

КОСМОС КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Физфак МГУ им.Ломоносова
Профессор А.В. ЗАСОВ

Экзотическое состояние вещества в космосе

- Предельно высокие и предельно низкие значения плотности, давления, температуры
- Предельно высокие энергии элементарных частиц
- Экзотические формы материи (вырожденный газ, тёмная материя, чёрные дыры)

СПЕЦИФИКА АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ:

- Дистанционные измерения вместо лабораторных экспериментов (кроме ближнего космоса)
- Физические состояния исследуемых сред, как правило, не воспроизводимы в земных условиях
- Возможность наблюдать разные стадии медленно развивающихся нестационарных процессов

История. Важнейшие физические открытия на основе астрономических наблюдений

- Открытие закона всемирного тяготения (17 век)
- Открытие конечности скорости света и её измерение (17 век)
- Открытие химического элемента ГЕЛИЙ (1868 г)
- Открытие излучений, не воспринимаемых глазом (1800 г -ИК)



Олаф Рёмер решение парадокса спутников Юпитера и оценка c .

20 крон 2013г



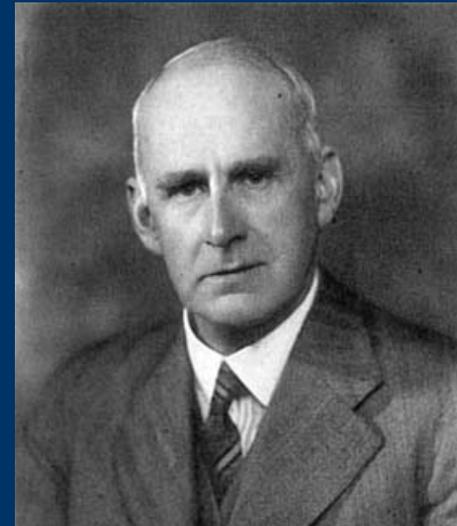
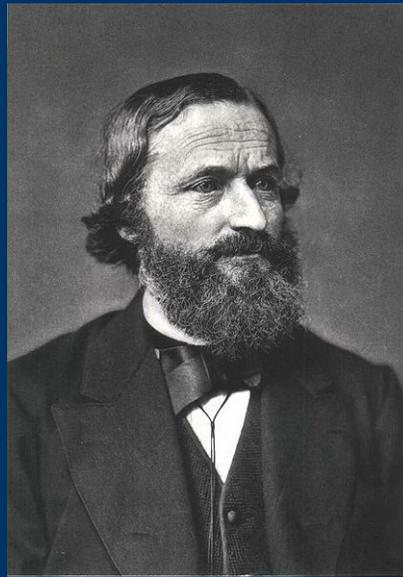
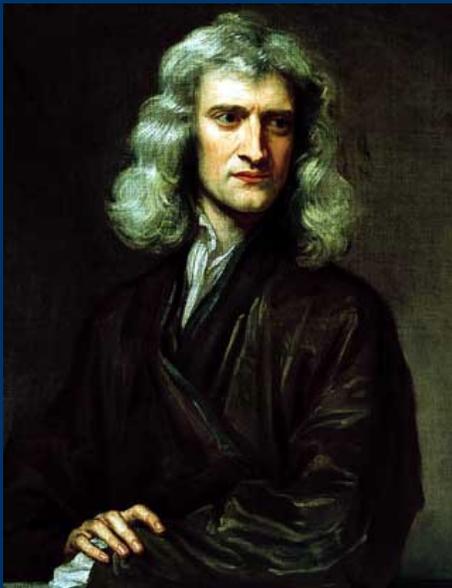
Основное положение астрофизики

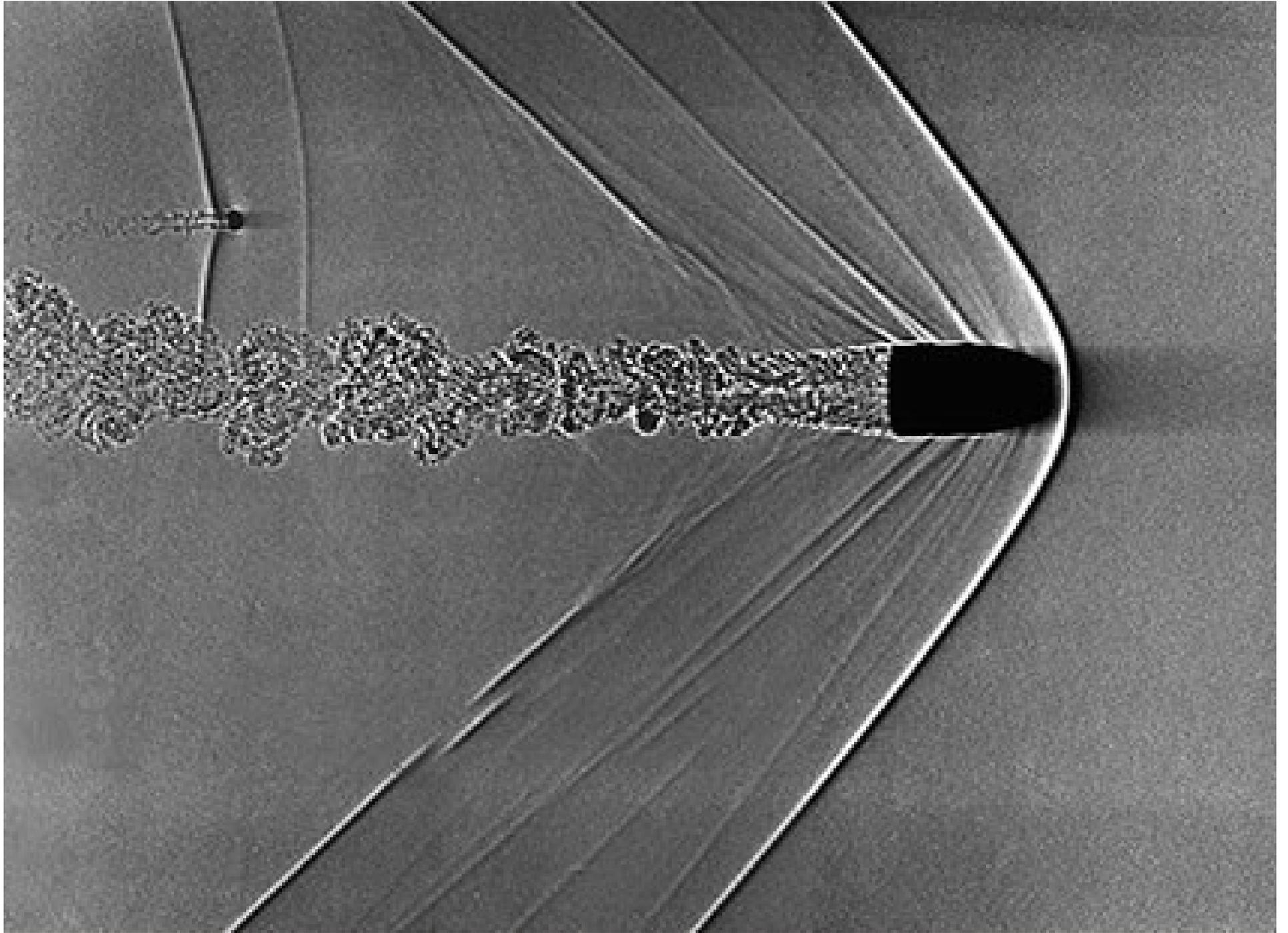
Законы физики, открытые на Земле, действуют и в космосе. Атомы устроены одинаково, а силы взаимодействия имеют те же свойства на Земле, в недрах звезд и в далеком космосе.

Исаак Ньютон

Густав Кирхгоф

Артур Эддингтон





УФ изображение. Mira Ceti (GALEX)

Расстояние – 400 св.лет

Скорость: 140 км/с
Длина хвоста 12 свет.лет.



Спектральные наблюдения

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

- *Измерения лучевых скоростей*
- *Измерения химического состава*
- *Измерения температуры, плотности и давления газа*
- *Измерение скоростей вращения тел*
- *Измерения магнитных полей*
- *Измерения поглощающих свойств среды*

«ГЛОБАЛЬНЫЕ» ЗАДАЧИ АСТРОФИЗИКИ

- Проверка фундаментальных физических теорий
- Исследование вещества в экзотических условиях космического пространства
- Построение физических моделей наблюдаемых космических объектов, выяснение их физической природы, источников энергии и происхождения.

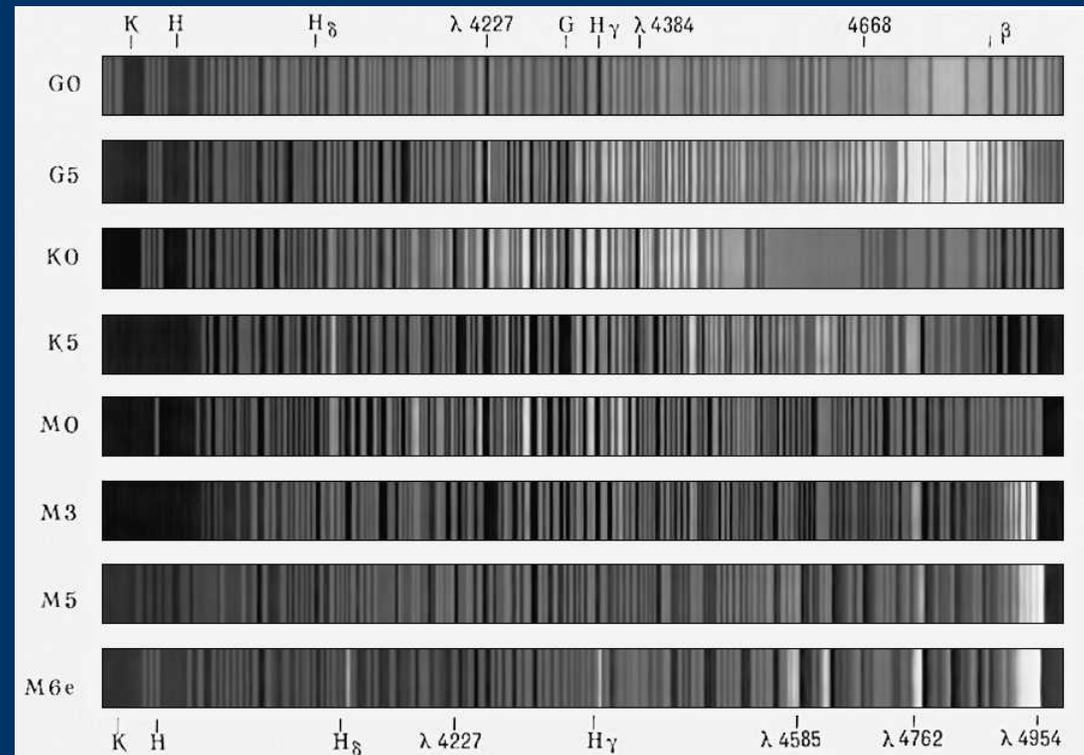
СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ АСТРОФИЗИКА

началась в первой половине XX в с работ

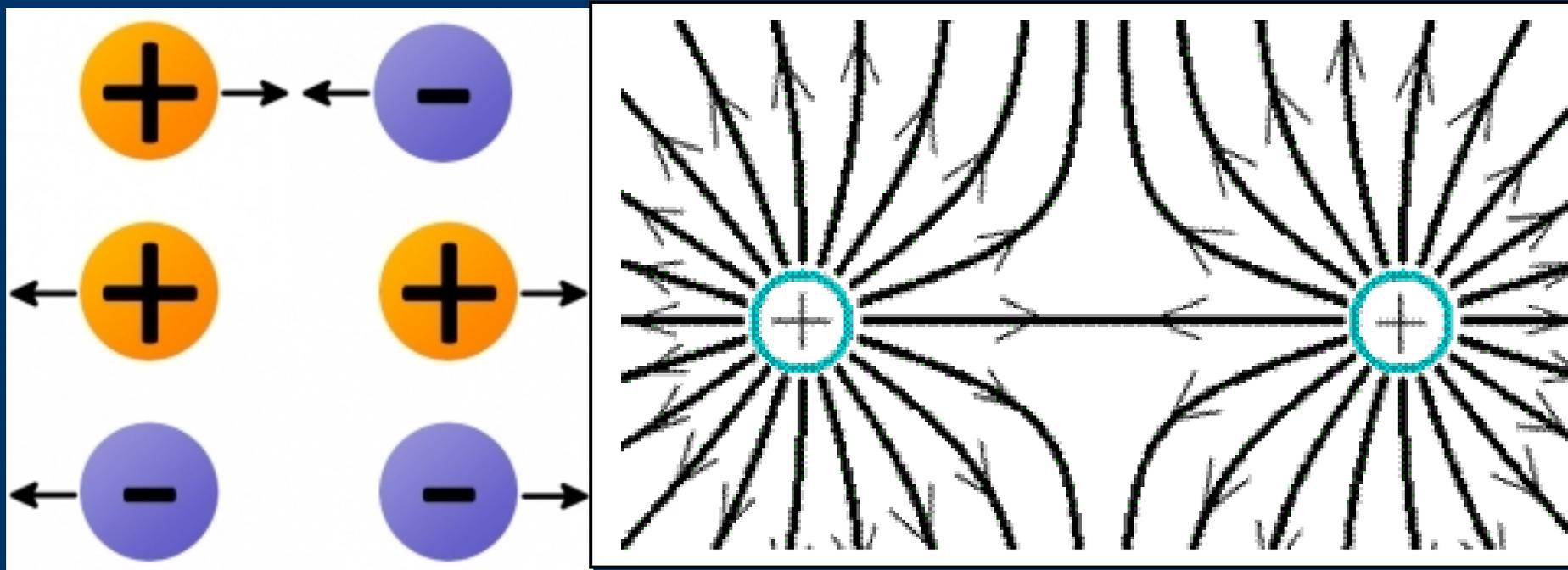
- Артура Эддингтона,
- Фреда Хойла,
- Сесилии Пэйн
- и др.

Сесилия Пейн
(гарвардский ун-т)

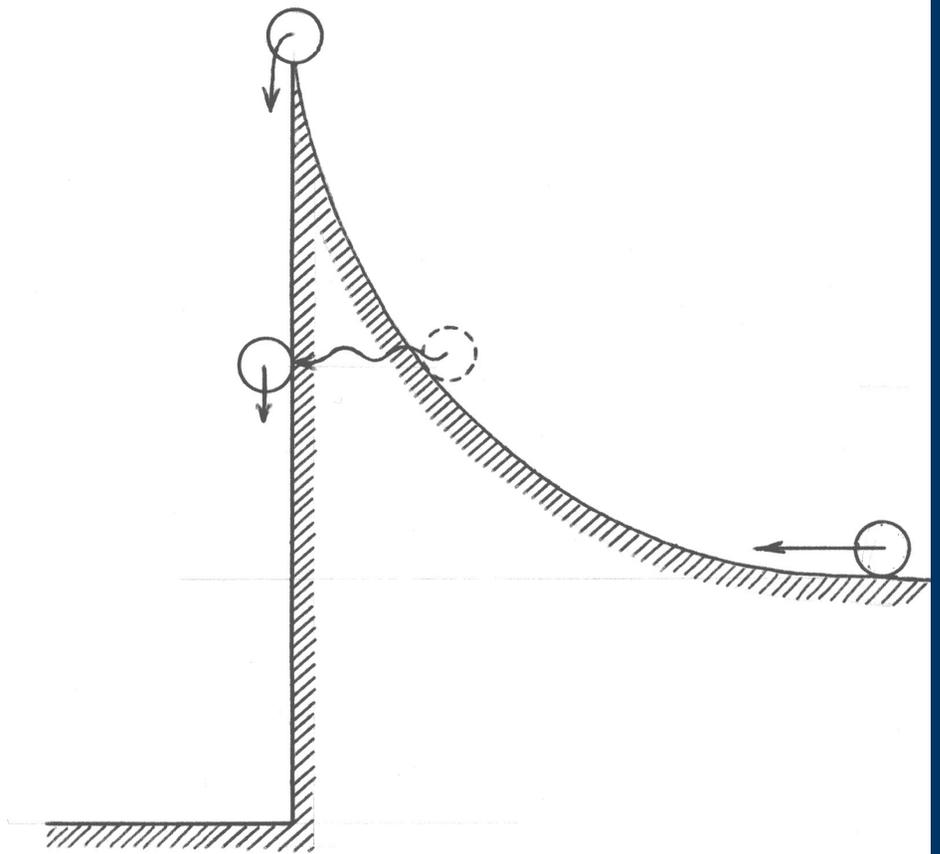
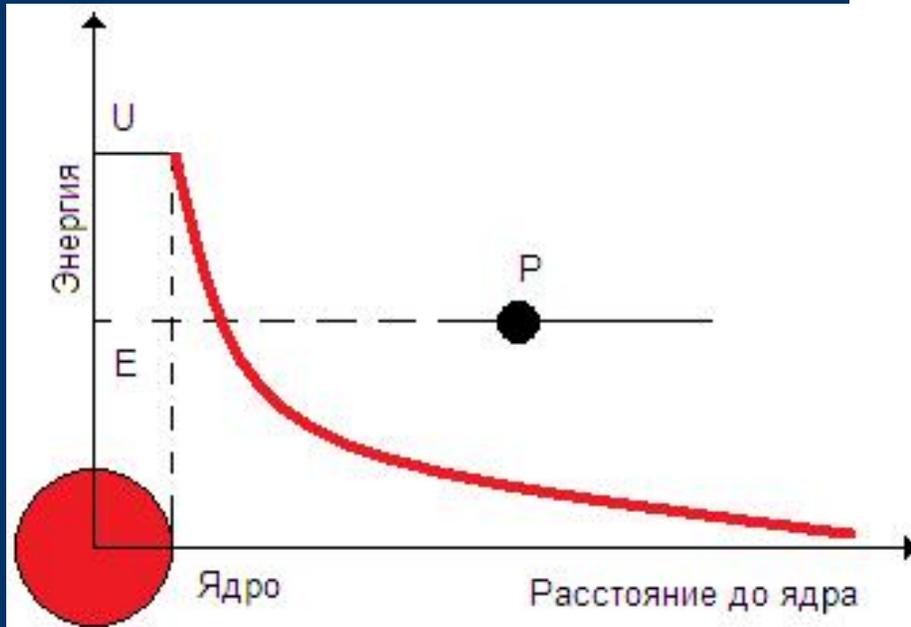
Первая определила
химический состав звёзд
на основе квантовой механики
(1922г)



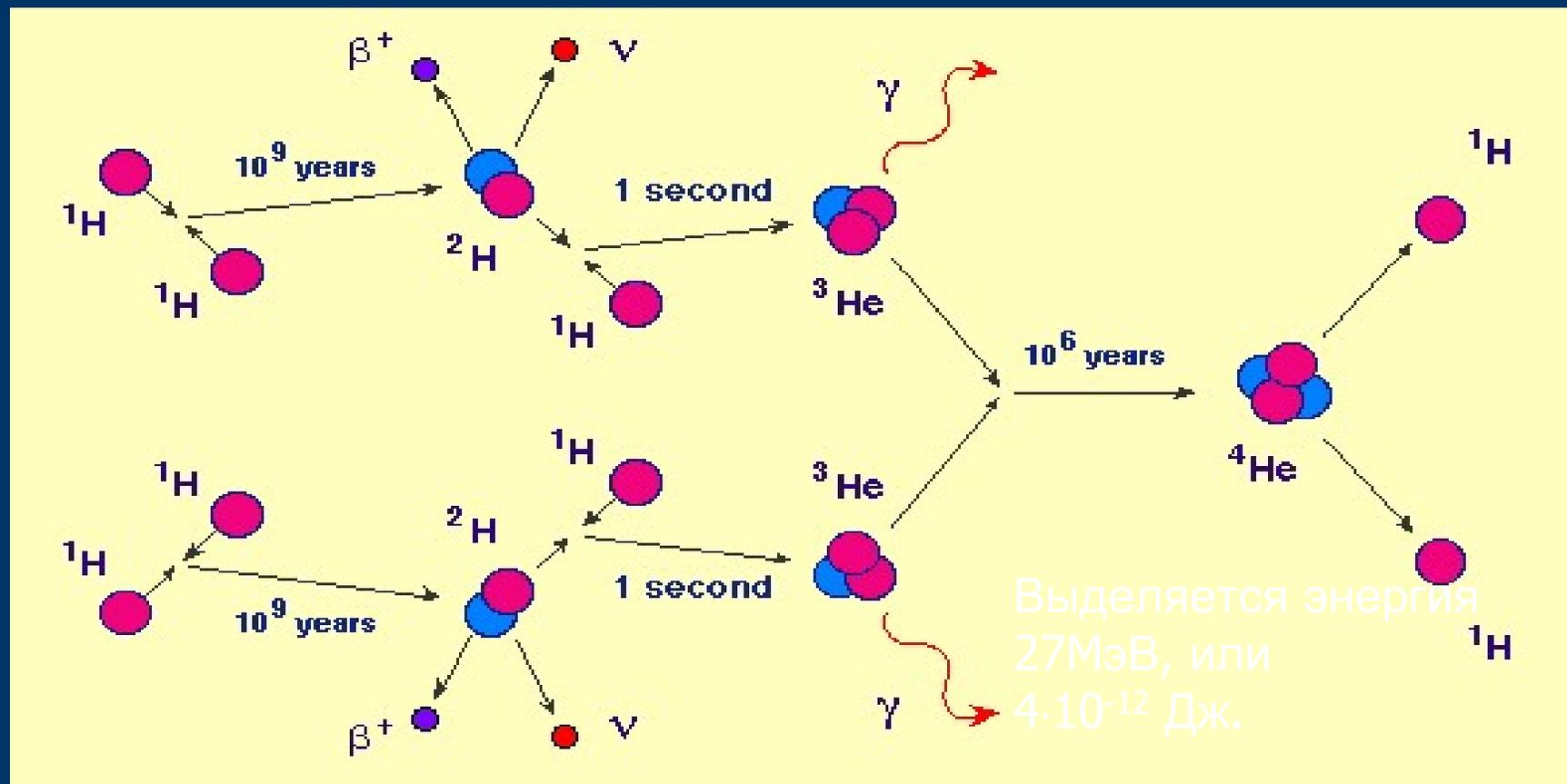
Проблема солнечного термояда



$$W_{\Pi} = k \frac{q_1 q_2}{r}$$



СОЛНЕЧНЫЙ ТЕРМОЯД



Процессы те же, что и при взрыве термоядерной бомбы.

Почему тогда Солнце не взрывается?

Всё дело в отрицательной теплоемкости вещества звезд: при получении дополнительных порций энергии его температура уменьшается.

Избыток энергии переходит в гравитационную энергию

Каждую секунду Солнце теряет часть своей массы:

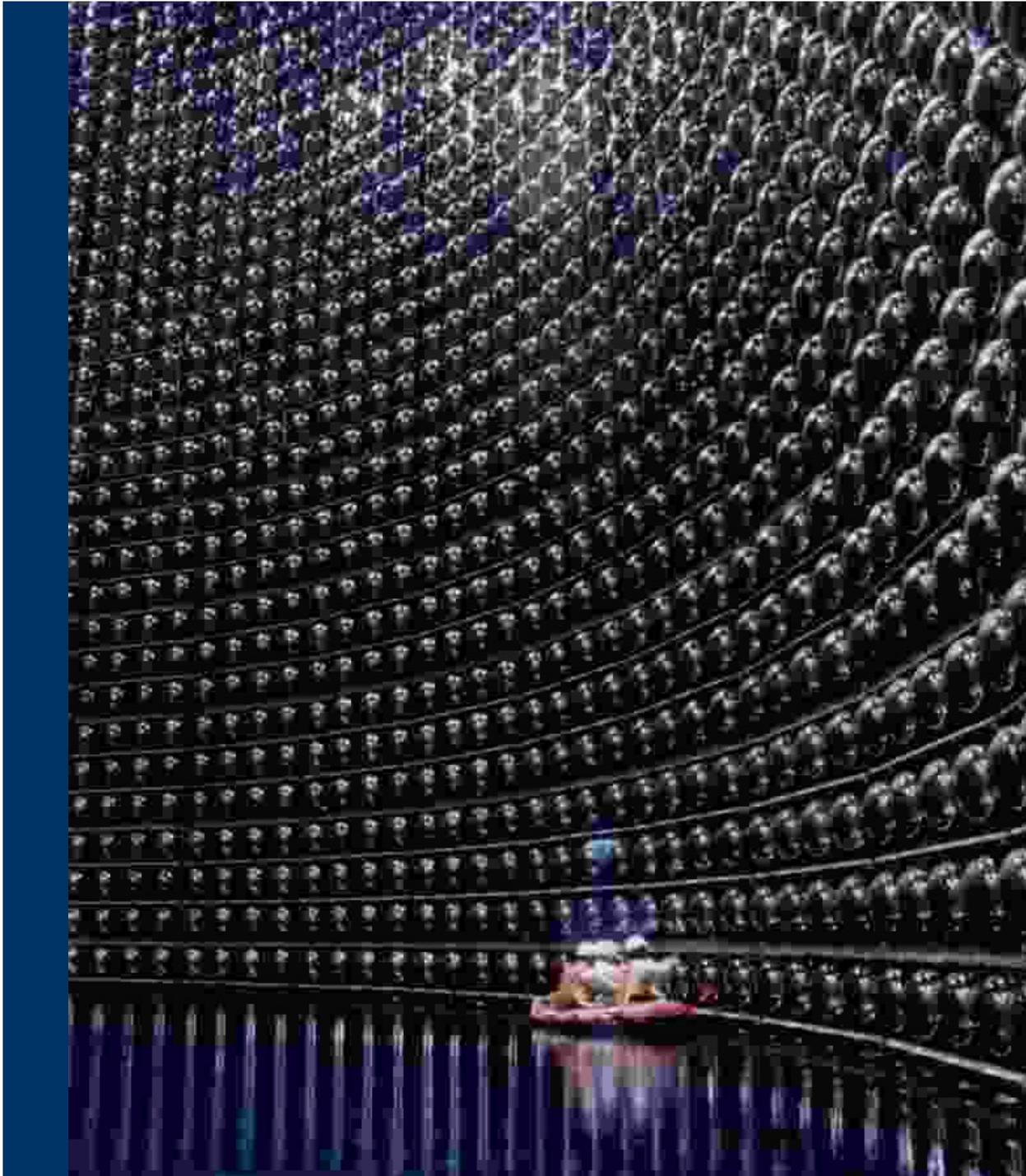
4 миллиона тонн на излучение

1 -2 миллиона тонн в форме солнечного ветра.

При таких темпах похудения за всю долгую жизнь Солнце может потерять не более 0.1% полной массы

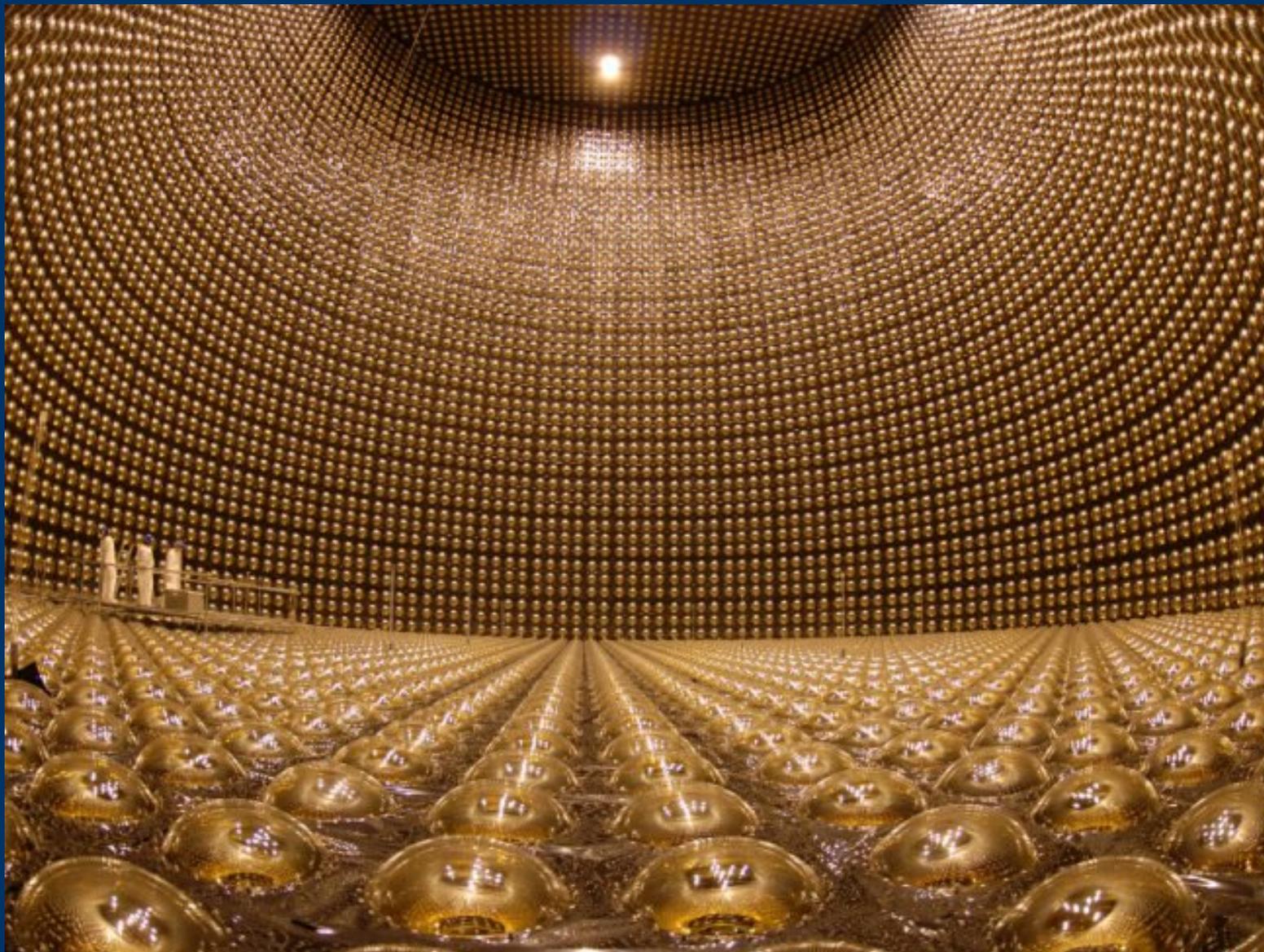
ПОПЫТКИ ПОЙМАТЬ СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

- Через каждый см^2 на Земле ежесекундно пролетает почти сто миллиардов нейтрино из недр Солнца.
- Первые эксперименты в глубокой шахте (Дэвис) дали $\sim 1/3$ ожидаемого количества электронного нейтрино.
- Осцилляции нейтрино? ДА!



Нейтринная
обсерватория
СуперКамиоканде
(Япония)

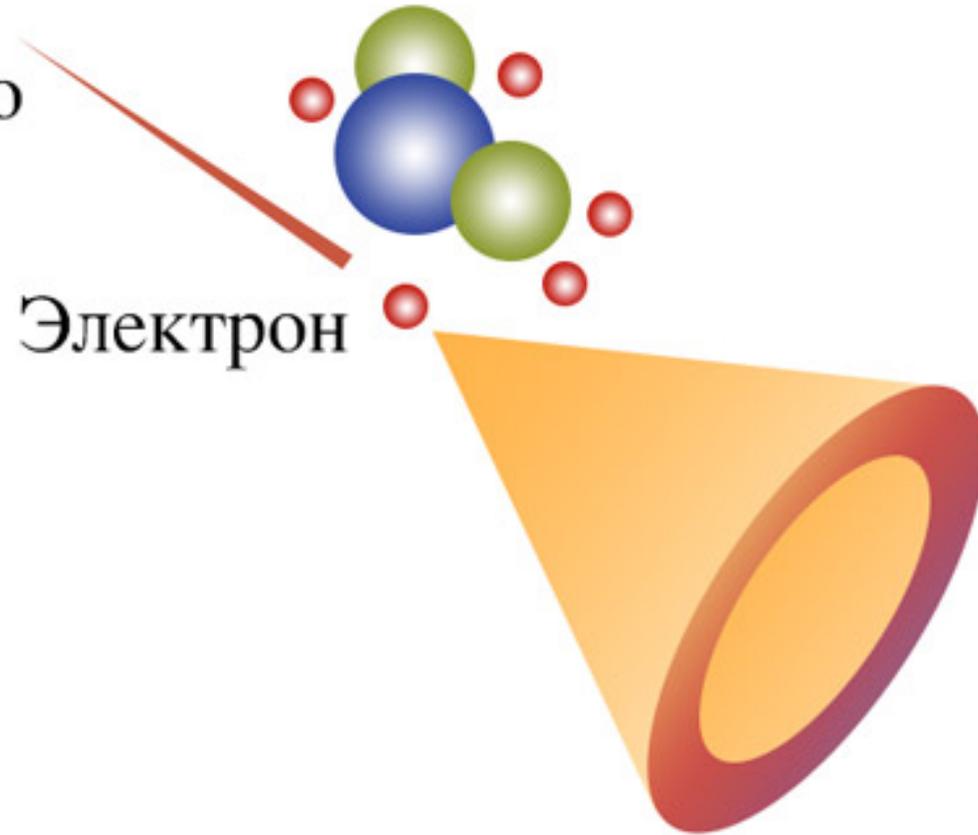
Нейтринная обсерватория Супер-Камиоканде (Япония).

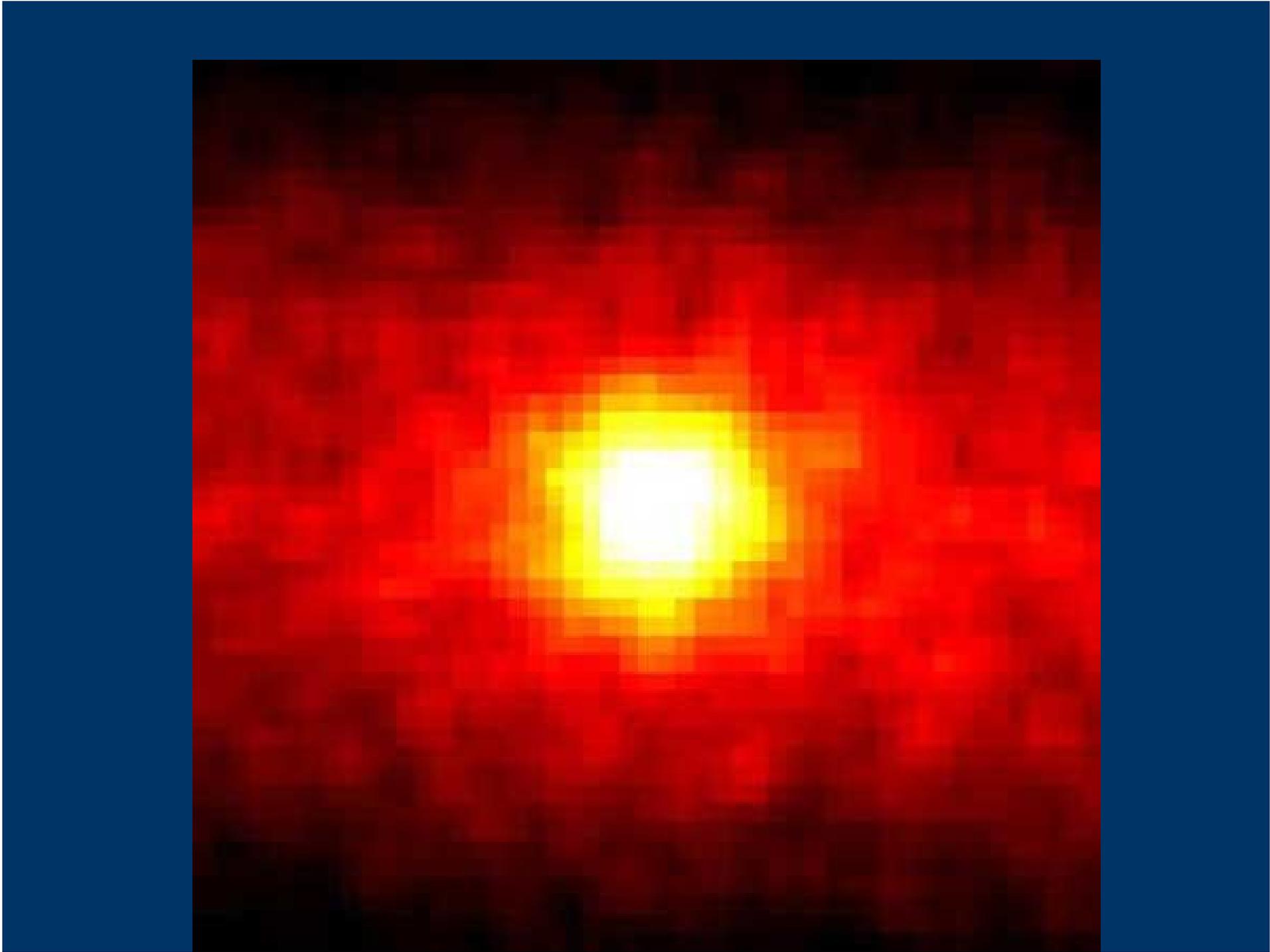


Нейтрино

Электрон

Черенковский свет



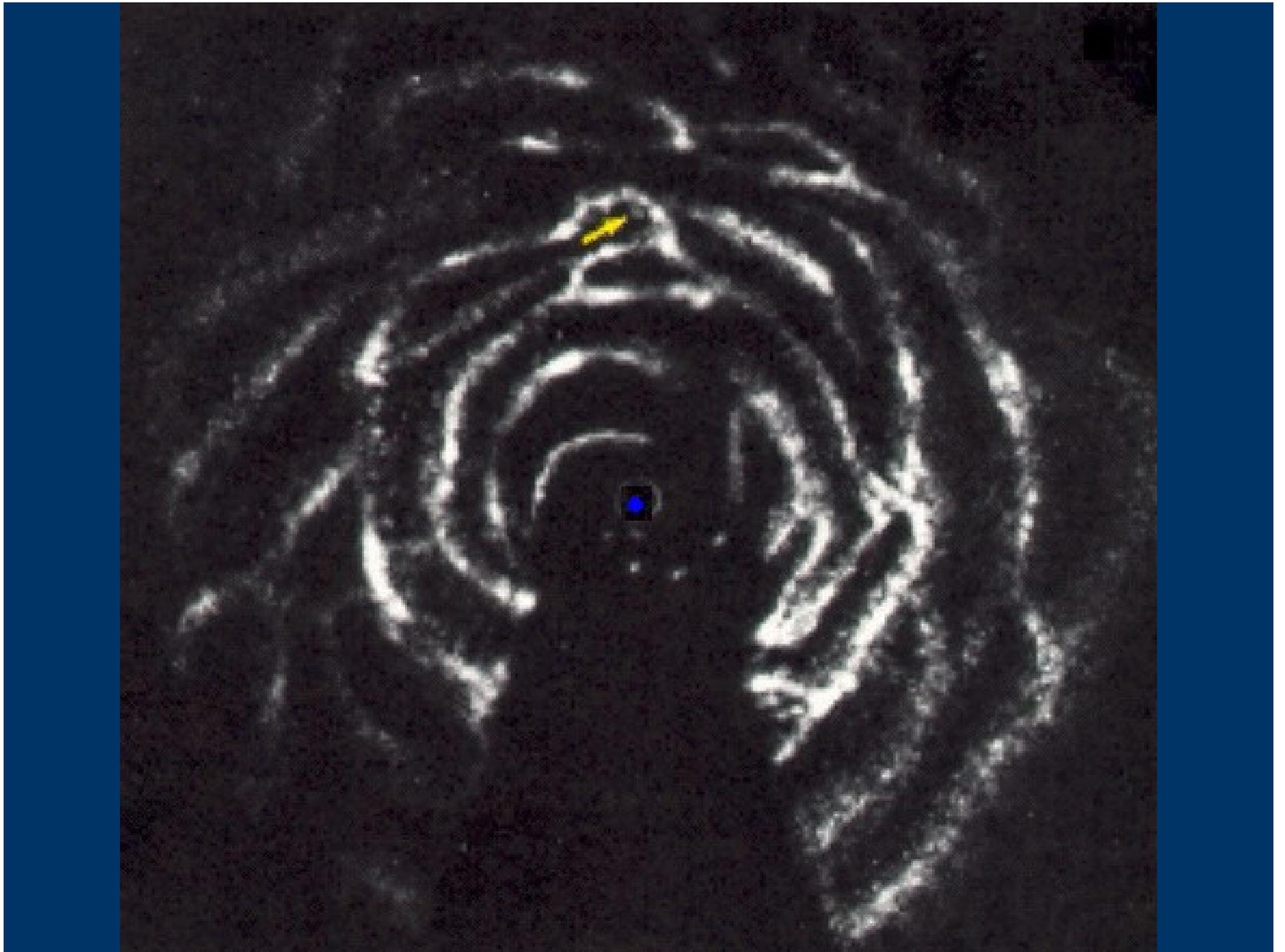


Ещё одно подтверждение правильности квантомеханических представлений об атоме

1951 г. Обнаружение теоретически предсказанного
радиоизлучения межзвездного водорода на 21 см

Гарольд Ивен,
Рук. Эдвард Парцель
Гарвардский ун-т, США.





Астрофизические источники излучения

- Тепловые:

звёзды, межзвёздный газ, горячая плазма (аккреционные диски вокруг компактных звезд, остатки сверхновых, горячий межгалактический газ...)

- Нетепловые:

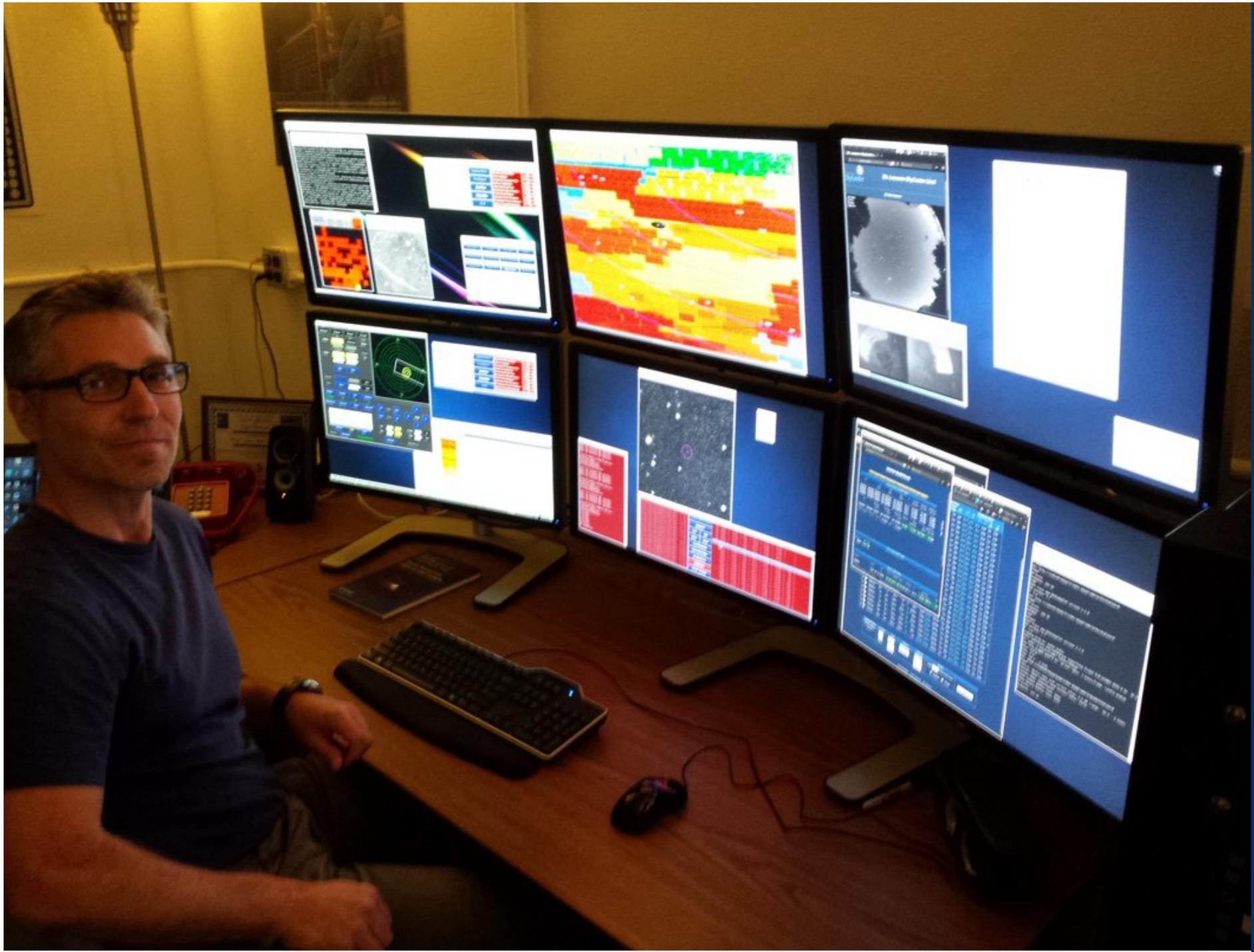
пульсары, ядра галактик и квазары, радиоджеты, космические лучи...)

Каналы информации:

- Электромагнитное излучение, проходящее сквозь атмосферу (оптическое и радио)
- Электромагнитное излучение, НЕ проходящее сквозь атмосферу (гамма, рентген, далёкое УФ, далёкое ИК)
- Космические лучи
- **Нейтринное излучение**

СОВРЕМЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ РАБОТАЮТ В ДВУХ РЕЖИМАХ:

- ЦИФРОВОЙ ФОТОАППАРАТ
- (фотометрия или угломерные измерения)
- ЦИФРОВОЙ СПЕКТРОГРАФ
- (спектральные наблюдения).

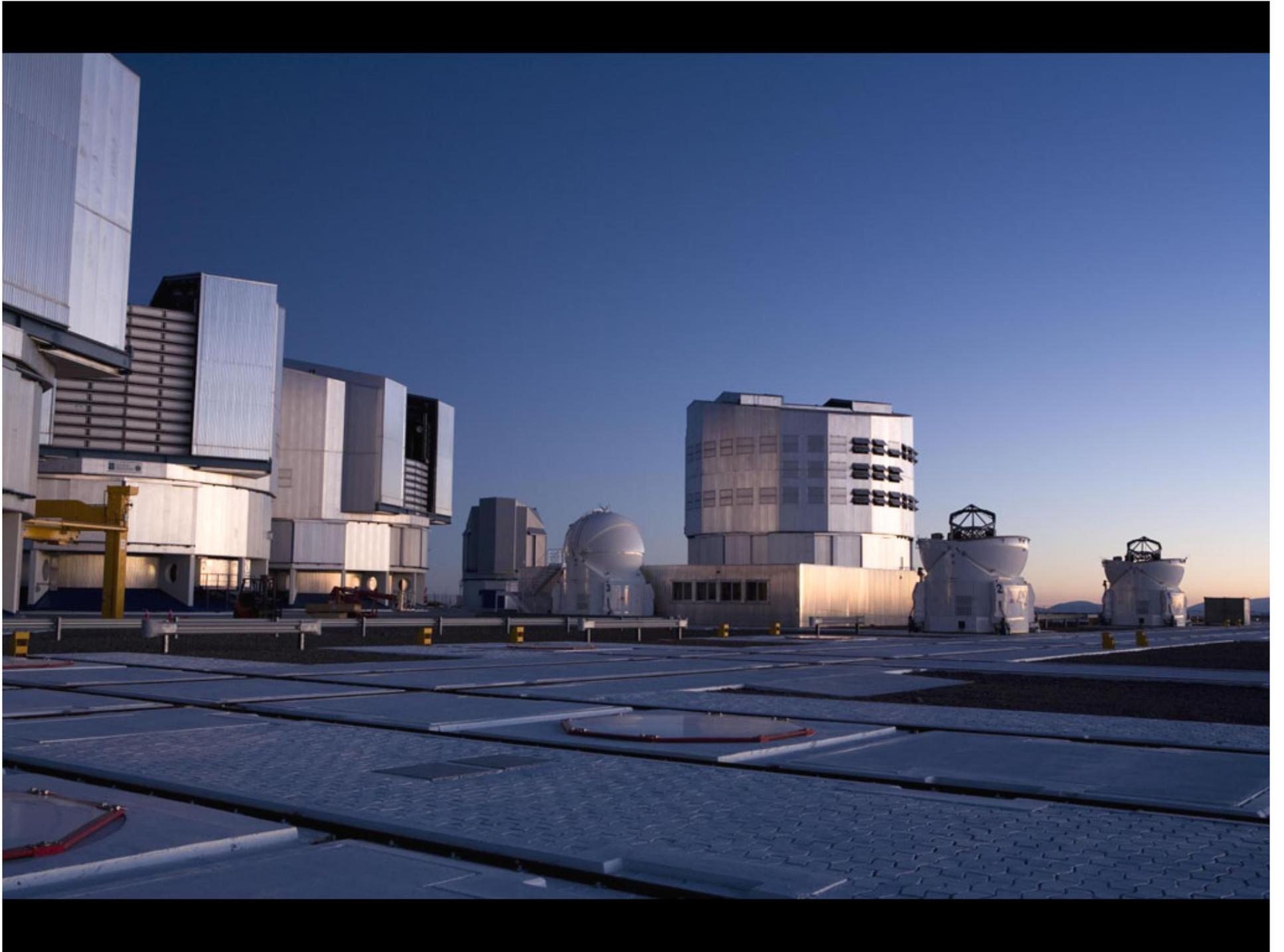




БТА (Россия)







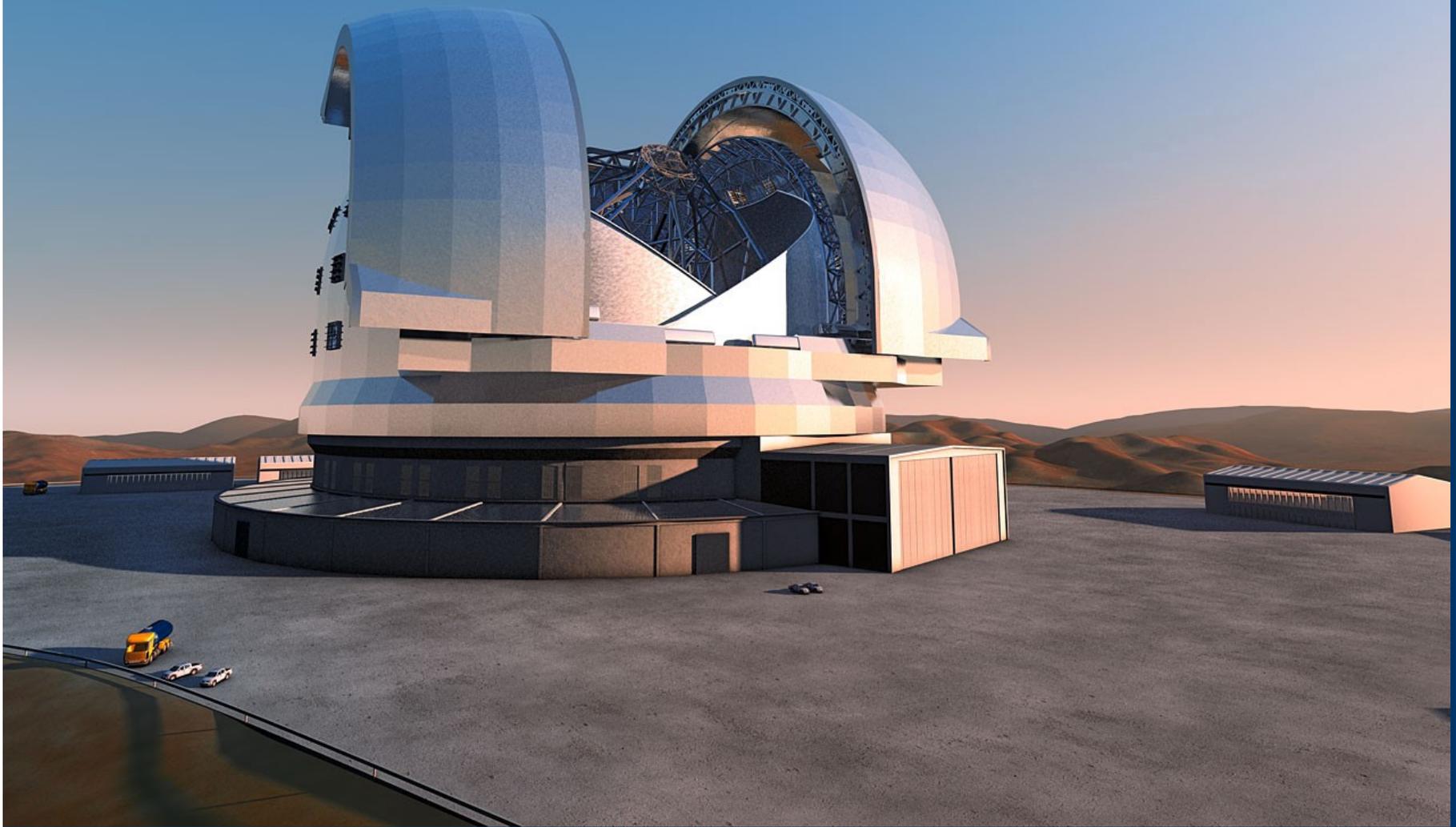
LBT 2x8.4m
Arizona, USA



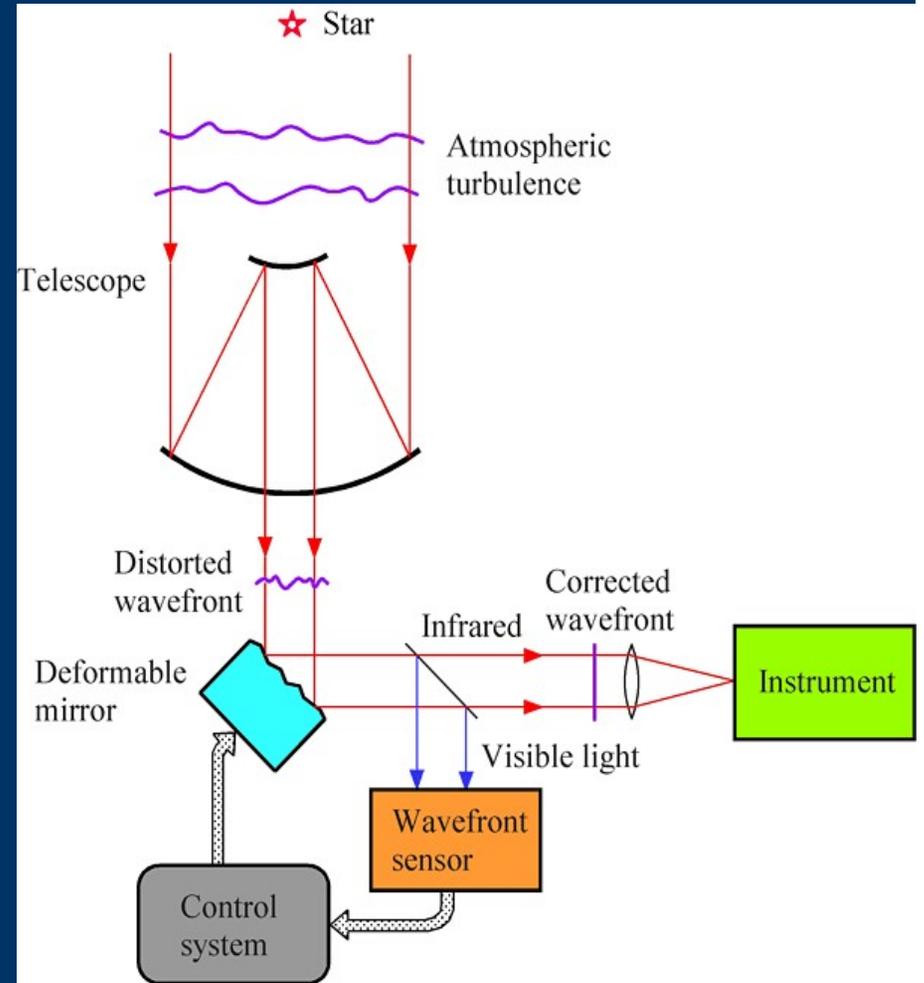
Канарские острова
10.4 м
Gran Telescopio CANARIAS (GTC)
36 сегментов.



E-ELT



Адаптивная оптика



Schematic diagram of adaptive optics

FAST D500m



VLA, (США)



Космический радиоинтерферометр РАДИОАСТРОН

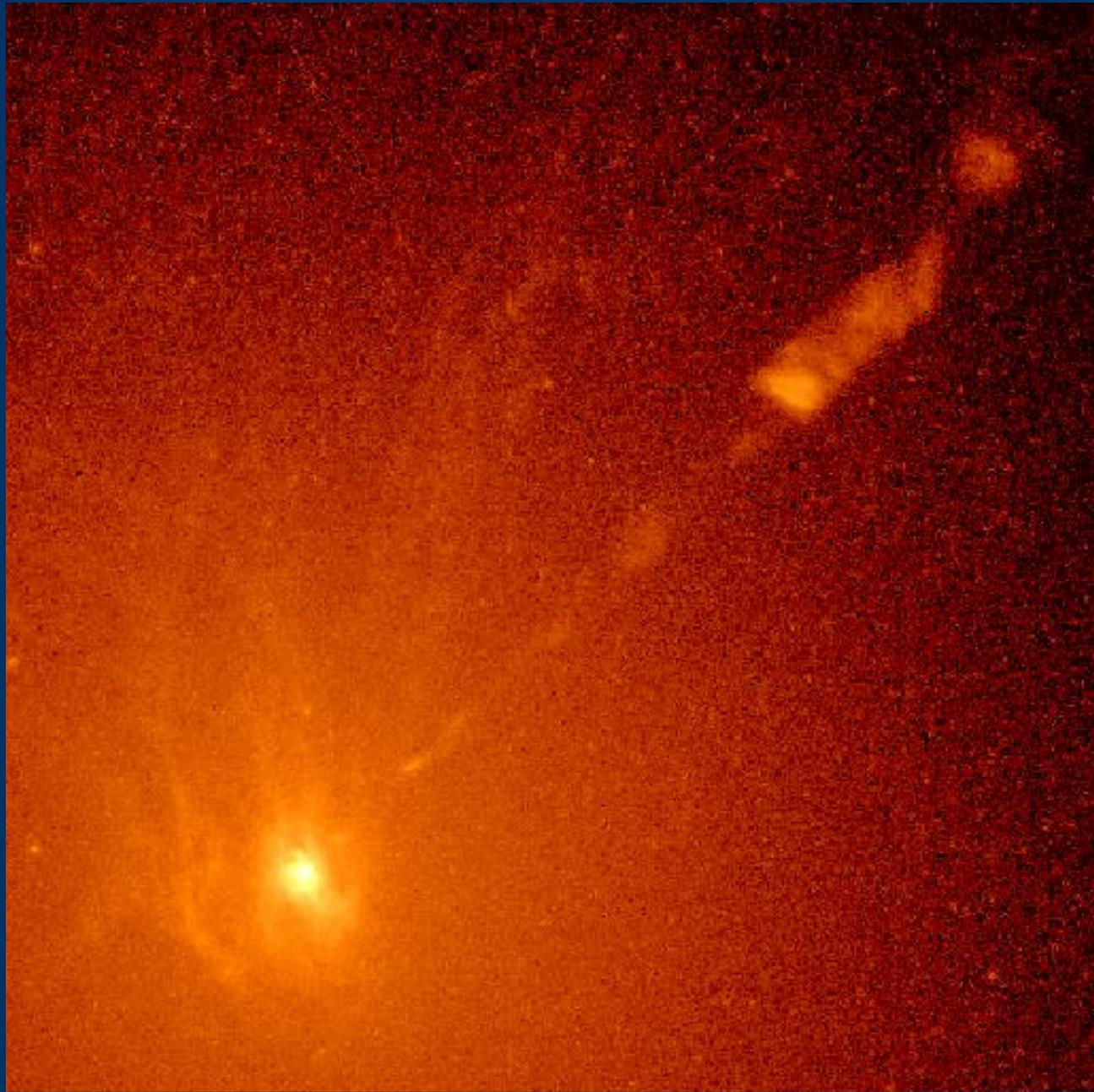
- *Запущен в 2011 (Россия)*



Это угол, под которым видна толщина спички с расстояния 10 тыс.км!

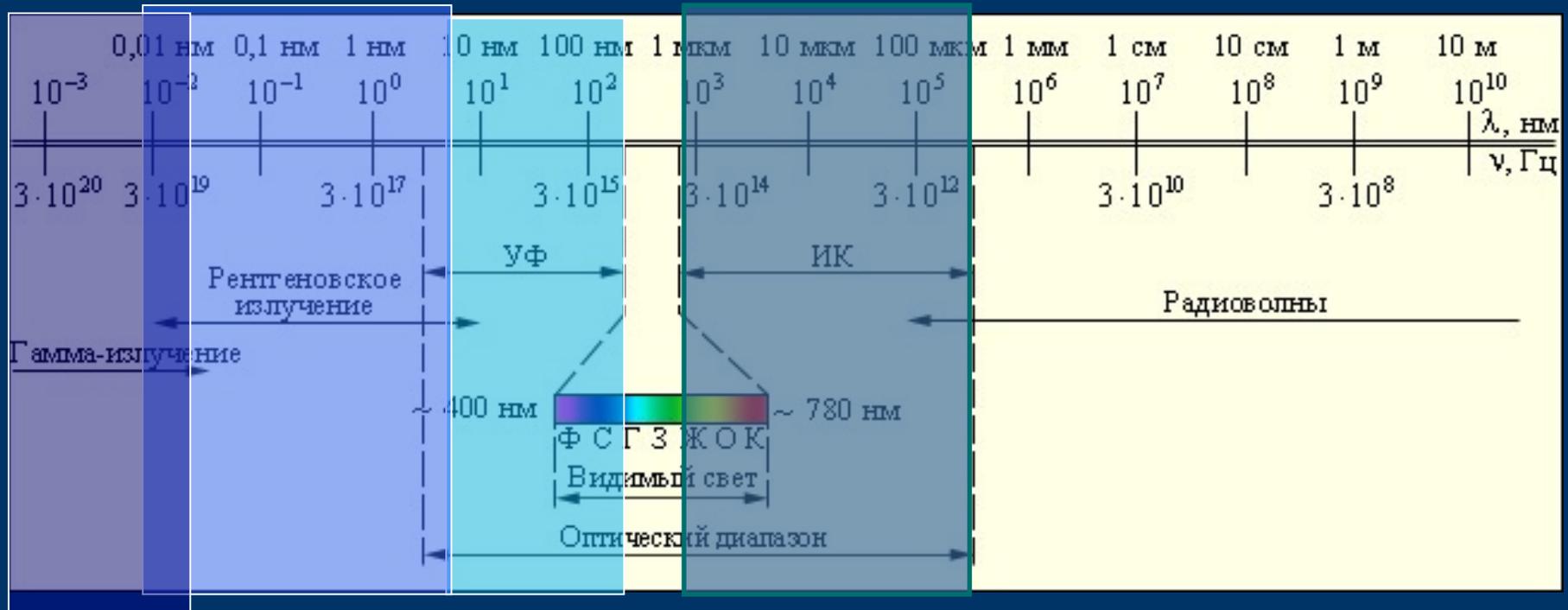
- Антенна 10м
- Апогей орбиты-
350 тыс.км
- Достигнутое
угл. разрешение-
- 10 микросекунд





Спектр электромагнитного излучения

- 3000-100 А – ультрафиолетовый свет



Телескоп им. Хаббла





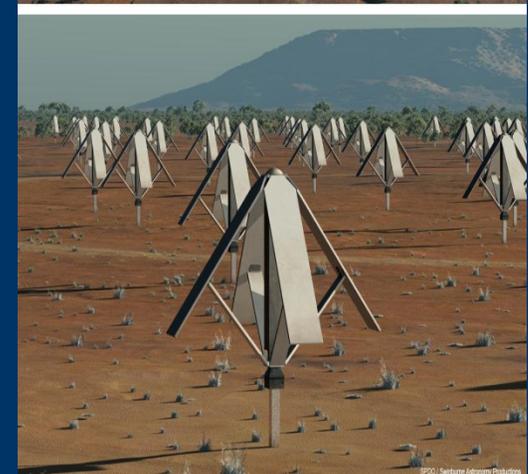






SKA- самый крупный международный проект

- Система из нескольких тысяч антенн трех типов суммарной площадью в один миллион кв. метров, разбросанных в пределах области размером в 3000 км
- Стоимость не менее 2 млрд Евро.
- Исследование эволюции Вселенной
- Исследование природных ускорителей элементарных частиц
- Исследование окрестностей черных дыр в ядрах галактик

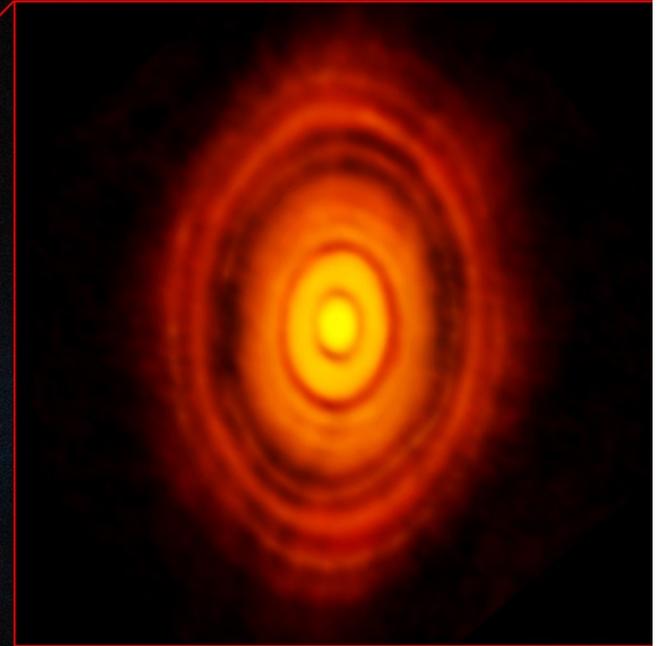


Комплекс ALMA

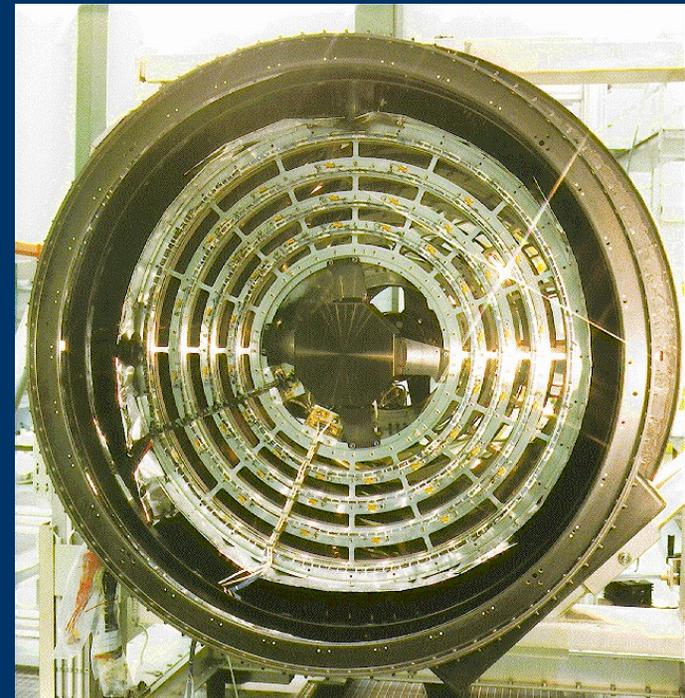
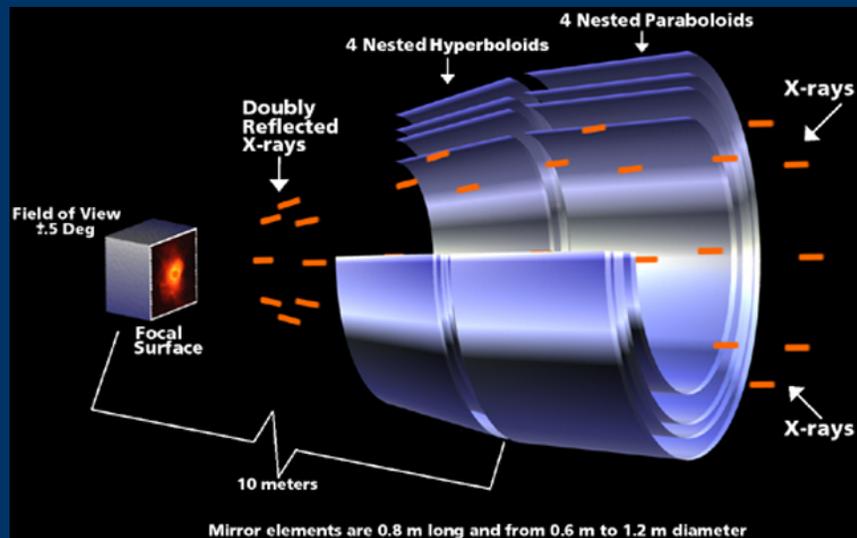


ALMA Протопланетный диск

HH 150
HL Tauri
XZ Tauri



- Наиболее мощные источники энергии – это взрывы звёзд и активные ядра галактик. Их активность сопровождается мощным рентгеновским и гамма-излучением.
- Требуются внеатмосферные наблюдения.

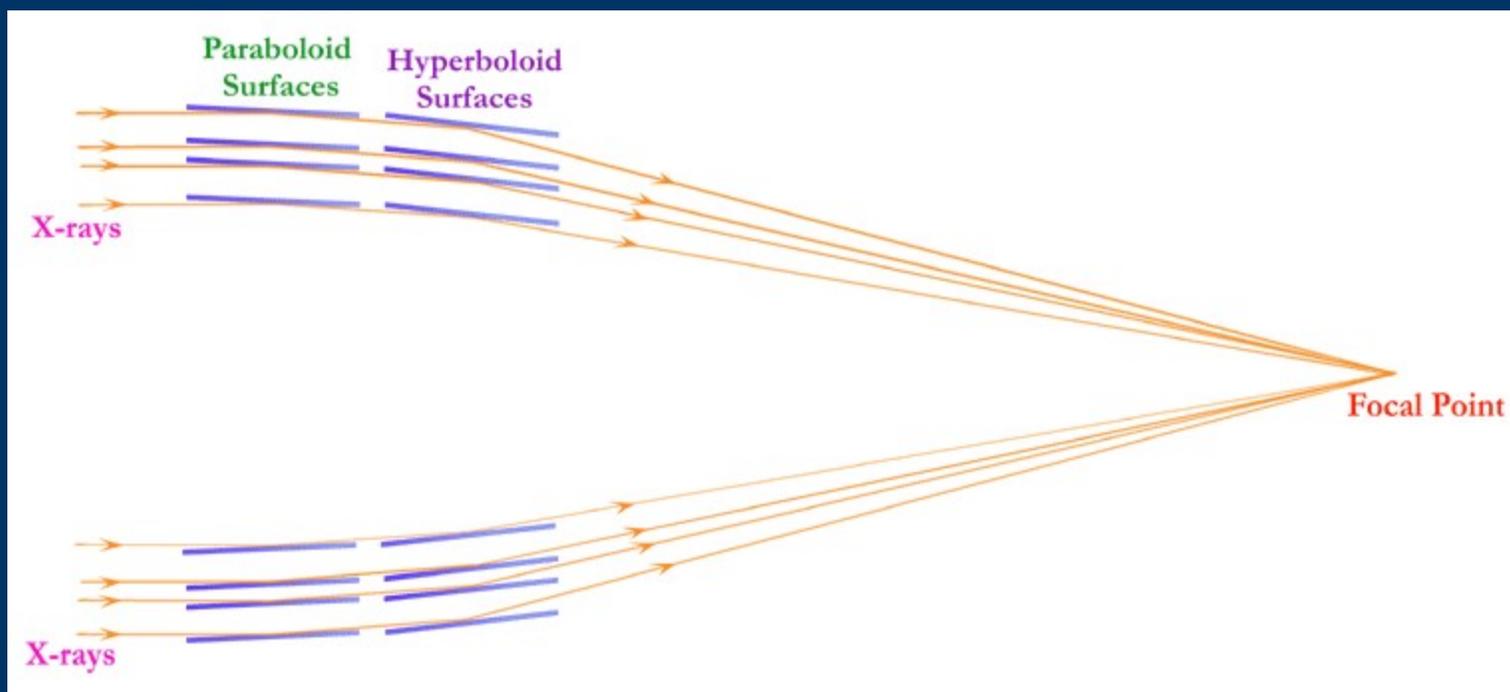


Угловое разрешение современных
рентгеновских телескопов (Chandra)
1 сек. дуги

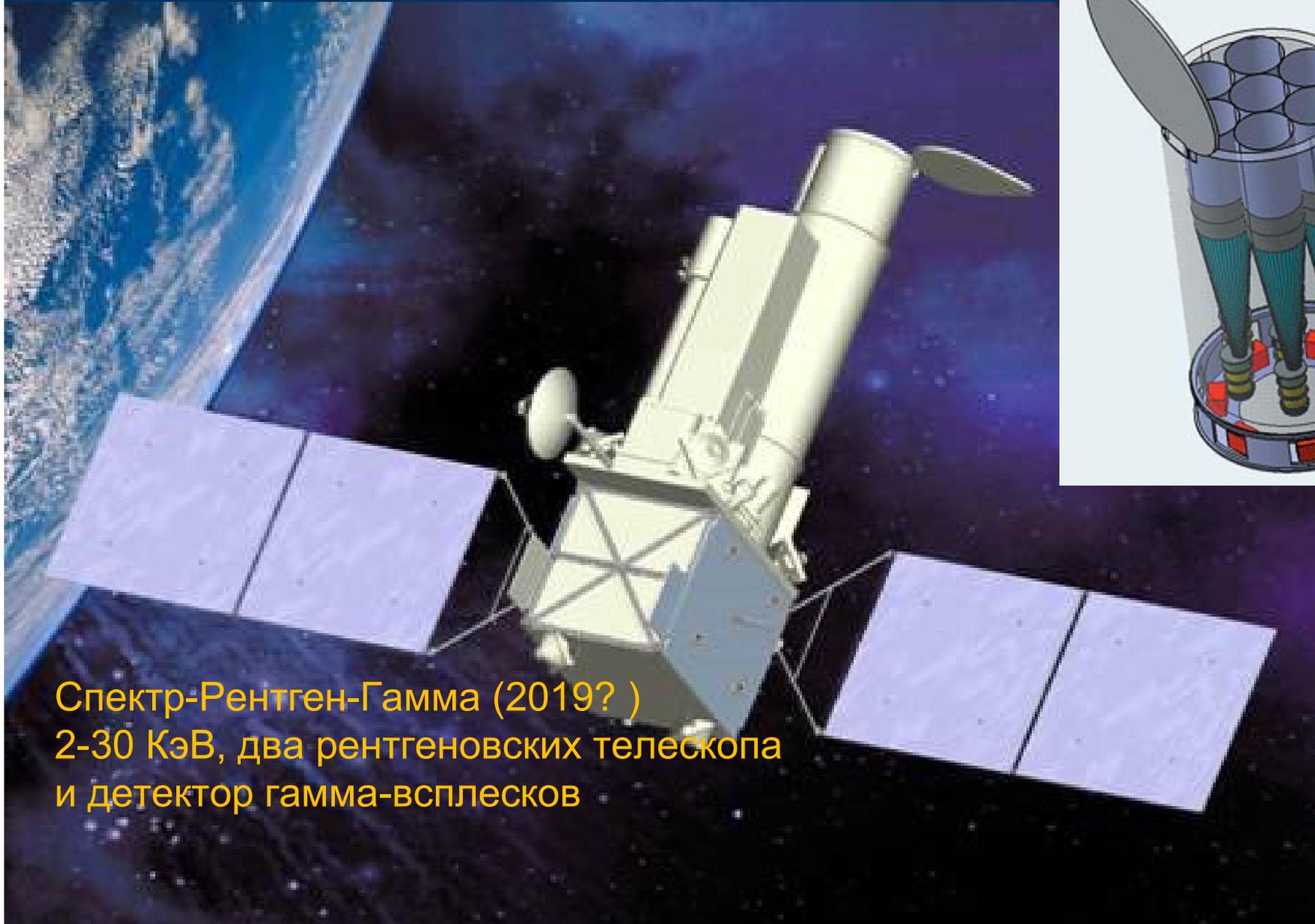
Рентгеновские телескопы косоугольного падения (Обсерватории Эйнштейн, XMM-Ньютон, Чандра)

Принцип работы: фокусировка лучей при косом падении на металлы

Главный недостаток: длинный фокус (10-ки м) + малая эффективная площадь



Цель- исследовать эволюцию галактик
и скоплений галактик в масштабах всей Вселенной

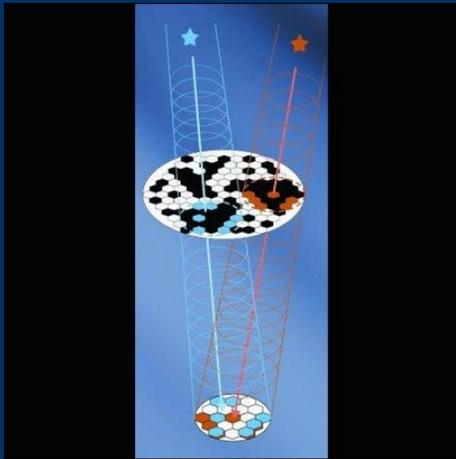


Спектр-Рентген-Гамма (2019?)
2-30 КэВ, два рентгеновских телескопа
и детектор гамма-всплесков

ГДЕ РОЖДАЕТСЯ ЖЁСТКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (рентген, гамма) И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЧАСТИЦЫ?

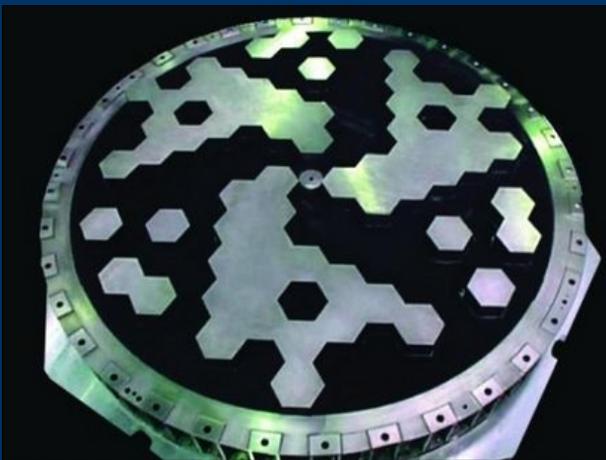
- Вспышки на Солнце (потому что близко)
- Мощных источников вблизи солнечной системы и среди ближайших звёзд НЕТ.

Гамма-телескопы кодированной апертуры: обсерватория ИНТЕГРАЛ



Угловое разрешение ~ 1 градуса
(20 кэВ-10МэВ)

Маска SPI телескопа INTEGRAL
Детекторы: крист. Ge, CsI, CaTi
ЛЗ



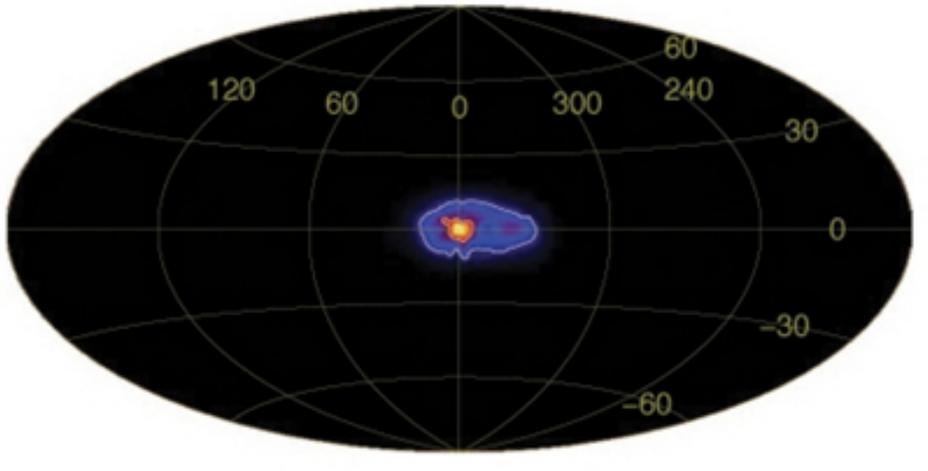
30.06.2018

Карта неба в диапазоне 20-60 кэВ



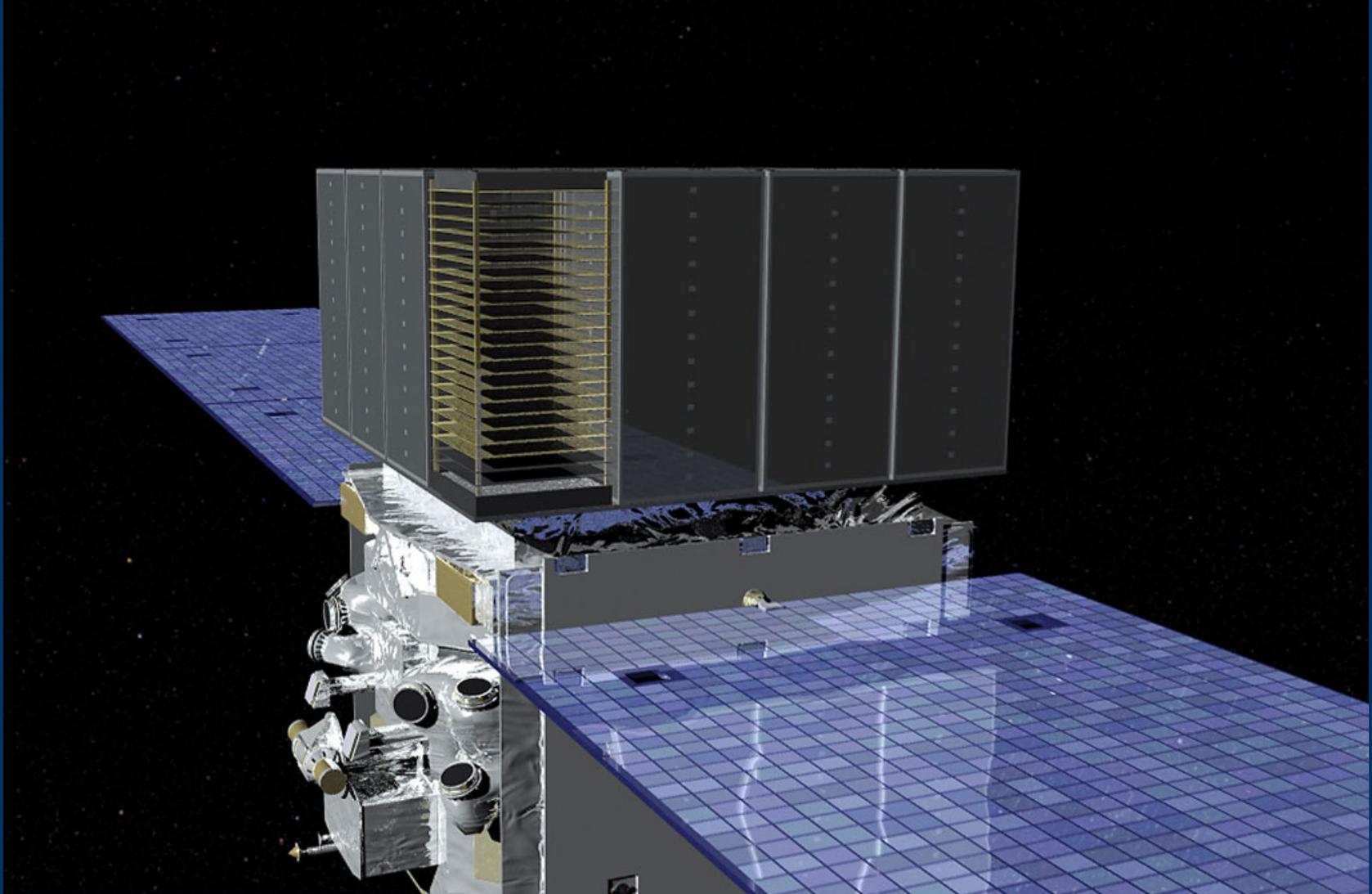
Ядра галактик и квазары, НЗ и ЧД в тесных двойных системах, магнитары, рентгеновские пульсары

Аннигиляционная линия 511 кэВ ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$)



- Из области центра Галактики
- Соответствует $\sim 10^{43}$ аннигиляций в секунду
= 10^{10} тонн антивещества в секунду!
- Нерешенная проблема происхождения

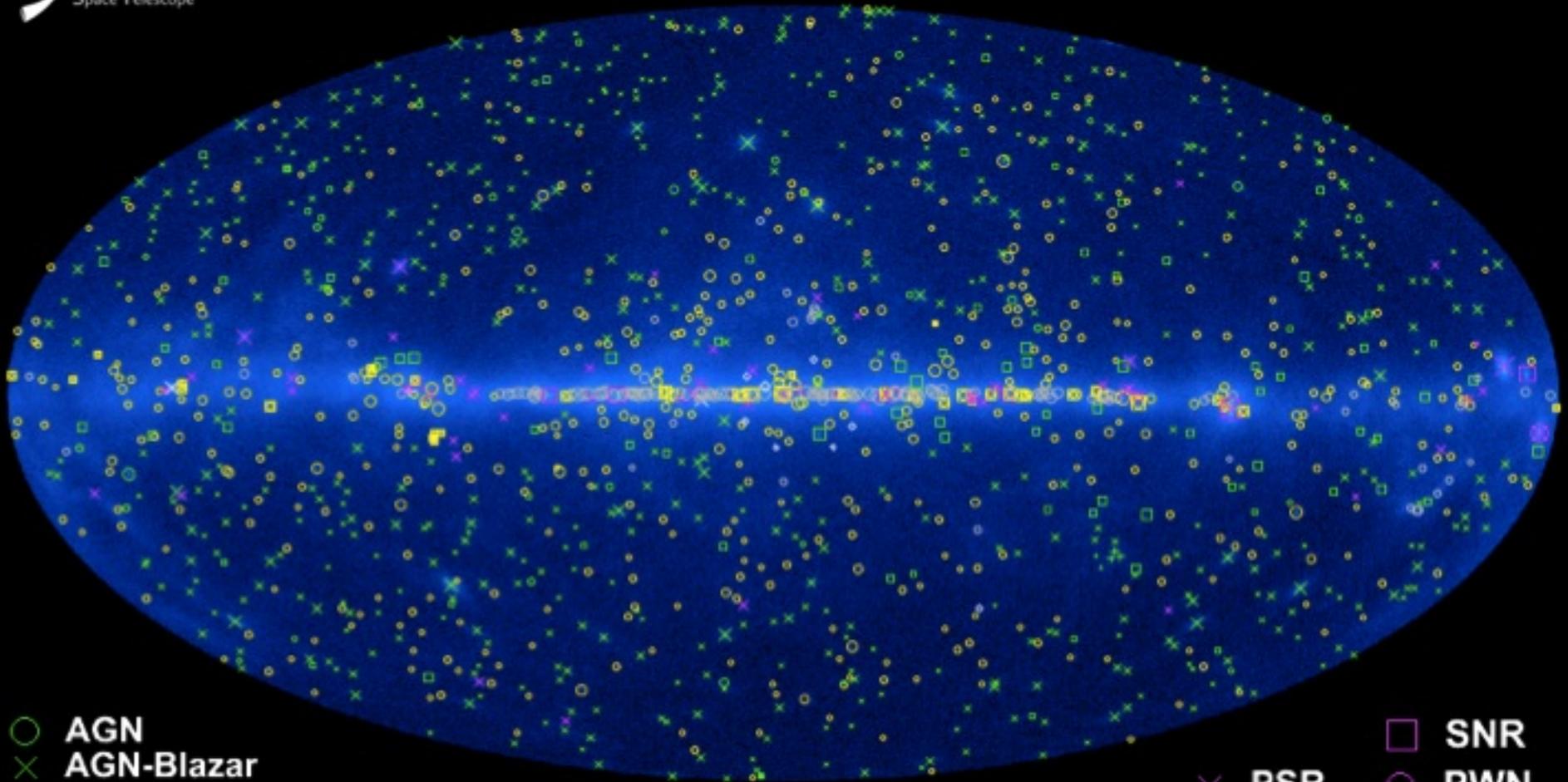
Fermi (NASA) 30 МэВ-300 ГэВ Запущен в 2008.





The Fermi LAT 1FGL Source Catalog

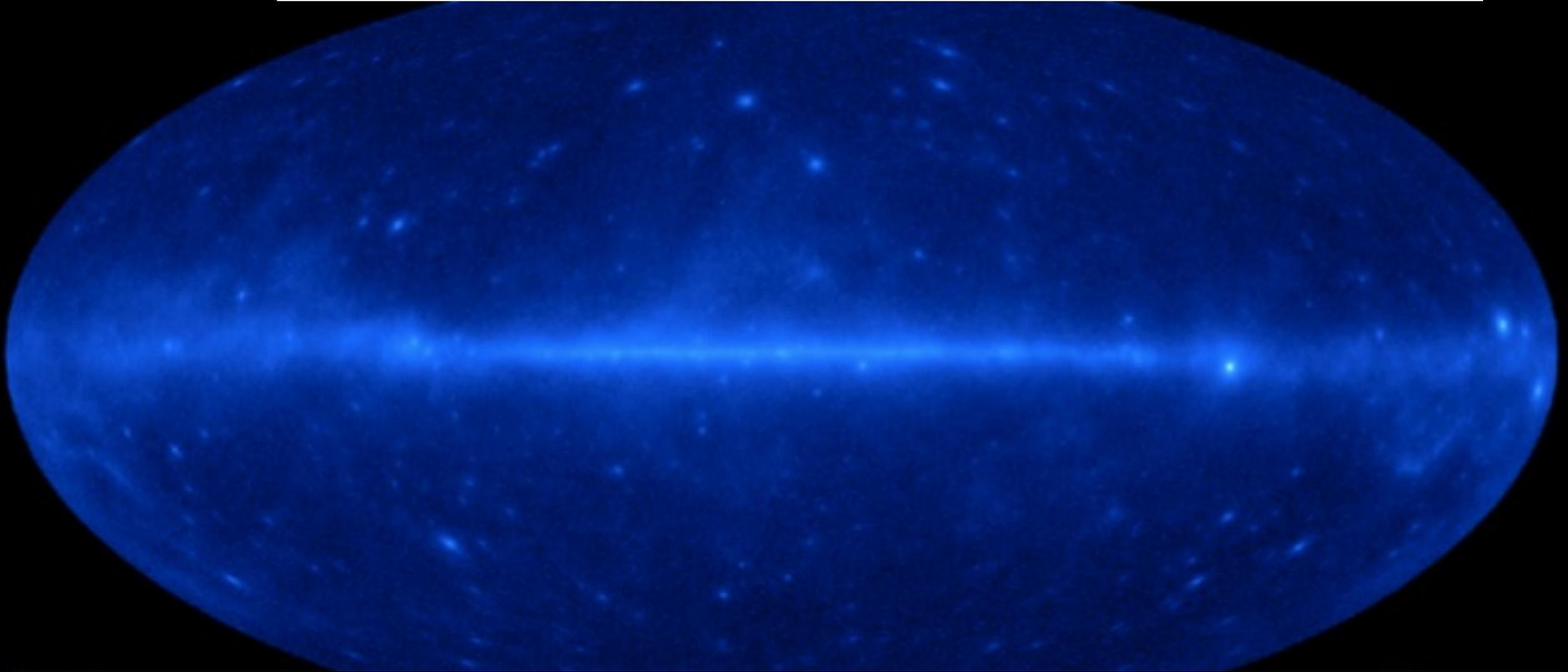
1451 Sources



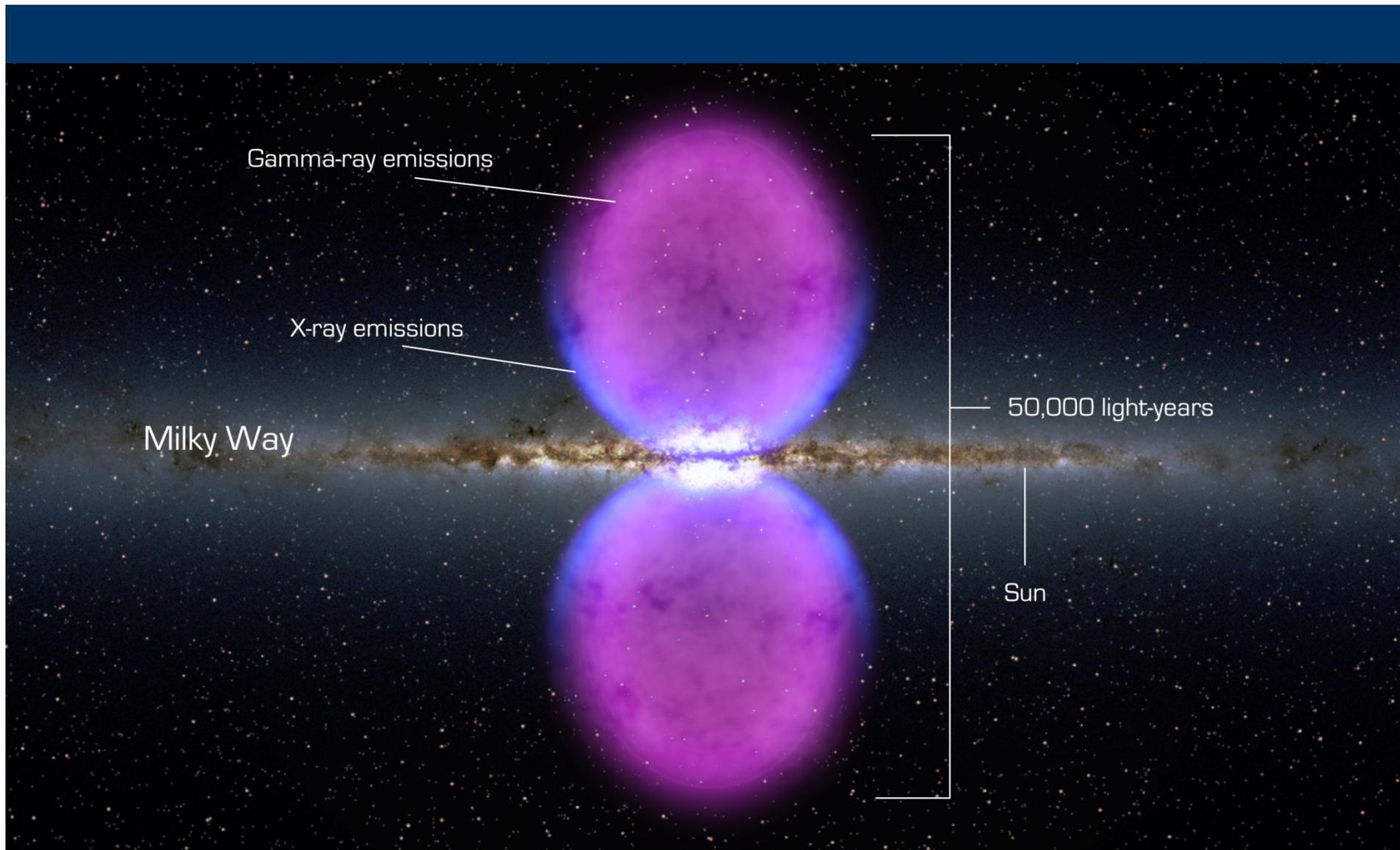
- | | |
|---|--------------------|
| ○ AGN | □ SNR |
| × AGN-Blazar | ○ PWN |
| □ AGN-Non Blazar | × PSR |
| ○ No Association | ⊗ PSR w/PWN |
| □ Possible Association with SNR and PWN | ◇ Globular Cluster |
| ○ Possible confusion with Galactic diffuse emission | × HXB or MQO |
| □ Starburst Galaxy | |
| + Galaxy | |



Фоновое гамма излучение (Fermi, $E > 1$ GeV image)



Излучение рождается при взаимодействии релятивистских протонов с атомами межзвёздной среды



Гамма-пузырь, открытый Fermi (2010). Возможно, связан с активностью центральной черной дыры в Галактическом центре

30.06.2018

ЛЗ

Vela – спутники-шпионы

*Договор о запрете ядерных испытаний,
1963*

Первые Vela запущены 1963



Спутники Vela 5 (DoD, AEC) запущены 23 мая 1969 на высокоапогейную орбиту (118,000 km), Пара этих спутников и предшествующие Vela 4, открыли первые гамма-всплески. Открытие опубликовано в статье Klebesadel, Strong, and Olson (ApJ, 182, 85) в 1973.

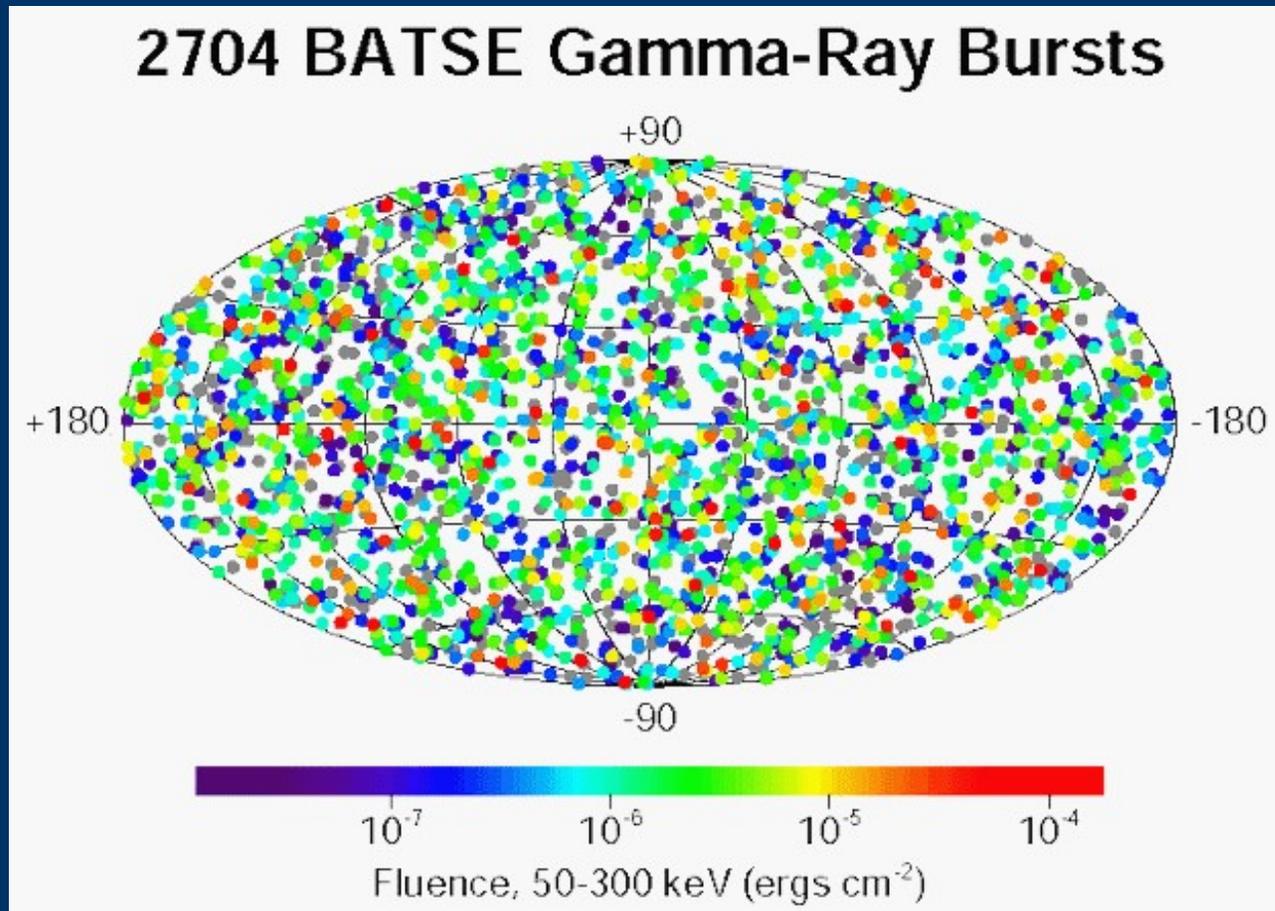
Некоторые из ГАММА- всплесков ассоциируются с самыми энергичными сверхновыми («гиперновые»)

Видны до красных смещений $z \sim 6.3$
– самые далекие взрывы во Вселенной

BATSE $\sim 1/\text{сут}$
 $S = 10^{-7} - 10^{-4}$ эрг/см²

Энерговыделение только в гамма-излучении порядка 10^{51} эрг

Послесвечения гамма-всплесков видны во всех диапазонах (от радио до рентгеновского)



Как определяют температуру космических тел и сред?

Для непрозрачных сред:

- По непрерывному спектру излучения

Для прозрачных сред:

- По относительным интенсивностям спектральных линий различных элементов

В более сложных случаях:

- Расчёт переноса излучения в среде

Параметры наблюдаемых космических сред

- Температура

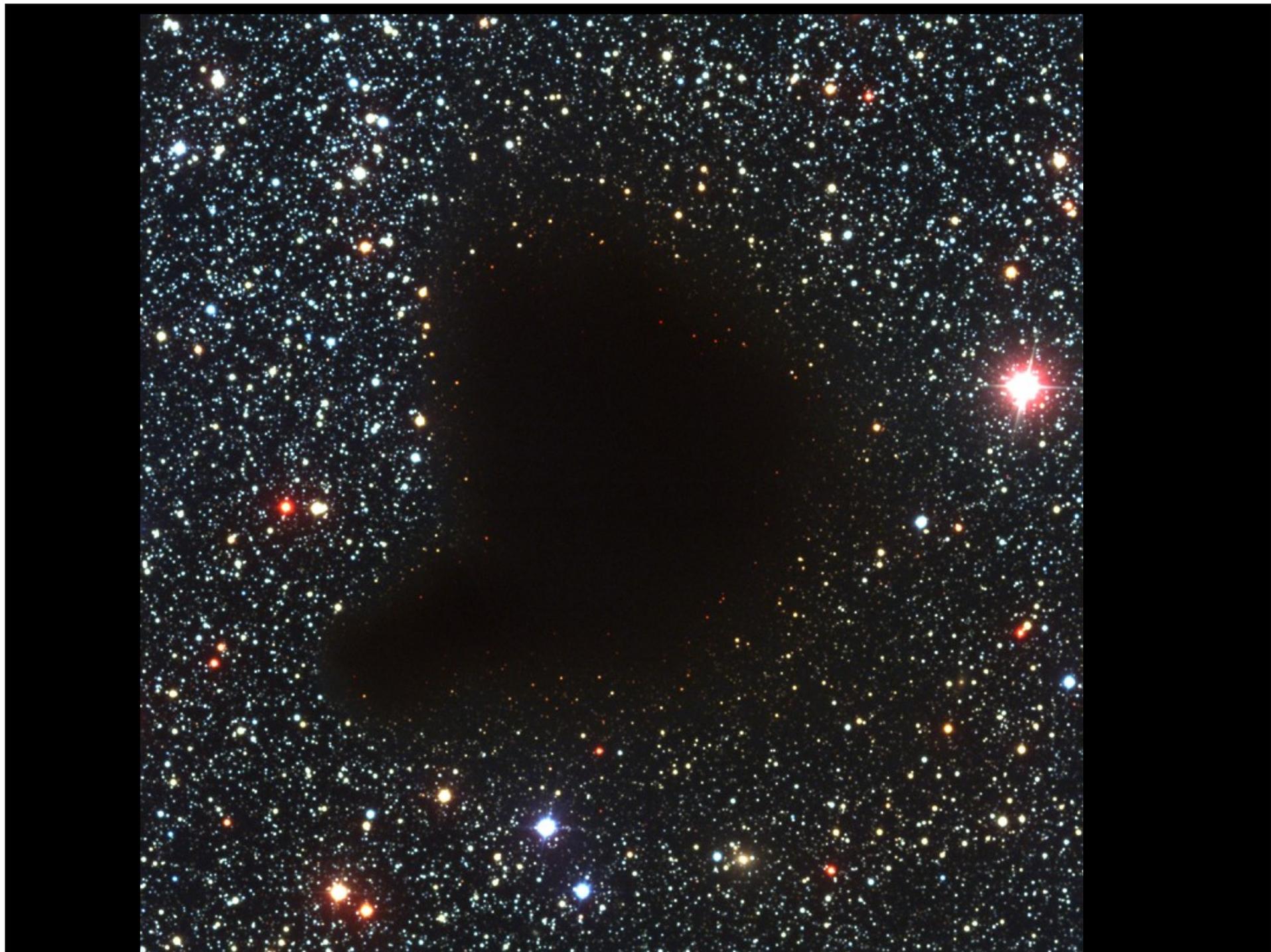
От 3К до 10^9 К

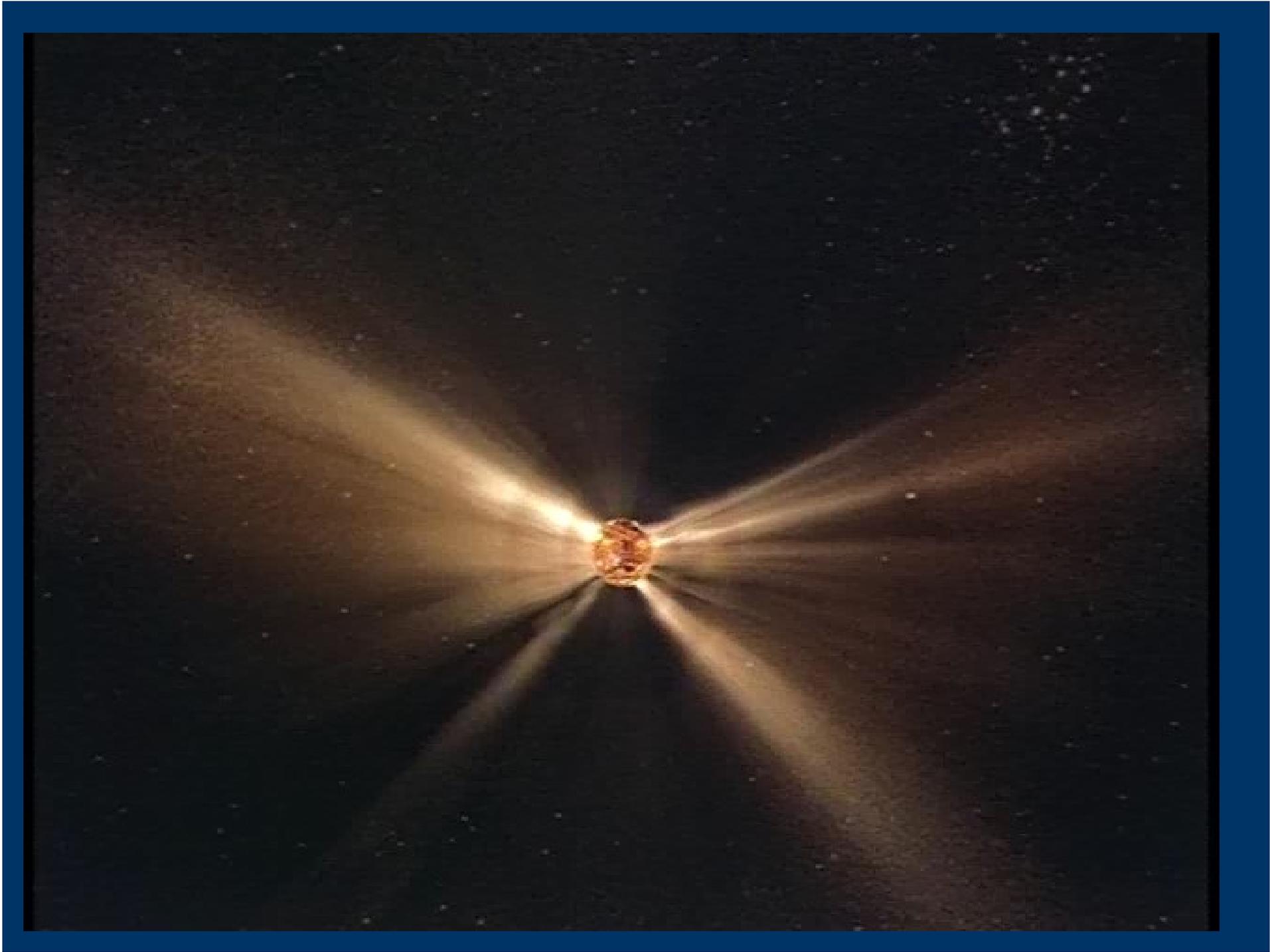
- Плотности

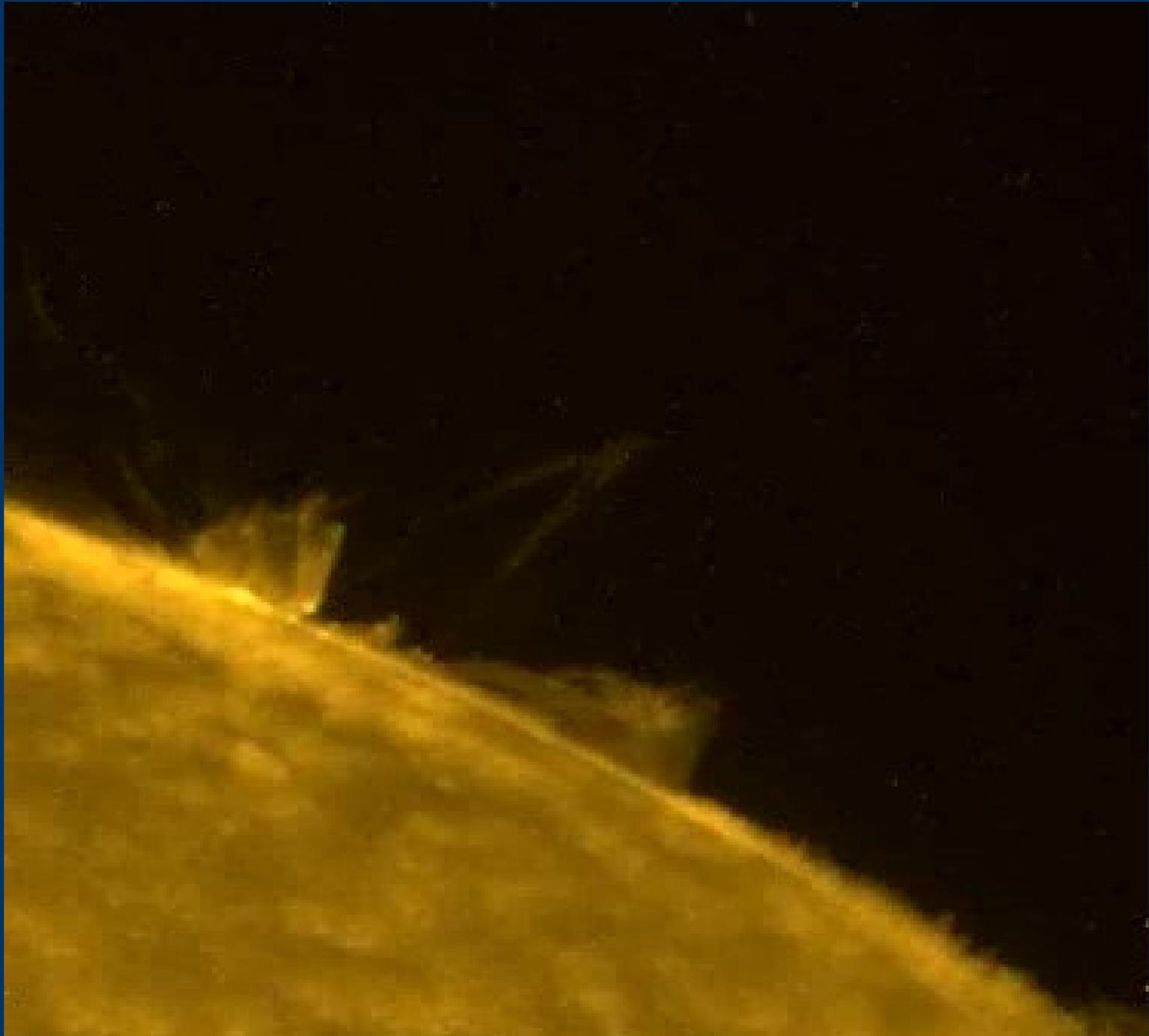
От 10^{14} г/см³ до 10^{-28} г/см³

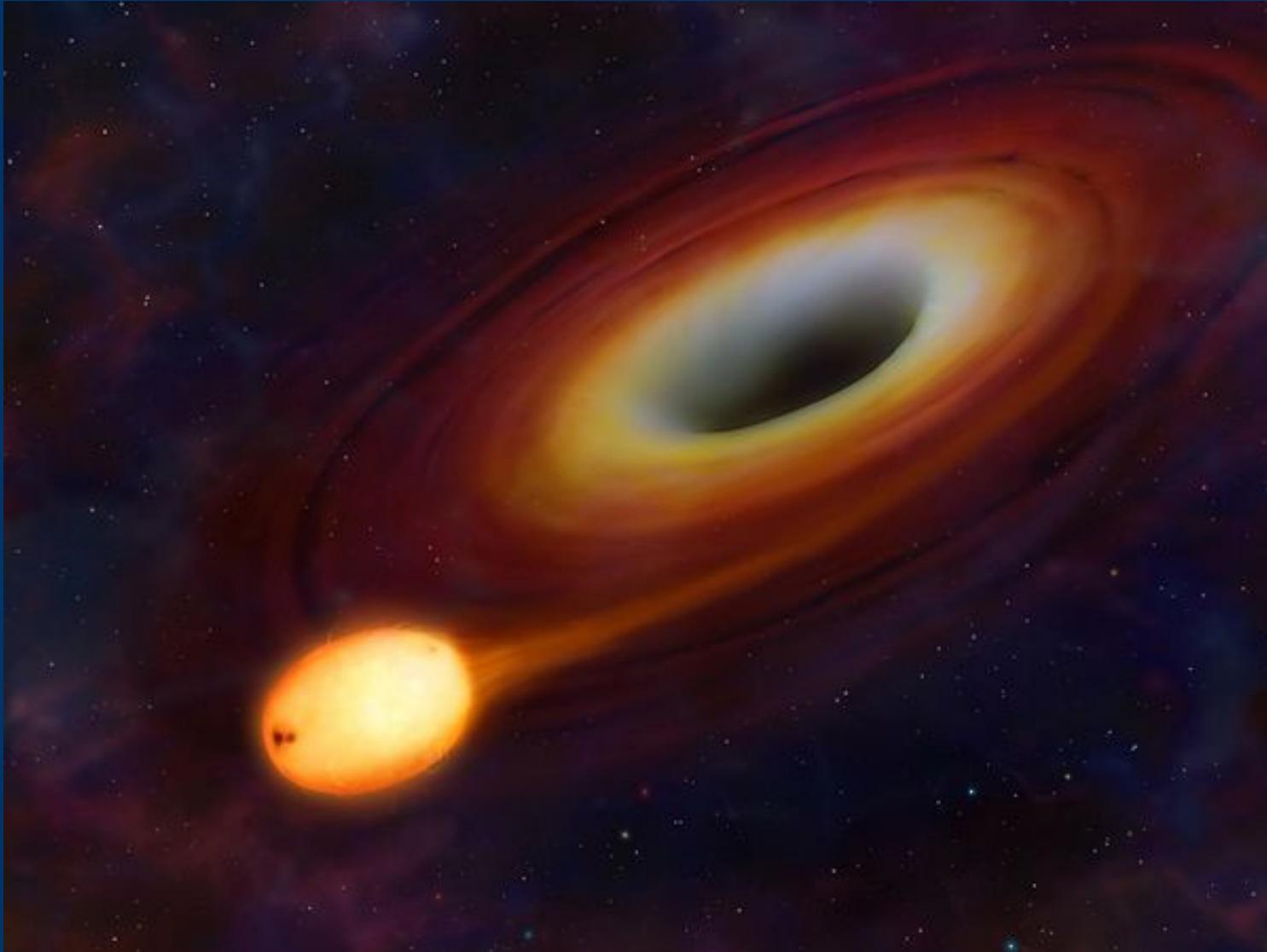
- Индукция магнитного поля

От 10^{-7} Гс до 10^{11} Гс









Низкие и сверхнизкие ПЛОТНОСТИ

- 1 атмосфера = $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Сверхвысокий лабораторный вакуум
 $10^{-5} \text{ Па} \sim 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$

Видимая поверхность Солнца 10^{16} см^{-3}

Солнечная корона $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$

Молекулярные облака $10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$

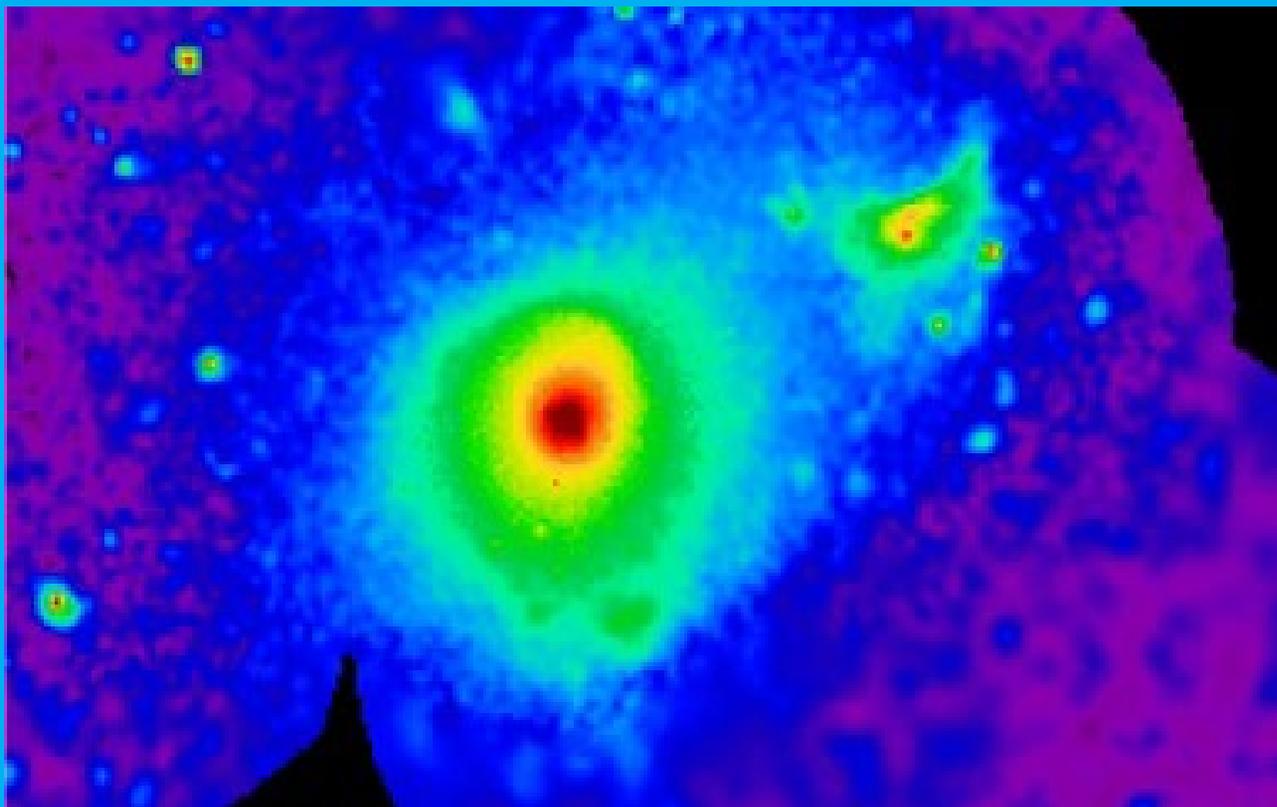
Межзвездный газ $10^{-1} - 1 \text{ см}^{-3}$

Газ в скоплениях галактик $10^{-2} - 10^{-4} \text{ см}^{-3}$

Средняя концентрация атомов во Вселенной $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-3}$



Bubble Nebula

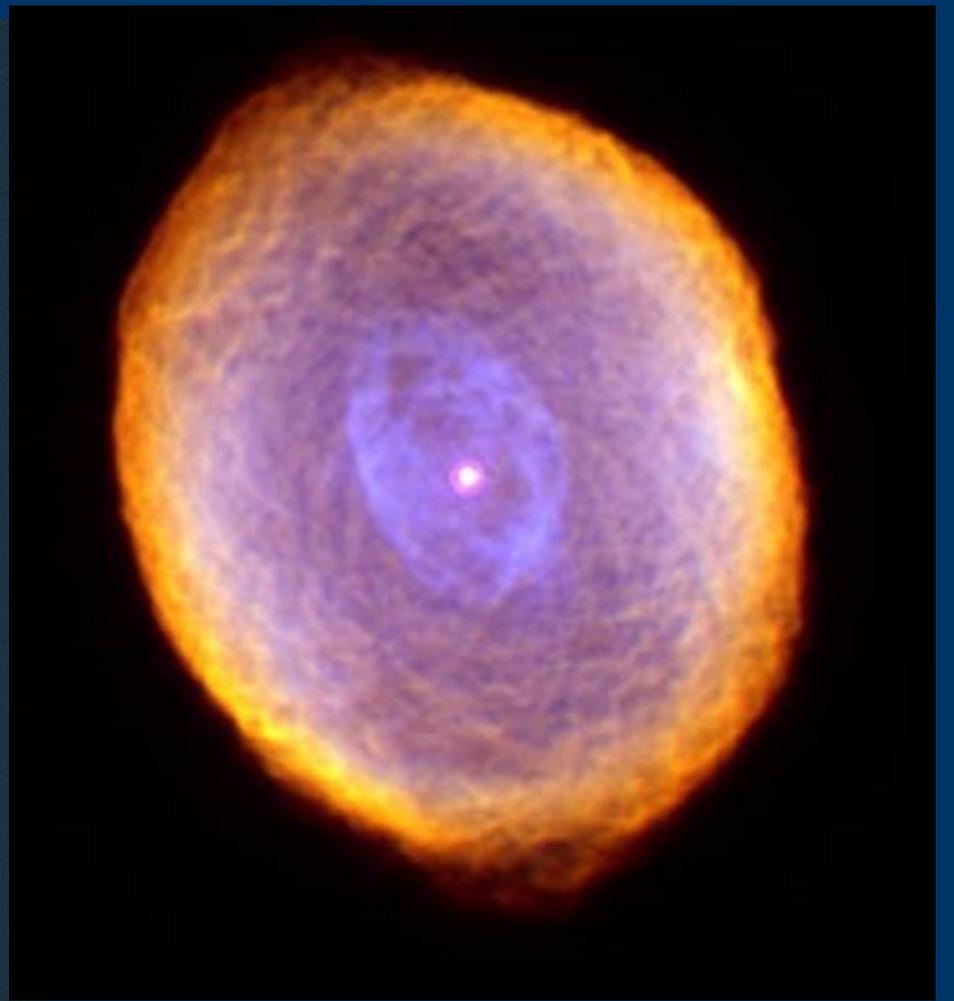


Область
скопления VIRGO.
Излучение
газа с $T \sim 10^6$ К
и концентрацией
 $n \sim 10^{-3}$ см $^{-3}$

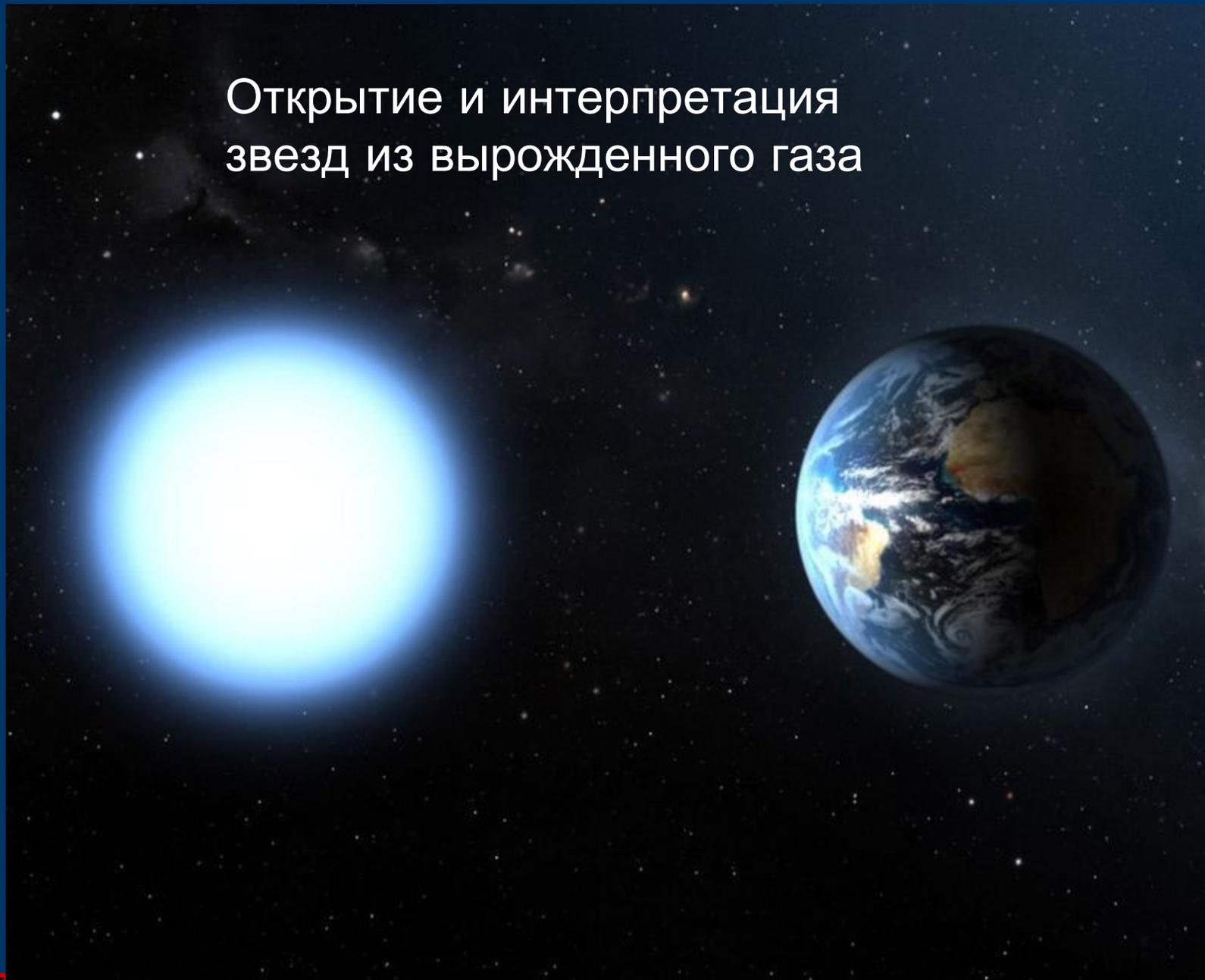
Высокие и сверхвысокие плотности

- Осмий 22 г/см^3
- Свинец 11 г/см^3
- Средняя плотность Солнца 1.4 г/см^3
- Идеальный газ в центре Солнца 140 г/см^3
- Вырожденные звезды $10^5 - 10^8 \text{ г/см}^3$
- Нейтронные звезды $10^{13} - 10^{14} \text{ г/см}^3$

Открытие и интерпретация звезд из вырожденного газа



Открытие и интерпретация
звезд из вырожденного газа



Вырождение вещества

- Квантово-механический эффект
- Наступает, когда среднее расстояние между частицами (фермионами, полуцелый спин) становится порядка длины волны Де-Бройля:

$$\Delta x \sim n^{-1/3} \sim \frac{\hbar}{mv} \sim \frac{\hbar}{\sqrt{2mkT}}$$

- Отсюда следует, что концентрация частиц не может быть выше, чем $n_{\max} = (2mkT)^{3/2} / h^3$

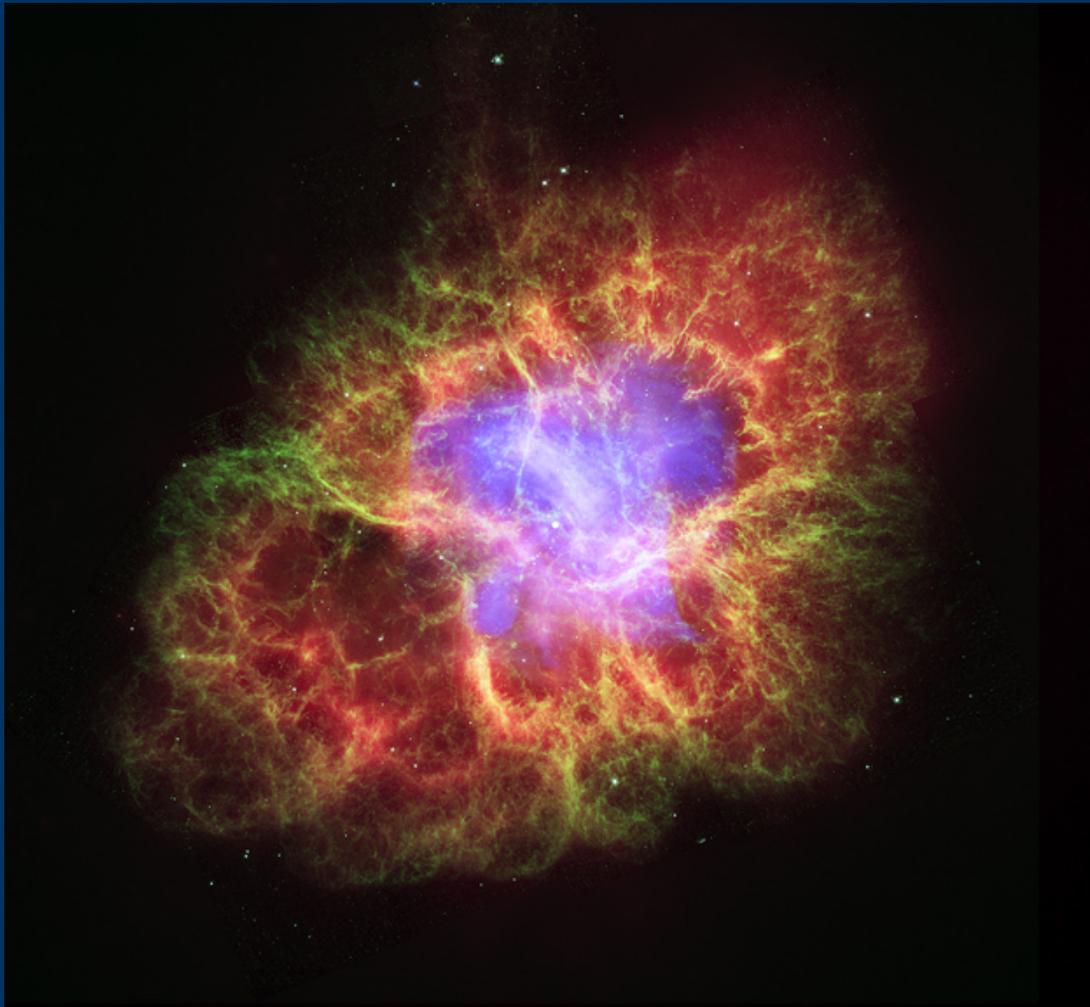
$$P = K \rho^\gamma, \quad K = \text{const}_{77}$$

Краткая сводка свойств НЗ

- $\langle M \rangle = 1.4 M_{\odot}$
- $R \sim 10$ км
- Рекордная (ядерная) плотность $\sim 10^{13}-10^{14}$ г/см³
- Рекордные магнитные поля $\sim 10^{10}-10^{14}$ Гс
- Рекордно малый период вращения ~ 1.5 мс – 10 с
- Рекордные пространственные скорости в Галактике $\sim 100-1000$ км/с



Пульсары – вращающиеся замагниченные нейтронные звезды



30.06.2016

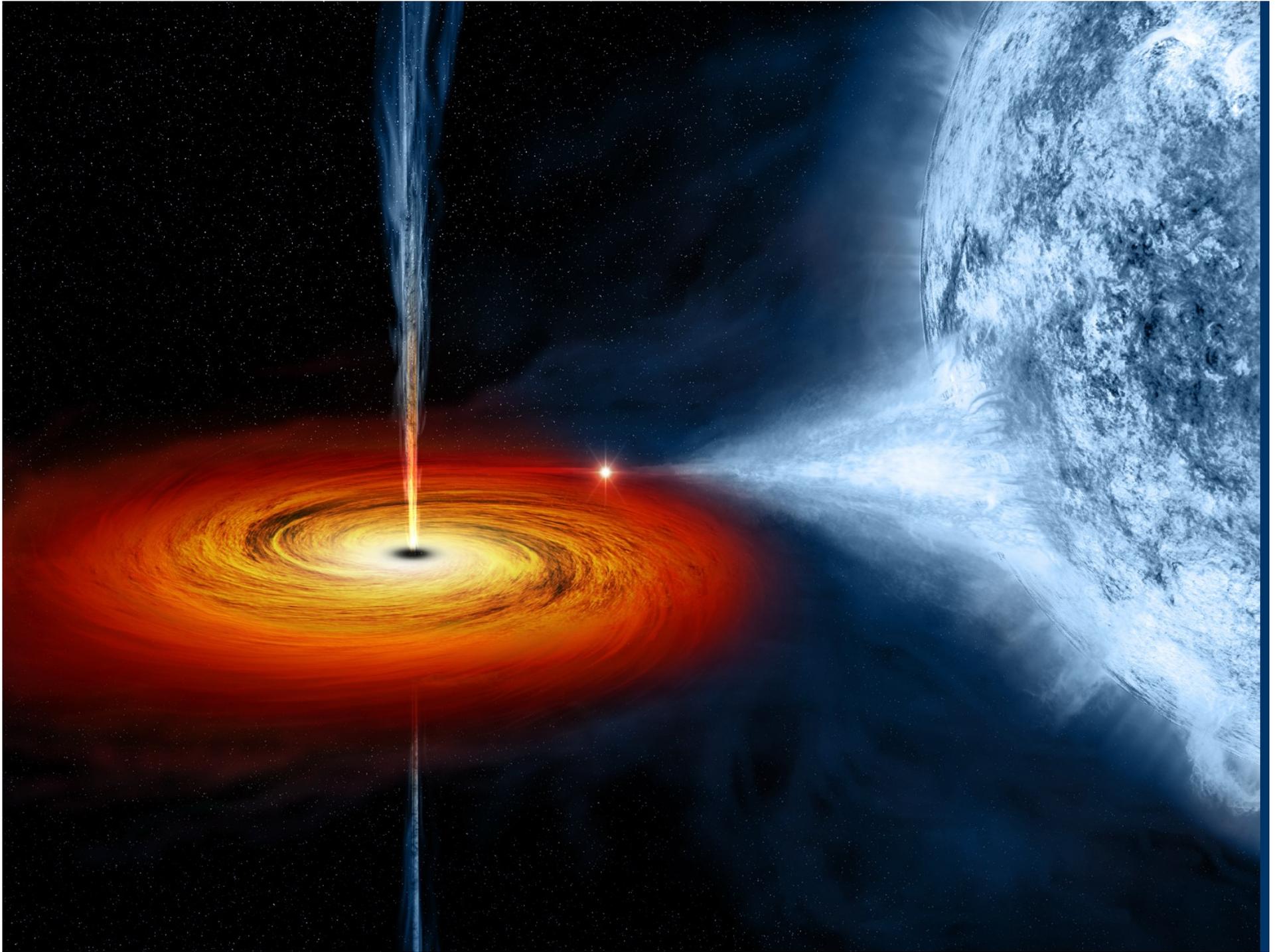
115

Пульсар в
Крабовидной туман-
ности. SN 1054 г.
Нетепловое (синхр).
излучение
 $P=33$ мс,
 $B \sim 10^{12}$ Гс



Область нейтронной звезды
в Крабовидной туманности



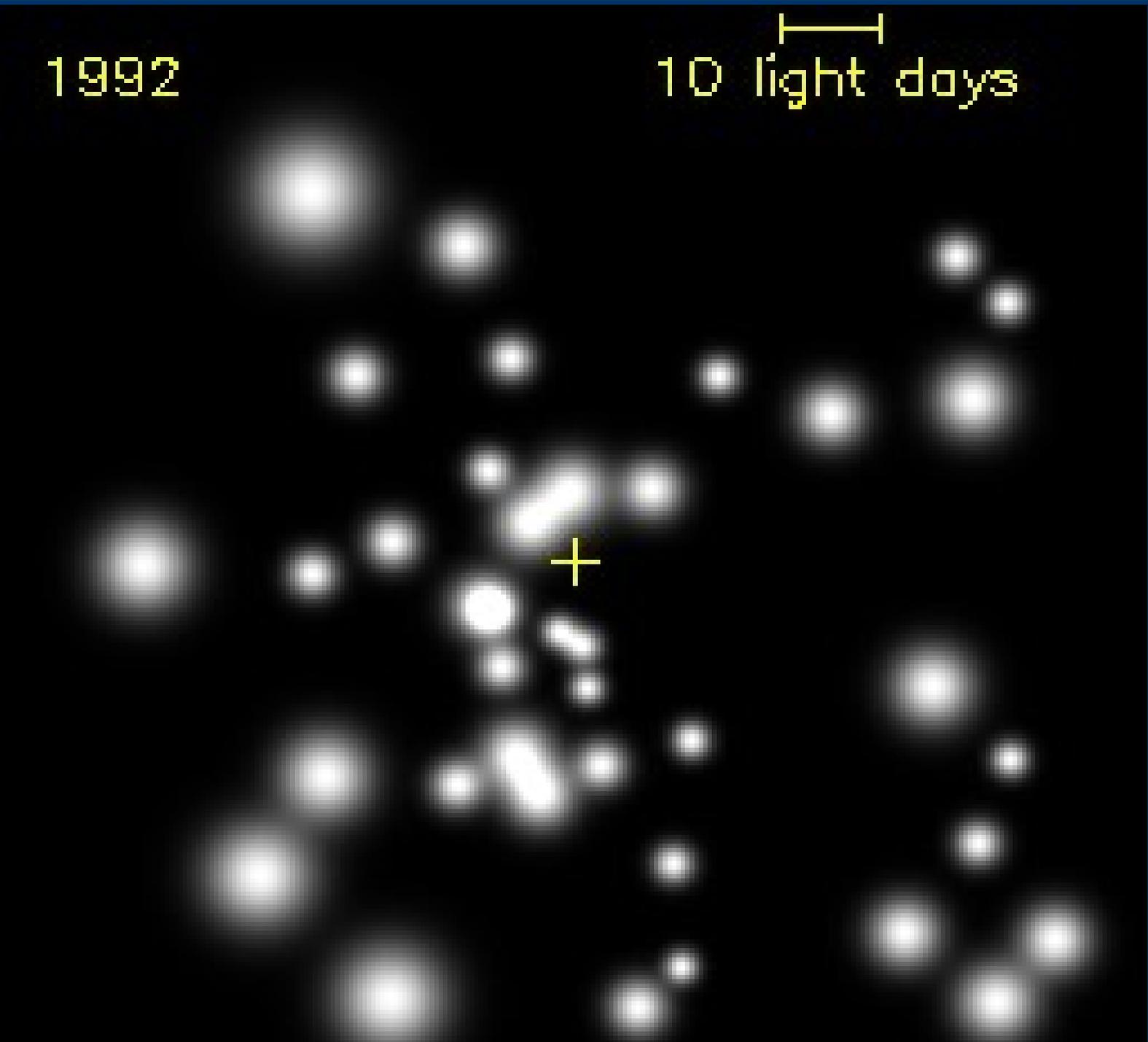


Поиски черных дыр

- Звездные ч.д. – около десятка кандидатов
- Ч.д. в ядрах галактик – для нескольких десятков измерена масса

1992

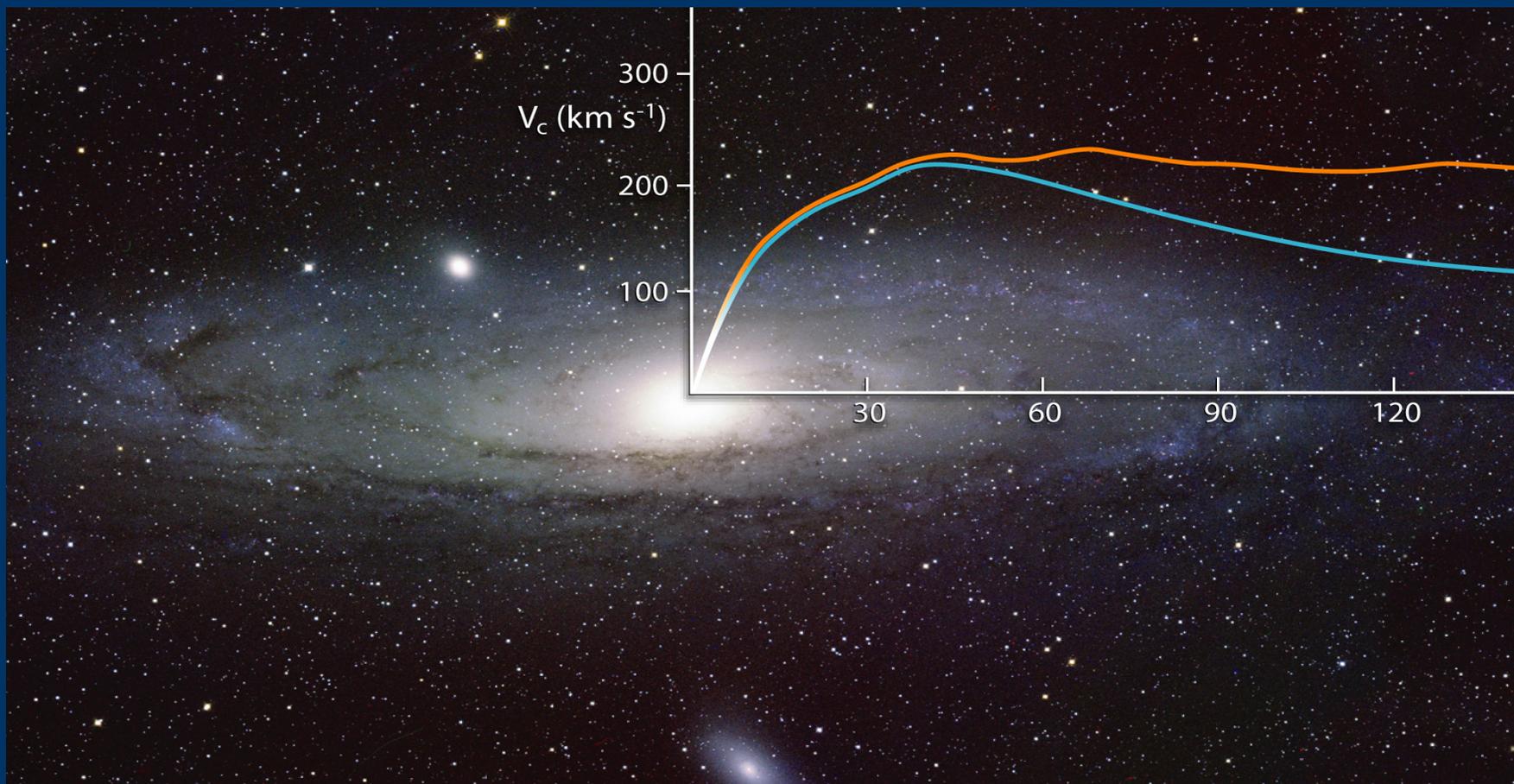
10 light days

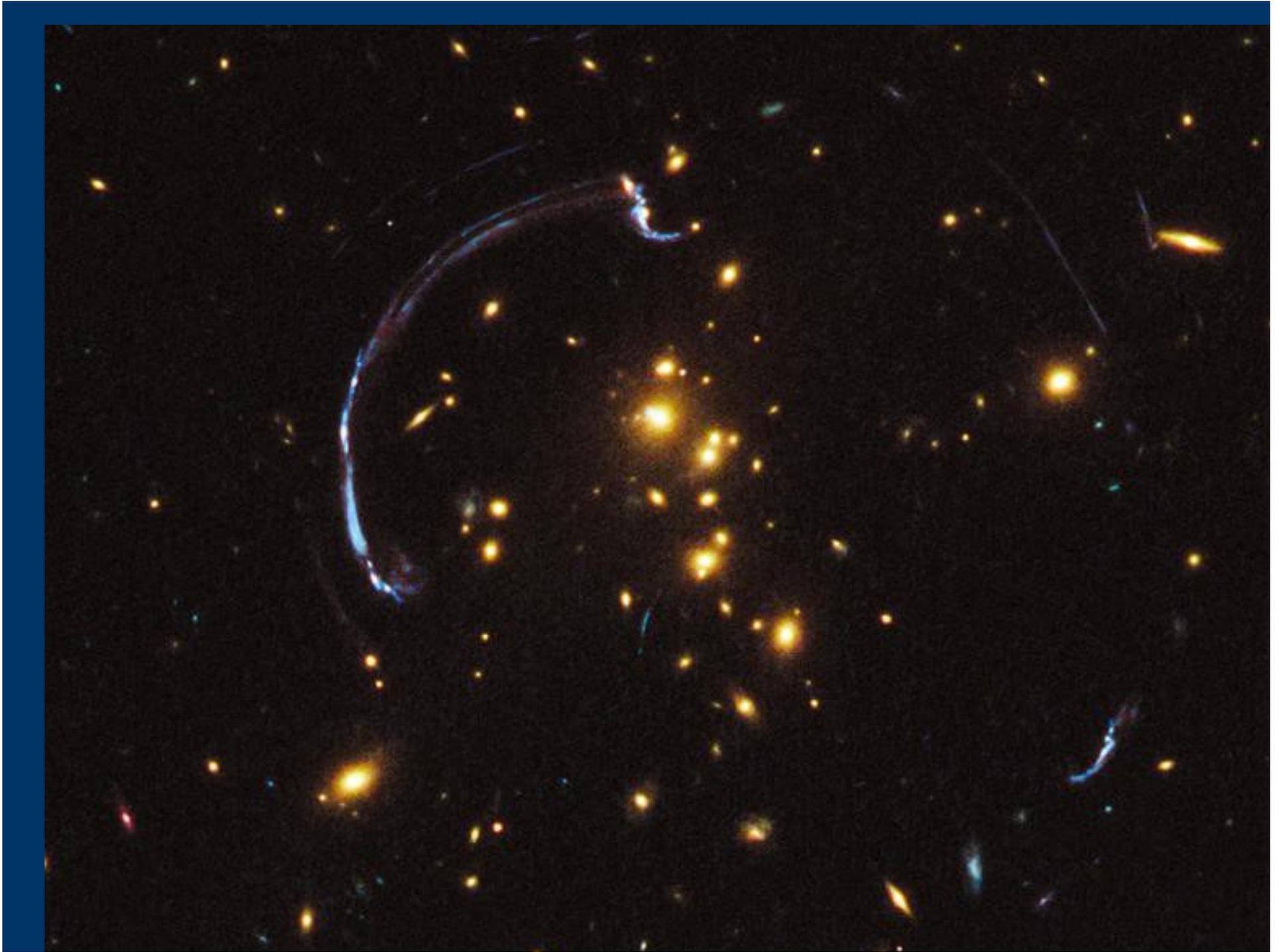


Другой пример «темной массы»

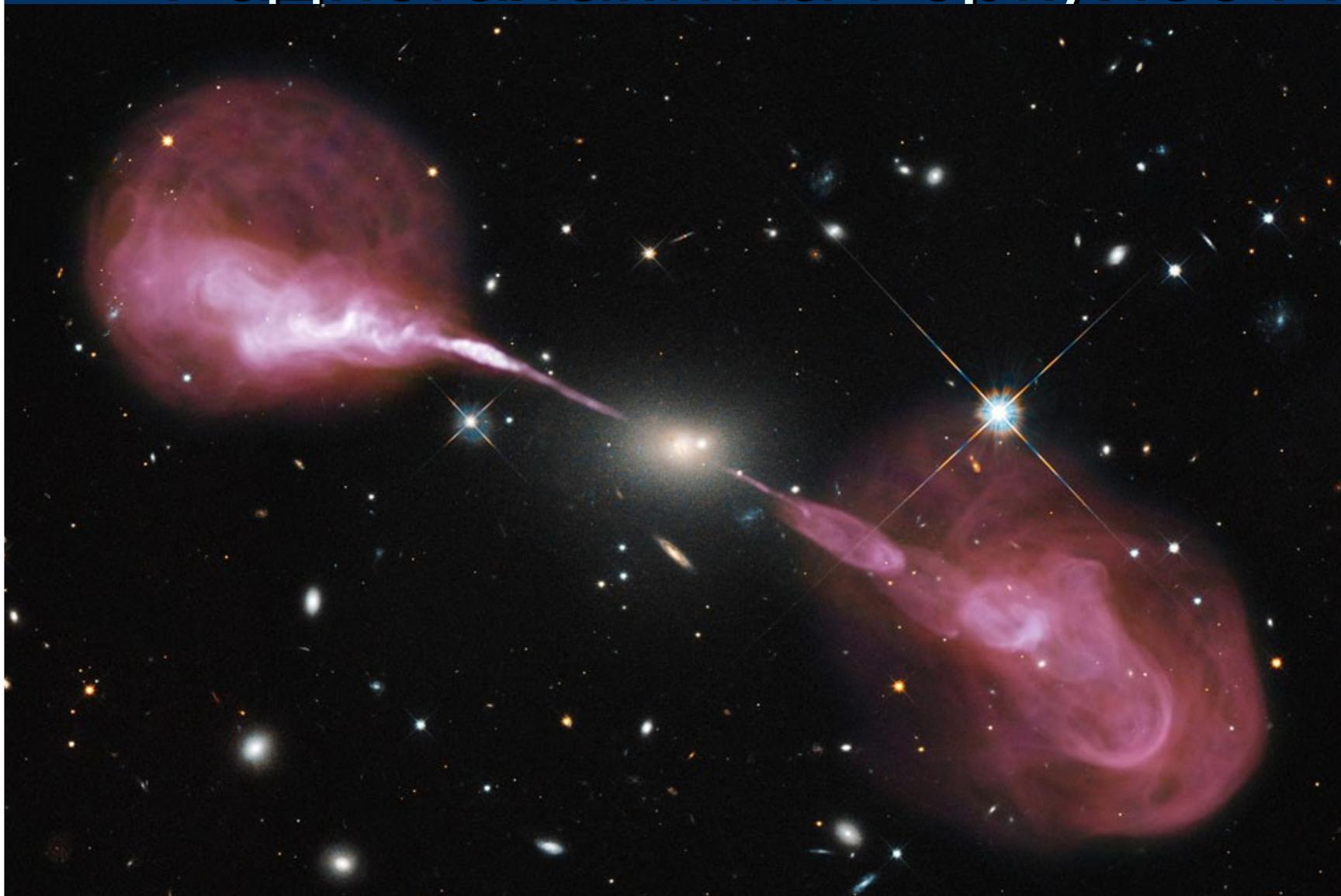
- - невидимая материя, гравитация которой обеспечивающая высокие скорости звезд в галактиках и скорости галактик – в скоплениях галактик

Вращение туманности Андромеды





Радиогалактика Геркулес А



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

- Классическая механика
- Ньютоновская теория гравитации
- Специальная теория относительности (СТО)
- Релятивистская теория гравитации (ОТО)
- Квантовая механика и теория элементарных частиц

Космические частицы сверхвысоких энергий

- До 10^{10} эВ – Солнечные космические лучи
- До 10^{17} эВ – галактические космические лучи
- Более высокие энергии (до 10^{19} эВ) – по кр.мере частично – частицы внегалактического происхождения. *Природа малопонятна.*

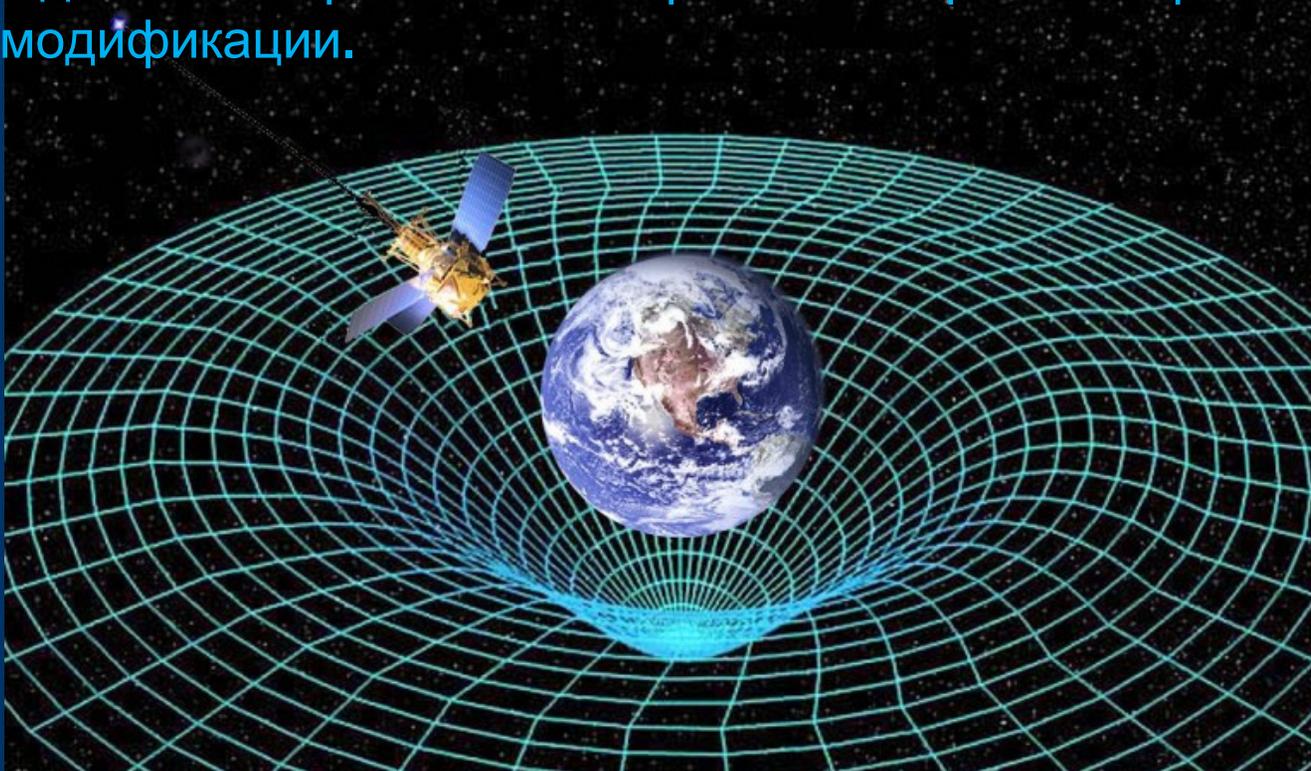
Максимальная энергия частиц на БАК:

$(7 - 14) \cdot 10^{12}$ эВ

Проект VLHC (2030-2035 год?) – 10^{14} эВ

Проверка ОТО

- Общая Теория Относительности = современная теория гравитации.
- Уже используется при расчетах движения космических аппаратов.
- Однако есть различные варианты теории и ее различные модификации.



Точность оценки эффектов ОТО (по Турышеву В.Г.)

- Радиометрические данные с Марса: замедление времени в грав.поле Солнца (Викинг-1) ■ 0.1%
- Постоянство «постоянной тонкой структуры» α (по спектрам квазаров) ■ Не более 10^{-5} доли за 10 млрд лет
- Лазерная дальнометрия Луны, проверка принципа эквивалентности. ■ 0.011 %
- Радиометрические данные с Кассини, проверка ОТО. ■ 0.002 %
- Постоянство «постоянной гравитации» G (Лазерная дальнометрия Луны) ■ $dG/dt < 4 \cdot 10^{-13} \text{ G /год}$

Излучение гравитационных волн

СТОЛКНОВЕНИЕ ЗВЕЗД- ЧЕРЕЗ 300 МЛН ЛЕТ

Пульсар Халса-Тэйлора (в двойной системе)

- Расстояние – 21 св. год

- $P = 59.0999792988$ мсек

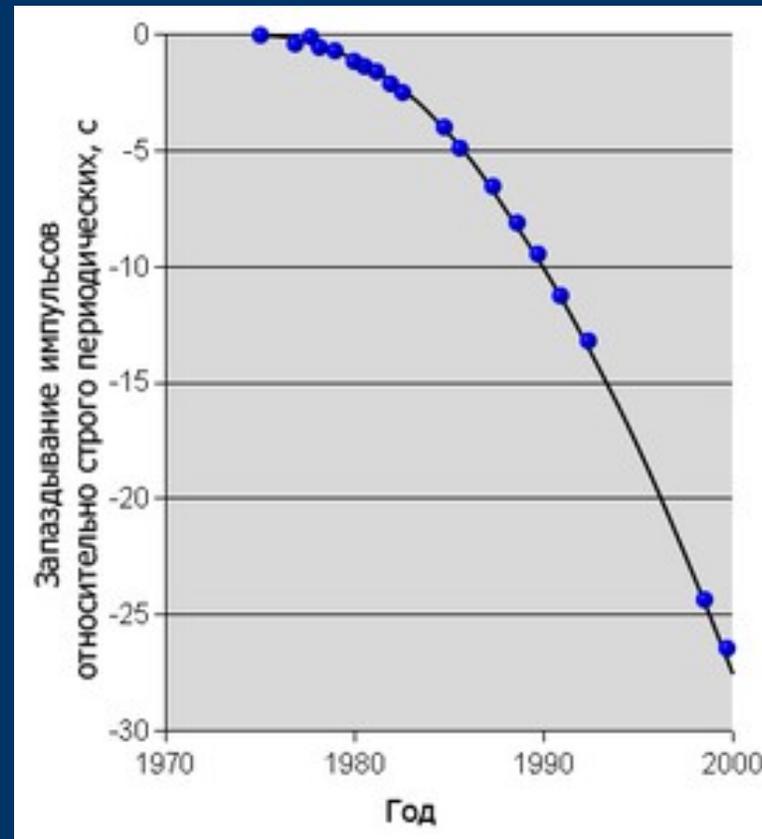
Период между импульсами уменьшается на 76 мсек за год из-за сокращения

большой полуоси орбиты на 1 см/день

Другие подтверждения ОТО:

- Геодезическая прецессия и

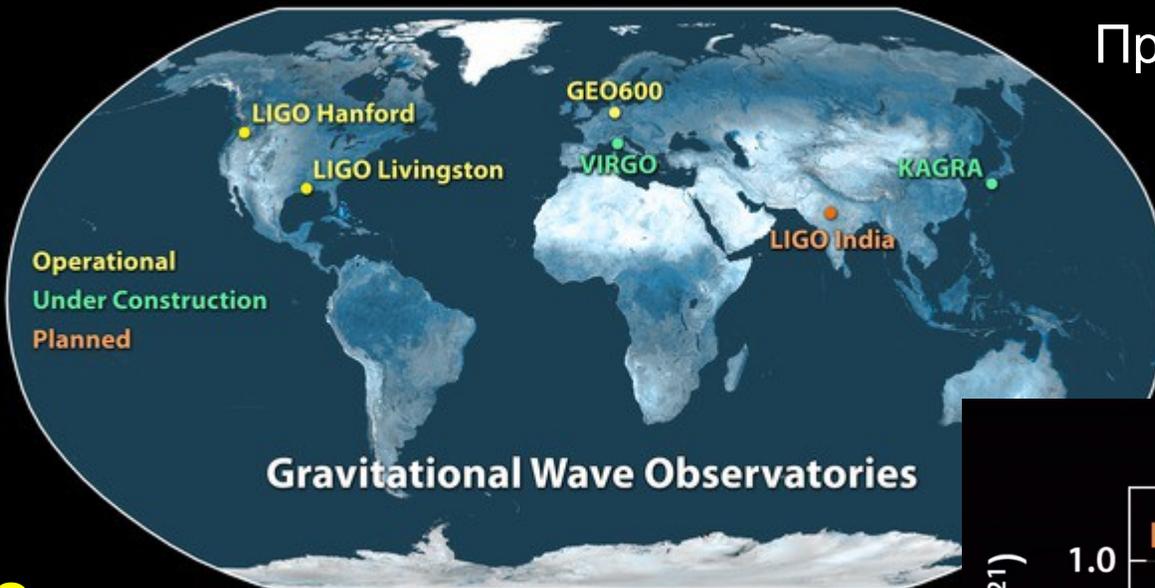
- Релятивистский поворот большой оси орбиты (4° в год)



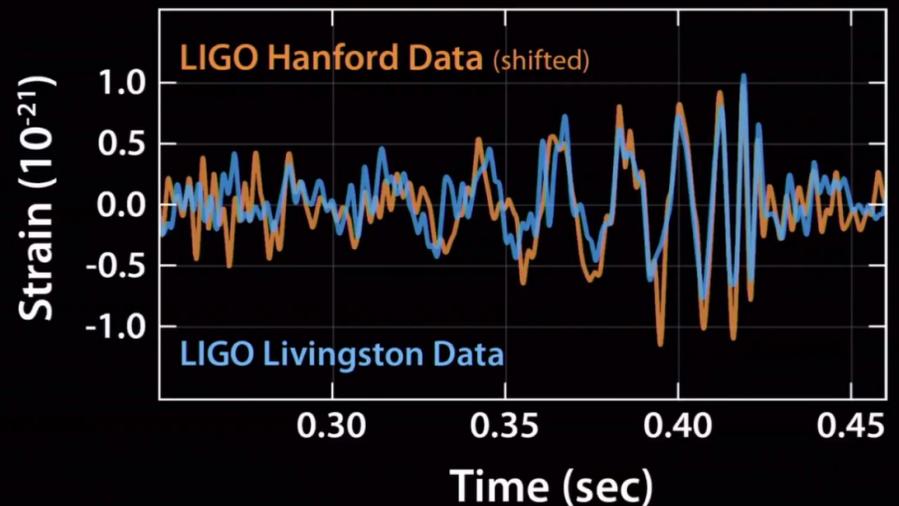
Сплошная кривая — предсказания Общей теории относительности

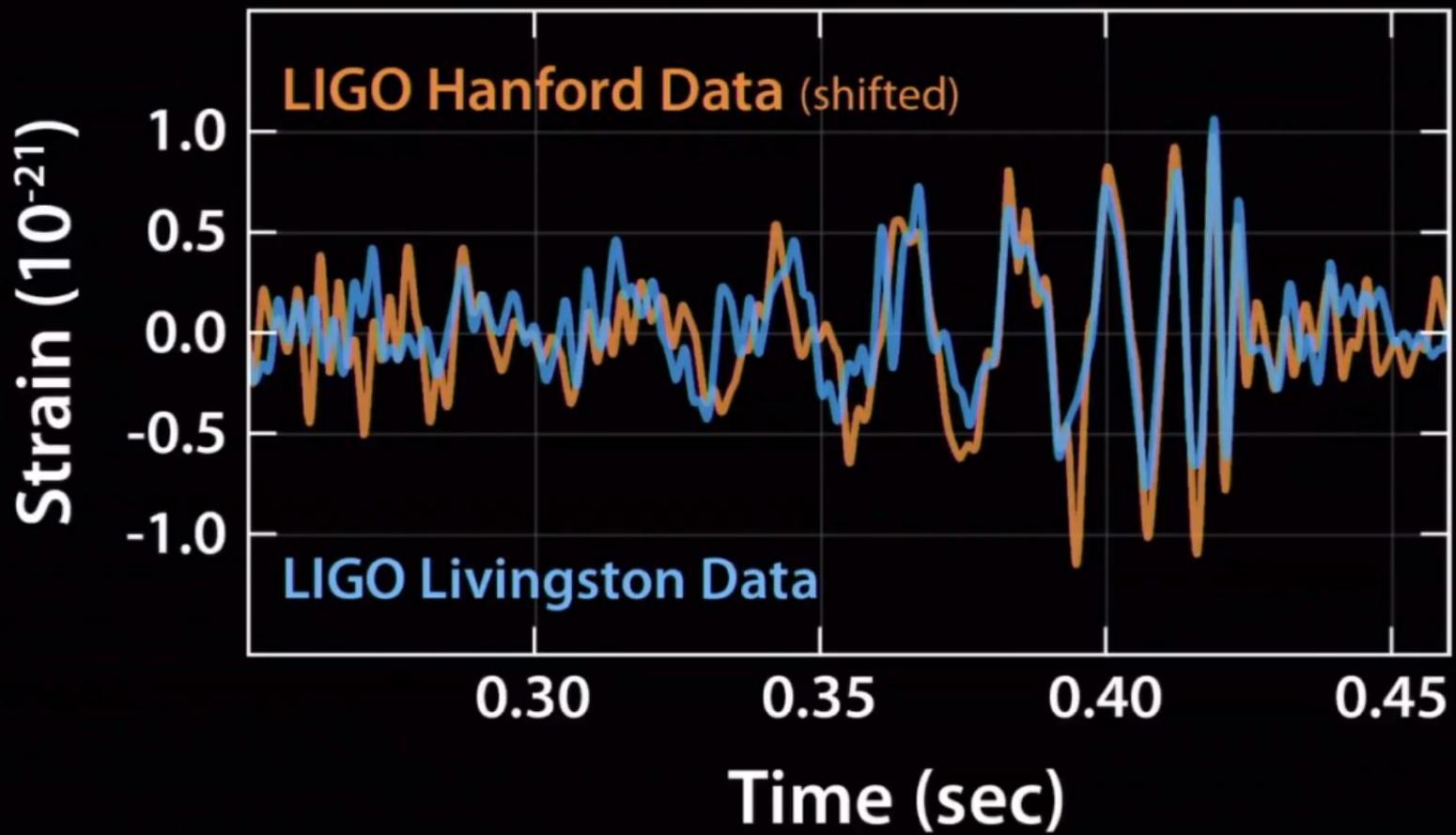
Гравитационно-волновые обсерватории

Проект LIGO стоит 620 млн \$.



Открытие гравитационных волн было выполнено путем их прямого детектирования 14 сентября 2015 года. Форма сигнала совпадает с предсказанием ОТО для слияния двух чёрных дыр массами 36 и 29 солнечных



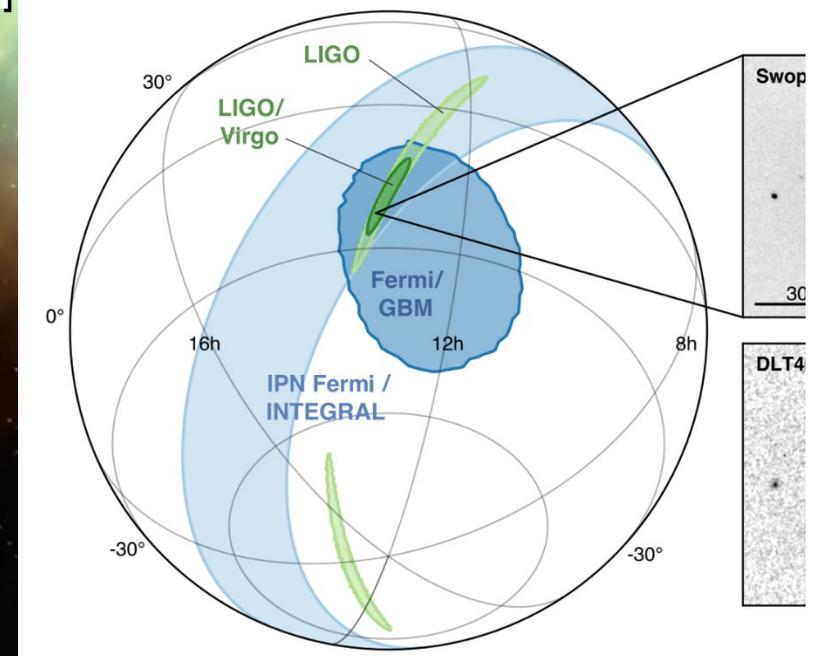


17 августа 2017г: сенсация

- Всплеск гравитационного излучения от сливающихся нейтронных звёзд (продолжительность ~ 100 сек).
- (LIGO-1, LIGO-2, VIRGO).
- Через 2 с – короткий гамма-всплеск (Fermi, Integral).

Гравитационные волны и слияния двойных НЗ

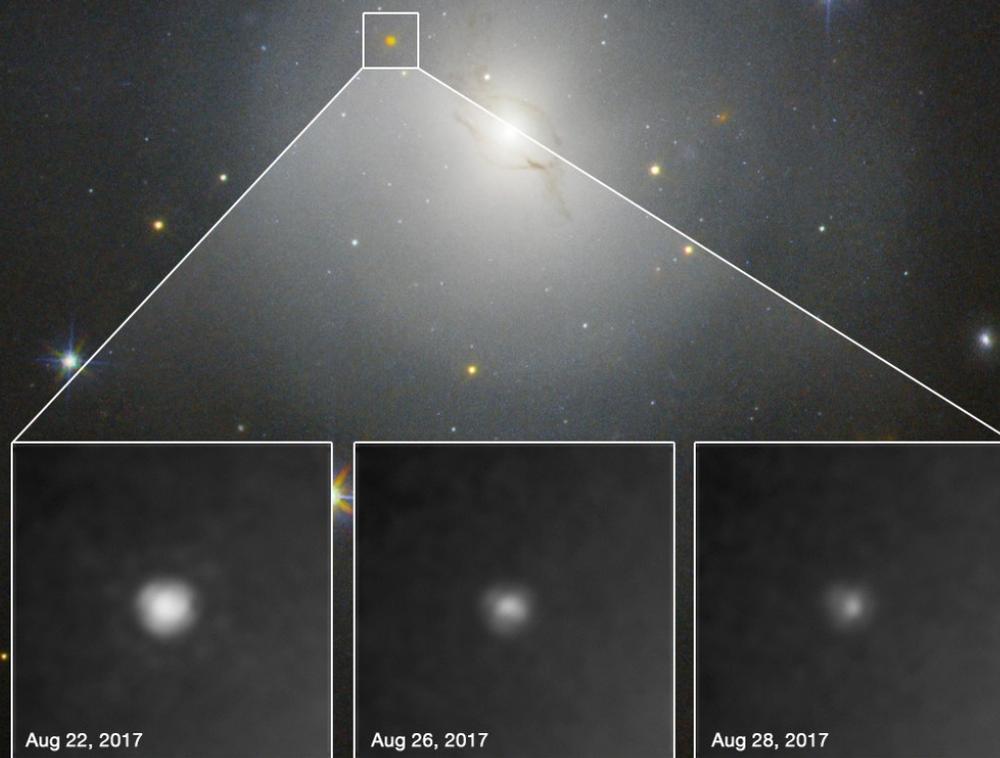
- GW170817
- Многоволновые наблюдения
- Килоновая — источник тяжелых элементов



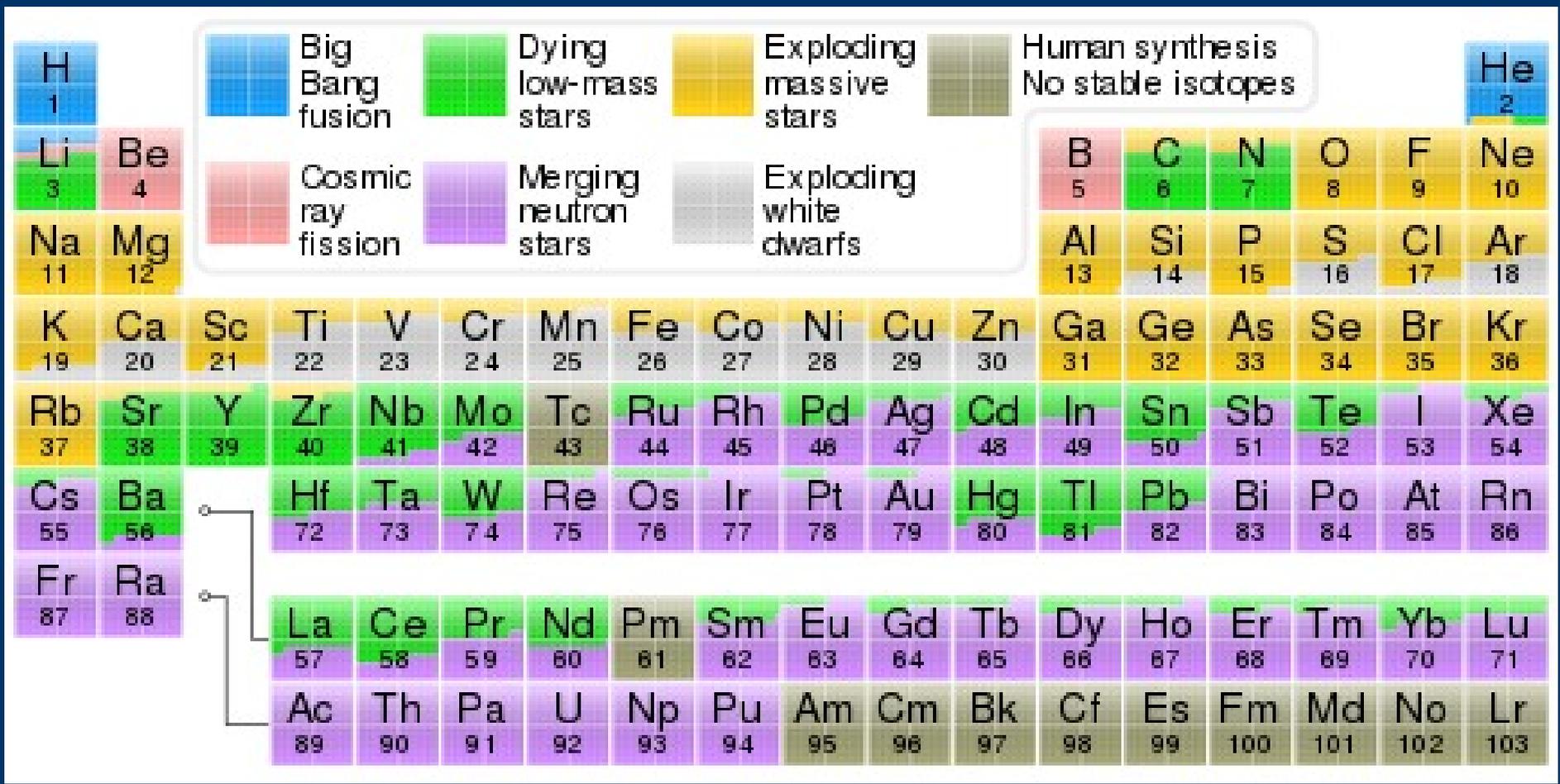
30.06.2018

NGC 4993

D=130 млн.св.л



Откуда появились химические элементы?



ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

Список В. Л. Гинзбурга:

- Экспериментальная проверка общей теории относительности,
- Проблема детектирования гравитационных волн,
- Космологические проблемы. Связь между космологией и физикой высоких энергий,
- Нейтронные звезды и пульсары; сверхновые звезды.
- Черные дыры и космические струны
- Квазары и ядра галактик; образование галактик,
- Проблема существования и детектирования темной материи;
- Проблемы происхождения космических лучей со сверхвысокими энергиями,
- Гамма-всплески и гиперновые.
- Нейтринная физика и астрономия, осцилляция нейтрино

МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОМОЩЬ

- Сайт астрономического об-ва
<http://www.sai.msu.ru/EAAS/rus/>
- Сайты для учителей (напр., «Открытый колледж»)
<http://www.college.ru/astronomy/>
- Новостные сайты
<http://www.astronet.ru/>
<http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/>

<https://sites.google.com/site/auastro/>

The screenshot shows a web browser window with the address bar containing <https://sites.google.com/site/auastro/n>. The browser's address bar also shows "Защищено" (Secure) and a search icon. The browser's toolbar includes various icons for services, NED, H-leda, maps, V/Page, ADS, ADS_INASAN, SAI, Gmail, Google, Яндекс, Однокл, ГАИШ, and КИАС РФФИ. The website content features a large header image with the text "Российская Ассоциация учителей астрономии" (Russian Association of Astronomy Teachers) set against a cosmic background. Below the header, there is a sidebar on the left with a menu of links, including "Второй сайт" and "Вторая часть сайта - методика". The main content area displays a quote by Henri Poincaré: "«Астрономия полезна, потому что она возвышает нас над нами самими; она полезна, потому что она величественна; она полезна, потому что она прекрасна...»" followed by the name "Анри Пуанкаре". Below the quote is a collage of images related to astronomy, including a portrait of Galileo Galilei, a landscape with a sunset, a ringed planet, and a portrait of another astronomer. The browser's taskbar at the bottom shows several open documents and the system tray with the date 15.04.2018 and time 16:41.

Второй сайт
Вторая часть сайта - методика

Российская Ассоциация учителей астрономии
Информация о правлении Ассоциации
Конференция Российской Ассоциации учителей астрономии 28-29 января 2015 г.
1 съезд Учителей астрономии
Анкета "О возвращении курса астрономии" в общеобразовательные школы
Новости Ассоциации
Новости астрономические
Конференции с секциями по методике преподавания астрономии
Астрономическое образование в зеркале прессы
Календарь событий
Опросы

Российская Ассоциация учителей астрономии

«Астрономия полезна, потому что она возвышает нас над нами самими; она полезна, потому что она величественна; она полезна, потому что она прекрасна...»
Анри Пуанкаре

Translate

moya_rabochaya_....doc ^
Rabochaya-progr....docx ^
rabochaya_progr....docx ^

Показать все x

16:41
15.04.2018