

Введение в радиоастрономию

Лекция для аспирантов ИНАСАН

Я.Н. Павлюченков

18.10.2017

Электромагнитный спектр

Условные диапазоны в радиоастрономии

Субмиллиметровый:

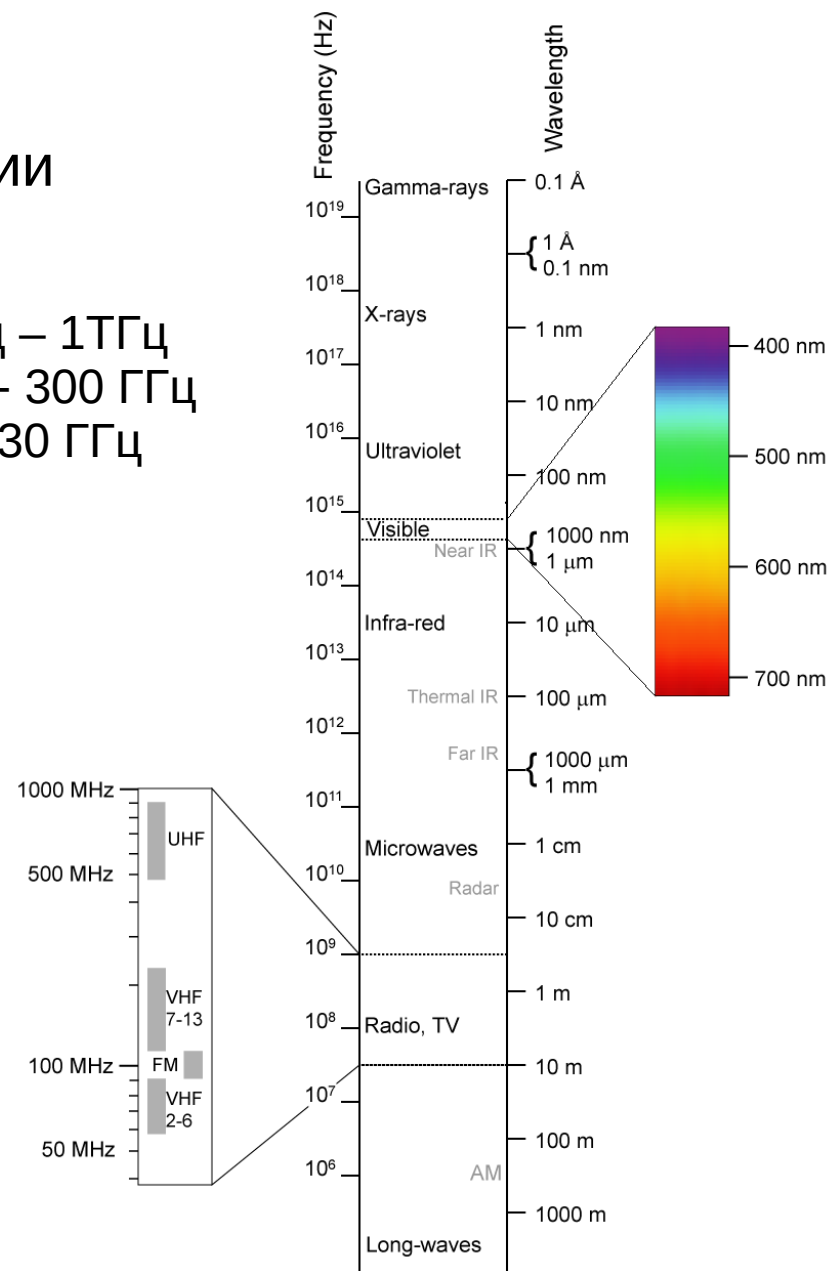
0.3 мм -- 1 мм, 300 ГГц – 1 ТГц

Миллиметровый:

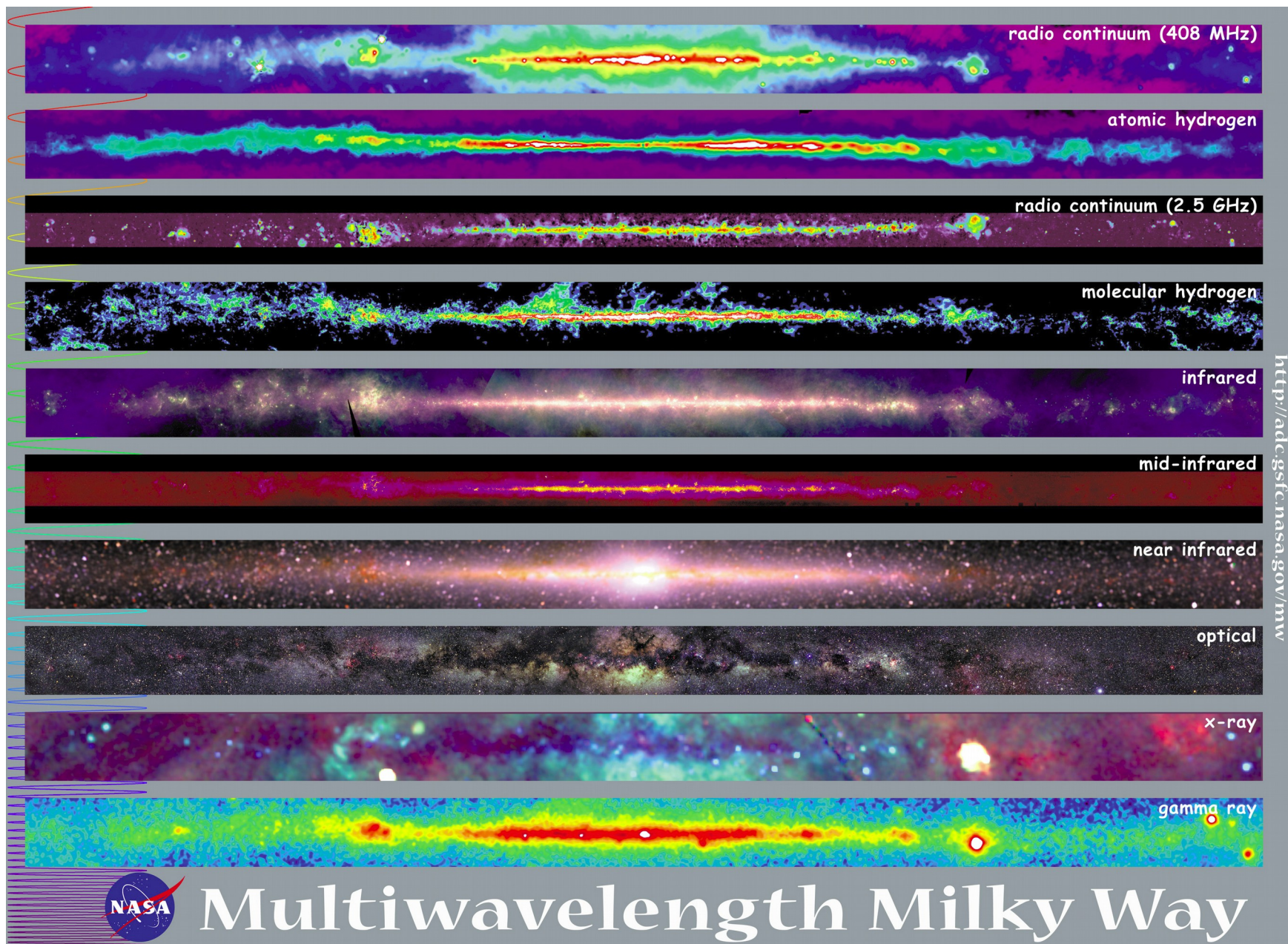
1 мм -- 10 мм, 30 ГГц -- 300 ГГц

Микроволновый:

1 см -- 30 м, 10 МГц -- 30 ГГц



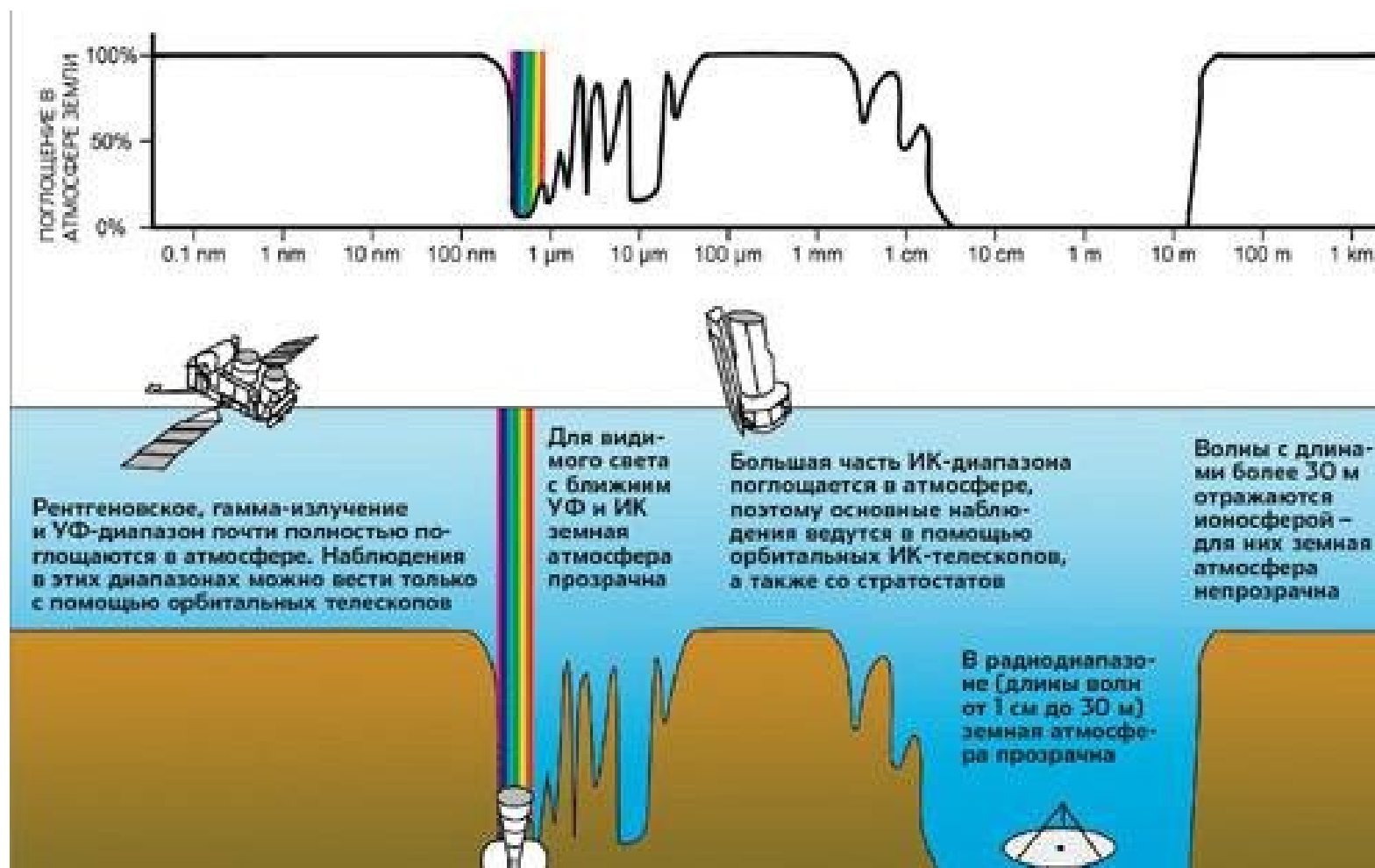
Изображение Галактики в различных диапазонах



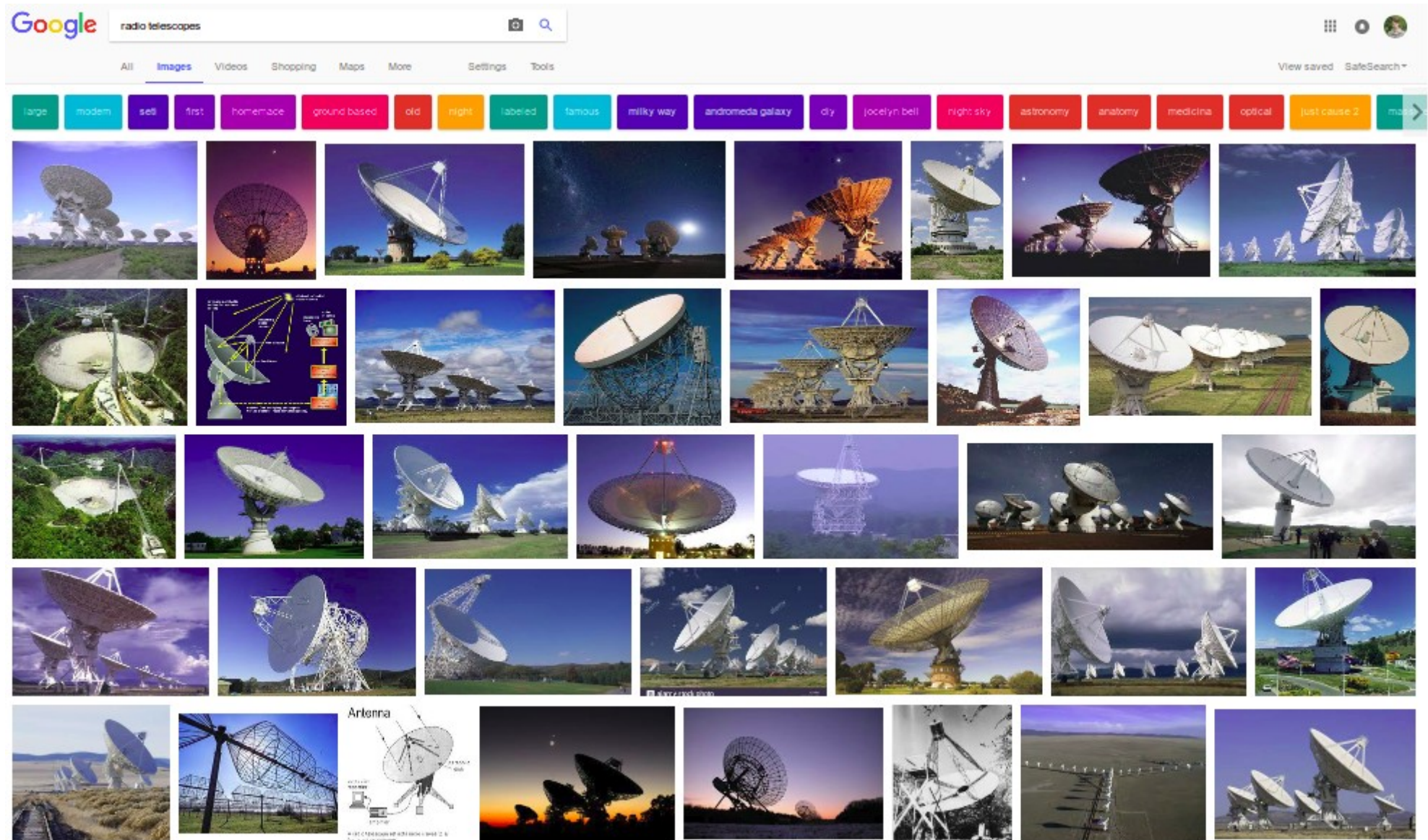
1. Механизмы/источники радиоизлучения

- Тепловое излучение атомов и молекул (вращательные переходы, переходы между уровнями сверхтонкой структуры, инверсионные переходы, рекомбинационные линии и т. д.)
- Мазерное излучение молекул
- Тепловое излучение пылинок
- Свободно-свободное (тормозное) излучение электронов
- Циклотронное и синхротронное излучение
- Реликтовое излучение
- Излучение периодических источников (пульсаров) и источников с большими красными смещениями (квазары)

2. Окна прозрачности атмосферы

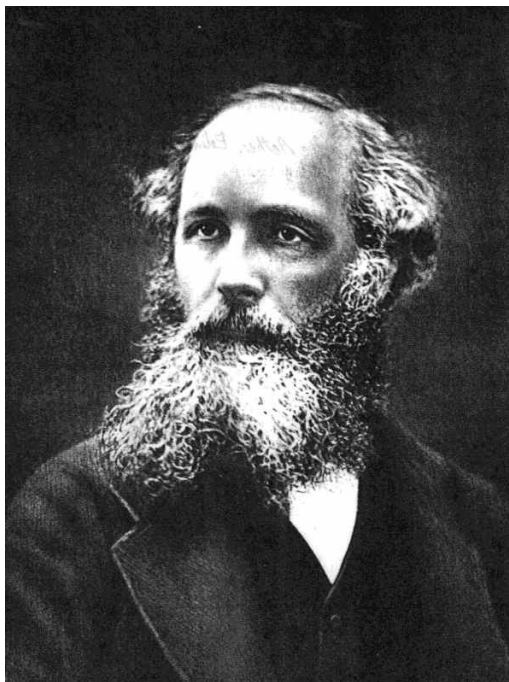


Радиотелескопы – неотъемлемые инструменты современной астрономии, но они не всегда были такими



2. Истоки радиоастрономии

Электромагнитная теория Дж. Максвелла, 1864 г.



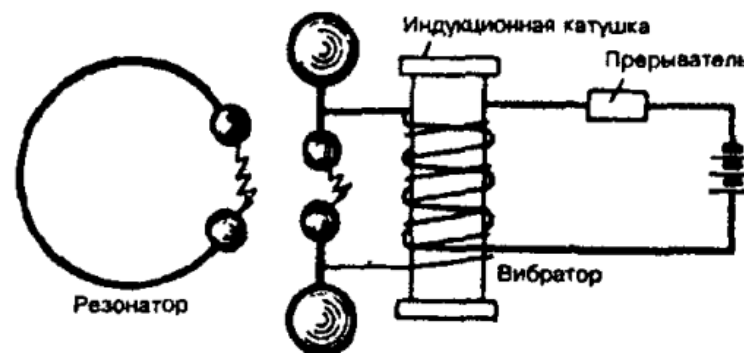
$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Опыты Г. Герца, 1887 г.

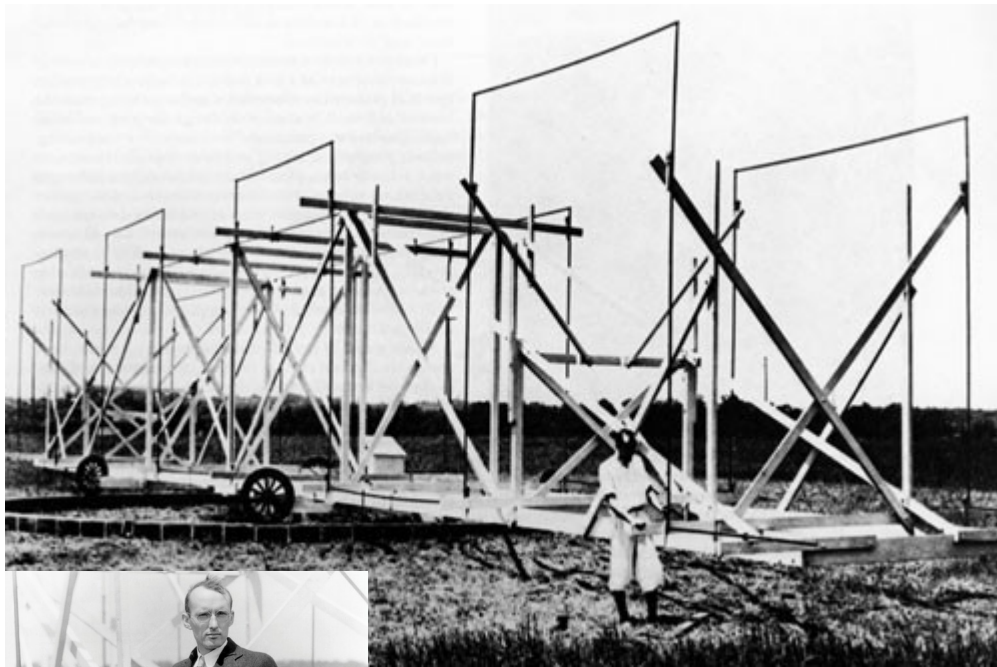


На заре радиоастрономии

Открытие радиоизлучения от Млечного пути

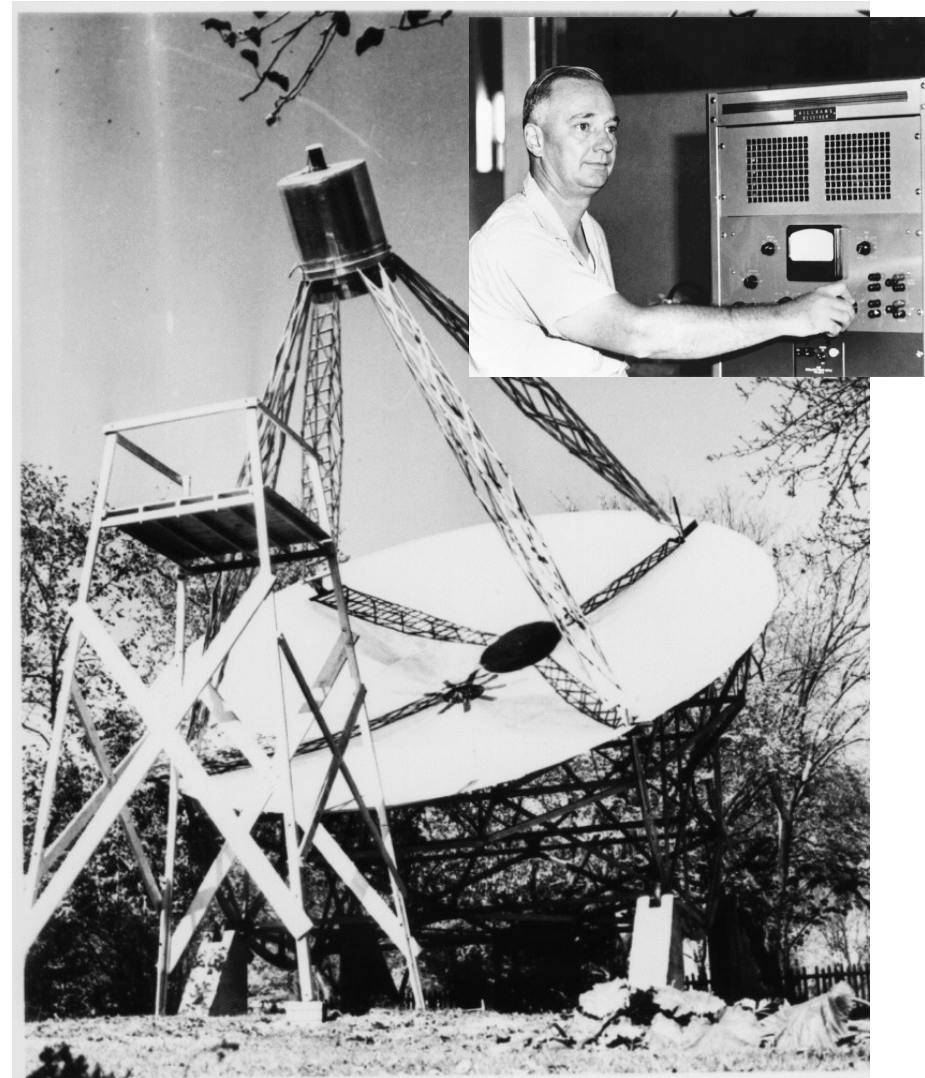
1932 – Карл Янский

20 МГц



1939 – Гроут Ребер

160, 480 МГц



2. Немного истории

1. Радиоизлучение Солнца
1942 – Саутворт и Хей

2. Излучение атомарного водорода, 21 см
1945 – ван де Хюлст обосновал принципиальную возможность
1948 – И.С. Шкловский рассчитал ожидаемую интенсивность
1951 – обнаружена Х. Юэном и Э. Парселлом в США
и Х. Мюллером и Я. Оортом в Нидерландах.

3. Реликтовое излучение $T_{\text{cmb}} = 2.73 \text{ K}$
1948 – предсказано Г. Гамовым, Р. Альфером и Р. Германом на основе
созданной ими теории горячего Большого взрыва
1965 – обнаружена А. Пензиасом и Р. В. Вильсоном
(за что в 1978 они получили Нобелевскую премию)

4. Излучение межзвездных молекул, OH (1963)

5. Излучение квазаров (1963)

6. Открытие радиопульсаров (1967)

...

Радио-обсерватории мира



Article [Talk](#)

[Read](#) [Edit](#) [View](#)

List of radio telescopes

From Wikipedia, the free encyclopedia

This is a **list of radio telescopes** - over one hundred - that are or have been used for [radio astronomy](#). The list includes both single [dishes](#) and [interferometric](#) arrays. The list is sorted by region, then by name; unnamed telescopes are in reverse size order at the end of the lists.

This list is [incomplete](#); you can help by [expanding it](#).

Типы радиотелескопов:

1. Линейные антенны
2. Параболоиды
3. Многолучевые системы
4. Антенные решетки
5. Интерферометры

Примеры:

Однозеркальный телескоп:
IRAM 30m (Испания)



Высота над уровнем моря: 2,8 км
Диаметр зеркала: 30 м
Длины волн: 0.9-3 мм
Угловое разрешение: 9-30"

Интерферометр ALMA (Чили)



Высота над уровнем моря: 5км

Количество антенн: 66

Диаметр одиночного зеркала: 12, и 7, м

Взаимное расположение: 150 м - 16 км

Длины волн: 0.3-10 мм

Угловое разрешение: 0.01 угловых секунд!

Спектральное разрешение < 50 м/с

Интерферометр со сверхдлинной базой: VLBI



Интерферометр космического базирования: РАДИОАСТРОН

Российская космическая обсерватория «Радиоастрон»

Проект «Радиоастрон» позволит увидеть далекие объекты космоса в небывалом разрешении

Параболическая антенна

- Диаметр – 10 м
- Состоит из 27 твердых лепестков из углепластика

«Радиоастрон» – первый в истории российский радиотелескоп на орбите

Он будет изучать:

- ядра галактик
- черные дыры
- нейтронные звезды
- облака межзвездной плазмы
- гравитационное поле Земли
- и многие другие объекты и явления Вселенной

Заказчик: Роскосмос

Головной исполнитель проекта: НПО имени Лавочкина

Разработчик научной аппаратуры: Астрокосмический центр ФИАН

Запуск: 18 июля 2011

Срок активного существования: не менее 5 лет

Малонаправленные антенны

Фокальный модуль

Служебный модуль «Навигатор»

Высокоинформативный радиокомплекс

Солнечные батареи

Орбита: высокоэллиптическая

- апогей: 330 000 км
- перигей: 600 км
- период обращения: 8,2 суток

Наблюдаемый объект

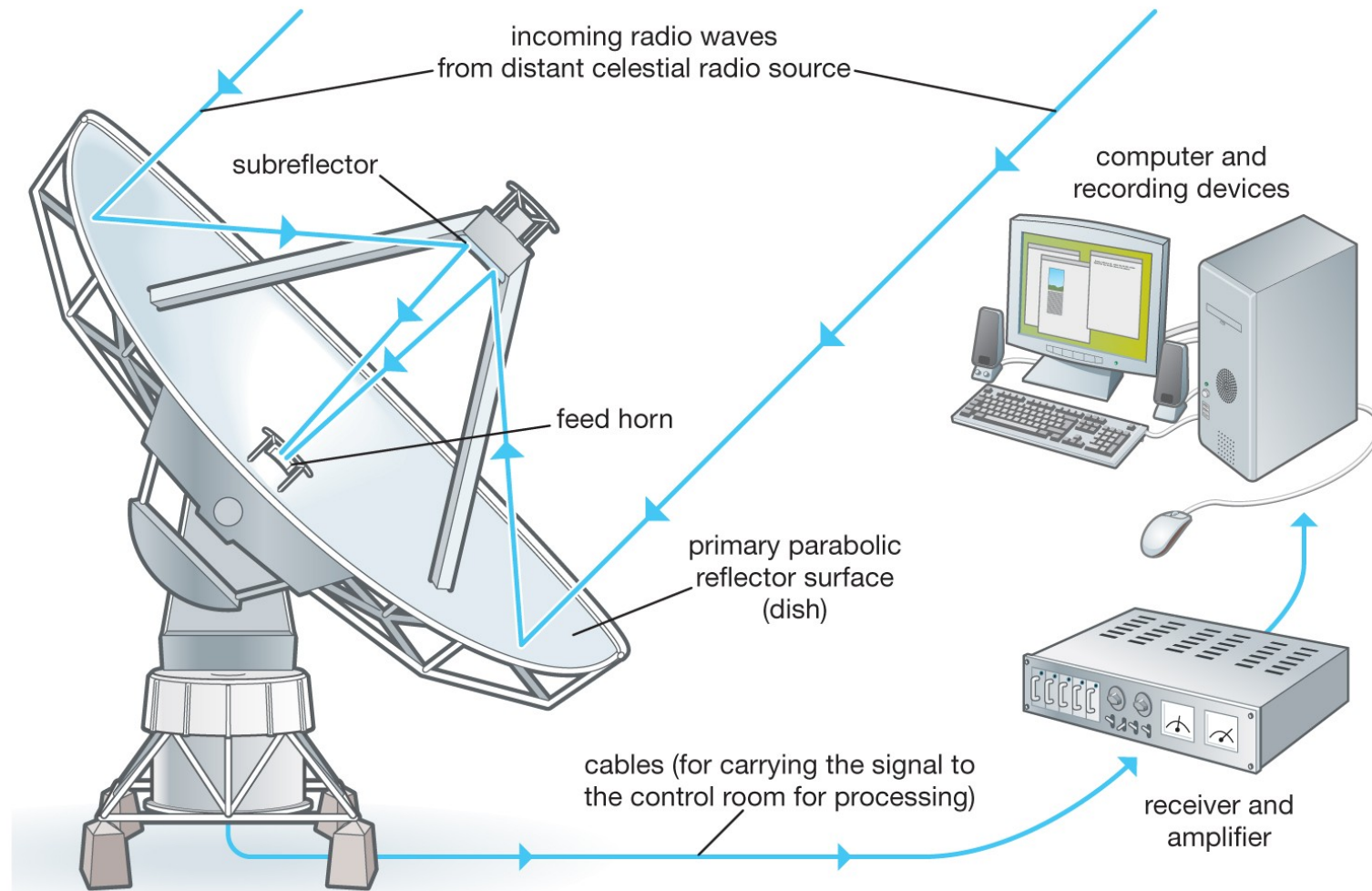
База интерферометра

Луна

«Радиоастрон» будет работать совместно с международной сетью наземных радиотелескопов, образуя **гигантский наземно-космический телескоп (т.н. интерферометр)** высочайшего углового разрешения.

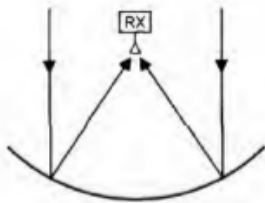
Это позволит получить изображения далеких объектов **в тысячу раз более детальные**, чем у орбитального телескопа «Хаббл»

Схема радиотелескопа

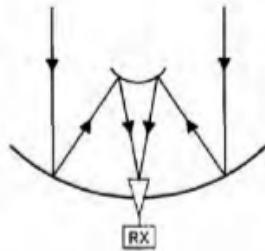


Оптические схемы

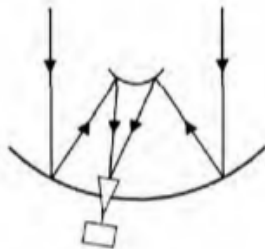
Prime Focus



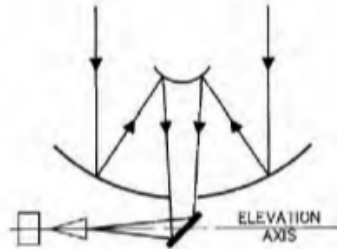
Cassegrain Focus



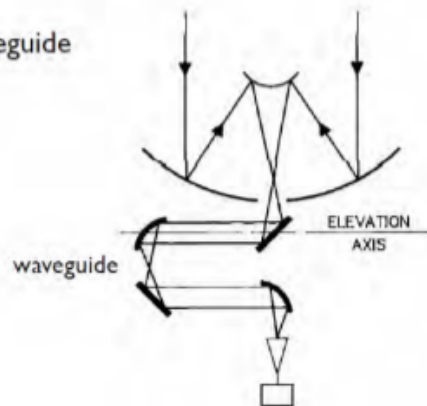
Offset Cassegrain



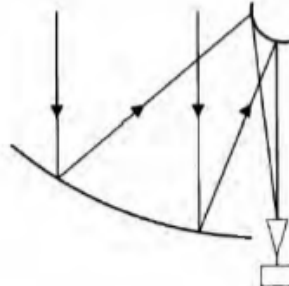
Naysmith



Beam Waveguide



Dual offset



Облучатель антенны
(вместе с дипольным
элементом)

– воспринимает
входной электромагнитный
сигнал, разделяет его на
два с противоположными
поляризациями.

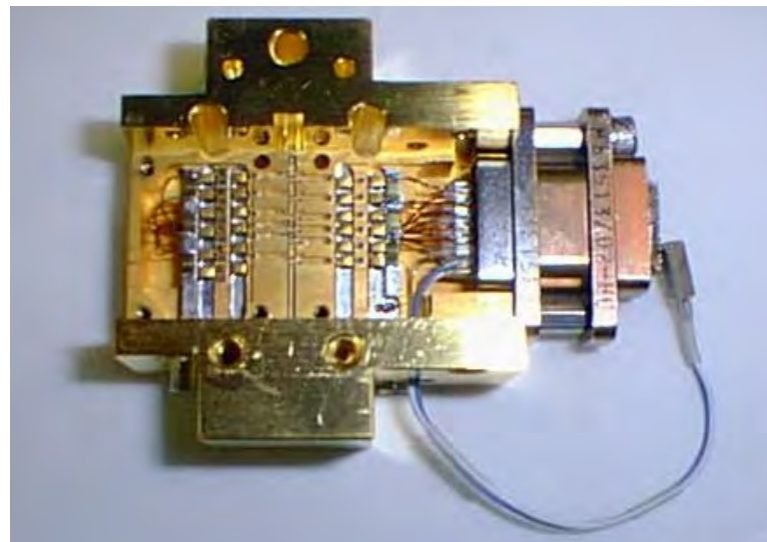


Приемные (входные) системы

1. Гетеродинные системы (когерентные приемники)

Усиливают входной сигнал и смешивают его с промежуточной частотой от внутреннего генератора (гетеродина).

Сигнал обрабатывается с помощью сложных электронных устройств



2. Болометрические радиометры

Приемники, основанные на нагревании датчиков, поддерживаемых при сверхнизких температурах $T \sim$ милли-К. Не регистрируют фазу сигнала. Наиболее современные детекторы создаются в виде решеток (мульти-лучевые системы)

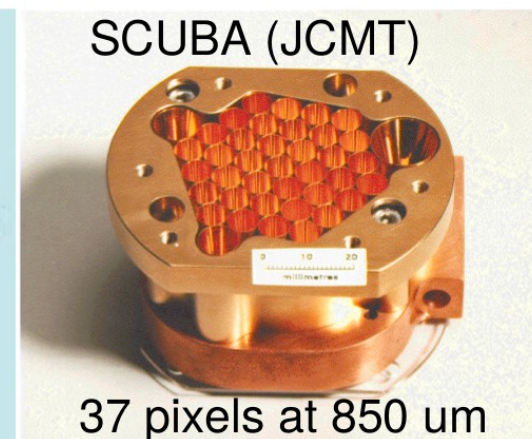
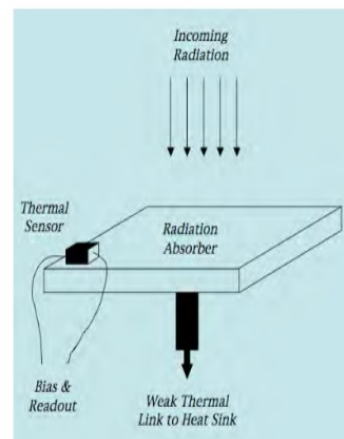
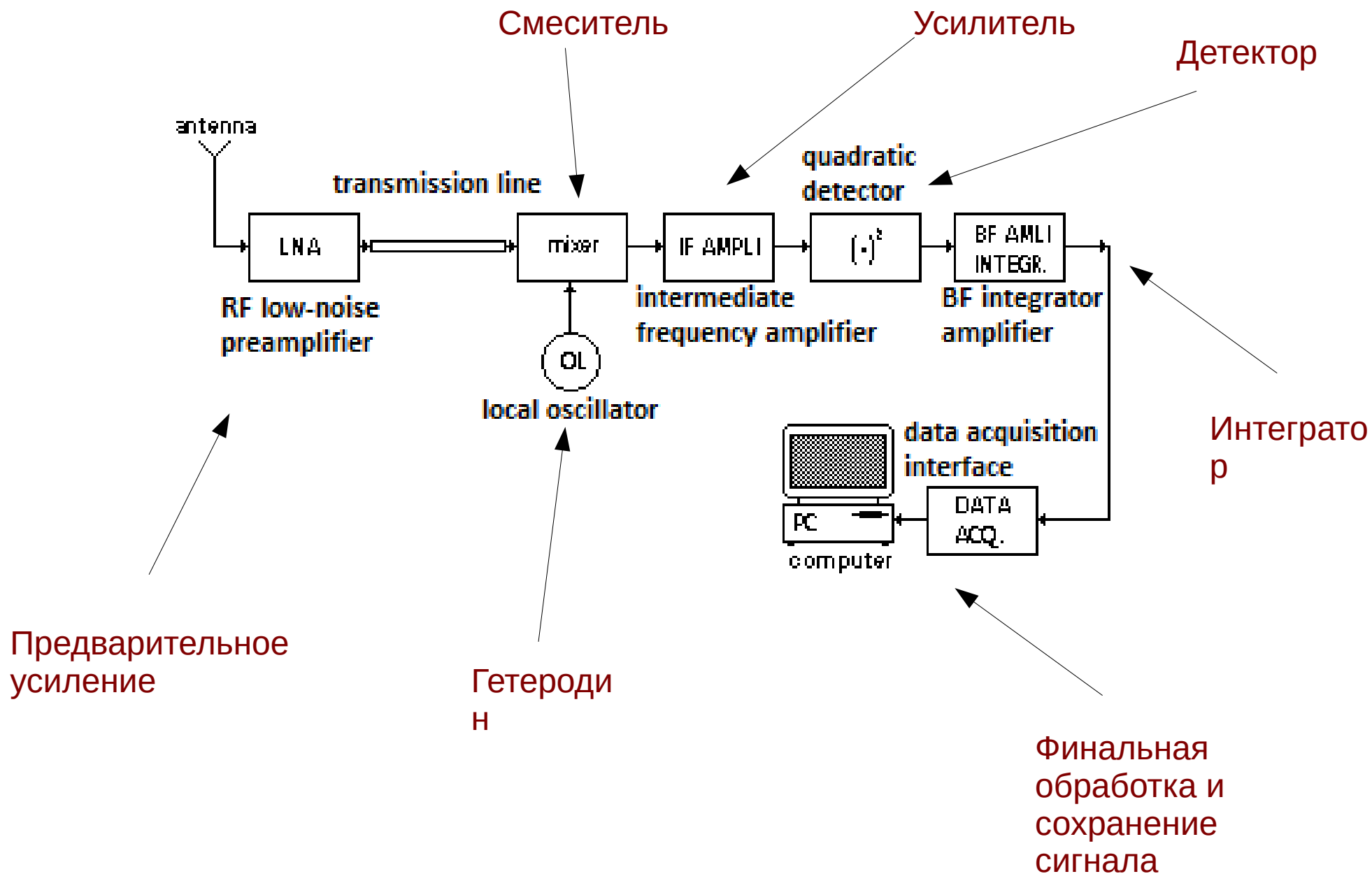
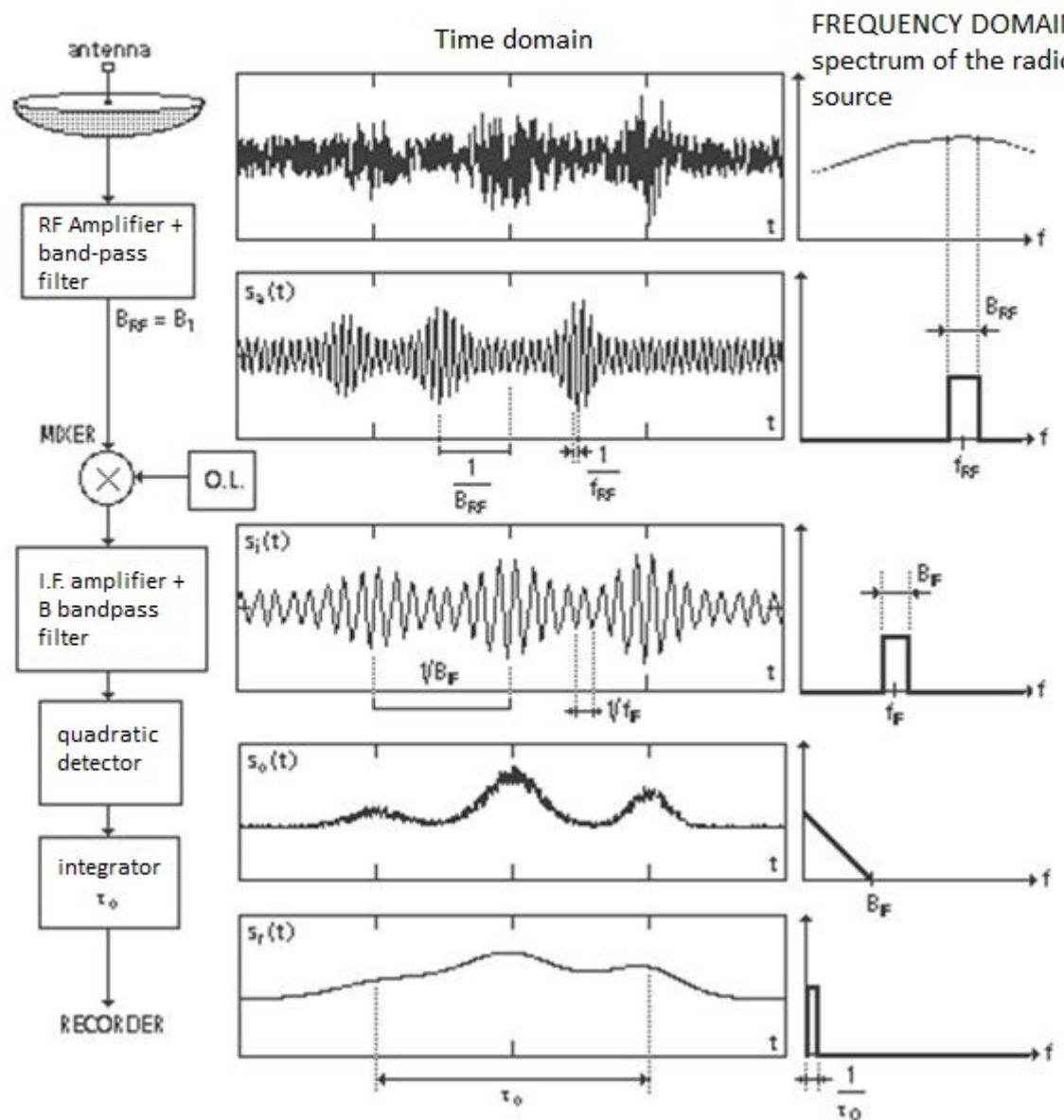


Схема гетеродинной приемной системы



Processed signals from a radio



The most important requirement for a total-power receiver, after the sensitivity of the system is its ability to measure, in a stable and reproducible, slight differences in the equivalent noise temperature of the antenna compared to the background noise

Equation of the radiometer

$$\Delta T = \frac{T_s}{\sqrt{BN\tau_0}} \text{ [}^\circ\text{K]}$$

B = RX bandwidth;

N = Records number;

T_0 = RX Noise temperature;

τ_0 = Integral time constant.

ΔT = Minimum detectable signal

Важные физические величины и понятия радиоастрономии

Интенсивность излучения I_ν (spectral intensity = specific intensity = monochromatic intensity = spectral brightness)

$$dE = I_\nu \cos\theta d\sigma d\Omega d\nu dt$$

Поток излучения S_ν (flux density)

$$S_\nu = \int I_\nu \cos\theta d\Omega$$

Для измерения потока обычно используется внесистемная единица Янский: $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$

Формула Планка:

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

В радиоастрономии, как правило, $h\nu \ll k_B T$

Поэтому с хорошей точностью справедлива формула Релея-Джинса:

$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2}.$$

Тот факт, что интенсивность излучения пропорциональна температуре делает удобным описывать интенсивность в ед. температуры:

$$T_b \equiv I_\nu c^2 / 2k\nu^2$$

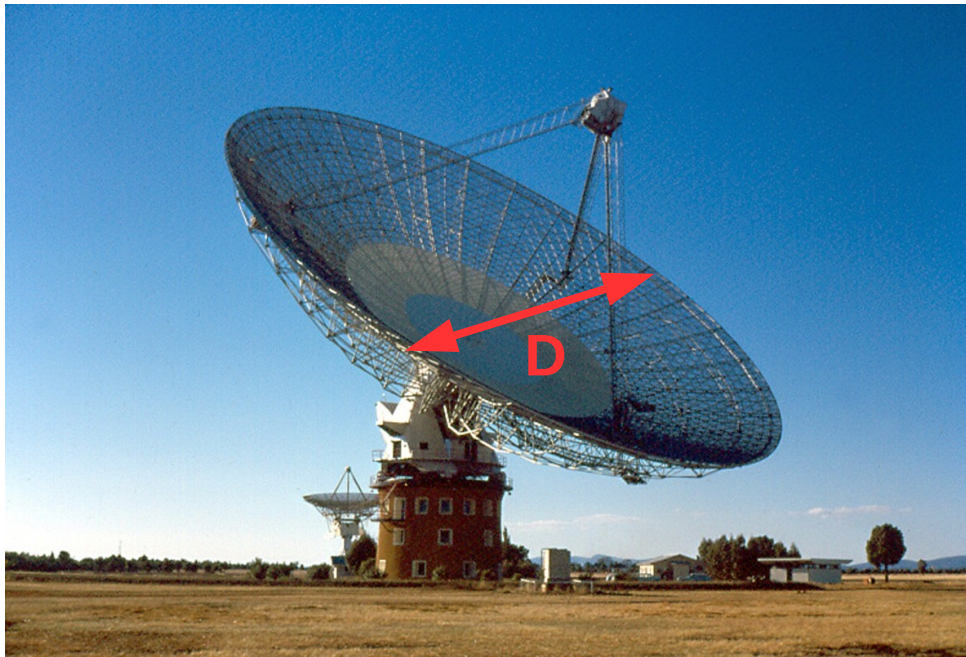
T_b — температура излучения или яркостная температура

Важные элементы теории радиотелескопов

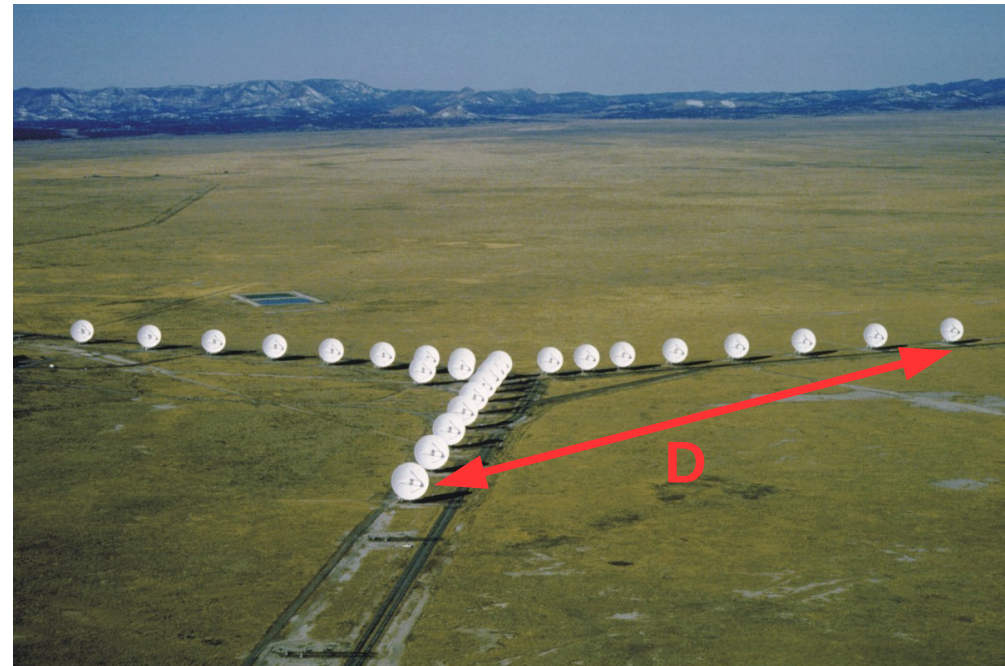
1. Угловое разрешение и диаграмма направленности антенны
2. Эффективная площадь антенны
3. Антенная температура
4. Шум и системная температура

Угловое разрешение определяет минимальный масштаб, который можно различить в изображении. Этот масштаб определяется волновой природой света (дифракцией) и равен:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

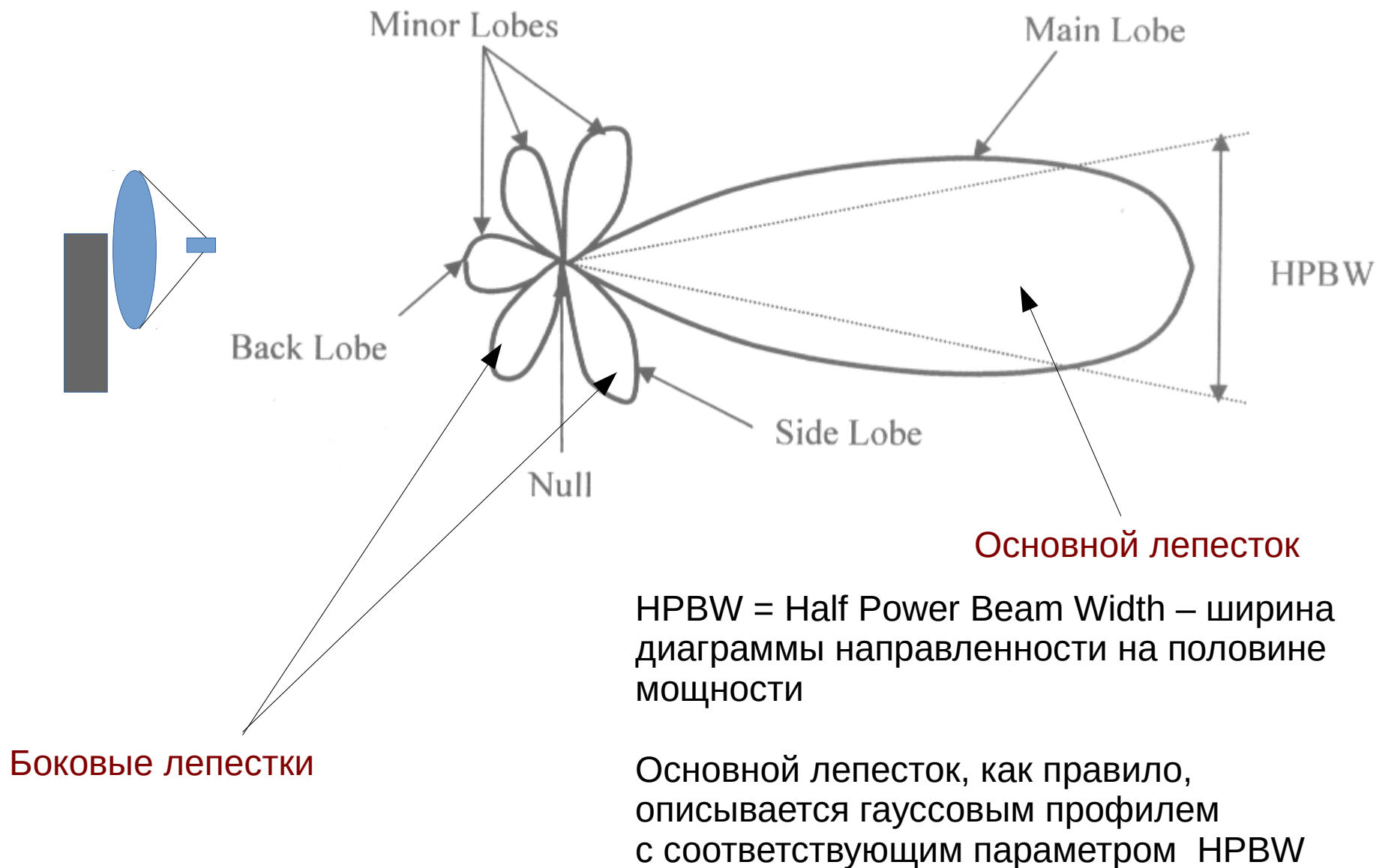


Одиночный телескоп



Радиоинтерферометр

Диаграмма направленности одиночного телескопа определяет чувствительность телескопа во всех направлениях



Эффективная площадь (апертура) антенны A_e :

$$A_e = \frac{P_e}{S}$$

S – поток излучения от плоской волны

P_e – извлекаемая антенной мощность

Эффективная апертура антенны зависит от длины волны:

$$A_e \Omega_A = \lambda^2$$

Ω_A – телесный угол главного лепестка антенны

λ – длина волны

Эффективная апертура антенны, как правило, меньше геометрической

Антенная температура T_A :

$$P_e = kT_A$$

где P_e – мощность на выходе антенны

Антенная температура – по сути температура излучения, свернутая по нормированной диаграмме направленности телескопа

$$T_A = \frac{\int T_b P_n(\Omega) d\Omega}{\int P_n(\Omega) d\Omega}$$

Антенная температура -- это не температура антенны :)

Шум и системная температура

Полезный сигнал на выходе приемника антенны необходимо отделить от шума, источниками которого является небо, земля, антенна телескопа, усилитель и другие элементы телескопа.

Уровень шума описывается с помощью шумовой (системной) температуры T_{sys} , которая, как правило, значительно выше антенной температуры (например 300 vs 0.1K). Важным свойством шума является его независимость от частоты (белый шум).

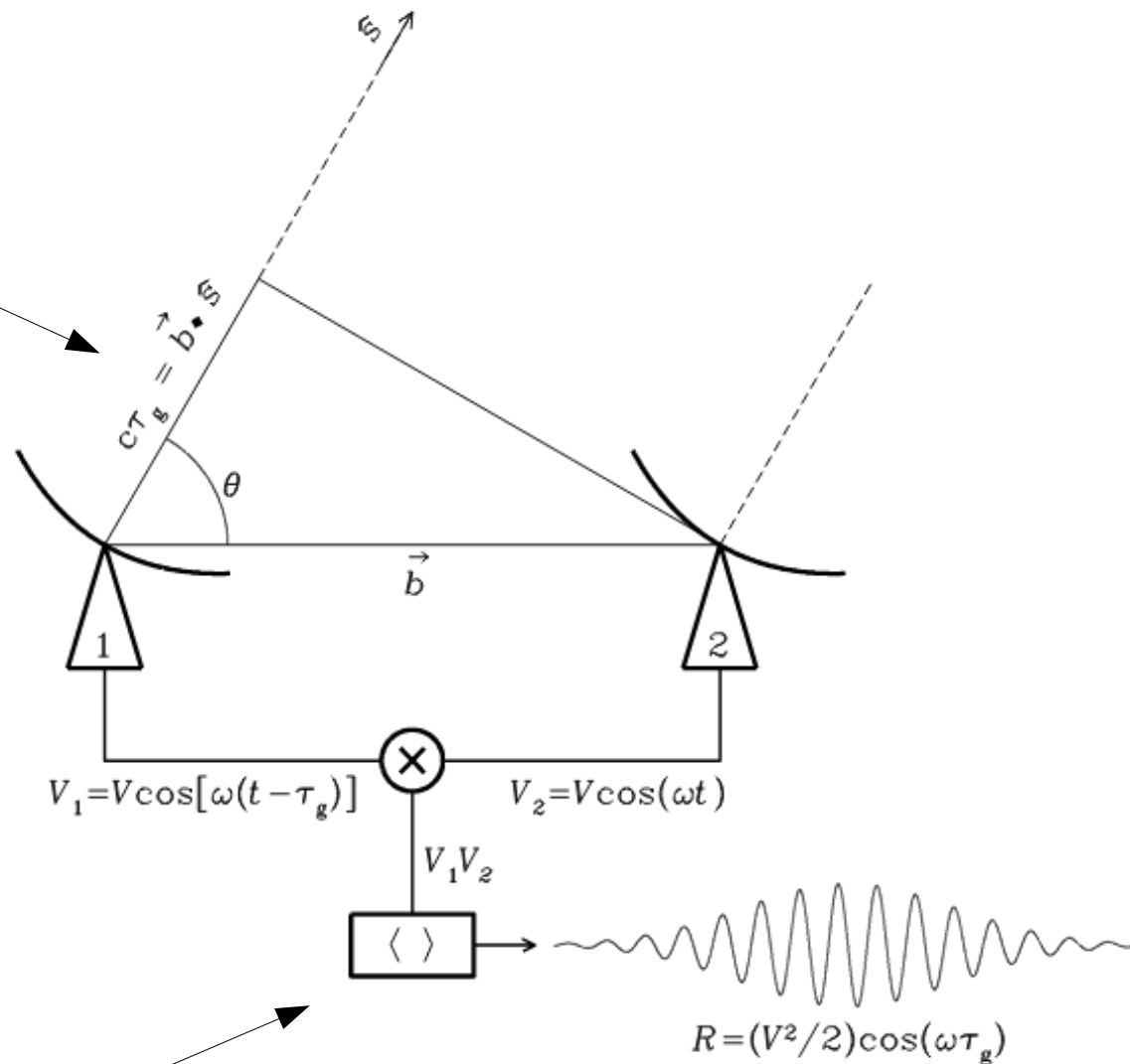
Для выделения полезного сигнала из шума, сигнал накапливается (интегрируется по времени), тем самым уменьшаются его флуктуации, связанные с наличием шума:

$$\frac{\Delta T}{T_{sys}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta \nu \Delta t}}$$

7. Интерферометрия и апертурный синтез

В основе всех интерферометров – двухэлементная система

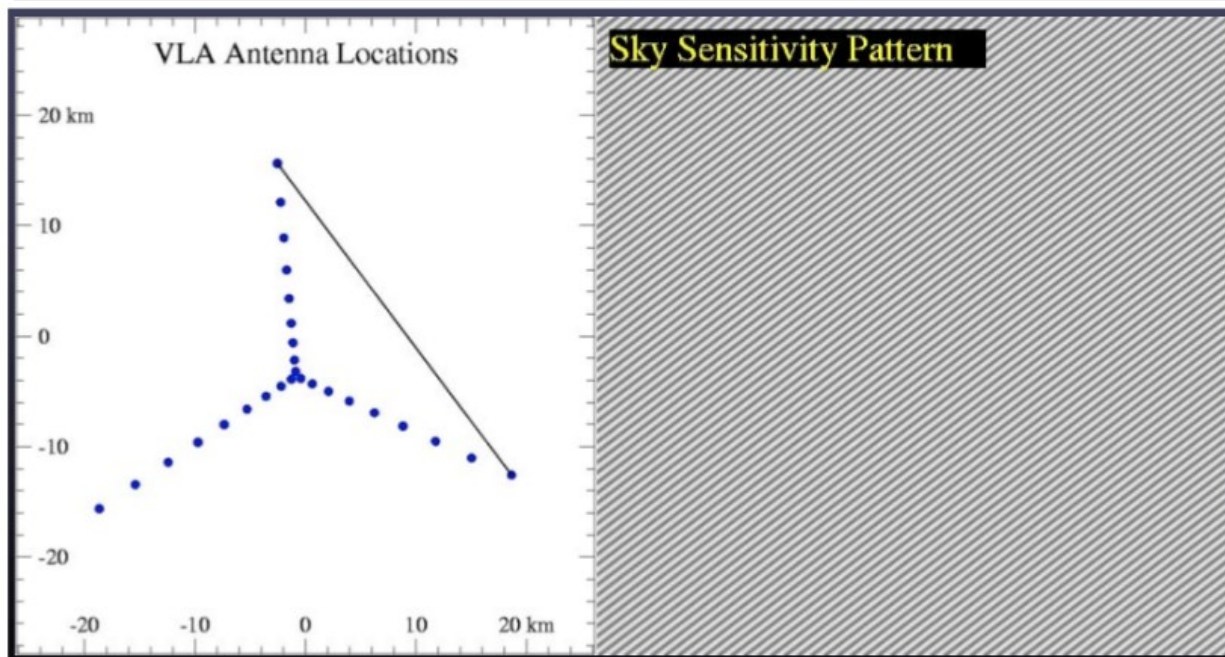
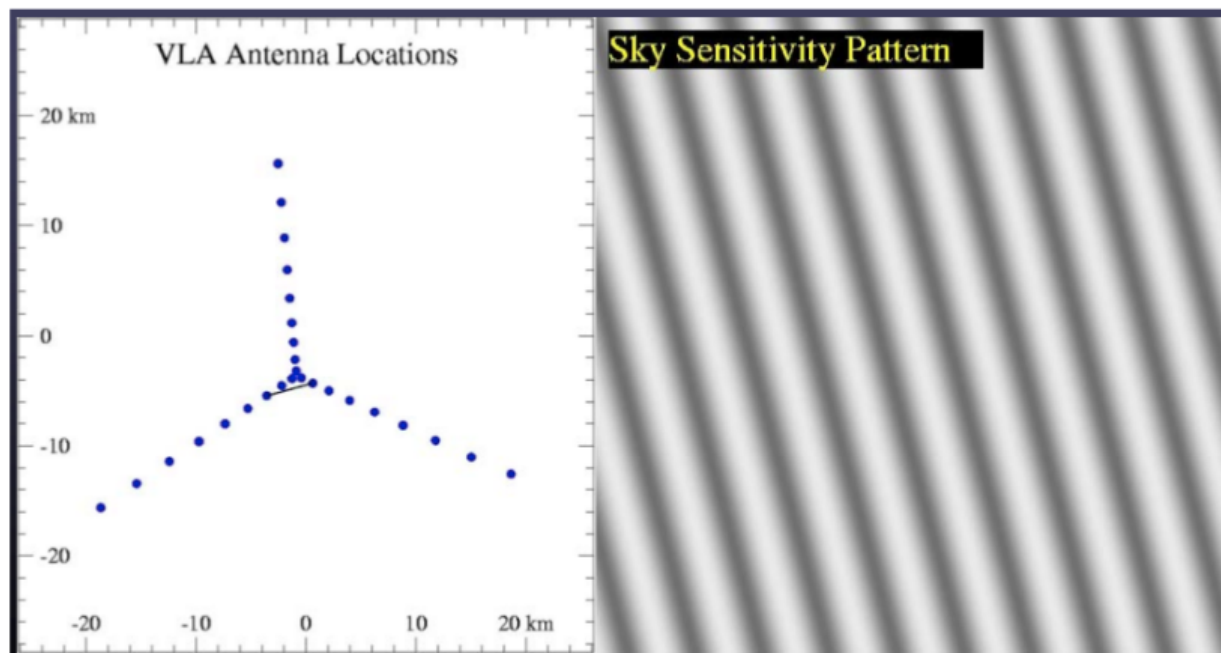
Геометрическая
задержка



Коррелятор и интегратор

R — функция направления

Чувствительность двухэлементного интерферометра при фиксированном положении относительно источника

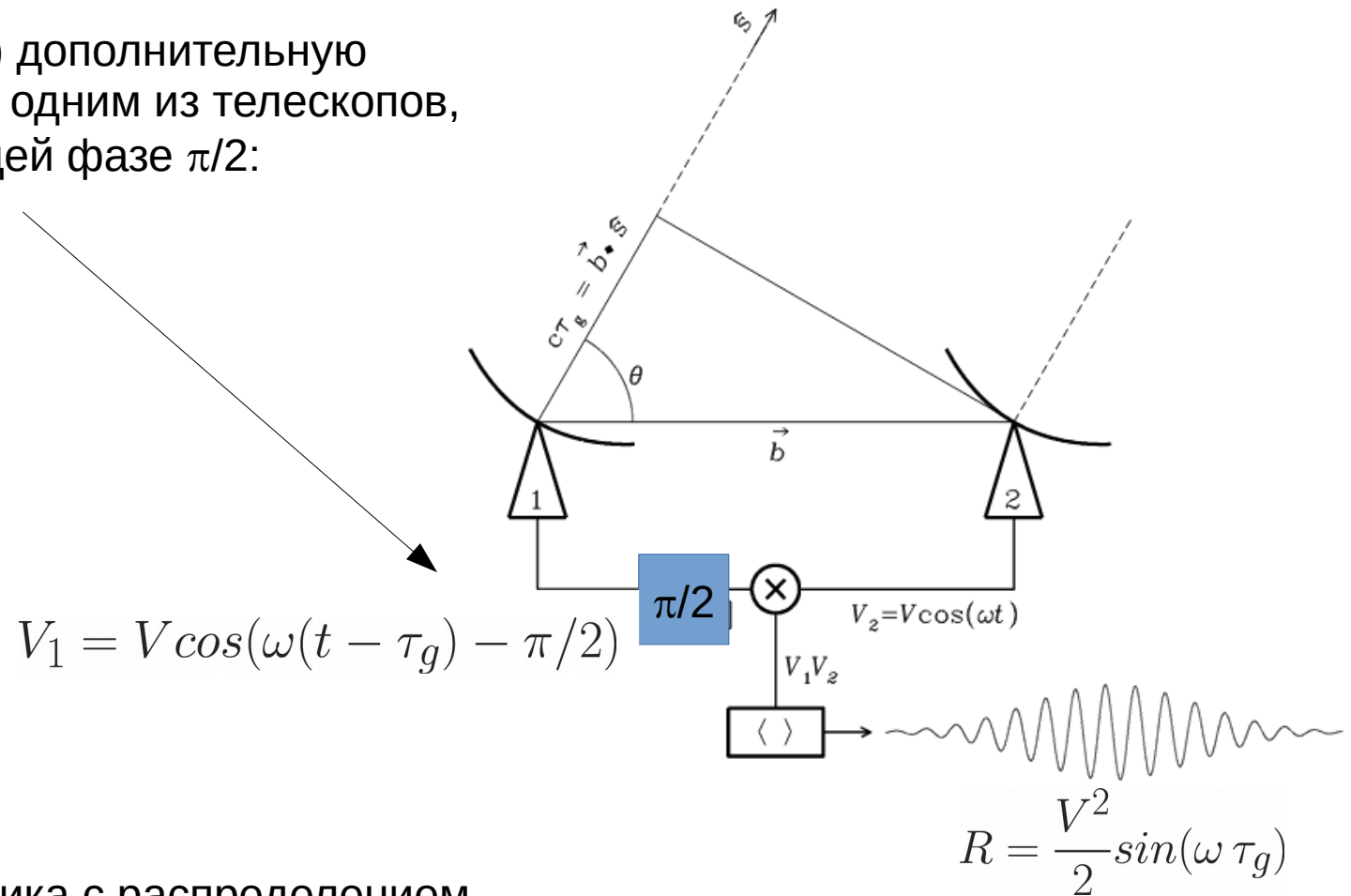


Таким образом, можно сказать, что двухэлементный интерферометр свертывает исходное изображение с «полосатой» диаграммой направленности:

$$R_c = \int I(\vec{s}) \cos(\omega \underbrace{\vec{b} \cdot \vec{s}}_{\tau_g} / c) d\Omega$$

τ_g - геометрическая
задержка

Введем (сами!) дополнительную задержку перед одним из телескопов, соответствующей фазе $\pi/2$:



Тогда для источника с распределением интенсивности $I(\vec{s})$ корреляция будет давать:

$$R_s = \int I(\vec{s}) \sin(\omega \vec{b} \cdot \vec{s} / c) d\Omega$$

Объединим R_c и R_s в единую комплексную величину V (функцию видности):

$$V = R_c - i R_s$$

Эта функция – есть ни что иное, как преобразование Фурье от распределения интенсивности:

$$V(\vec{b}) = \int I(\vec{s}) e^{-2\pi i \vec{b} \cdot \vec{s} / \lambda} d\Omega$$

Значит, зная функцию видности для всех возможных значений $\mathbf{b}$ можно найти исходное распределение интенсивности с помощью Обратного преобразования Фурье!

$$I(l, m) = \int V(u, v) e^{-2\pi i (ul - vm)} du dv$$

где (l, m) – угловые координаты, (u, v) – координаты в «обратном» пространстве, связанные с ориентацией базиса интерферометра по отношению к источнику

Дополнительные сложности:

1. Учет конечной диаграммы направленности одиночного телескопа
2. Учет конечной ширины интервала частот
3. Учет вращения Земли и гидирования источника
4. Проблемы заполнения UV-плоскости и обратного преобразования Фурье при неполном заполнении UV плоскости

Пример: симулятор работы интерферометра

<https://github.com/crpurcell/friendlyVRI>