



**Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»**

**Институт ядерной физики и технологий**

**Лаборатория экспериментальной ядерной физики**  
**<http://enpl.mephi.ru/>**

*А.И. Болоздыня*

Экспериментальная ядерная физика

*Лекция №29*

***Ядерная астрофизика***

## *Лекция №29*

# ***Ядерная астрофизика***

1. Модель расширяющейся Вселенной
2. Нуклеосинтез
3. Эволюция звёзд
4. Космические лучи
5. Тёмная материя и тёмная энергия

# 1. Модель расширяющейся Вселенной

**Вселенная Фрийдмана** — первая из нестационарных моделей Вселенной, предложенная А.А.Фрийдманом в 1922, в общем случае описывает **нестационарную** Вселенную, обладающую кривизной.

Решение Фрийдмана было вначале отрицательно воспринято А.Эйнштейном, впоследствии А.Э. не раз подтверждал, что начало теории расширяющейся Вселенной положил А. А. Фрийдман.

Современная  **$\Lambda$ CDM** модель по-прежнему является моделью Фрийдмана, но уже с учётом космологической постоянной и тёмной материи.

В 1929 году Эдвин Хаббл обнаружил зависимость между красным смещением галактик и расстоянием до них (Закон Хаббла):

$$v = H_0 r, \quad H_0 = 67.80 \pm 0.77 \text{ (км/с)/Мпк} \quad (1 \text{ Мпк} \rightarrow 3.09 \times 10^{19} \text{ км})$$

1 пк = 3.26 свет.года

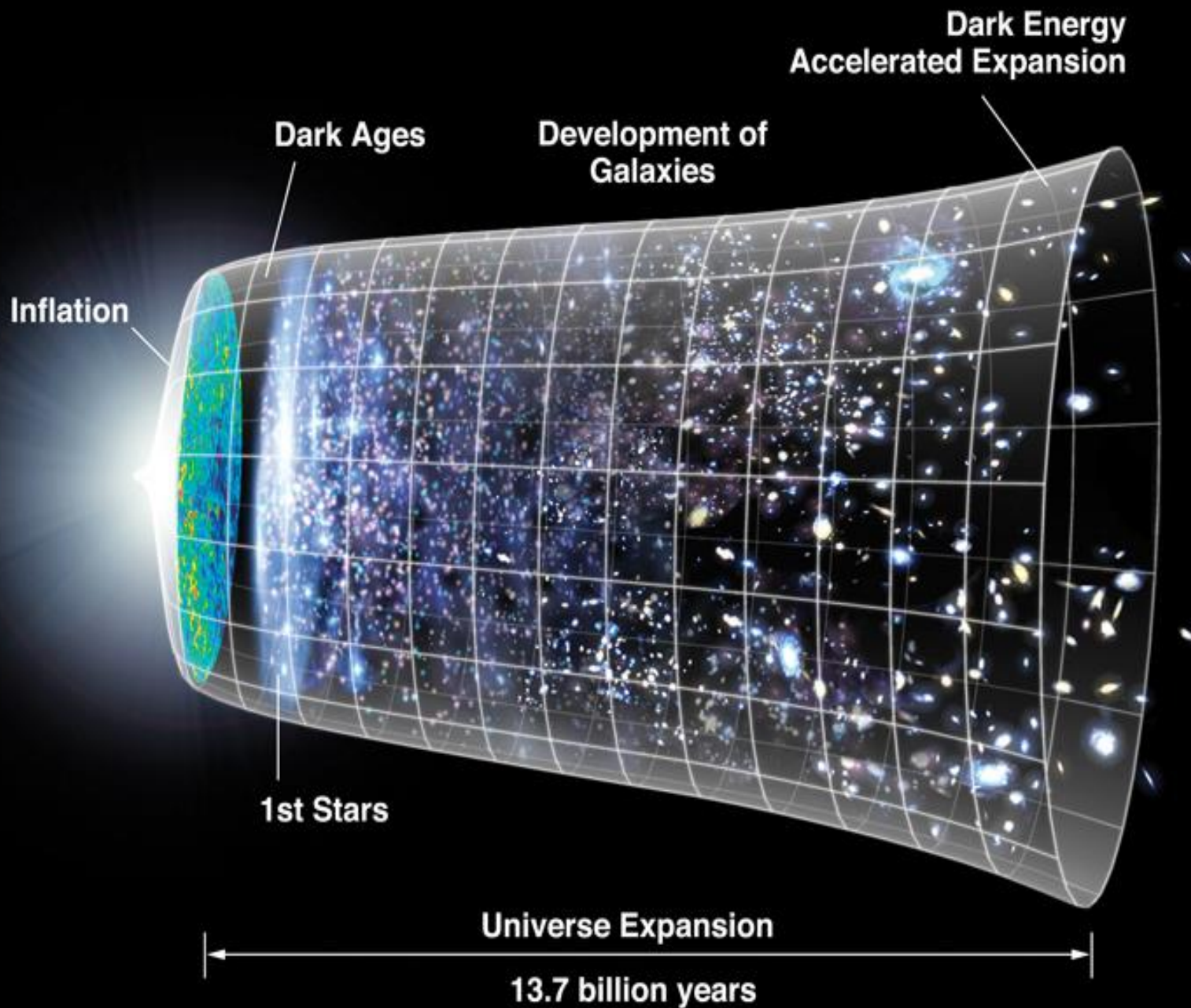
что подтвердило нестационарность Вселенной, введённую Фрийдманом

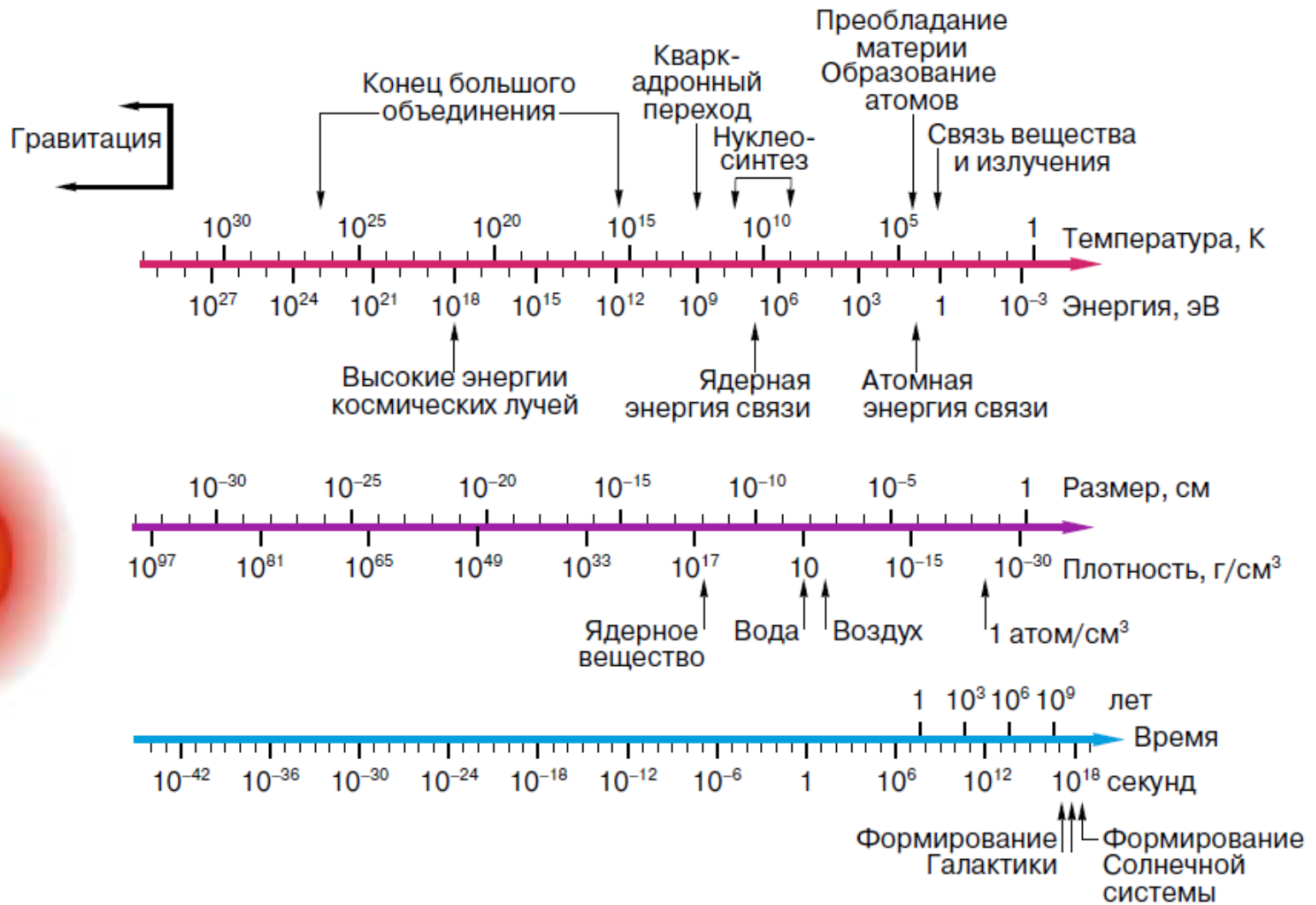
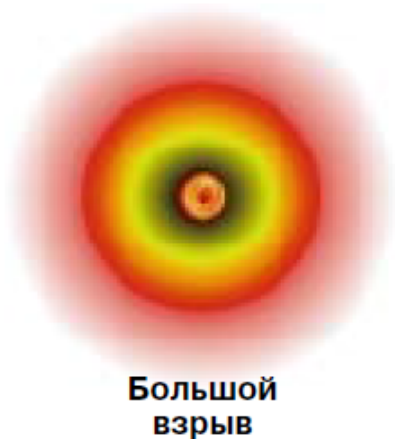
1964 — американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вилсон открыли микроволновый космический фон э.-м. излучения и измерили его температуру = 3 К, как и было предсказано моделью «Большого Взрыва»

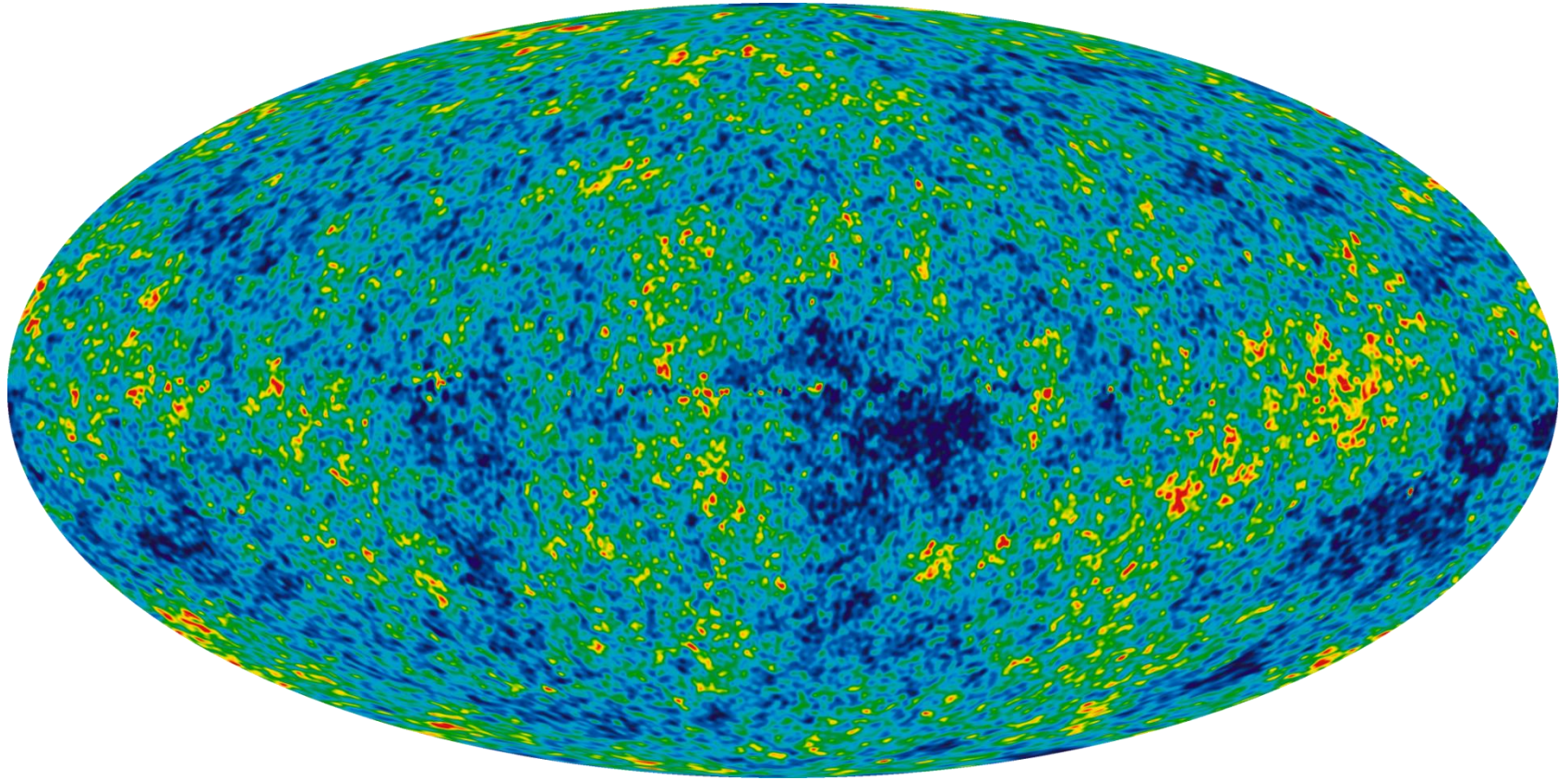
В 1998 году было обнаружено что Вселенная ускоряет расширение за счет «темной энергии»



А.А.Фрийдман, 1916 г.  
(1888 — 1925)







*Распределение микроволнового фона (реликтового излучения) по небесной сфере*

9-летняя экспозиция со спутника WMAP. Данные подтверждают космологическую модель  $\Lambda$ CDM и инфляционную теорию Вселенной: возраст 13.77 млрд. лет, барионная материя — 4 %, тёмная материя — 23 %, тёмная энергия — 73 %.  $T=2,72548 \pm 0,00057$  K

The signal from our galaxy was subtracted using the multi-frequency data. This image shows a temperature range of  $\pm 200$  microKelvin.

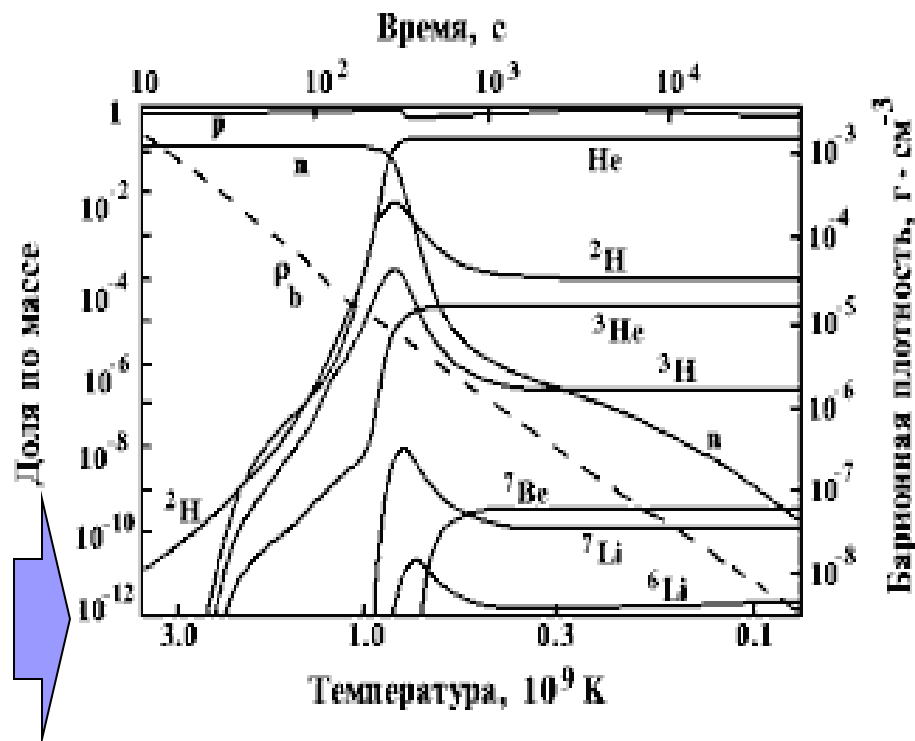
<http://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>

## 2. Нуклеосинтез

Существуют три главных механизма нуклеосинтеза во Вселенной:

- 1) первичный (космологический или дозвёздный) нуклеосинтез,
- 2) синтез ядер в звёздах и при взрывах звёзд (звёздный),
- 3) нуклеосинтез под действием космических лучей.

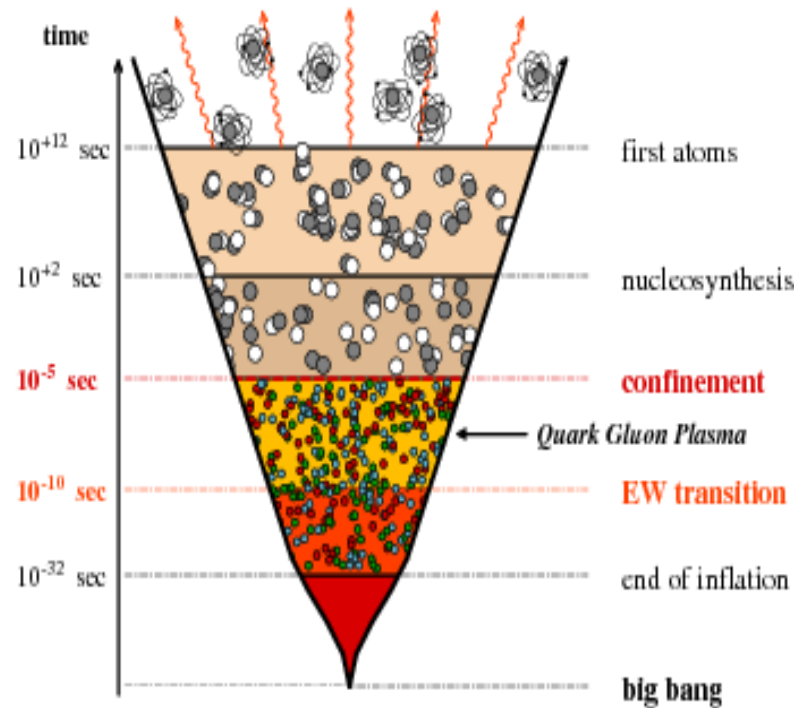
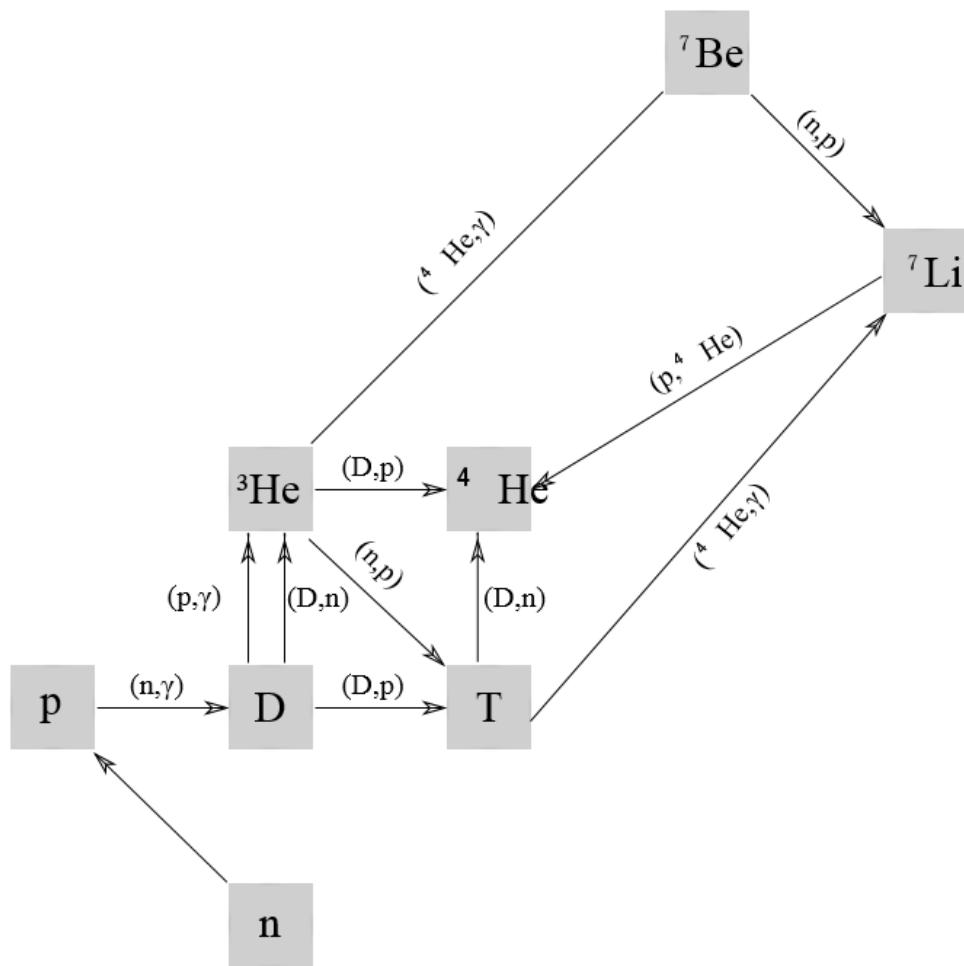
В горячем прото-веществе Вселенной, содержащем протоны и нейтроны при температуре  $\approx 10^9$  К, в результате их слияния образовывались лёгкие элементы.



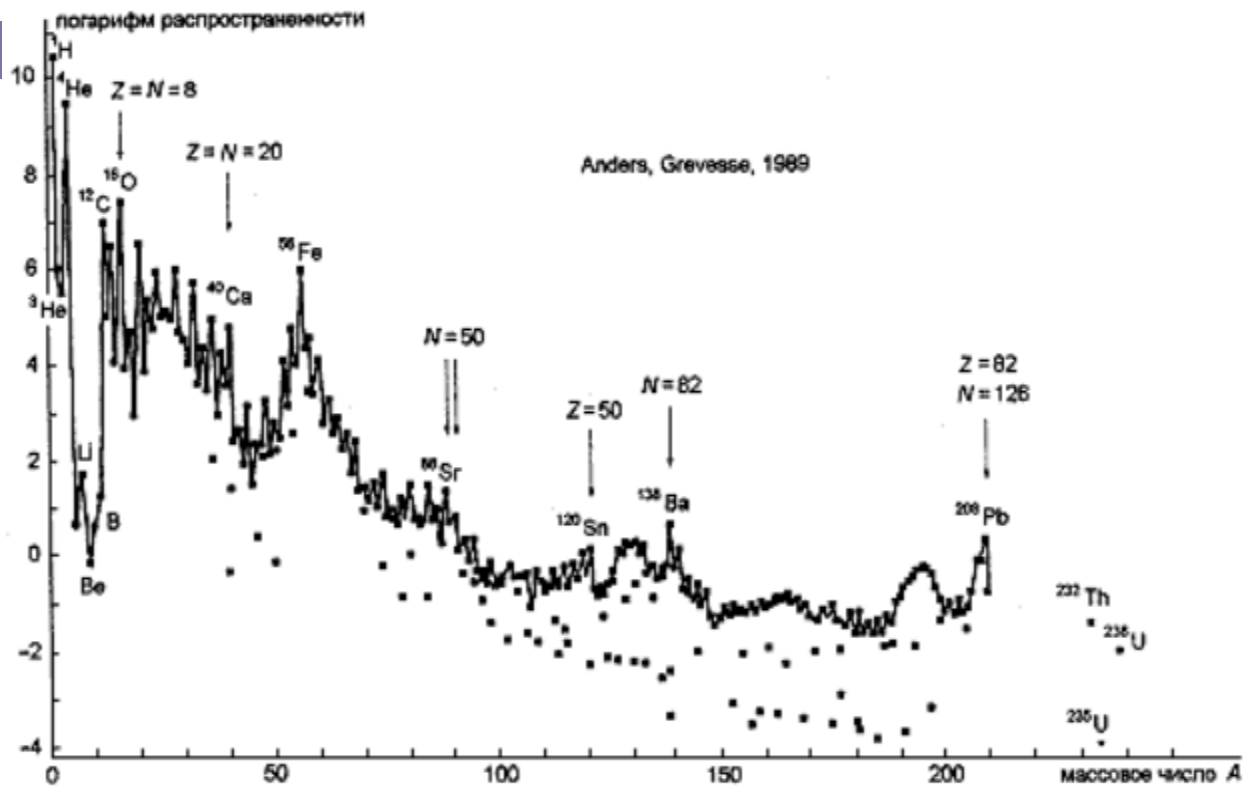
При плотности вещества  $\rho \sim 10^{-3} - 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> вероятность того, что нейтрон и протон не провзаимодействуют за время первичного нуклеосинтеза составляет менее  $10^{-4}$ .

Так как в начале на один нейтрон приходилось 5 протонов, соотношение между числом ядер  $^4\text{He}$  и  $p$  должно быть  $\sim 1/10$ . Наблюдаемое соотношение распространенностей водорода и гелия сформировалось в течение первых минут существования Вселенной.

# Первичный нуклеосинтез



## Звёздный нуклеосинтез

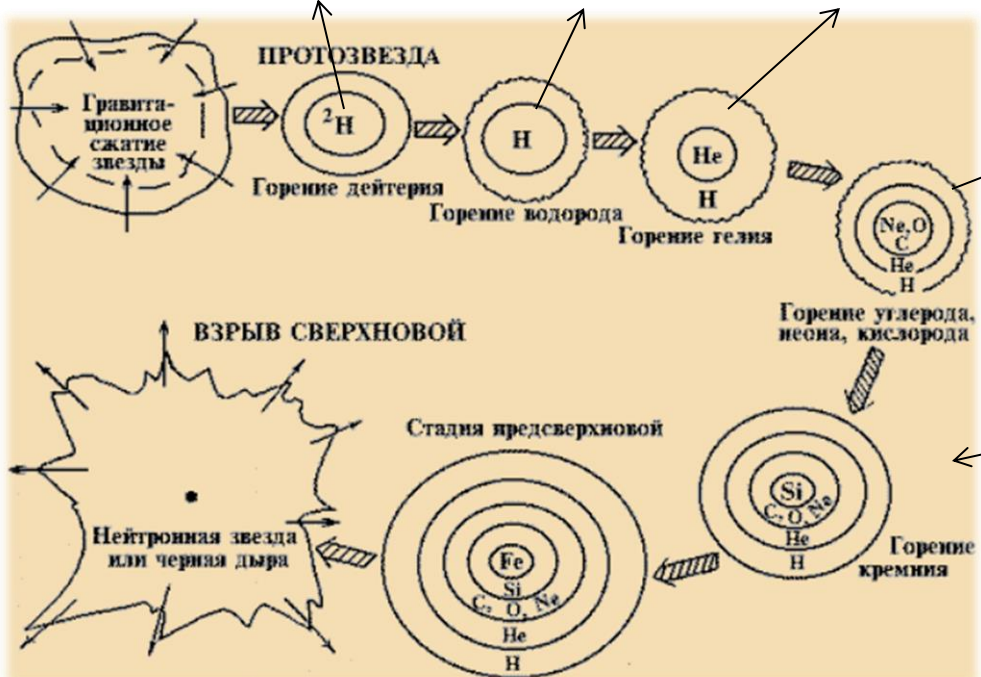
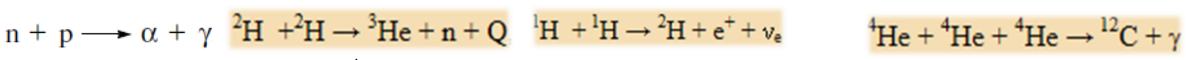


После того как во Вселенной образовались звёзды, основным механизмом нуклеосинтеза становятся ядерные реакции в звёздах. Ядра тяжёлых элементов (вплоть до урана) образуются в массивных звёздах и при взрывах сверхновых главным образом в результате захвата нейтронов более лёгкими ядрами с последующим  $\beta^-$  - распадом.

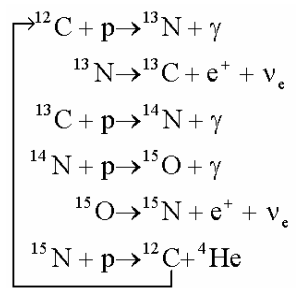
Некоторые химические элементы и даже молекулы образуются в результате взаимодействия космических лучей с межзвёздной средой.

В результате нуклеосинтеза сформировался современный атомарный состав Вселенной, где больше всего водорода ( $\approx 91\%$  атомов) и гелия ( $\approx 8.9\%$ ). Остальных атомов  $< 0.2\%$ . Нуклеосинтез продолжается и в настоящее время.

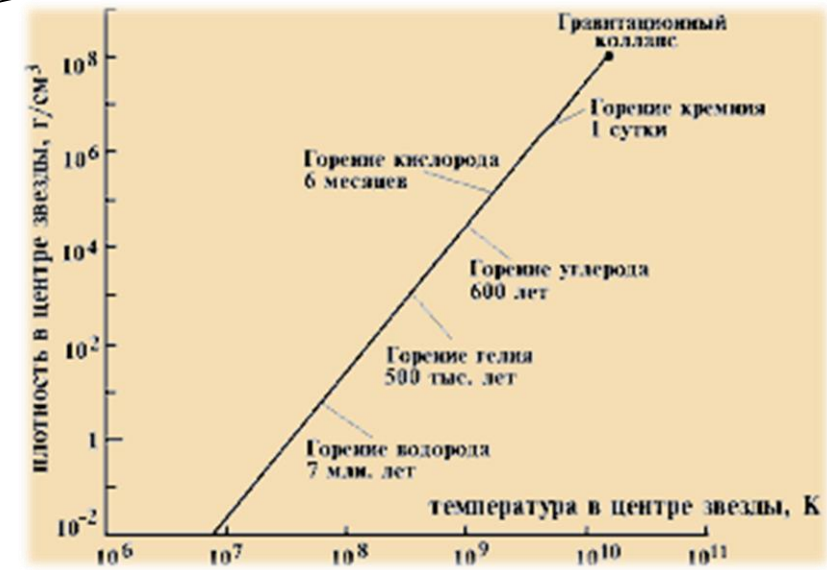
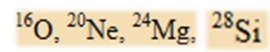
# 3. Эволюция звёзд



CNO цикл

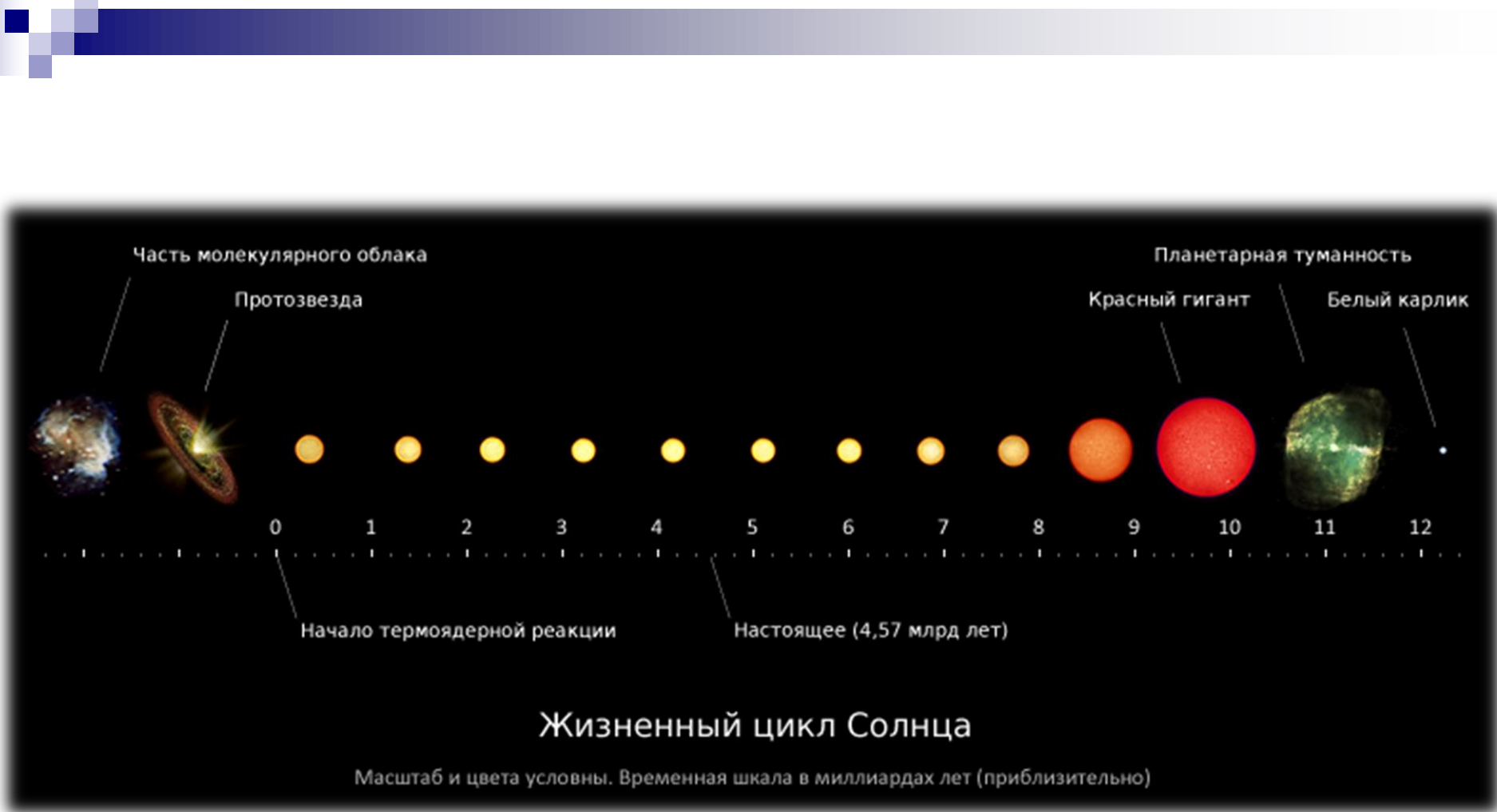


α-процесс



Основные этапы эволюции массивной звезды  $M > 25 M_{\odot}$

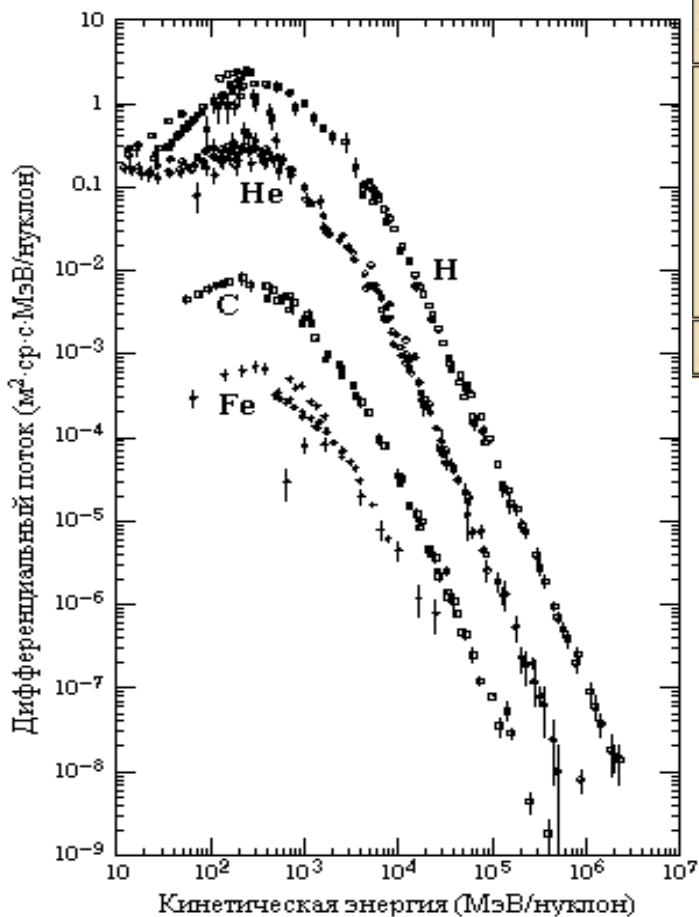
Масса, $M_{\odot}$	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии



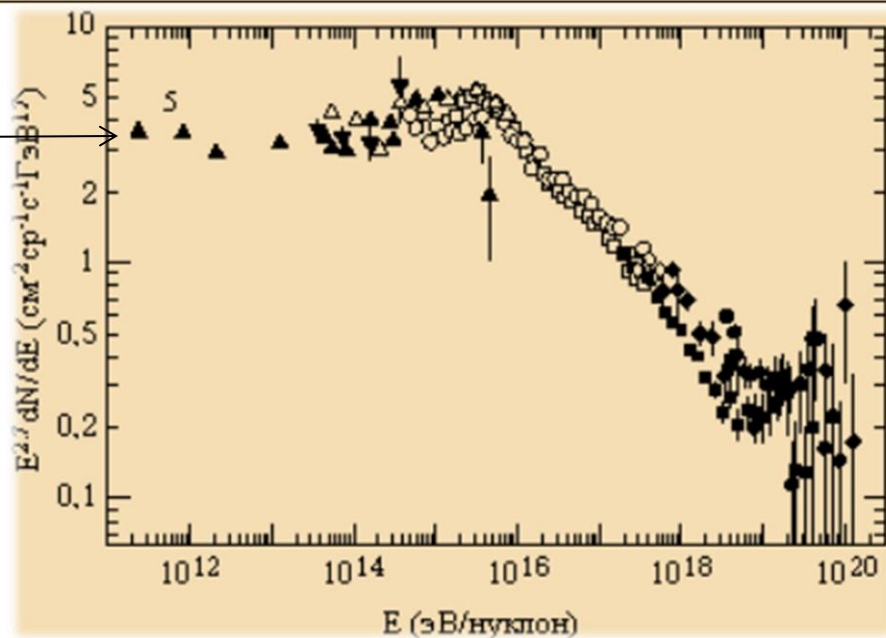
# 4. Космические лучи

## Первичные

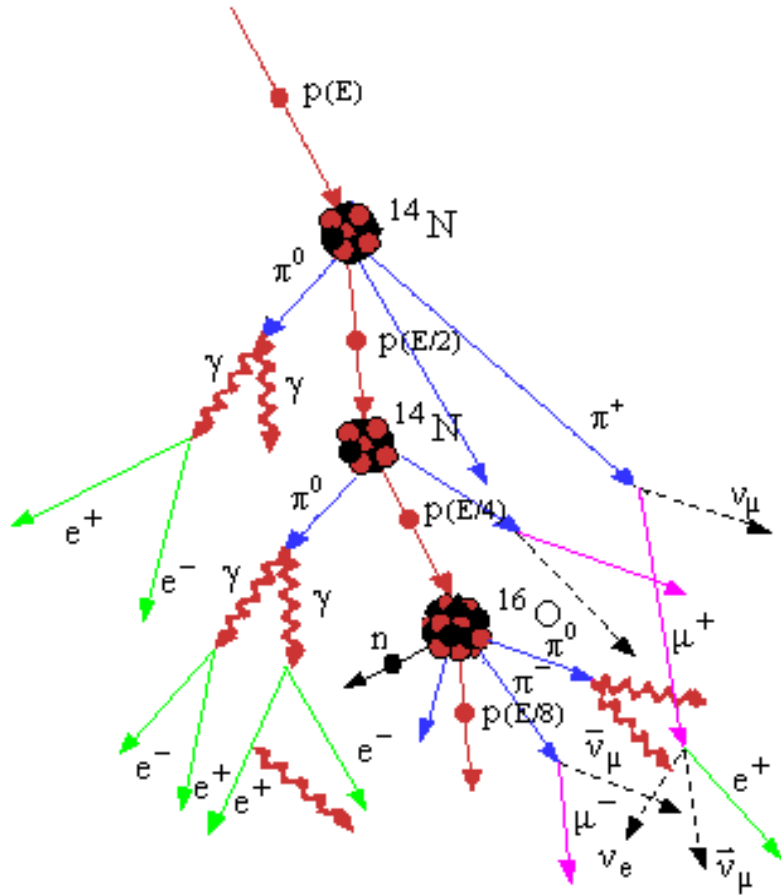
Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)		
	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ядерная компонента - <math>\sim 90\%</math> протонов, <math>\sim 10\%</math> ядер гелия, <math>\sim 1\%</math> более тяжелых ядер</li> <li>2. Электроны (<math>\sim 1\%</math> от числа ядер)</li> <li>3. Позитроны (<math>\sim 10\%</math> от числа электронов)</li> <li>4. Антиадроны <math>&lt; 1\%</math></li> </ol>	98-99% протоны, $\sim 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ



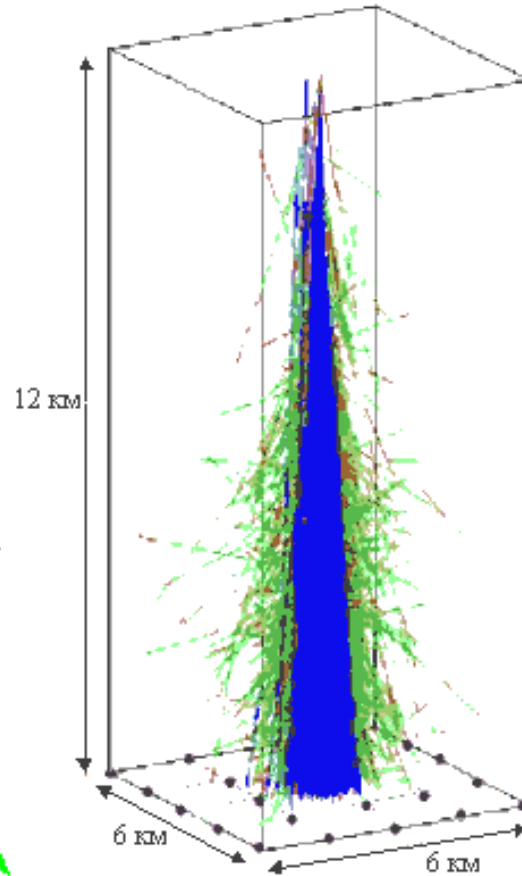
$$dN/dE \sim E^{-2.7}$$



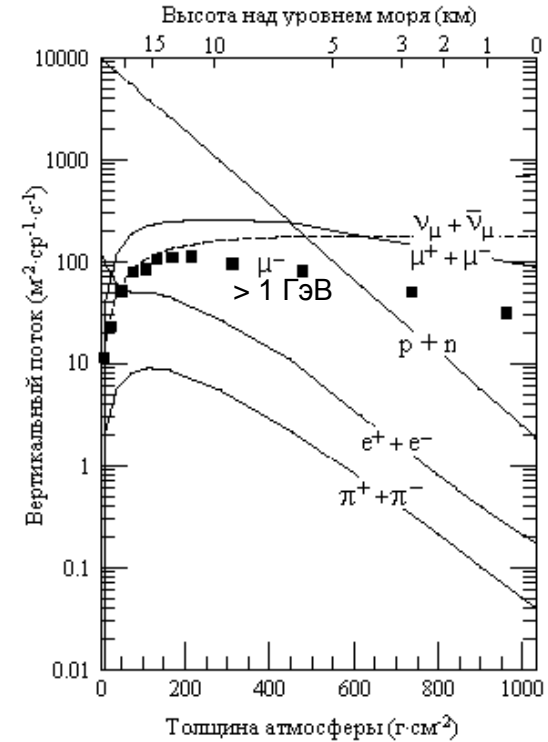
# Атмосферные



Широкий атмосферный ливень



Пространственное распределение компонент широкого атмосферного ливня

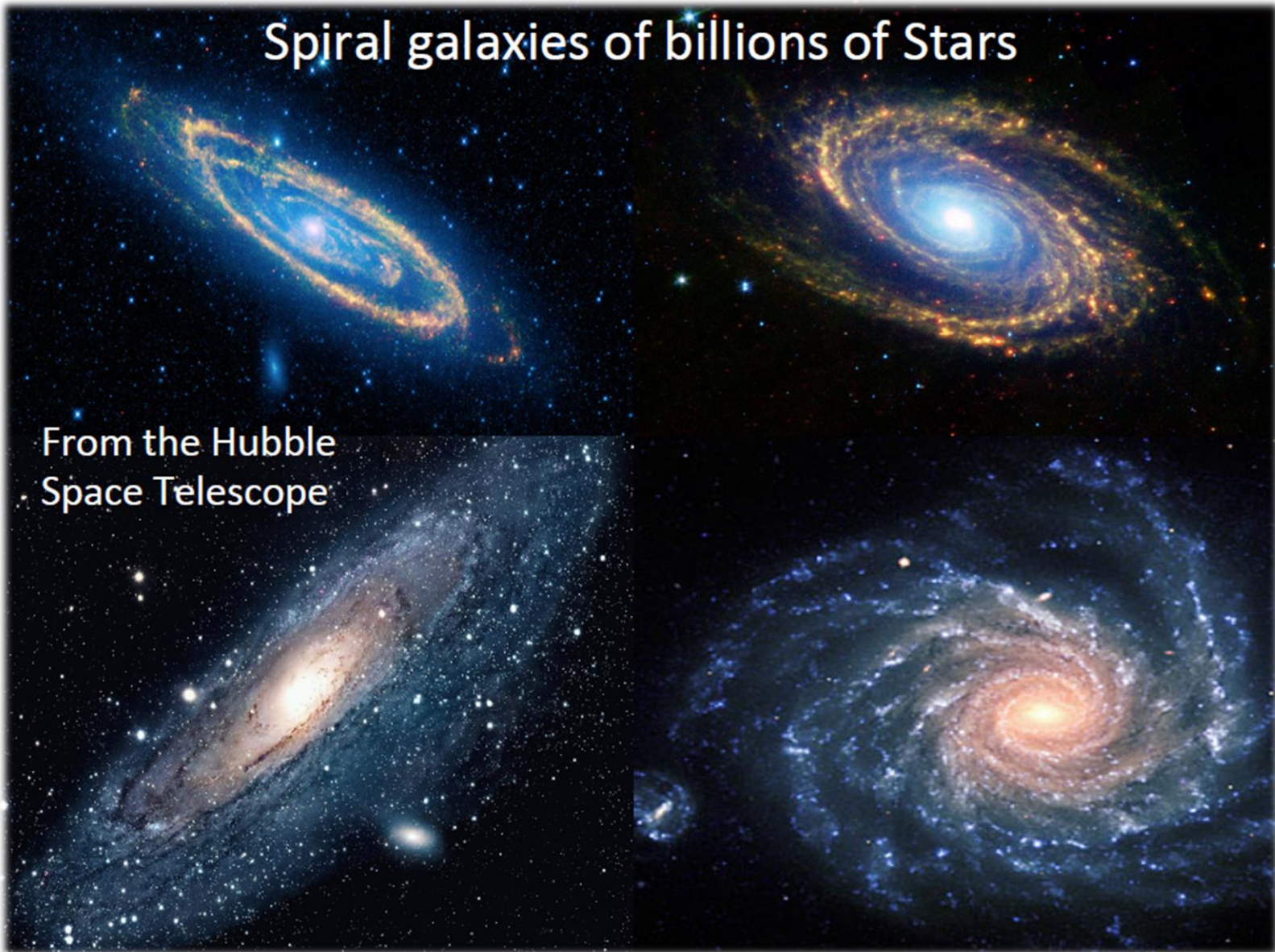


Вертикальные потоки космических лучей в атмосфере.

## 5. Тёмная материя и тёмная энергия

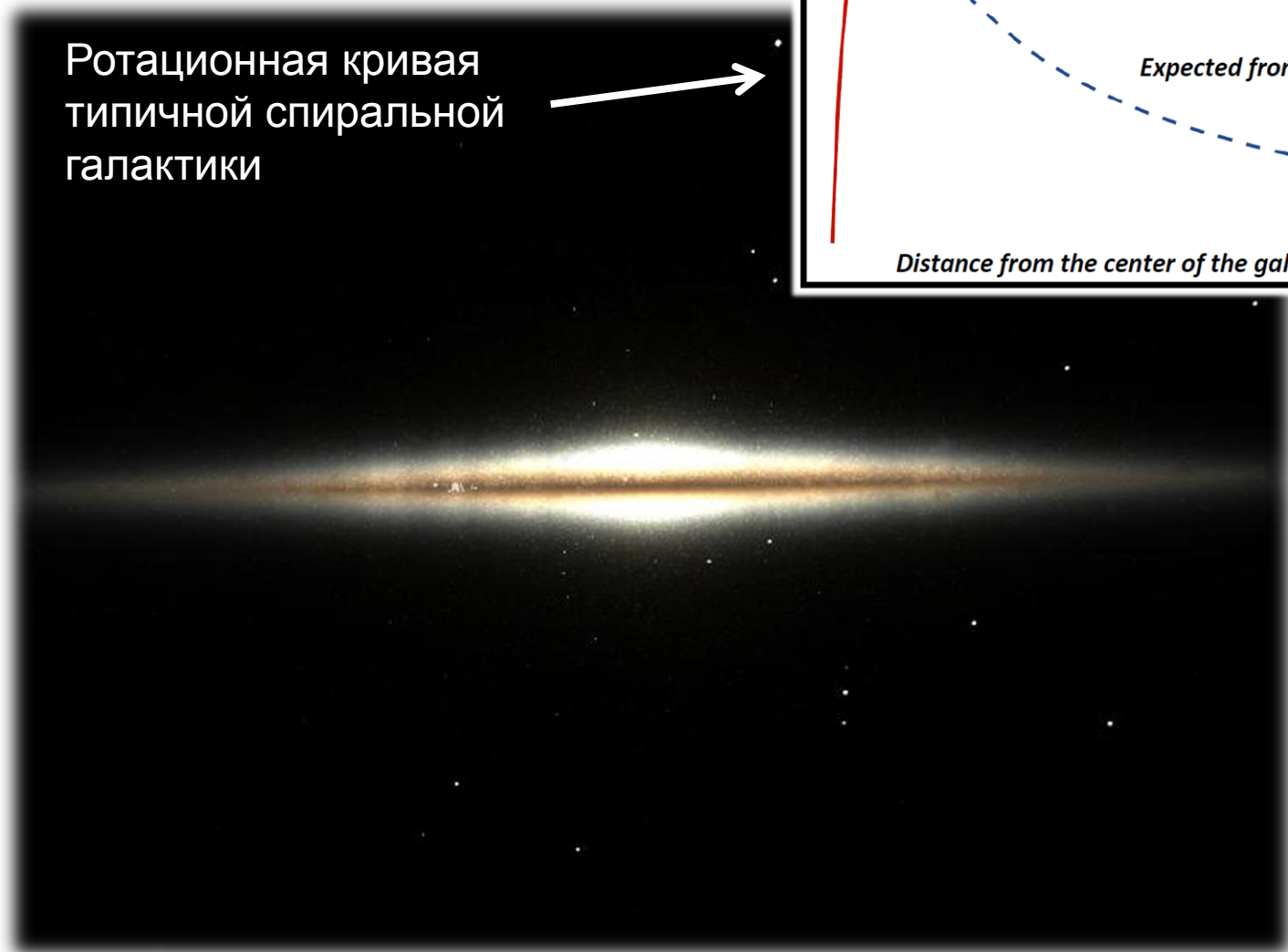
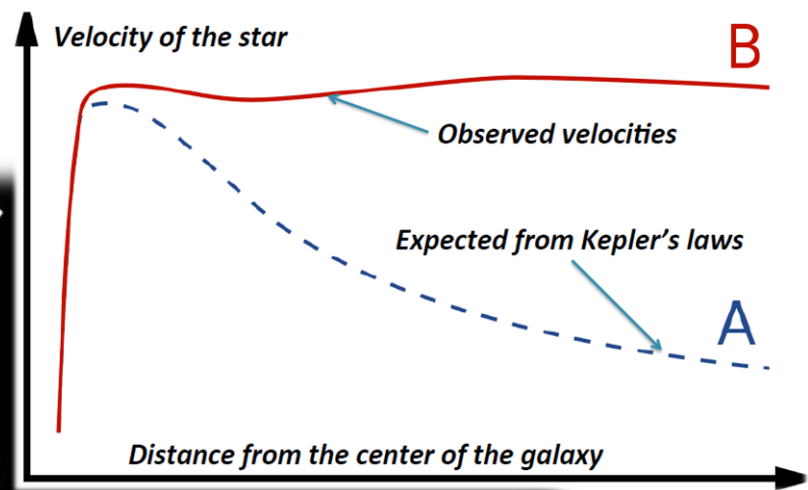
Spiral galaxies of billions of Stars

From the Hubble  
Space Telescope

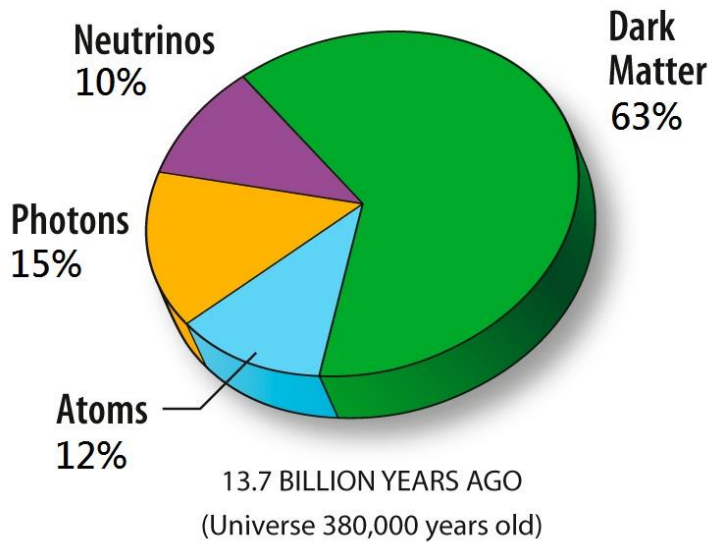
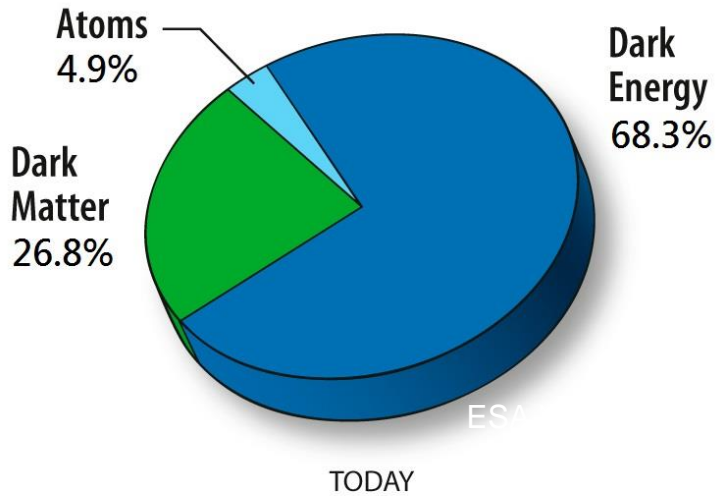


# 1933-1970 «Недостающая масса» Вселенной

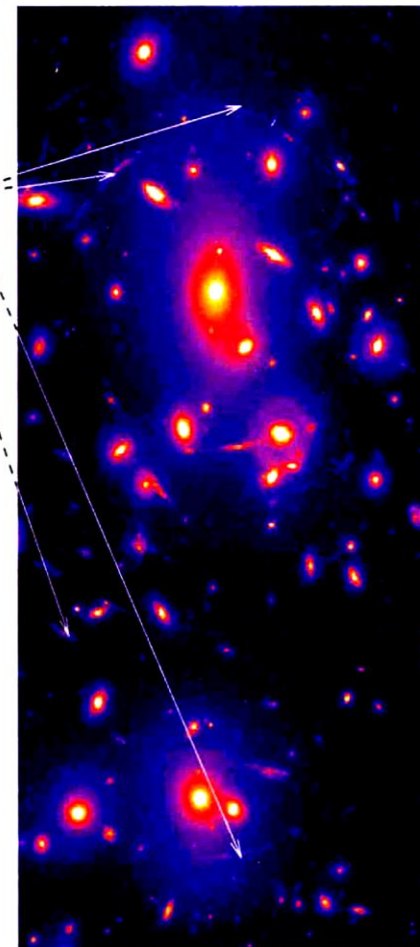
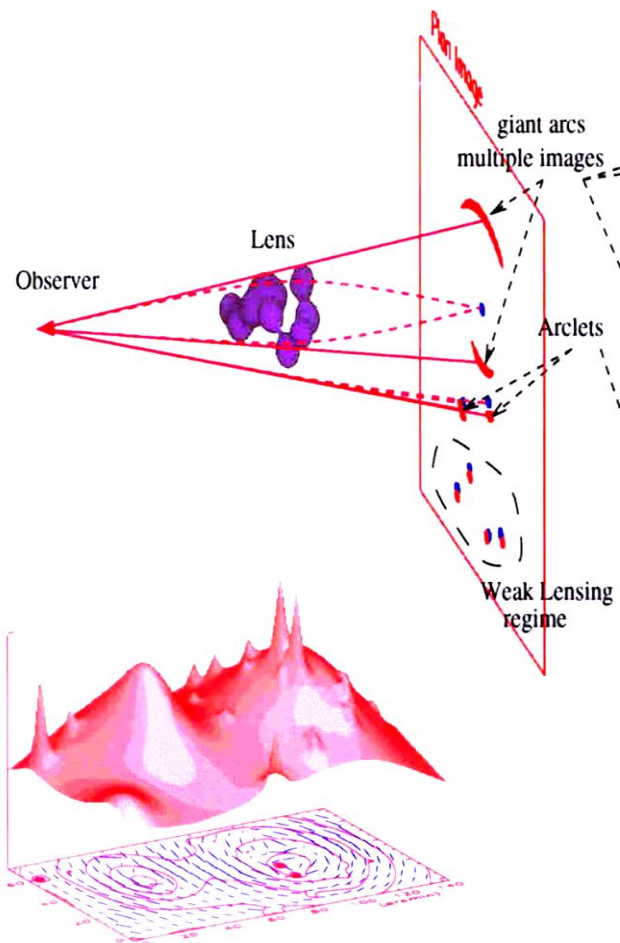
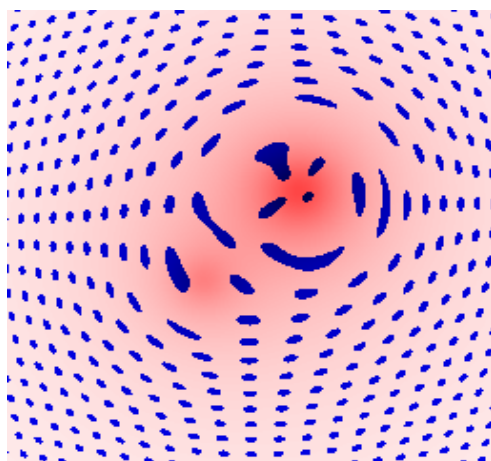
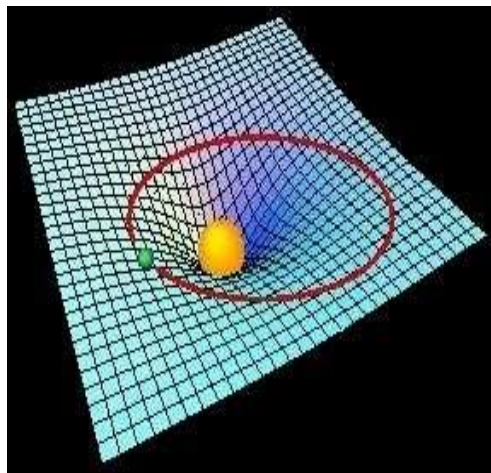
Ротационная кривая  
типичной спиральной  
галактики



# Наблюдаемые эффекты

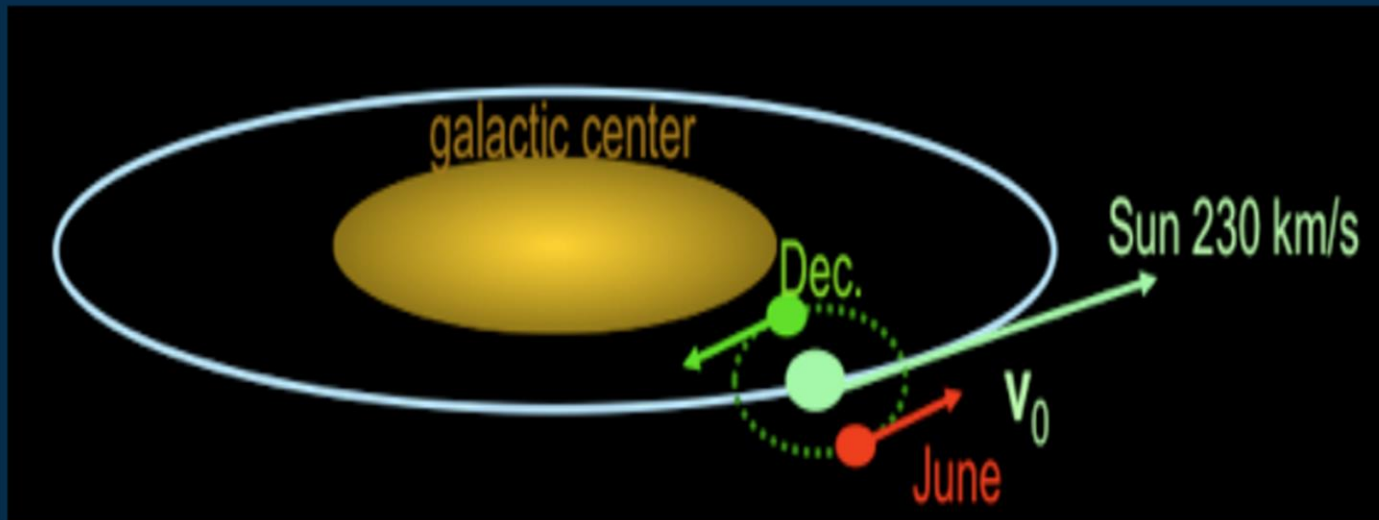


# Гравитационное линзирование



Так выглядела бы простейшая решётка,  
находящаяся за массивными объектом

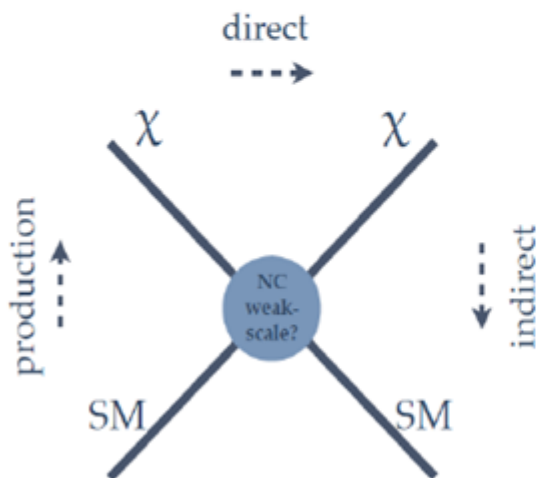
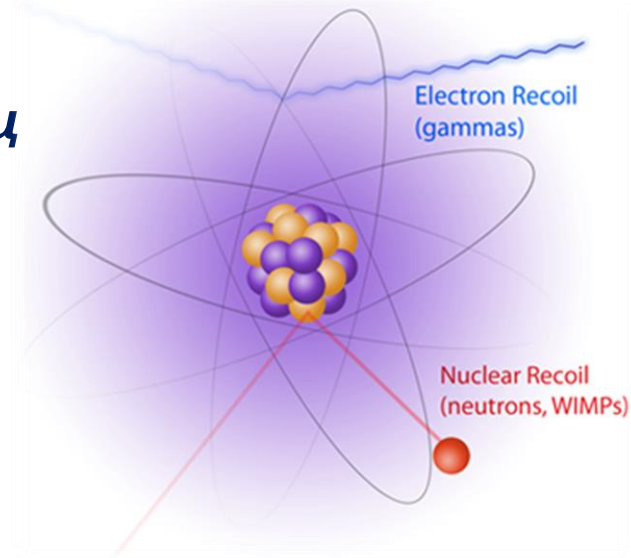
The solar system moves through the galactic halo at about 230-kilometers per second. That creates a wind of dark matter particles impinging on detectors on earth!



# Поиск темной холодной материи в форме массивных слабо взаимодействующих частиц

## 1. Direct detection (scattering XS)

- Nuclear (atomic) recoils from elastic scattering
- (annual modulation, directionality, A- & J-dependence)
- Galactic DM at the Sun's position – our DM!
- Mass measurement (if not too heavy)



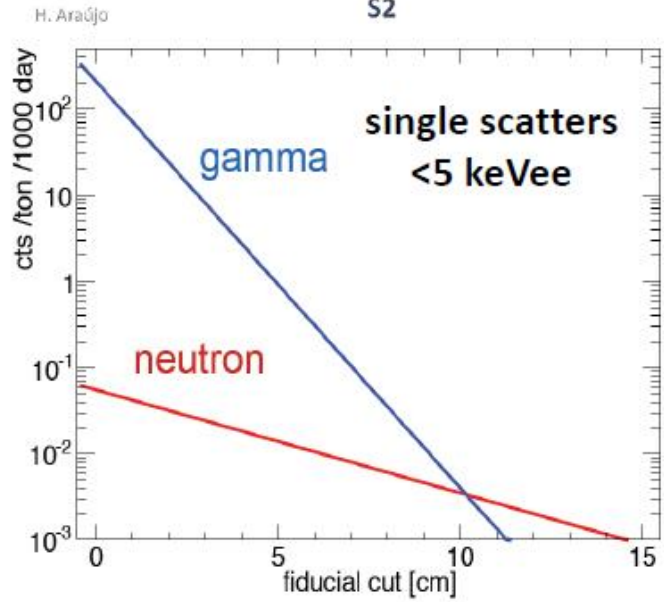
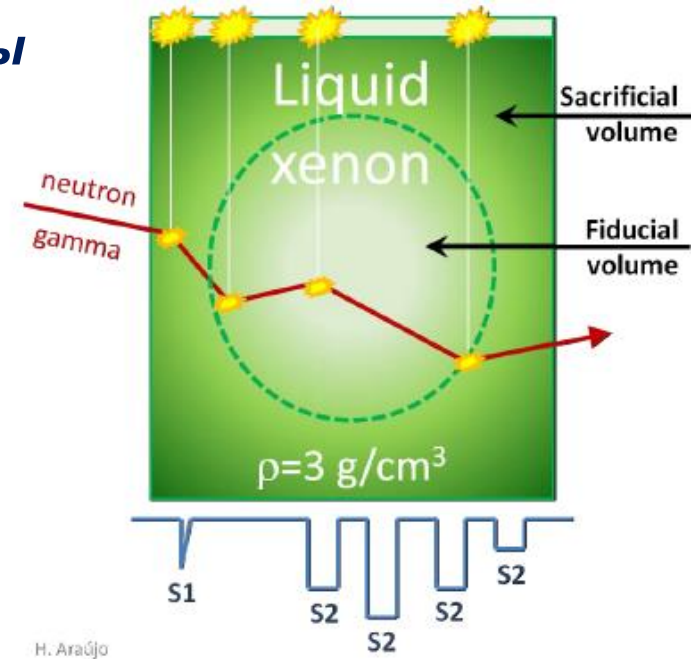
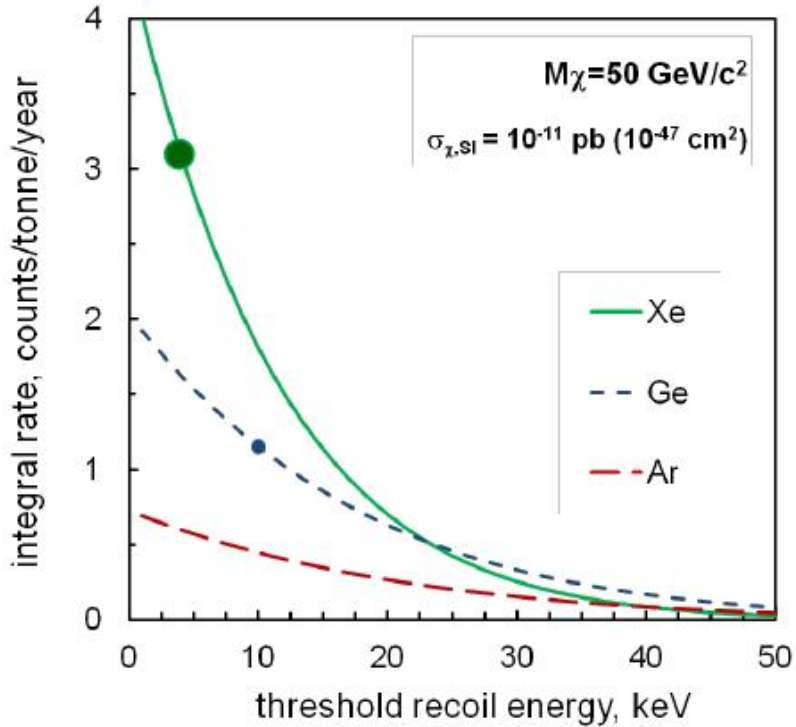
## 2. Indirect detection (decay, annihilation XS)

- High-energy cosmic-rays,  $\gamma$ -rays, neutrinos, etc.
- Over-dense regions, annihilation signal  $\propto n^2$
- Challenging backgrounds

## 3. Accelerator searches (production XS)

- Missing transverse energy, monojets, etc.
- Good place to look for particles...
- Mass measurement poor, at least initially
- Can it establish that new particle is the DM?

# Двухфазные эмиссионные детекторы



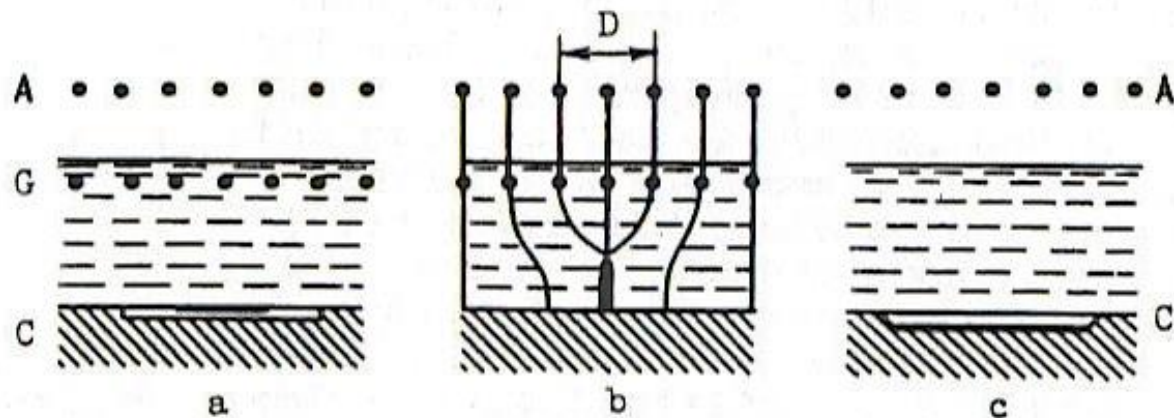
Searches for RARE and LOW ENERGY events: a very challenging combination



Мемориальная  
доска на корпусе  
«Э» открыта  
18 ноября 2014 г.

1969-70

## Принцип регистрации



Б.А. Долгошеин



Б.У. Родионов



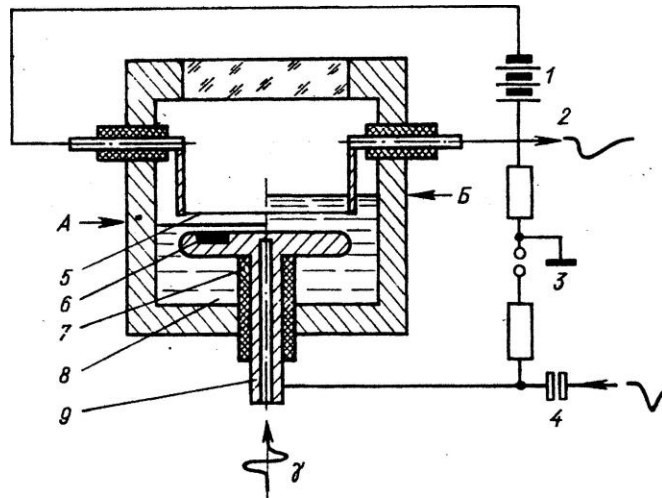
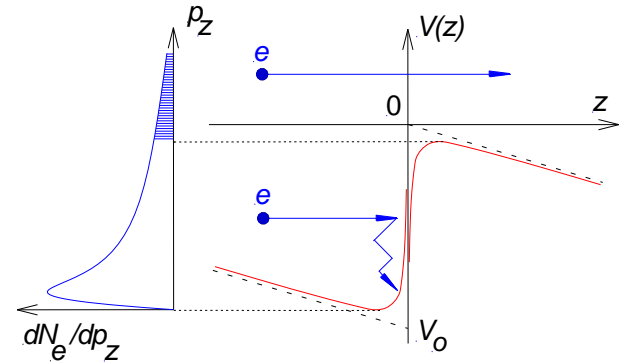
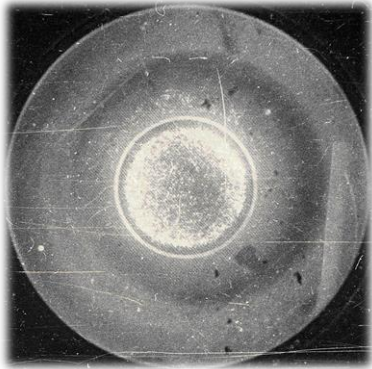
В.Н. Лебедеико

Долгошеин Б.А., Лебедеико В.Н. и Родионов Б.У. Новый метод регистрации треков ионизирующих частиц в конденсированном веществе, Письма в ЖЭТФ, 1970, т.11, стр. 351-353.

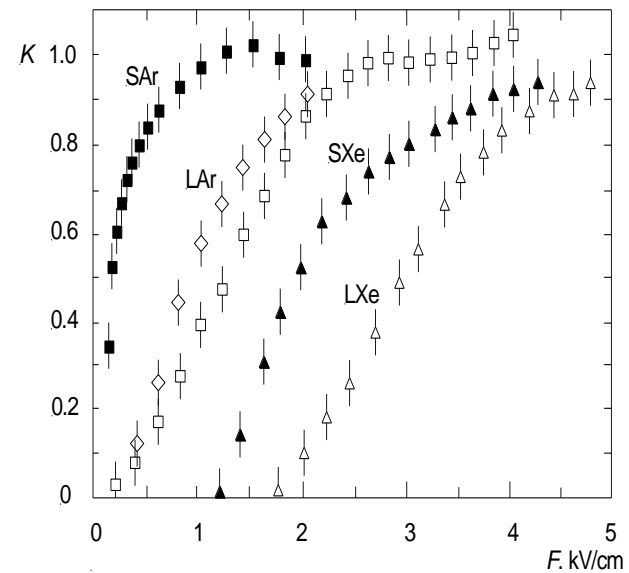
Hutchinson G. W. (1948). Ionization in liquid and solid argon, *Nature*, 162, pp. 610-611.

1970-73

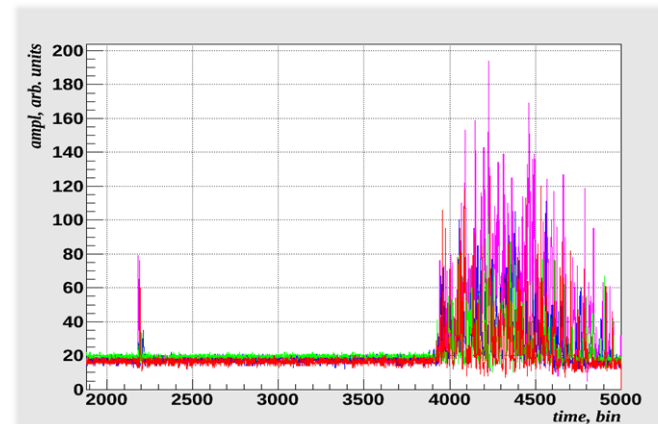
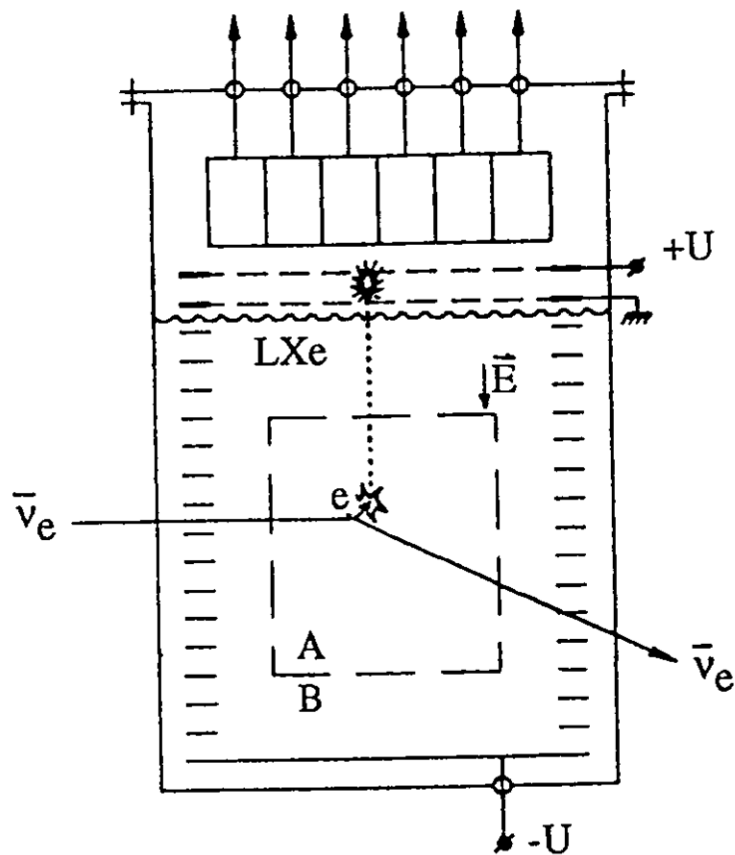
# Эмиссионная искровая камера на жидком аргоне



Вероятность эмиссии электронов ионизации из конденсированных благородных газов

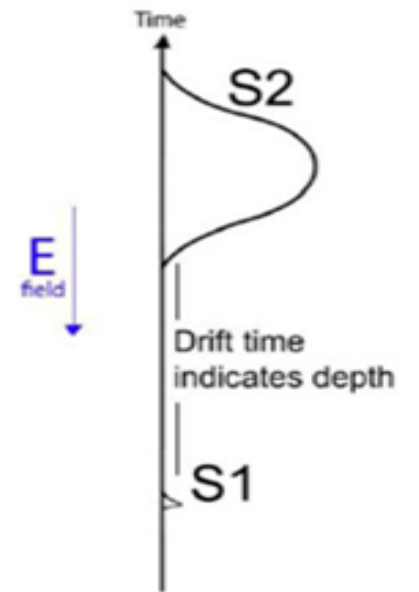
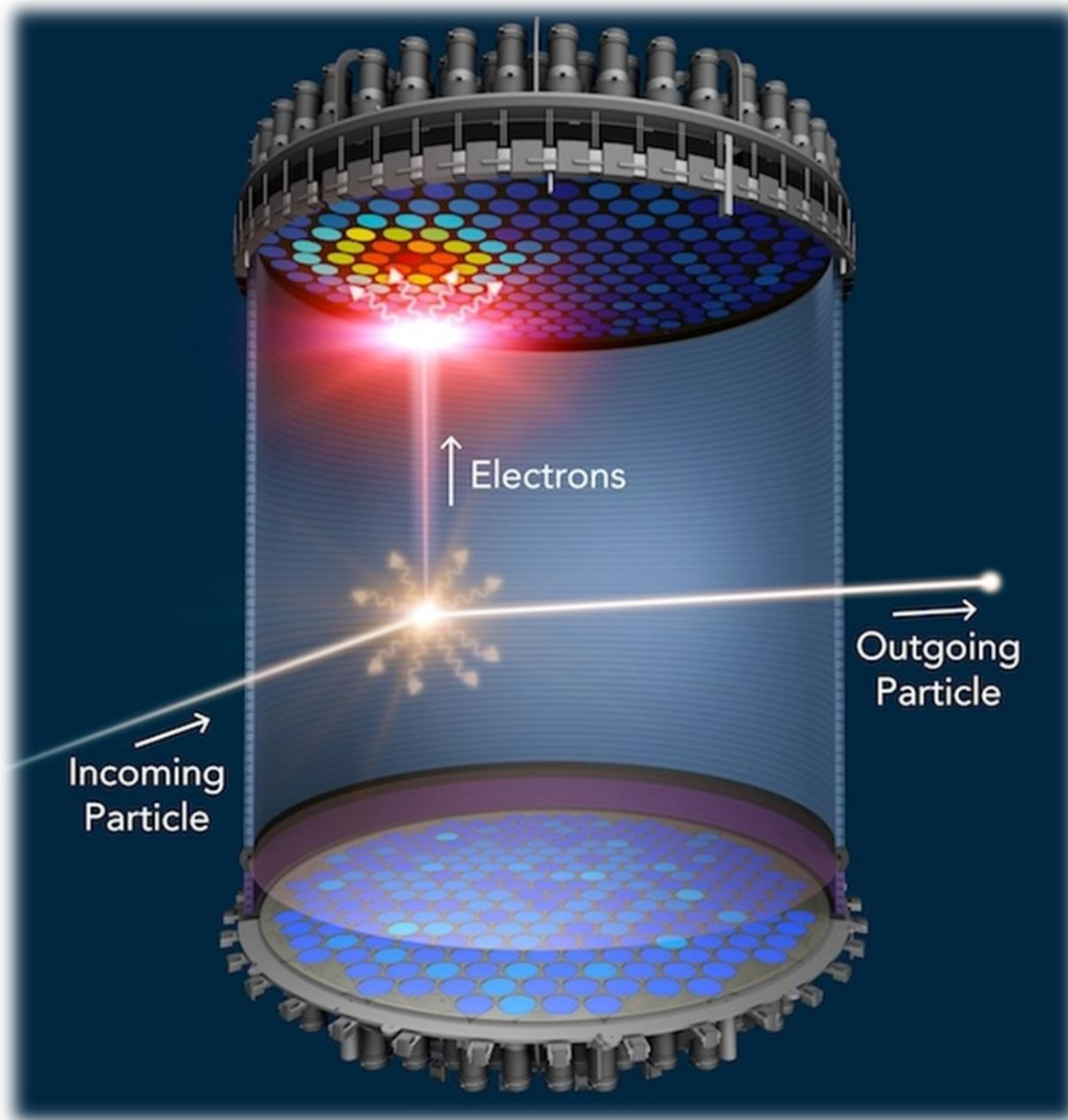


Долгошеин Б.А., Лебеденко В.Н. и Родионов Б.У.  
 Новый метод регистрации треков ионизирующих частиц в конденсированном веществе, Письма в ЖЭТФ, 1970, т.11, стр. 351-353.

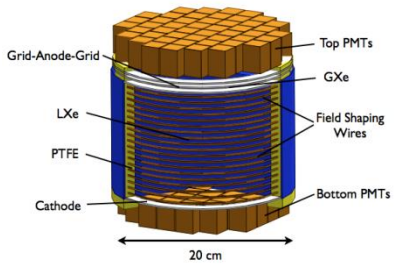


- Чувствителен к одиночным электронам
- Двойной сигнал: возбуждение и ионизация среды
- «Само-экранировка»
- Большая масса
- Можно использовать для поиска редких и слабых сигналов

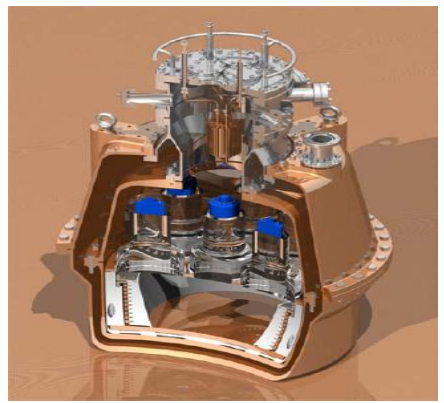
Fig.4. LXe time-projection scintillating drift chamber as wall-less detector for measurements of magnetic momentum neutrino.



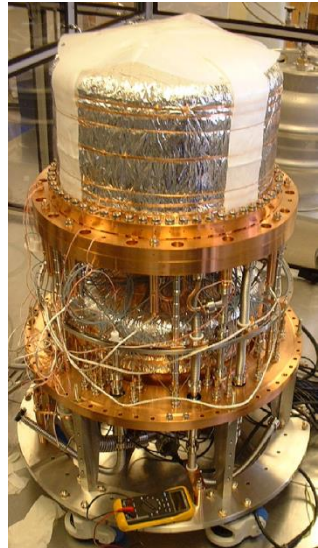
# 2003-2013 Эмиссионные детекторы ТМ



**XENON 10**



**ZEPLIN II**



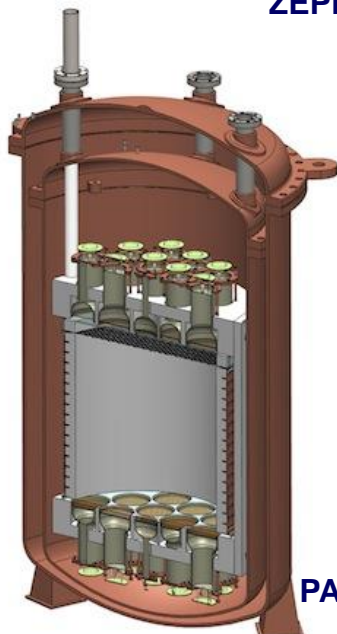
**ZEPLIN III**



**LUX**

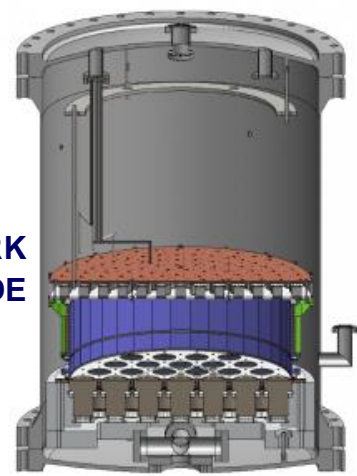


**XENON 100**



**PANDA-X**

**DARK  
SIDE**



# XENON100 at Gran Sasso Lab 2005-now

*Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy*

*LNCS 1400 m Rock (3100 w.m.e)*



# ZEPLIN III



CCLRC Rutherford Appleton  
Laboratory



Imperial College London



University of Edinburgh



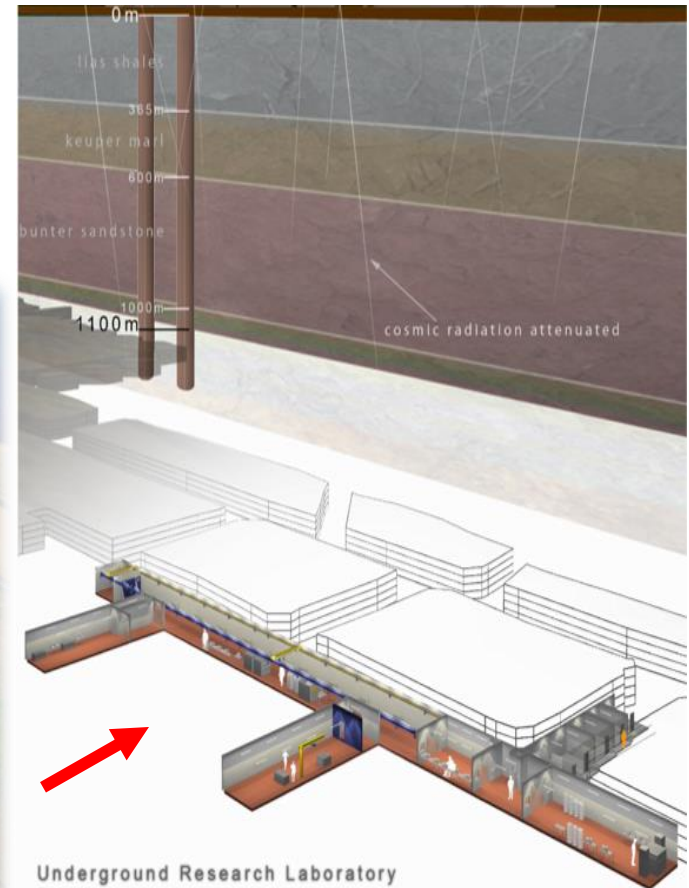
LIP- Coimbra (Coimbra Univ.)



ITEP

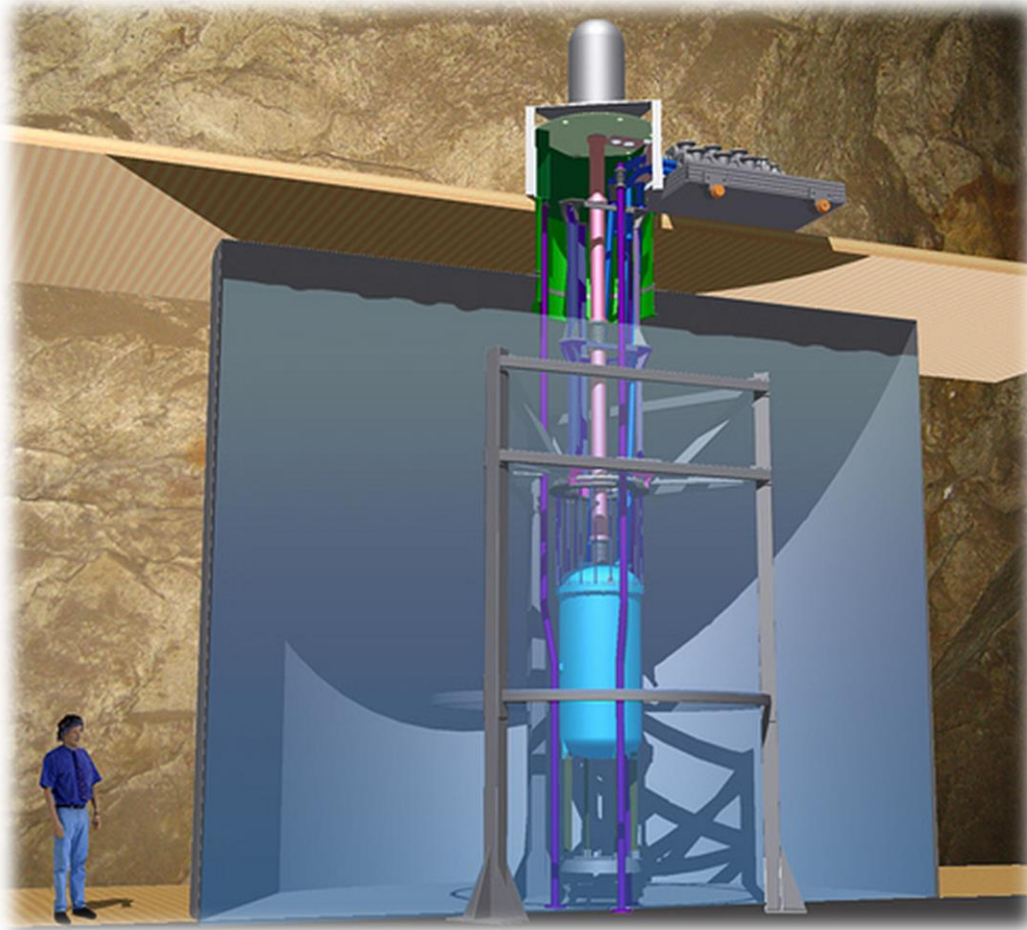
Boulby, U.K. site ('Palmer lab')  
1100m, 2.8km water equiv.  
 $10^6$  reduction in muon flux

Cleveland Potash LTD



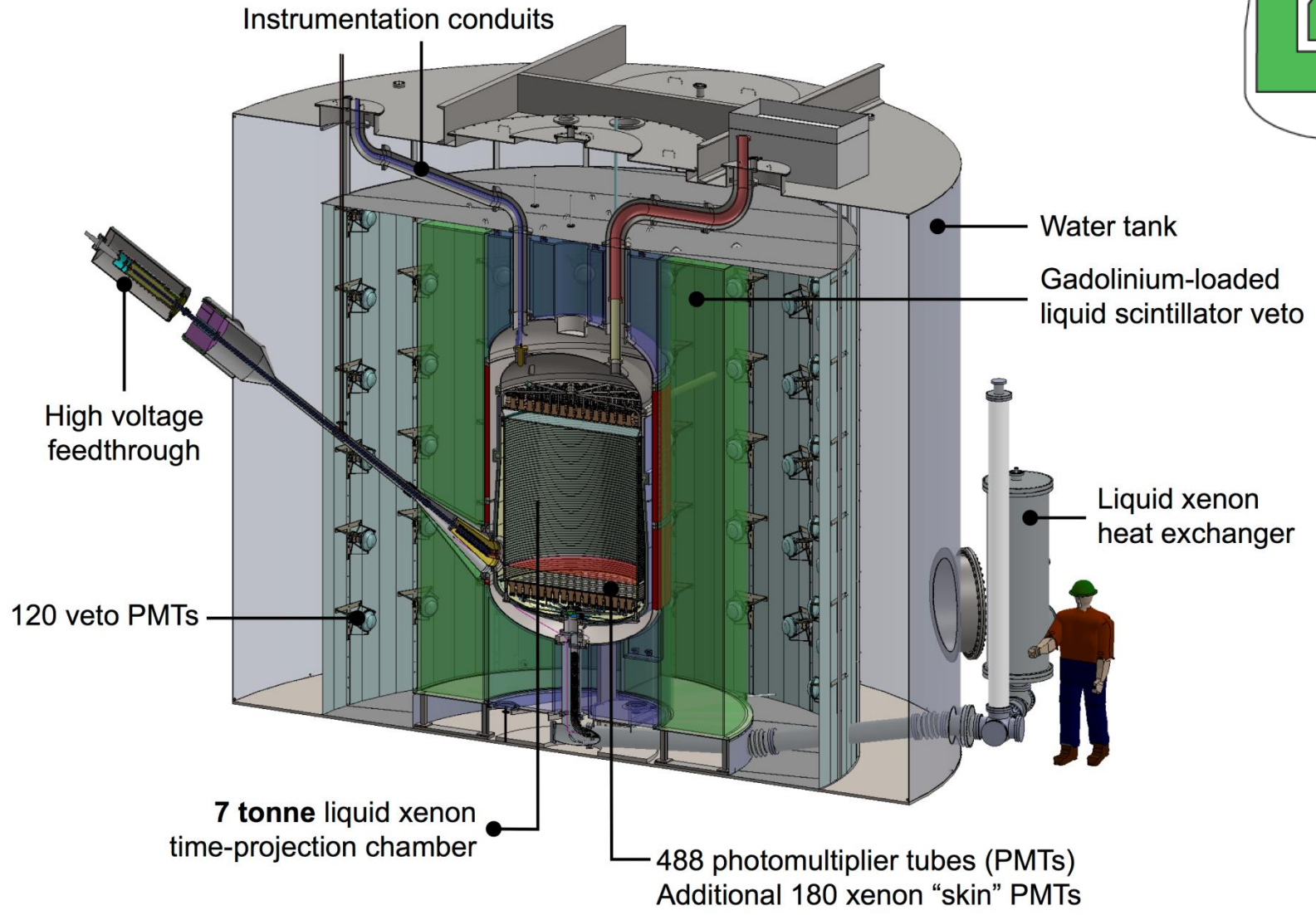
Underground Research Laboratory  
Boulby

## LUX at Homestake mine (USA)

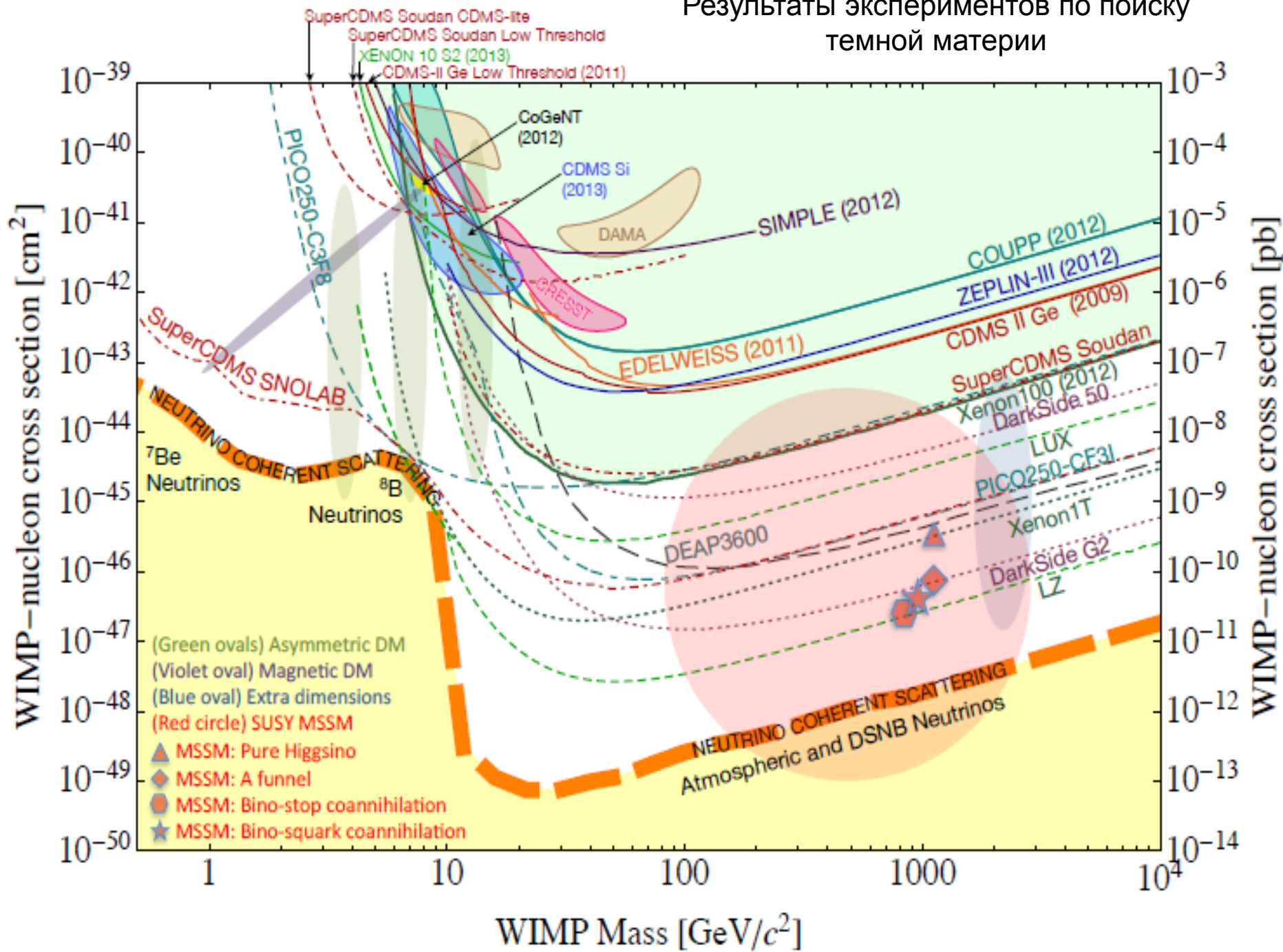


Homestake Gold Mine  
4850 ft.

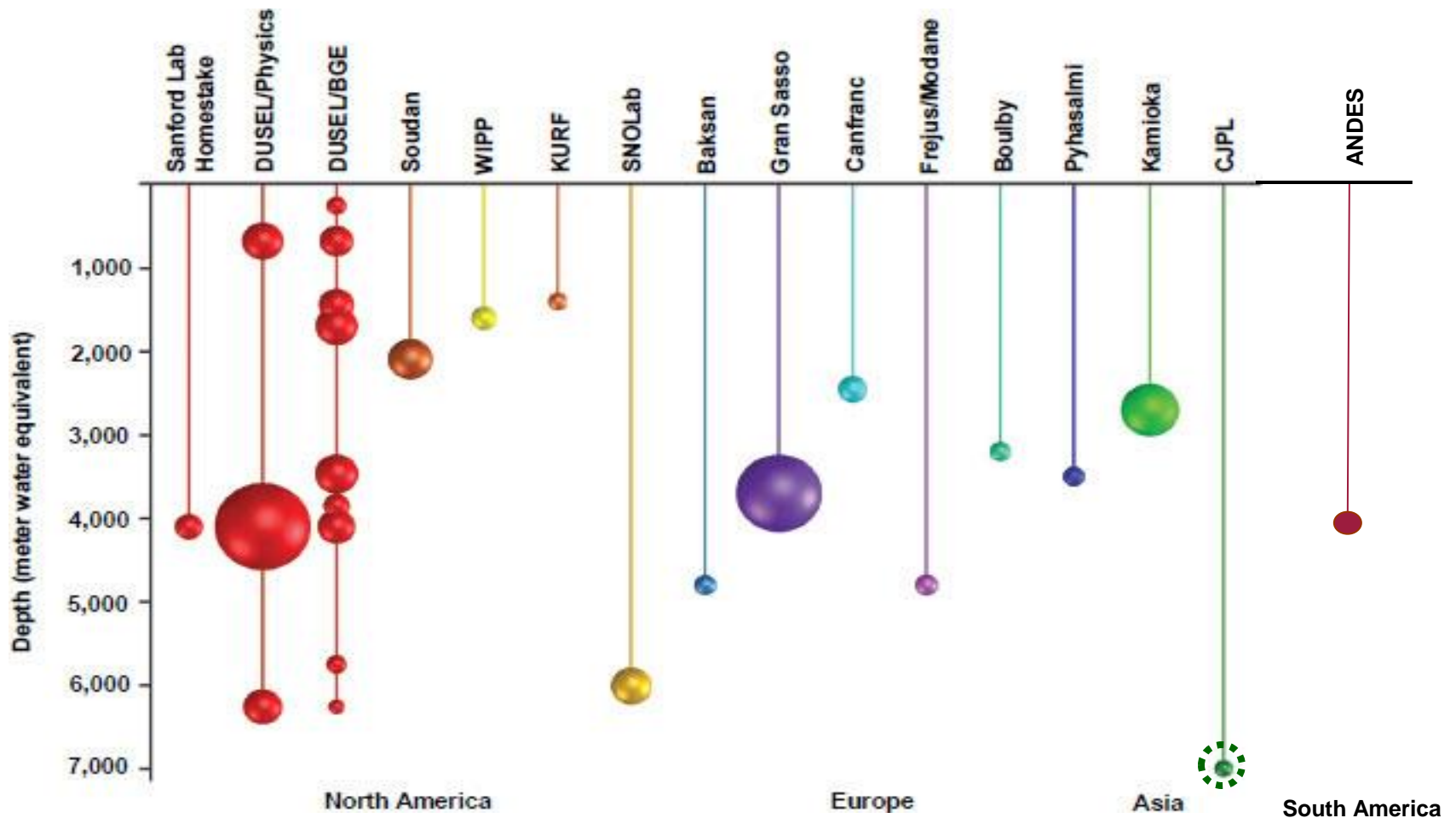




# Результаты экспериментов по поиску темной материи



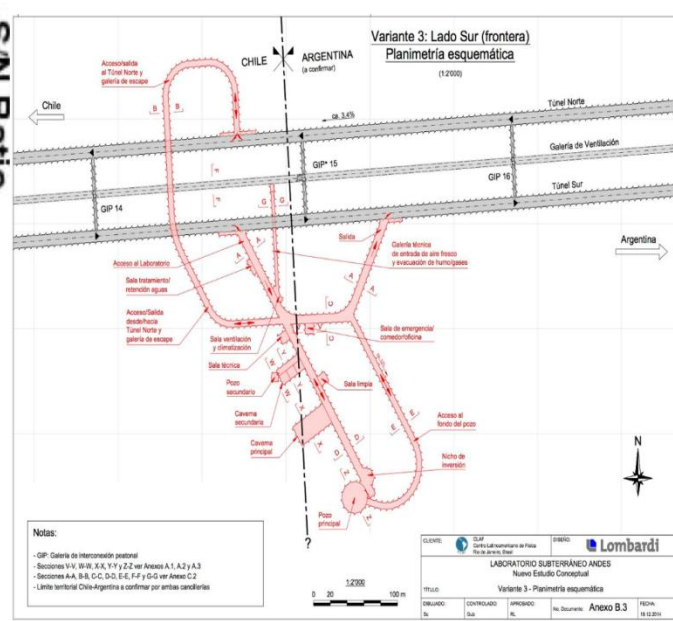
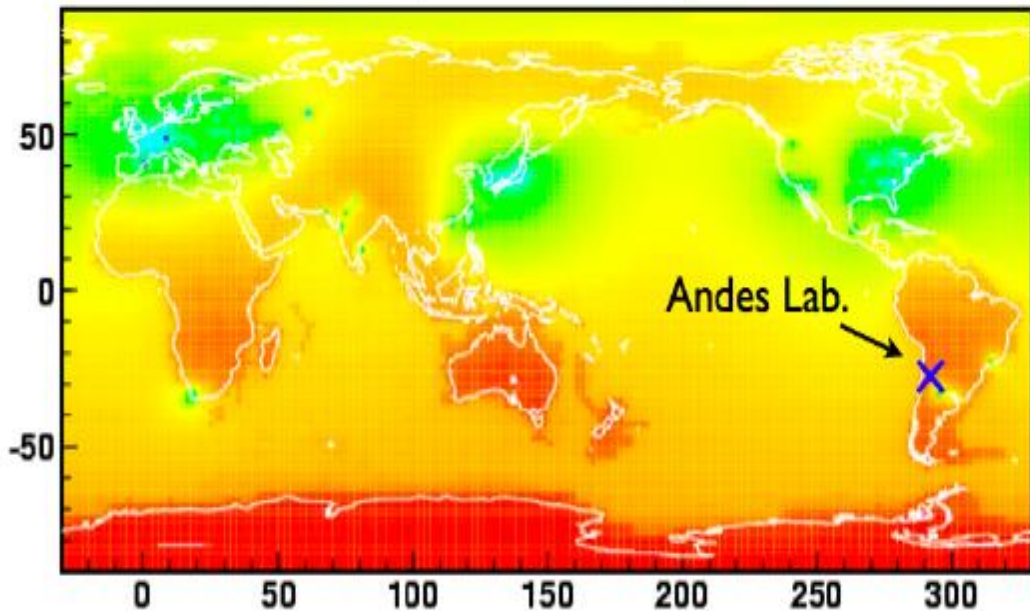
## Подземный лаборатории мира, где ведутся поиски астрочастиц



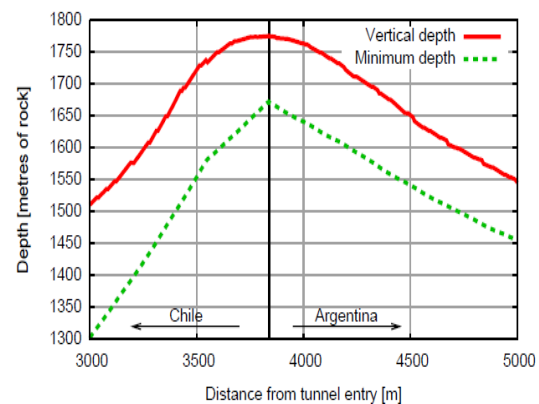
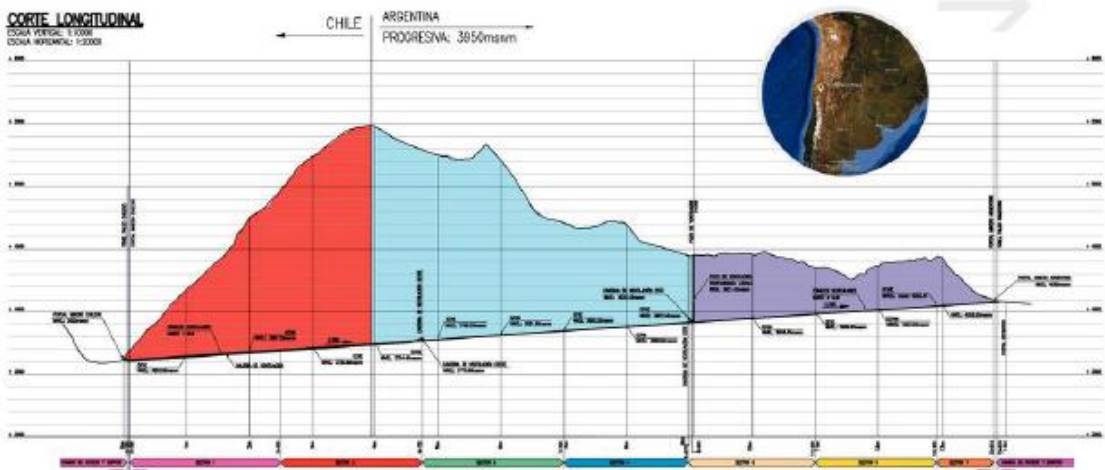
Отношение ожидаемого сигнала от геонейтрино к фону от реакторных нейтрино на поверхности Земли

S/N Ratio: (Crust + Mantle) / Reactor

Latitude [deg]



CORTE LONGITUDINAL  
ESCALA VERTICAL: 1:2000  
ESCALA HORIZONTAL: 1:20000



## **ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:**

***«The existence of dark matter is at present one of the strongest pieces of evidence that the current theory of fundamental particles and forces, summarized in the standard model of particle physics, is incomplete.***

***...Dark matter therefore plays a central role in both particle physics and cosmology, and the discovery of the identity of dark matter is among the most important goals in science today.»***

The Report of the Dark Matter Scientific Assessment Group, a joint sub-panel of the High Energy Physics Advisory Panel (HEPAP) and the Astronomy and Astrophysics Advisory Committee (AAAC), states (July 2007):

## Источники информации

1. Ю. М. Широков, Н.П. Юдин. Ядерная физика. М.: Наука, 1980. Глава XII
2. Ядерная физика в Интернете: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 19;  
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf>
4. Ю.Э.Пениожкевич. Ядерная астрофизика. Соровский образовательный журнал №10 1998; [http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/1998\\_10.pdf](http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/1998_10.pdf)
5. Д.Ю. Акимов. Обзор экспериментов по поиску темной материи.  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/26.11.14.pdf>