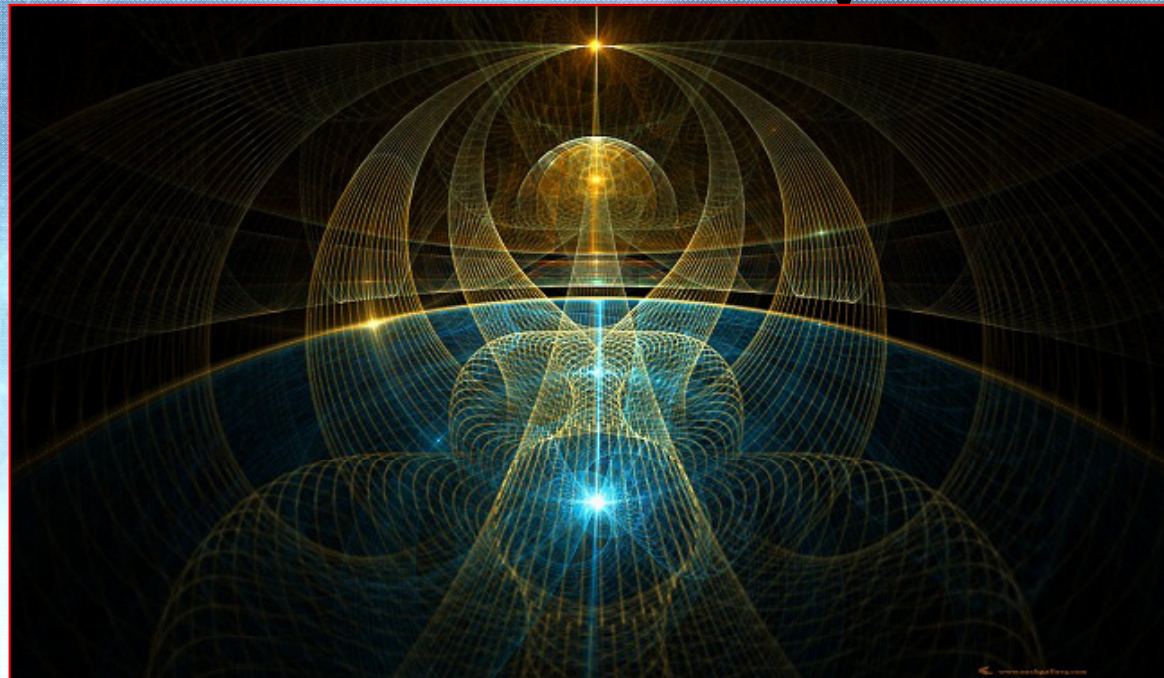


Темная Вселенная. Современный статус проблемы темной материи



Иванчик

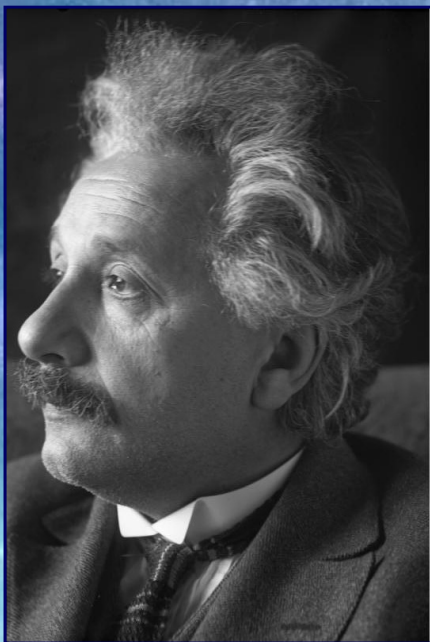
Александр Владимирович

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Санкт-Петербург, 2022*



Лекция посвящается памяти
Валерия Анатольевича
Рубакова

ОСНОВЫ современной космологии



Эйнштейн

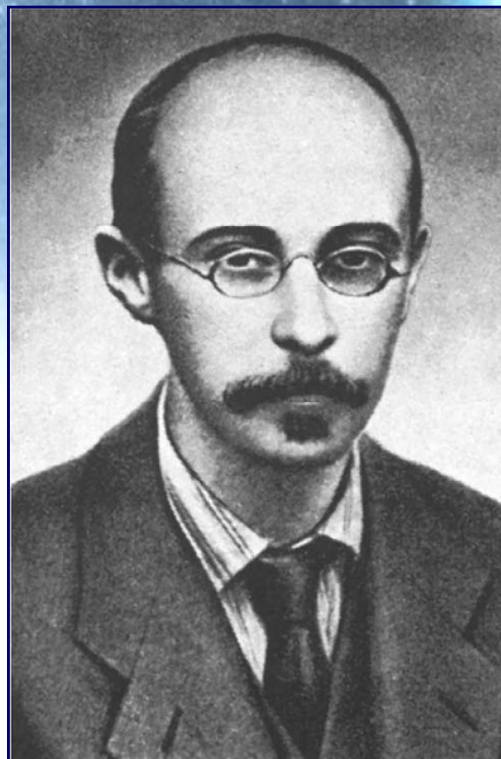
1916 ОТО
1917 Ст. Вс.

**де Ситтер
(1917)**

**Слайфер
(1910-1924)**

Вейль

**Эддингтон
(1920)**



А. Фридман

Фридман

1922
**Нестационарная
Вселенная**

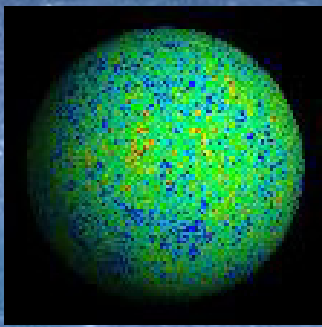


1929: Edwin Hubble

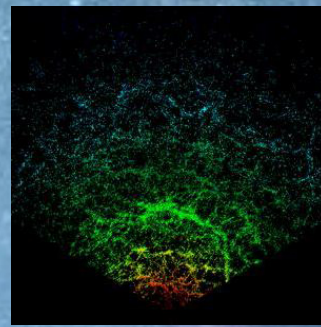
Хаббл

1929
Закон расширения

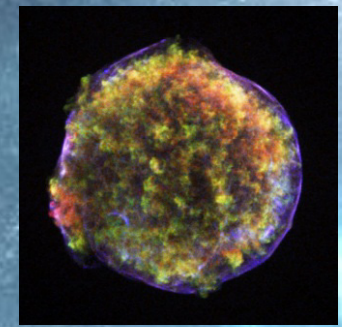
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$



Cosmic
Microwave
Background



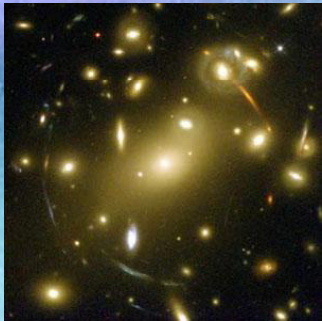
Galaxy surveys



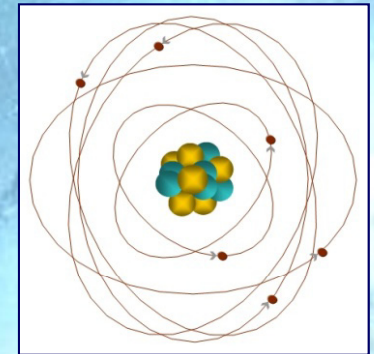
Supernovae Ia

**Ключевые наблюдательные положения
современной космологии:**

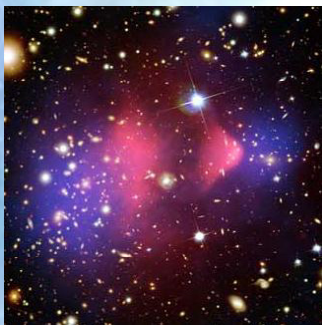
- I. Расширение Вселенной. (Закон Хаббла)
- II. Распространение химических элементов.
- III. Реликтовое Излучение (CMBR).
- IV. Крупномасштабная структура Вселенной.
- V. Ускоренное расширение Вселенной.
(Антигравитация)



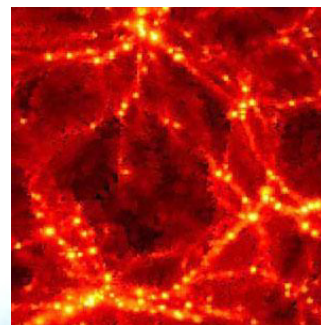
Gravitational
lensing



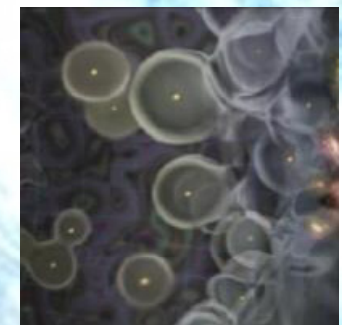
Big Bang
nucleosynthesis



Galaxy clusters

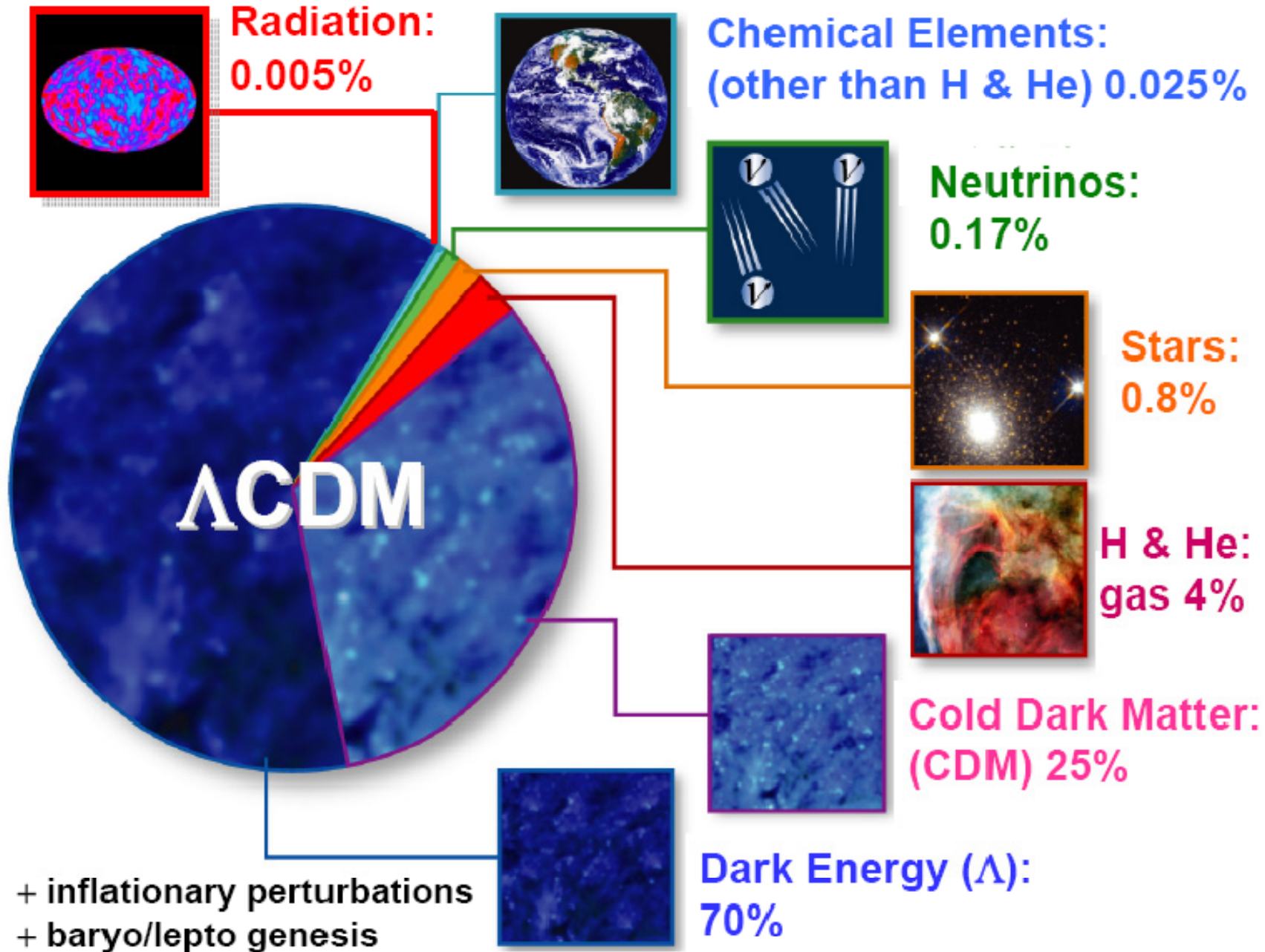


Lyman α forest



Hydrogen tomography

Формы материи во Вселенной



Ω_b
~
5%

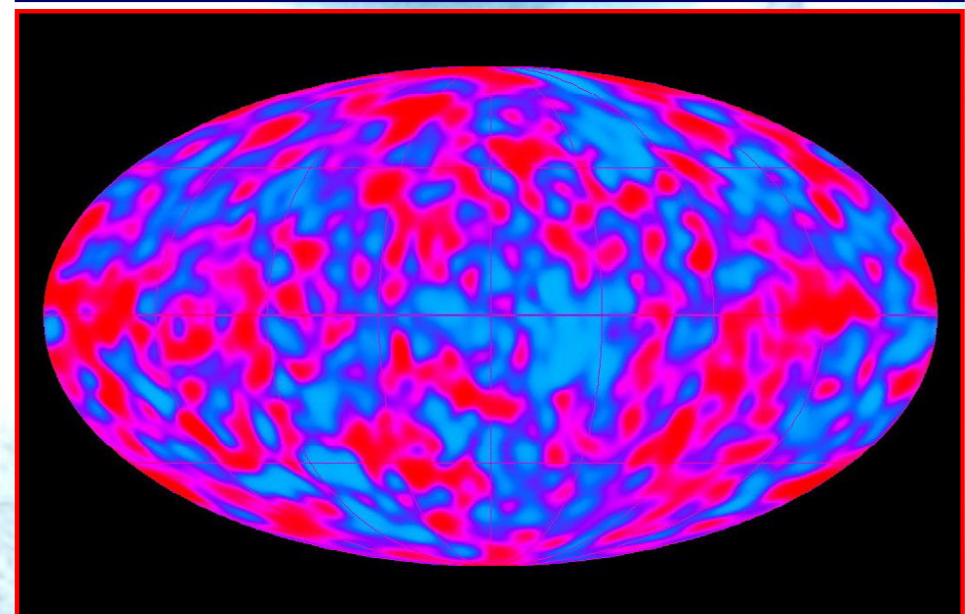
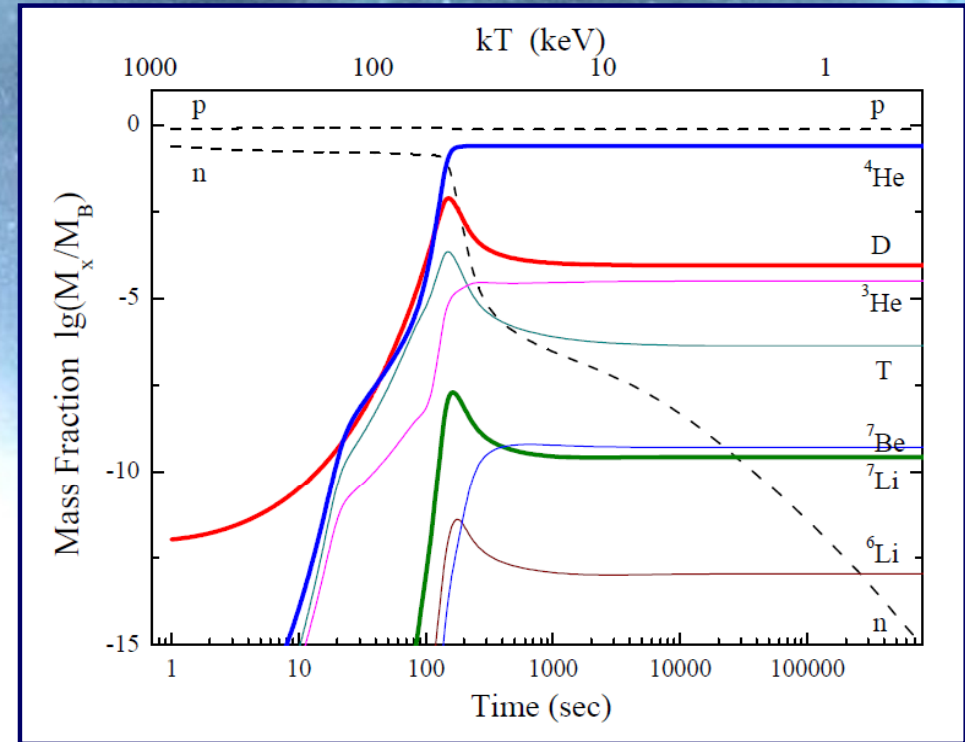
95 %
???

I.

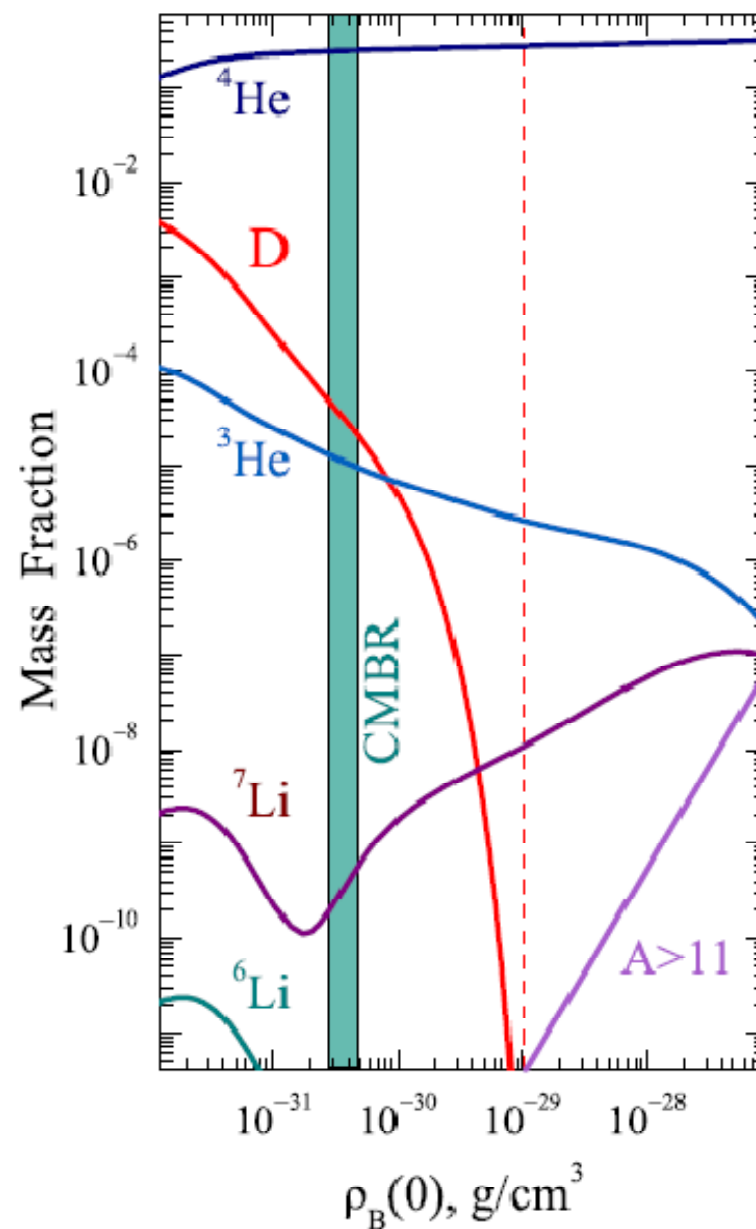
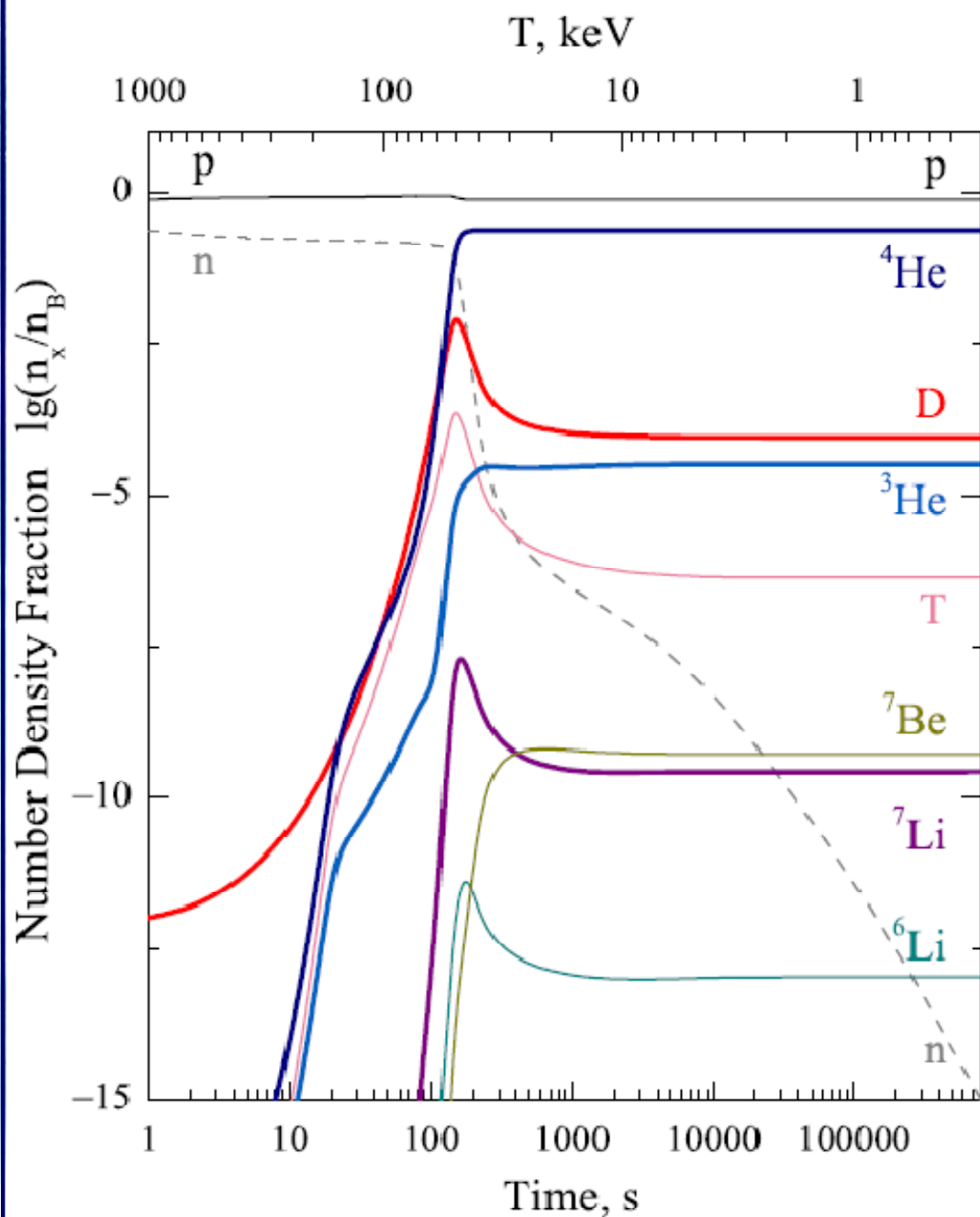
Химический состав Вселенной и Реликтовое Излучение



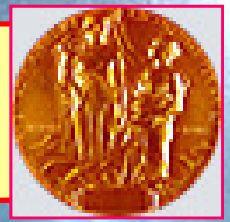
Георгий Гамов
Горячая Вселенная
1948



Первичный нуклеосинтез

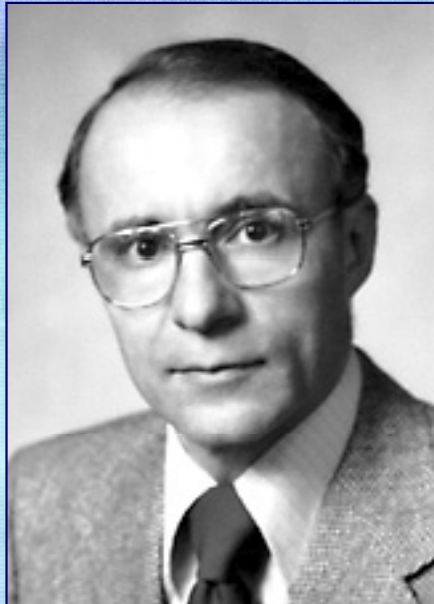


II. The Nobel Prize in Physics

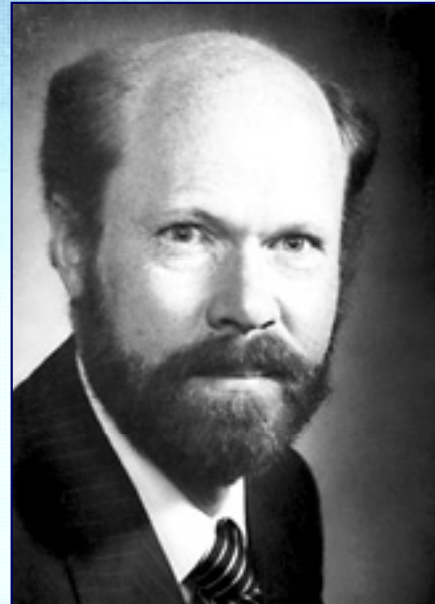


1978

За открытие космического
микроволнового фонового
излучения



Arno A. Penzias
1/4 of the prize
USA



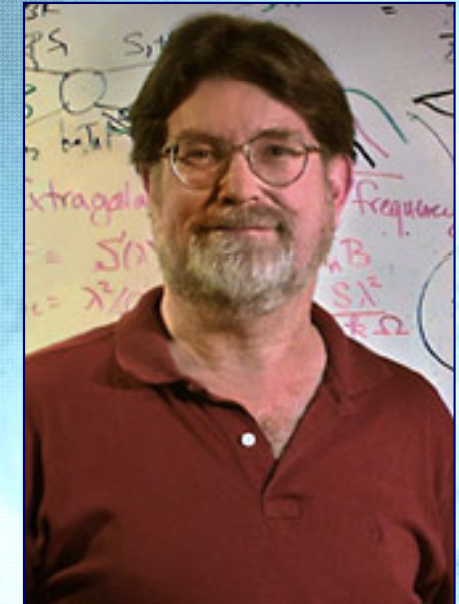
Robert W. Wilson
1/4 of the prize
USA

2006

За открытие чернотельной формы
и
анизотропии CMBR



John C. Mather
1/2 of the prize
USA

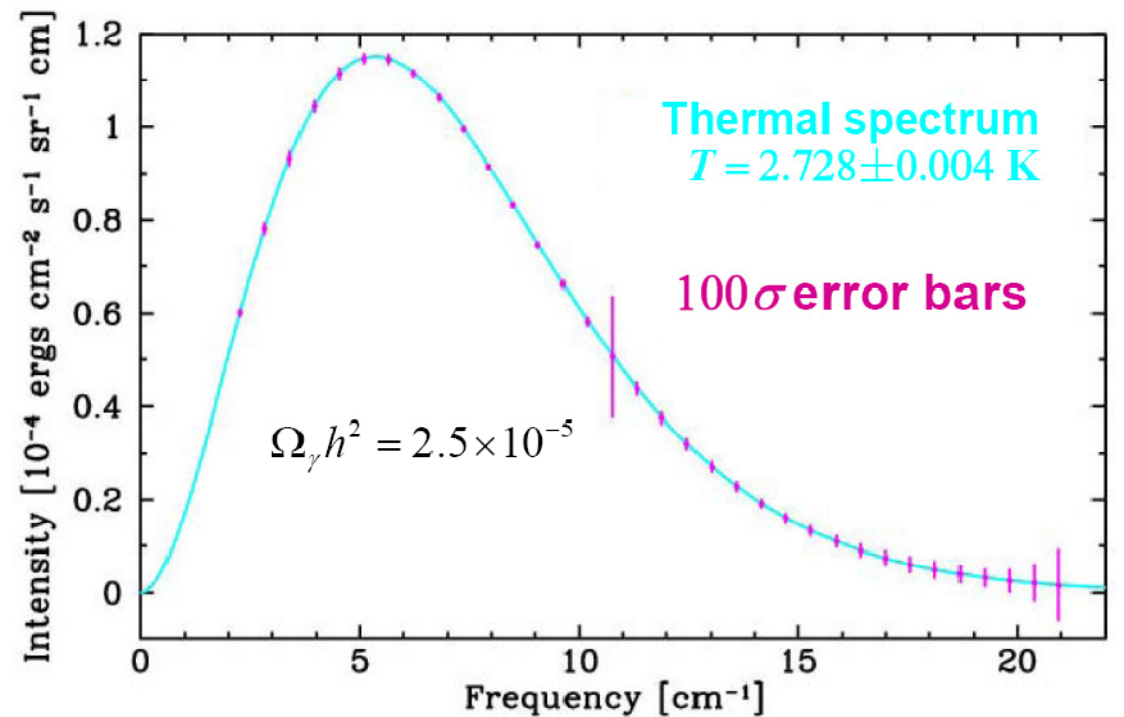
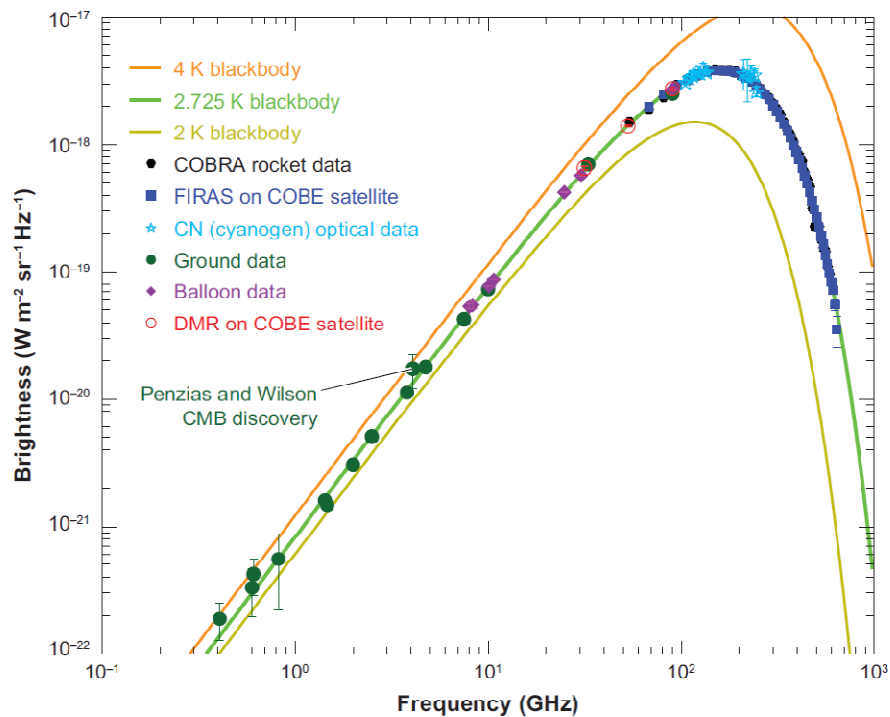


George F. Smoot
1/2 of the prize
USA

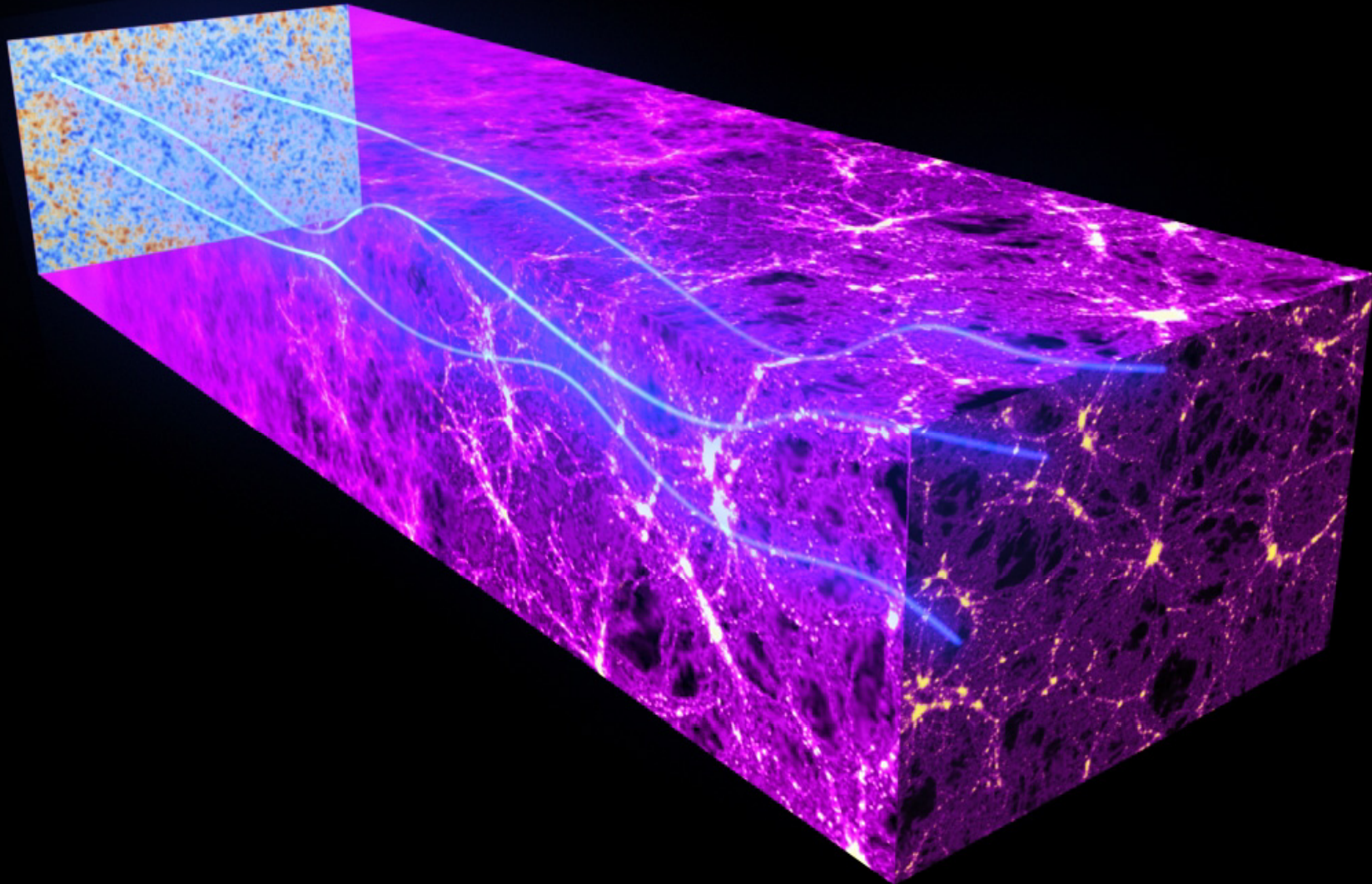
Реликтовое Излучение (CMBR)

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

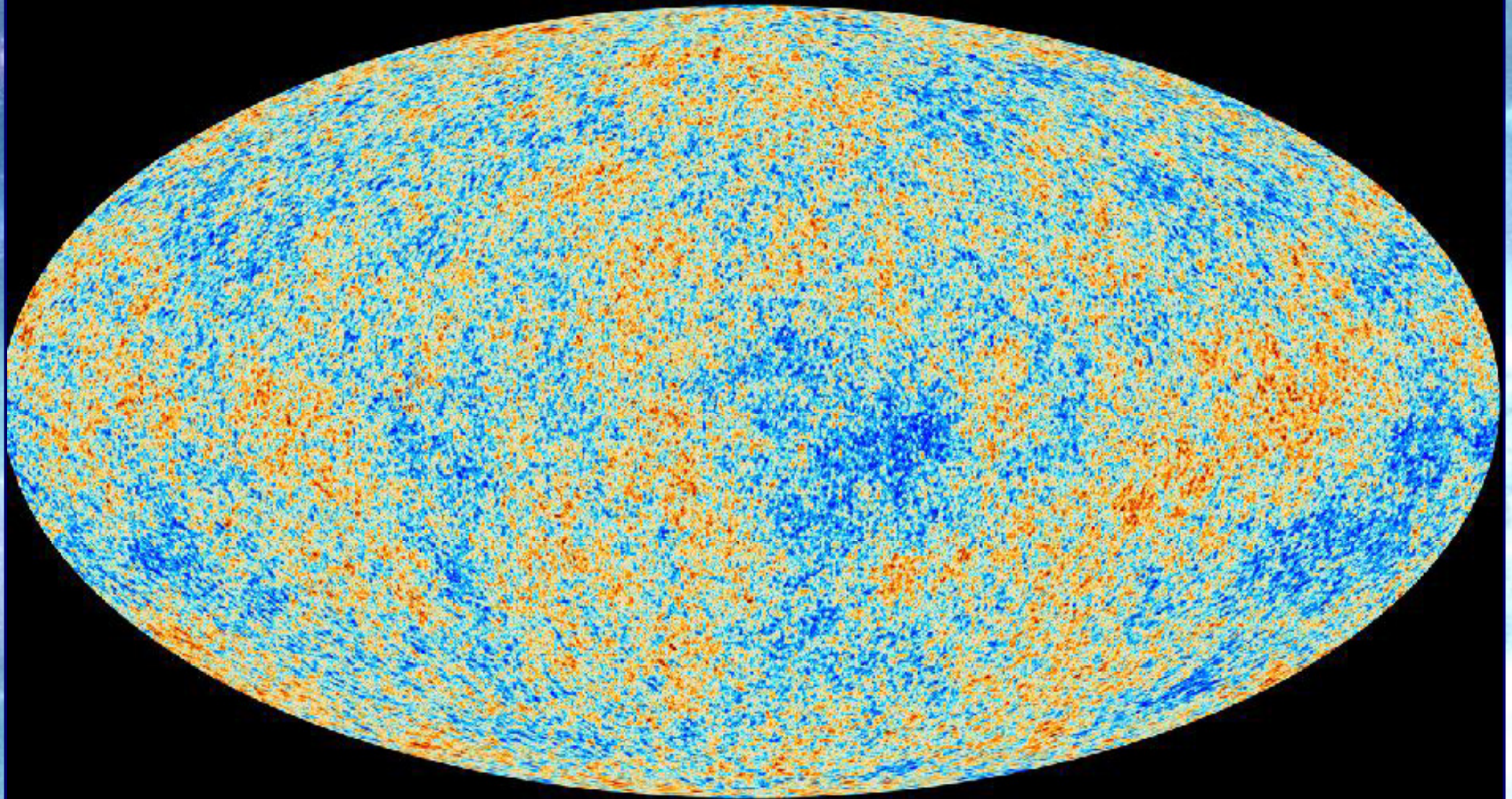
$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$



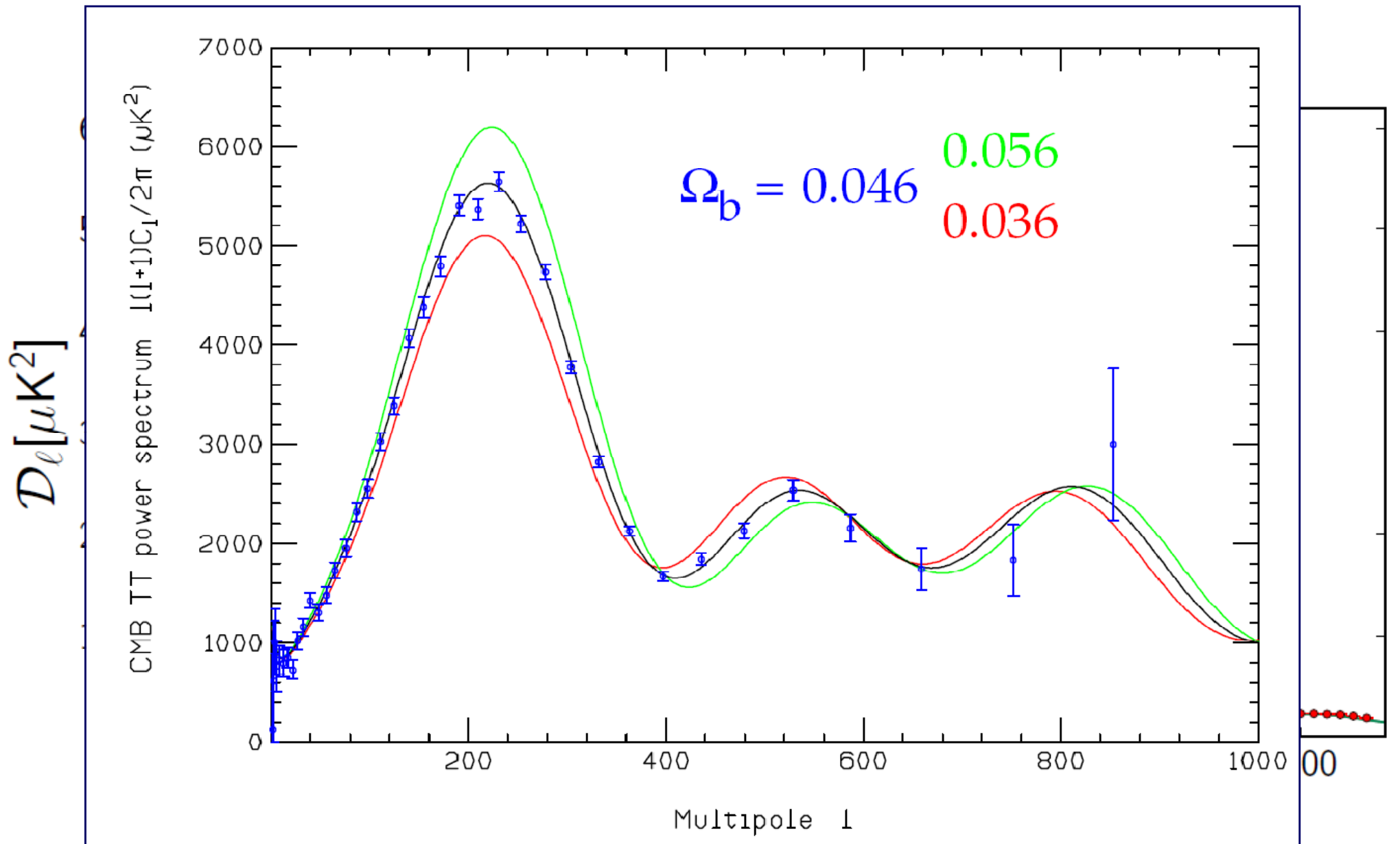
Рождение и распространение РИ



Основные результаты Планка



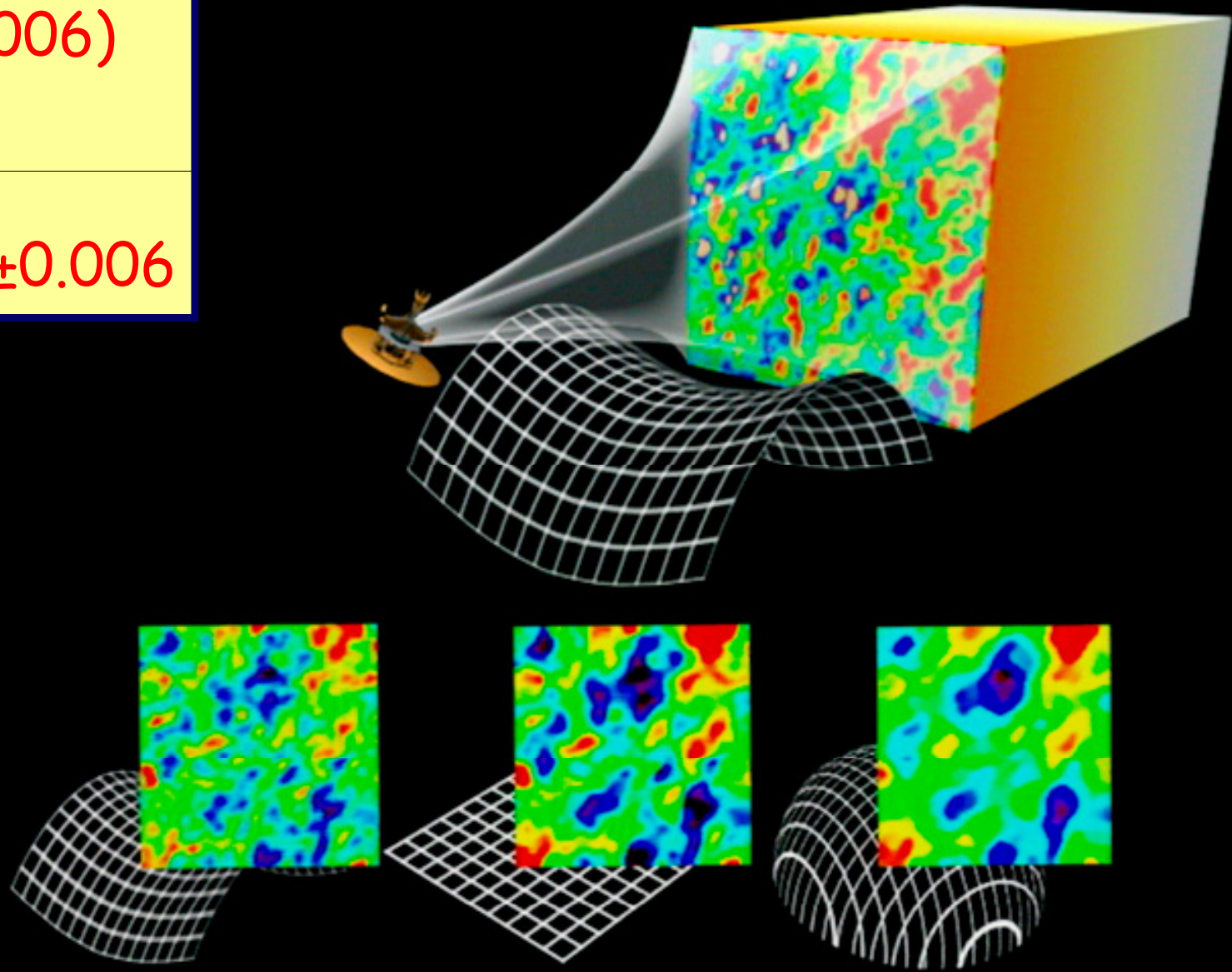
5% барионов



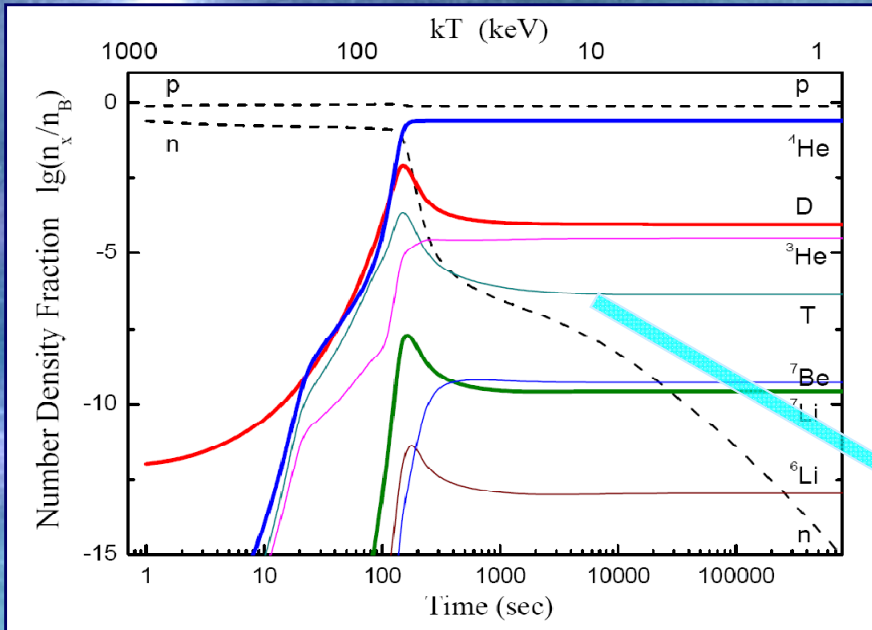
Топология Вселенной

$$\Theta = (1.0415 \pm 0.0006) \times 10^{-2}$$

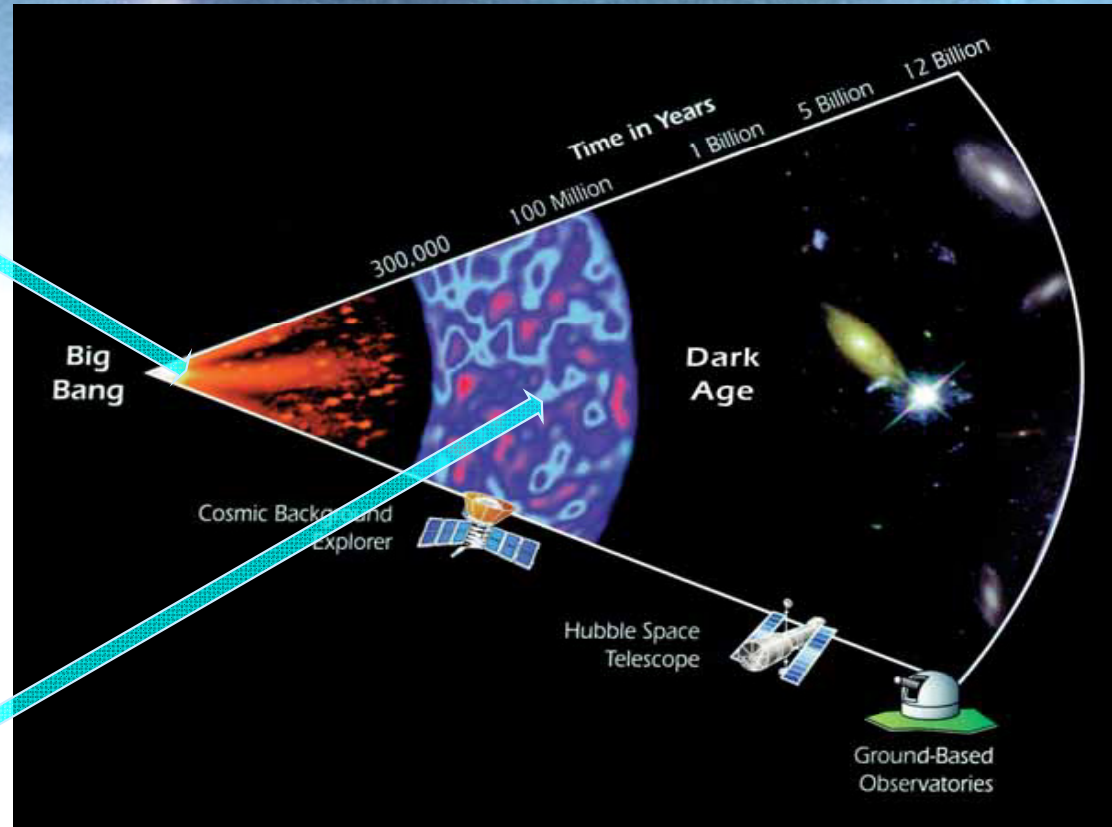
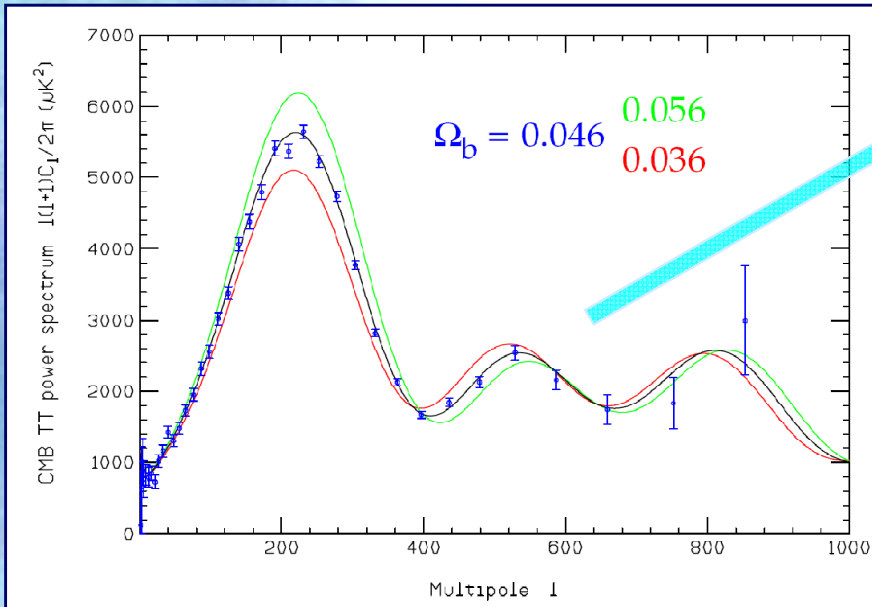
$$\Omega_{\text{tot}} \approx 1.001 \pm 0.006$$



Темная материя (26%) небарионная !!!



5%



Темная Материя
(Dark Matter)

Темная Энергия
(Dark Energy)

Темные Эпохи
(Dark Ages)

Темное Излучение
(Dark Radiation)

Темная Материя

Астрономические наблюдения

1. Динамика скоплений
2. Кривые вращения галактик
3. Гравитационное линзирование
4. Крупномасштабная структура

Физическая природа ?

MOND

(Модифицированная
Ньютоновская динамика)

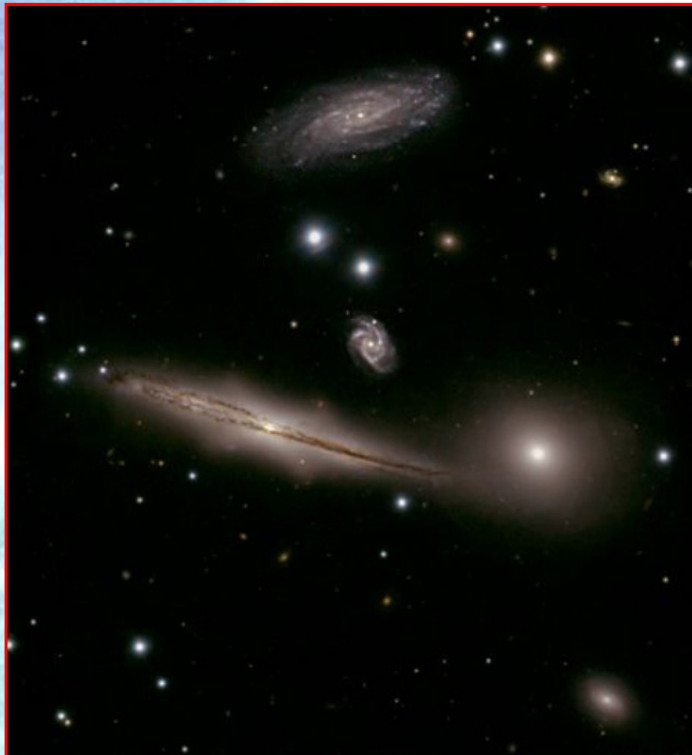
или

Реликтовые
Частицы

(за рамками стандартной
модели)

Фриц
Цвикки

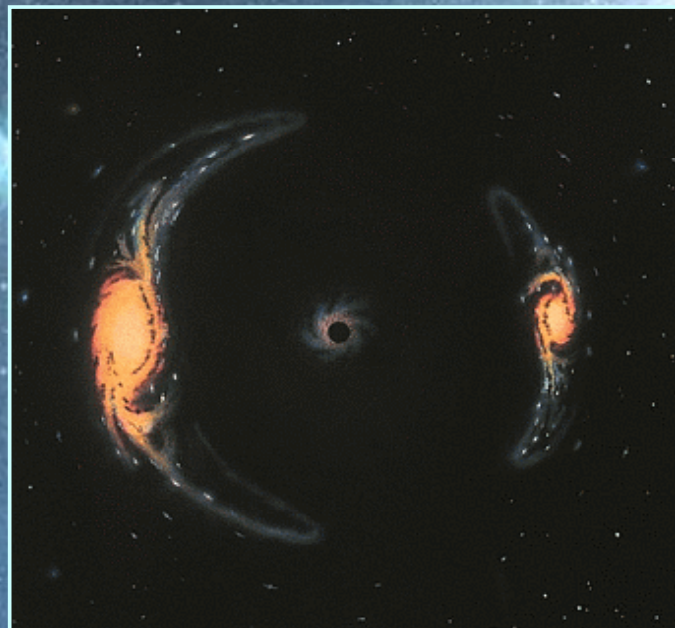
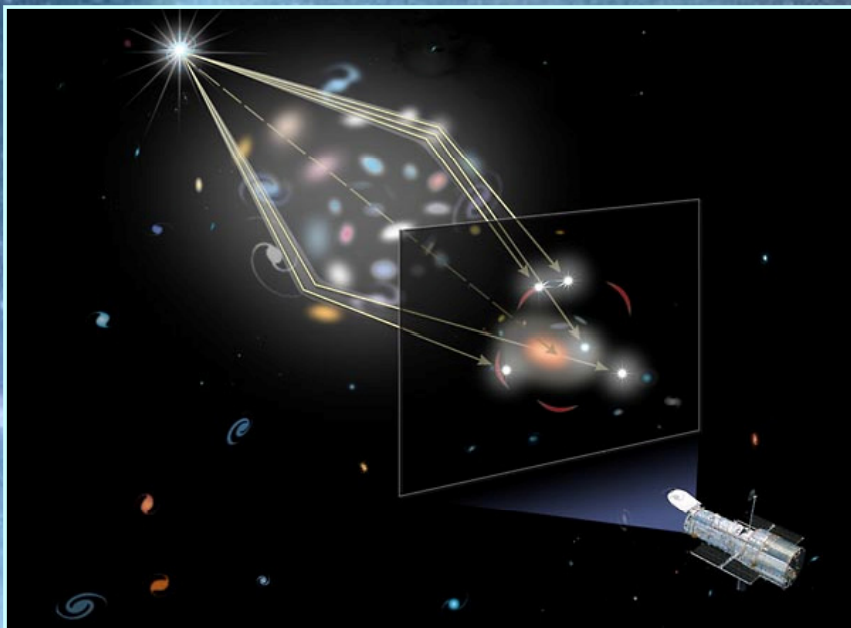
1933 г.



Кривые вращения Галактик



Г
Л
Р
Л
А
И
В
Н
И
З
Т
И
А
р
Ц
о
И
в
О
н
а
Н
н
и
О
е
Е



Bullet cluster

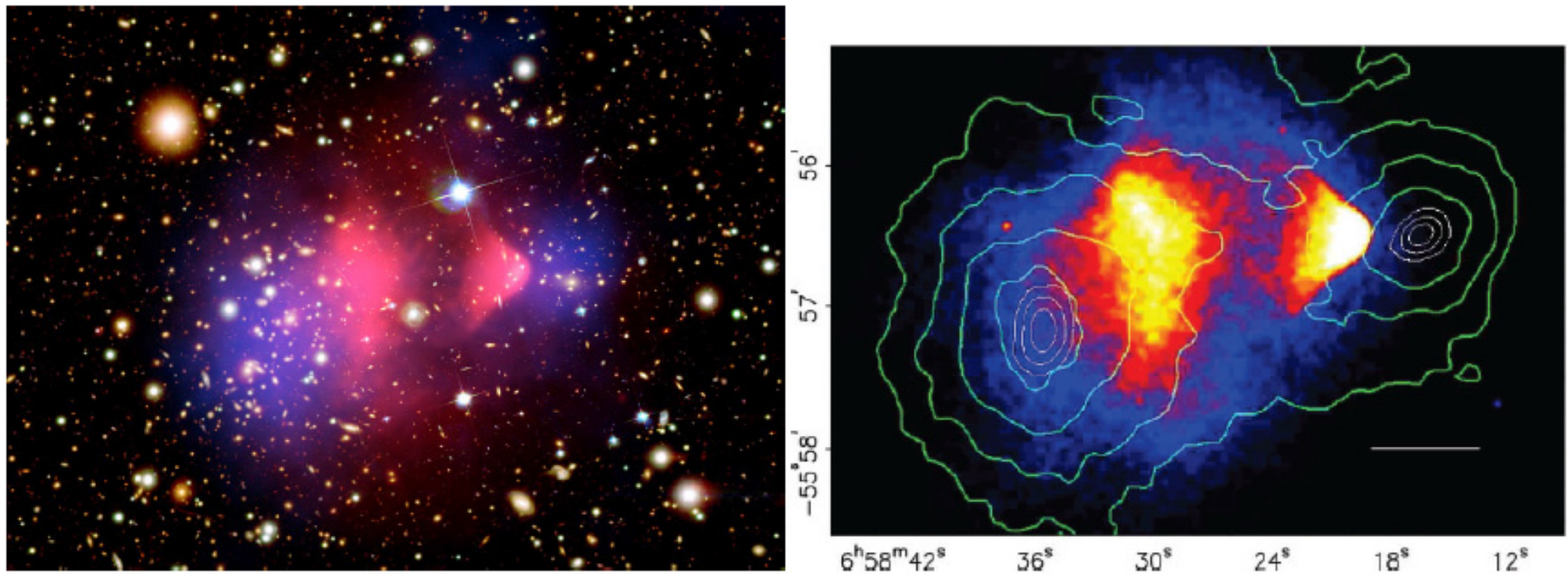
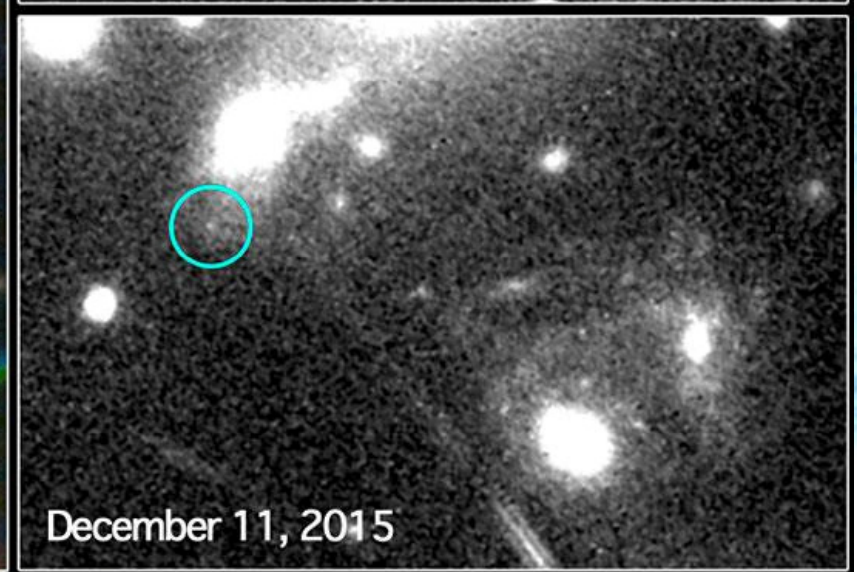
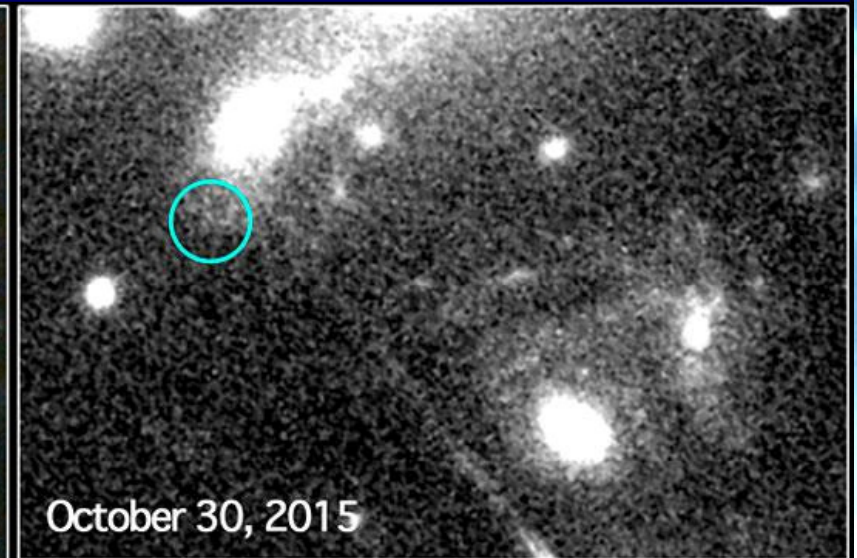
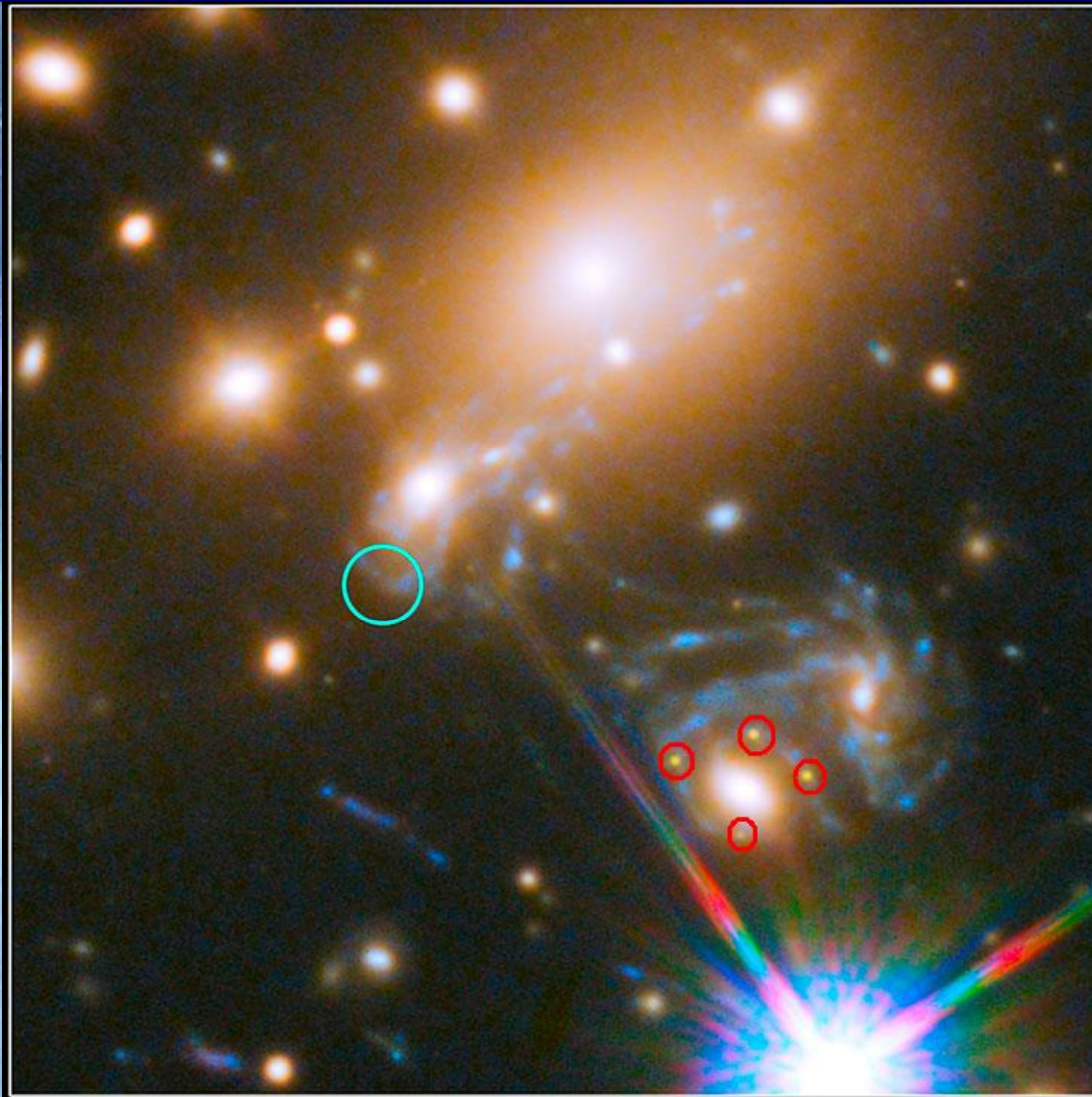


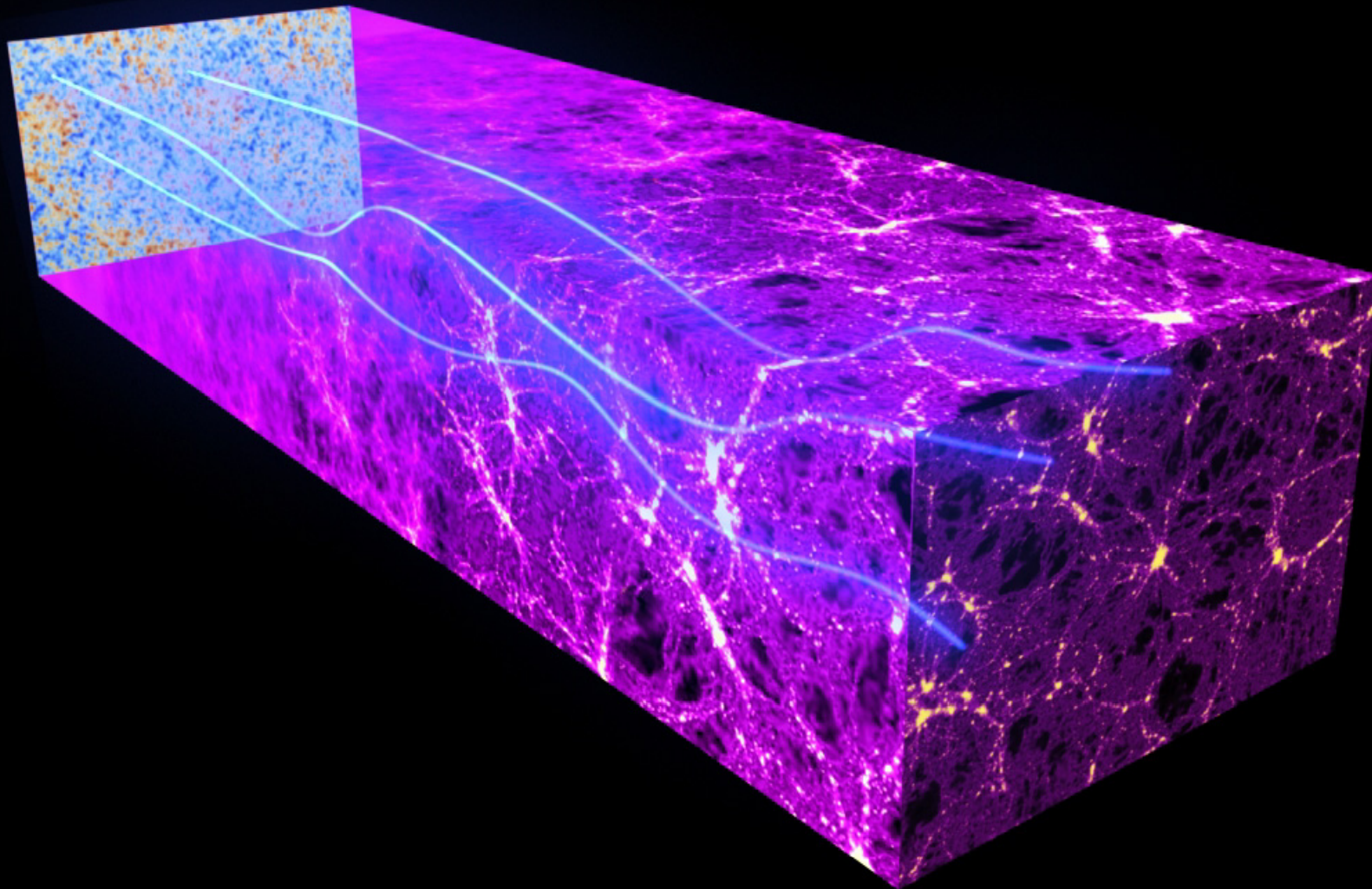
FIGURE 5. Left panel: the Bullet cluster (1E 0657-56) consists of two colliding cluster of galaxies. The smaller cluster that traversed the larger cluster is on the right. X-ray images come from Chandra (red), and the DM (blue) is obtained through lensing. Studies of the Bullet cluster, announced in August 2006, provide the best evidence to date for the existence of DM. The spatial offset of total mass-baryonic mass peaks cannot be explained using modified gravity, at 8σ level. Right panel: Bullet cluster, mass density contours, in green, obtained through weak lensing, superimposed over photograph got from HST. (From Clowe[6])

10 ноября 2014, $z=1.49$ (9.3 млрд. лет),
Скопление MACS J1149.5+2223 ($z=0.54$)

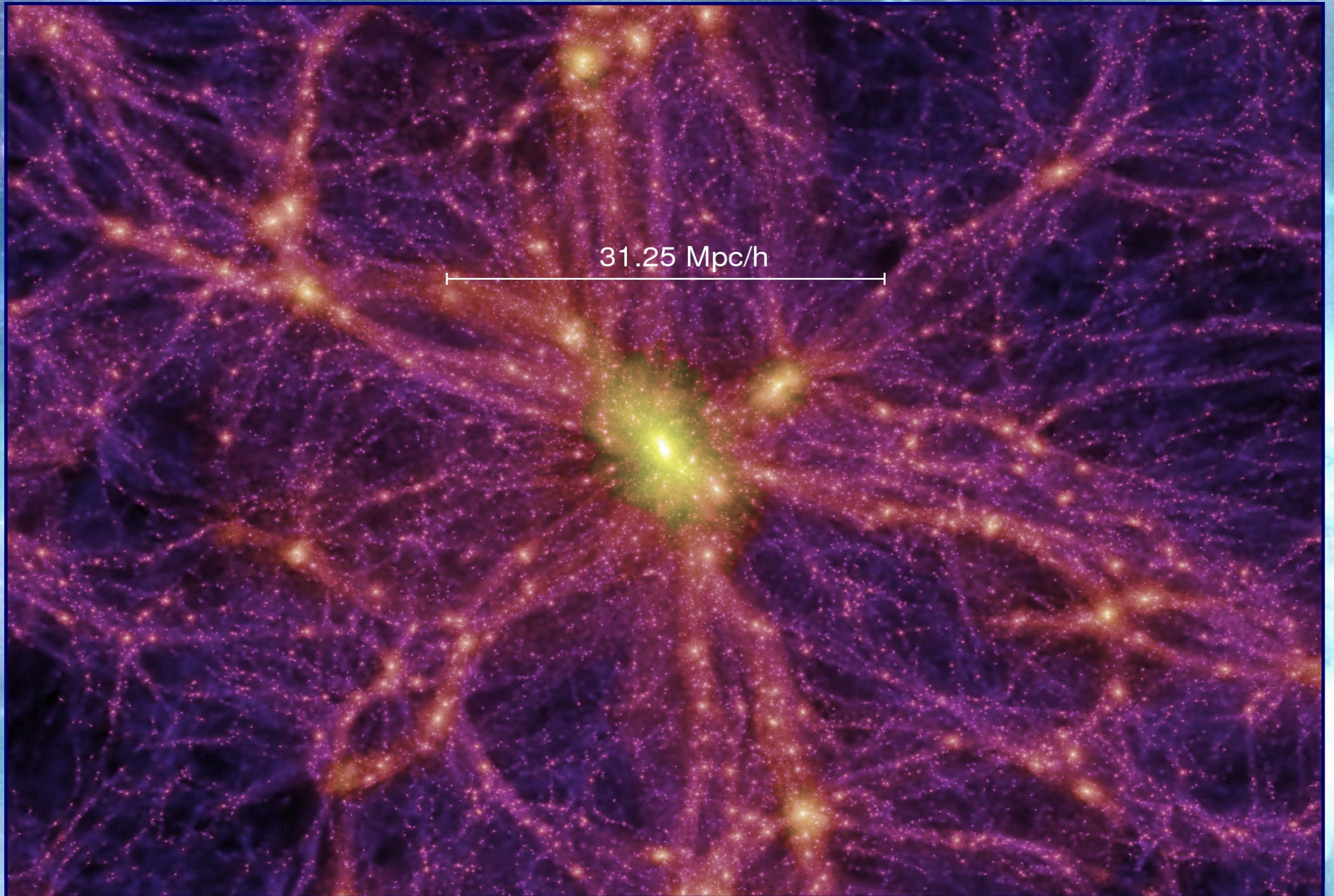


11 декабря 2015

Гравитационное линзирование СМВ (Планк)



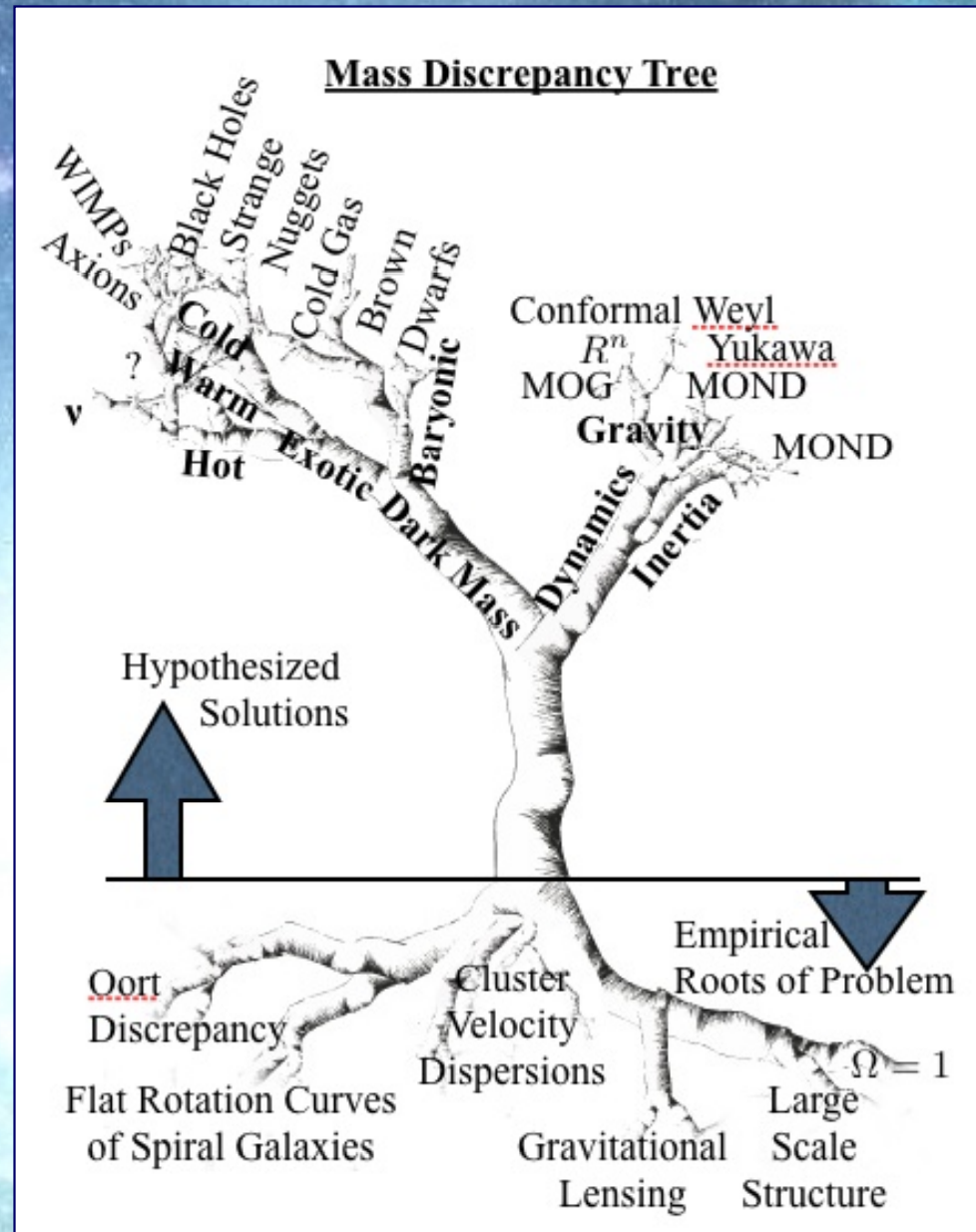
Крупномасштабная структура Вселенной



Природа Темной Материи

WIMP

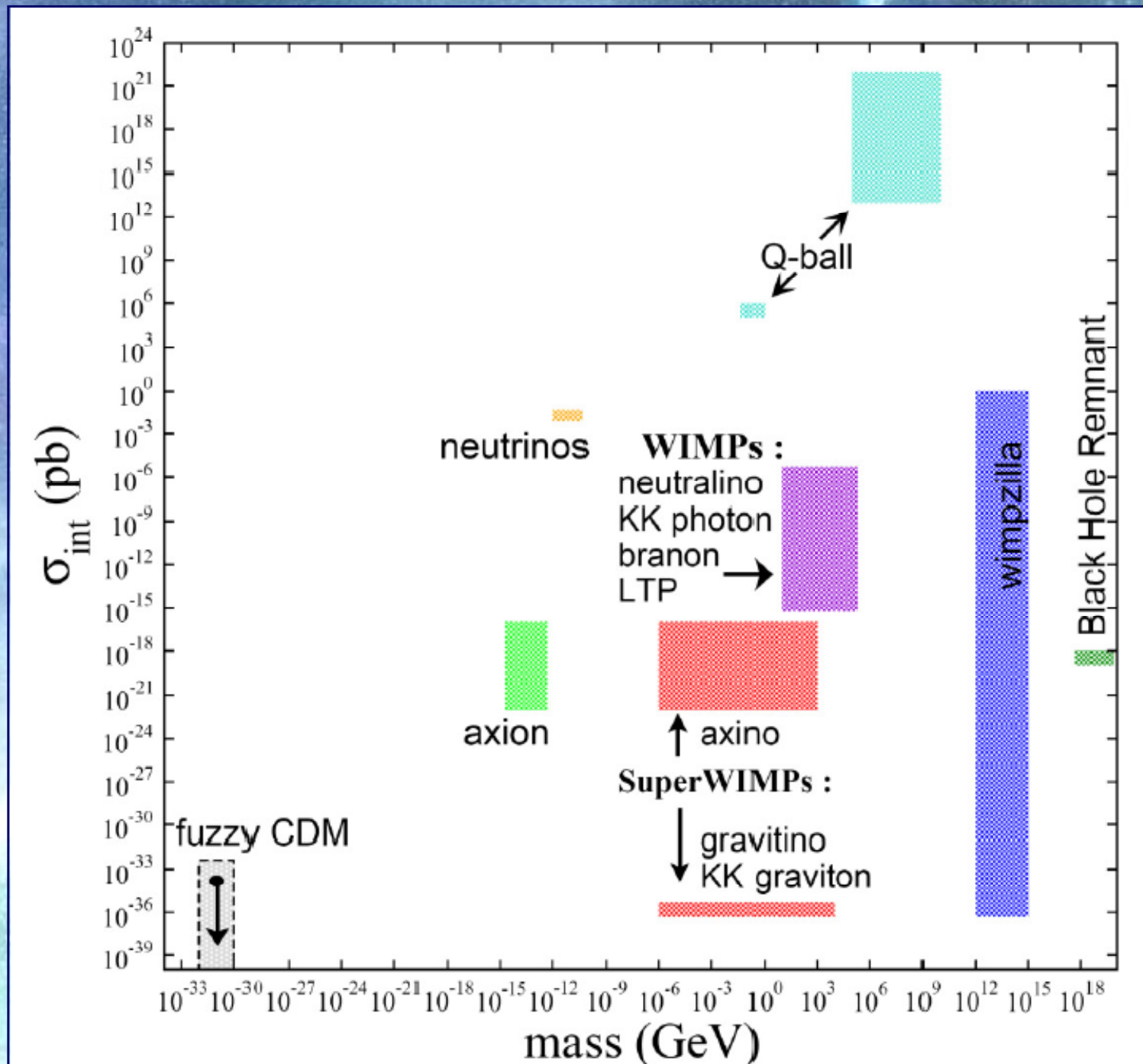
Слабо-
Взаимодейс-
твующие
Массивные
Частицы



MOND

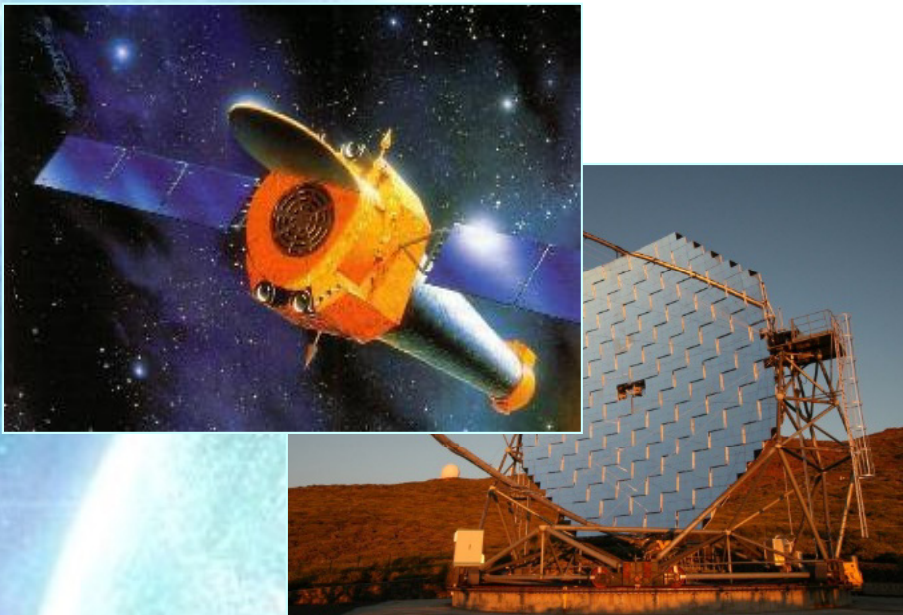
Модифицир-
ованные
Ньютоновские
Гравитации

Кандидаты в DM

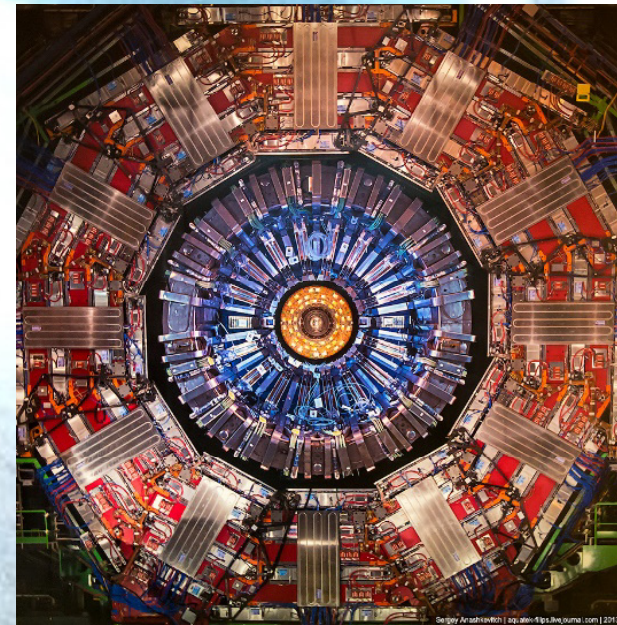


Методы негравитационного детектирования Темной Материи

Косвенные
Астрофизические
Космологические



Прямые
Ускорители
Детекторы



Текущие эксперименты



Изображение из доклада Direct WIMP searches: на конференции SUSY 2013

Positron fraction

10^{-1}

1

10

p_0

$\log_{10}(e^+/(e^+ + e^-))$

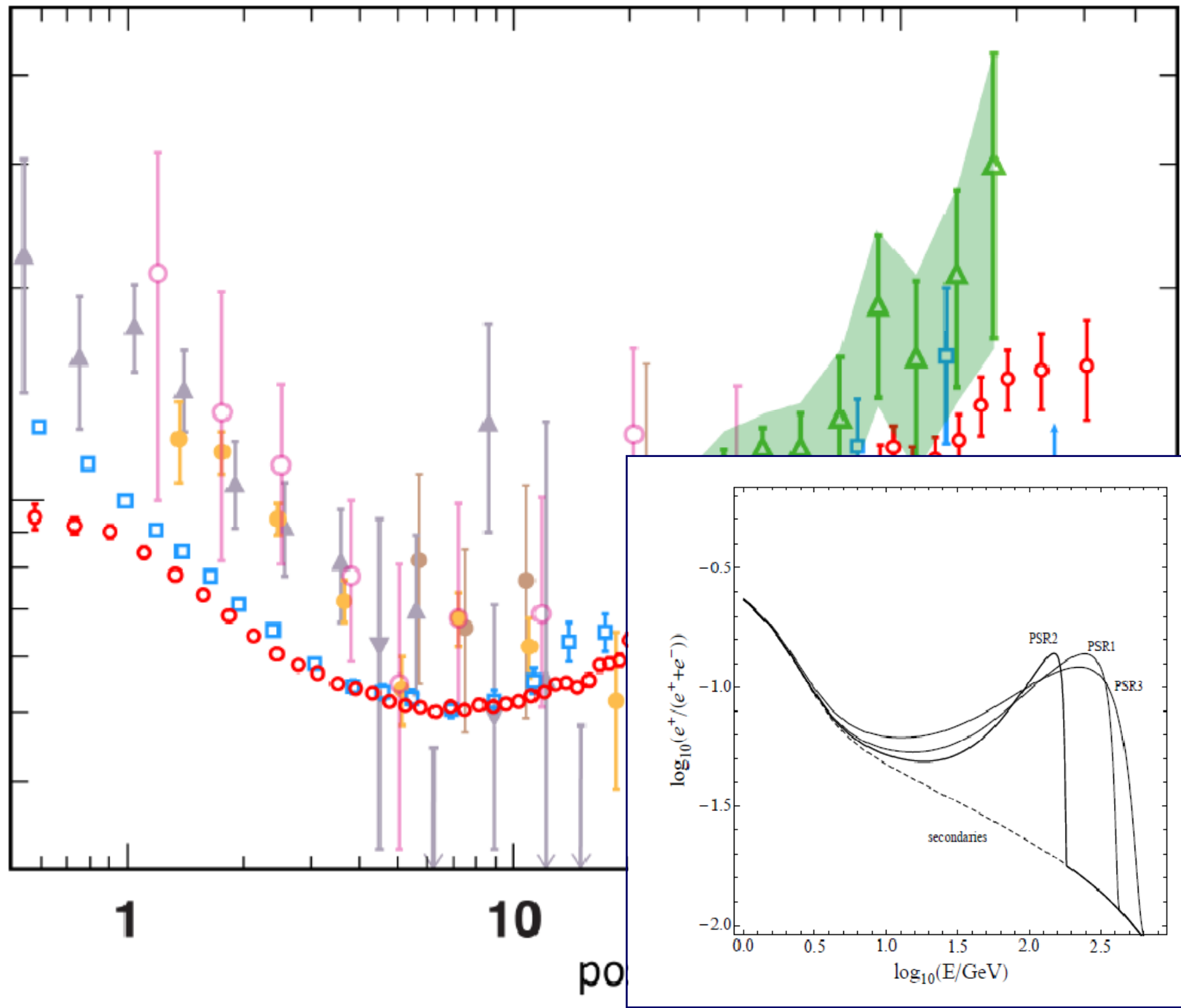
secondaries

PSR2

PSR1

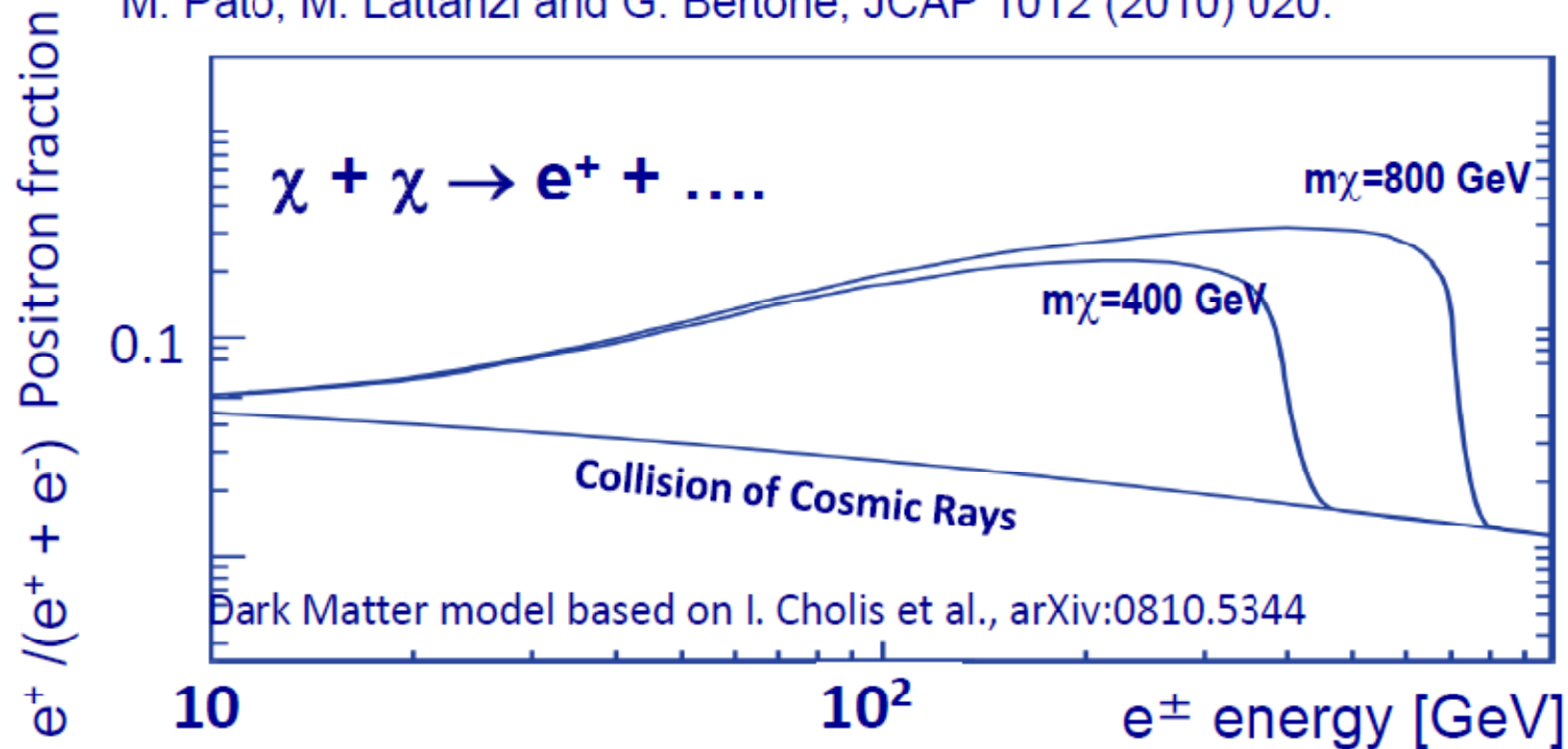
PSR3

$\log_{10}(E/\text{GeV})$



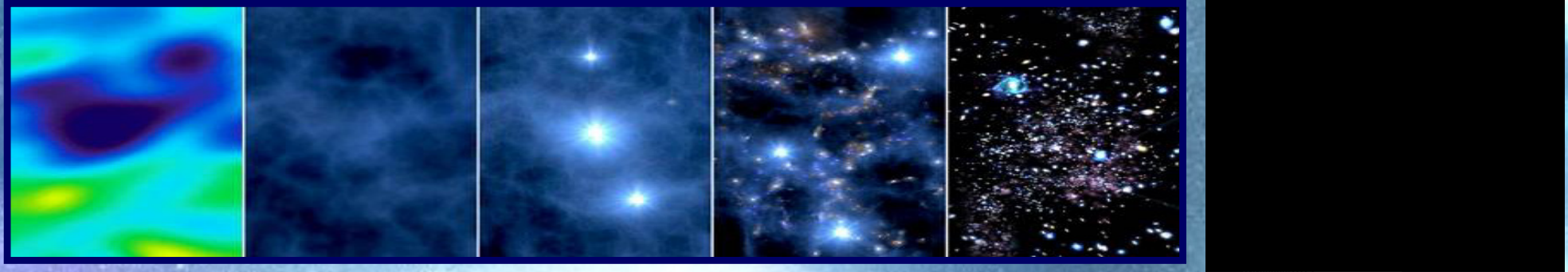
Physics of Positron Fraction

M. Turner and F. Wilczek, Phys. Rev. D42 (1990) 1001;
J. Ellis, 26th ICRC Salt Lake City (1999) astro-ph/9911440;
H. Cheng, J. Feng and K. Matchev, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 211301;
S. Profumo and P. Ullio, J. Cosmology Astroparticle Phys. JCAP07 (2004) 006;
D. Hooper and J. Silk, Phys. Rev. D 71 (2005) 083503;
E. Ponton and L. Randall, JHEP 0904 (2009) 080;
G. Kane, R. Lu and S. Watson, Phys. Lett. B681 (2009) 151;
D. Hooper, P. Blasi and P. D. Serpico, JCAP 0901 025 (2009) 0810.1527; B2
Y-Z. Fan et al., Int. J. Mod. Phys. D19 (2010) 2011;
M. Pato, M. Lattanzi and G. Bertone, JCAP 1012 (2010) 020.



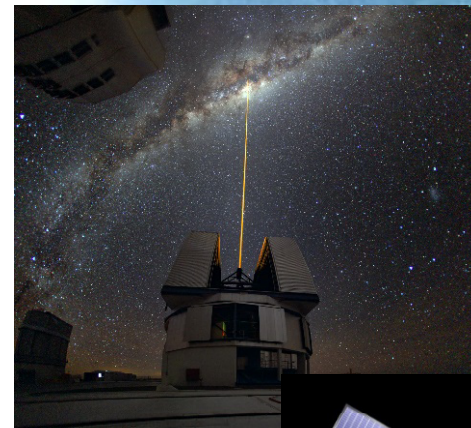
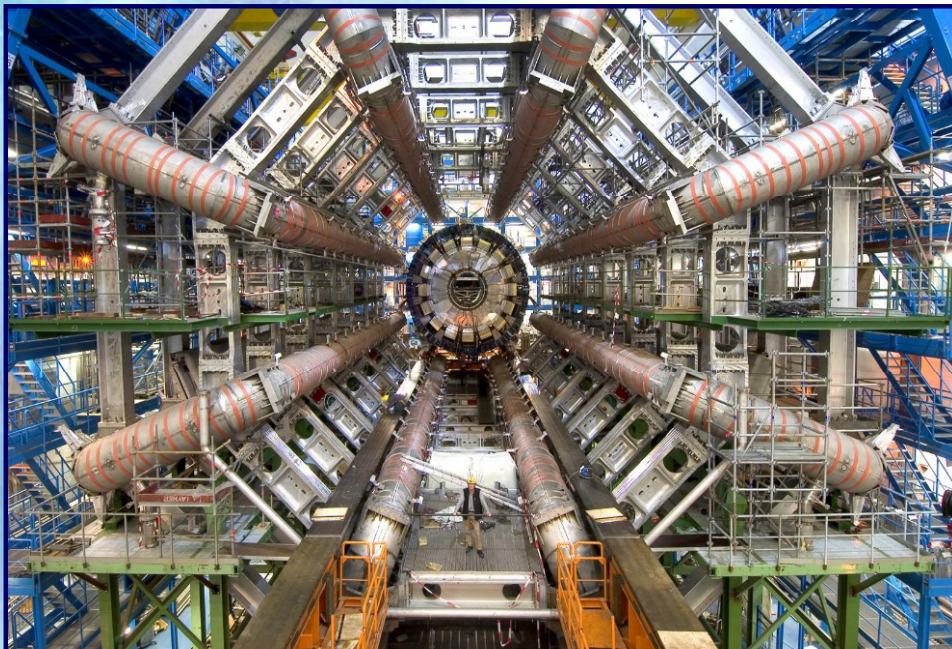
МИКРО - КОСМО

Физика



Большой адронный коллайдер
(коллайдеры)

Наземные и космические
эксперименты



Благодарю

за

внимание



Темные Галактики

