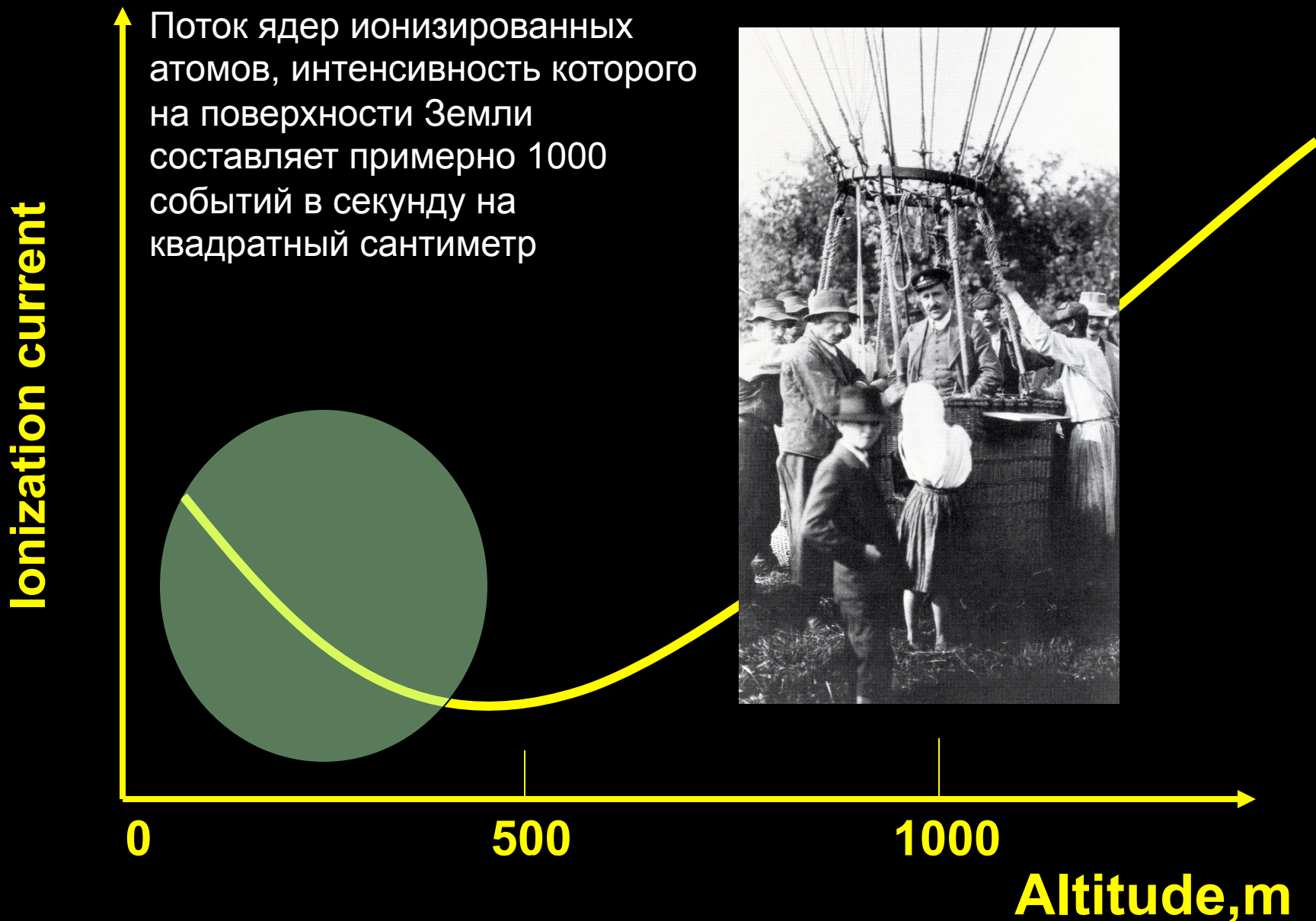


Микромир и Вселенная 2018

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

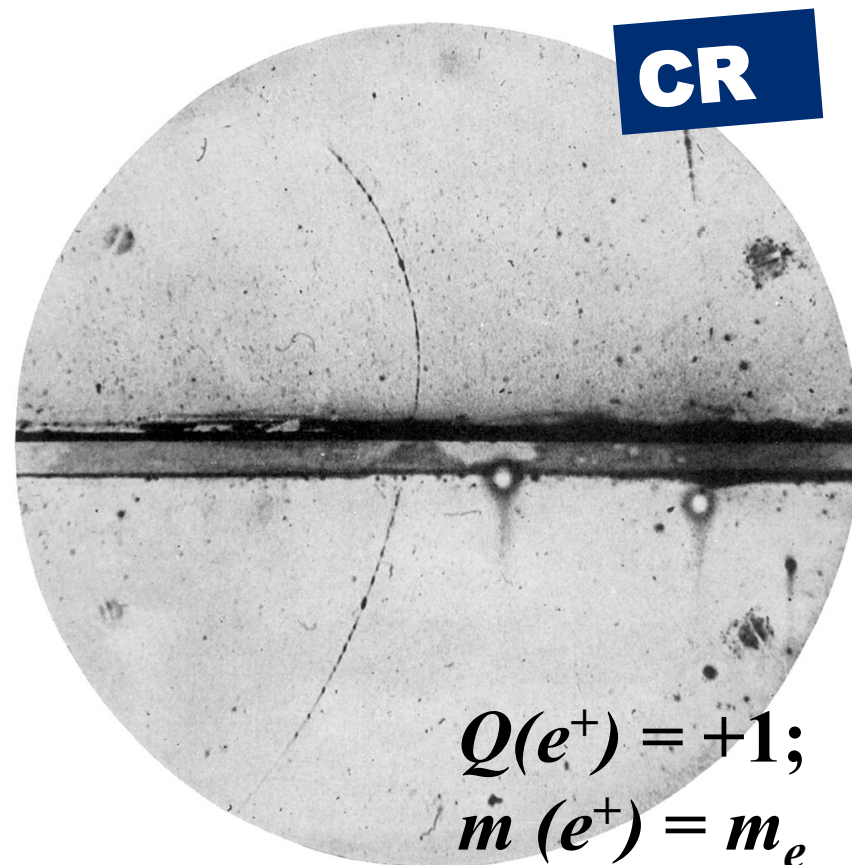
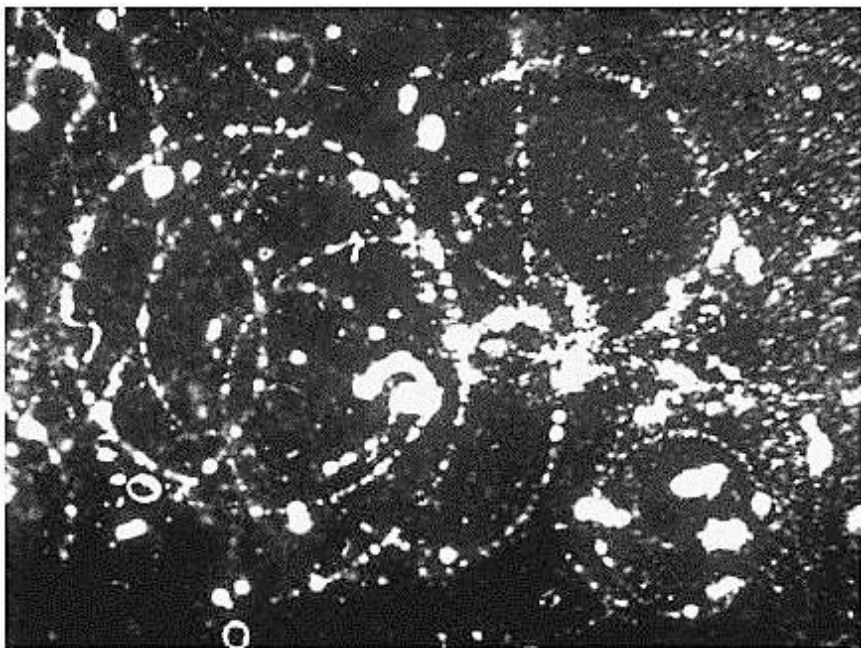
1912 г. – В. Ф. Гесс

Ионизация воздуха



Космические лучи

1927 г. – Д.В. Скобельцын
Наблюдение электронов
космических лучей



1932 г. Позитрон



1936 г. К. Андерсон
За открытие позитрона

1921—1925 г. Р. Милликен. Поглощение космического излучения в Pb в зависимости от высоты наблюдения происходит так же, как и поглощение гамма-излучения. Название: **космические лучи**.

CR

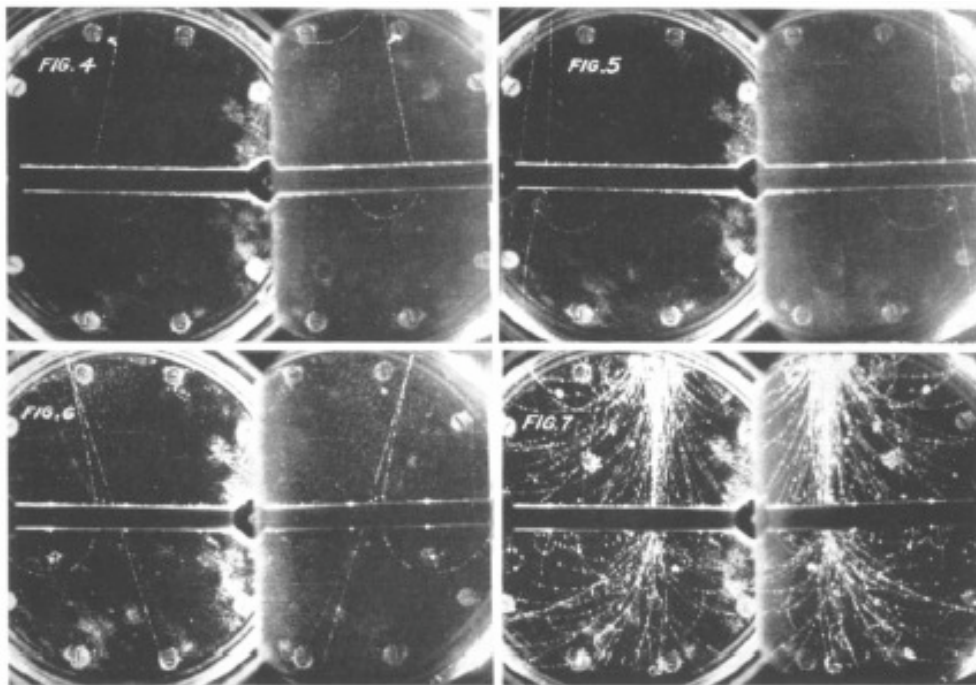
1937 г. К.

Андерсон,

С.Неддермейер.

Открытие мюона.

$$Q_{\mu} = q_e; m_{\mu} = 200 m_e$$



Rev. Mod. Phys. 11 (1939) 191



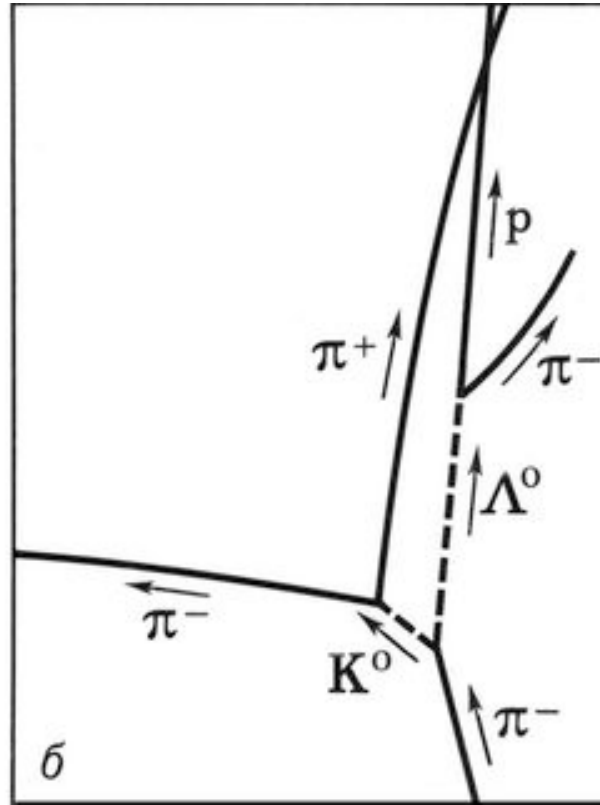
1947 г. С.Пауэлл. Открытие заряженных пионов.

$$Q_{\pi} = \pm q_e; m_{\pi} = 140 MэВ$$

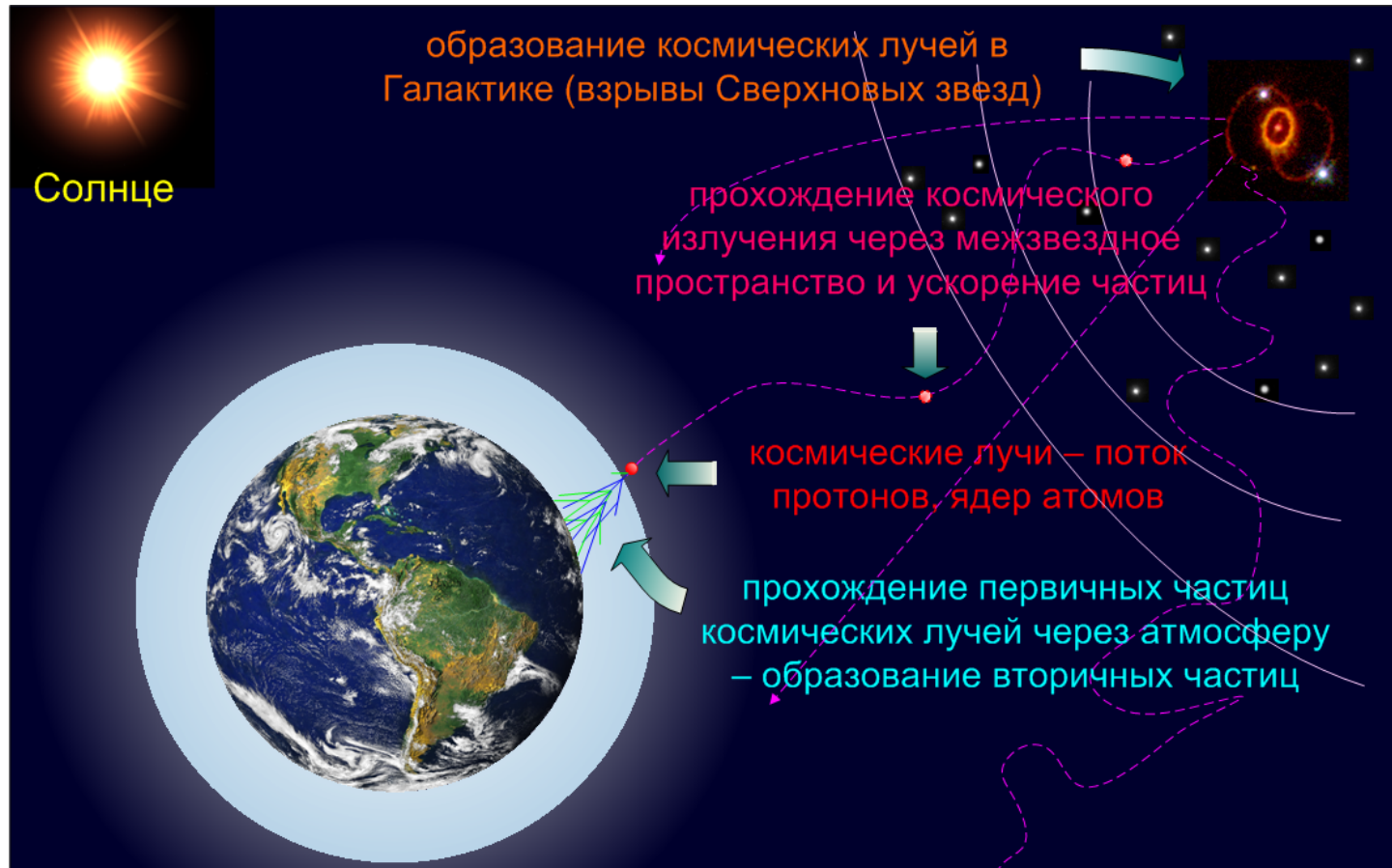
CR

Странные частицы

1947 – 1953 г. Открытие в космических лучах
K-мезонов и гиперонов: Λ , Σ , Ξ



Космическое излучение



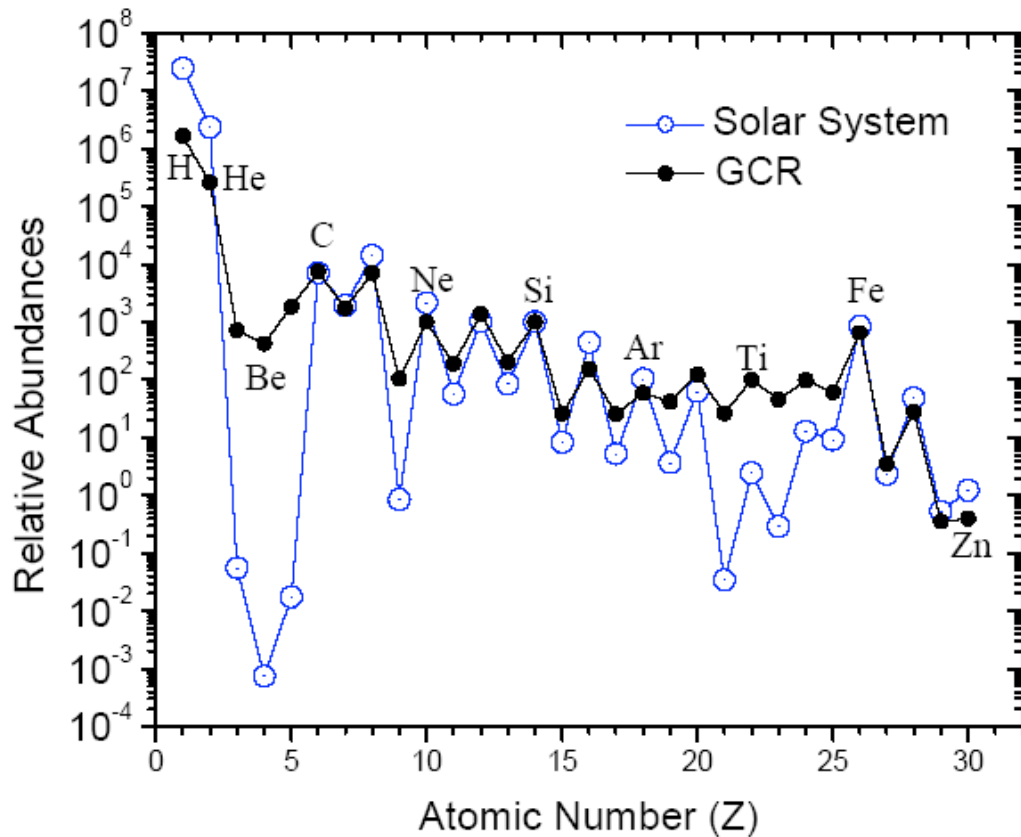
Первичное космическое излучение – это потоки атомных ядер высоких энергий, заполняющих пространство Вселенной и постоянно бомбардирующих Землю

Вторичное космическое излучение возникает в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли.

Первичные космические лучи

	<i>Галактические космические лучи</i>	<i>Солнечные космические лучи</i>
Поток	$\approx 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\approx 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ядерная компонента ($\approx 90\%$ протонов, $\approx 10\%$ ядер гелия, $\approx 1\%$ более тяжелых ядер), 2. Электроны ($\approx 1\%$ от числа ядер), 3. Позитроны ($\approx 10\%$ от числа электронов), 4. Антиадроны ($< 0.01\%$) 	98–99% протоны, $\approx 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

Относительная распространенность химических элементов



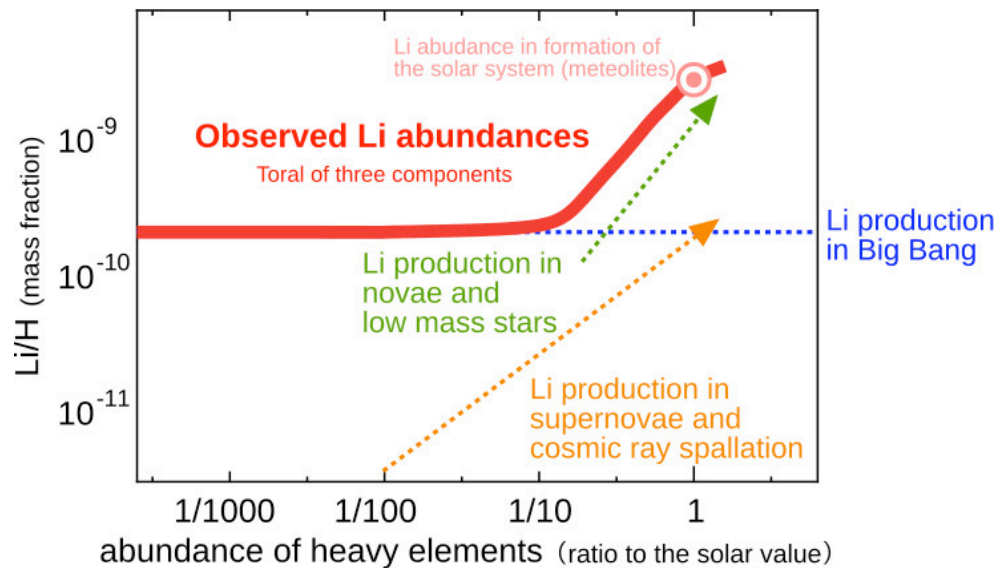
Группы ядер

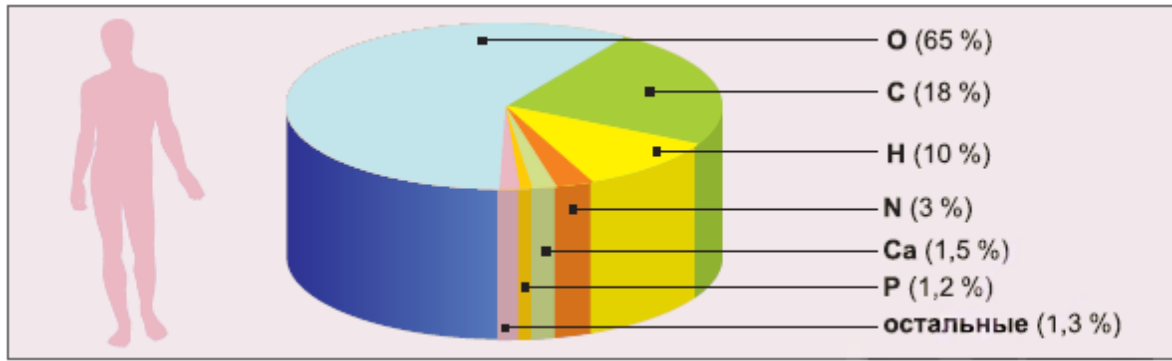
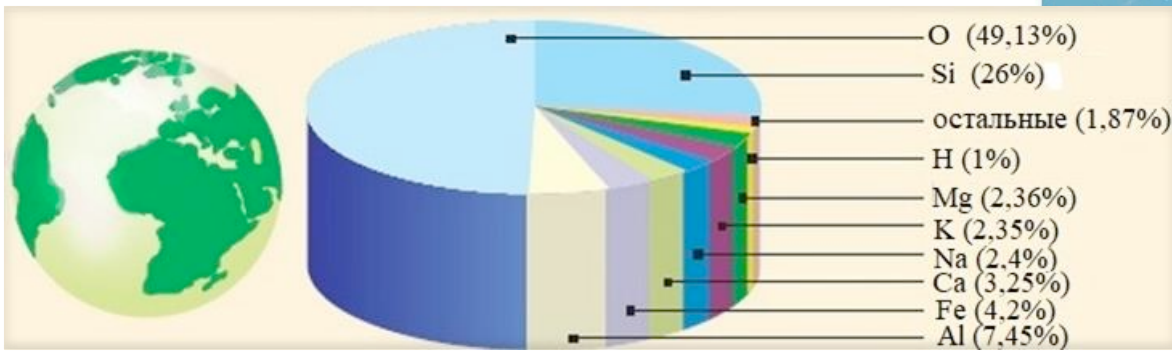
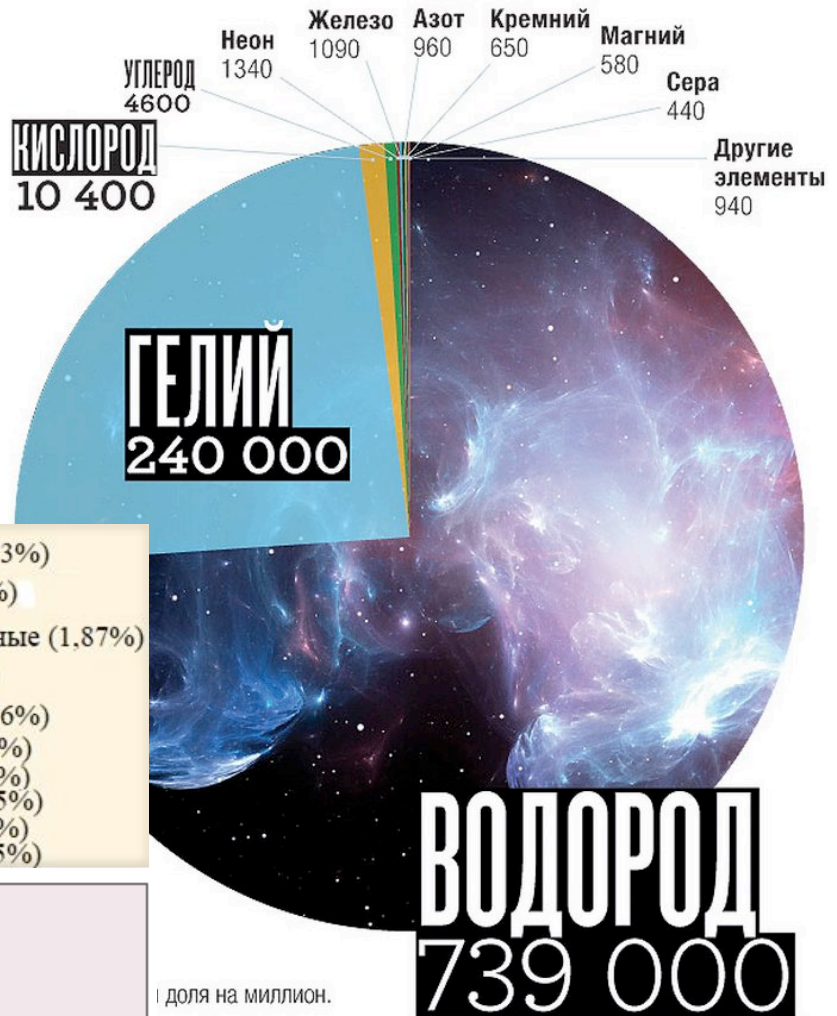
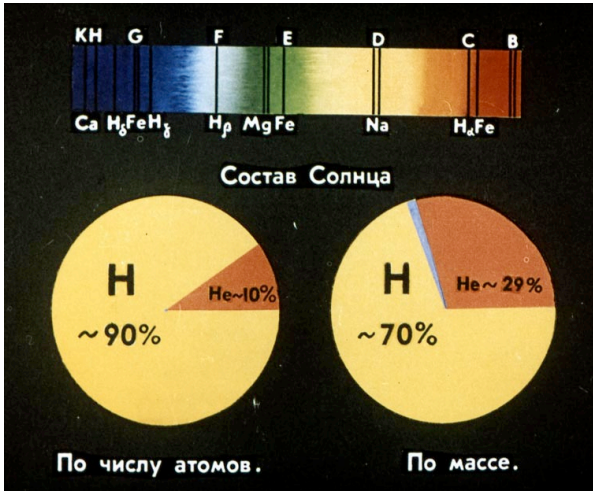
1. H
2. He
3. CNO
4. Si
5. Fe

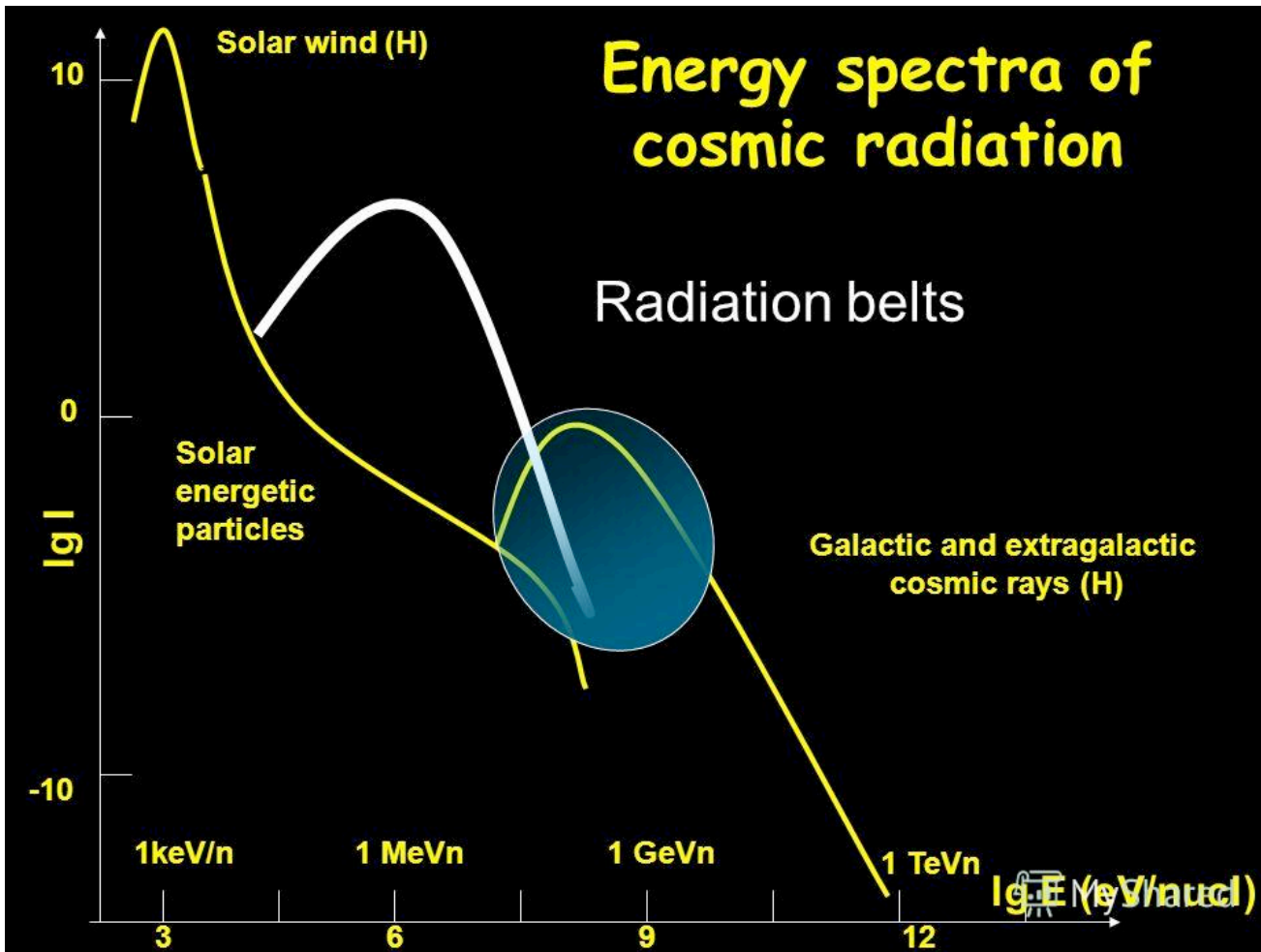
X - process

Изотопы **Li**, **Be**, **B** образуются в реакциях расщепления (скалывания) при взаимодействии галактических космических лучей с веществом межзвёздной среды:

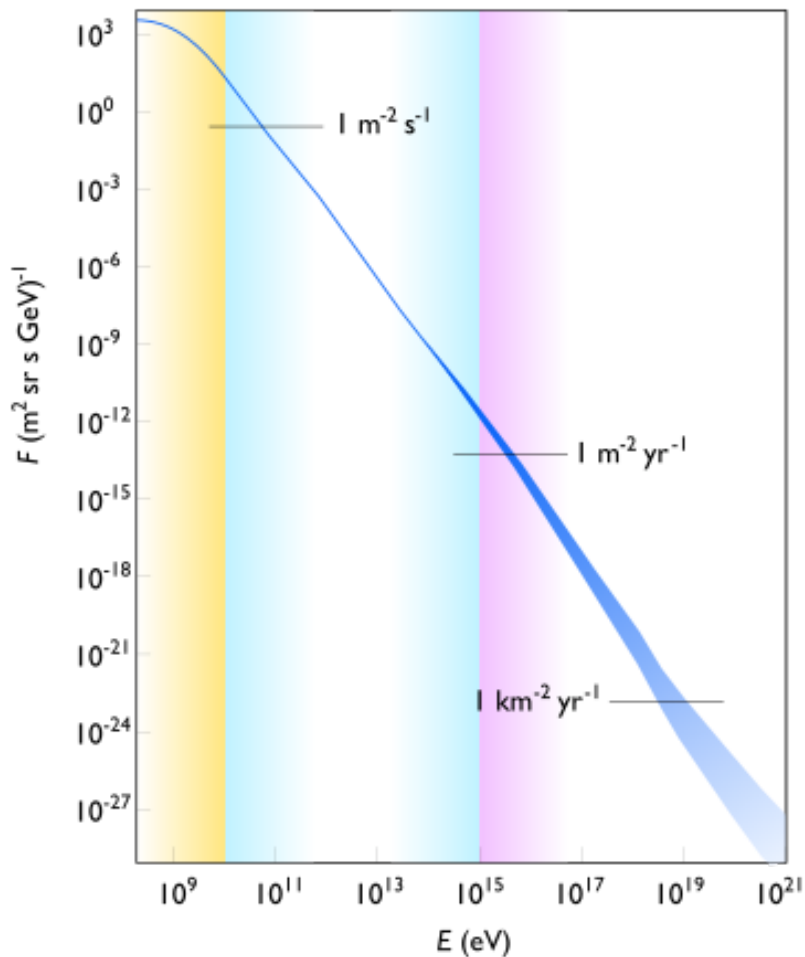
- 1) лёгкая компонента космических лучей (быстрые протоны и α -частицы) в результате столкновения с тяжёлыми ядрами межзвёздной среды вызывает расщепление их с образованием изотопов **Li**, **Be**, **B**, которые затем смешиваются с межзвёздной средой;
- 2) быстрые ядра **C**, **N**, **O**, входящие в состав космического излучения, сталкиваясь с ядрами **H** и **He**, превращаются в **Li**, **Be**, **B**.





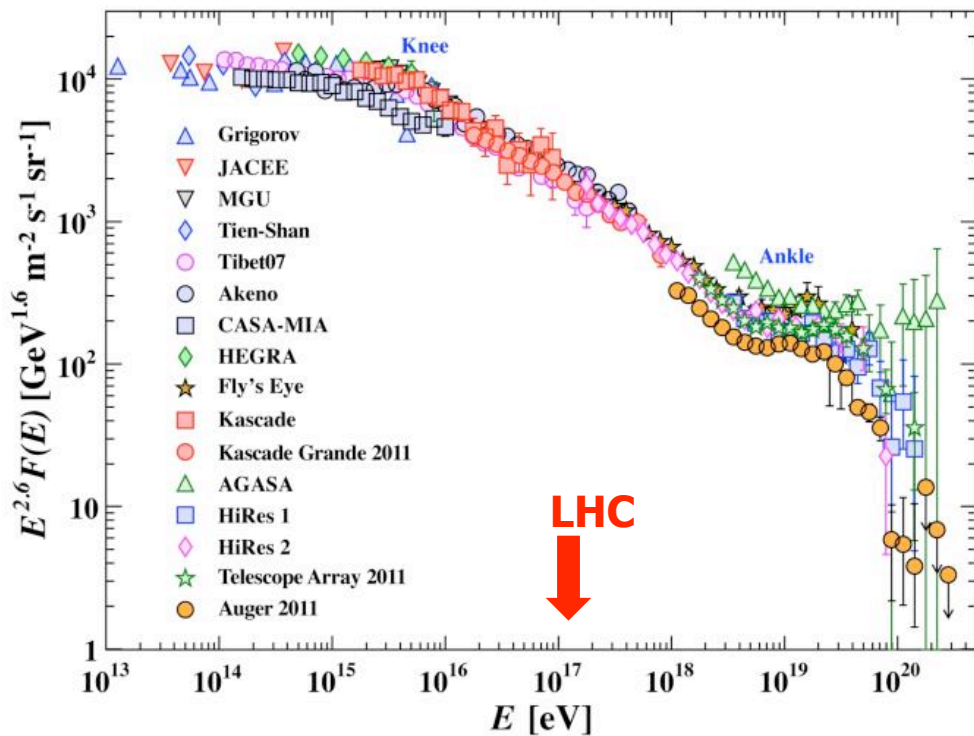


Энергетический спектр космического излучения



Предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина $\approx 10^{19}$ эВ

1 Joule = 6×10^{18} eV

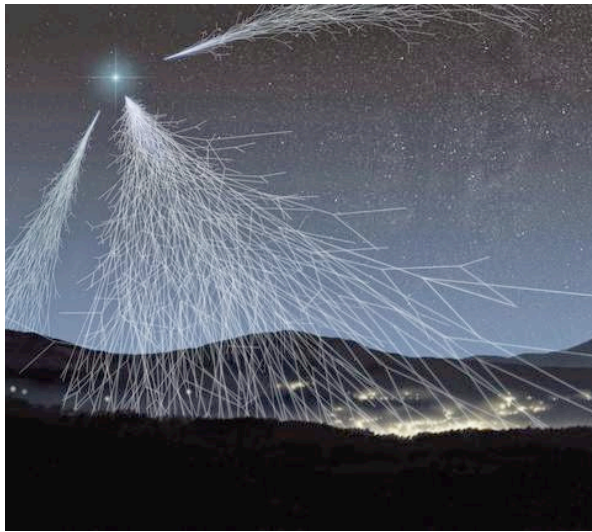


$$\frac{dN}{dE} = N_0 e^{-\gamma}$$

$$E_{кли} < 10^{15} \text{ эВ} \quad \gamma; 2,7$$

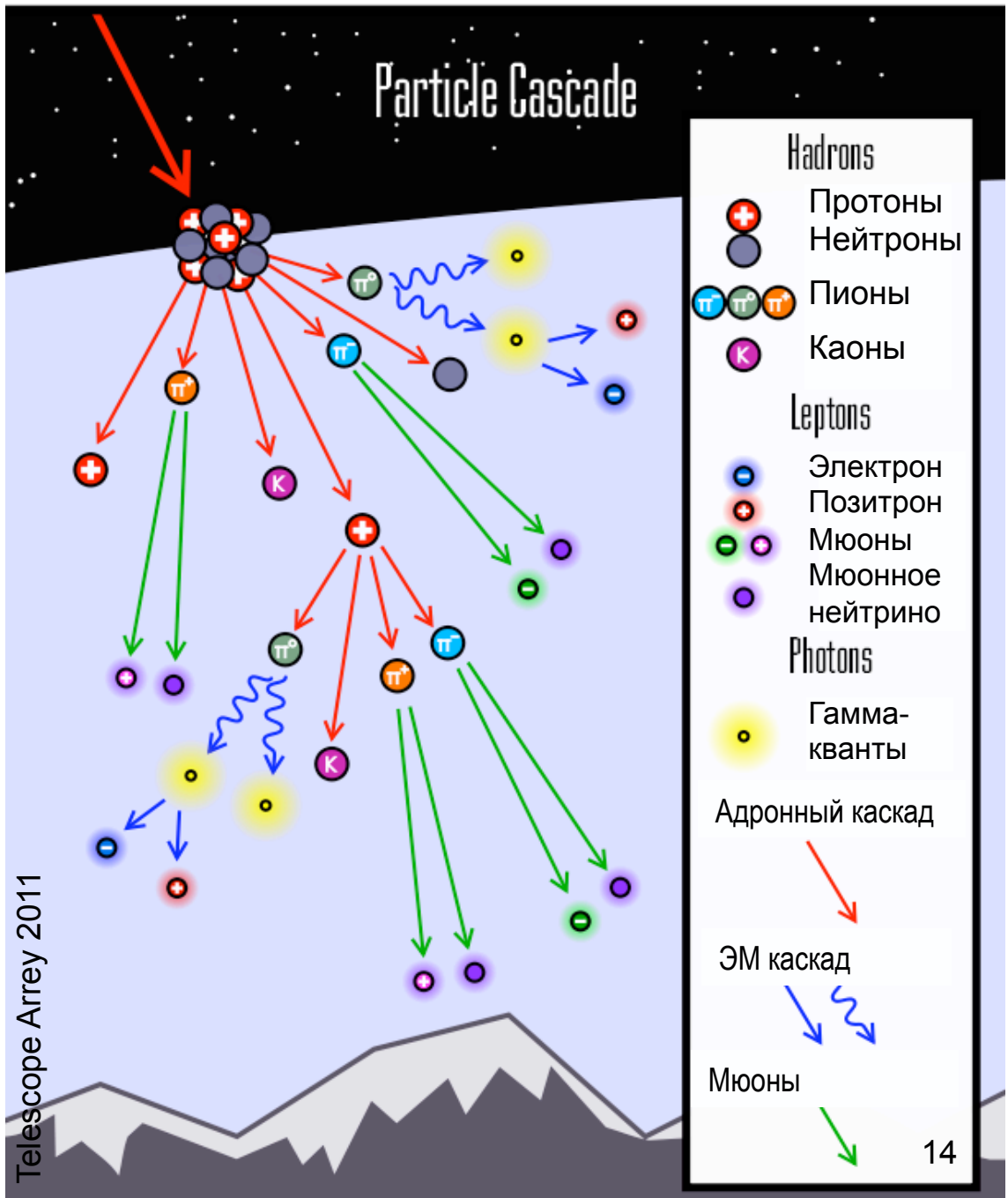
$$E_{кли} > 10^{15} \text{ эВ} \quad \gamma; 3$$

$$E_{кли} > 10^{19} \text{ эВ} \quad \gamma; 3,3$$

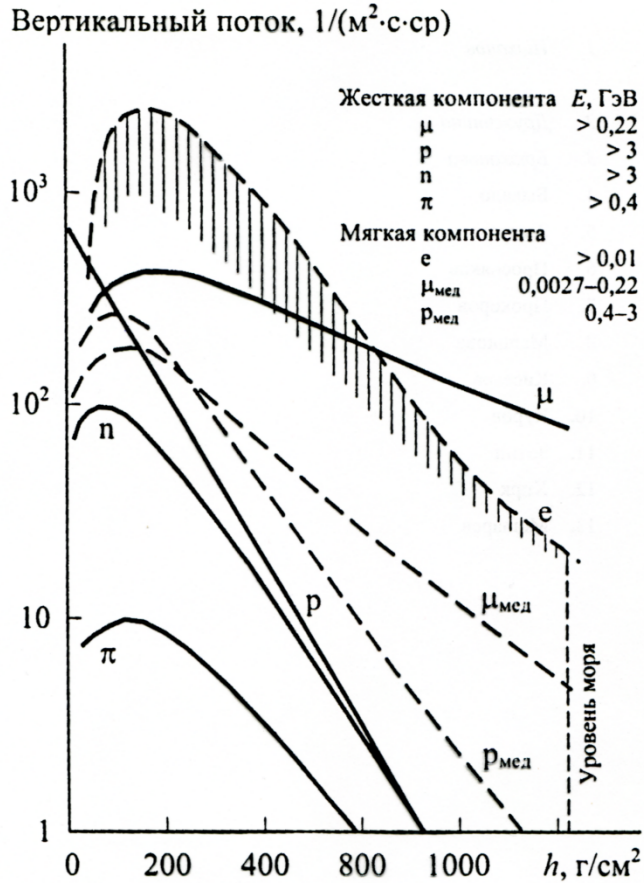


Каскад вторичных частиц в атмосфере Земли

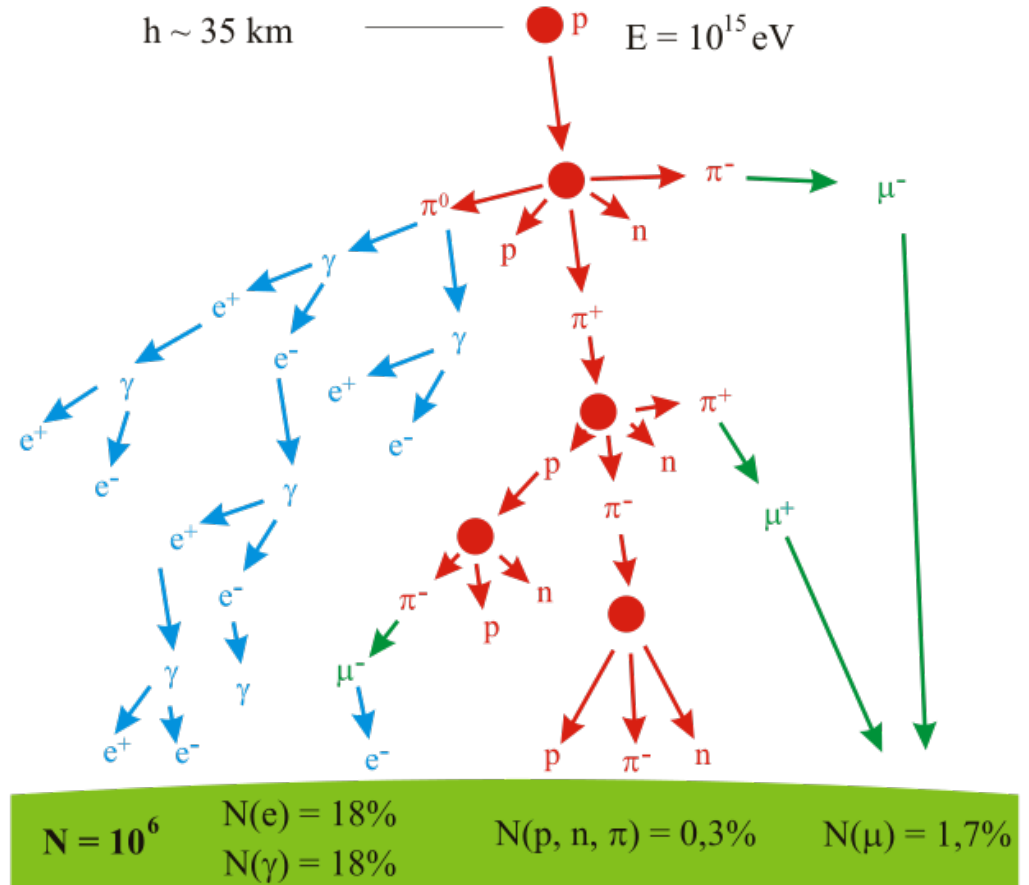
1938 г. Виктор Оже и
сотрудники. Открытие
широких атмосферных
ливней



Широкий атмосферный ливень



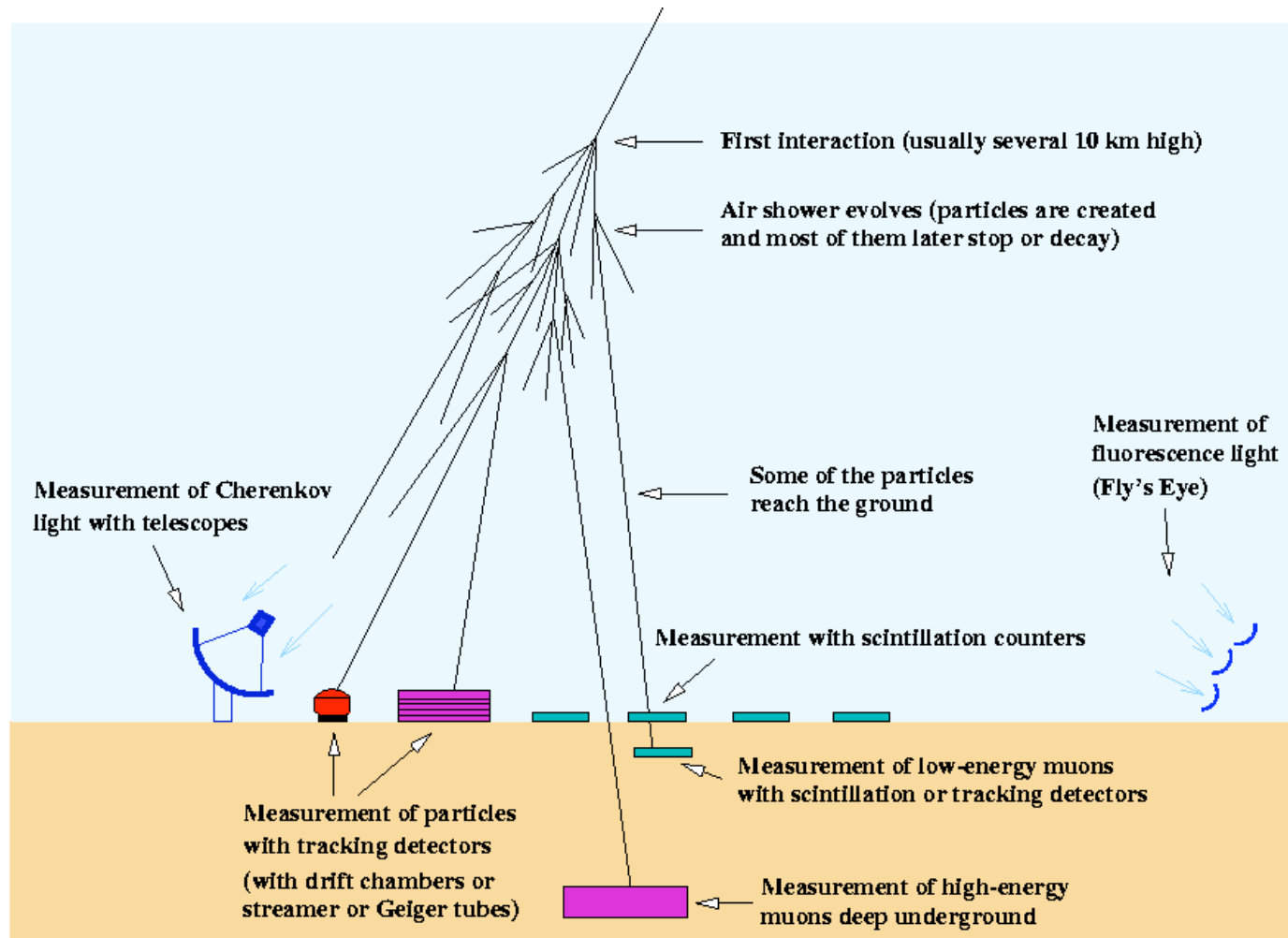
Состав вторичного излучения



Широкие атмосферные ливни

Первичный нуклон с энергией $E_N > 10^{12}$ эВ может испытать десятки столкновений с атомами атмосферы Земли, в результате чего развивается широкий атмосферный ливень. На малых расстояниях от оси ливня образуется диск вторичных частиц. По мере развития каскада образуются адронная, мюонная, электронно-фотонная, нейтринная компоненты ШАЛ. Прохождение космических лучей через атмосферу Земли сопровождается черенковским излучением, радиоизлучением и флюоресценцией частиц атмосферы. Частицы с энергией $\sim 10^{12}$ эВ на уровне моря образует $\sim 10^5 - 10^6$ электронов, 10^4 мюонов. Число адронов составляет 1% от общего числа частиц ШАЛ. Радиус ливня частицы с энергией $> 10^{15}$ эВ на поверхности Земли достигает до нескольких сотен метров, а число частиц — до 10^8 .

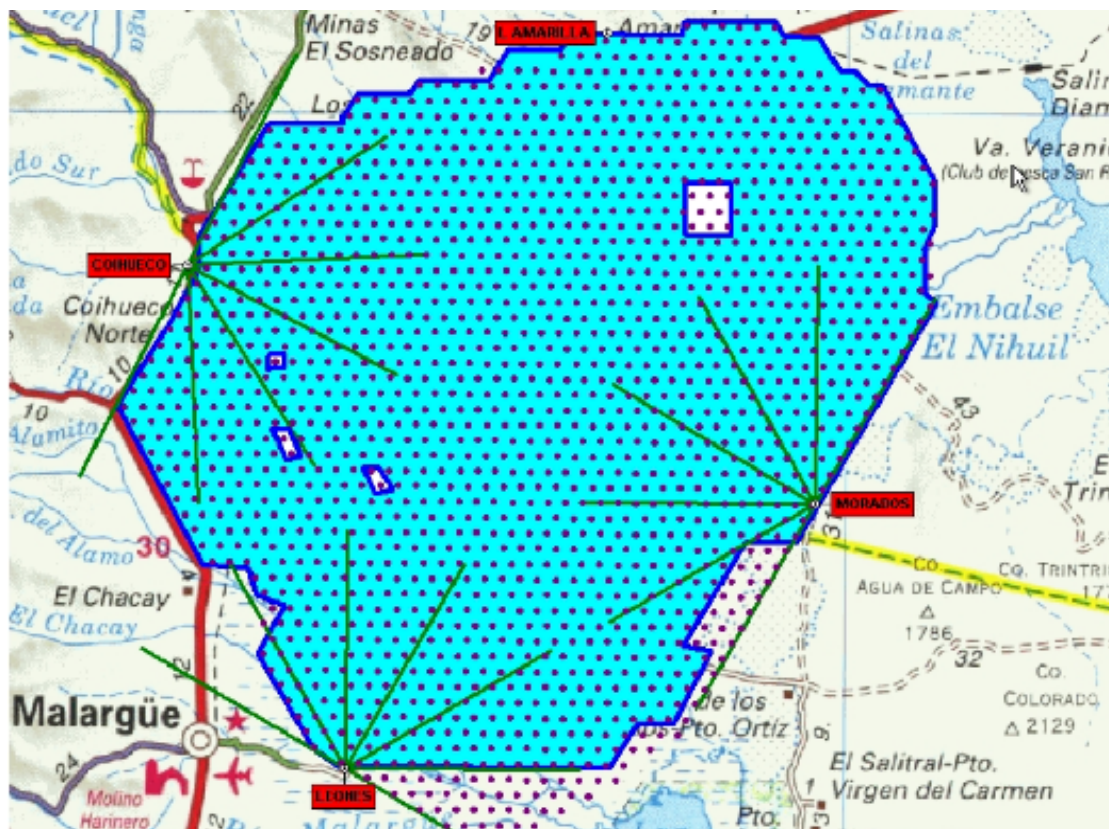
Методы регистрации ШАЛ



1. Регистрация заряженных частиц ШАЛ
2. Регистрация черенковского света
3. Регистрация флуоресцентного света
4. Регистрация радиоизлучения

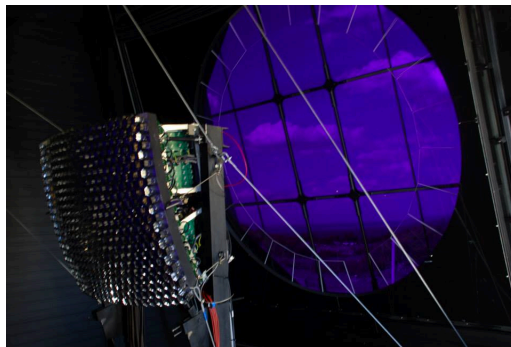
Обсерватория Оже

Обсерватория Пьер Оже в Малаге (Маларгве), Аргентина является крупнейшим и наиболее чувствительным в мире детектором космических лучей ультра высоких энергий. Обсерватория измеряет космические ливни, чтобы восстановить энергии, направления прилета и некоторую информацию об атомном составе для каждого обнаруженного первичного космического луча. Путем тщательного анализа сделанной реконструкции свойств зарегистрированных частиц, можно ограничить и, возможно, в конечном счете, идентифицировать эти астрофизические источники.



Синие точки – приблизительно 1650 поверхностных детекторов. Зеленые линии показывают направления просмотра для всех четырех флуоресцентных детекторов. В целом, массив занимает площадь более 3000 квадратных километров.

Флуоресцентные детекторы FD



440 фотоумножителей
Радиус обзора > 30 км

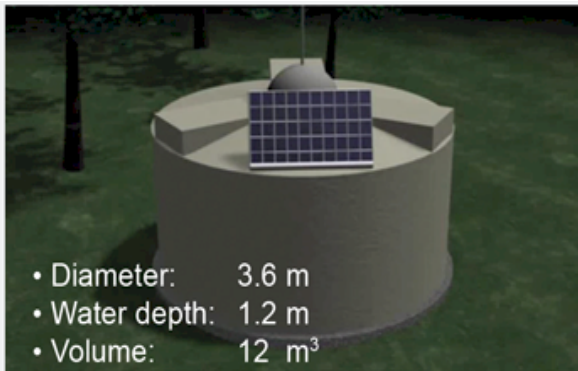
Заряженные частицы ливня также взаимодействуют с азотом воздуха, вызывая флуоресценцию. Флуоресцентные детекторы позволяют следить за развитием ливней путем измерения яркости излучаемого света, которая постоянно возрастает и может достигать до 4 ватт, когда каскад вырастает до максимального размера. Используя сетку фокусирующих зеркал детекторы могут проследивать ливень до 15 км. Если ливень проходит так, что регистрируется двумя флуоресцентными детекторами, возможно очень точное определение направления космических лучей.

Поверхностные детекторы SD

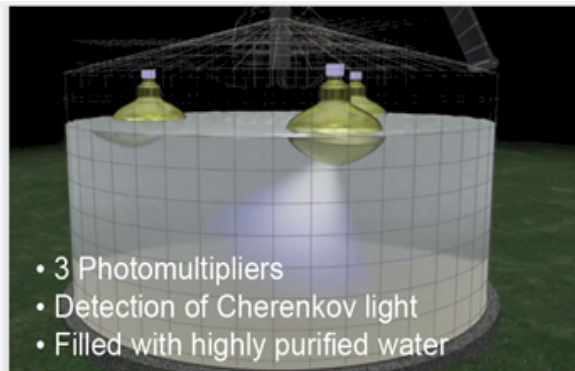
Гайдаров Е. Сича - 2007



В обсерватории задействовано 1660 водяных поверхностных детекторов, между которыми 1.5 км. Детекторы покрывают площадь в 3000 км². Высокоэнергетичные частицы, попадая в емкость, заполненную очищенной водой, вызывают черенковское излучение, которое регистрируется ФЭУ. Интенсивный космический ливень содержит миллиарды вторичных частиц и может вызывать почти одновременные световые вспышки в более чем пяти емкостях. Энергия первичной космической частицы может быть оценена по количеству света от вторичных частиц. Небольшое отличие во времени детектирования события в различных емкостях помогает определить траекторию прилетевшей частицы

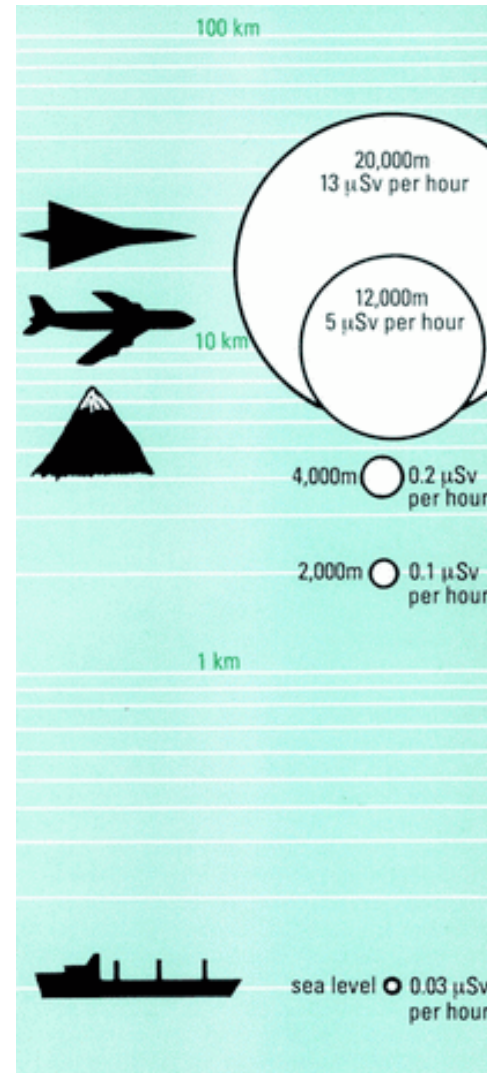
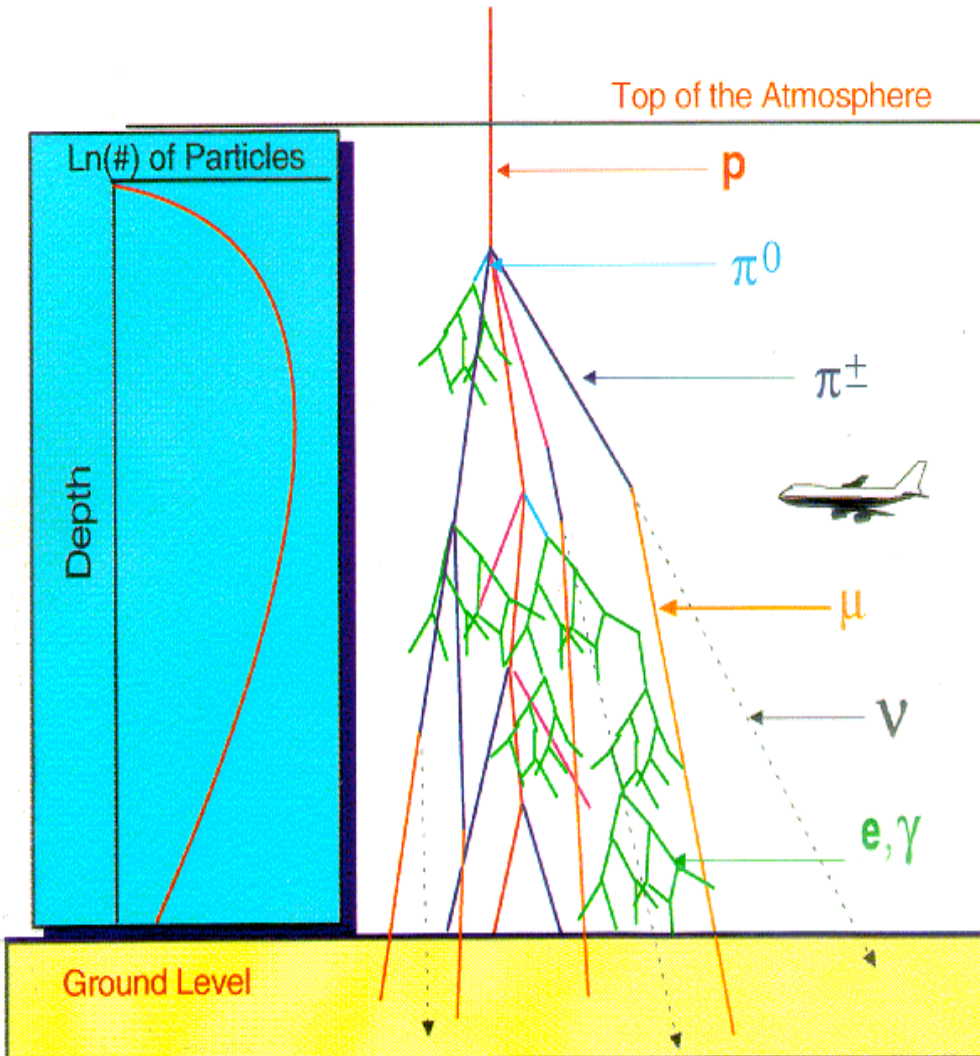


- Diameter: 3.6 m
- Water depth: 1.2 m
- Volume: 12 m³



- 3 Photomultipliers
- Detection of Cherenkov light
- Filled with highly purified water

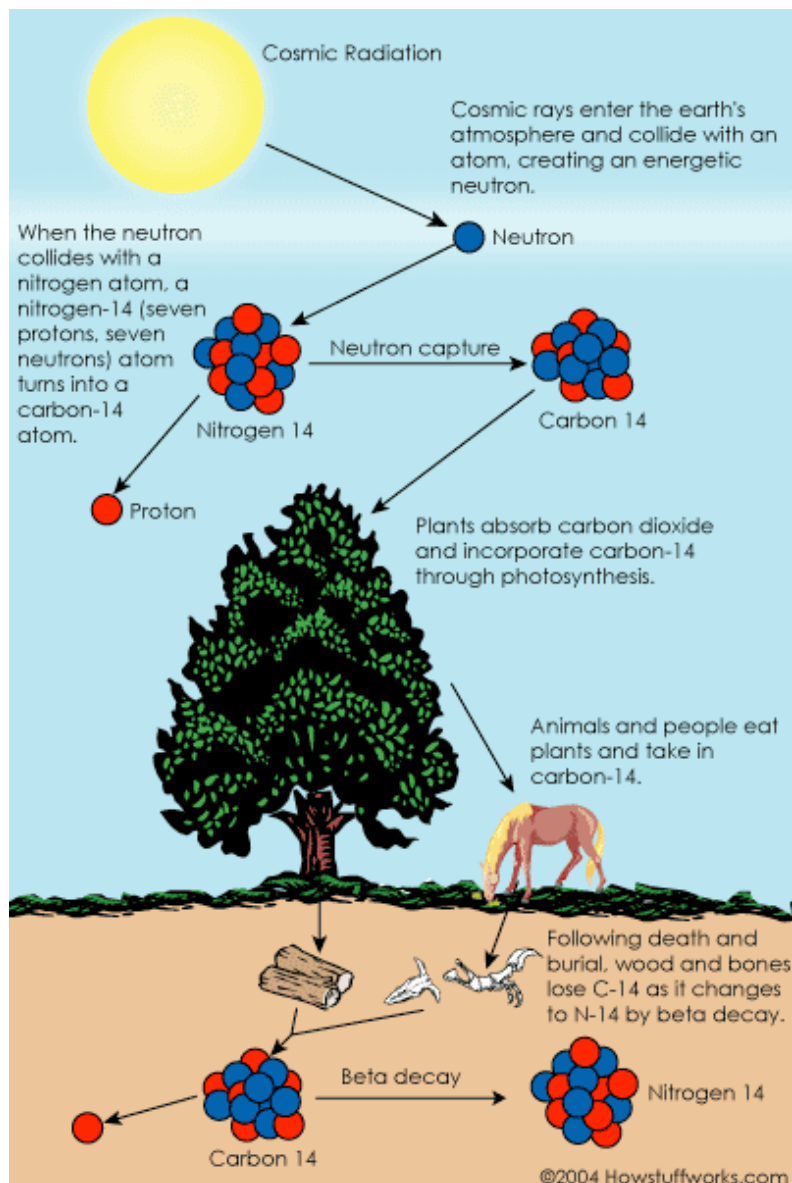
Радиация



5 мкЗв/час

0,03 мкЗв/час

Космогенные радионуклиды



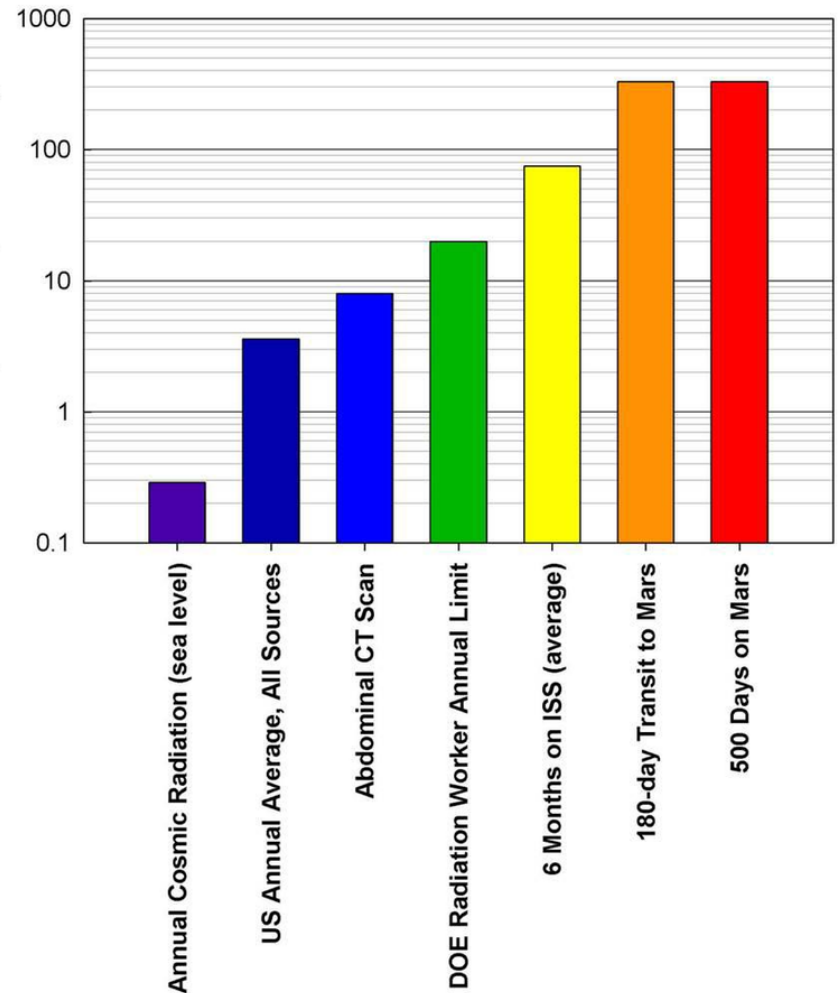
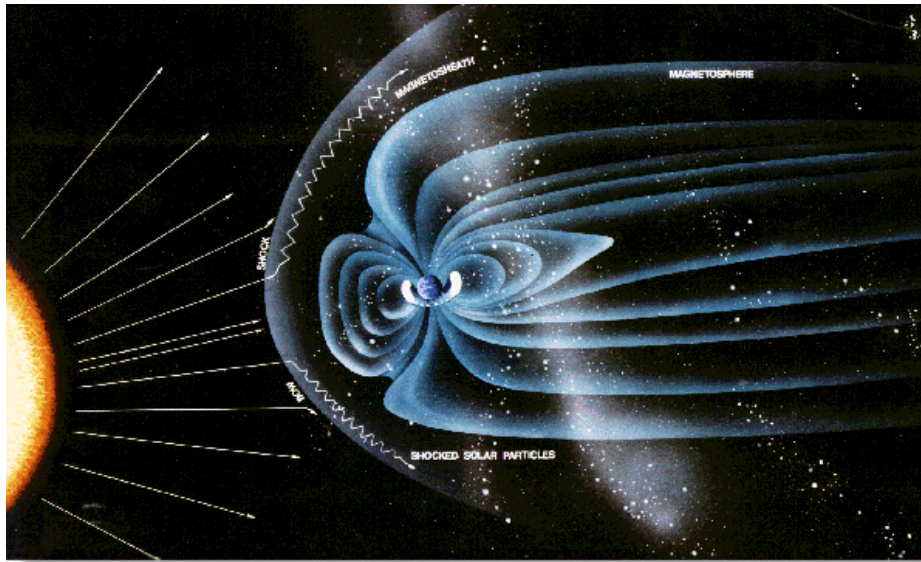
В создание дозы наибольший вклад вносят ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{22}\text{Na}$ которые поступают вместе с пищей в организм человека

Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека

Радионуклид	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0.004
${}^7\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около **15 мкЗв/год.**

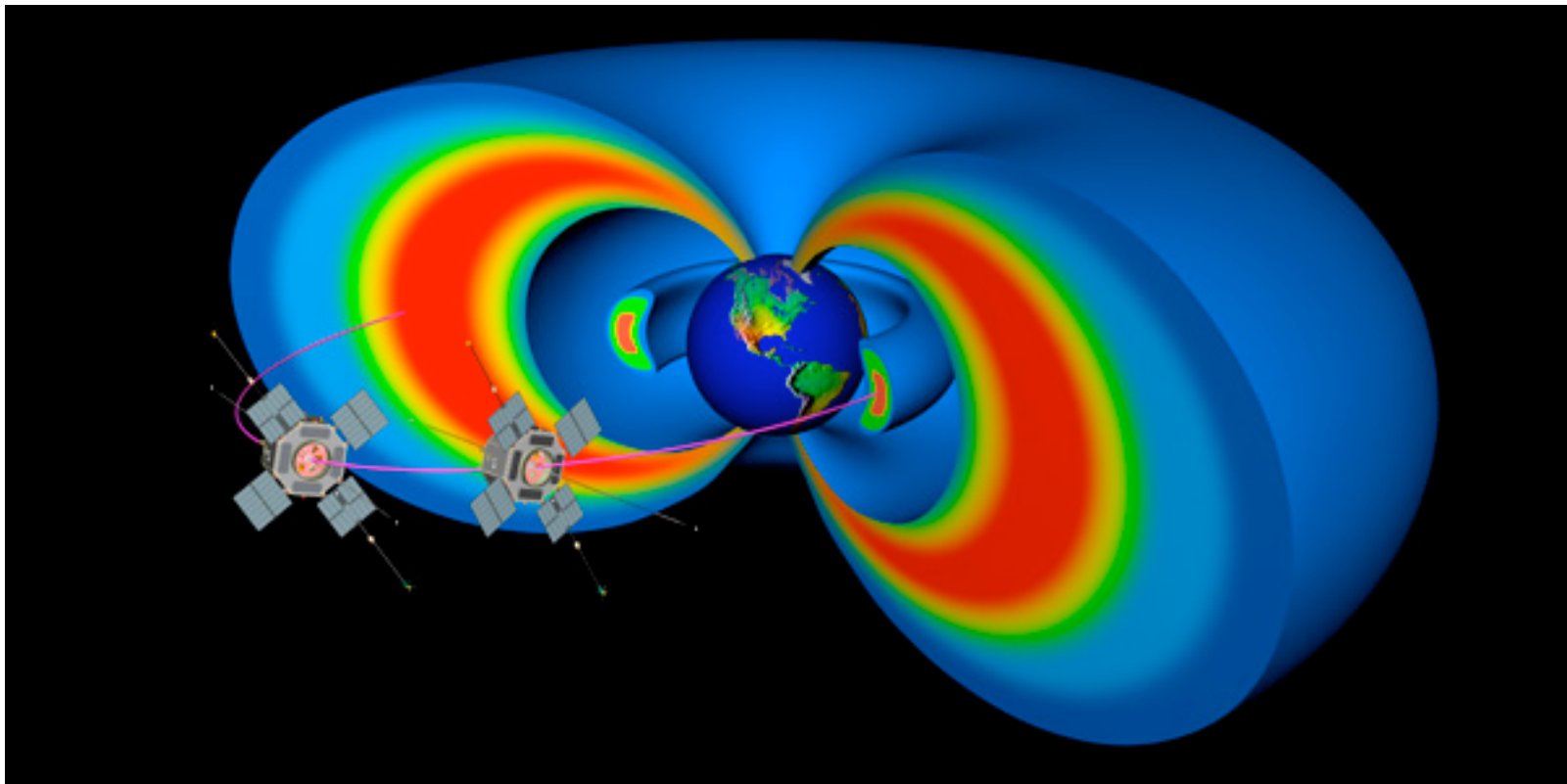
Радиация



За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около **0.35 мЗв /год.** Эффективная доза от глобальных авиаперевозок составляет на душу населения в мире в среднем около **1 мкЗв/год**, а в Северной Америке около 10 мкЗв.

МКС (400 км) – 1 мЗв/день ²³

Радиационные пояса Земли



1958 г

Дж. Ван Аллен. Внутренний радиационный пояс на высоте ≈ 4000 км (протоны с энергией в десятки МэВ)

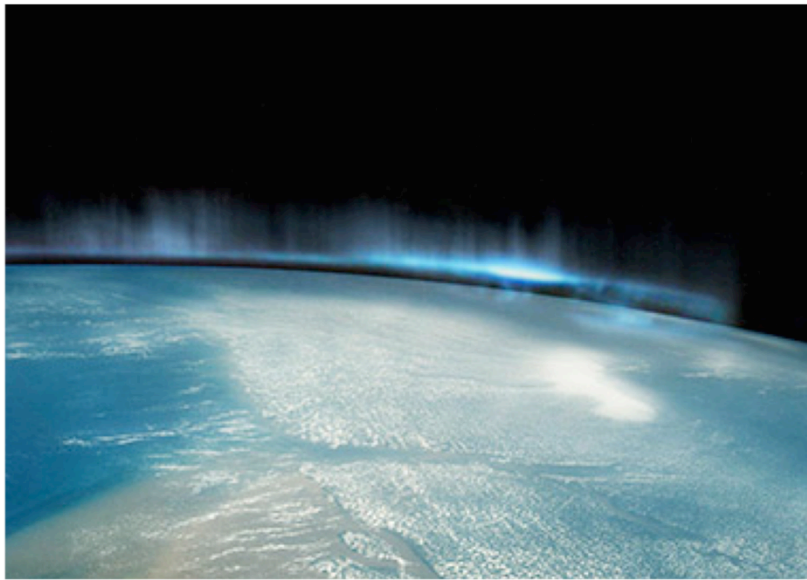
С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков. Внешний пояс на высоте $\approx 17\,000$ км (электроны с энергией в десятки кэВ)

Радиационные пояса Земли

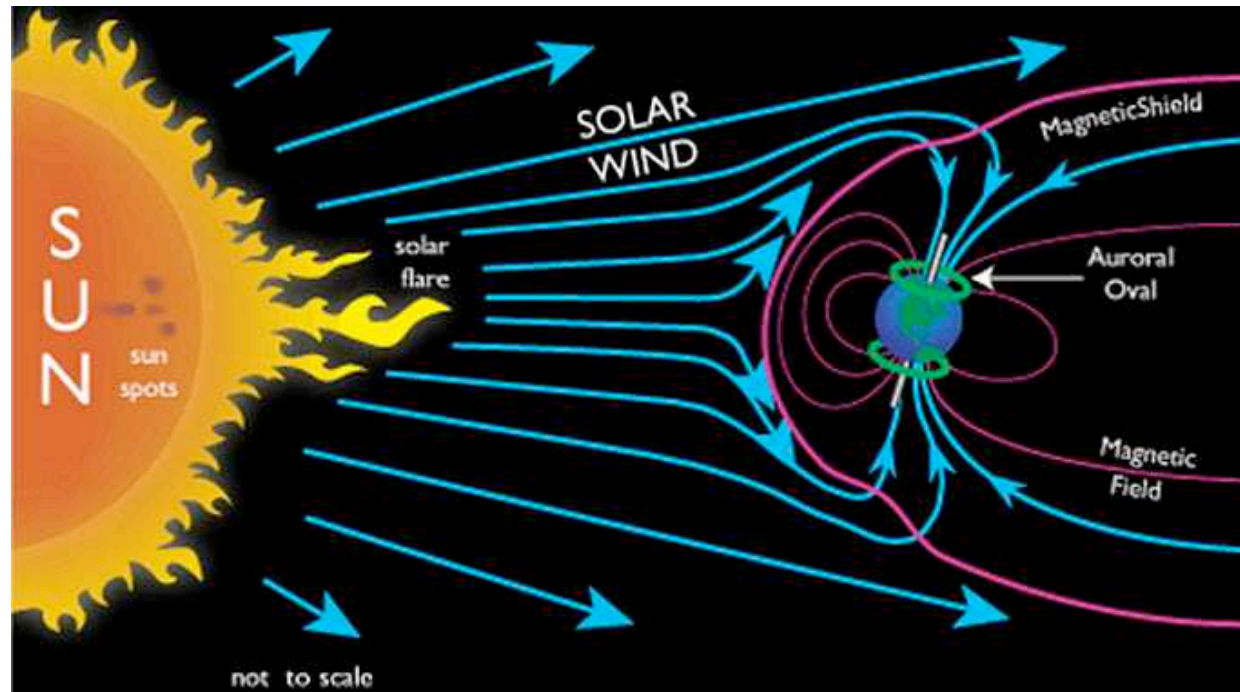
Для заряженной частицы с энергией, не превышающей несколько ГэВ, в магнитном поле Земли существуют магнитные ловушки — области пространства, в которые заряженные частицы не могут ни влететь извне, ни вылететь из них. Эти области имеют форму тороидов, охватывающих Землю в широтном направлении. Их удаленность от Земли зависит от энергии частицы. Чем выше энергия частицы, тем ближе они расположены к поверхности Земли. Вблизи Земли находятся зоны повышенной концентрации заряженных частиц — **радиационные пояса Земли**.

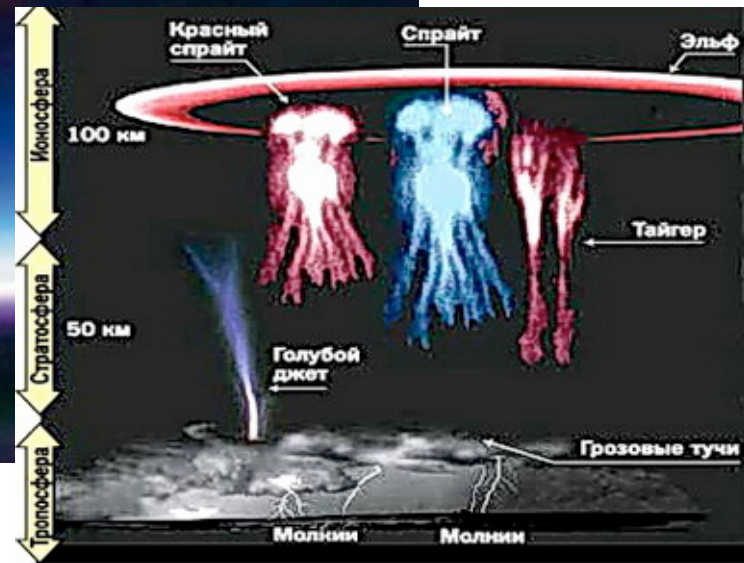
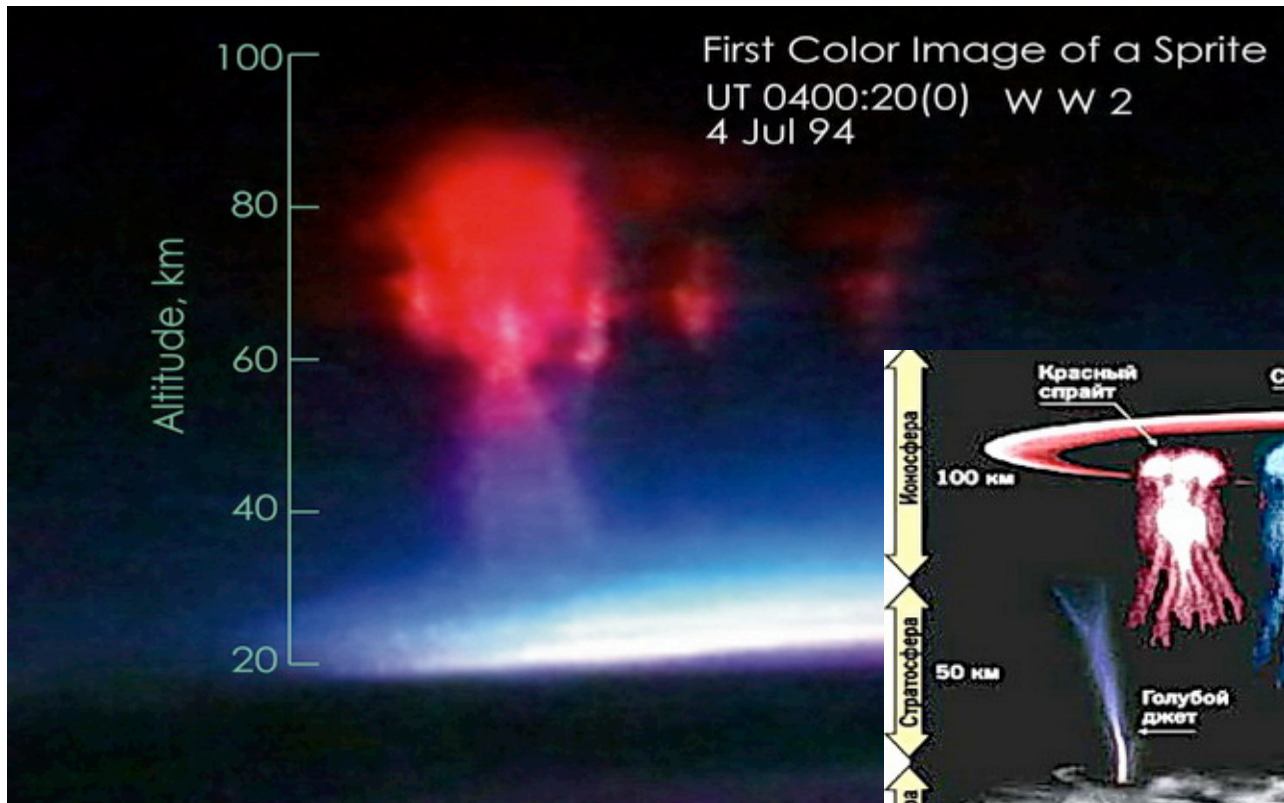
Внутренний радиационный пояс состоит в основном из протонов ($E_p > 35$ МэВ) и находится на расстоянии нескольких тысяч километров от поверхности Земли. Основным механизмом инжекции протонов во внутренний радиационный пояс Земли является распад нейтронов, которые образуются при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли. Максимум потока захваченных протонов внутреннего радиационного пояса Земли — на расстоянии $\sim 1,5$ радиуса Земли.

Внешний радиационный пояс начинается на высоте 60–75 тыс. км и состоит в основном из электронов с энергией от нескольких сотен кэВ до ~ 10 МэВ.



Северное сияние

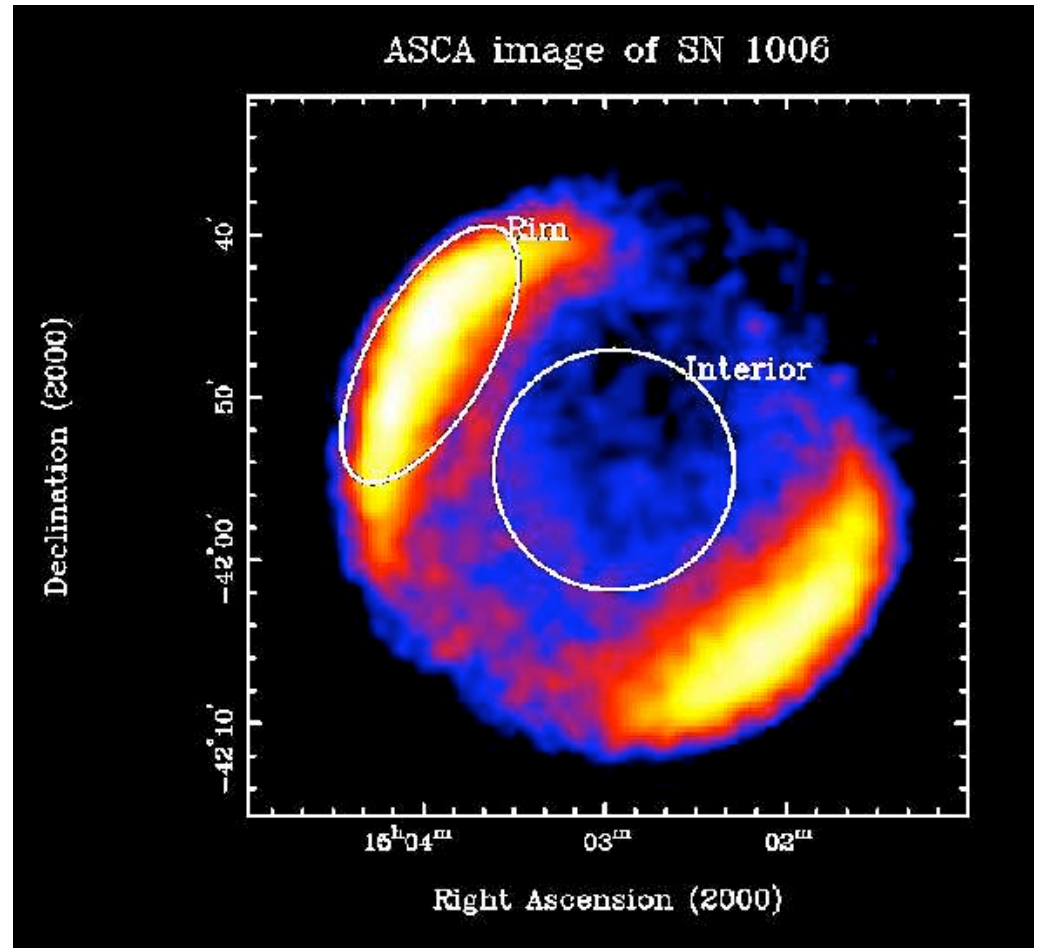




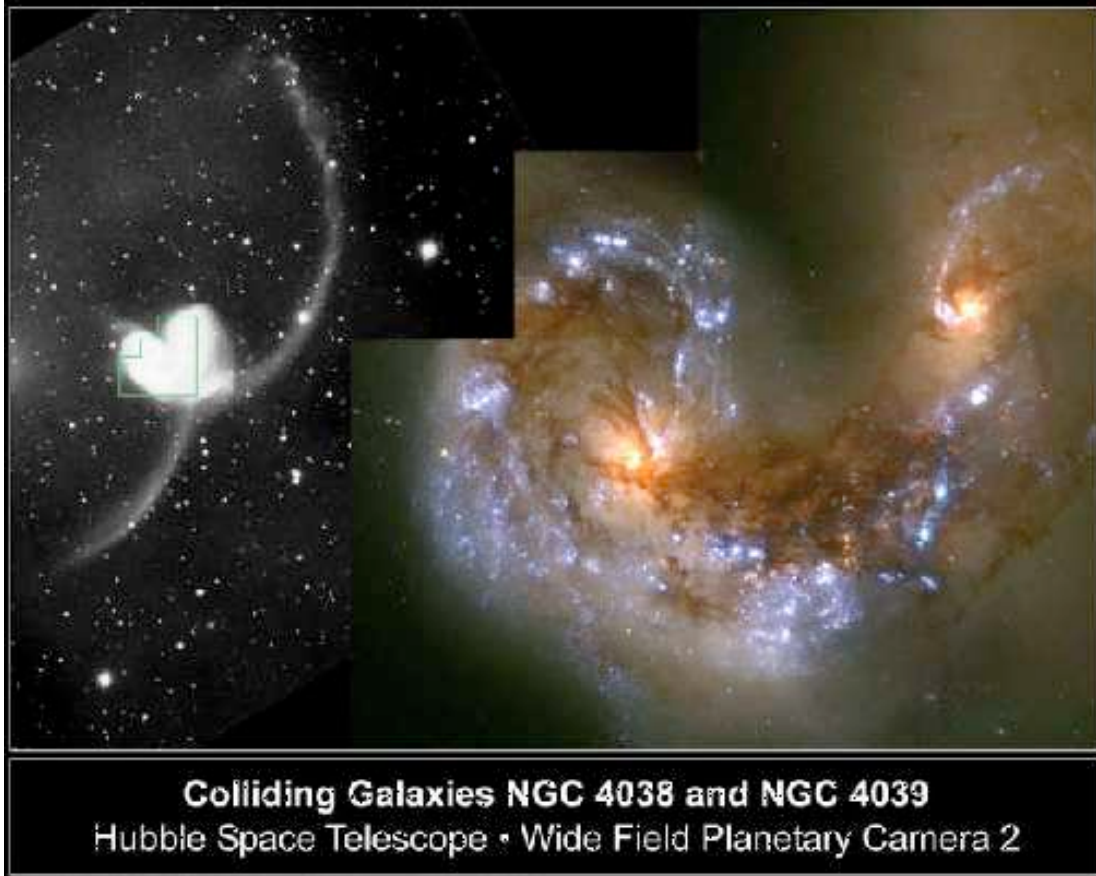
Между радиационными поясами находится так называемая безопасная зона. **За "расчистку" безопасной зоны высотой в несколько тысяч километров отвечают обычные молнии в атмосфере**, которые во время гроз сверкают на высоте всего лишь 3-5 километров над поверхностью Земли. А в верхних слоях их называют голубой джет, тайгерт, спрайт и эльфы.

Источники космического излучения

- Солнце и другие звезды ($10^4 - 10^5$ эВ)
- Нейтронные звезды (до 10^4 эВ)
- Сверхновые (до 10^{14} эВ)
- Реликтовые нейтрино
- Свыше 10^{14} эВ?



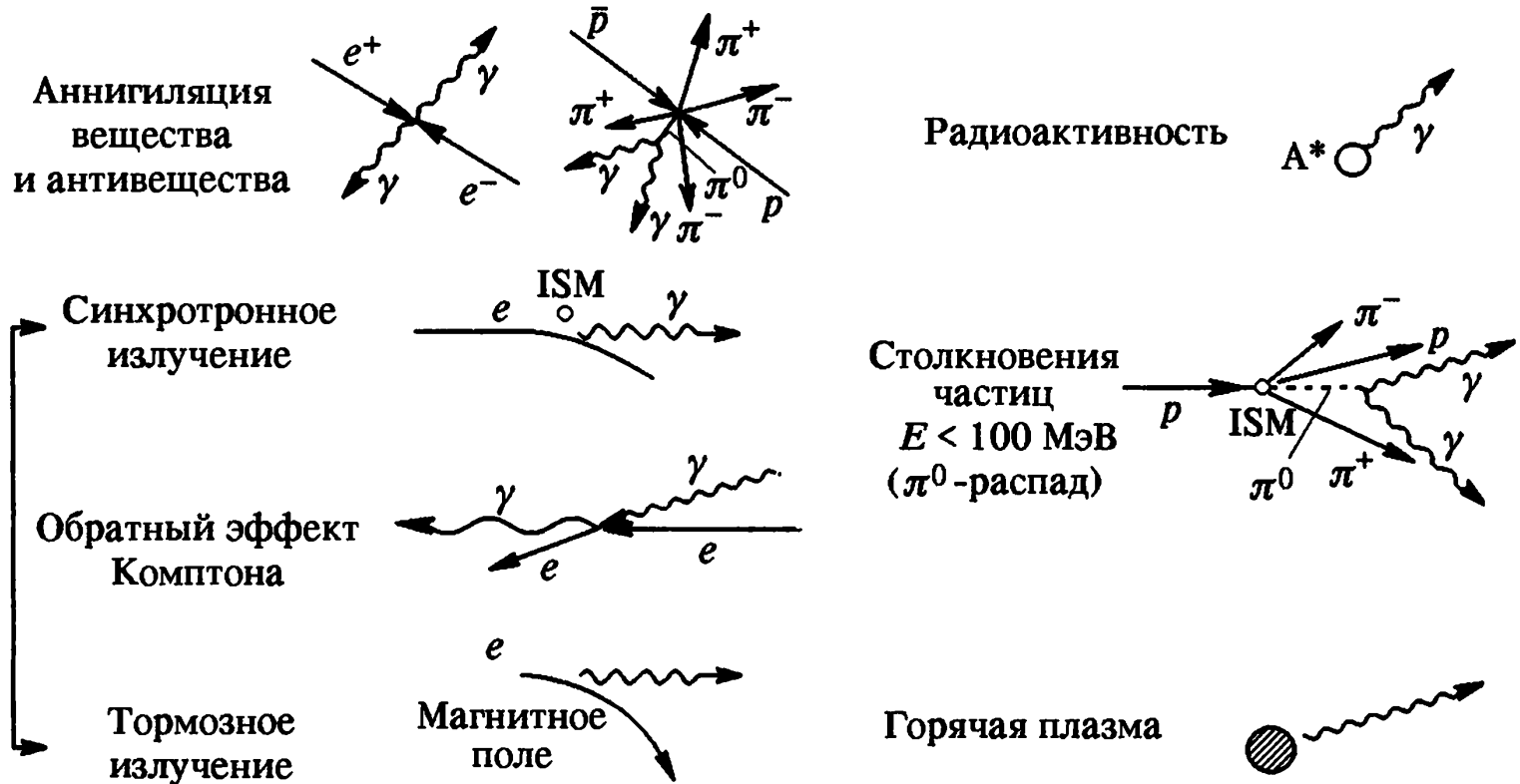
Космические лучи высоких энергий



Свыше 10^{14} эВ? Теории:

- Струи частиц из пульсаров и черных дыр
- Столкновения звезд и галактик
- Аккреционный диск черной дыры
- Слияние черных дыр
-

Рентгеновская астрономия



Процессы генерации гамма-излучения во Вселенной

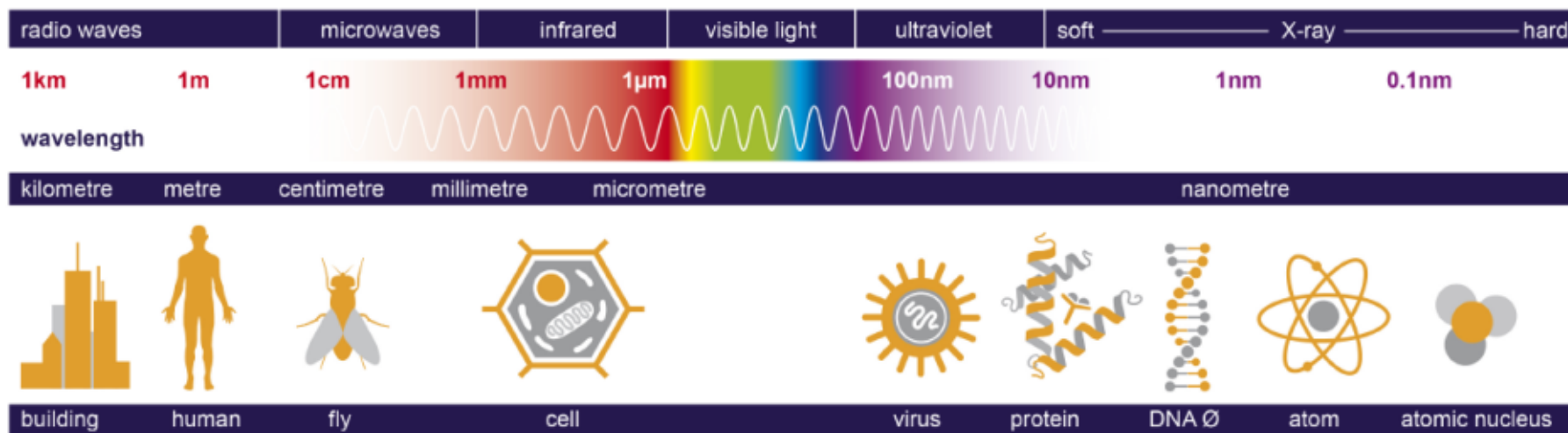
Электромагнитное излучение

Энергия, эВ

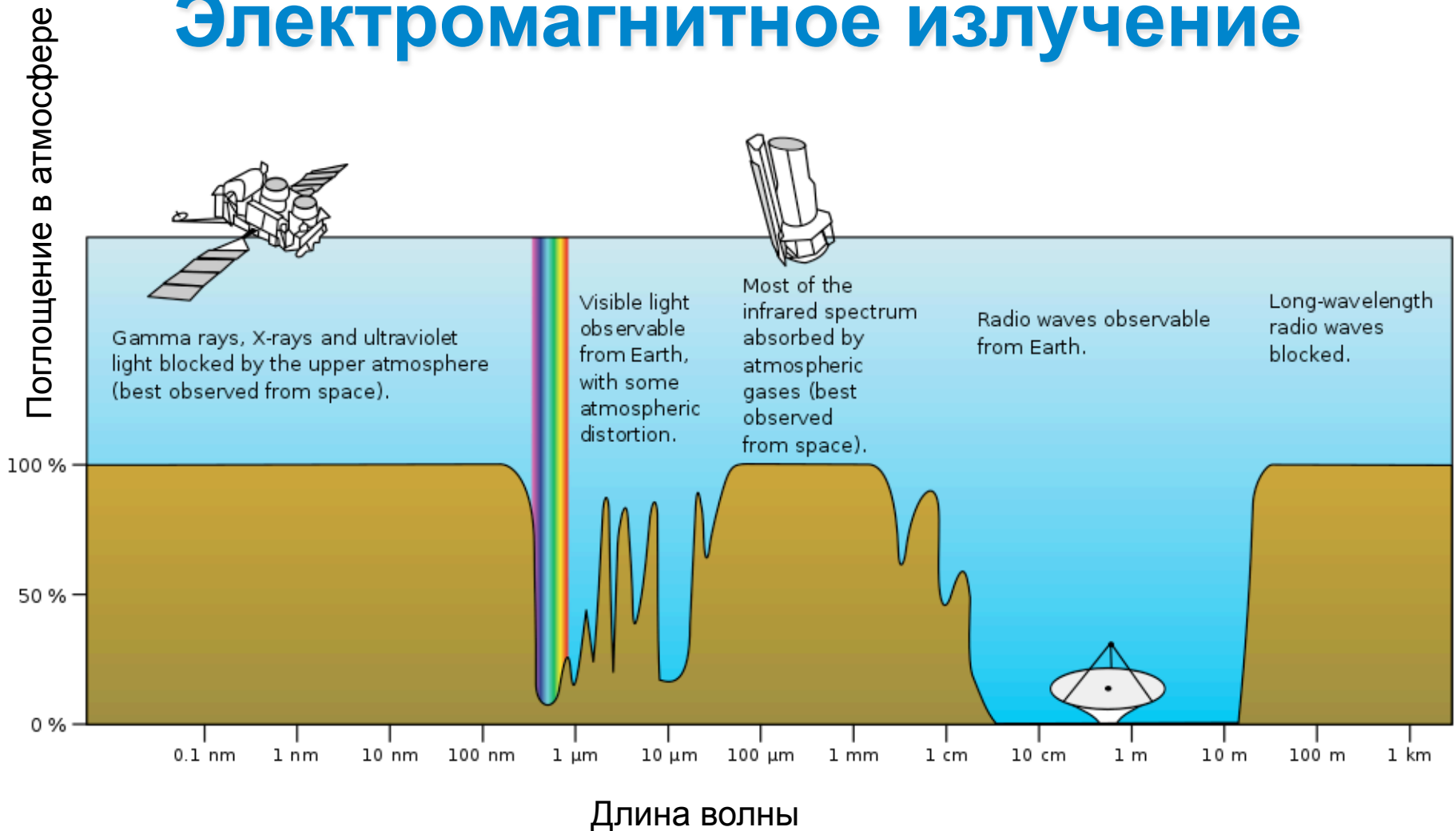
10^{-10} 10^{-7} 10^{-5} 10^{-4} 0,1 1 10 10^2 10^3

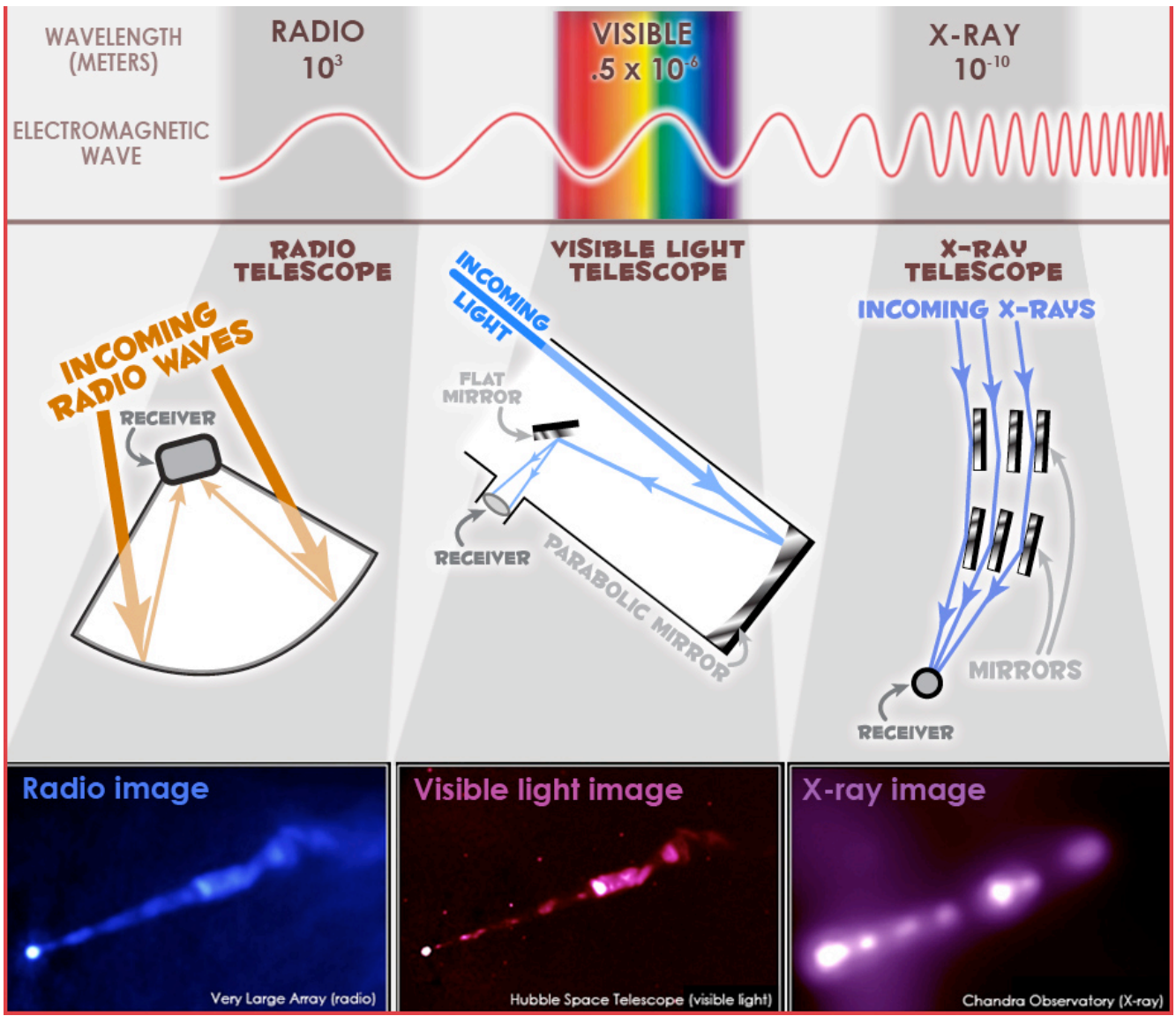
Частота, Гц

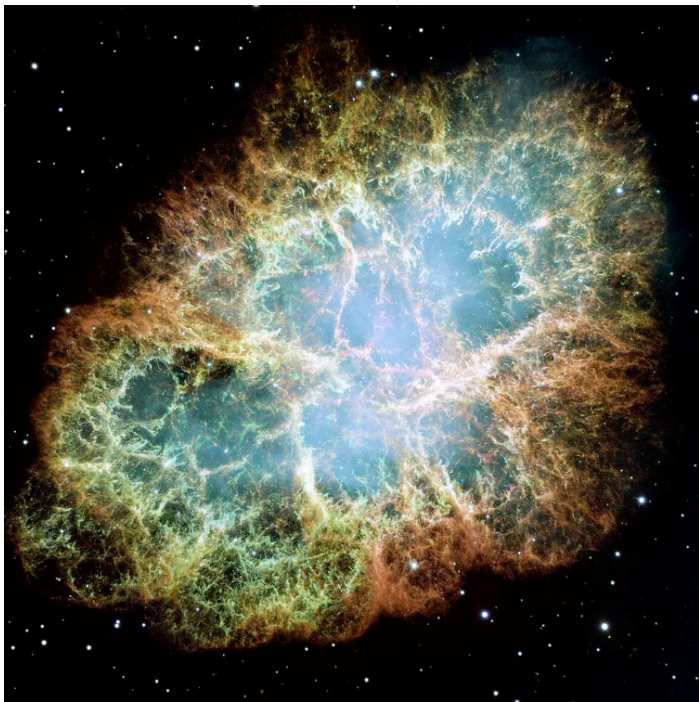
10^5 10^8 10^{10} 10^{11} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{18}



Электромагнитное излучение

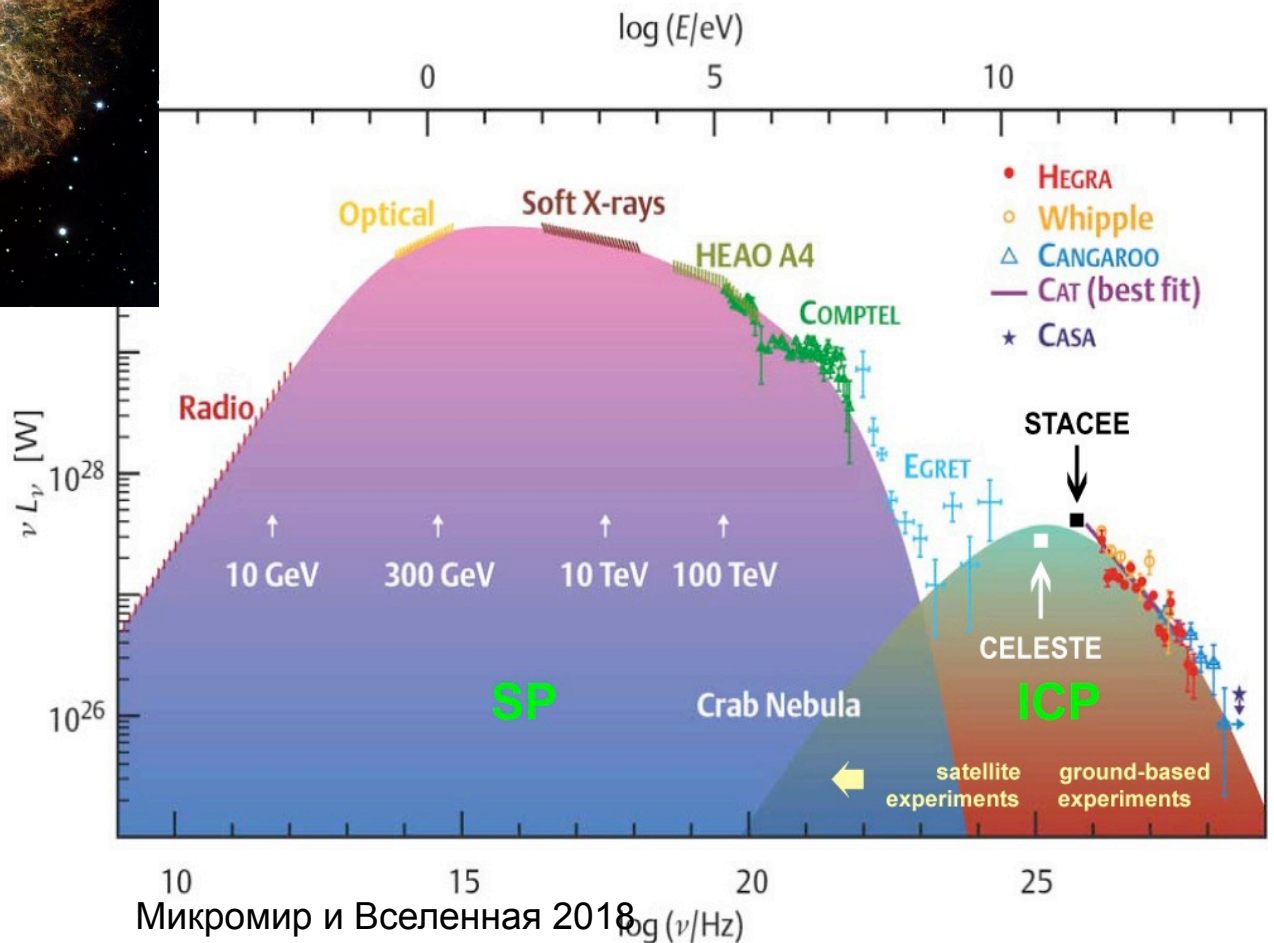






Спектр Крабовидной туманности состоит из двух пиков, **SP** и **ICP**, синхротронное излучение электронов высоких энергий и **обратное комптоновское рассеяние** этих фотонов на тех же электронах.

Крабовидная туманность в созвездии Тельца, являющаяся остатком сверхновой SN 1054





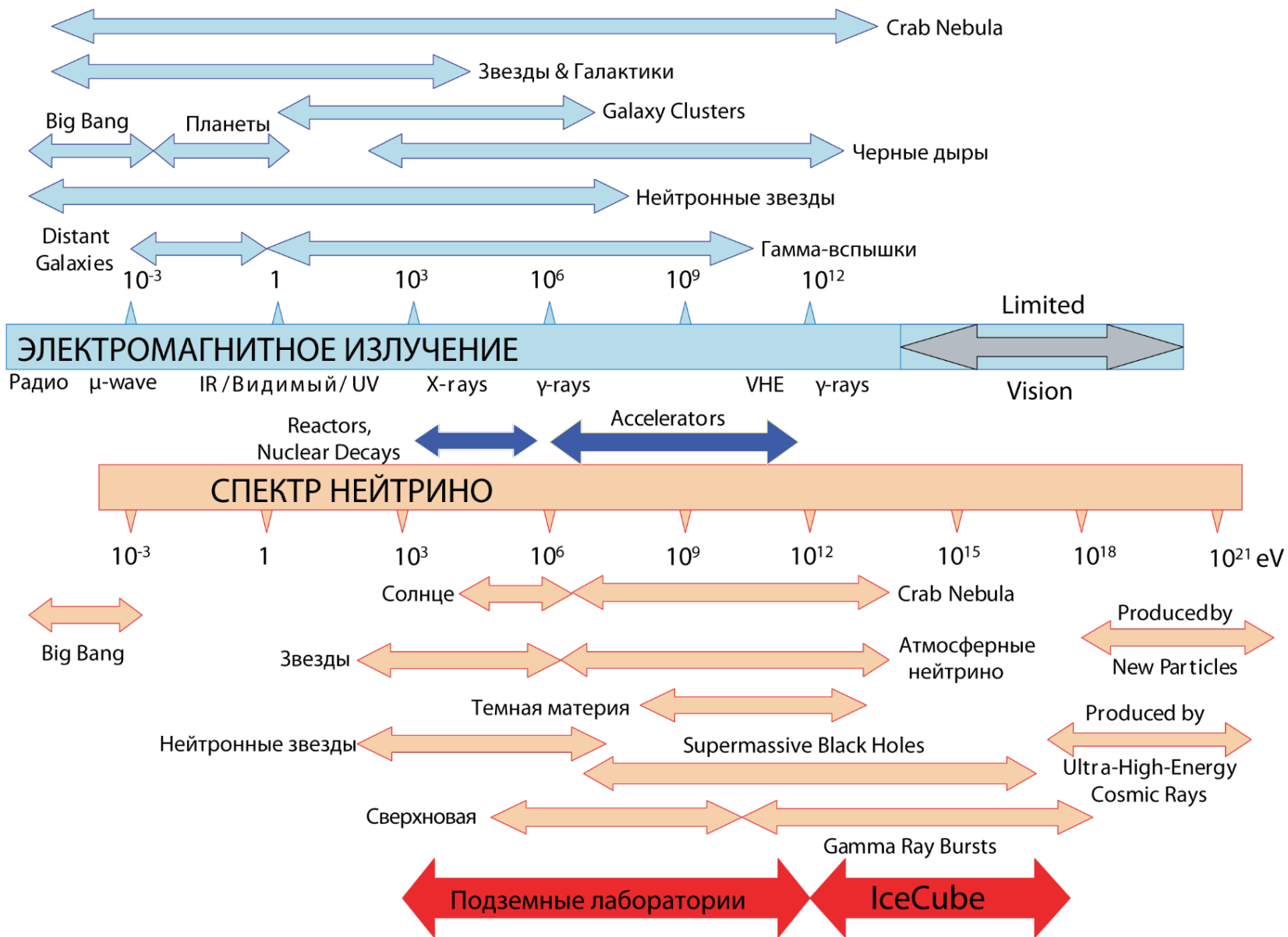
В центре туманности находится пульсар -- нейтронная звезда, оставшаяся после взрыва сверхновой, диаметр 25 км.

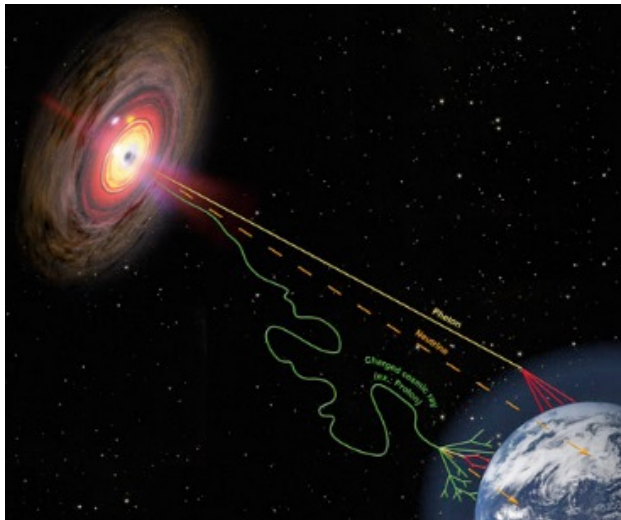
Пульсар был открыт в 1968 году; это было первое наблюдение, связывающее останки сверхновой и пульсары и послужившее основой для предположения, что пульсары являются нейтронными звёздами.

Пульсар Краба вращается вокруг своей оси, совершая 30 оборотов в секунду.

Излучение пульсара также регистрируется в электромагнитном спектре, начиная от радиодиапазона и заканчивая γ -излучением.

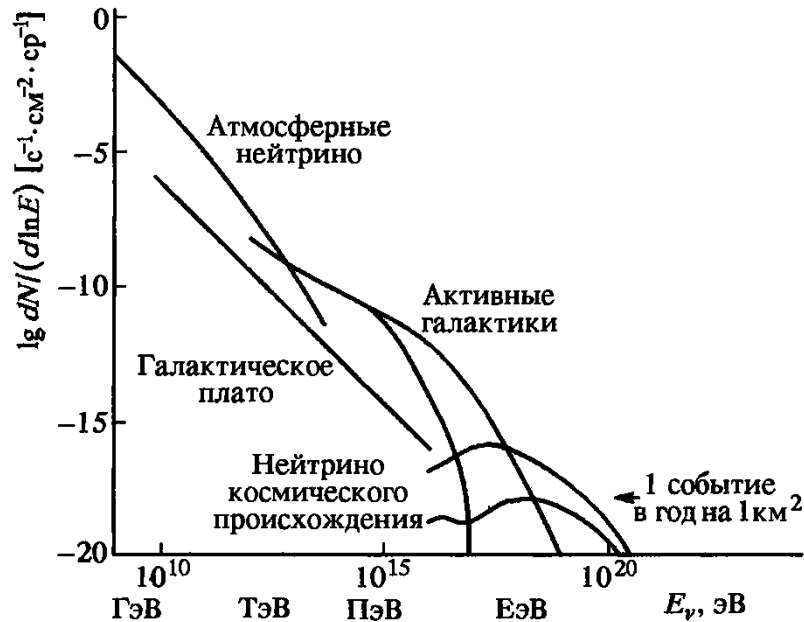
Нейтринная астрономия





Нейтринная астрономия

На своем пути к Земле нейтрино высоких энергий почти не участвуют во взаимодействиях, и поэтому направление их распространения непосредственно указывает на источник нейтрино. По этой причине поиск источников нейтрино высоких энергий столь привлекателен.



Поскольку источником гамма-излучения высокой энергии и нейтрино является процесс образования пионов, оба эти излучения должны возникать одновременно. Однако в отличие от фотонов поиск нейтрино обладает одним преимуществом — они не поглощаются космическими объектами (например, очень плотными средами). Это означает, что с помощью нейтрино возможно обнаружение таких источников, которые невидимы в гамма-области.

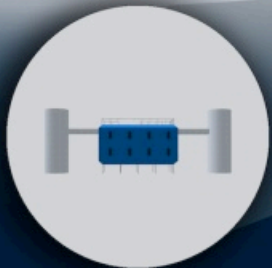


ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

50 m

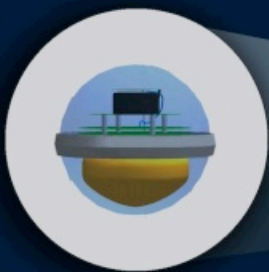
IceTop



IceCube Laboratory

Data from every sensor is collected here and sent by satellite to the IceCube data warehouse at UW-Madison

1450 m



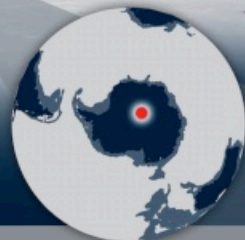
Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs deployed in the ice

2450 m

2820 m

IceCube

bedrock



Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility

86 strings

DeepCore



Eiffel Tower
324 m

