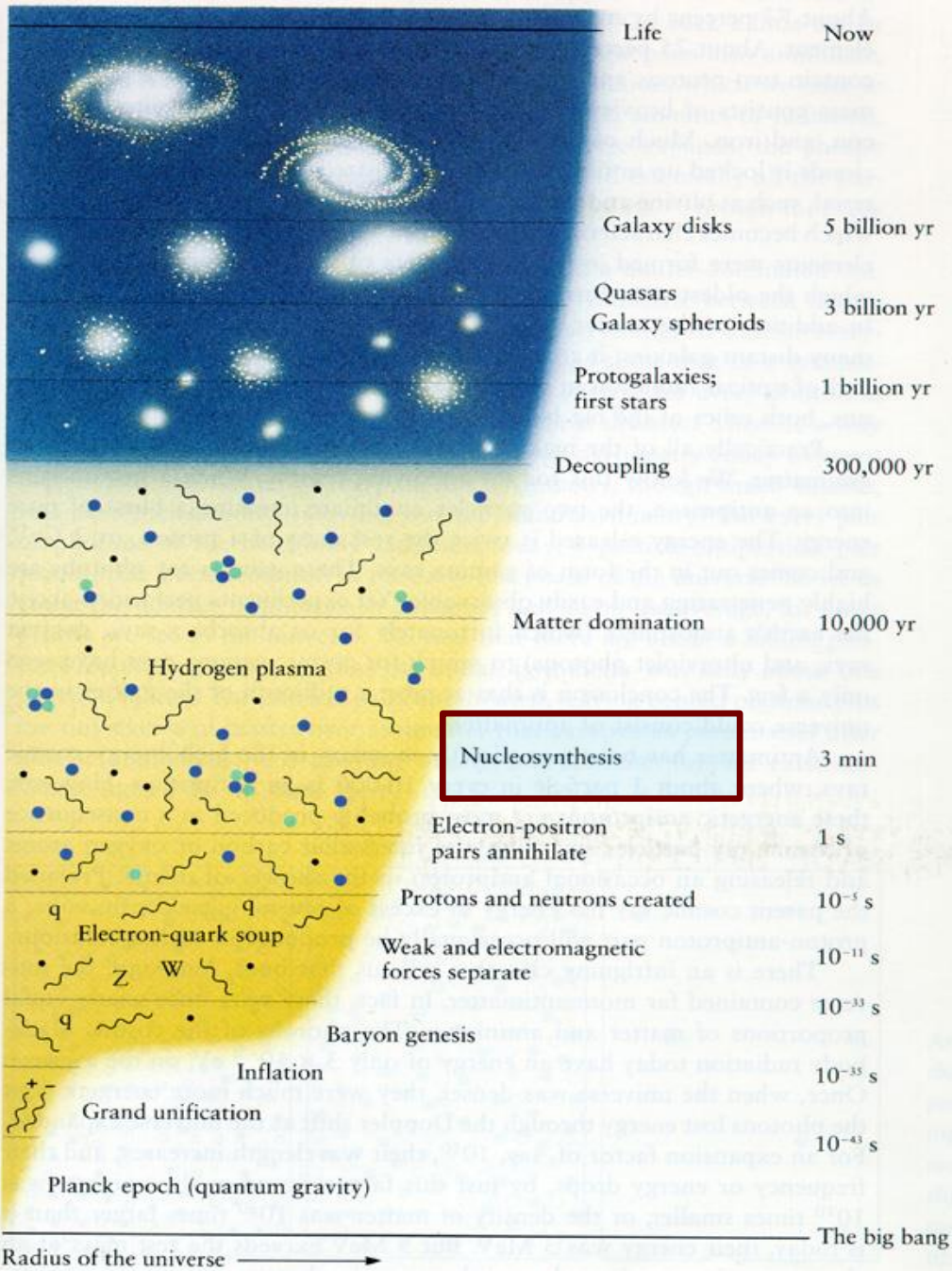


10⁻⁴ с. Протони и Неутрони

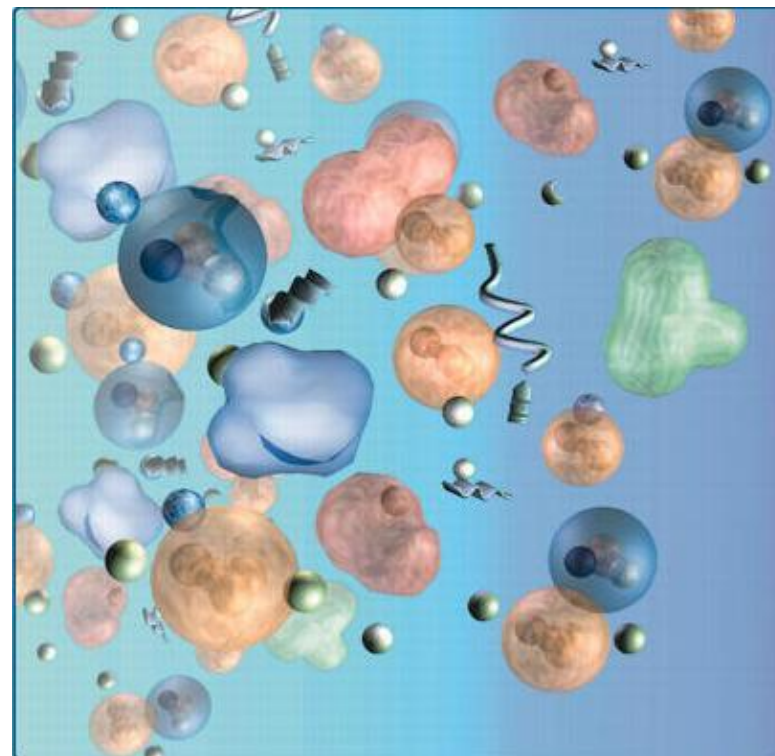


- 10⁻⁴ сек (1 GeV, 10¹³ K, 10⁻¹⁶ m)
- Спира аниhilацията на qq
- Кварките се свързват в протони и неутрони p=uud, n=udd n/p = 50:50
- 1 сек (1 MeV, 10¹⁰ K, 10⁻¹⁵ m)
- Неутрината престават да взаимодействат
- e⁺ e⁻ – аниhilират, остават само e⁻
- n/p = 25: 75 n → p e ν

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

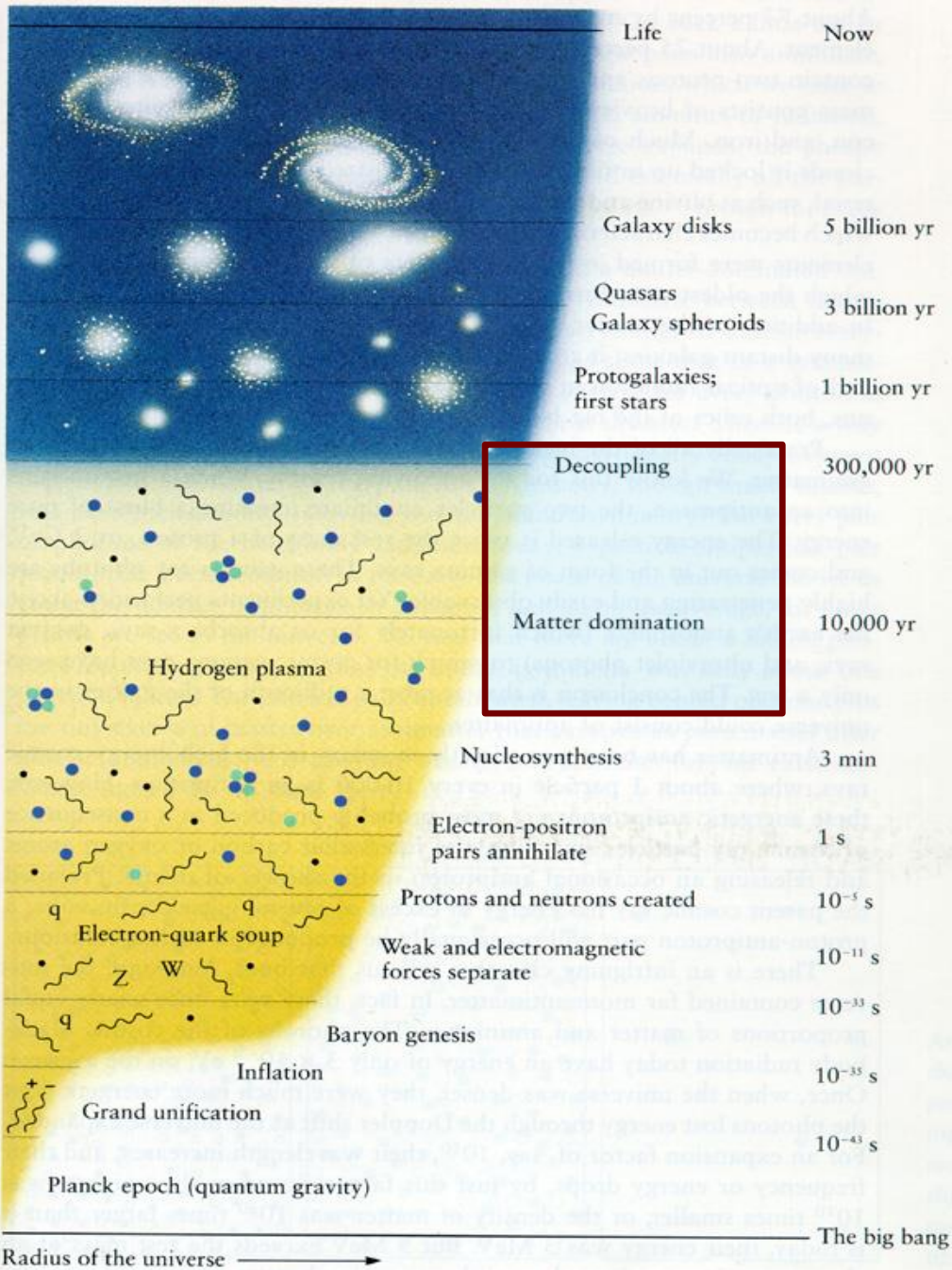


100 с. Формиране на ядра

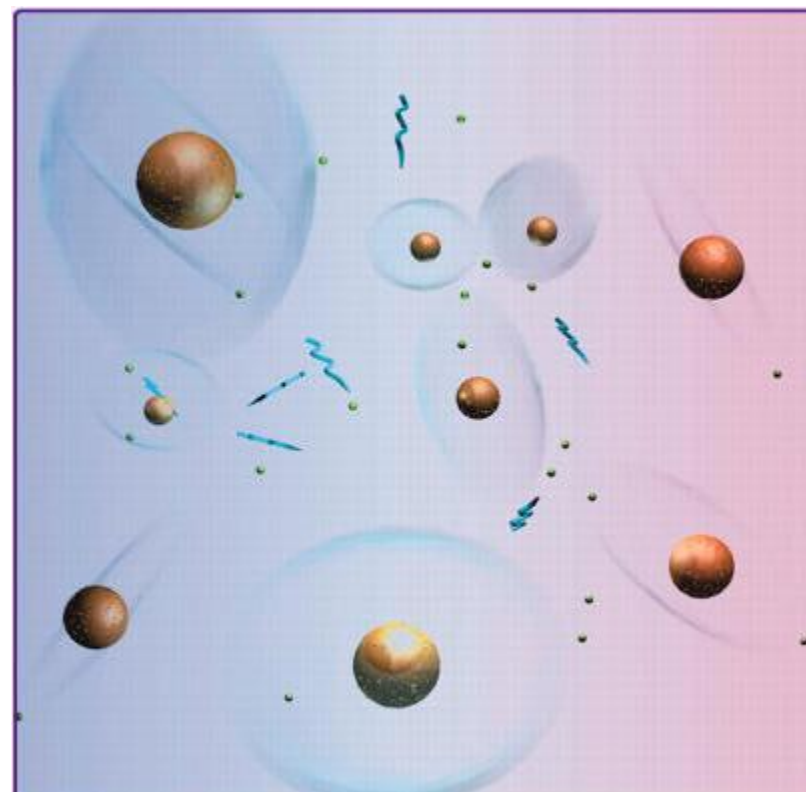


- 3 мин (0.1 MeV, 10^9 K, 10^{-12} m)
- Формиране на He ядра
- Неутроните се захващат в ядрата
- Останалите се разпадат $n/p = 13:87$
- Вселената се състои от $H/He = 75:25$
- Електронен газ

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE

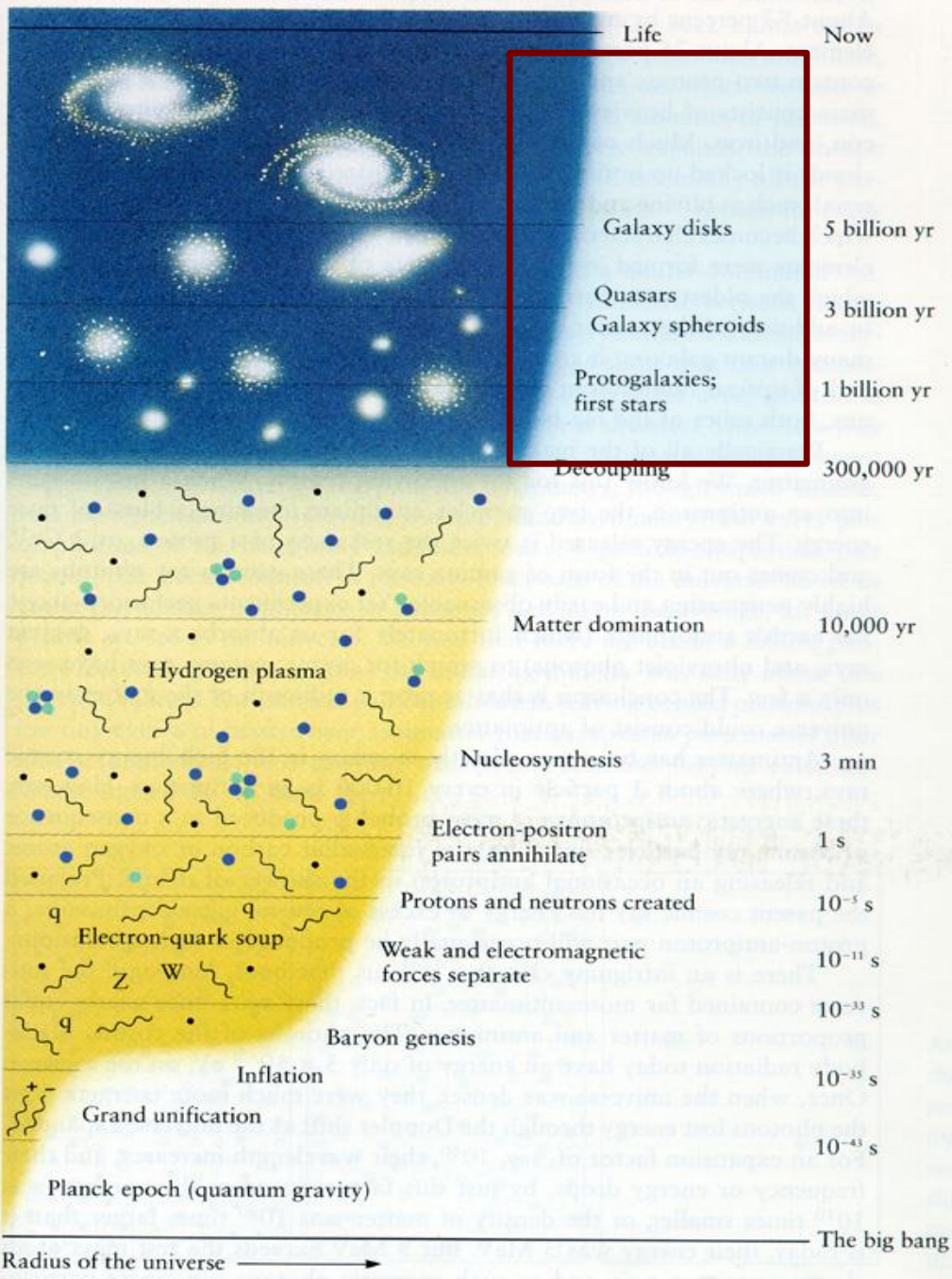


300 000 г. Атоми и светлина



- 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

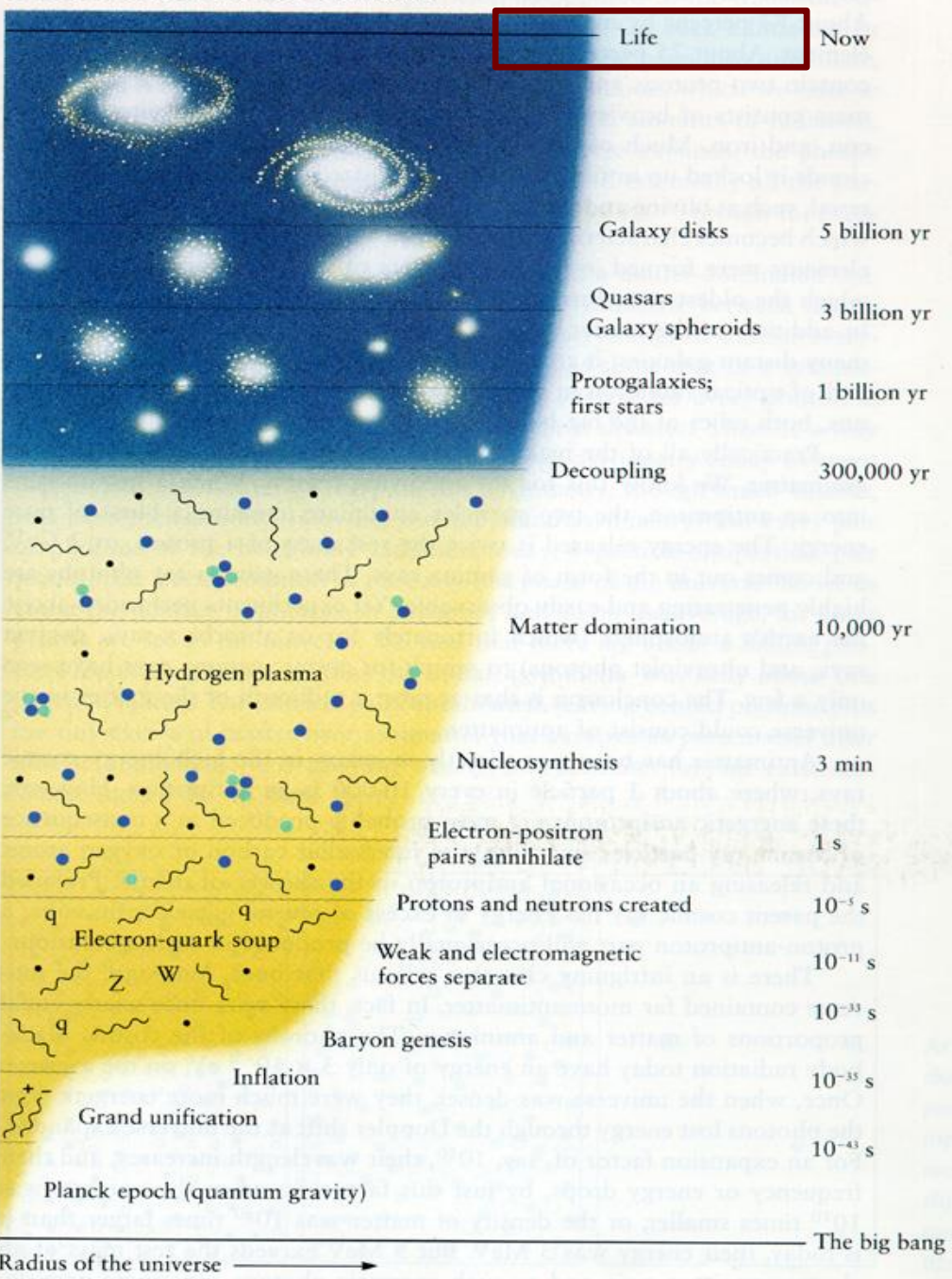


10⁹ г. Формиране на галактики

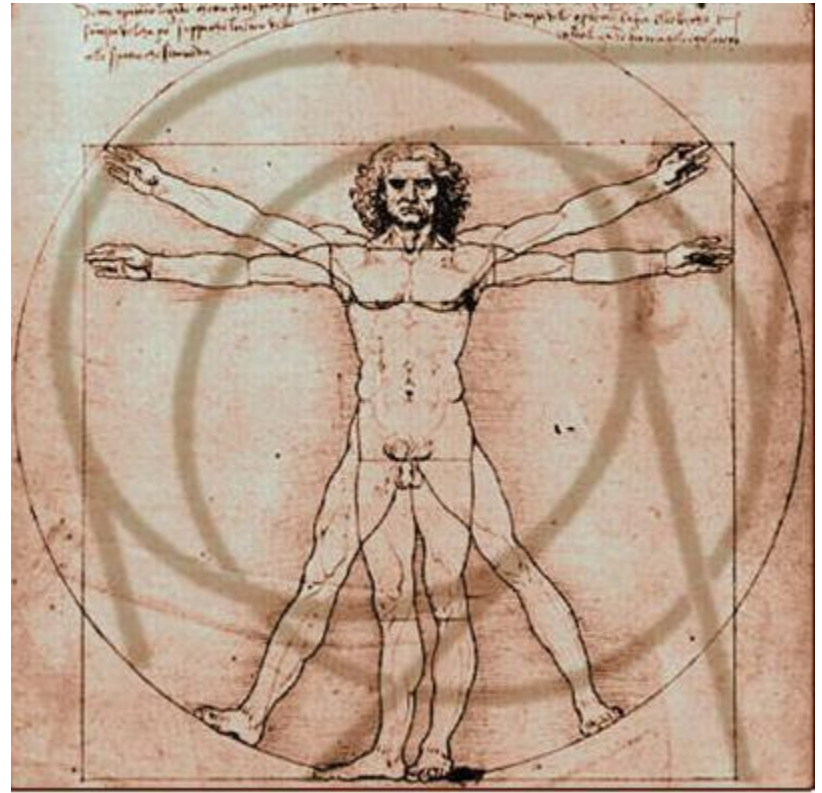


- 10⁹ г. 18 К
- Локални флуктуации – звезди и галактики
- Синтез на тежки ядра – С - Fe
- Разпространение на тежки елементи - свръхнови

A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



14x10⁹ г. Днес

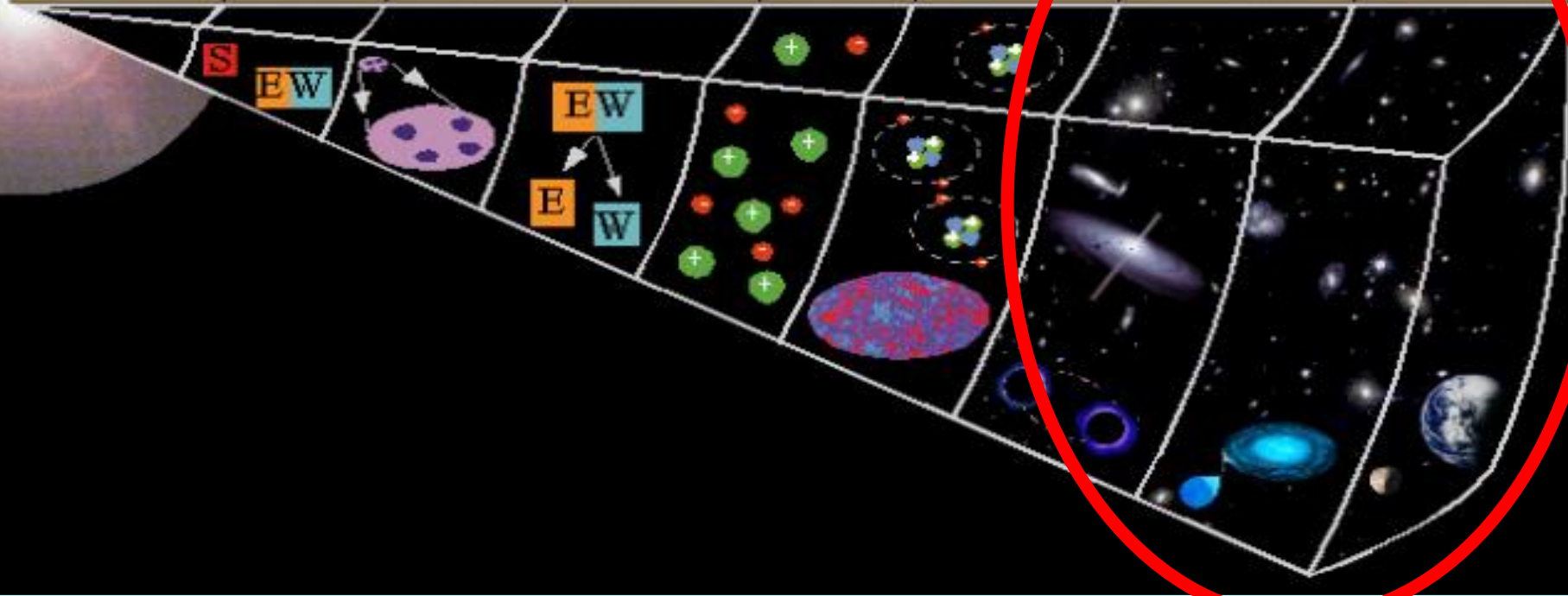


- 14x10⁹ г. 3 К
- Атоми, молекули, хора
- Задават въпроси
- Кои са фундаменталните съставлящи на материята?
- Как те взаимодействат по между?

Big Bang

Time →

$10^{-44} s$	$10^{-35} s$	$10^{-32} s$	$10^{-10} s$	300 s	$3 \times 10^5 \text{ yr}$	$1 \times 10^9 \text{ yr}$	$15 \times 10^9 \text{ yr}$
Superstring (?) Era	GUT Era	Inflation Era	Electro-weak Era	Particle Era	Recombination Era	Galaxy and Star Formation	Present Era



Наблюдаема информация от измервания с телескопи

□ Physical objects reconstructed

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

□ Goals

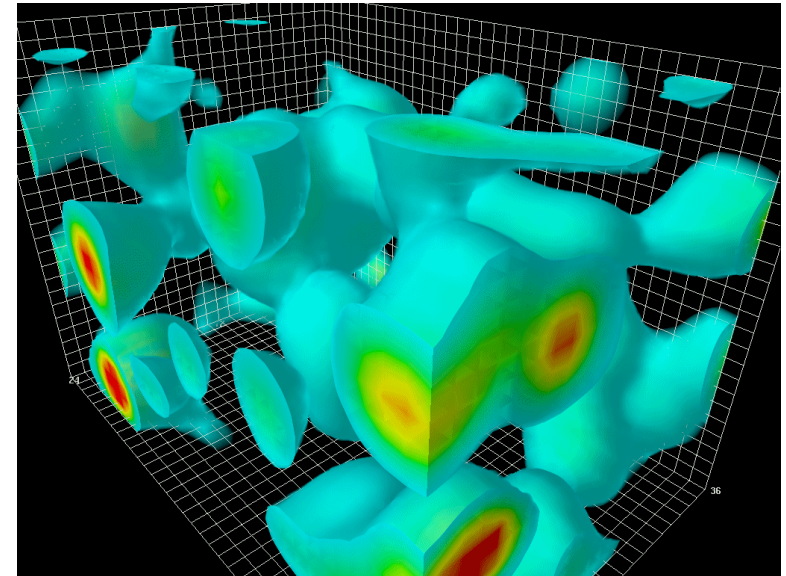
- Precise test of SM
 - measurement of its parameters
 - search for deviations from the SM predictions
- New physics
 - New particles
 - New phenomena

- 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 – Λ
- обикновена материя (барионна + радиация)
- Тъмна материя

$a(t)$ – може да се измери

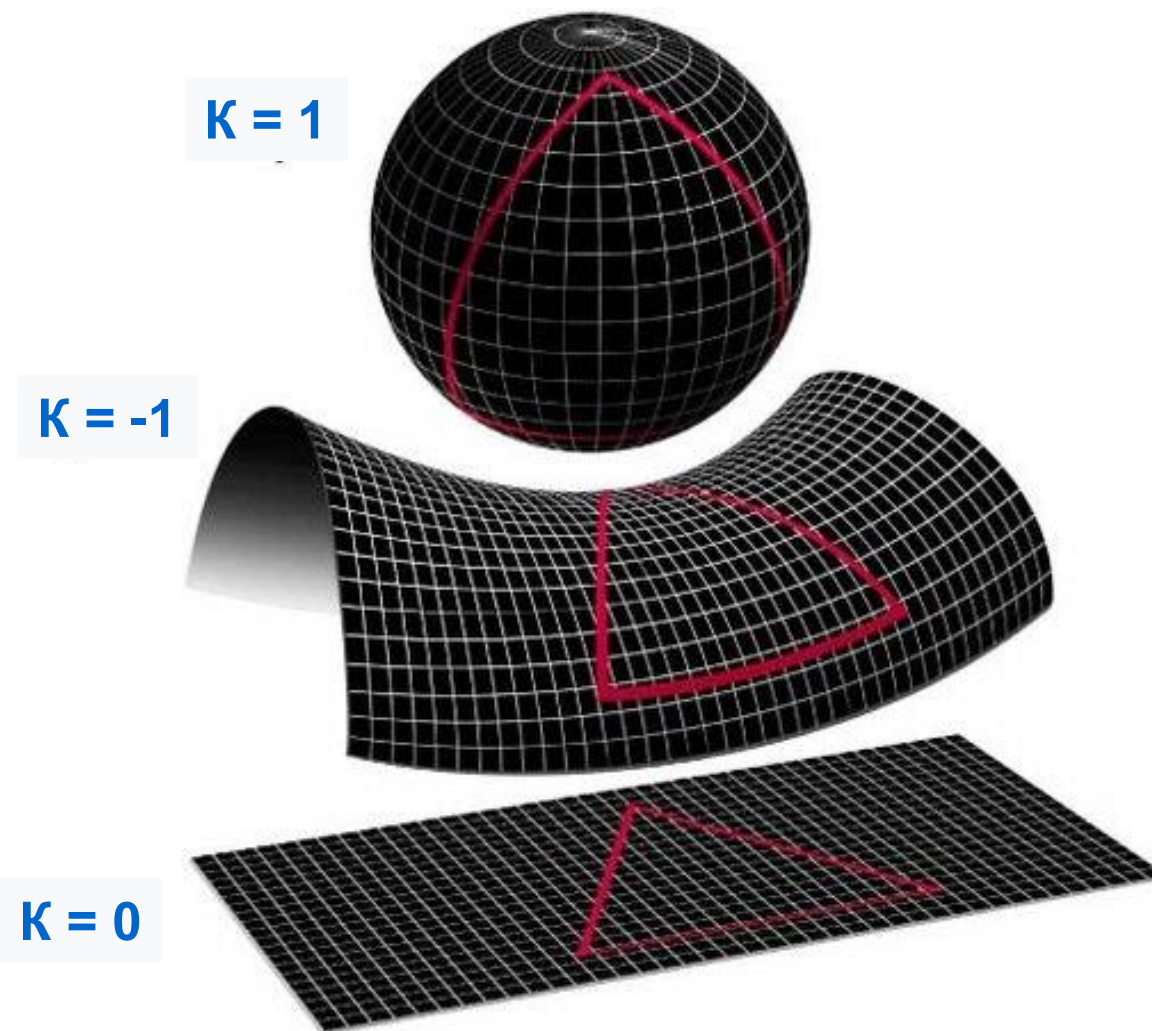
$$\frac{1}{a(t_{\text{em}})} = 1 + z.$$

Изменението на $a(t)$

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

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

ρ – 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

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

➤ Режима на разширение на Вселената зависи

- ✓ Плътноста на материята
- ✓ Стойността на космологичната константа

- ❑ 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



Hubble constant	H_0	$67.74 \pm 0.46 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Baryon density parameter ^[b]	Ω_b	0.0486 ± 0.0010 ^[e]
Dark matter density parameter ^[b]	Ω_c	0.2589 ± 0.0057 ^[f]
Matter density parameter ^[b]	Ω_m	0.3089 ± 0.0062
Dark energy density parameter ^[b]	Ω_Λ	0.6911 ± 0.0062
Critical density	ρ_{crit}	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
Age at decoupling	t_*	$377700 \pm 3200 \text{ years}$
Age of the universe	t_0	$13.799 \pm 0.021 \times 10^9 \text{ years}$
Total density parameter	Ω_{tot}	1.0023 ± 0.0056 -0.0054

□ Тъмна енергия

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