

АСТРОФИЗИКА

Лекция 2

Не только электро-магнитные волны

От космических объектов приходит не только электромагнитное излучение.

На Землю прилетают различные частицы:
протоны, электроны, нейтрино ...

Кроме того, существуют т.н. гравитационные волны.

О чем рассказывают космические лучи и почему они важны

**Космические лучи –
это одновременно и объект, и инструмент исследования.**

1. Новый канал информации.
2. Вопрос о происхождении и эволюции.
3. Открытие новых частиц. Естественные ускорители.
4. В Галактике КЛ динамически важны.
Их плотность энергии порядка энергии магнитного поля и тепловой энергии газа.



Спектр космических лучей

На 90% космические лучи состоят из протонов, на 10% - из альфа-частиц, остальное – более тяжелые ядра, электроны, и тд.

Для первичных КЛ у Земли:

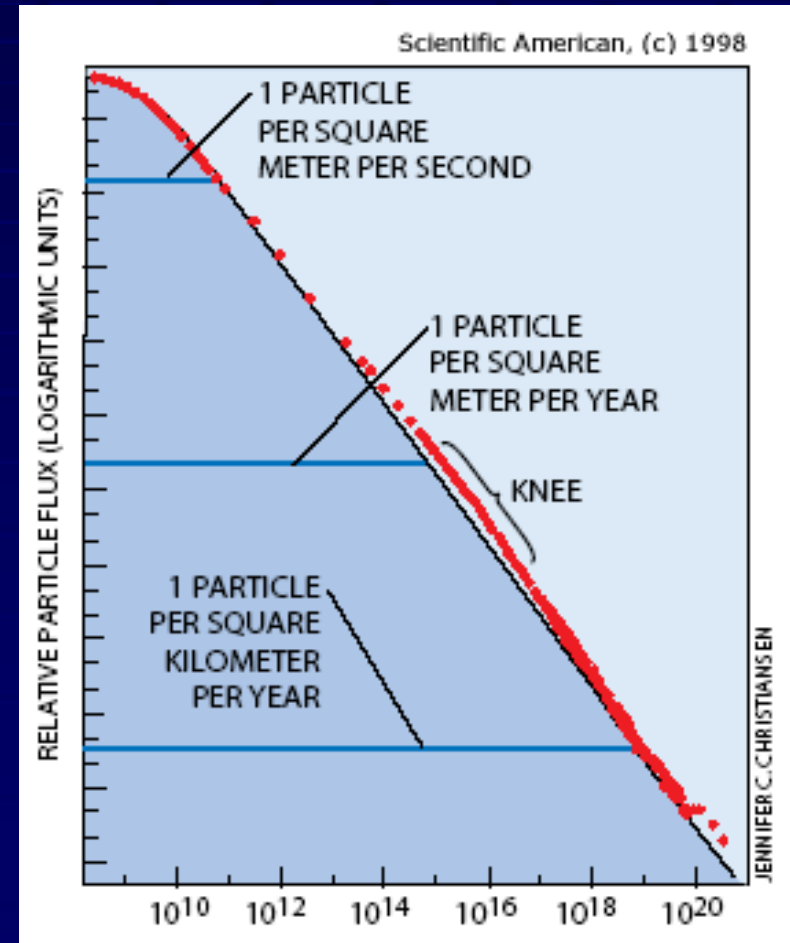
$I = 0.2 - 0.3$ частиц/(см² с ср)

$N = 10^{-10}$ частиц/см³

$W = 10^{-12}$ эрг/см³ = 1 эВ/см³

Первичные КЛ поверхности Земли практически никогда не достигают (лишь около 1%).

Вторичные частицы: на 70% мюоны и на 30% электроны и позитроны.

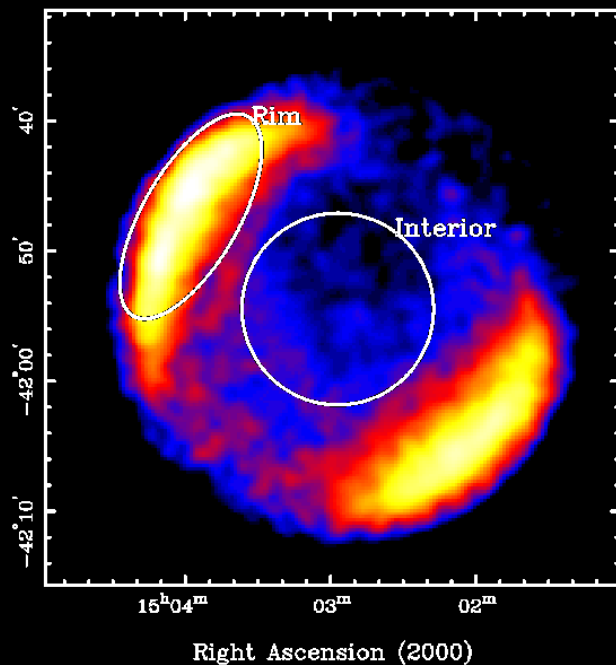


Происхождение

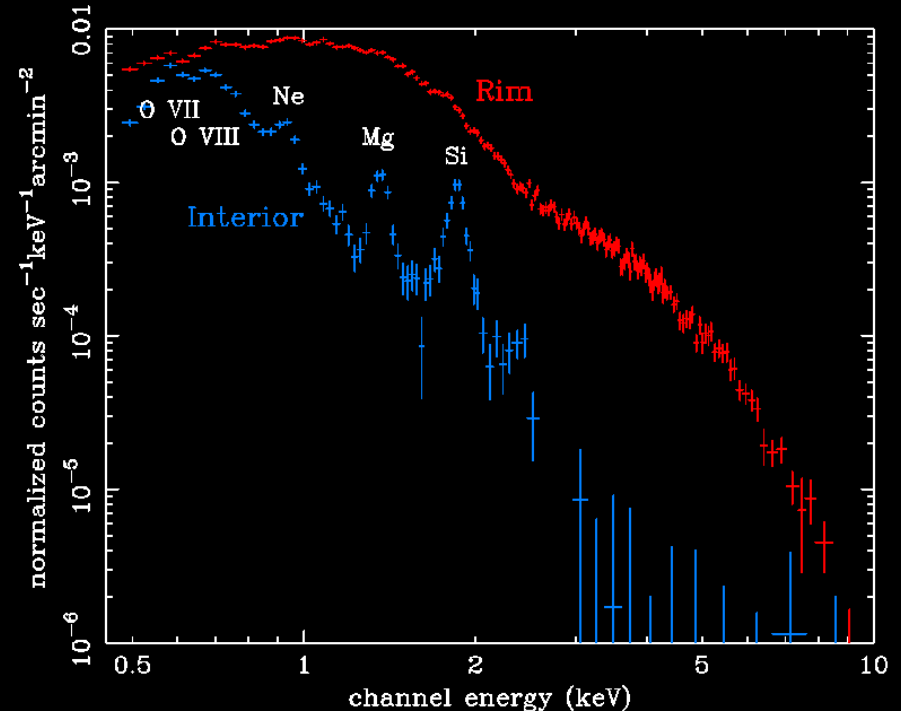
Галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых.

Рентгеновское излучение остатка сверхновой SN1006 говорит о наличии электронов с энергиями 100-200 ТэВ!

ASCA image of SN 1006



X-ray spectrum of SN 1006





Межзвездн
Плотность
энергии (да

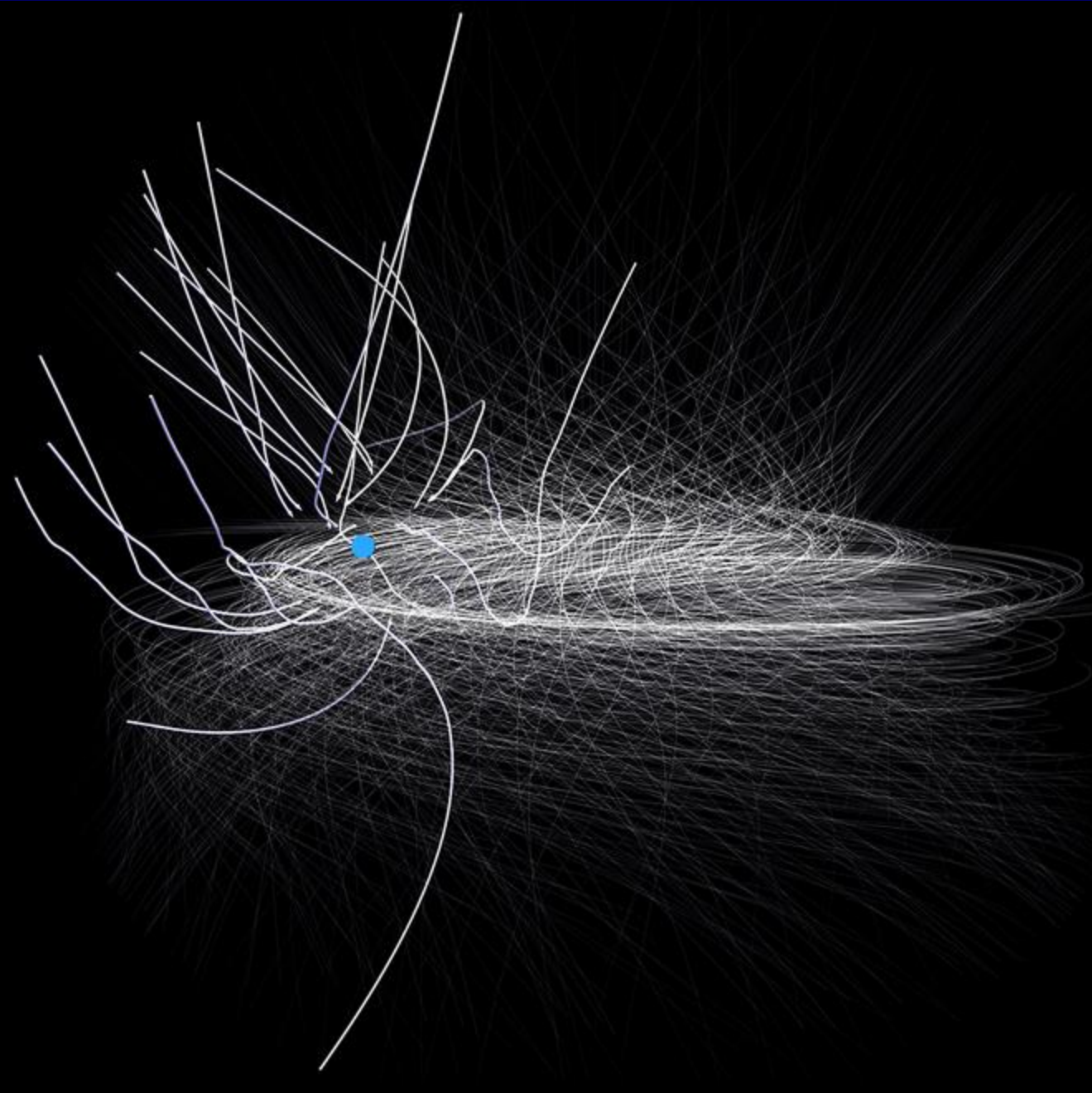
Минималы
300 пк ~

Рассмотрим

Кривизна т
 $r_H \sim E/eH$
 $r_H = 3.3 \cdot 10^4$

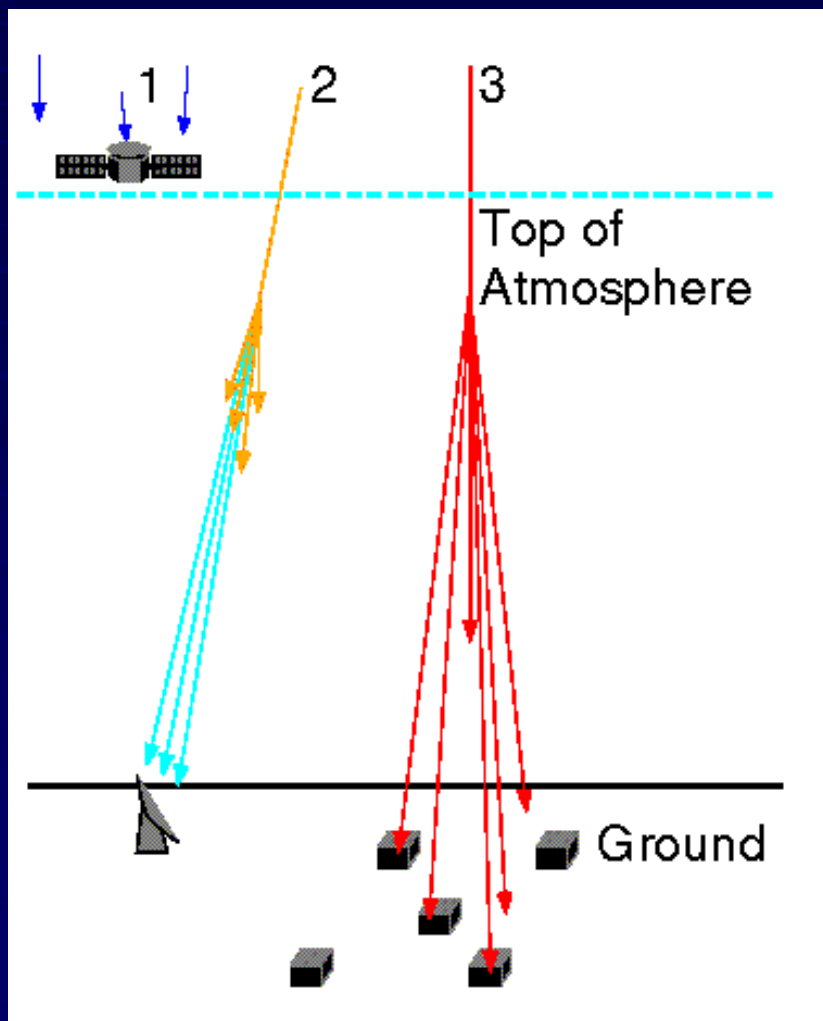
При $E > 3 \cdot 10^4$

В реальнос



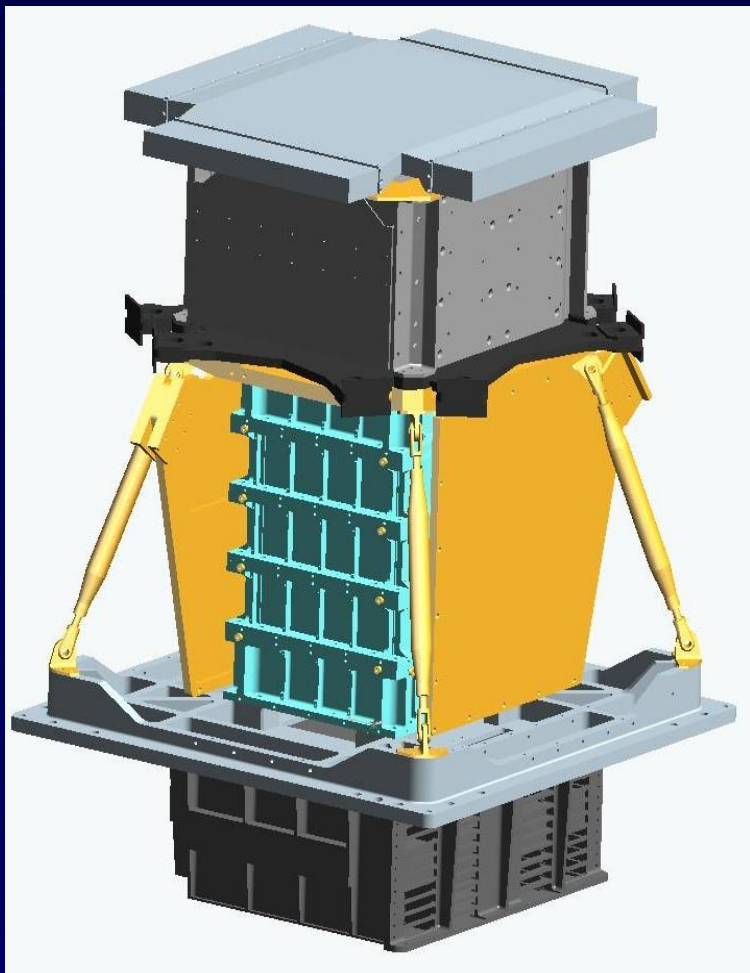
идать диск.

Регистрация космических лучей



- Можно регистрировать первичные космические лучи над атмосферой на космических аппаратах, или же в самой верхней атмосфере на баллонах
- Можно регистрировать оптическое излучение, возникающее при взаимодействии первичных частиц с атмосферой
- Наконец, можно регистрировать сами вторичные частицы наземными детекторами

Наблюдения космических лучей

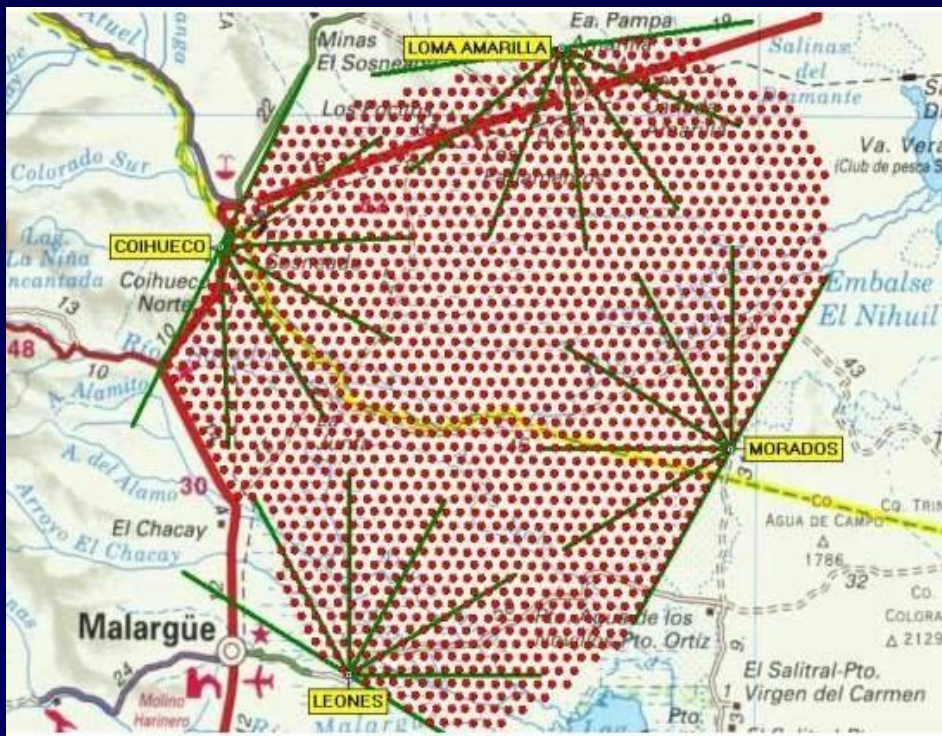


РАМЕЛА



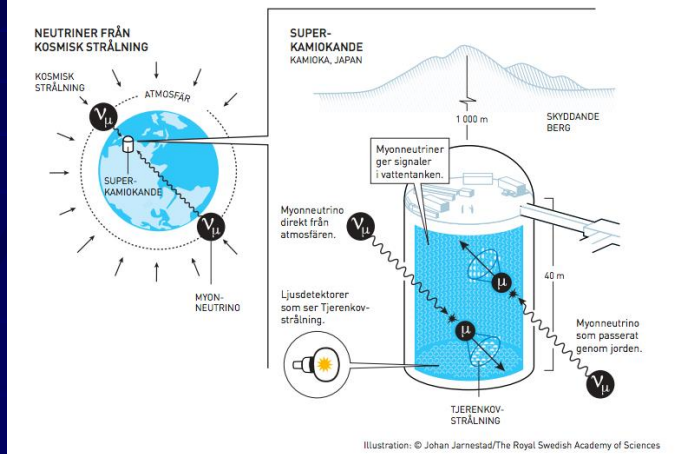
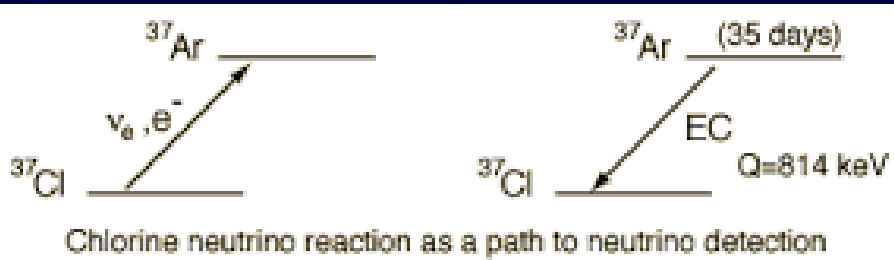
Полеты Гесса (1912 г.)

Обсерватория имени Оже



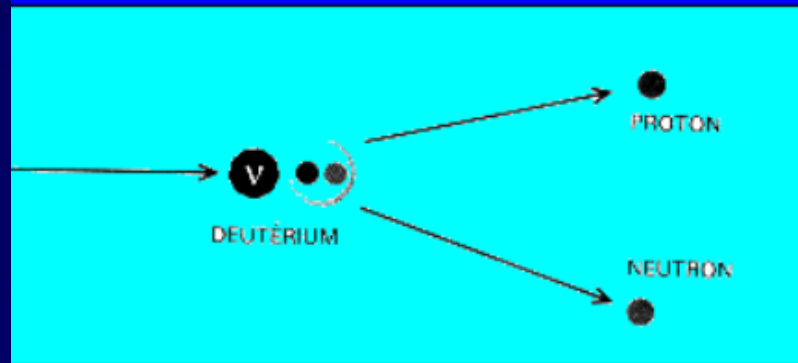
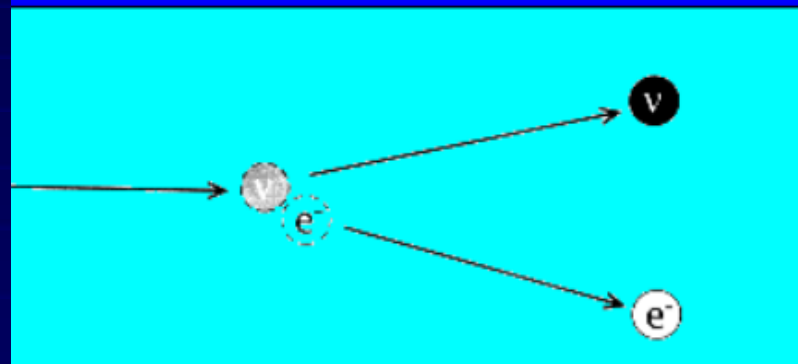
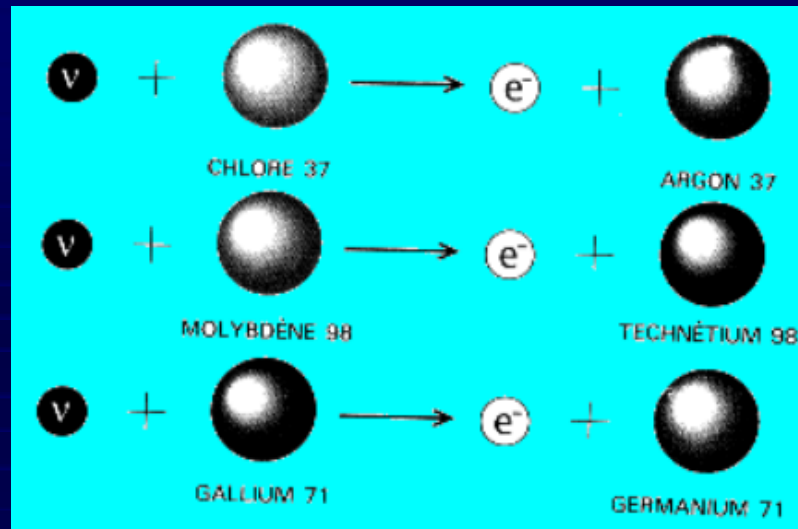
Более 1000 наземных детекторов.
Плюс 24 телескопа.

Нейтринные эксперименты

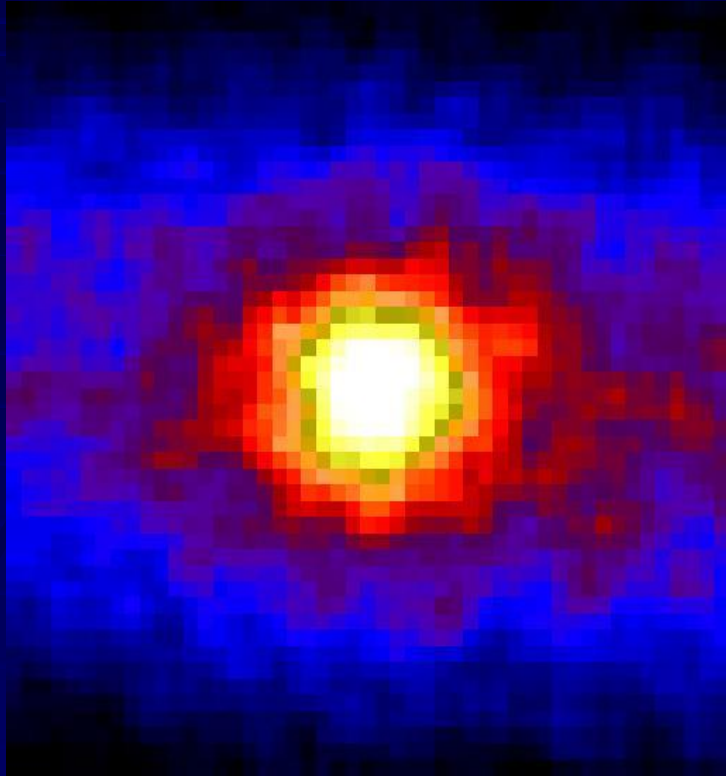


CC Charged Current Reaction	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$	$E_{threshold} = 1.4 \text{ MeV}$
NC Neutral Current Reaction	$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$	$E_{threshold} = 2.2 \text{ MeV}$
ES Elastic Scattering Reaction	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	$E_{threshold} \approx 0$

x denotes that this reaction will take place with any neutrino.



Нейтринная астрофизика



Нейтрино от Солнца

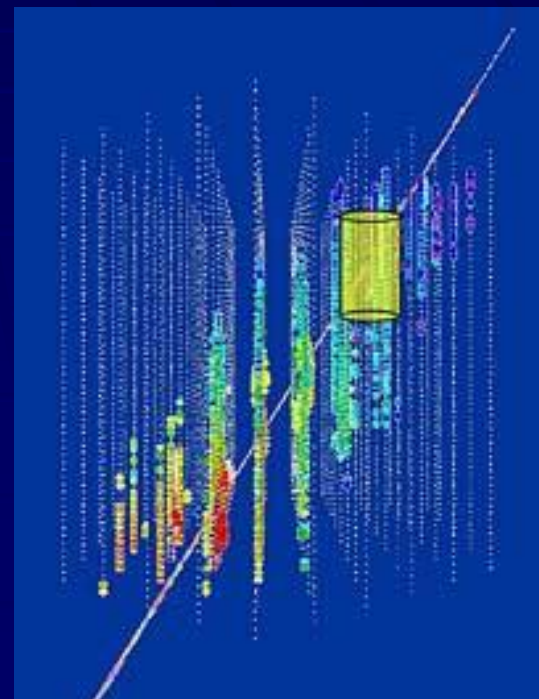
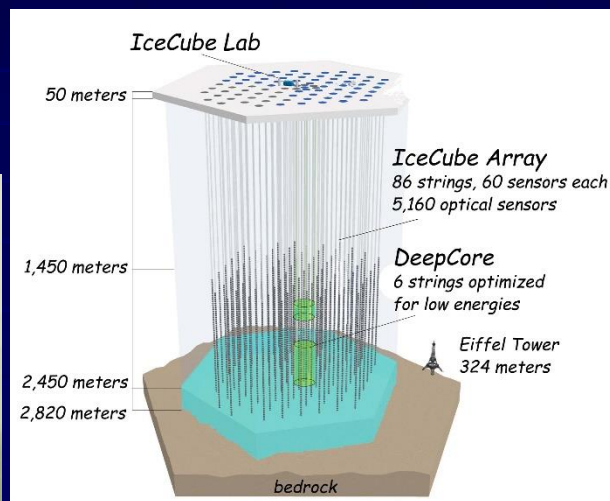
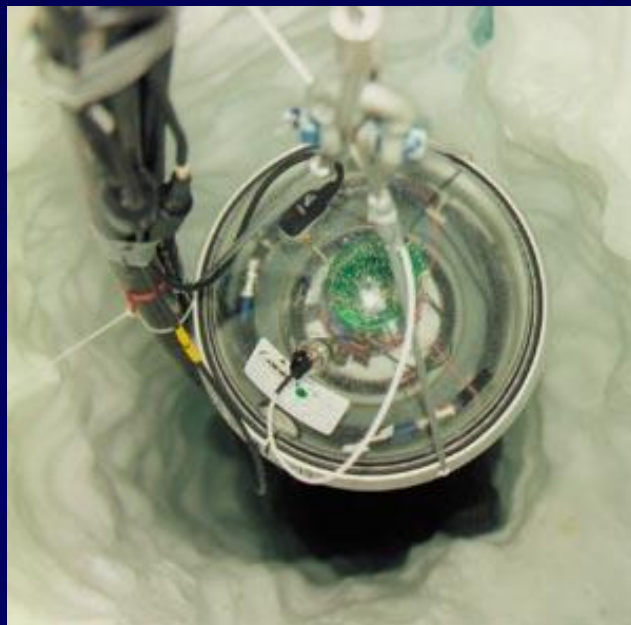


Нейтрино от взрывов сверхновых

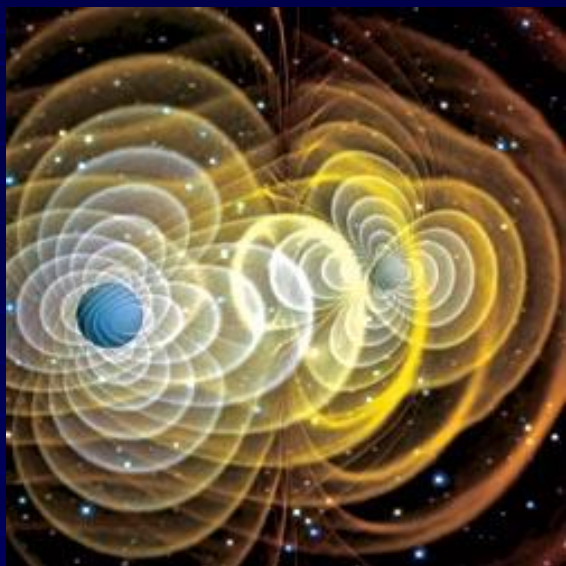
Наблюдения нейтрино



Эксперименты AMANDA
и IceCube в Антарктиде



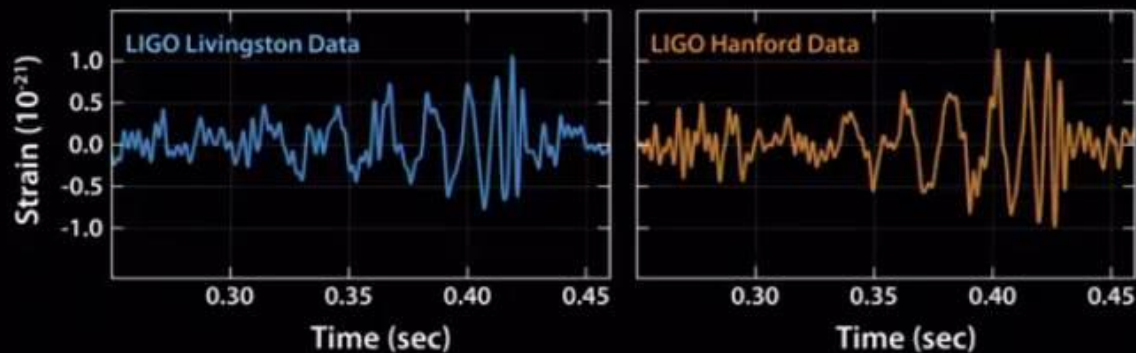
Гравитационные волны



Предсказаны Общей теорией относительности.

Возникают при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.

А также при вращении нейтронных звезд и при эволюции тесных двойных звезд.



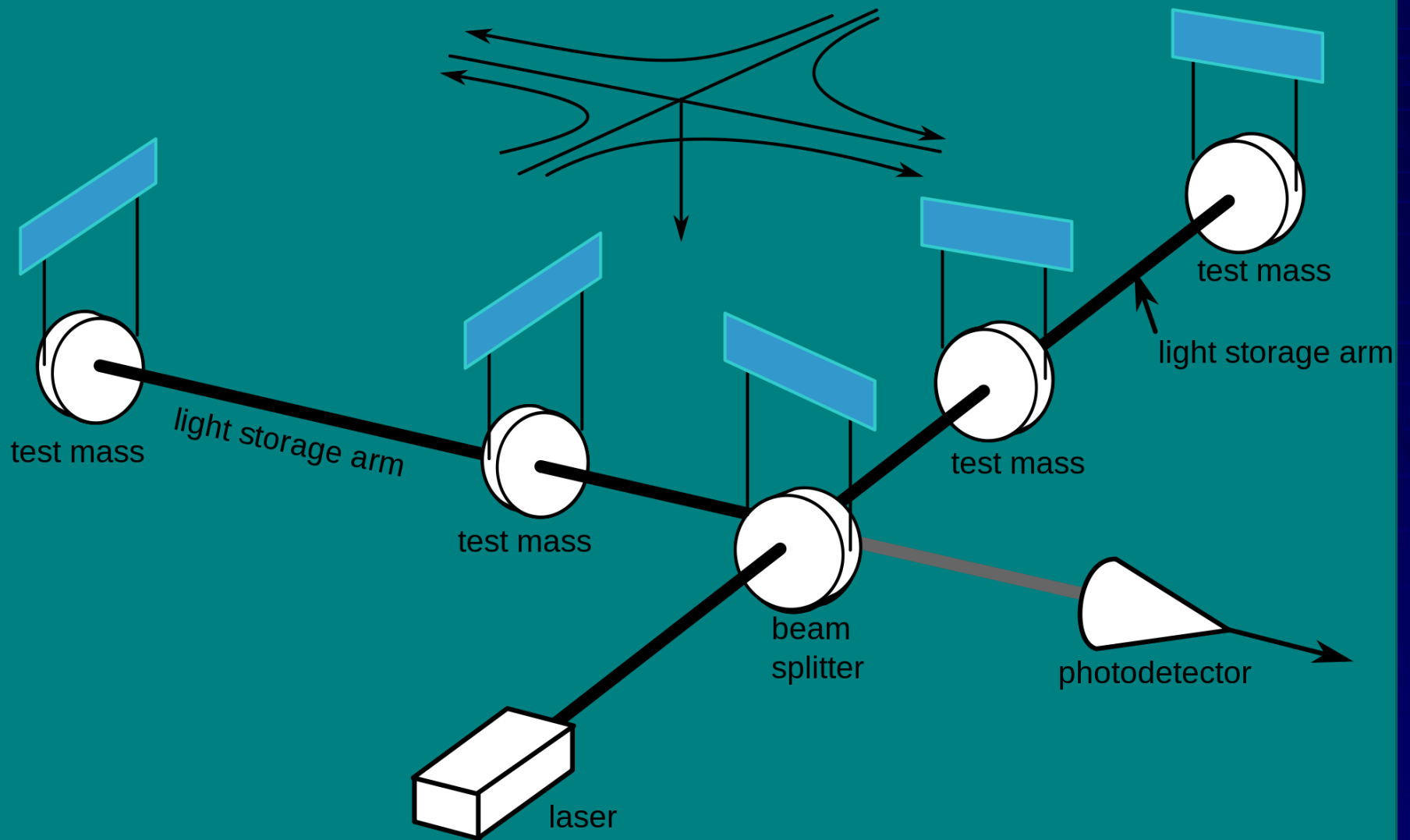
Детекторы гравитационных волн



Первый детектор
Вебера



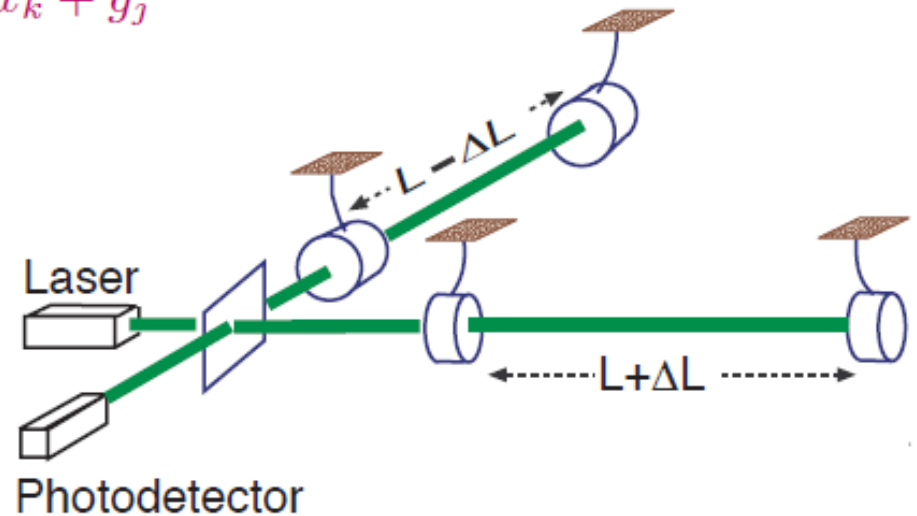
Эксперимент VIRGO



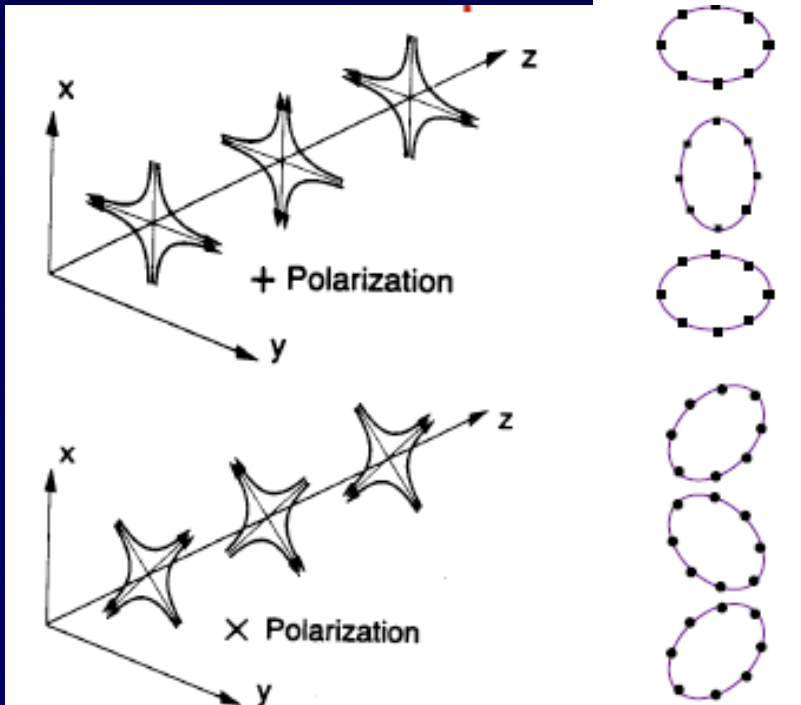
Изменение длины плеч

Прохождение гравитационной волны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра. Это можно измерить.

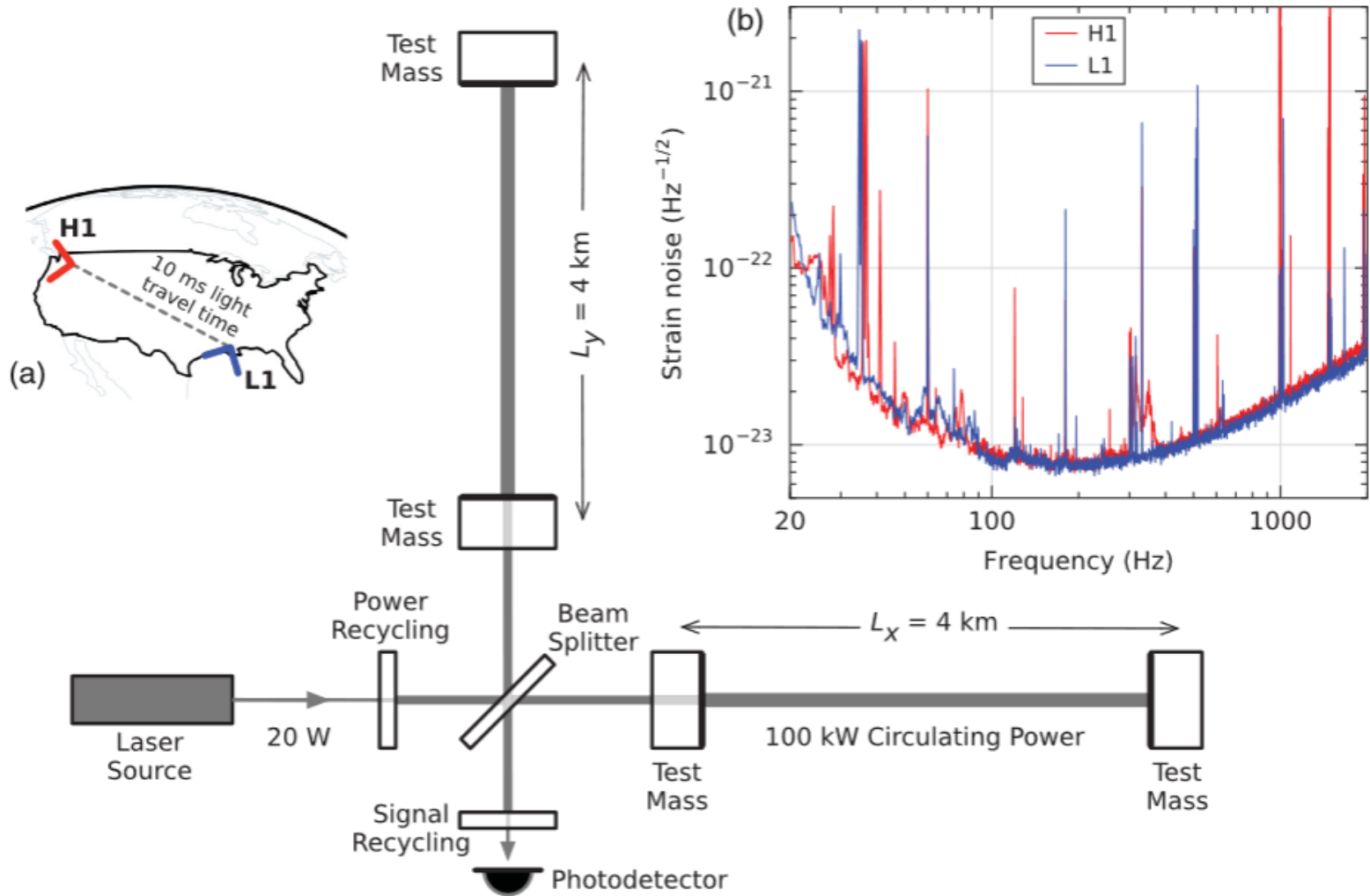
$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{\text{GW}} x_k + g_j$$



Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны. Измерение происходит довольно сложным способом.



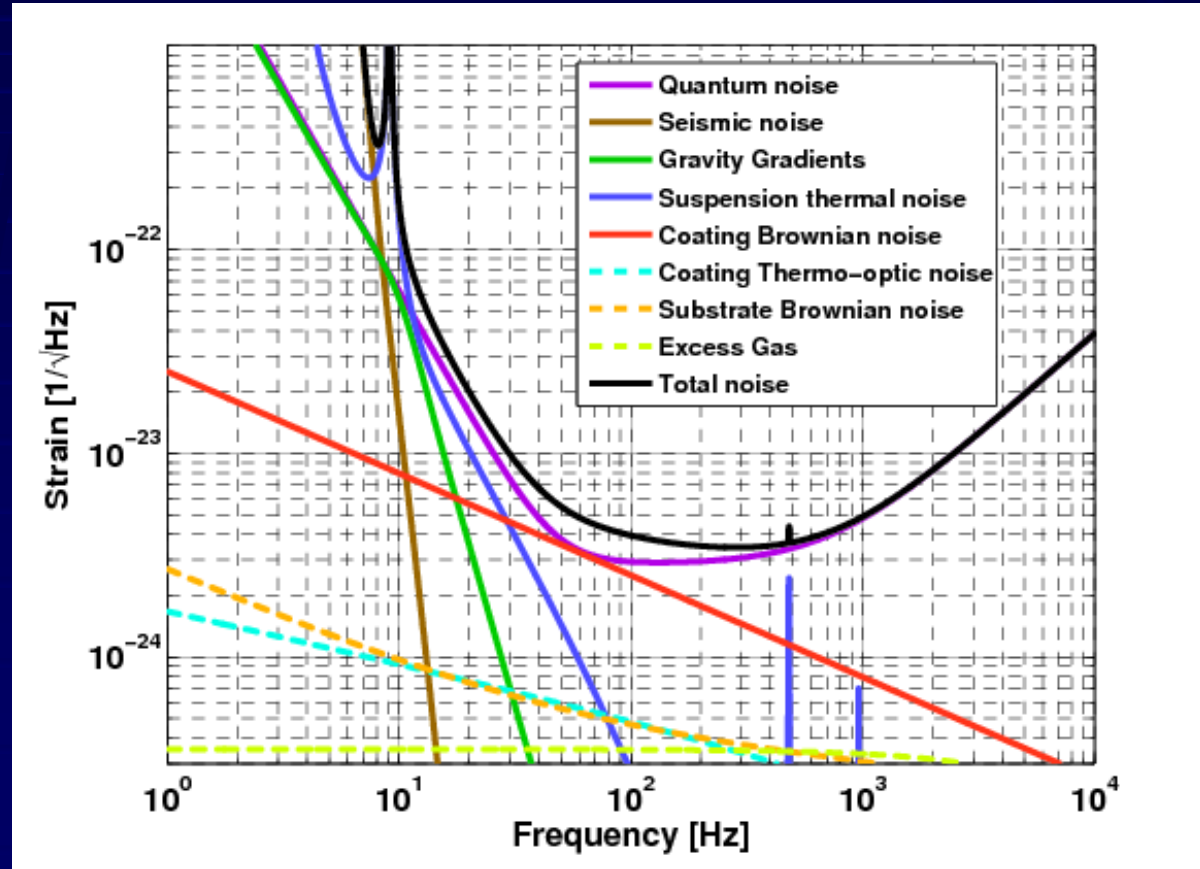
Детекторы и их чувствительность



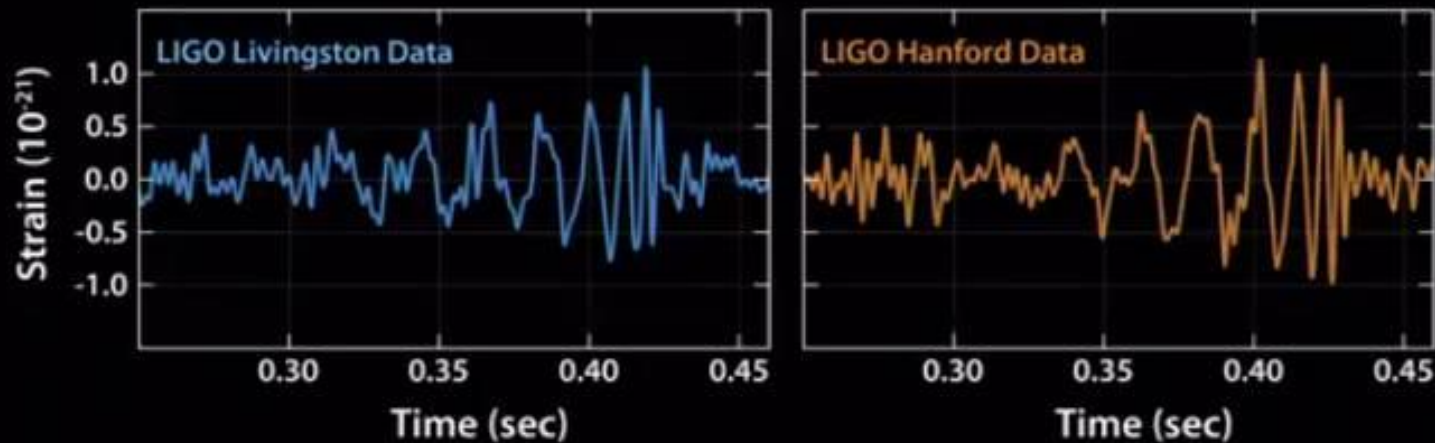
Разнообразные шумы

Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.



GW150914 13-50 по Московскому времени



<http://www.ligo.org>

Официальное объявление 11 февраля 2016 года.
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов
надежно обнаружено одно событие – слияние двух черных дыр в >400 Мпк от нас.

Итак

Астрономия – наблюдательная наука.

Наблюдения идут во всех диапазонах спектра.

Для многих видов наблюдений детекторы необходимо выводить в космос.

Наблюдают не только электромагнитные волны, но и различные виды частиц.

Открыты гравитационные волны.

Астрономические наблюдения из космоса

Сергей Попов



Наблюдать из космоса дорого



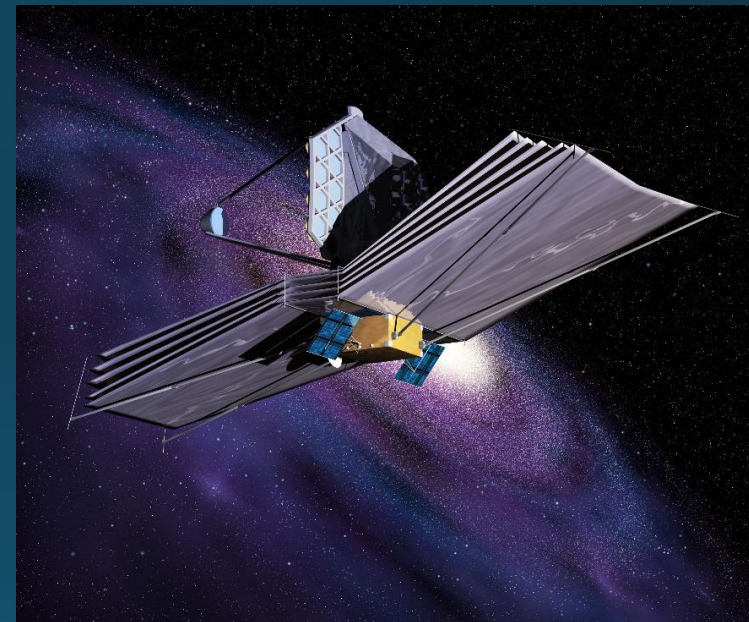
**Космический телескоп
имени Хаббла (США)**

*Стоимость: около \$6 млрд.
\$10 млрд с учетом эксплуатации.*



**Рентгеновский спутник
«Чандра» (США)**

Стоимость: около \$2,8 млрд.



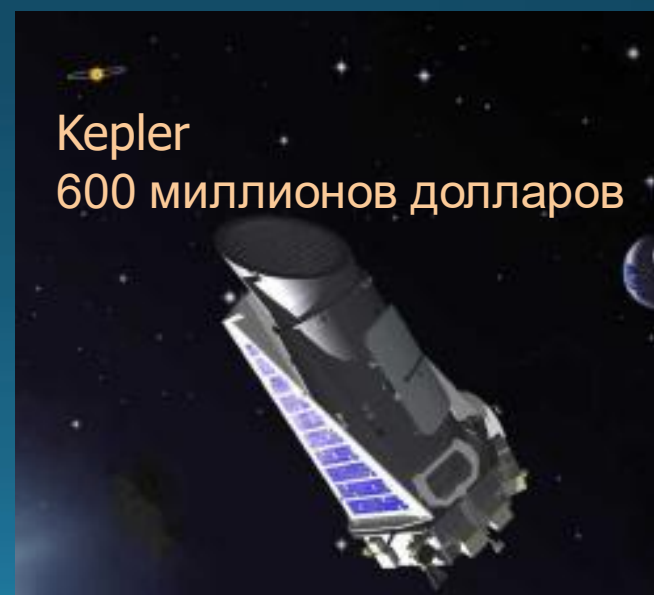
**Космический телескоп
имени Джеймса Вебба (США)**

*Стоимость создания: > \$5 млрд.
Стоимость десятилетней
эксплуатации: > \$1 млрд.*

Сравним.....



1	<i>Pirates of the Caribbean: On Stranger Tides</i>	2011	\$378.5
2	<i>Pirates of the Caribbean: At World's End</i>	2007	\$300
3	<i>Avengers: Age of Ultron</i>	2015	\$279.9
4	<i>John Carter</i>	2012	\$263.7
5	<i>Tangled</i>	2010	\$260
6	<i>Spider-Man 3</i>	2007	\$258
7	<i>Harry Potter and the Half-Blood Prince</i>	2009	\$250
	<i>The Hobbit: The Battle of the Five Armies</i>	2014	\$250
9	<i>Spectre</i>	2015	\$245
10	<i>Avatar</i>	2009	\$237
11	<i>The Dark Knight Rises</i>	2012	\$230
12	<i>The Chronicles of Narnia: Prince Caspian</i>	2008	\$225
	<i>The Lone Ranger</i>	2013	\$225
	<i>Pirates of the Caribbean: Dead Man's Chest</i>	2006	\$225
	<i>Man of Steel</i>	2013	\$225
	<i>The Hobbit: The Desolation of Smaug</i>	2013	\$225
17	<i>The Avengers</i>	2012	\$220
18	<i>Men in Black 3</i>	2012	\$215
	<i>Oz the Great and Powerful</i>	2013	\$215



Наблюдения из космоса



Наблюдения в диапазонах спектра, в которых земная атмосфера непрозрачна



Высокое качество изображения: картинка «не дрожит» и звезды «не мерцают»



Возможно создание установок очень большого размера

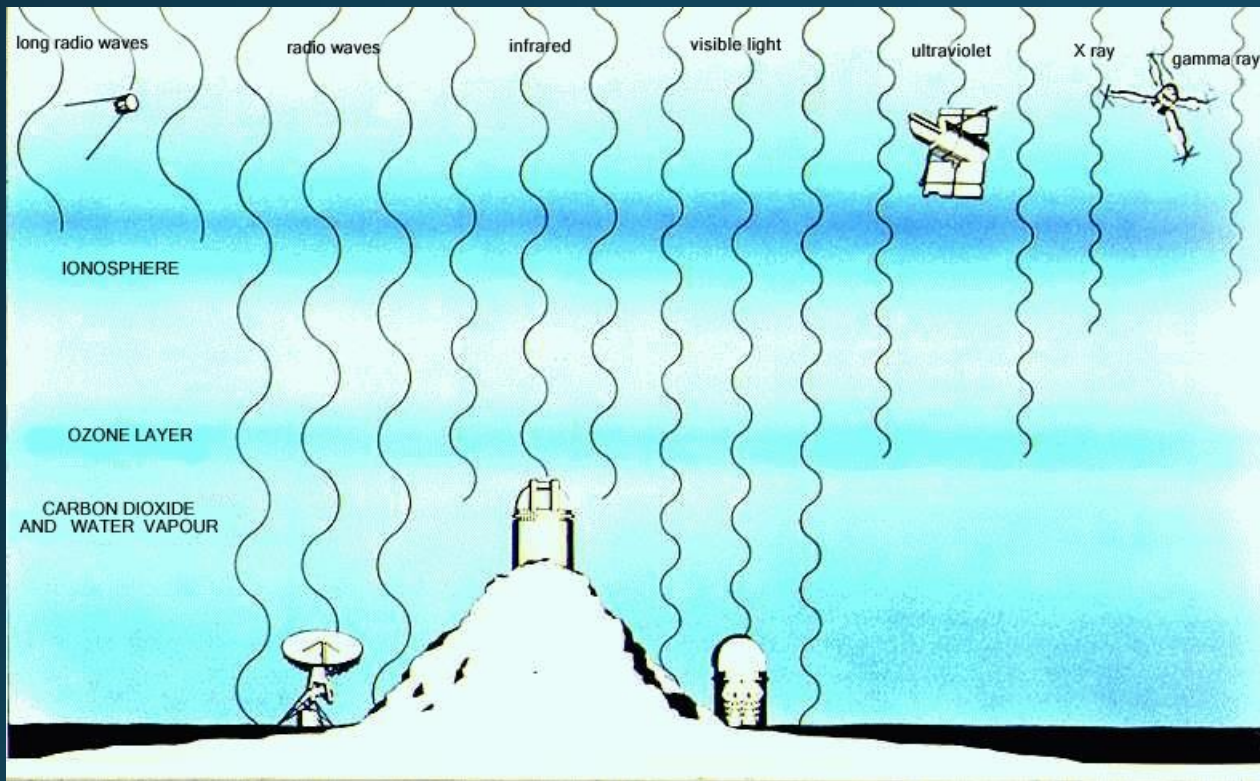


Всегда хорошая погода



Доступно все небо

Наблюдения из космоса

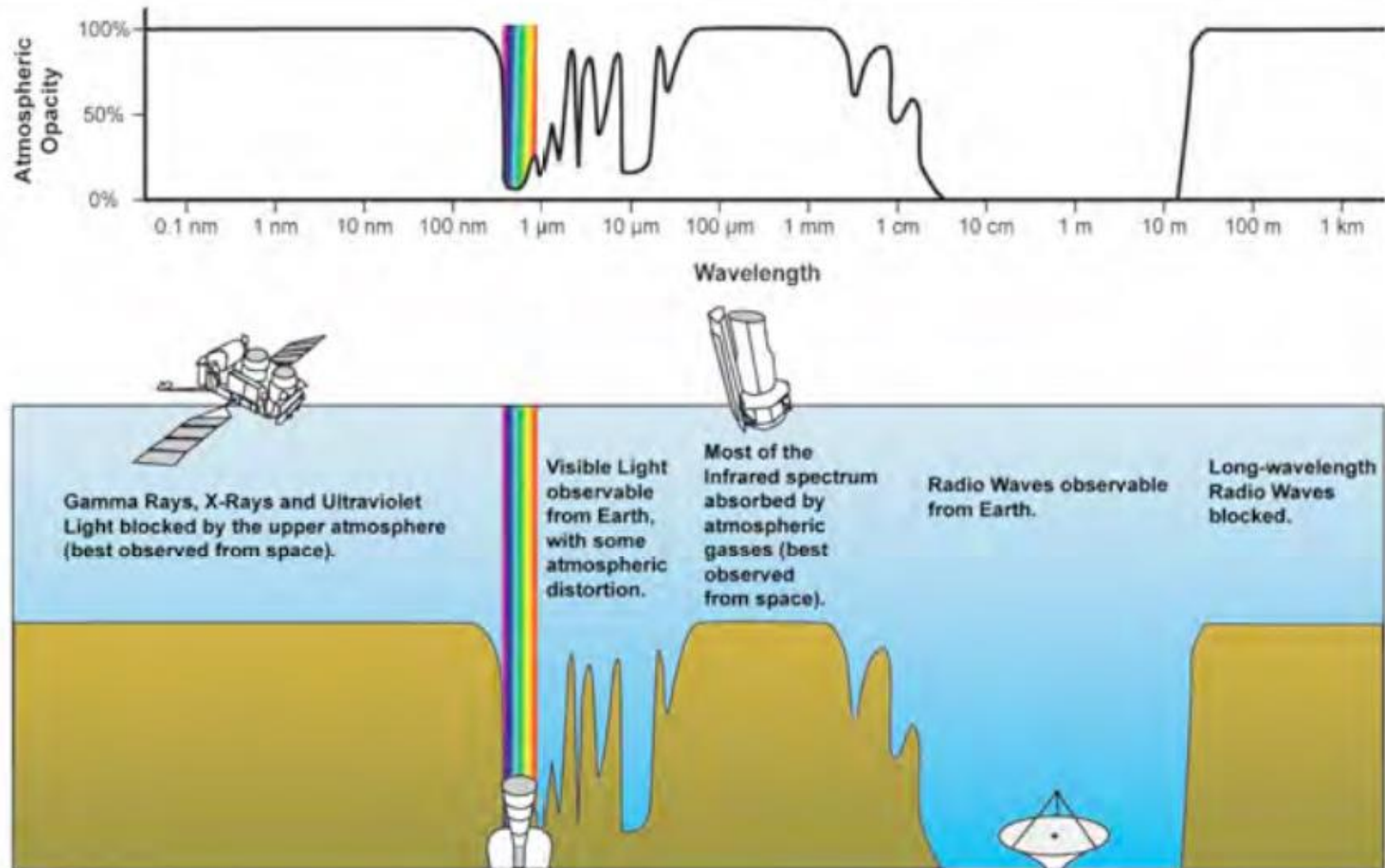


Поглощение

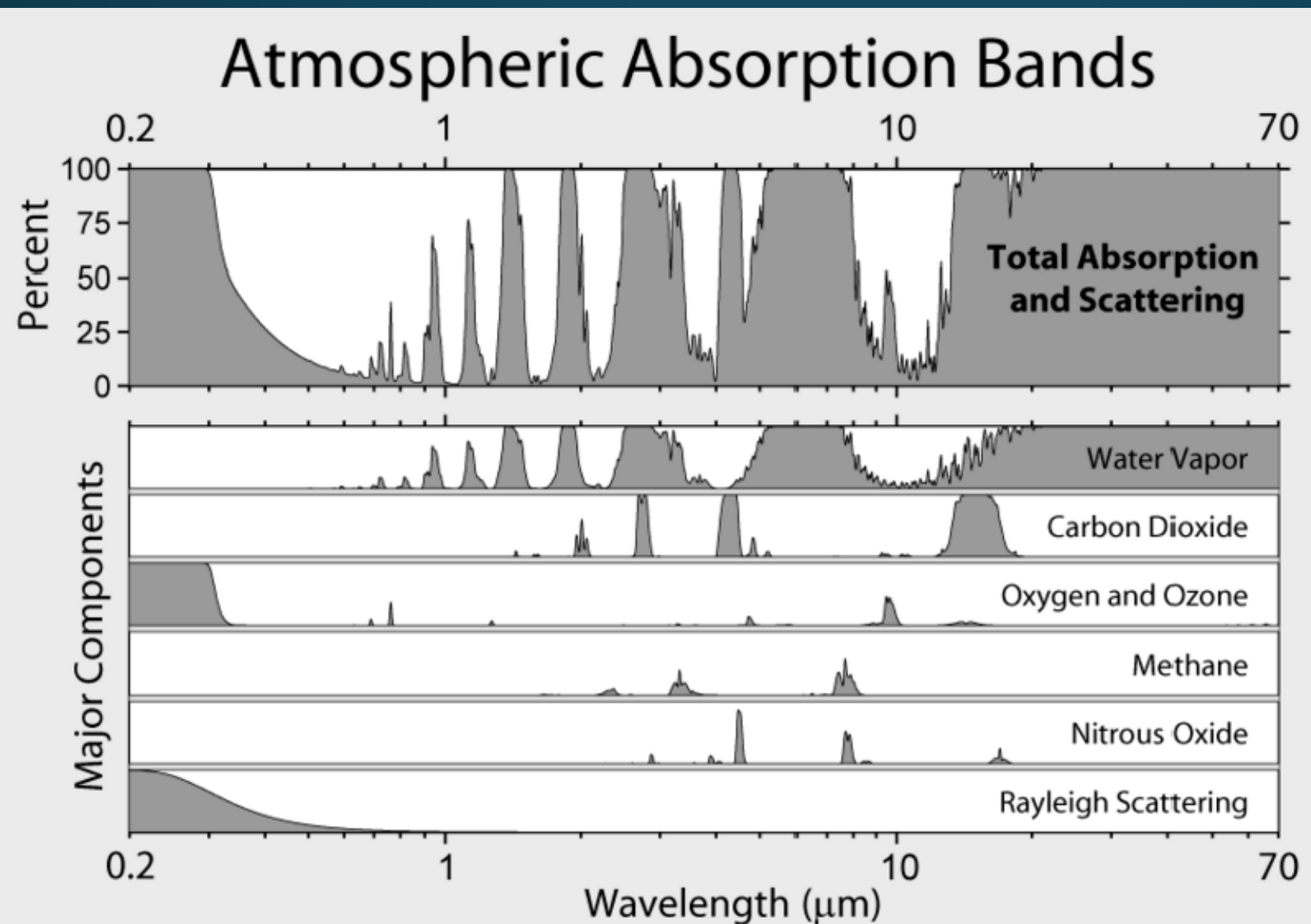


Мерцание

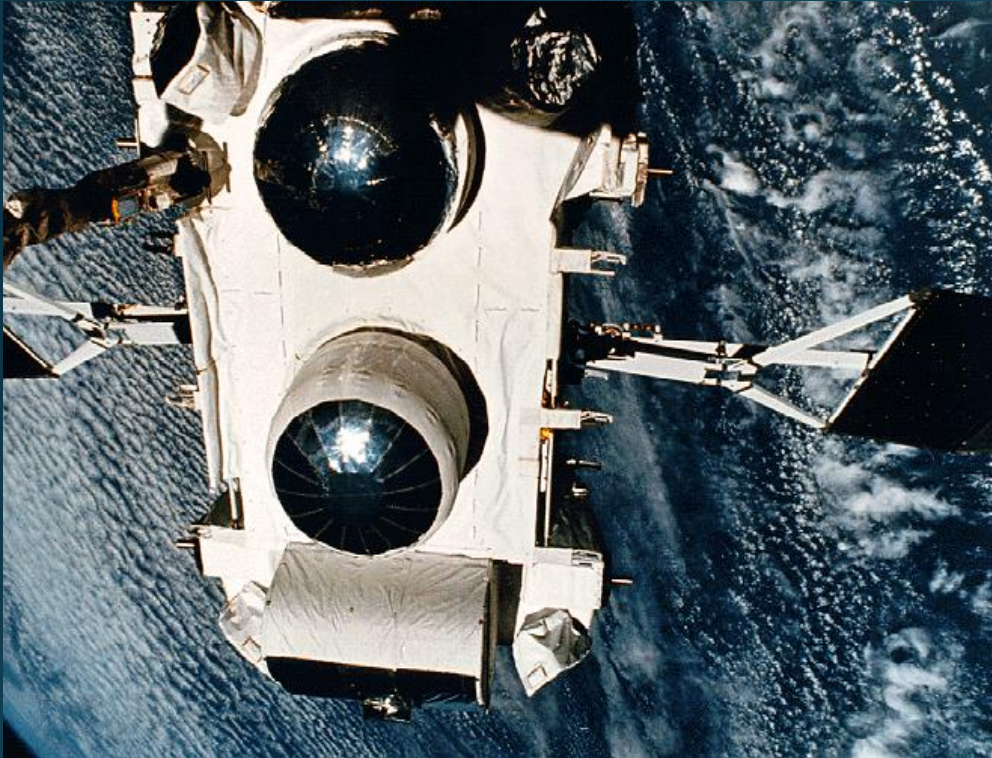
Поглощение в атмосфере



Поглощение в УФ и ИК



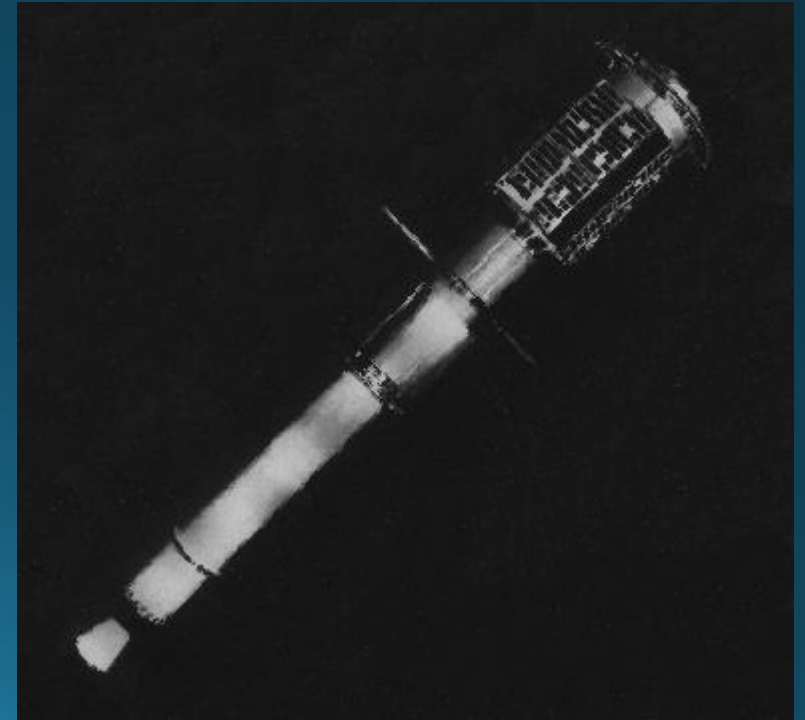
Гамма-астрономия в космосе



Комптовская гамма обсерватория

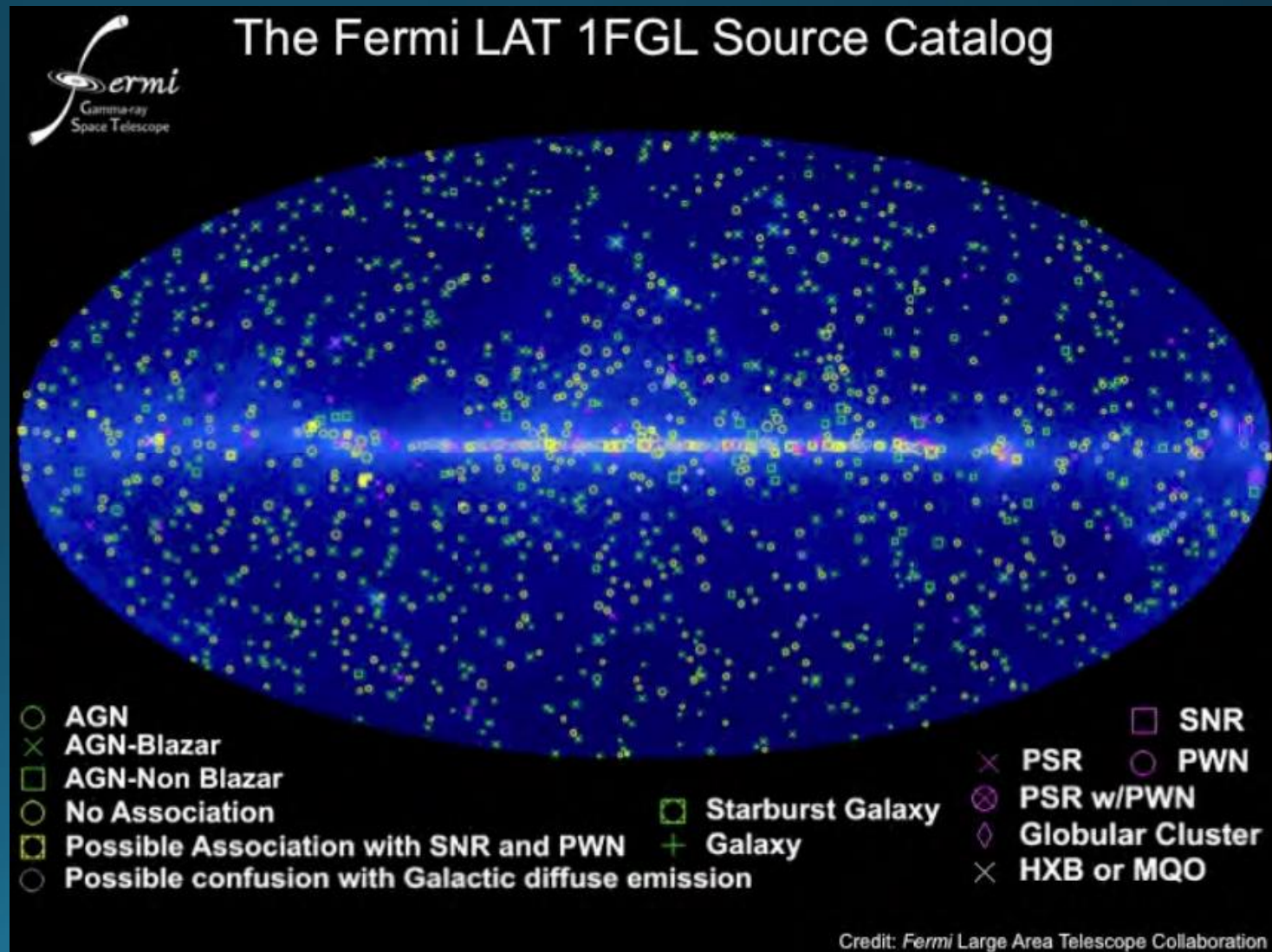
Самое жесткое излучение.

Многие неистовые процессы
приводят именно к излучению
гамма-квантов.



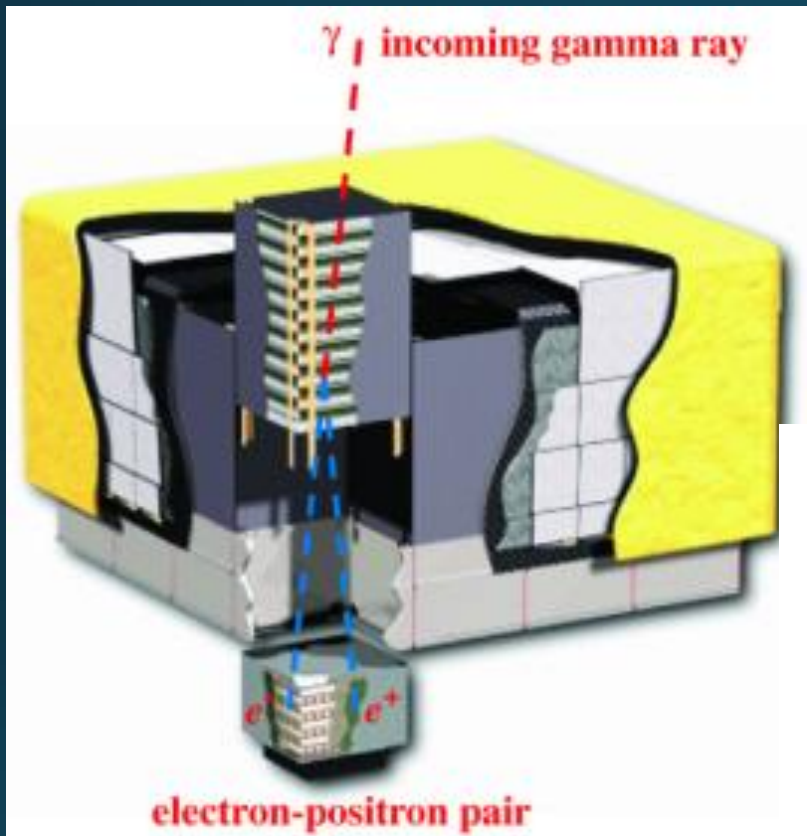
Explorer 11

Fermi – современная гамма-обсерватория

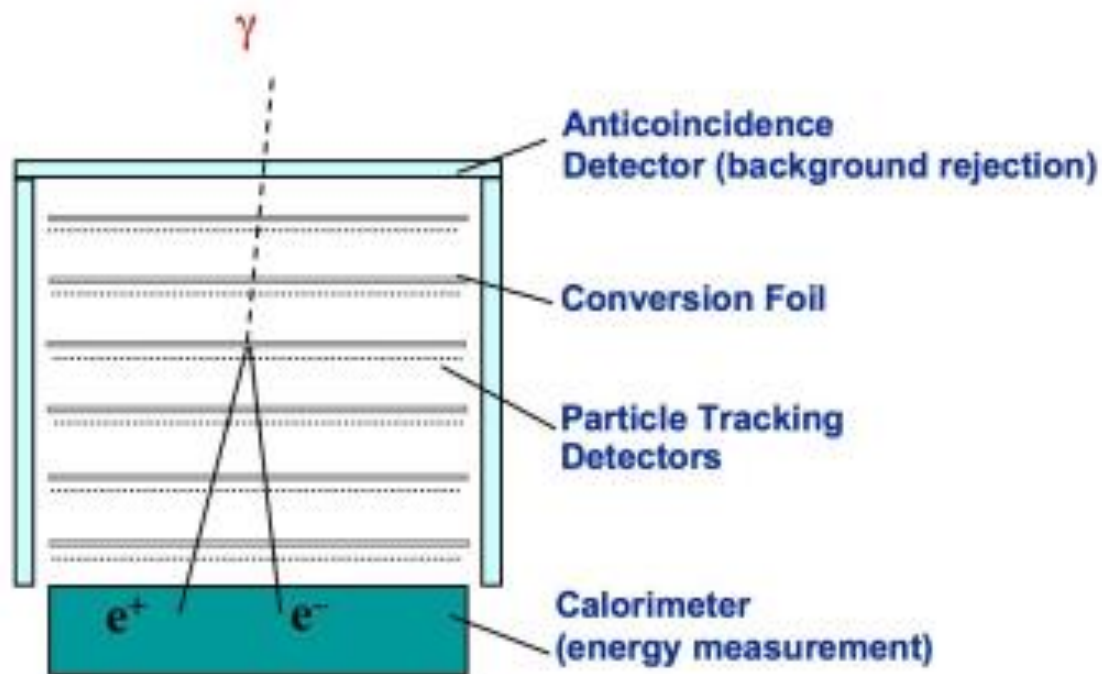


Устройство детектора Ферми LAT

www-glast.stanford.edu



Large Area Telescope
Нет фокусировки.
Регистрируются частицы.
Причем – вторичные!

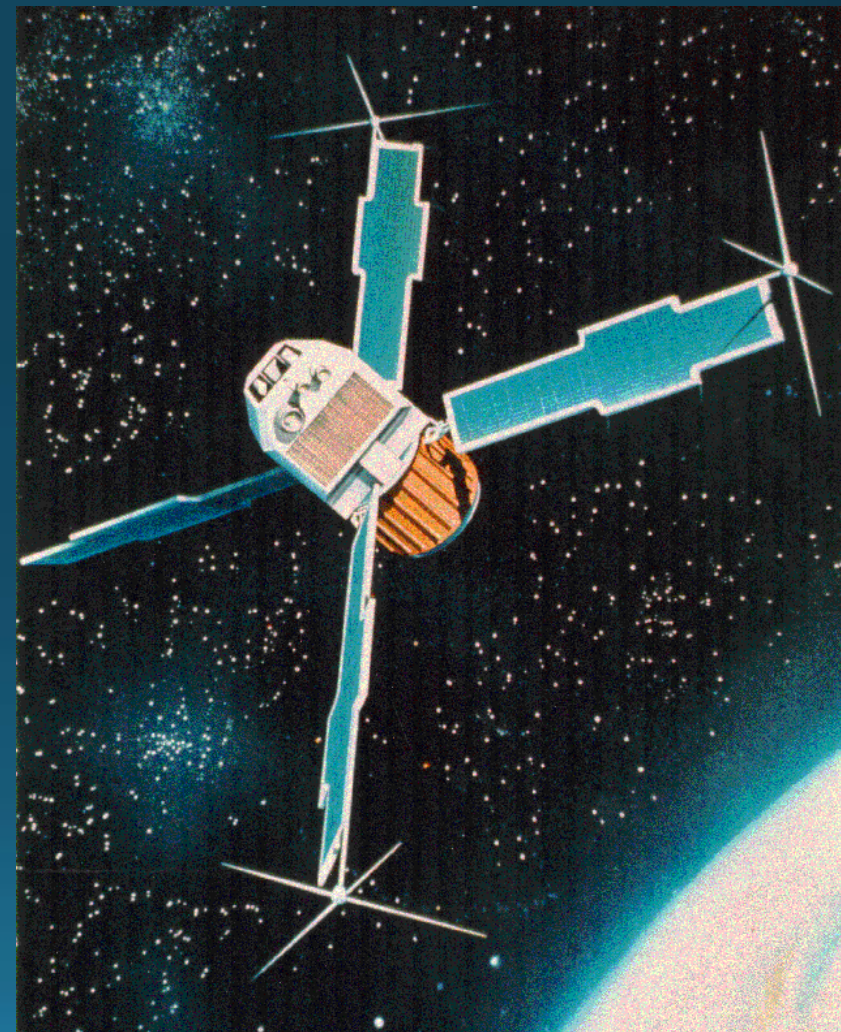
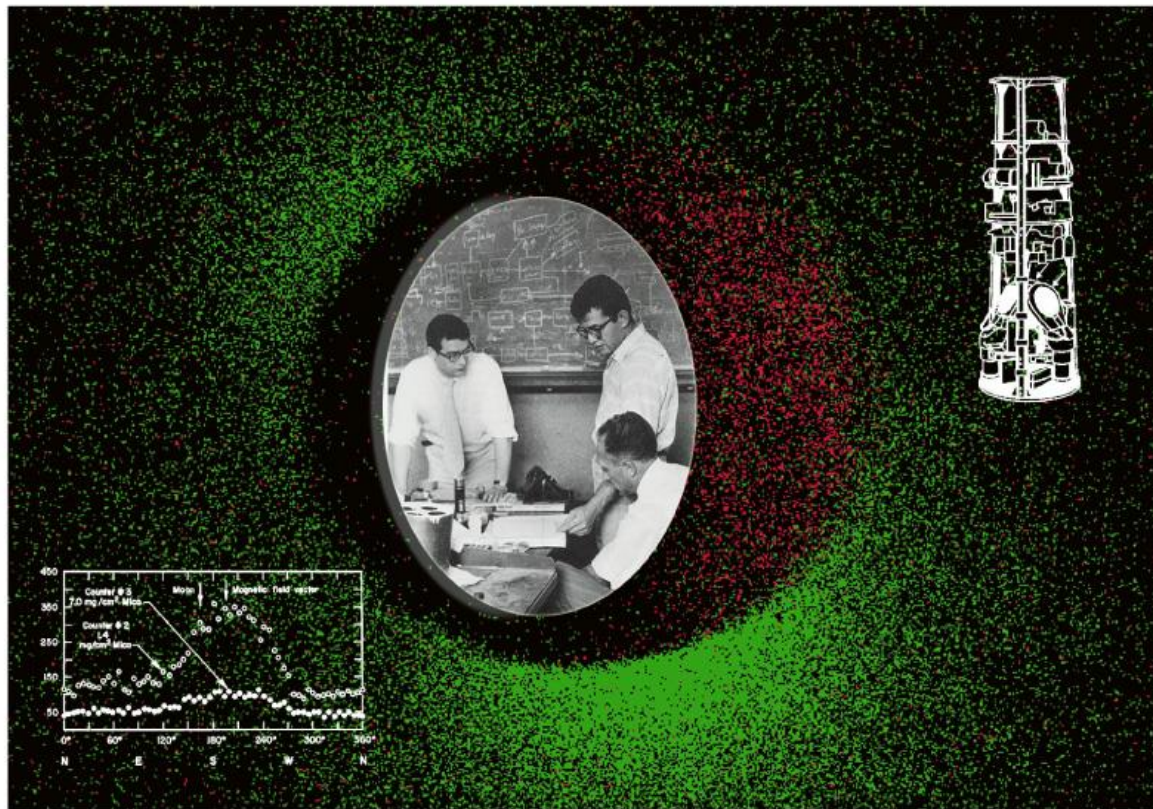


Для настройки прибора его надо калибровать.
В случае Ферми это проводилось в ЦЕРНе.

Рентгеновская астрономия

ROSAT Januar 2003

Max-Planck-Institut für
extraterrestrische Physik



Первые ракетные запуски детекторов
начались после войны на трофейных ФАУ.

UHURU (1970)

Рентген vs. Оптика

THE ROSAT X-RAY SKY AROUND ORION



Konrad Dörmert
Wolfgang Voges
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

THE OPTICAL SKY AROUND ORION



Konrad Dörmert
Wolfgang Voges
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

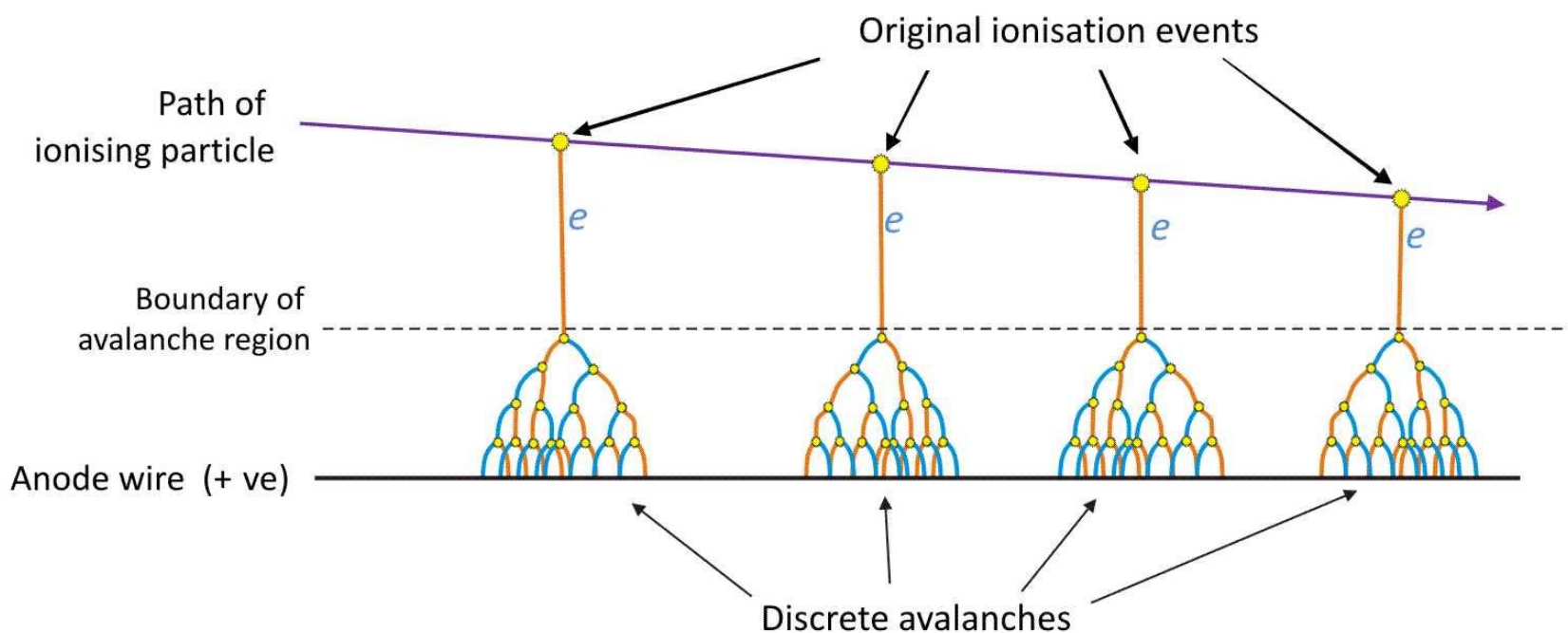
Созвездие Орион и Луна

RXTE

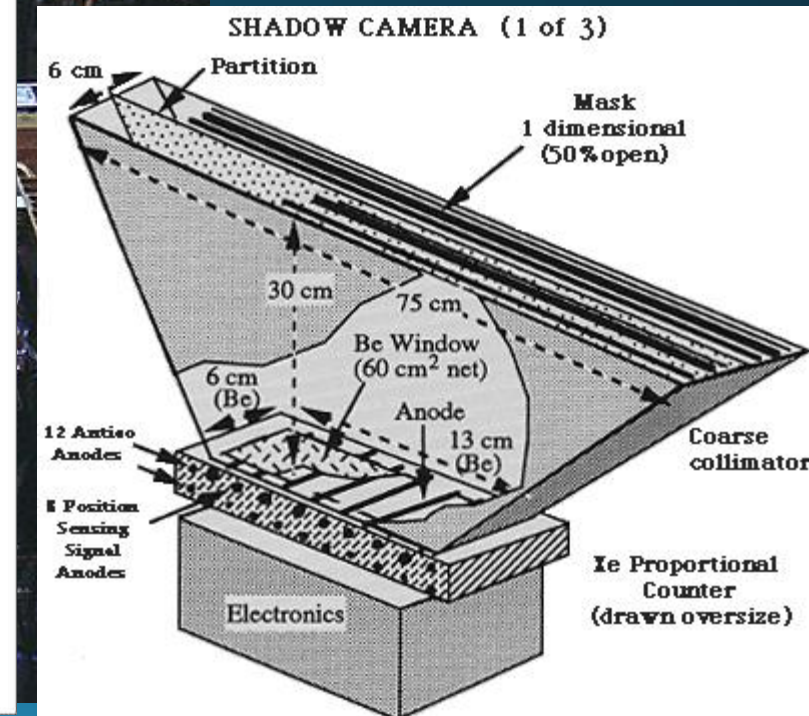
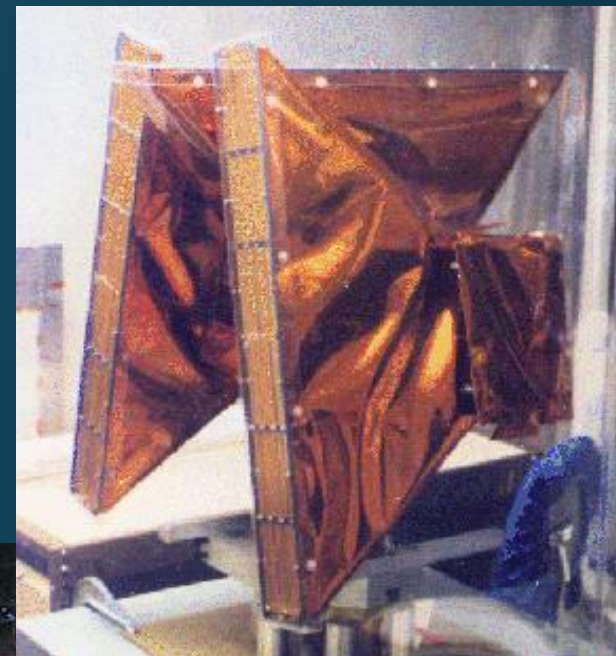


Пропорциональные счетчики

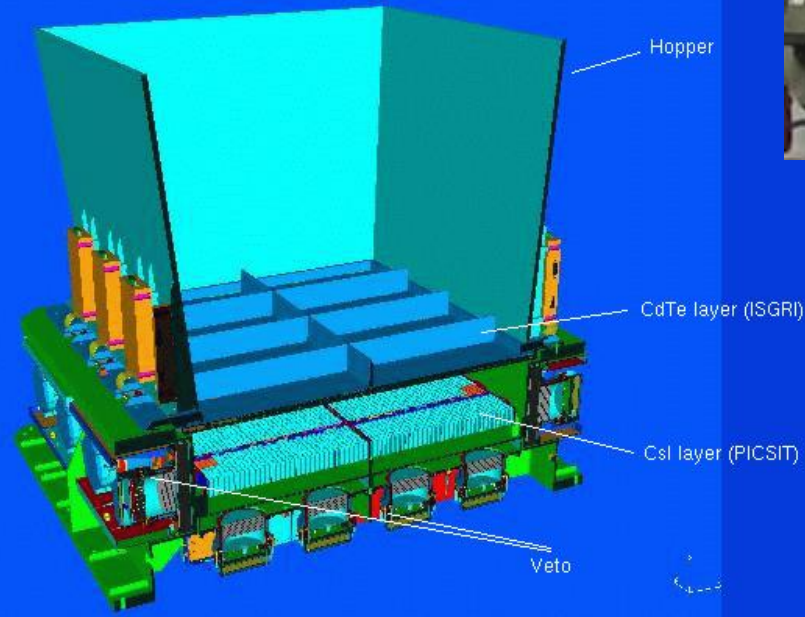
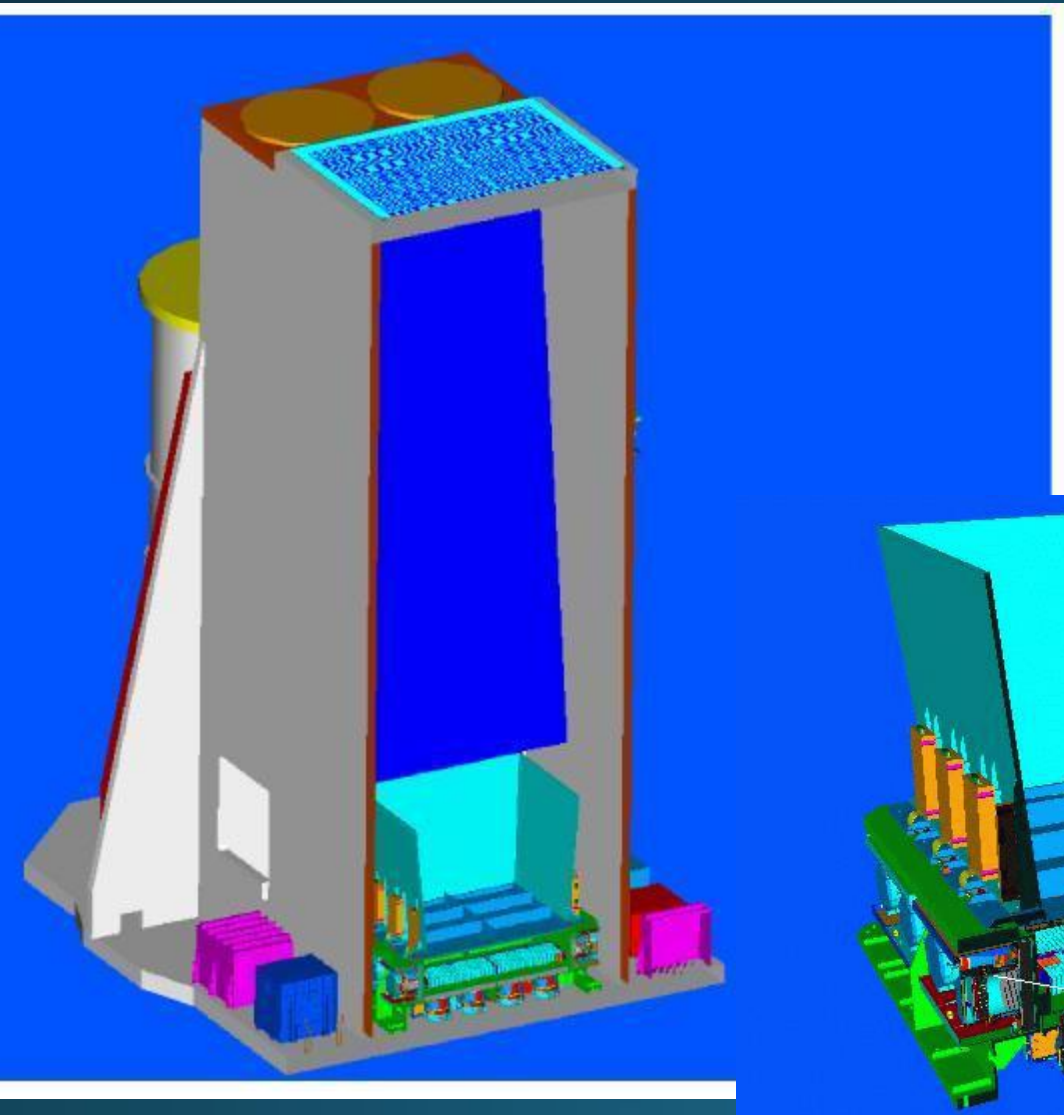
Creation of discrete avalanches in a proportional counter



ASM



Кодирующие маски. Integral

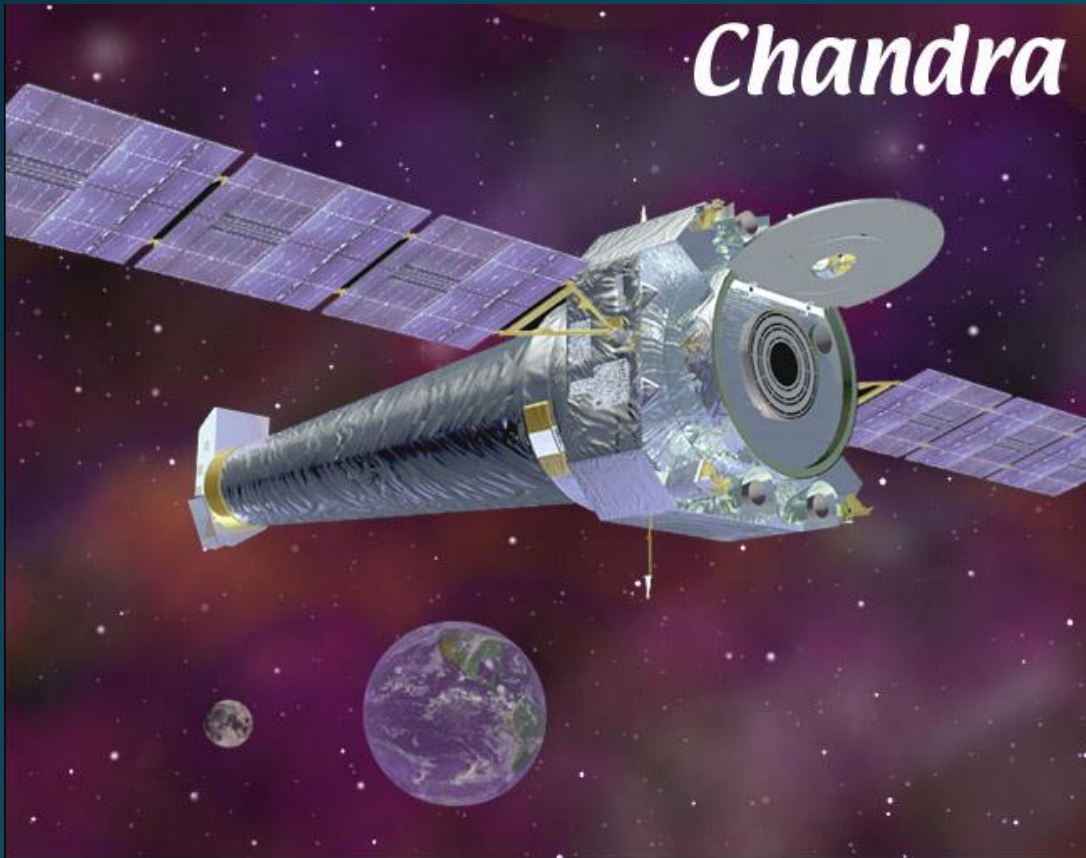


<http://ipl.uv.es/?q=es/content/page/ibis-coded-mask>

http://integral.esa.int/integ_payload_imager.html

Современная рентгеновская астрономия

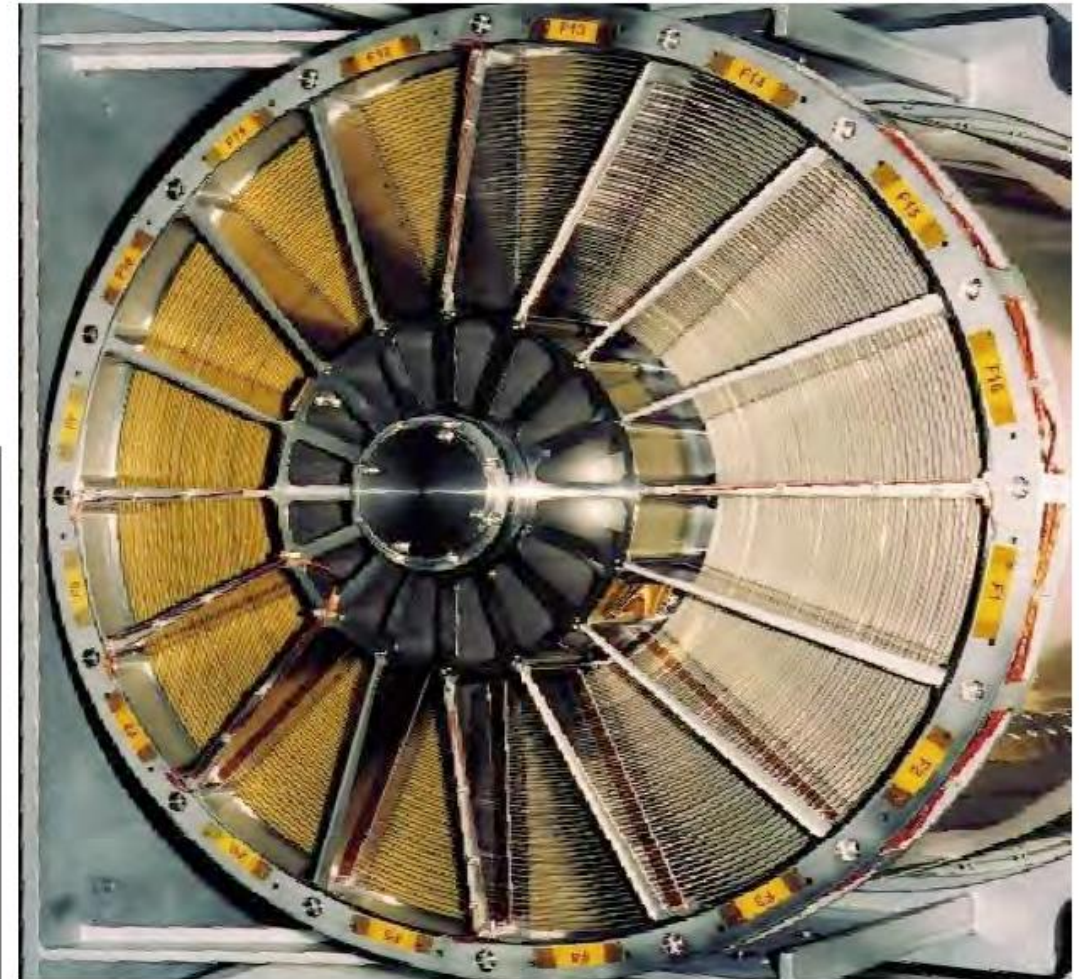
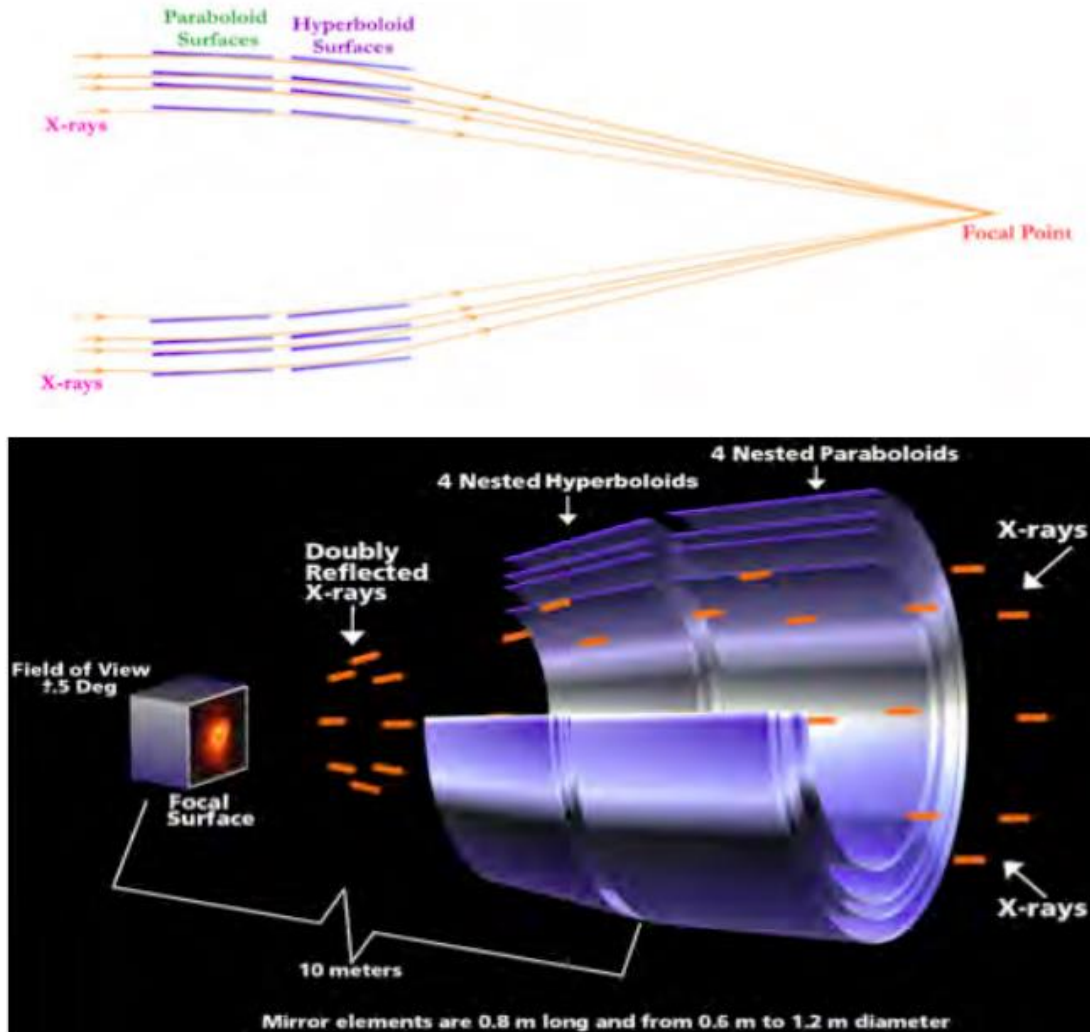
Фокусирующая оптика



XMM-Newton

Chandra

Зеркала косого падения для рентгеновских телескопов

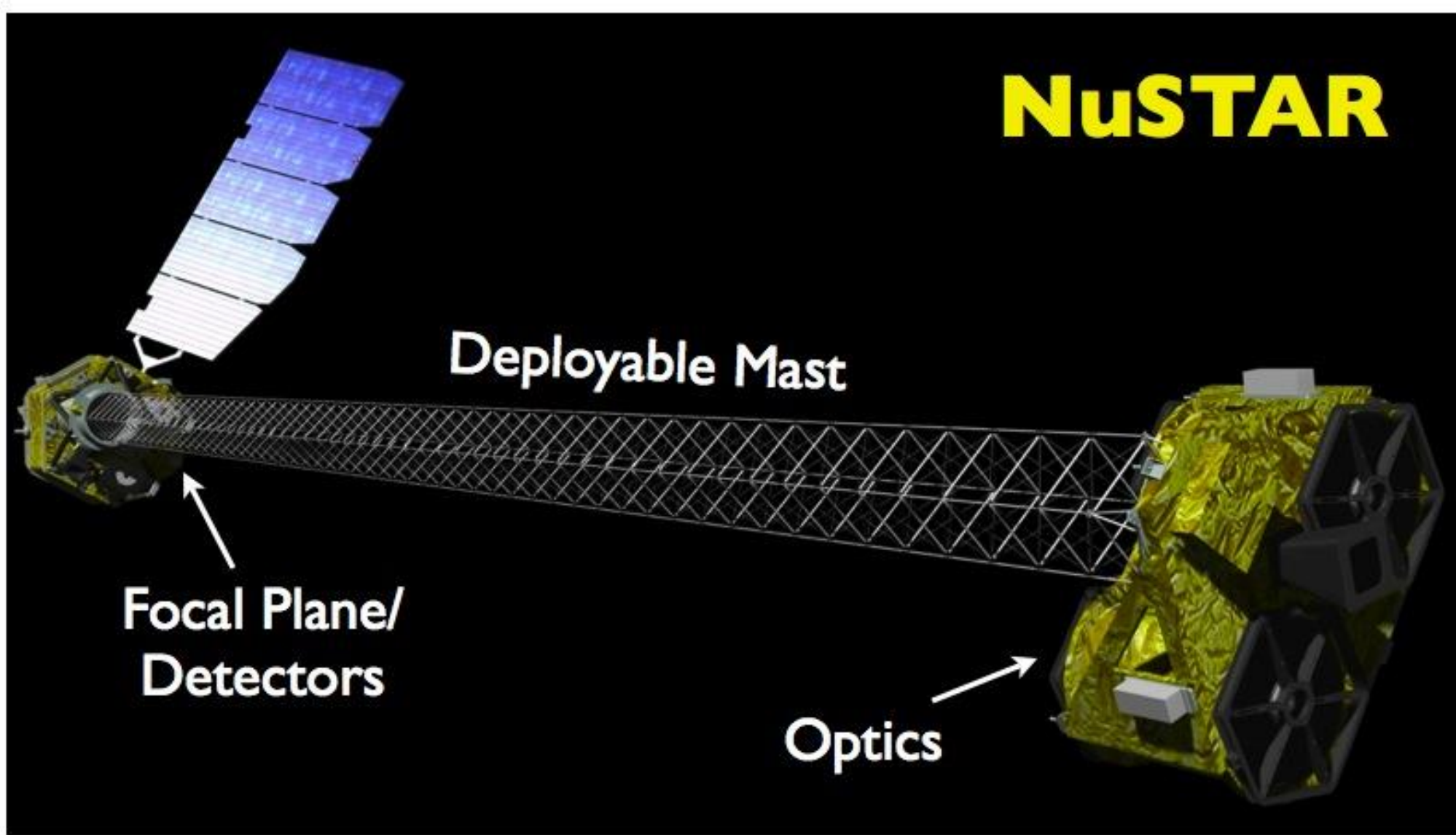


XMM-Newton mirrors during integration

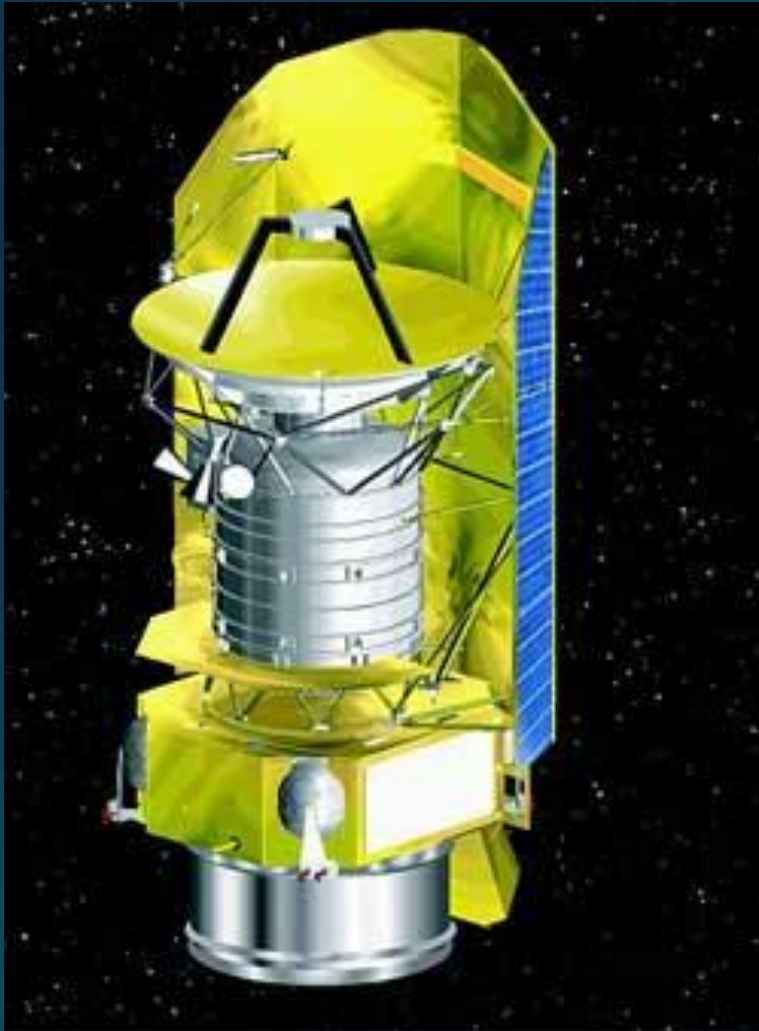
Image courtesy of Doornier Satellitensysteme GmbH

European Space Agency 

NuSTAR



Инфракрасная астрономия

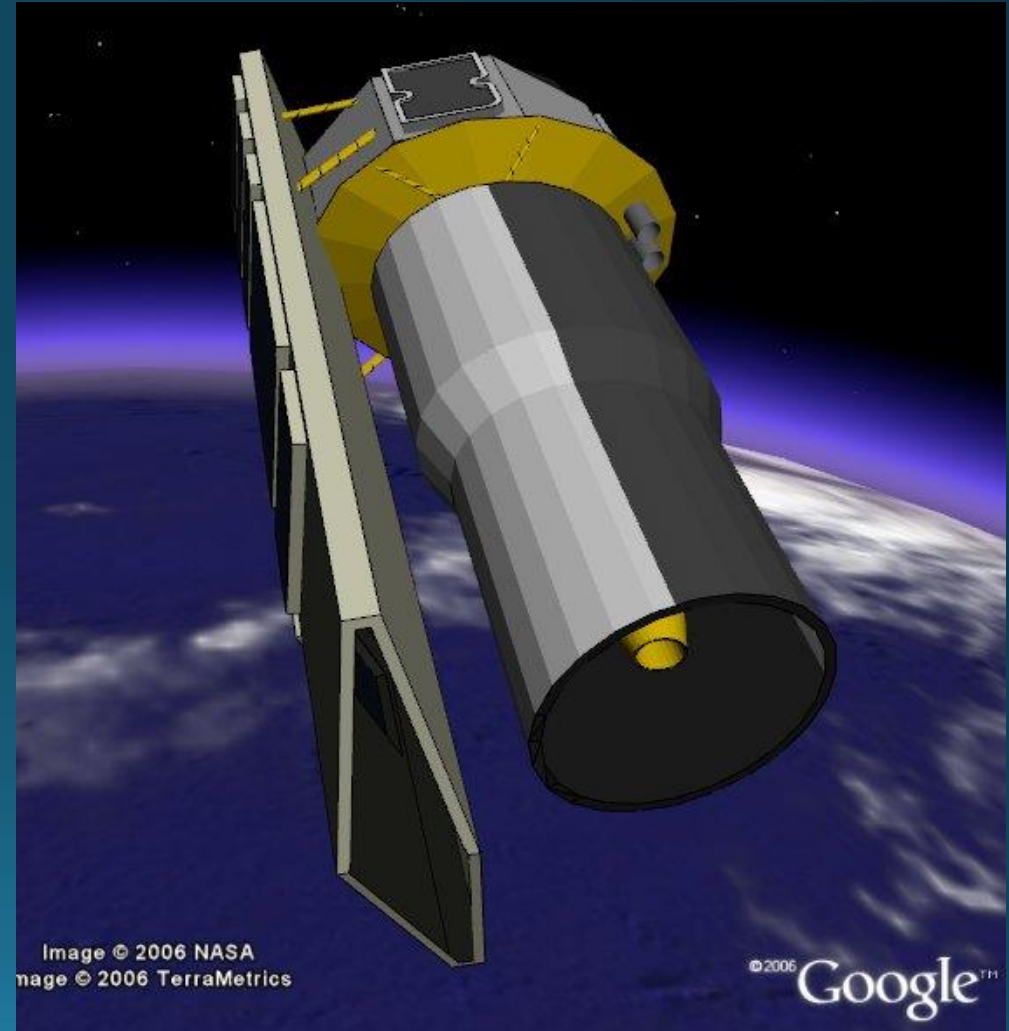


Гершель

Многие астрофизические процессы лучше наблюдать в ИК диапазоне.

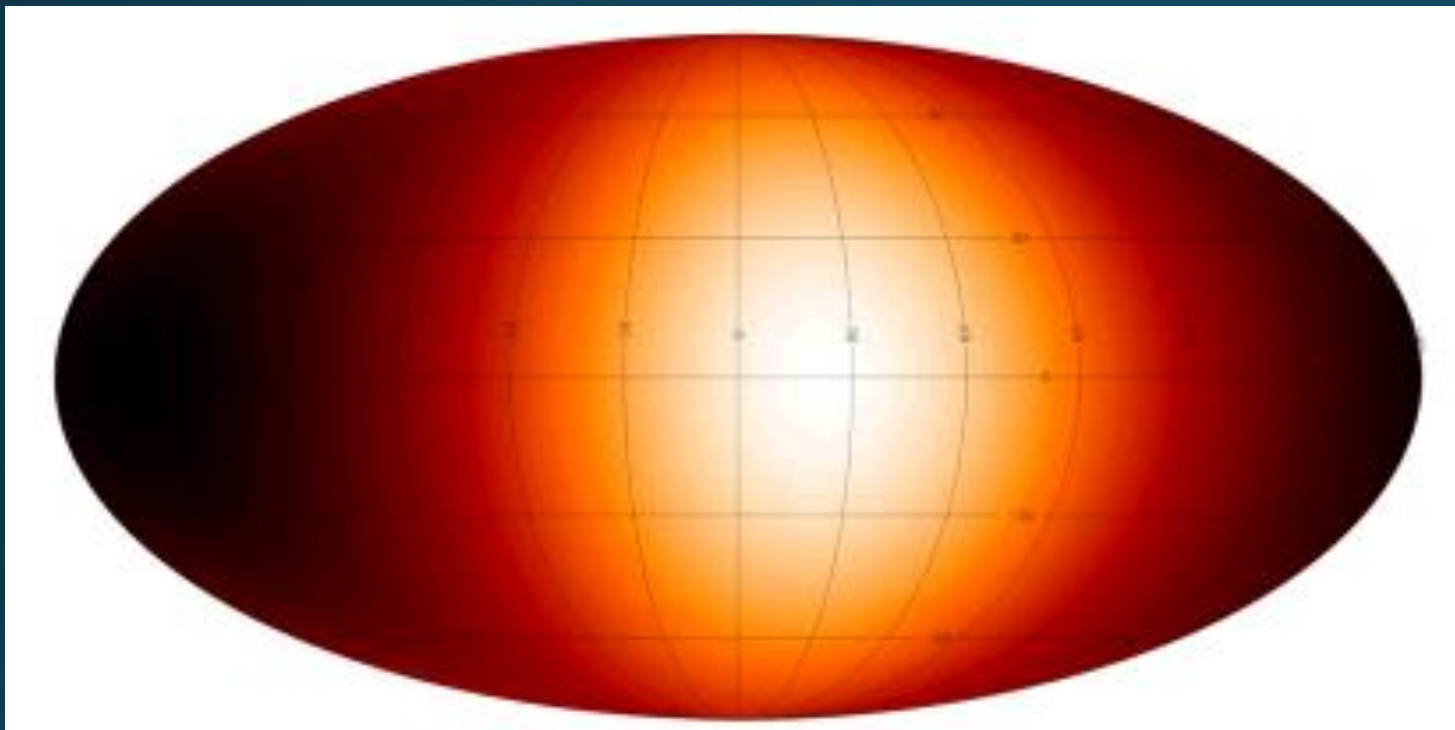
В первую очередь – рождение звезд и планет.

Необходимо охлаждение аппаратуры, что приводит к короткому сроку работы.

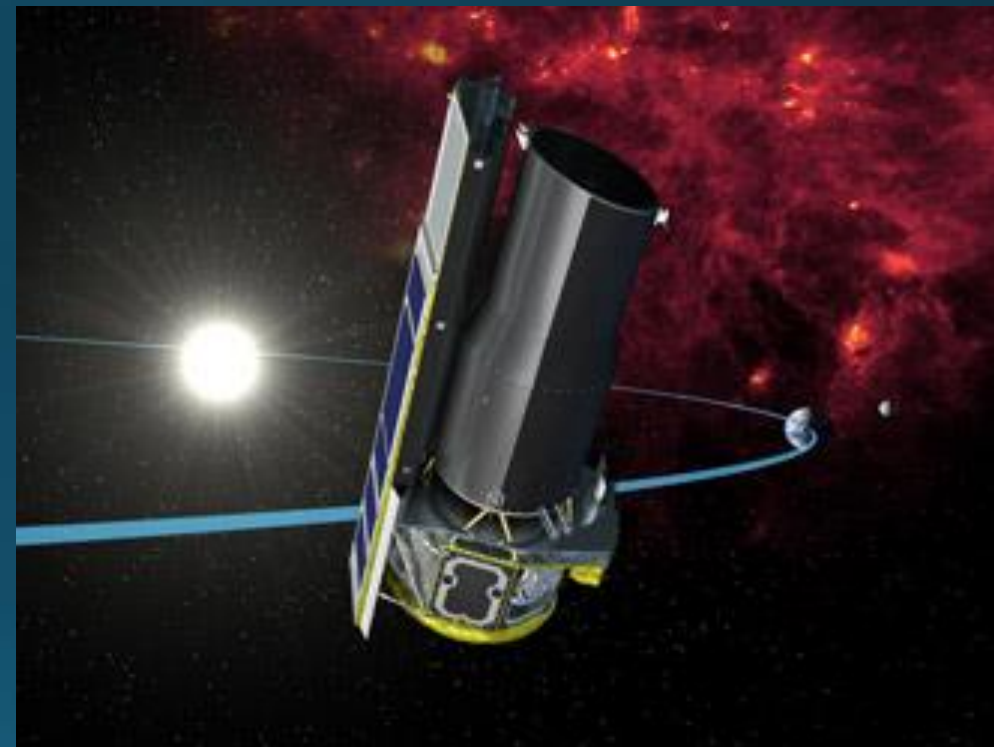


Спитцер

Карта экзопланеты HD 189733b



По данным о затмениях удалось построить карту экзопланеты.
Горячее пятно в экваториальной области.



Инфракрасная космическая
обсерватория имени Спитцера.

Космический телескоп



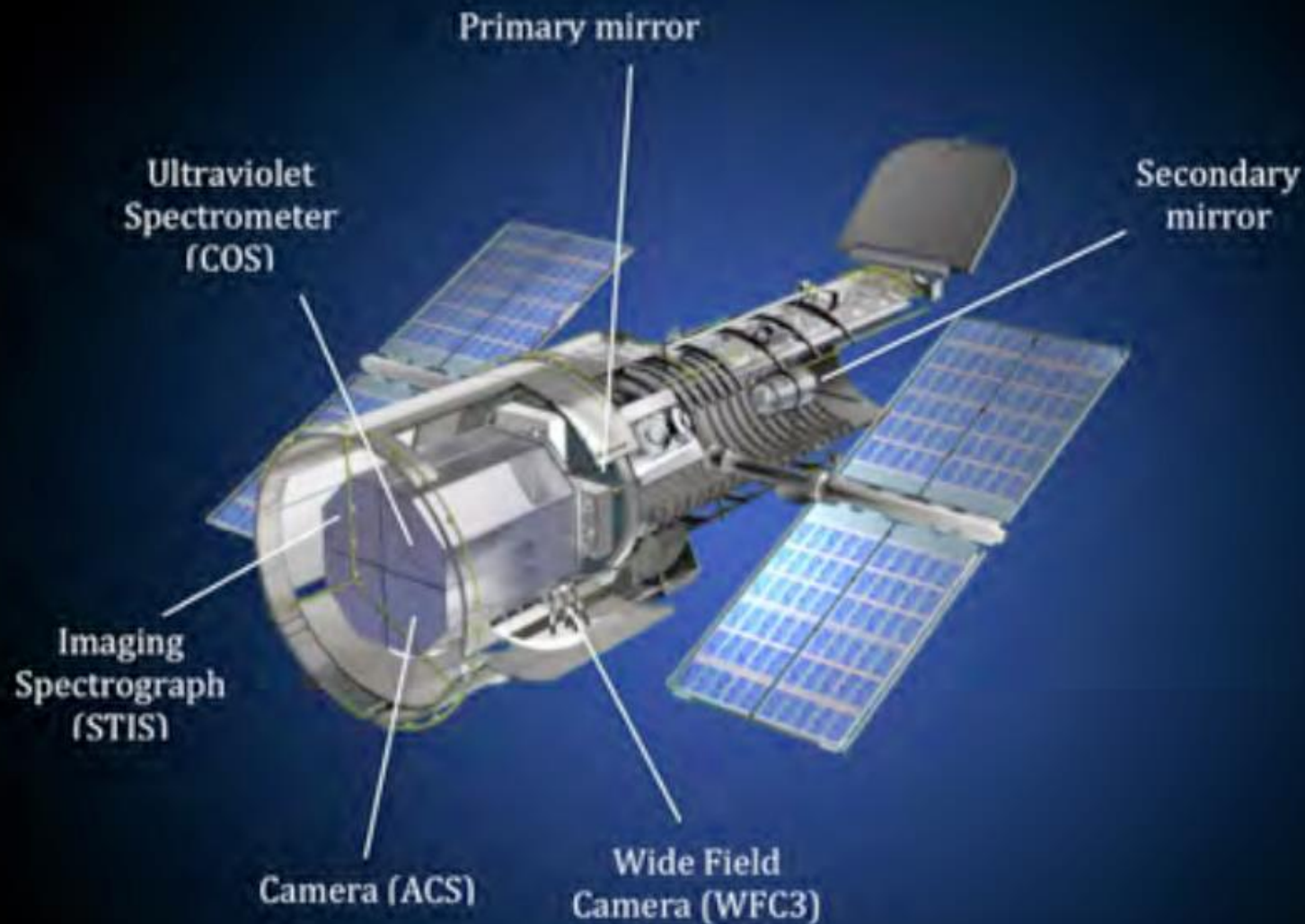
Несмотря на диаметр «всего лишь» 2.4 м телескоп по ряду параметров превосходит крупнейшие наземные инструменты.

Кроме того, он может наблюдать в УФ и ИК.

Carina nebula



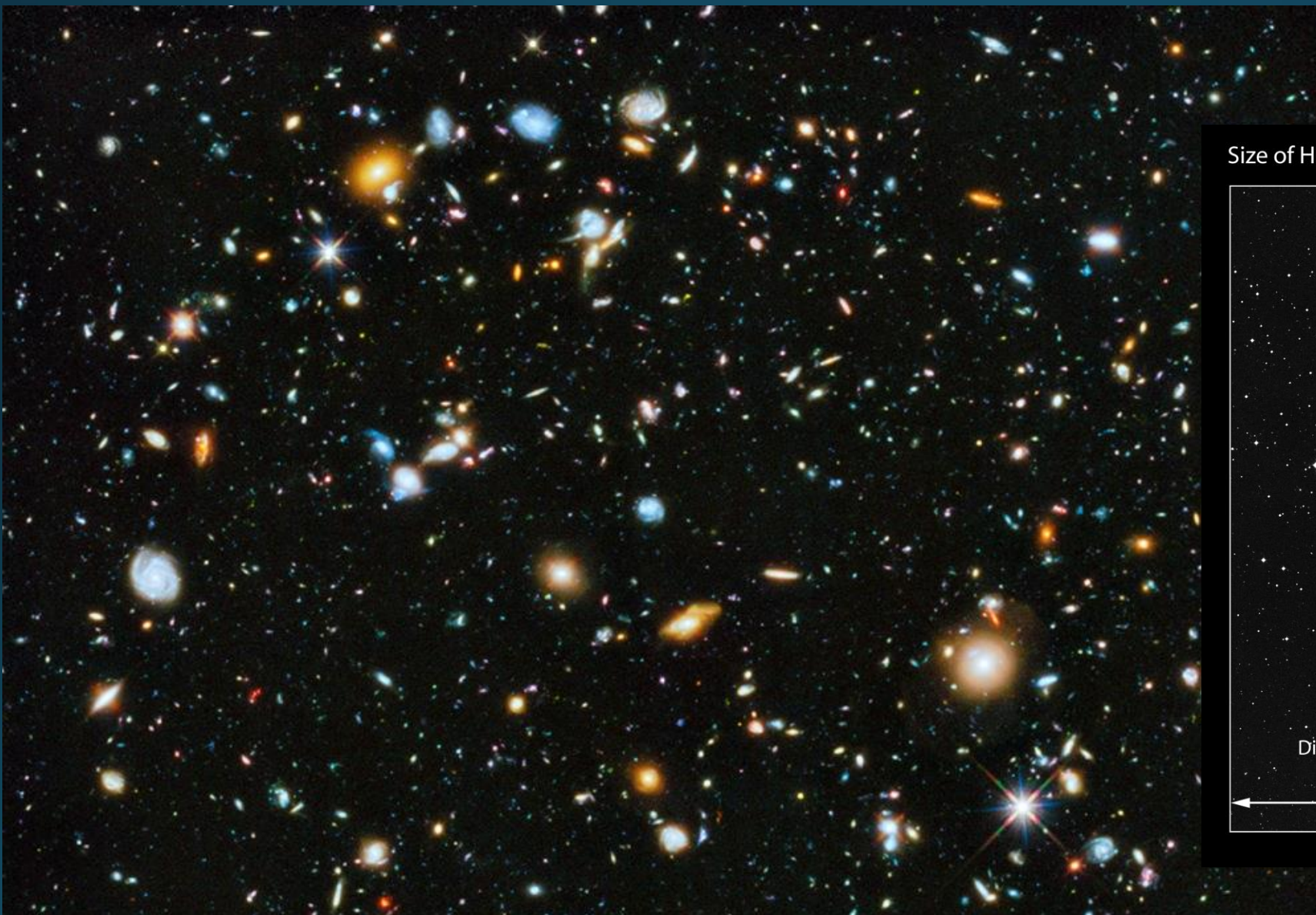
Приборы Хаббла



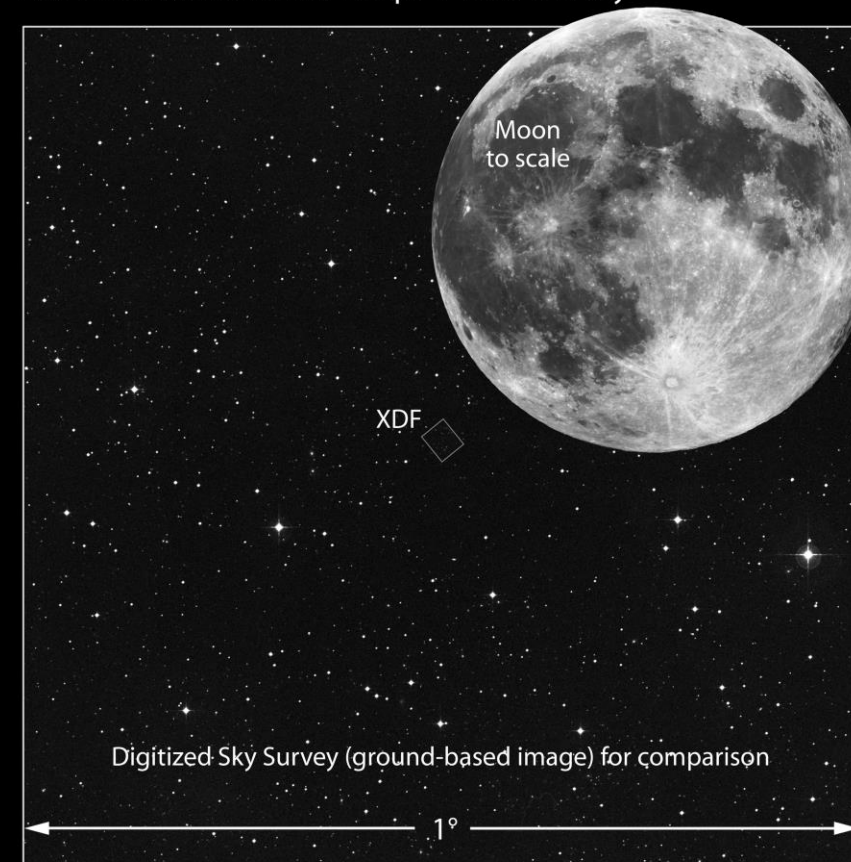
Телескоп может строить изображения и получать спектры в видимом, ИК и УФ диапазонах спектра.

Наблюдение объектов до 31 звездной величины

Глубокое поле Хаббла



Size of Hubble eXtreme Deep Field on the Sky

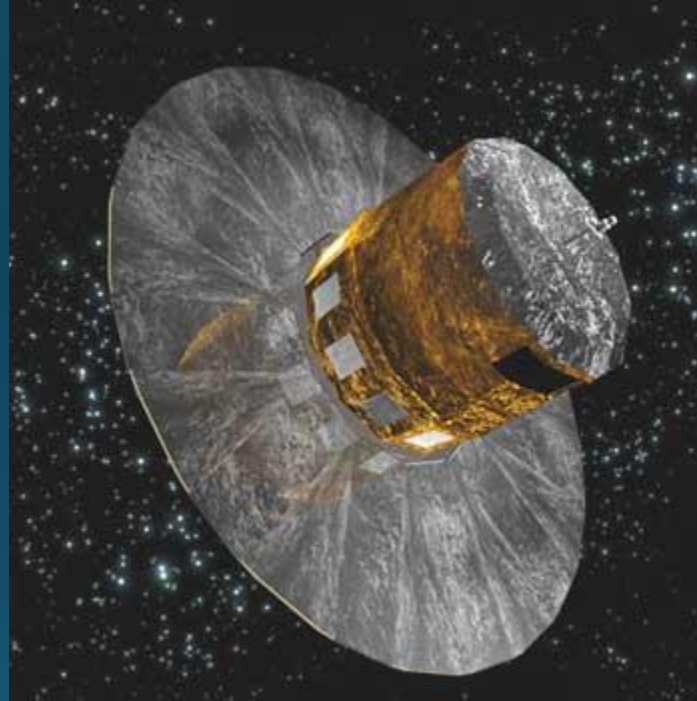


Астрометрические наблюдения из космоса

Hipparcos



GAIA

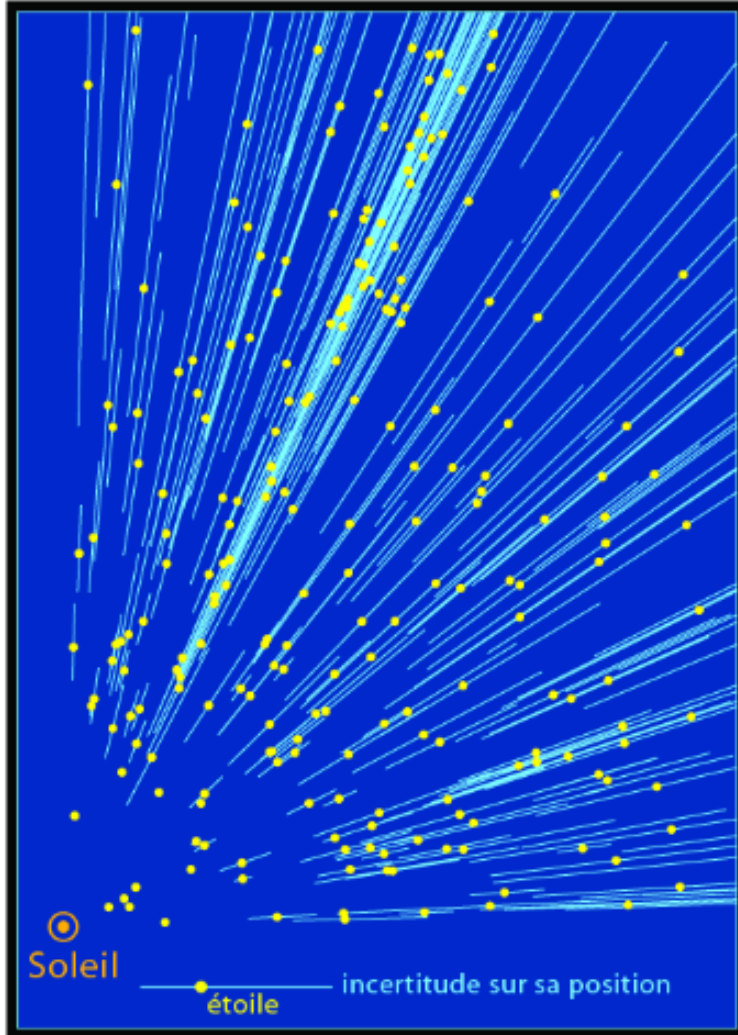


Спутник Gaia впервые даст нам трехмерную карту половины Галактики. См. детальное описание в 1609.04153

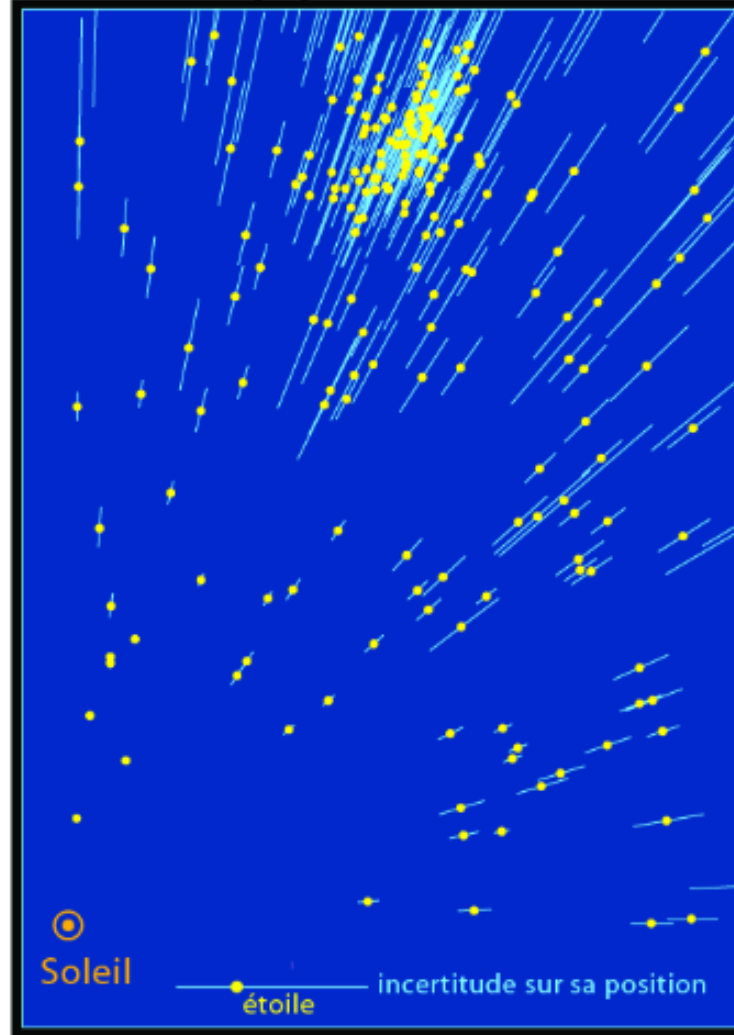
Наблюдения из космоса произвели революцию в астрометрии.

Пределы точного измерения расстояний

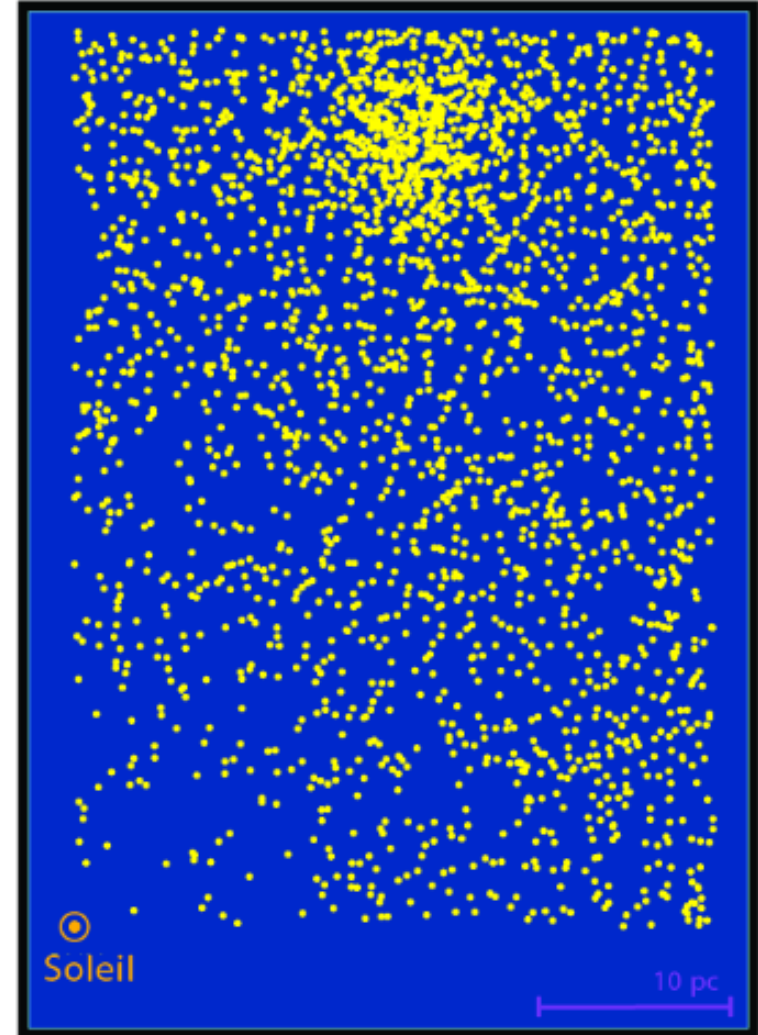
Sol



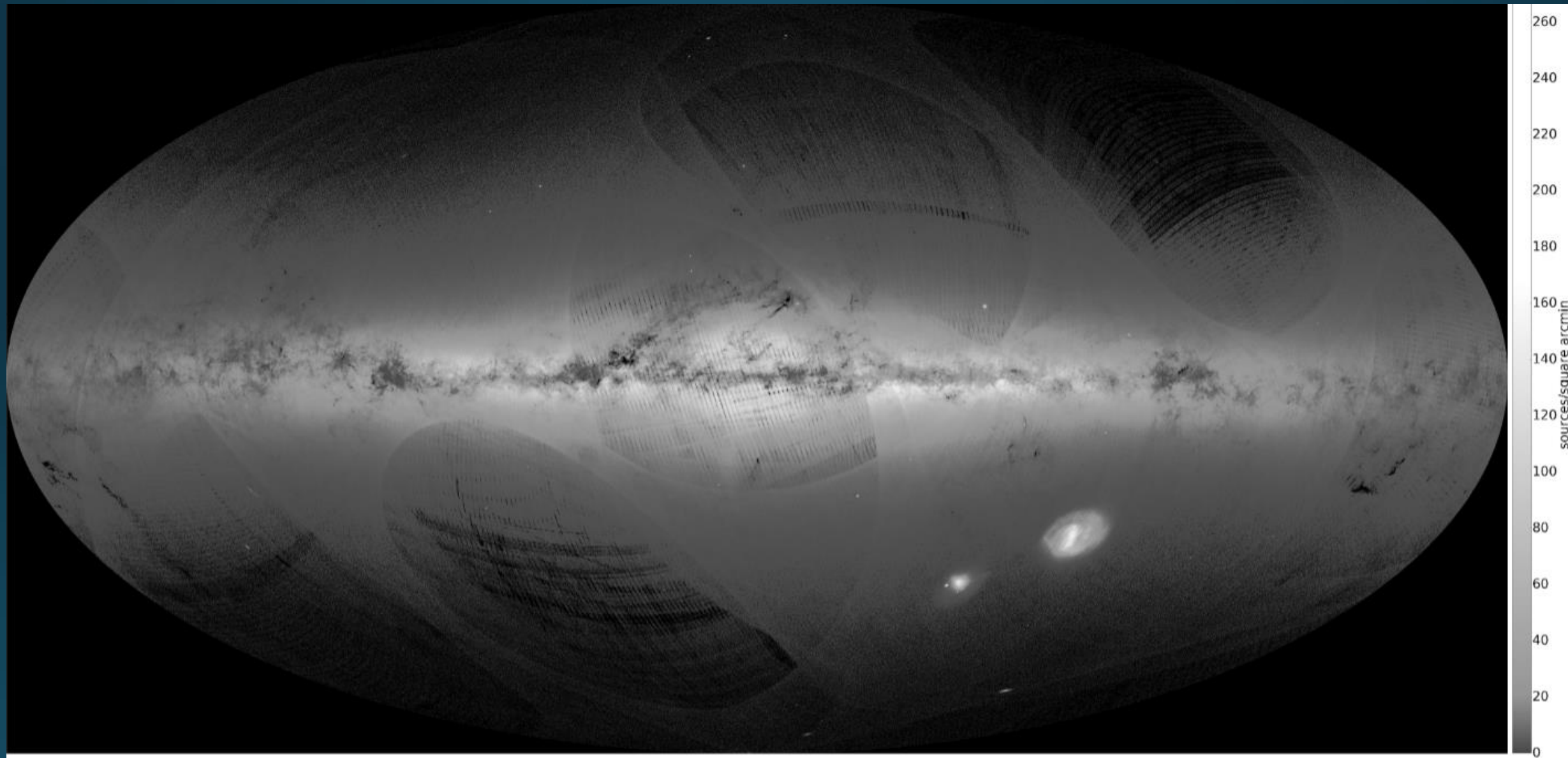
Hipparcos (1990)



Gaia (2020)



Первый релиз данных Gaia



Поиски экзопланет



CoRot



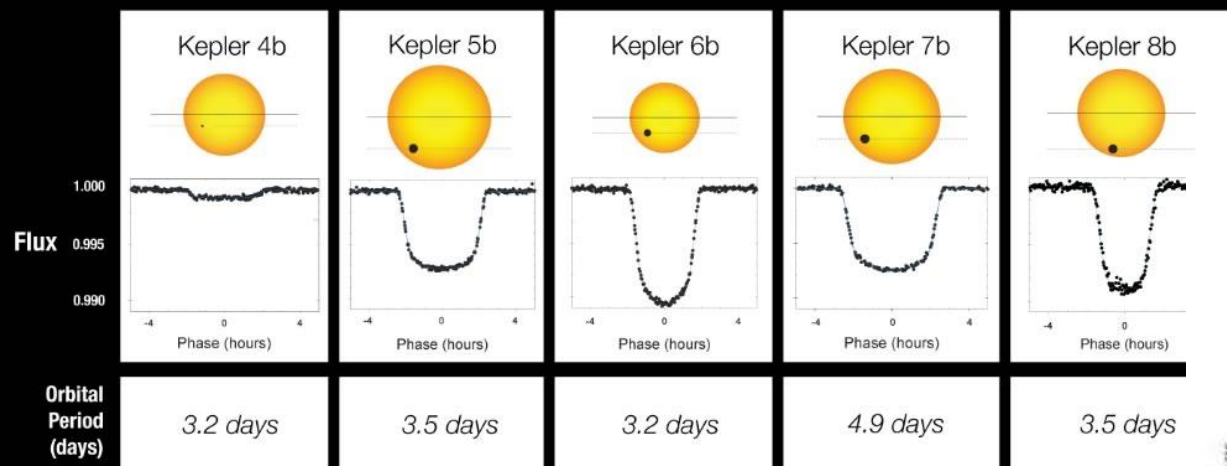
TESS



Kepler

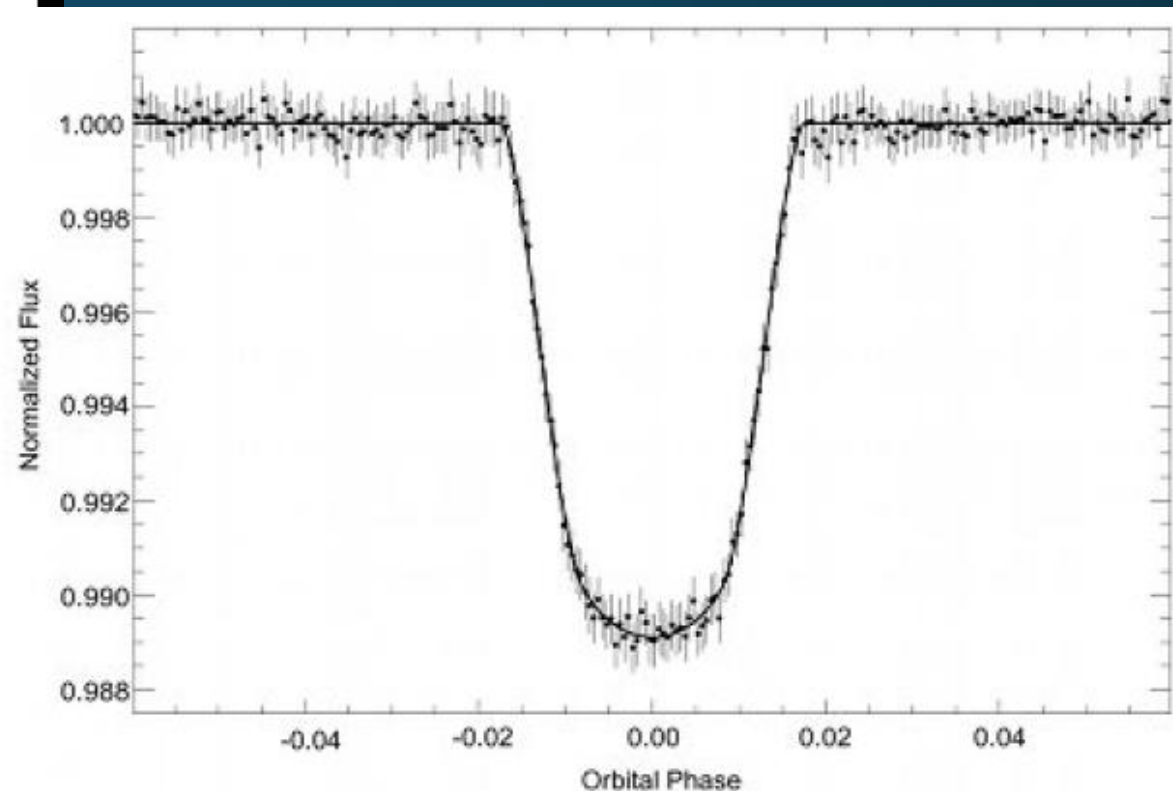
Кривые блеска при транзитах

Transit Light Curves

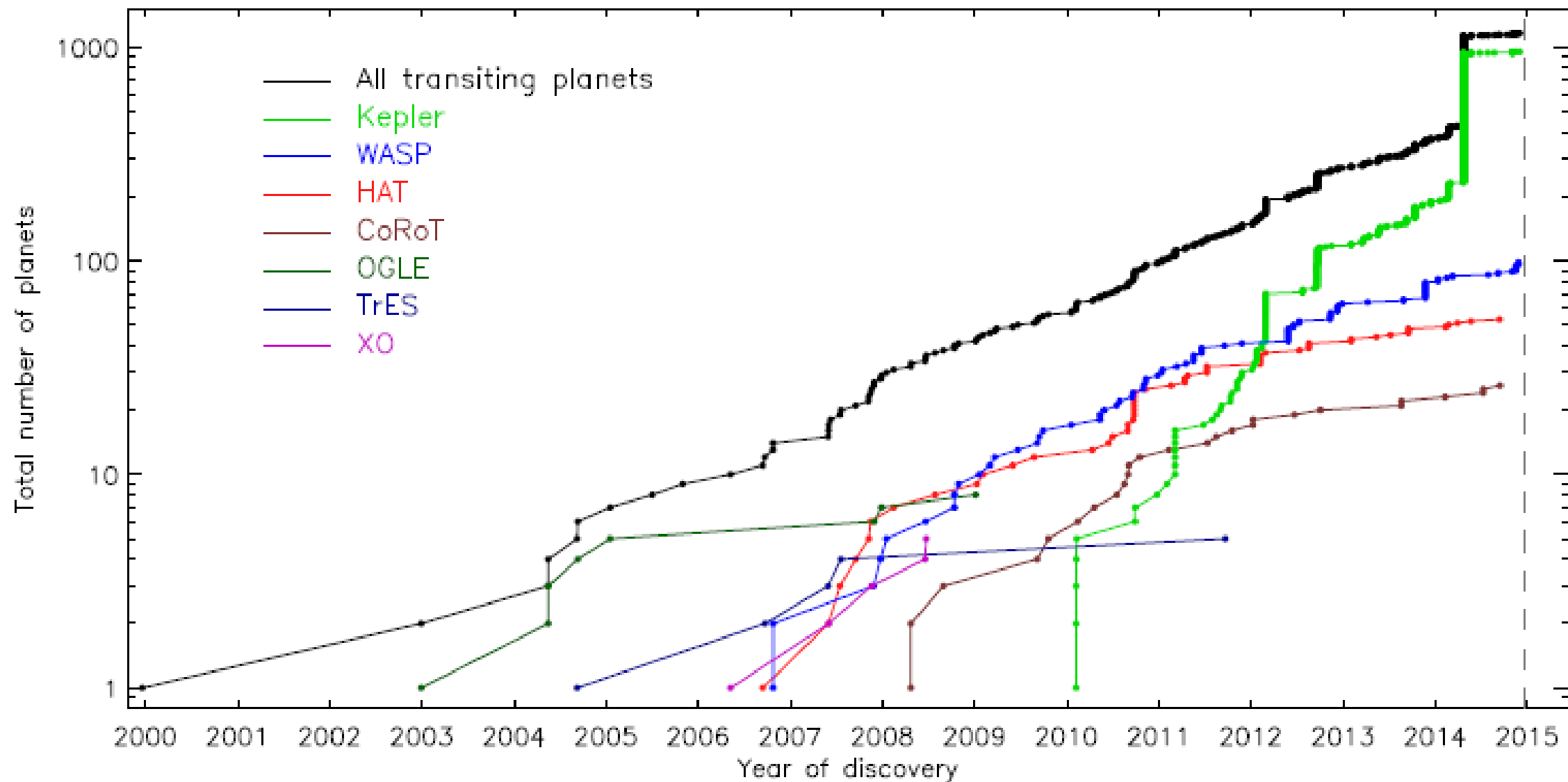


Падение блеска может составлять тысячные или даже десятитысячные доли полного потока.

Необходимо проводить измерения, сохраняя точность в течение нескольких периодов обращения планеты.



Темп открытия транзитных планет



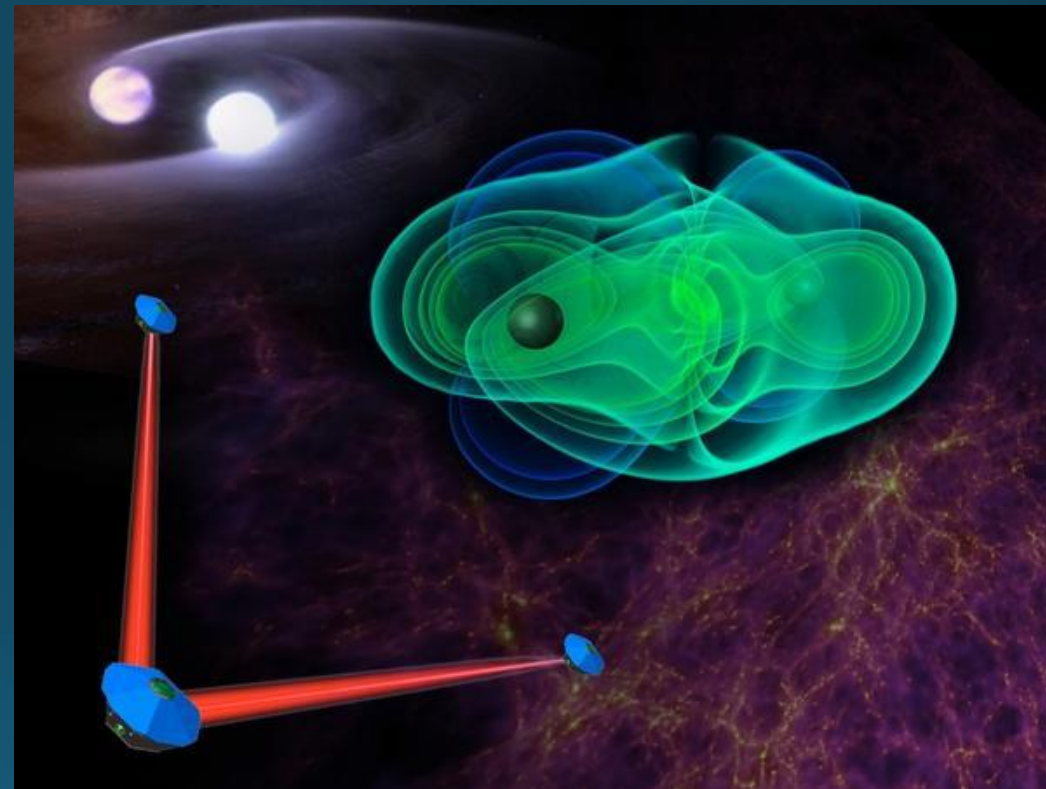
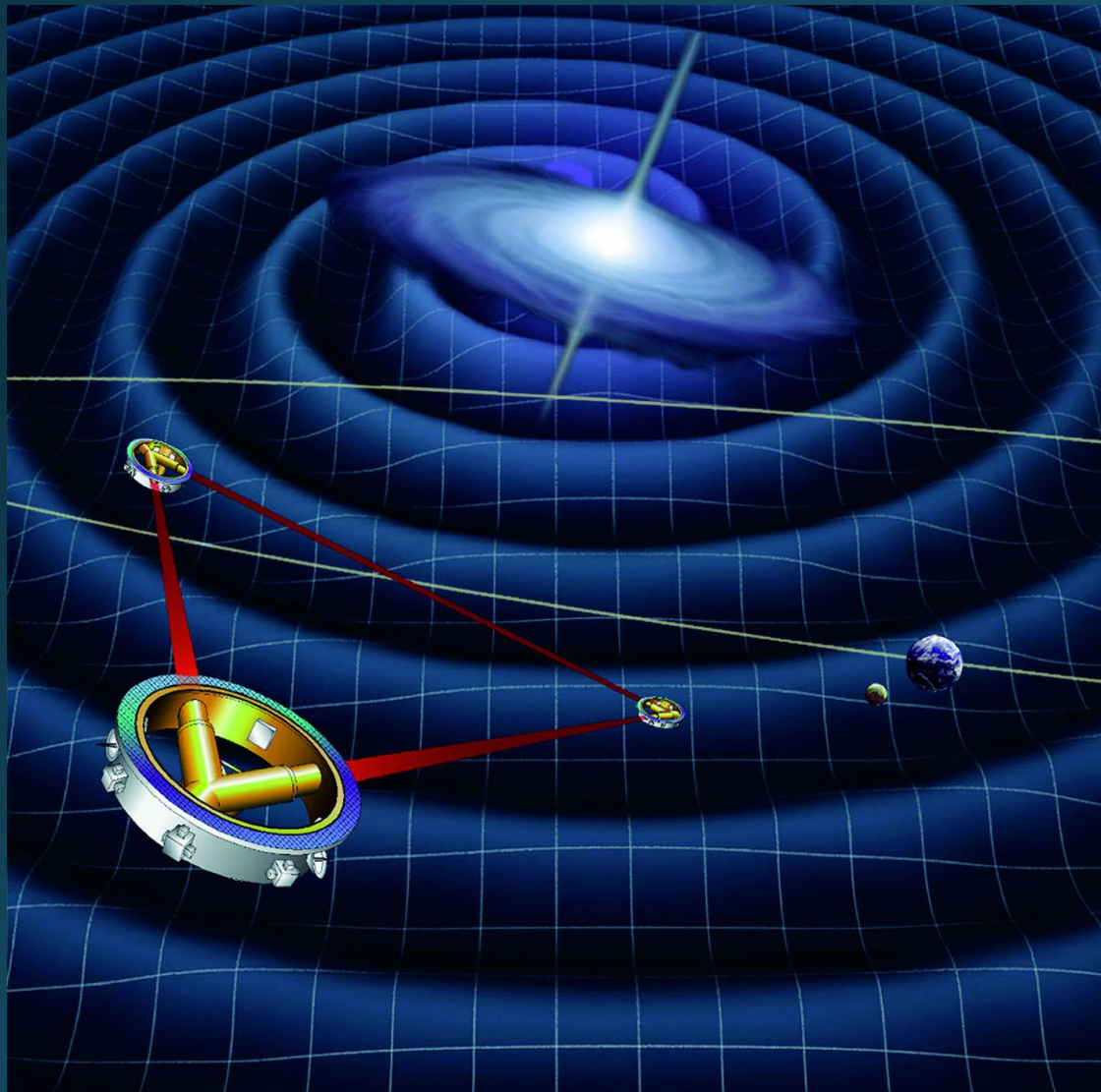
Радиоастрон



Космический
интерферометр

Рекордное
угловое разрешение

Космический проект eLISA



2.5 миллиарда долларов
NASA сняла свое финансирование
Сейчас ESA одобрена заявка на запуск
упрощенного варианта в 2034 г.
В новом виде проект назван eLISA.
В 2016 г. NASA вернулось в проект!

Космические лучи



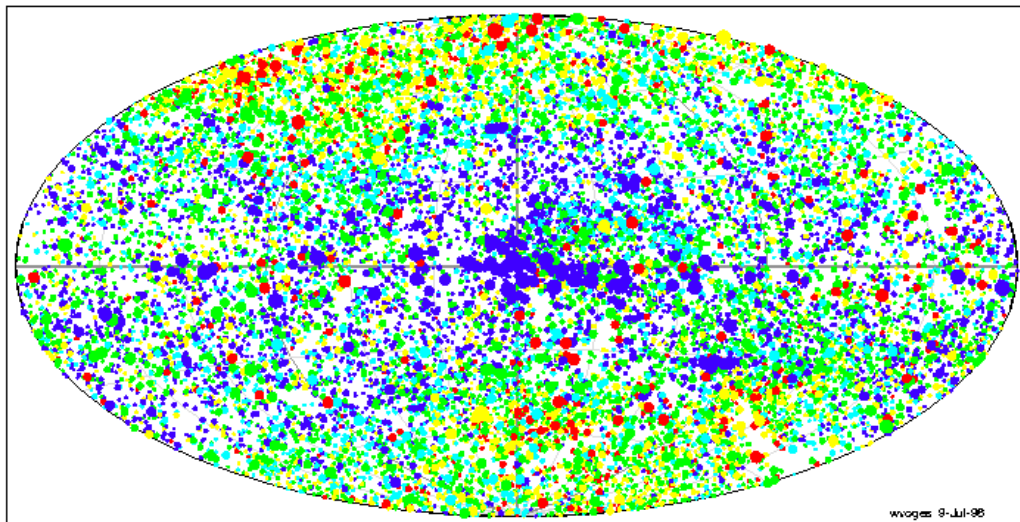
Возможно, что следующим шагом в изучении космических лучей сверхвысоких энергий будет запуск специальных космических аппаратов.

Задача: изучение редких частиц очень высоких энергий.

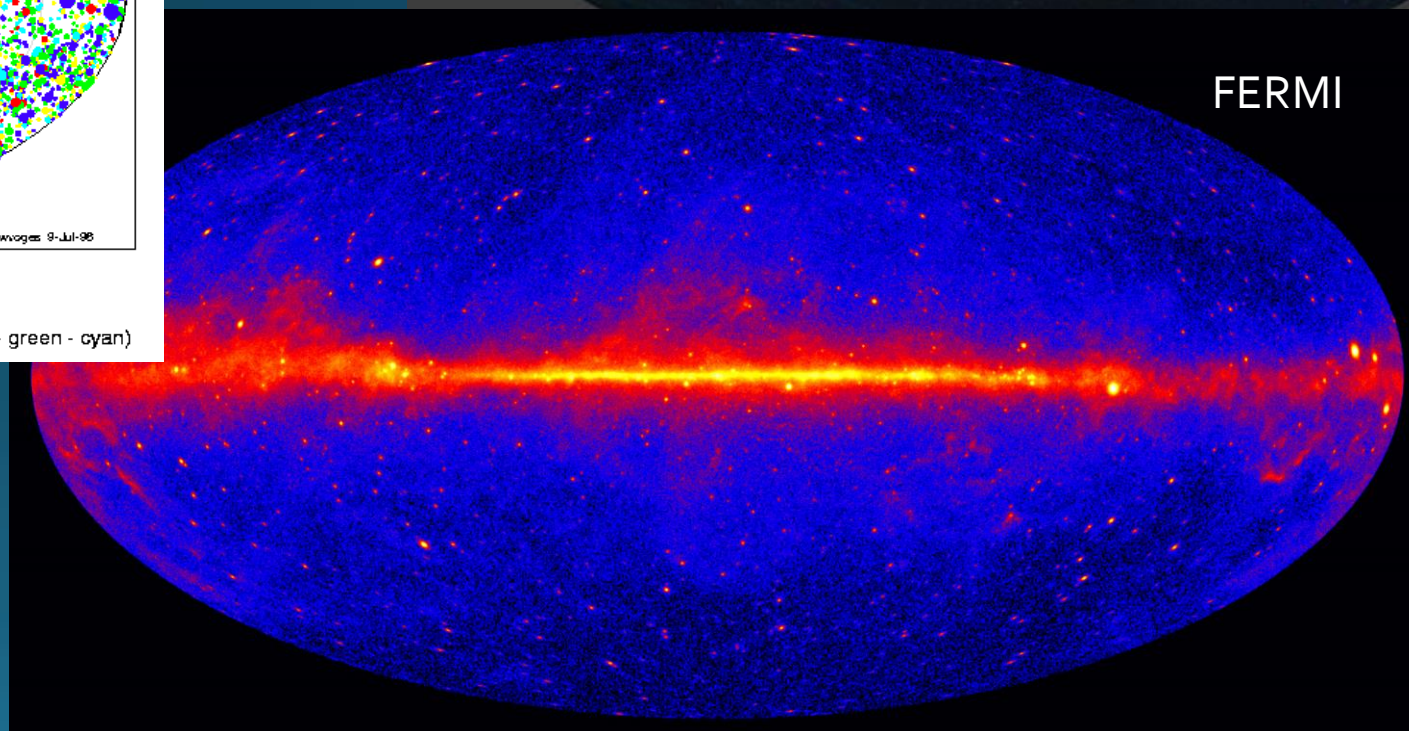
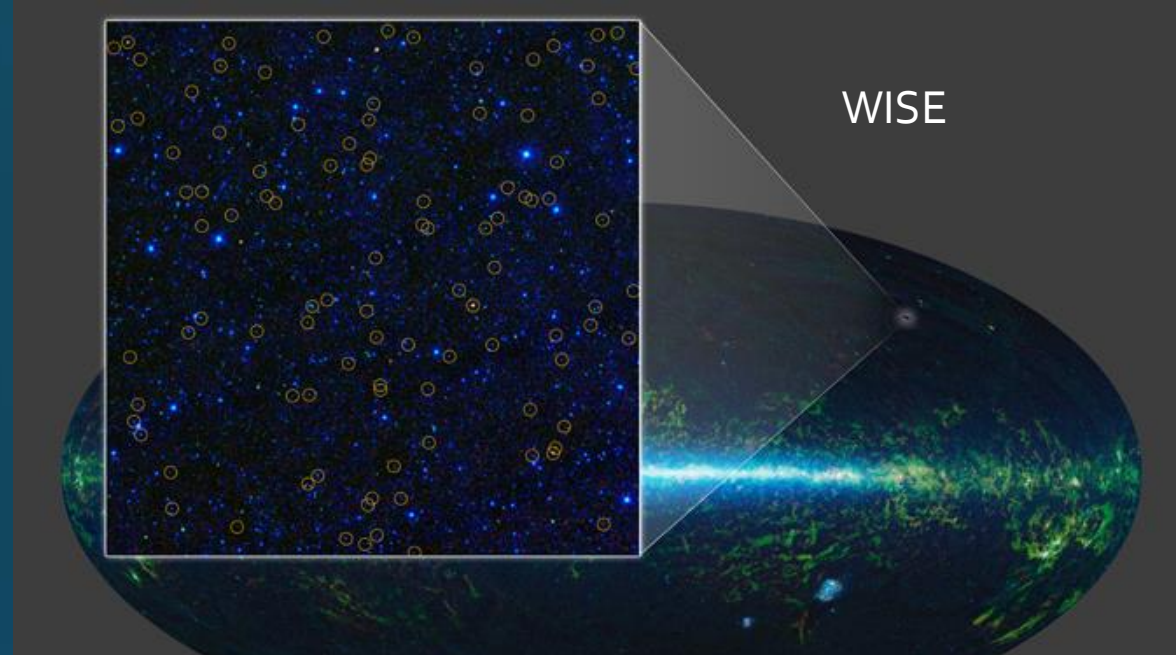
Обзоры

ROSAT ALL-SKY SURVEY Bright Sources

Aitoff Projection
Galactic II Coordinate System

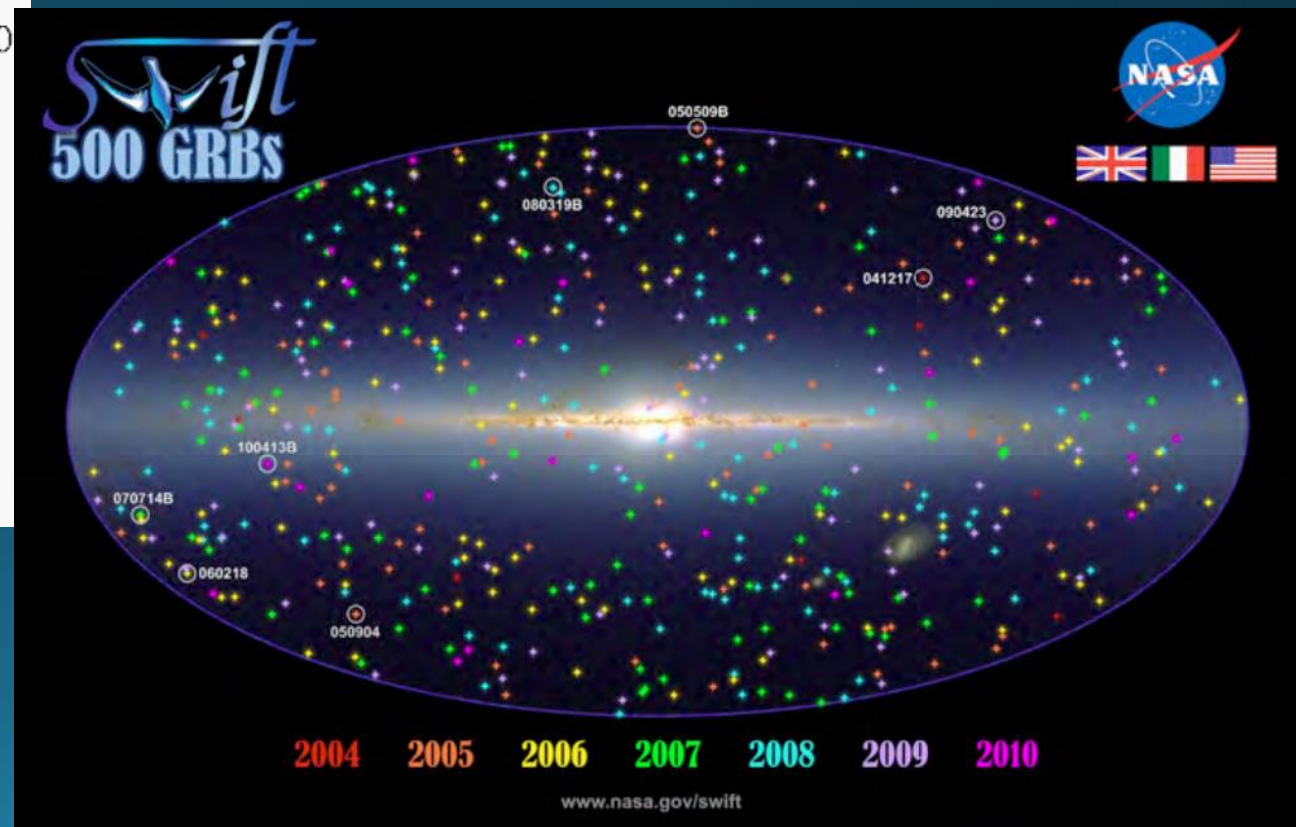
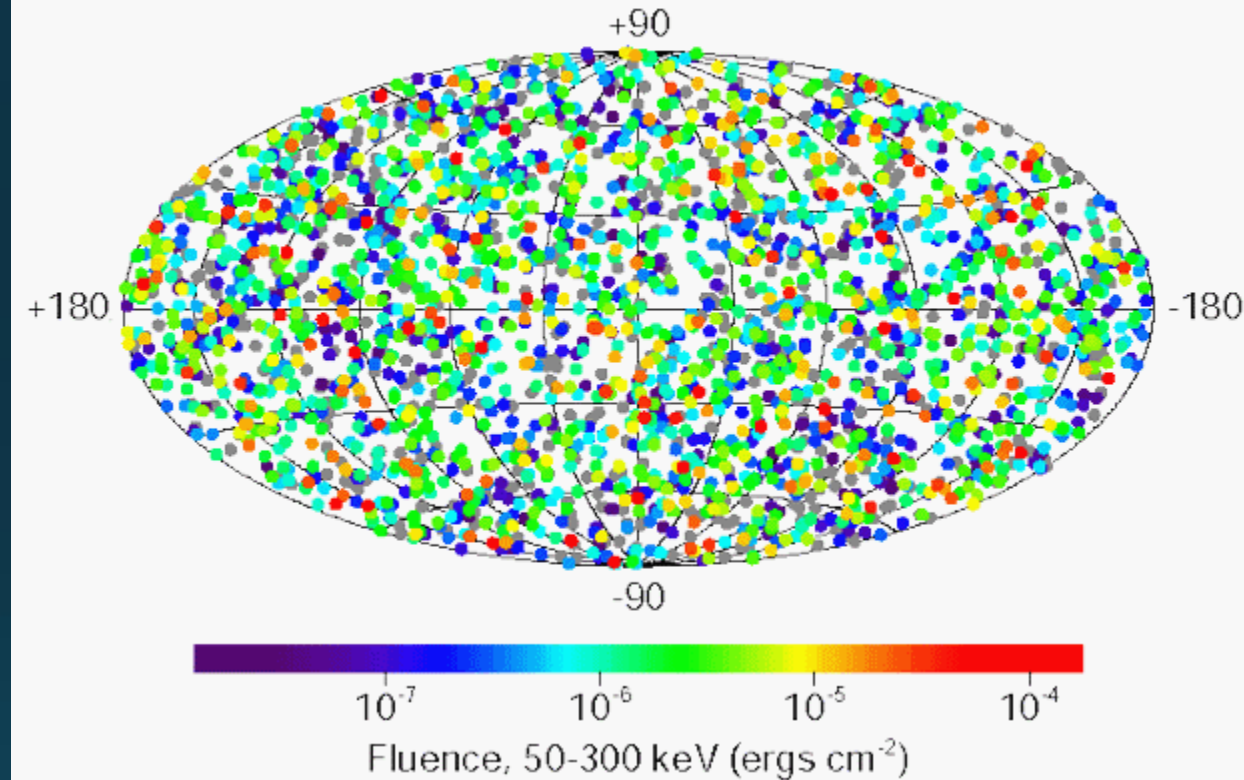


Energy range: 0.1 - 2.4 keV
Number of RASS-II sources: 18811
Hardness ratio: -1.0 | -0.4 | -0.2 | 0.2 | 0.6 | 1.0 (soft -> hard : magenta - red - yellow - green - cyan)

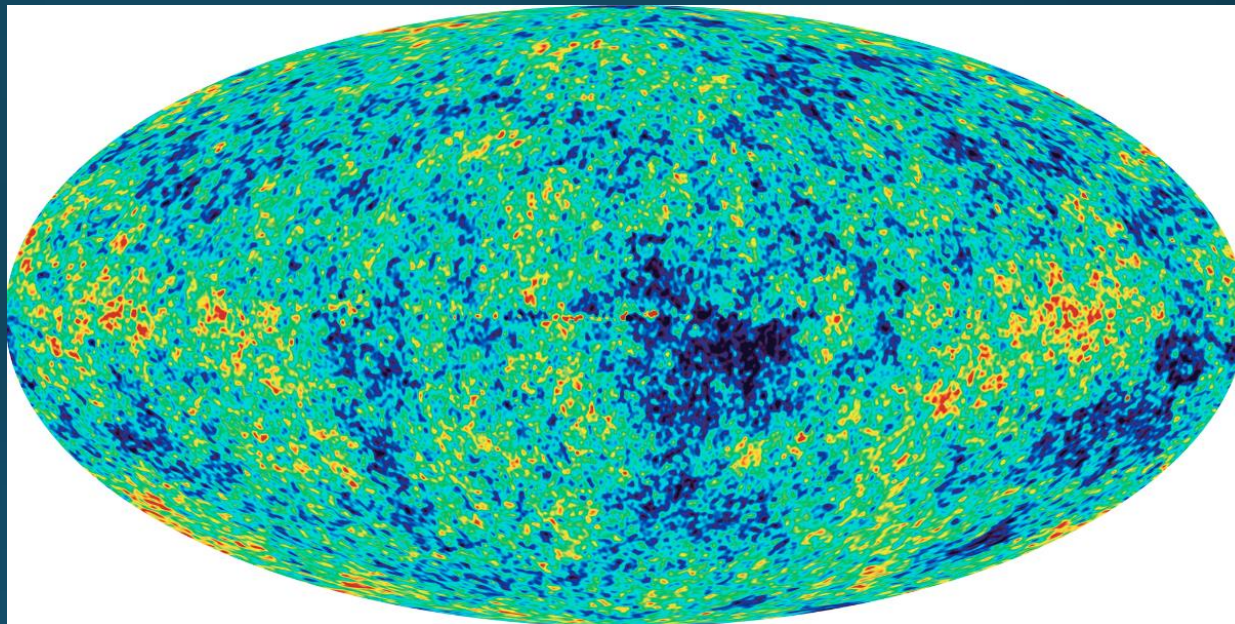
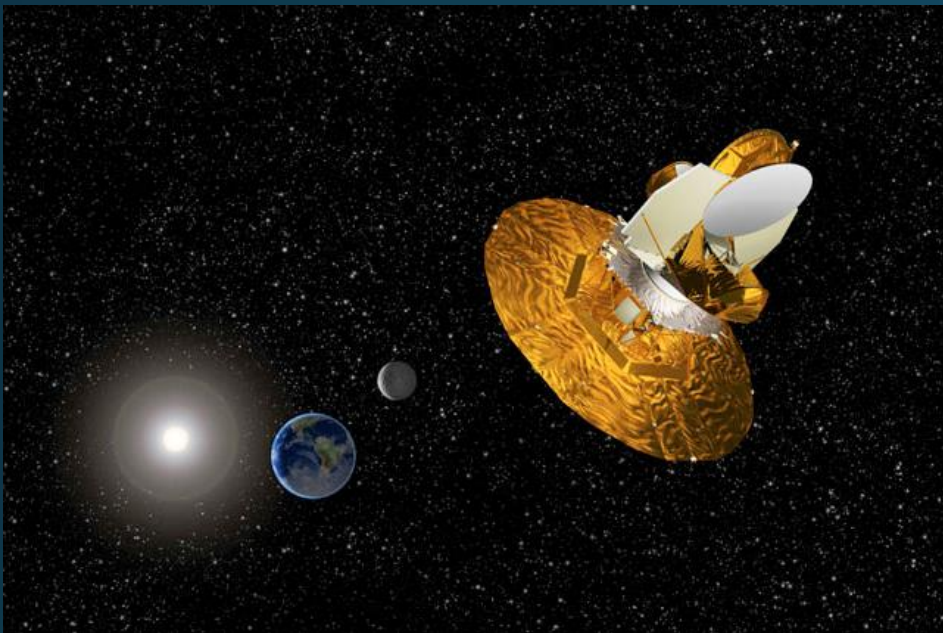


Мониторинг неба

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Спутник WMAP



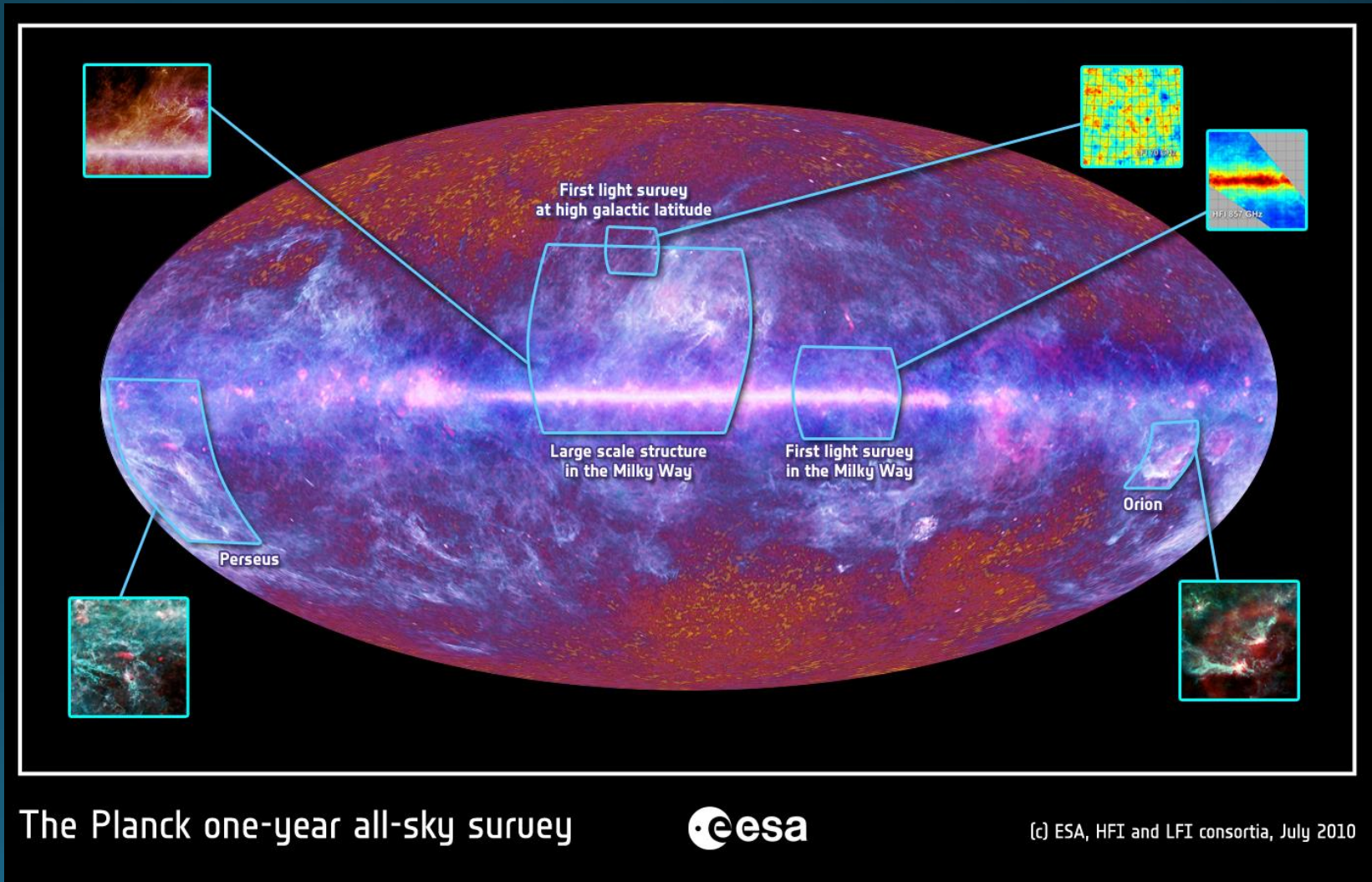
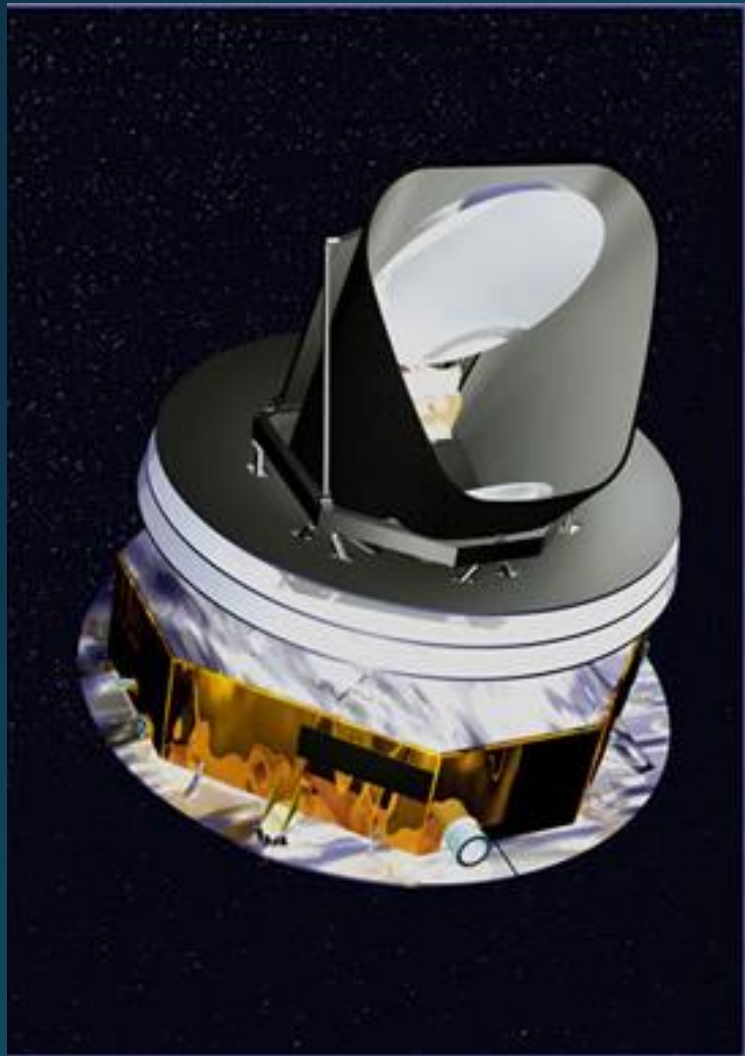
Спутник WMAP (США)

Задача инструмента — изучение микроволнового (реликтового) фона, несущего информацию о молодой Вселенной.

То есть это космологический прибор.

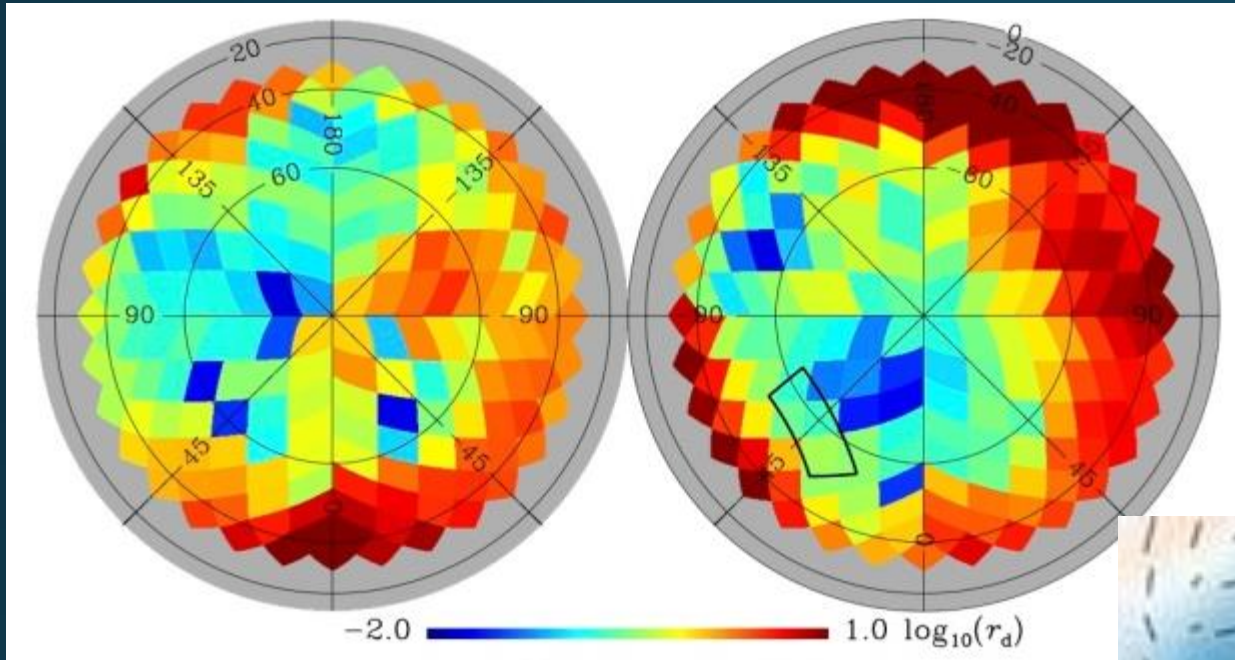
Однако, поскольку на реликтовое излучение накладывается излучение нашей Галактики, спутник получил важнейшую информацию о свойствах нашей звездной системы.

Результаты спутника Planck

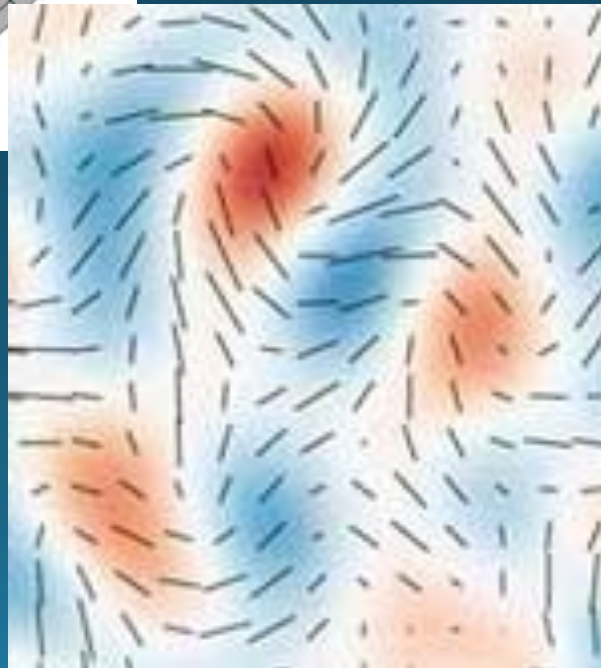


Наблюдения микроволнового фона на 100 - 857 ГГц

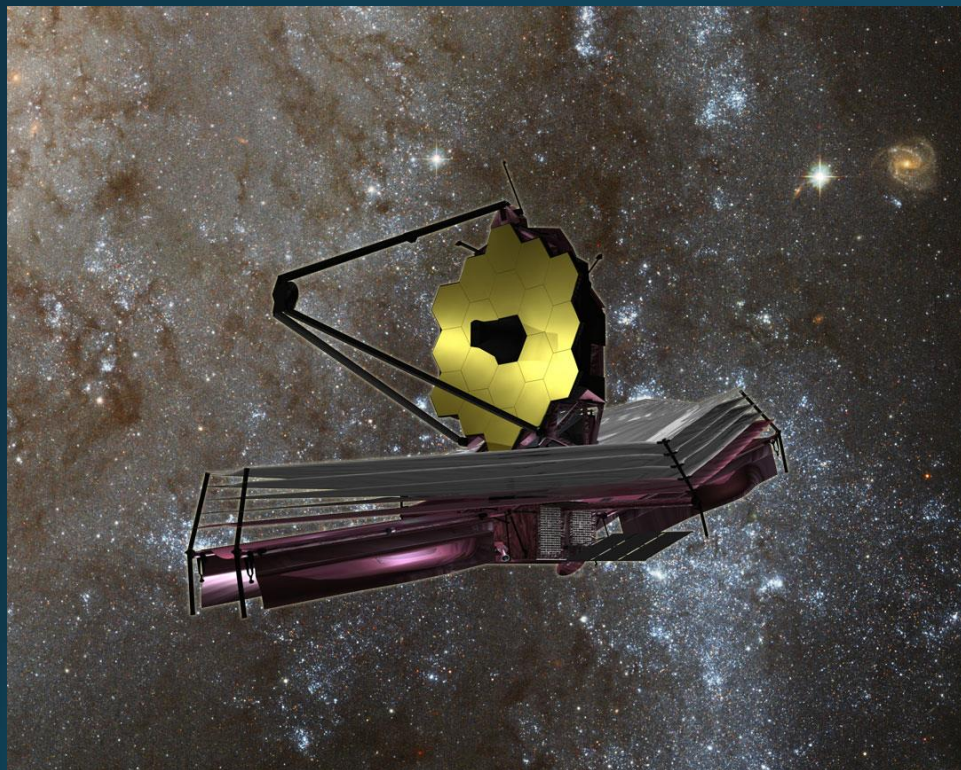
BICEP2 vs. Planck



Установить истину помогло то, что Планк может наблюдать все небо на разных частотах.

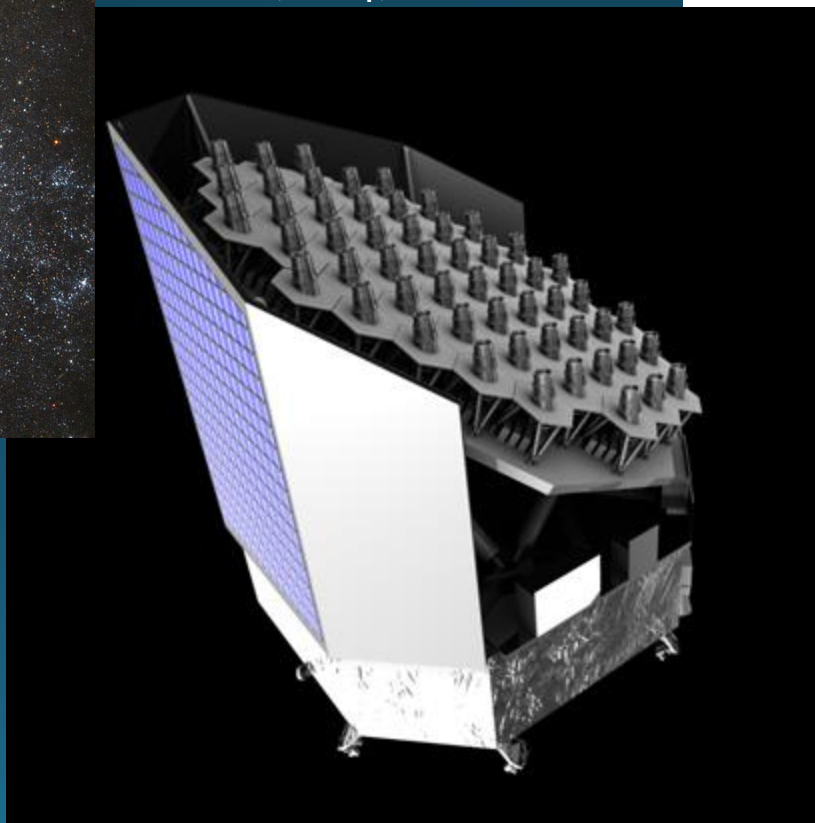


Астрономия XXI века



JWST (2018)

Plato (2024)



ATHENA (2028)