

Плазма в космосе

Лекция №1

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

9 сентября 2021



Программа курса

- ① **Астрономические инструменты**
- ② **Вселенная сегодня**
- ③ **Космология**
- ④ **Межзвёздная среда (МЗС)**
- ⑤ **Звёзды**
- ⑥ **Солнце**
- ⑦ **Околопланетная плазма**

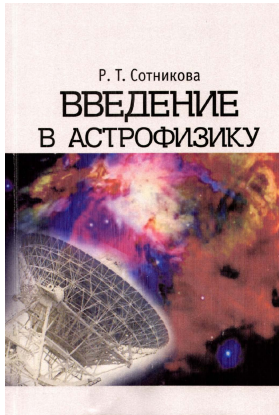
Литература

Основная литература



- ① А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика»
- ② Астронет. Лекции по Общей Астрофизике для Физиков.
К.А. Постнов

Общая астрофизика



① Р.Т. Сотникова «Введение в астрофизику»

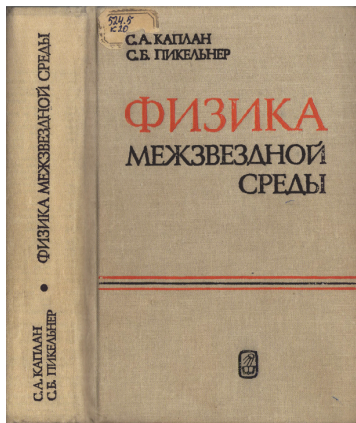
② В.Г. Сурдин «Астрономия Век XXI»

Космология

- ① Д.С. Горбунов, В. А. Рубаков
«Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва»
- ② М.В. Сажин «Современная космология в популярном изложении»
- ③ В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева
«Физическая космология»
- ④ Г.С. Бисноватый-Коган
«Релятивистская астрофизика и физическая космология»



Межзвёздная среда



- ① С.А. Каплан, С.Б. Пикельнер «Физика межзвездной среды»

Солнце

- ① Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский «Плазменная гелиогеофизика» т-1
- ② Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский «Плазменная гелиогеофизика» т-2
- ③ Э. Гибсон «Спокойное Солнце»
- ④ М. Aschwanden «Physics of the solar corona. An introduction with problems and solutions»



Магнитное пересоединение



① Э. Прист, Т. Форбс «Магнитное пересоединение»

Экзамен

- Два вопроса в билете + небольшой дополнительный.
- Вместо одного вопроса можно в течение семестра выступить с небольшим докладом по теме, имеющей отношение к курсу.

Содержание лекции

1 Особенности астрономических наблюдений

2 Электромагнитное излучение

- Понятие спектра
- «Температурная» шкала ЭМ волн
- Основные процессы генерации излучения
- Излучение водорода
- Магнитотормозное излучение
- Интенсивность и поток излучения
- Пропускание света земной атмосферой
- «Точечные» и «протяженные» источники

3 Астрономические инструменты. Телескопы

- Оптические телескопы
- Радиотелескопы

Особенности астрономических наблюдений

- Астрофизика и астрономия целиком основываются на наблюдениях.
- Наличие огромного числа наблюдаемых объектов (звёзд, галактик и т.п.) на разных стадиях эволюции позволяет даже при пассивном приеме информации изучать эти объекты на всем протяжении их эволюционного развития.
- По причине конечности скорости света, принимая сигнал от какого-либо источника, изучаются процессы, происходившие в нем многие сотни, тысячи и даже (для галактик) миллиарды лет назад.
- Космические объекты изучают во всех областях электромагнитного спектра – от радио- до гамма-лучей.

Главная задача наблюдений

Получение оценок измеряемых величин и определение характера их изменений с максимально высокой точностью.

- Из **фотометрических наблюдений** оцениваются потоки излучения в различных спектральных интервалах, интенсивность излучения или его поляризация и их временные характеристики.
- **Спектральные наблюдения** используются для измерения интенсивности излучения в непрерывном спектре и в линиях или для оценки длин волн линий.
- **Угломерные измерения** дают оценки угловых размеров источников или их отдельных деталей, с их помощью определяют угловые расстояния между источниками или их координаты.

Понятие спектра

- **Спектр** – это распределение интенсивности излучения по длинам волн I_λ или частотам I_ν .
- Вместо интенсивности для характеристики спектра можно использовать пропорциональные ей (для данного источника) единицы – световые потоки F_ν или F_λ , или же выражать спектр в относительных (безразмерных) единицах.
- Последнее обычно имеет место, если интересуются в первую очередь формой спектра, профилем или относительной интенсивностью линий, а не энергетическими характеристиками источника.
- Иногда спектры характеризуют распределением величины νI_ν или νF_ν по частотам или длинам волн, которая показывает, сколько энергии выделяется в логарифмическом интервале частот; максимум этой величины соответствует характерным частотам, на которых происходит основное энерговыделение.

Плотность энергии излучения

Спектральная плотность энергии излучения – это энергия излучения в элементе объема на частоте ν в интервале частот $d\nu$. Она имеет размерность [эрг/(см³·Гц)] и получается интегрированием интенсивности по телесному углу:

$$u_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu d\Omega. \quad (1)$$

«Температурная» шкала ЭМ волн

- В электродинамическом (классическом) описании излучение представляется электромагнитными волнами, которые распространяются в пустоте со скоростью света $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с.
- Частота ν монохроматической электромагнитной волны связана с длиной волны λ соотношением $\lambda\nu = c$.
- Энергия отдельного кванта света – фотона – может быть выражена через частоту излучения $E = h\nu = \hbar\omega$, где $h = 2\pi\hbar \simeq 6.625 \cdot 10^{-27}$ [эрг·с] — постоянная Планка.

«Температурная» шкала ЭМ волн

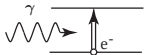
- Для теплового излучения среды с температурой T (т. е. в случаях, когда можно термодинамически ввести температуру как меру энергии хаотического движения частиц) характерная энергия излучаемых фотонов не будет сильно отличаться от энергии частиц $\sim kT$ где $k \approx 1.38 \cdot 10^{-16}$ [эрг/К] – постоянная Больцмана.
- Поэтому удобно характеризовать излучение средней энергией квантов (выраженной, например, в электрон-вольтах) или «температурой излучения» (выраженной в Кельвинах).

«Температурная» шкала ЭМ волн

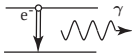


- Фотоны видимого света имеют энергию около 1 эВ, рентгеновские – 1–100 кэВ.
- В энергетических единицах температура в 1 эВ соответствует физической температуре ≈ 11600 К.
- Низкочастотное излучение в радиодиапазоне принято характеризовать частотой в Герцах или длиной волны.

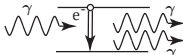
поглощение (b-b)



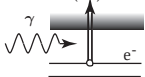
спонтанное излучение (b-b)



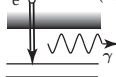
вынужденное излучение (b-b)



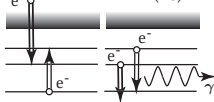
фотоионизация (b-f)



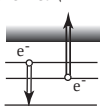
фоторекомбинация (f-b)



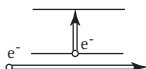
дielekтронная рекомбинация (f-b)



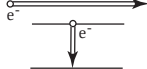
автоионизация



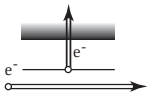
возбуждение эл. ударом (1 рода)



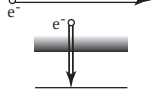
деактивация эл. ударом (2 рода)



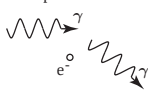
ионизация эл. ударом



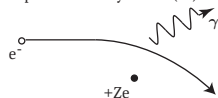
3-частичная рекомбинация



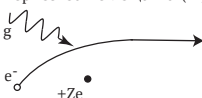
Томсоновское рассеяние



тормозное излучение (f-f)

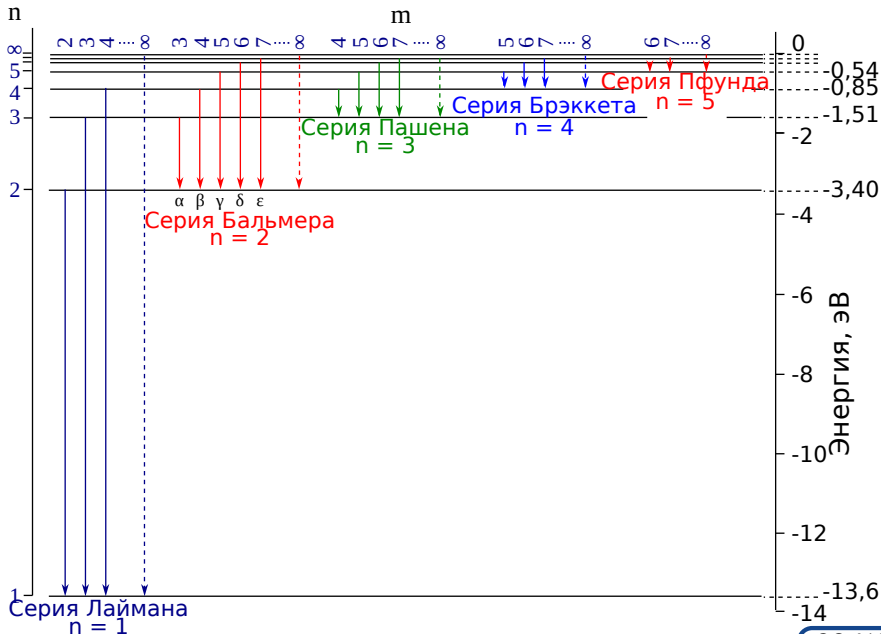


тормозное поглощение (f-f)



Схемы основных элементарных процессов взаимодействия фотонов (волнистые линии) с ионами (горизонтальные линии — уровни энергии, заштрихованные полосы — переход в континуум) и электронами (двойные стрелки). Ось времени направлена слева направо.

Излучение водорода



Серия Лаймана

Серия спектральных линий водорода, возникающая при переходе возбужденного электрона на первый энергетический уровень.

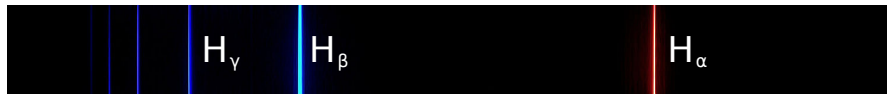
n	2	3	4	5	6	7	8	9
λ , нм	121.6	102.5	97.2	94.9	93.7	93.0	92.6	92.3
n	10	11	∞					
λ , нм	92.1	91.9	91.15					

Переход с ближайшего верхнего уровня на некоторый уровень во всех спектральных сериях водорода обозначается греческой буквой α , со следующего — буквой β и т. д.

Для серии Лаймана используется обозначение L .

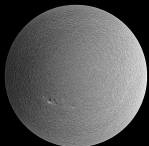
Длина волны 91.15 нм называется пределом Лаймана. В самых древних звёздах (состоящих из водорода) нет линий короче этого предела, поэтому присутствие предела в спектре является признаком, что излучение испущено древней звездой.

Серия Бальмера

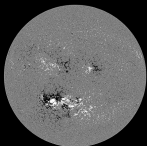


n	3	4	5	6
Название	H_α	H_β	H_γ	H_δ
λ , нм	656.279	486.135	434.0472	410.1734
Энергия, эВ	1.89	2.55	2.86	3.03
Цвет	Красный	Циан	Синий	Фиолетовый

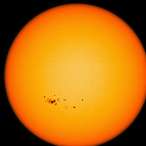
n	7	8	9	∞
Название	H_ϵ	H_ζ	H_η	Предел Бальмера
λ , нм	397.0075	388.9064	383.5397	364.6
Энергия, эВ	3.13	3.19	3.23	3.40
Цвет	УФ	УФ	УФ	УФ



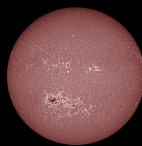
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



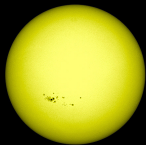
HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere



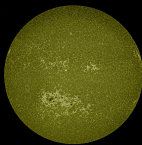
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere



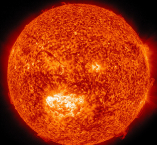
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere



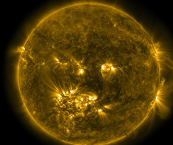
AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



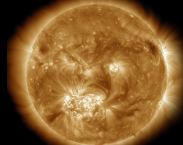
AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region



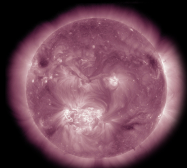
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



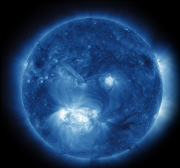
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



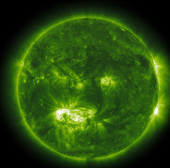
AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



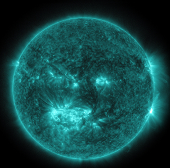
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions



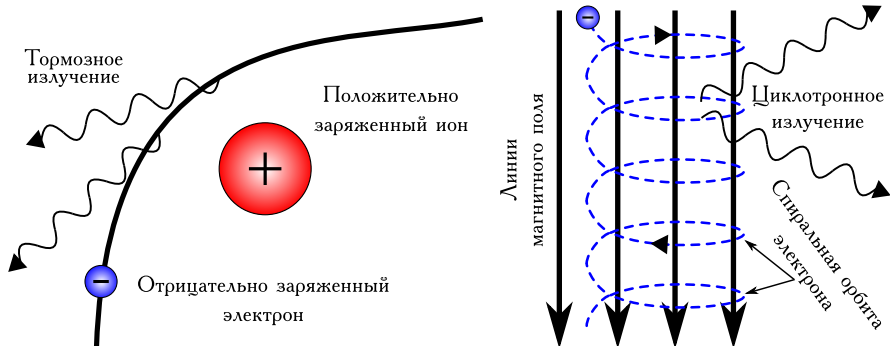
AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Магнитотормозное излучение

Электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися по траекториям, искривлённым электромагнитным полем.



Магнитотормозное излучение

Излучение



```
graph TD; A[Излучение] --> B[Циклотронное]; A --> C[Синхротронное]
```

Циклотронное

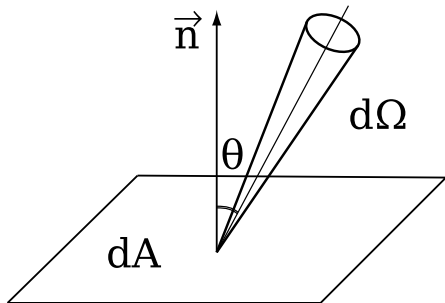
Излучение **нерелятивистских** частиц, движущихся по круговым или спиральным траекториям в магнитном поле, происходящее на гиромангнитной (циклотронной) частоте.

Синхротронное

Излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с **релятивистскими** скоростями по траекториям, искривлённым магнитным полем.

Интенсивность излучения

Интенсивность поля излучения в данном направлении — это мощность световой энергии, проходящей через элементарную площадку, расположенную перпендикулярно выбранному направлению, в элементарном телесном угле $d\Omega$ в интервале частот $d\nu$ или длин волн $d\lambda$



$$I_\nu = \frac{dE}{\cos \theta dA dt d\nu d\Omega} \quad (2)$$

$$I_\lambda = \frac{dE}{\cos \theta dA dt d\lambda d\Omega} \quad (3)$$

Переход от I_ν к I_λ осуществляется через соотношение $I_\nu d\nu = I_\lambda d\lambda$, из которого следует:

$$|I_\nu| = \left| I_\lambda \frac{\lambda}{\nu} \right|$$

Интенсивность излучения

- С ростом расстояния r до источника мощность излучения, проходящего через площадку, падает как r^2 .
- По такому же закону уменьшается и телесный угол, под которым виден источник (или любая его часть, наблюдаемая под малым телесным углом).

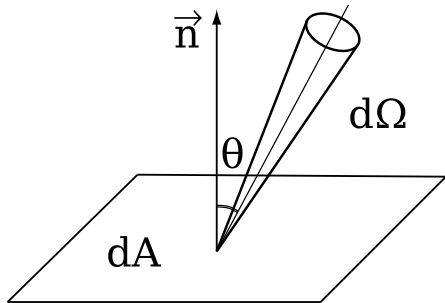
Важное свойство

Интенсивность характеризует излучательные свойства источника и не зависит от того, на каком расстоянии от него поместить элементарную площадку.

Поток излучения

Просуммировав интенсивность по всем направлениям из центра площадки, получим мощность излучения, проходящего через площадку в данном интервале частот или длин волн.

Эта (скалярная) величина является полным потоком энергии через площадку, которую называют **поток излучения**.



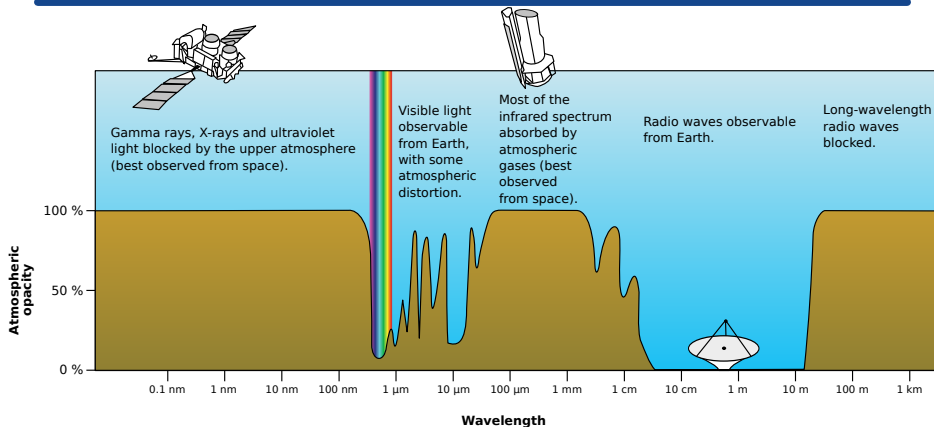
$$F_{\nu,\lambda} = \int I_{\nu,\lambda} \cos \theta d\Omega \quad (4) \quad F_{\nu,\lambda} = \int I_{\nu,\lambda}(\Omega) \cos \Omega d\Omega \quad (5)$$

Интенсивность и поток излучения могут быть определены как векторные величины. Тогда (4) – это проекция вектора спектрального потока $F_{\nu,\lambda}$ на направление, задаваемое нормалью к площадке n .

Поток излучения

- Если интенсивность излучения не зависит от направления Ω (изотропное поле излучение), то из этих формул вытекает, что полный поток через площадку равен нулю:
$$F = I \int_{4\pi} \cos \theta d\Omega = 0.$$
- Вектор потока также равен нулю, т.к. в каждом направлении энергии переносится столько же, сколько в противоположном. Такая ситуация реализуется в поле равновесного излучения (с большой точностью – глубоко внутри звезды).
- Чем более анизотропно поле излучения, тем дальше от равновесного состояния оно находится (например, поле излучения вблизи границы фотосферы звезды или излучение облака газа, подсвеченного удаленным источником, не является равновесным).

Пропускание света земной атмосферой



- Большая часть поглощения обусловлена водяным паром.
- В области малых длин волн – озоном и кислородом.
- Высоких – отражением от ионосферы.

«Точечные» и «протяженные» источники

- **Точечный источник** – это такой источник, который при наблюдениях с данным телескопом и данной аппаратурой неотличим от источника бесконечно малого углового размера.
- Существуют принципиальные физические ограничения, которые не позволяют телескопам строить сколь угодно резкие изображения. Поэтому даже точечные источники (звезды) воспринимаются как объекты, видимые на небе под малым, но конечным углом.
- Этот угол характеризует угловое разрешение (разрешающую способность) инструмента. Чем он меньше, тем более резким является изображение.

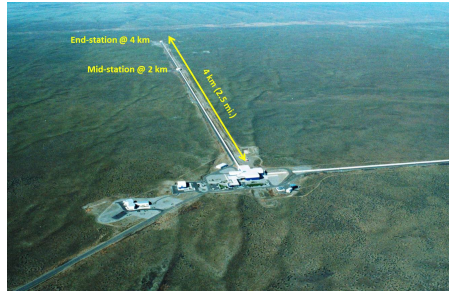
Разрешающая способность

- **Разрешающая способность телескопа** – минимальное угловое расстояние между точечными объектами, например, звездами, которые можно различить в телескоп раздельно.
- Минимальный наблюдаемый угловой размер изображения, то есть максимально возможное угловое разрешение (разрешающая способность), определяется дифракцией света на краях оптических элементов телескопа.
- Вследствие дифракции на отверстии объектива изображение любого точечного объекта имеет конечный угловой размер $\theta_d \approx \lambda/D$, где λ – длина волны излучения, D – диаметр объектива.
- Для наземных телескопов реальный размер изображения обычно ограничен влиянием турбулентности атмосферы, через которую проходит свет, и только у телескопов с объективом небольших размеров (10–30 см) он определяется дифракцией.

Виды телескопов

Телескоп – прибор, с помощью которого можно наблюдать отдалённые объекты путём сбора излучения от них.

- оптические телескопы
- радиотелескопы
- рентгеновские телескопы
- гамма-телескопы
- нейтринные телескопы
- гравитационные телескопы

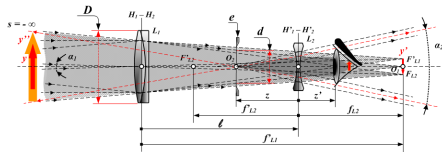


Оптические телескопы

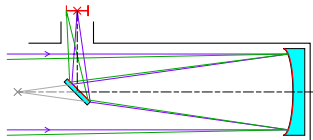


Оптические телескопы

Линзовые (рефракторы или диоптрические) — в качестве объектива используется линза или система линз.

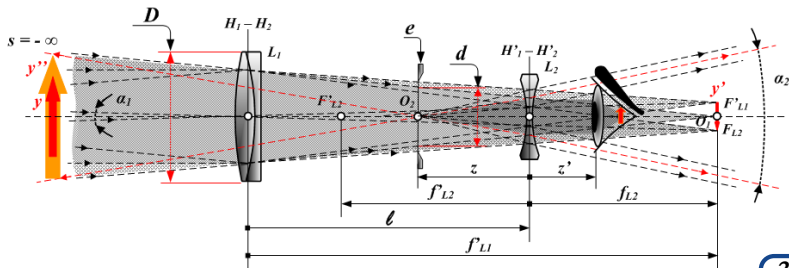


Зеркальные (рефлекторы или катаптрические) — в качестве объектива используется вогнутое зеркало.

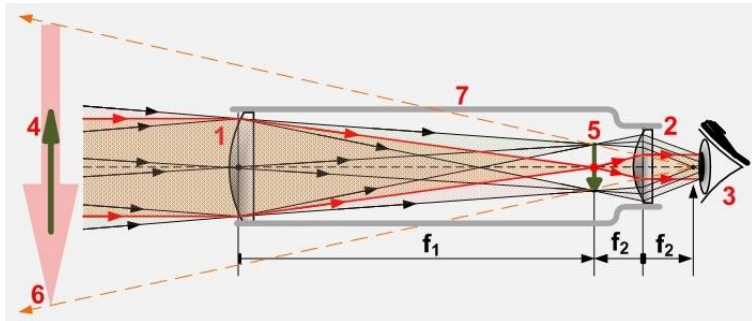


Зеркально-линзовые телескопы (катадиоптрические) — в качестве объектива используется сферическое зеркало, а линза, система линз или мениск служит для компенсации aberrаций.

Телескоп Галилея



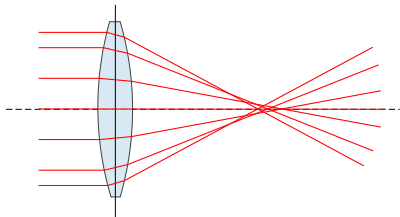
Телескоп Кеплера



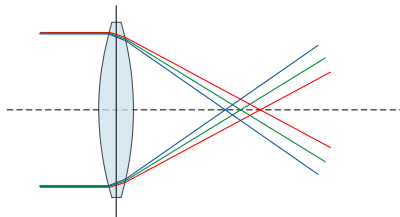
- Иоганн Кеплер в 1611 г. усовершенствовал телескоп, заменив рассеивающую линзу в окуляре собирающей.
- Это позволило увеличить поле зрения и вынос зрачка, однако система Кеплера даёт перевёрнутое изображение.
- Все последующие телескопы-рефракторы являются трубами Кеплера.

Аберрация

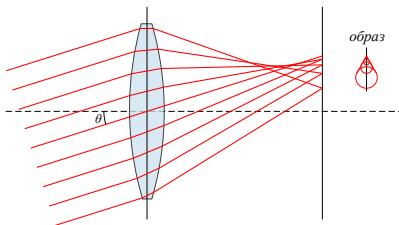
Сферическая аберрация



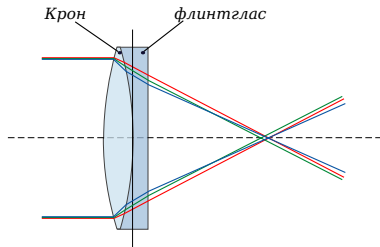
Хроматическая аберрация



Кома

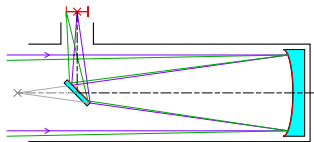


Ахроматическая линза

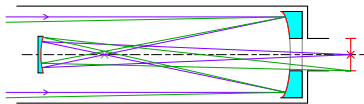


Рефлекторы

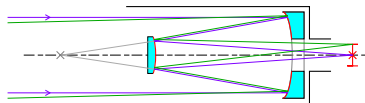
Система Ньютона (1668 г.)



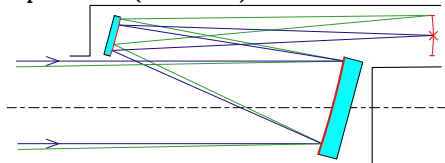
Система Грегори (1663 г.)



Система Кассегрена (1672 г.)



Брахиты (1877 г.)



Атмосферная турбулентность

- Атмосферная турбулентность создает быстро меняющуюся картину оптических неоднородностей среды (флуктуации показателя преломления) и, как следствие, искажает волновой фронт, «размывая» изображение звезды.
- Свет, падающий на различные области объектива телескопа, проходит в атмосфере разный оптический путь и поэтому имеет различный фазовый сдвиг, связанный с прохождением этих неоднородностей.
- Места установки крупных телескопов тщательно выбираются, исходя из того, насколько часто атмосфера позволяет реализовать хорошее качество изображения.
- Космические телескопы свободны от влияния атмосферы, и там может достигаться дифракционный предел углового разрешения.

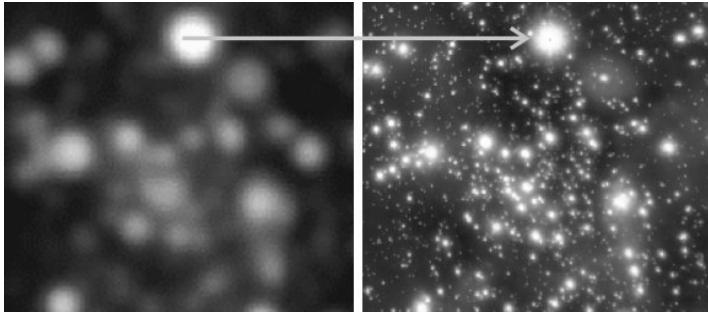
Активная и адаптивная оптика

Основной способ улучшения разрешающей способности современных крупных телескопов состоит в использовании активной и адаптивной оптики.

- Под **активной оптикой** понимают систему, изменяющую форму главного зеркала для корректировки низкочастотных (1 Гц и ниже) искажений волнового фронта. Последние могут возникать в процессе работы телескопа (деформации под действием собственного веса, температурные неоднородности).
- Под **адаптивной оптикой** понимают использование оптических устройств, которые механически изменяют свои параметры таким образом, чтобы скомпенсировать высокочастотные искажения волнового фронта (десятки–сотни Герц), вызванные атмосферной турбулентностью и иными причинами. В астрономических приборах в качестве адаптивной оптики используют специальные деформируемые зеркала диаметром порядка 20 см , форма поверхности которых изменяется при подаче внешнего сигнала.

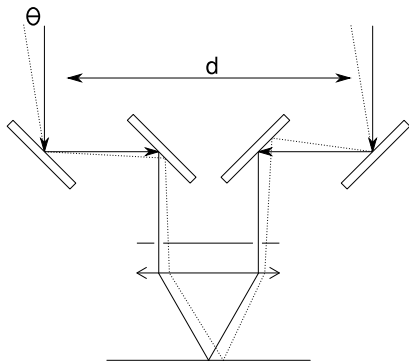
Адаптивная оптика

- При работе с адаптивной оптикой свет от главного зеркала направляется на деформируемое зеркало, которое «корректирует» волновой фронт и направляет исправленный пучок в основной фокус.
- Коррекция волнового фронта осуществляется в реальном времени путем подачи корректирующего сигнала на актюаторы деформируемого зеркала. Сигнал вырабатывается устройством, измеряющим наклон и кривизну волнового фронта света, отслеживая изображение выбранной реперной звезды.



Звездные интерферометры

Если свет принимать одновременно двумя телескопами, расположенными на расстоянии **d**, а затем заставить принятые сигналы интерферировать, то интерференционные полосы будут наблюдаться до тех пор, пока $d \leq 1.22\lambda/\theta$, где θ – угловой размер источника.



Наблюдения проводятся с короткими экспозициями (чтобы турбулентность атмосферы не размыла интерференционную картину) при различных ориентациях оси, соединяющей телескопы, относительно направления на источник. Получаемая при этом интерференционная картина в принципе позволяет достичь дифракционного углового разрешения $\sim \lambda/d$.

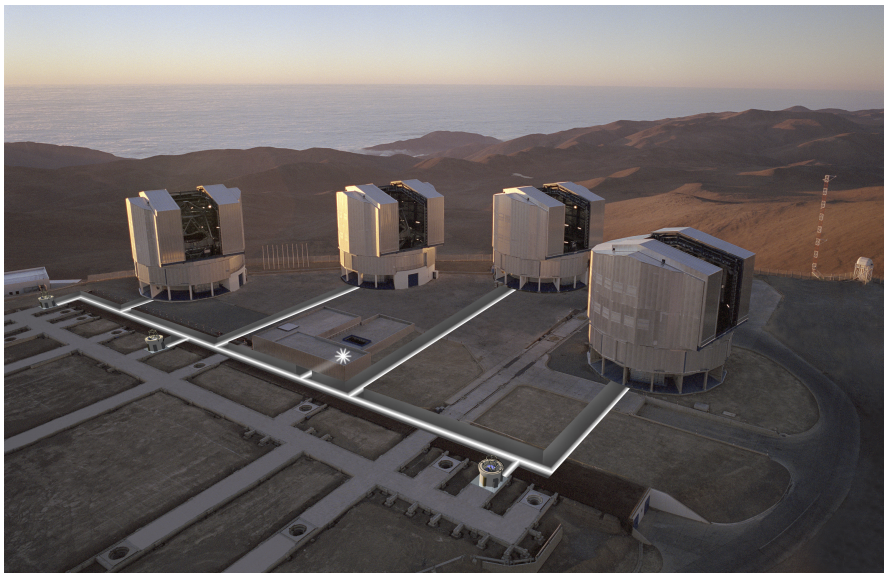
Большой Канарский телескоп



Телескопы обсерватории Кека



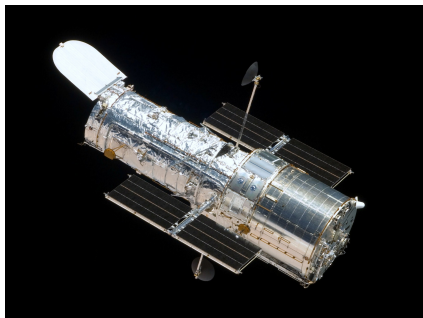
Very Large Telescope



Большой Телескоп Азимутальный

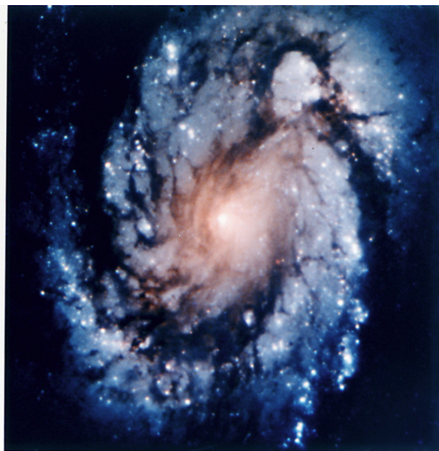


Телескоп «Хаббл»



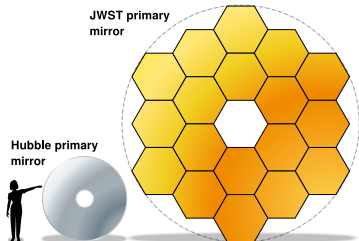
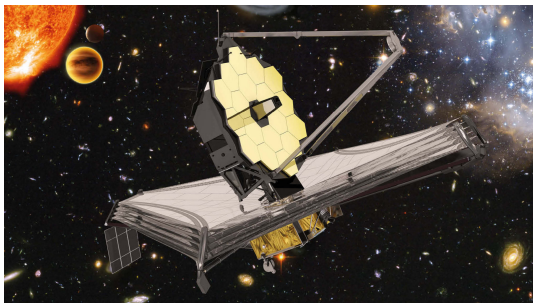
- Запуск: 25 апреля 1990 г.
- Диапазон: 0.11 — 2.4 мкм (ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный)
- Диаметр: 2.4 м
- Высота орбиты: ~ 569 км
- При помощи измерения расстояний до цефеид в Скоплении Девы было уточнено значение постоянной Хаббла (погрешность снизилась с 50% до 1.3%).
- Частично подтверждена теория о сверхмассивных чёрных дырах в центрах галактик;
- Доказано, что процесс формирования планет происходит у большинства звёзд нашей Галактики.

Система оптической коррекции



Зеркало было изготовлено слишком плоским по краям.
Отклонение от заданной формы поверхности составило 2 мкм, что
привело к сильной сферической аберрации.

Телескоп им. Джеймса Уэбба



- Запуск: ноябрь 2021 г. (планировался на 2007-й год)
- Диапазон: 0.6—28 мкм (части видимого и инфракрасного)
- Диаметр: 6.5 м
- Местонахождение: точка Лагранжа L_2 системы Солнце – Земля (1,5 млн км от Земли в противоположную Солнцу сторону)

Рефрактор Иерсейской обсерватории (40-дюйм. линза в том же масштабе)
Уильямс-Бей, Висконсин, США (1893)

Телескоп Всемирной выставки в Париже (49-дюймовая линза в том же масштабе)
Париж, Франция (1900)

Телескоп Хокера (100 дюймов)
Гора Вилсон, Калифорния, США (1917)

Телескоп Хейла (200 дюймов)
Гора Паломар, Калифорния, США (1948)

Многозеркальный телескоп (1979—1998)
Гора Хопкинс, Аризона, США

Большой телескоп азимутальный (БТА)
Зеленчукский район, КЧР, Россия (1975)

«Гайя»
Точка L-системы
Солнце — Земля (2014)

«Джеймс Уэбб»
Точка L-системы
Солнце — Земля (запланирован на 2021)



Теннисный корт в том же масштабе

Спектроскопический телескоп LAMOST
Хэбэй, Китай (2009)

Большой Канарский телескоп Ла-Пальма
Канарские о-ва, Испания (2007)

Телескоп Хобби — Эверли
Горы Дейвис, Техас, США (1996)

Большой южноафриканский телескоп
Сатерленд, ЮАР (2005)

Большой бинокулярный телескоп
Гора Грейам, Аризона, США (2005)

Очень большой телескоп
Серро-Параналь, Чили (1998, 1999, 2000, 2000)

Магеллановы телескопы
Лас-Кампанас, Чили (2000, 2002)

Телескопы Кека
Мауна-Кеа, Гавайи, США (1993, 1996)

«Джемини» (северный)
Мауна-Кеа, Гавайи, США (1999)

«Субару»
Мауна-Кеа, Гавайи, США (1999)

«Джемини» (южный)
Серро-Пачон, Чили (2000)

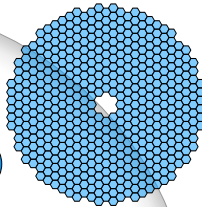
Обсерватория имени Веры Рубин
Серро-Пачон, Чили (запланирована на 2022 г.)

Гигантский Магелланов телескоп
Лас-Кампанас, Чили (запланирован на 2029 г.)

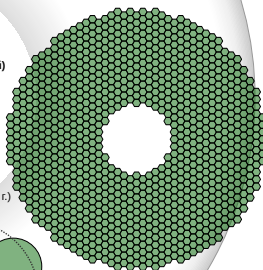
Ошеломляюще большой телескоп (отменён)

305-метровый радиотелескоп Аресибо в том же масштабе

Радиотелескоп FAST
(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)
в том же масштабе



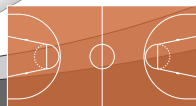
Тридцатиметровый телескоп
Мауна-Кеа, Гавайи, США (запланирован на 2027 г.)



Чрезвычайно большой телескоп
Серро-Армазонес, Чили (запланирован на 2025 г.)

Человек
в том же масштабе

0 5 10м
0 10 20 30фут



Баскетбольная площадка в том же масштабе

Радиотелескопы



Радиотелескопы

- Радиотелескопы используются для приема космического излучения в пределах окна прозрачности земной атмосферы для радиоволн в диапазоне от миллиметров до декаметров.
- Основные части радиотелескопа: антенна и радиометр (приемное устройство).
- Наиболее распространены параболические антенны, фокусирующие радиопоток.
- Высокого углового разрешения можно достичь с использованием радиоинтерферометров.

Аресибо (США, расположен в Пуэрто-Рико)



- Диаметр чаши 304.8 м;
- Длины волн радиоволны (3 см — 1 м);
- Начало работы: 1 ноября 1963 года

Аресибо



- Атлантический тайфун "Исайя" обрушившись на Пуэрто-Рико 10 августа 2020 года.
- Лопнули два из 18 прикрепленных к трем мачтам стальных тросов, удерживавших 820-тонный приемник радиоволн на высоте 137 метров.
- 1 декабря в 7:55 по местному времени оставшиеся кабели лопнули, и 820-тонный приемник радиоволн рухнул на расположенную под ним сферическую зеркальную антенну

FAST



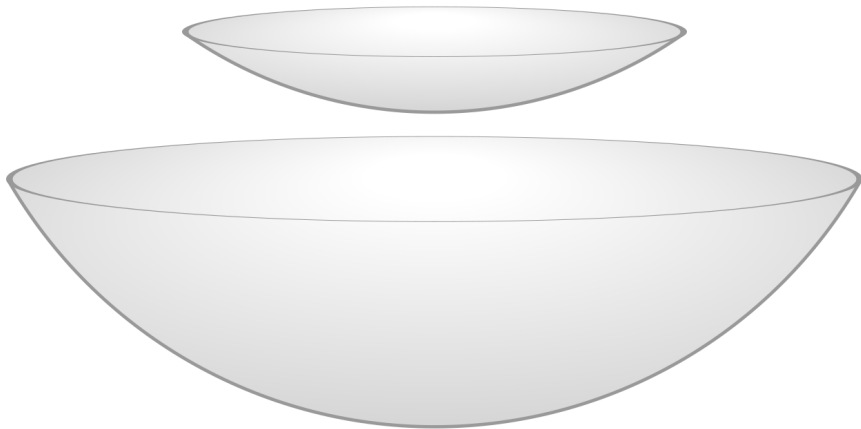
- Five hundred meter Aperture Spherical Telescope — «Сферический радиотелескоп с пятисотметровой апертурой»
- Самый большой мире радиотелескопом с заполненной апертурой, его диаметр — 500 метров.

FAST



- Расположение: Китай, провинция Гуйчжоу;
- Длины волн: 10см - 4.29 м;
- Дата запуска: 3 июля 2016.

FAST vs. Аресибо



РАТАН-600



- Крупнейший в мире радиотелескоп с рефлекторным зеркалом диаметром около 600 метров.
- Радиотелескоп расположен в Карачаево-Черкесии, недалеко от станции Зеленчукская, на высоте 970 метров.

РАТАН-600



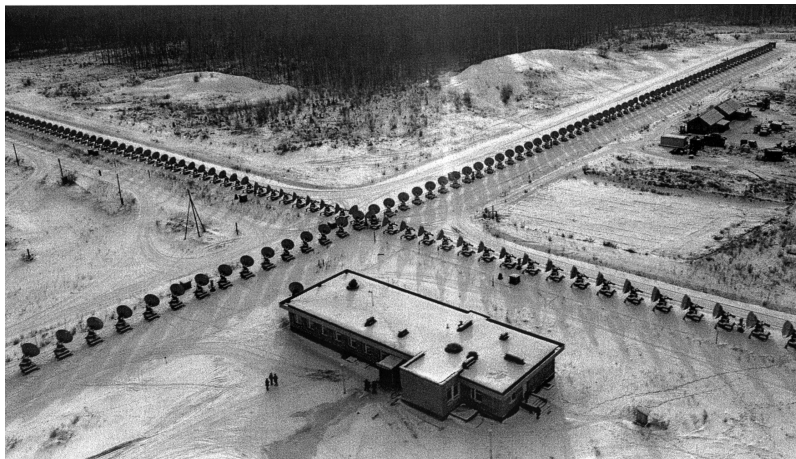
- Длины волн: радиоволны 0,8 — 50 см (610 — 35 000 МГц);
- Дата запуска: 12 июля 1974.

Радиотелескоп Грин-Бэнк



- Крупнейший в мире полноповоротный параболический радиотелескоп.
- Длины волн: радиоволны 0.1–116 ГГц;
- Дата запуска: 2000 год. Диаметр: 100 м.

Сибирский солнечный радиотелескоп



- Массив антенн 128×128 элементов (крестообразный радиоинтерферометр)
- Микроволновой диапазон (5.7 ГГц)
- Август 1984 года. Размер: 622×622 м.

Сибирский солнечный радиотелескоп



- Старые антенны имеют диаметр 2.5 м и расположены на расстоянии 4.9 м одна от другой.
- В 2020 году был существенно обновлён (стоимость реконструкции более двух миллиардов рублей).
- Новый комплекс состоит из трех решеток с разным диапазоном частот: 3–6 ГГц (96 антенн), 6–12 ГГц (192 антенны), 12–24 ГГц (224 антенны).

Low-Frequency Array (LOFAR)



- Радиointерферометр, разрабатывающийся нидерландским институтом ASTRON.
- Общая эффективная площадь достигает 1 кв. километра.
- Предназначен для наблюдений на низких радиочастотах – 10-240 МГц.

Радиоастрон

Российская космическая обсерватория «Радиоастрон»

«Радиоастрон» позволяет увидеть далекие объекты космоса в недостижимом доселе разрешении

Параболическая антенна

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

«Радиоастрон» – первый в истории российский радиотелескоп на орбите

Он изучает:

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

Главный исполнитель проекта: НПО имени Лавочкина

Разработчик научной аппаратуры: Астрономический центр ФИАН

Срок службы: не менее 5 лет

Масса: 3,8 тонны

Точность информации: 8 угл.микросекунд

Синхронизация телескопов и усиление сигналов

Наземный телескоп

Платформа «Навигатор»

Комплекс для передачи информации

Солнечные батареи

Орбита: высокоэллиптическая

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

Наблюдаемый объект

Радиоастрон

Луна

База интерферометра



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

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

○ Время работы: с 2011 по 2019 год.

На следующей лекции

Вселенная сегодня. Методы измерения расстояний, масс и скоростей астрофизических объектов.

