КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА – ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

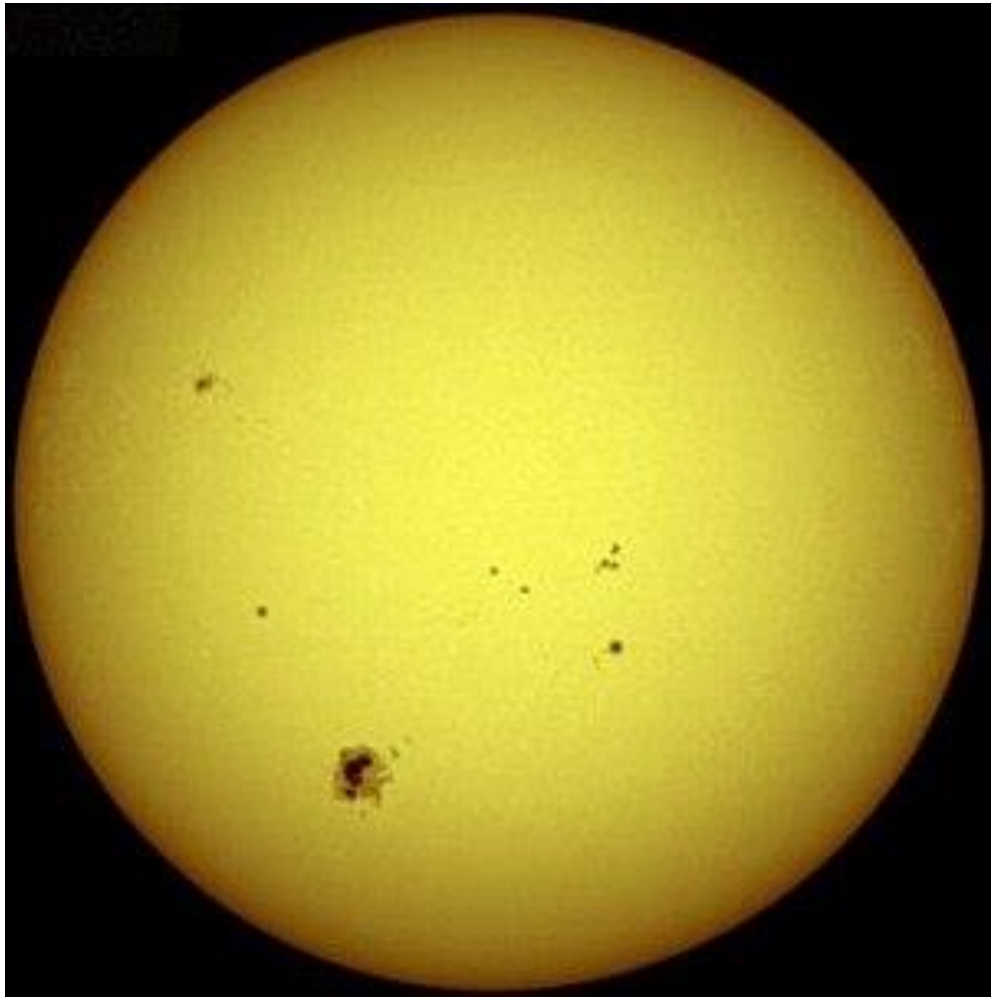
С.А. Богачёв

Наблюдения Солнца с Земли

Наблюдения Солнца с Земли

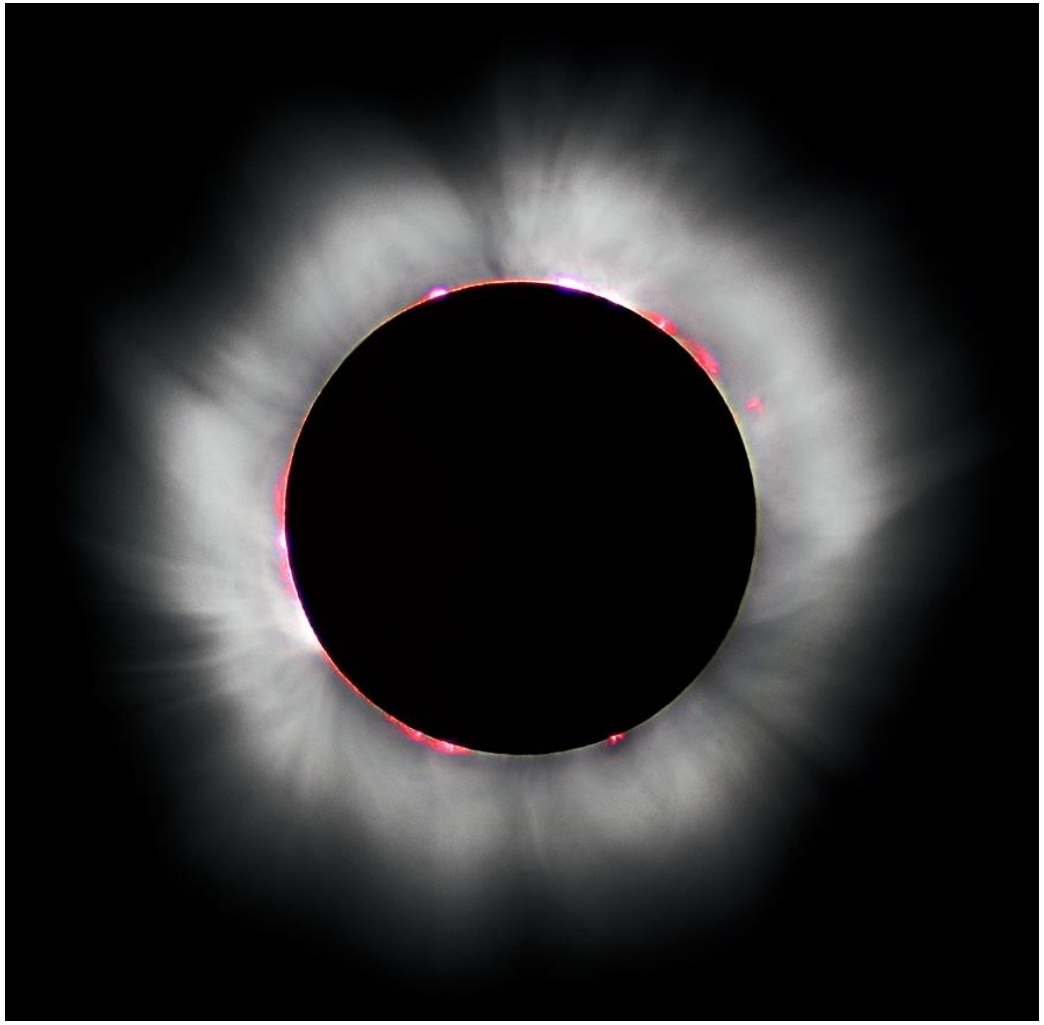
Наблюдения Солнца с Земли

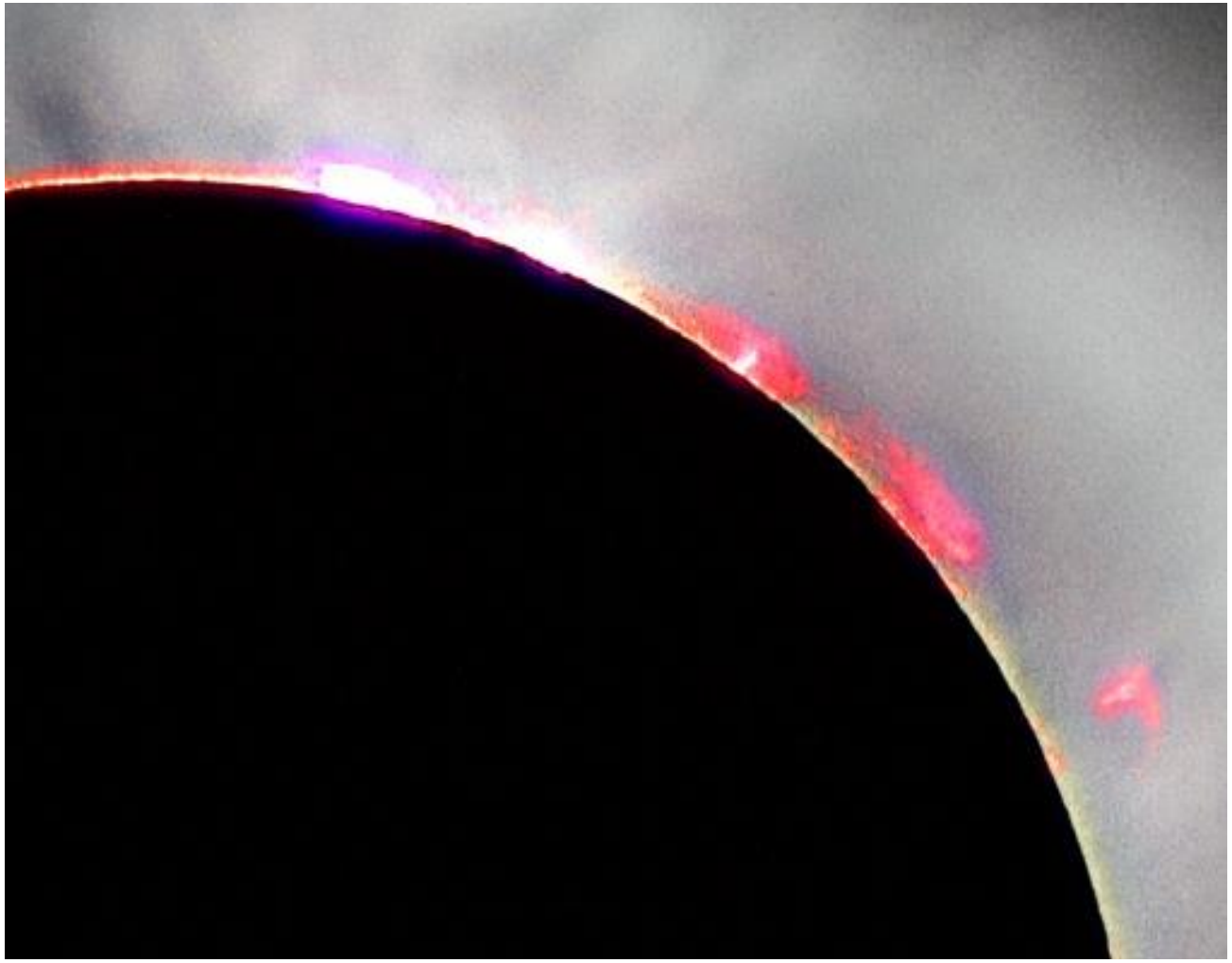
Видимое Солнце - фотосфера



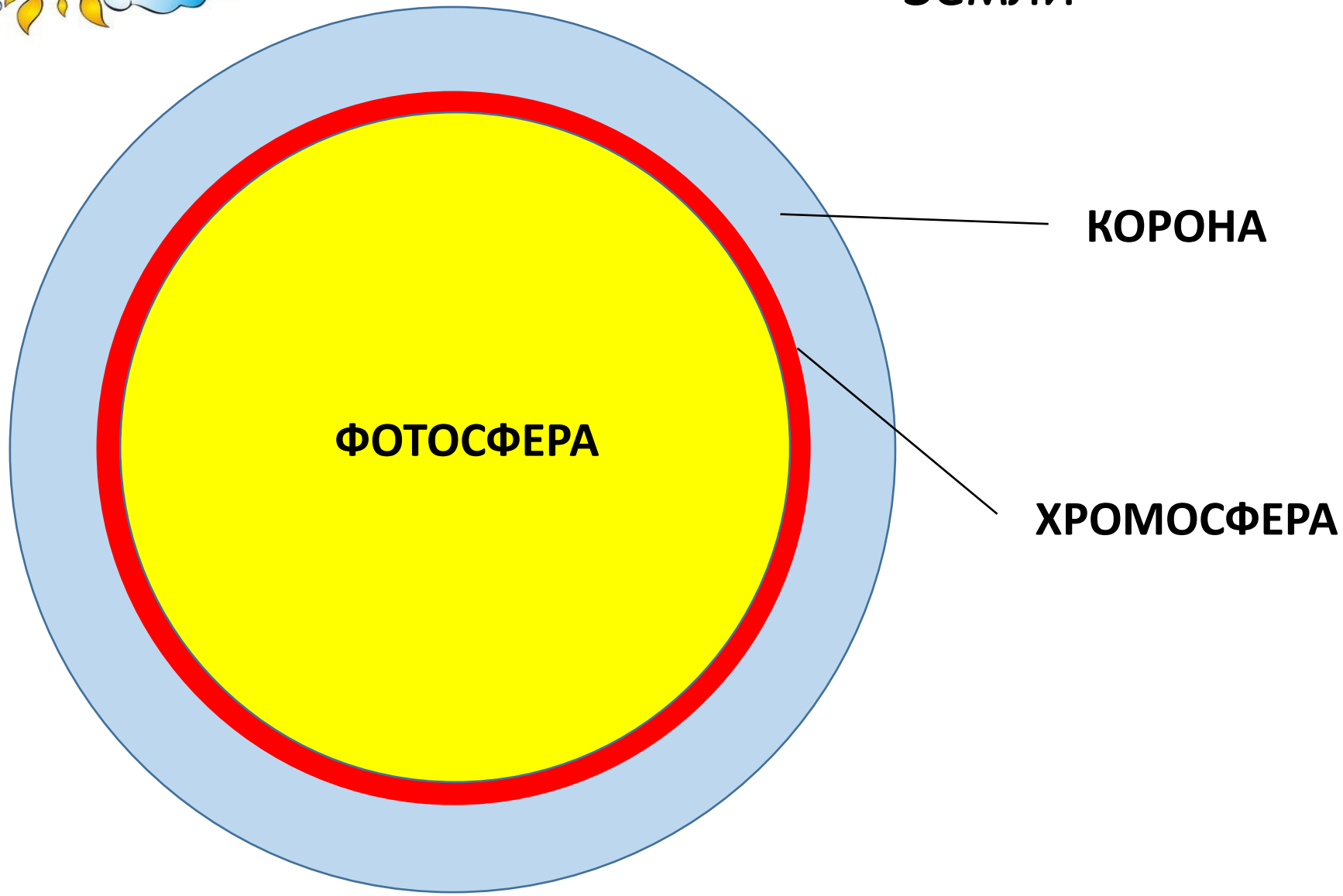
Наблюдения Солнца с Земли

Корона и хромосфера Солнца

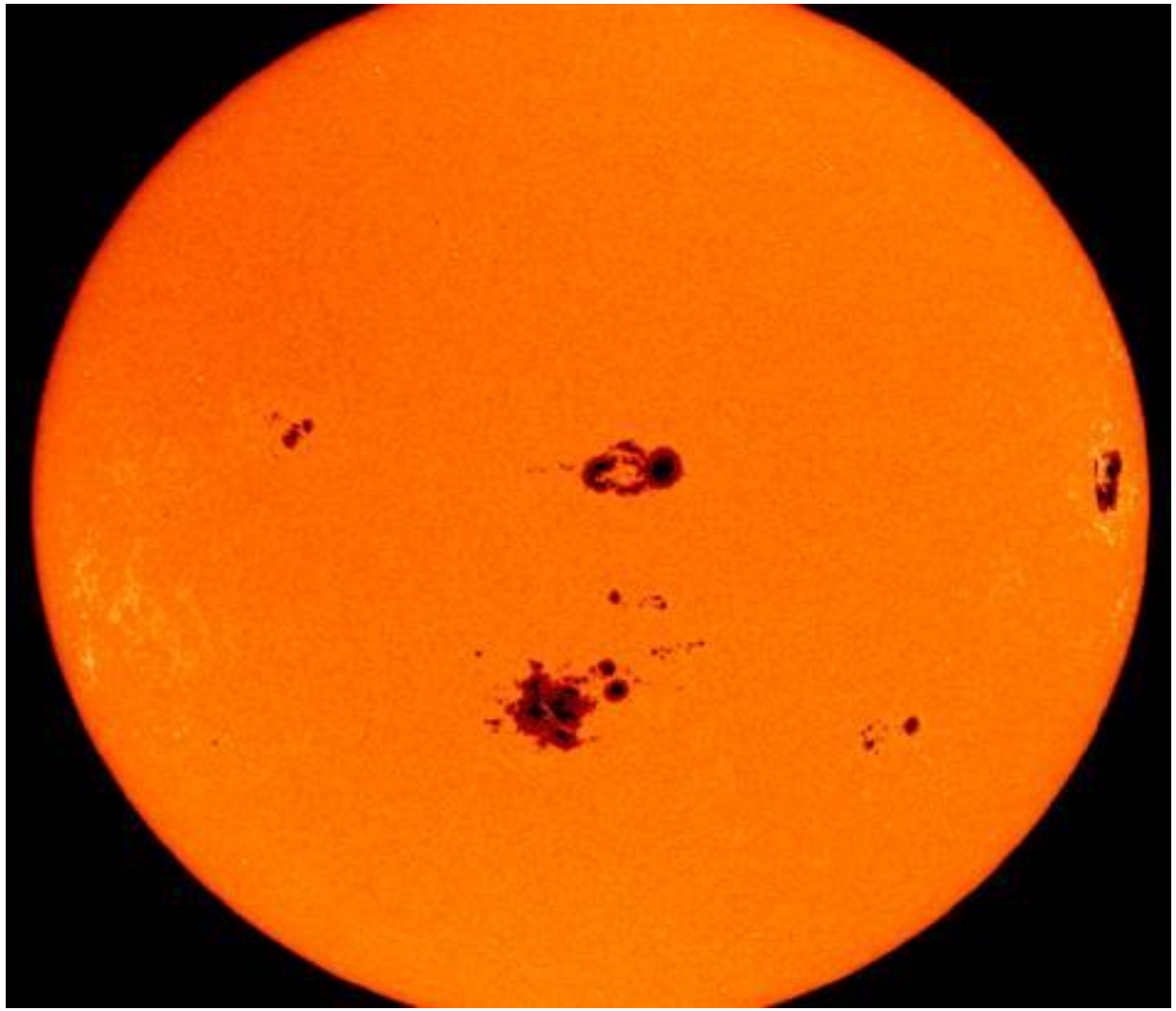




Строение атмосферы Солнца по наблюдениям с Земли



Вид Солнца с Земли - пятна



Солнечные пятна – основная деталь, видимая с Земли.
Галилей, Штейнер – начало XVII века (~ 1610)

Размеры пятен – до 1 угловой минуты.

Максимальная площадь – не более 1 % площади диска.

В 80 % случаев – пятна есть.

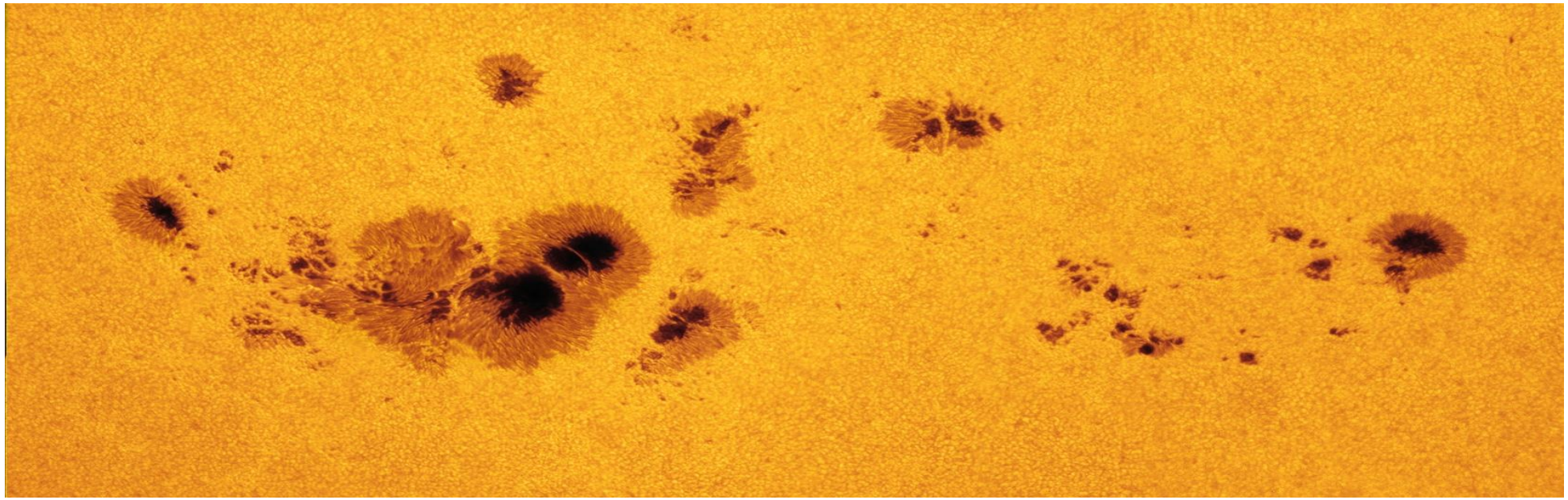
В 20 % случаев – нет.

Солнечный цикл

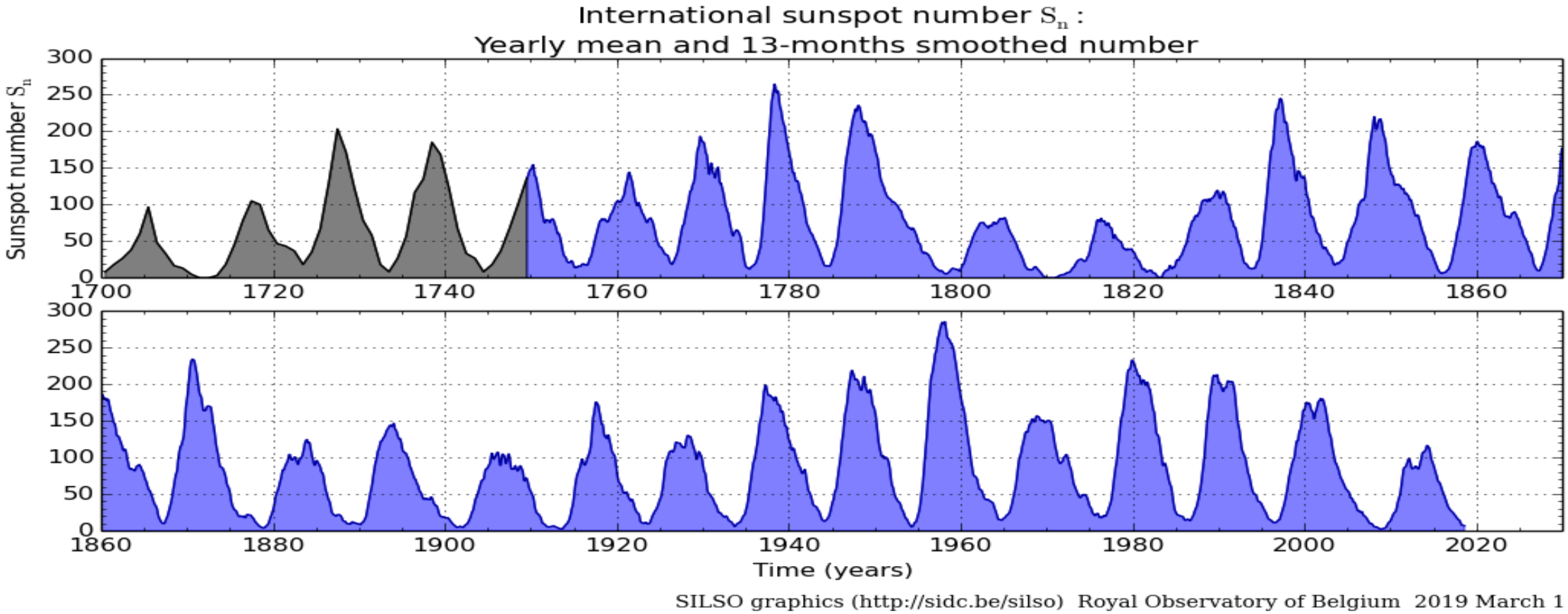
Самуэль Генрих Швабе
Наблюдал Солнце с 1826 по 1843 год.

Рудольф Вольф
Директор обсерватории в г. Берн.
Число Вольфа.

$$W = 10 \times G + N$$



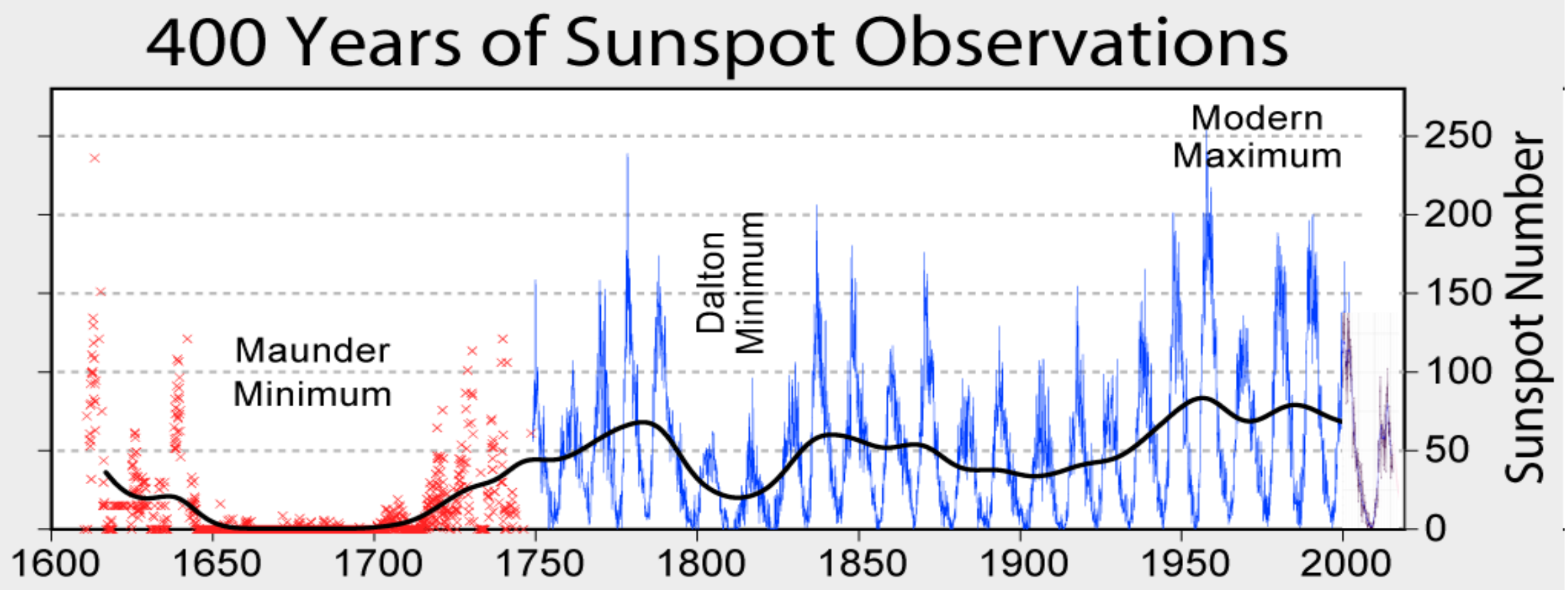
Солнечный цикл



Канонический ряд солнечной активности

С 1749 года – данные обсерватории Цюрих. Сейчас окончился цикл № 24 и начинается цикл № 25.

Солнечный цикл



Данные по солнечной активности – прямые измерения.

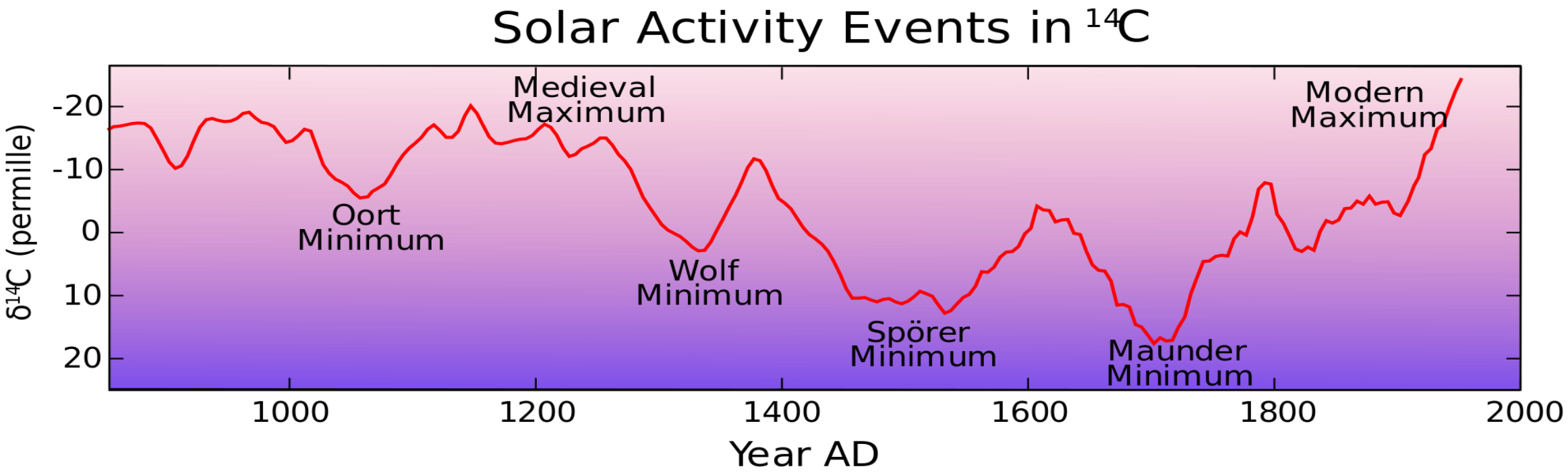
Основной период ~ 11 лет.

Огибающая – вековой цикл (~ 87 лет).

Солнечный цикл

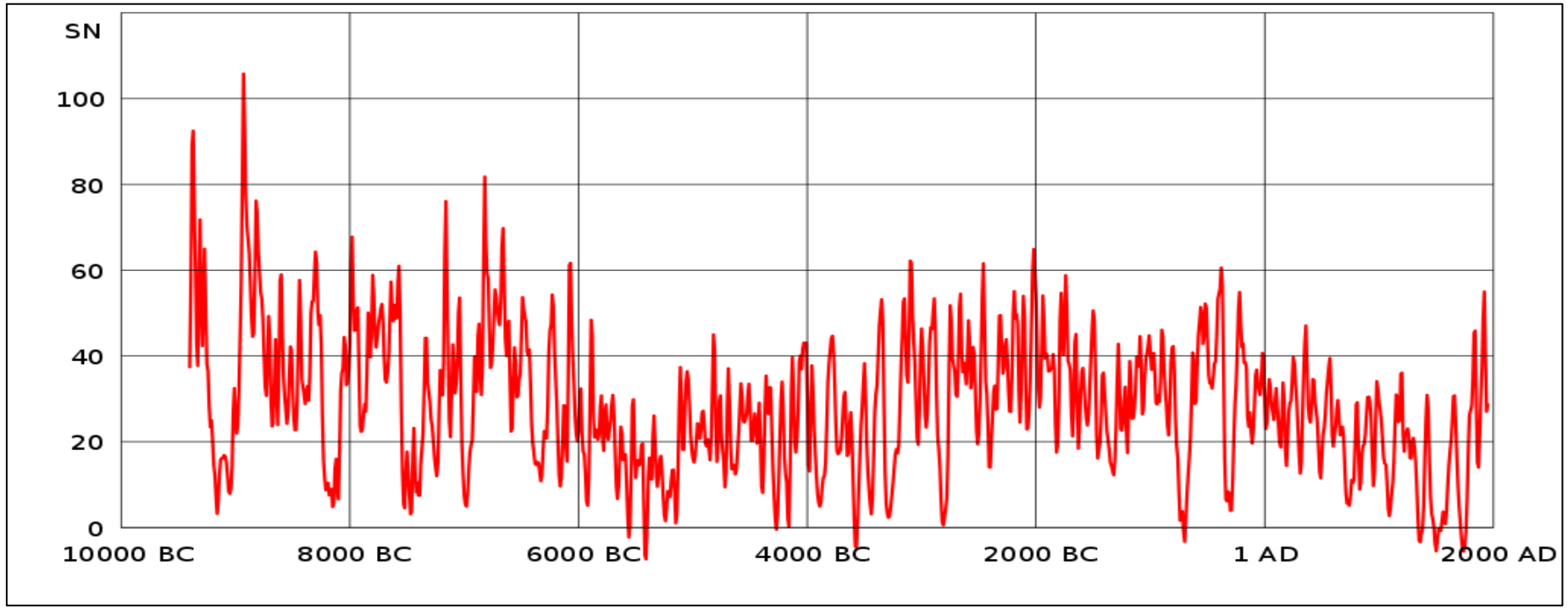
Измерения по радиоактивному углероду

$$^{1}n + ^{14}N \rightarrow ^{14}C + p$$



Солнечный цикл

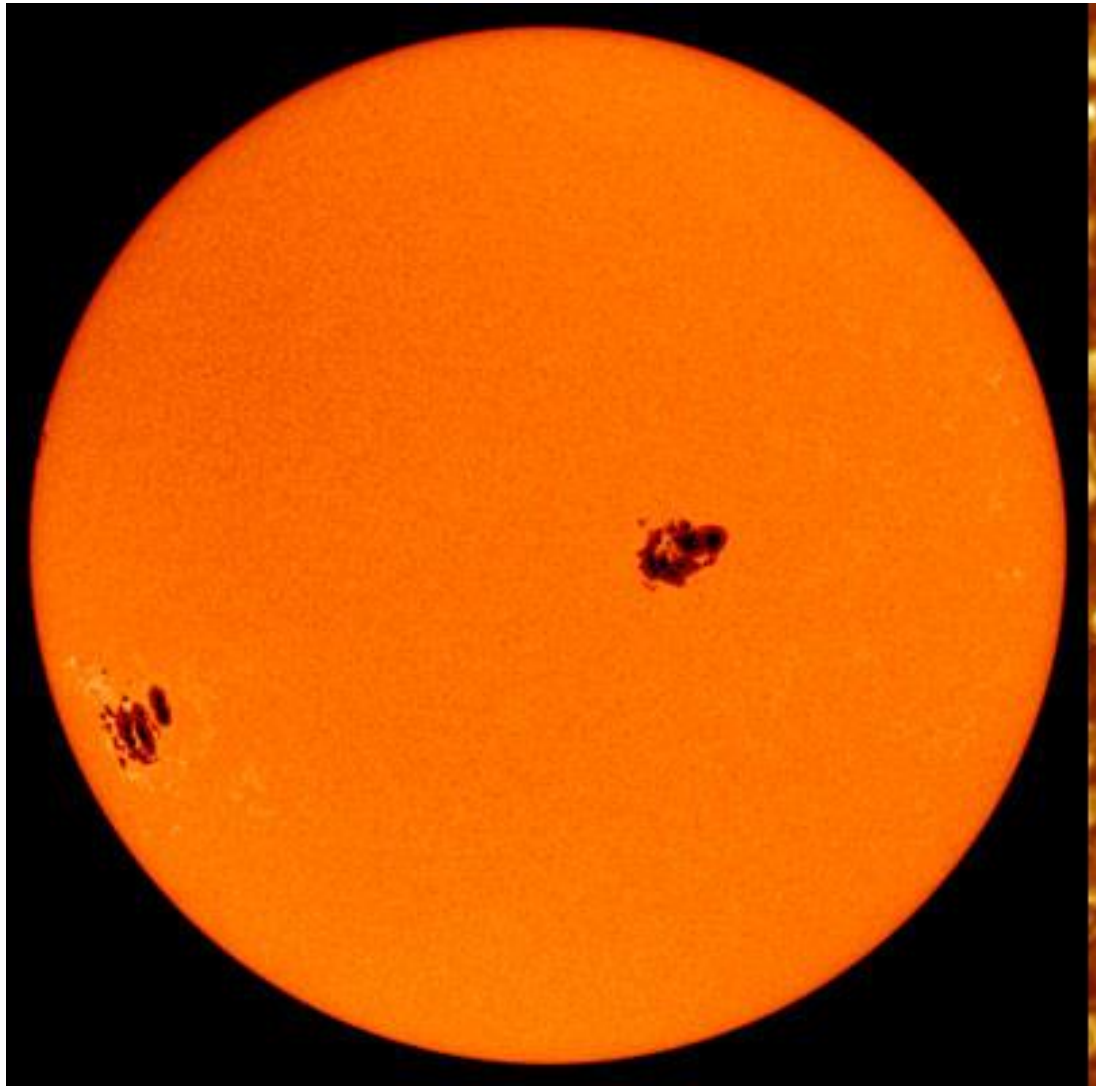
Измерения по радиоактивному углероду

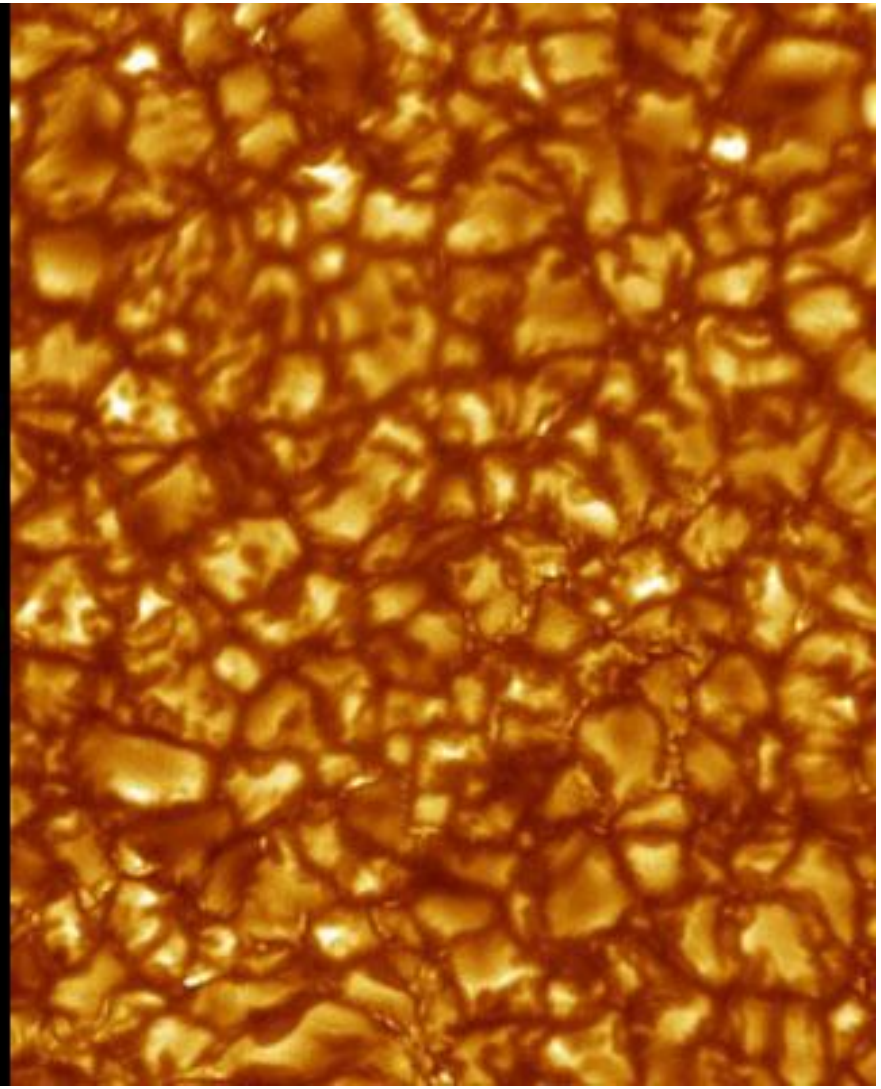


Данные по солнечной активности – косвенные измерения.

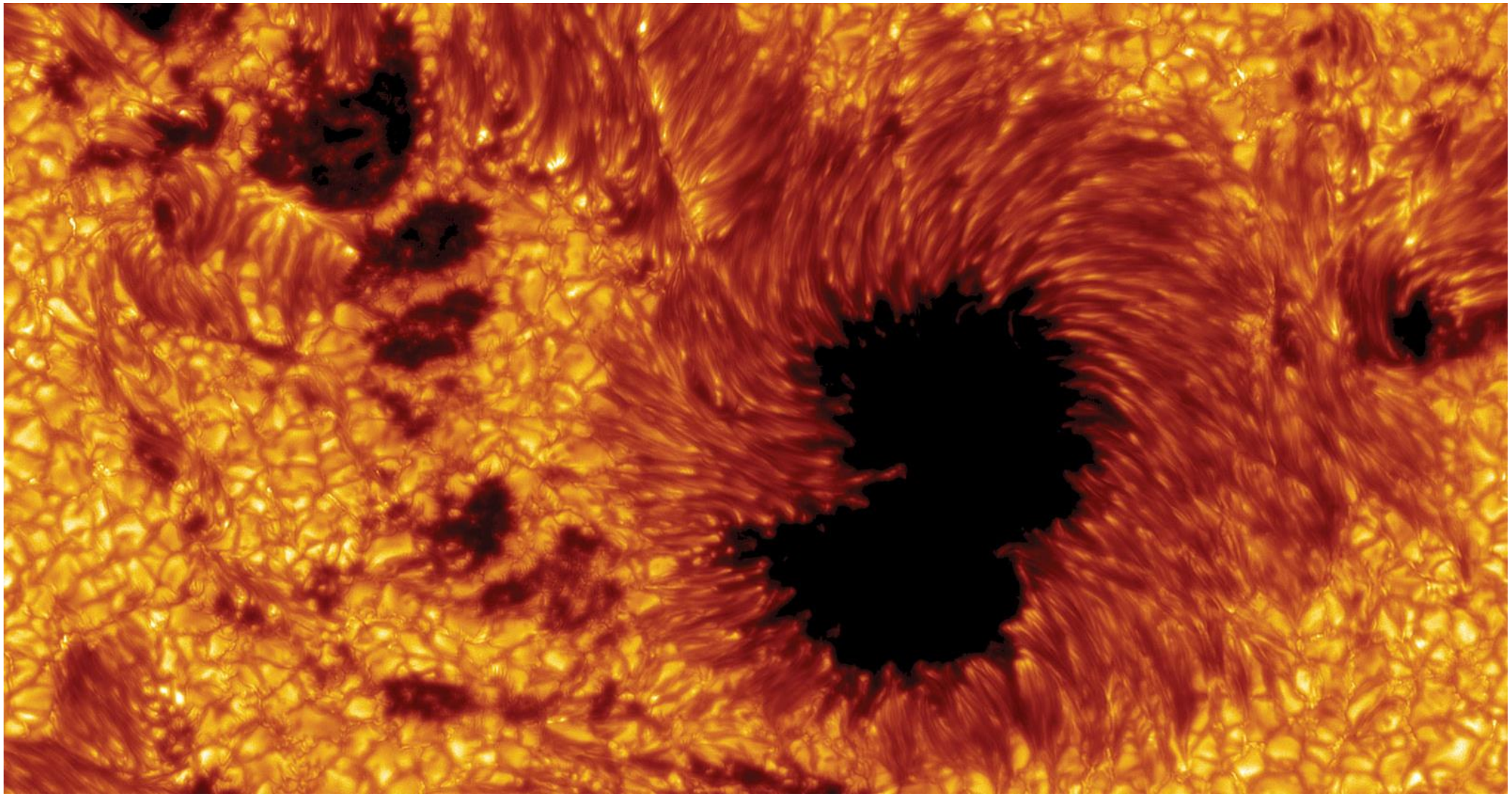
Следующие моды – 210 лет, 2300 лет, возможно ~ 10 000 лет.

Наблюдения с Земли - грануляция



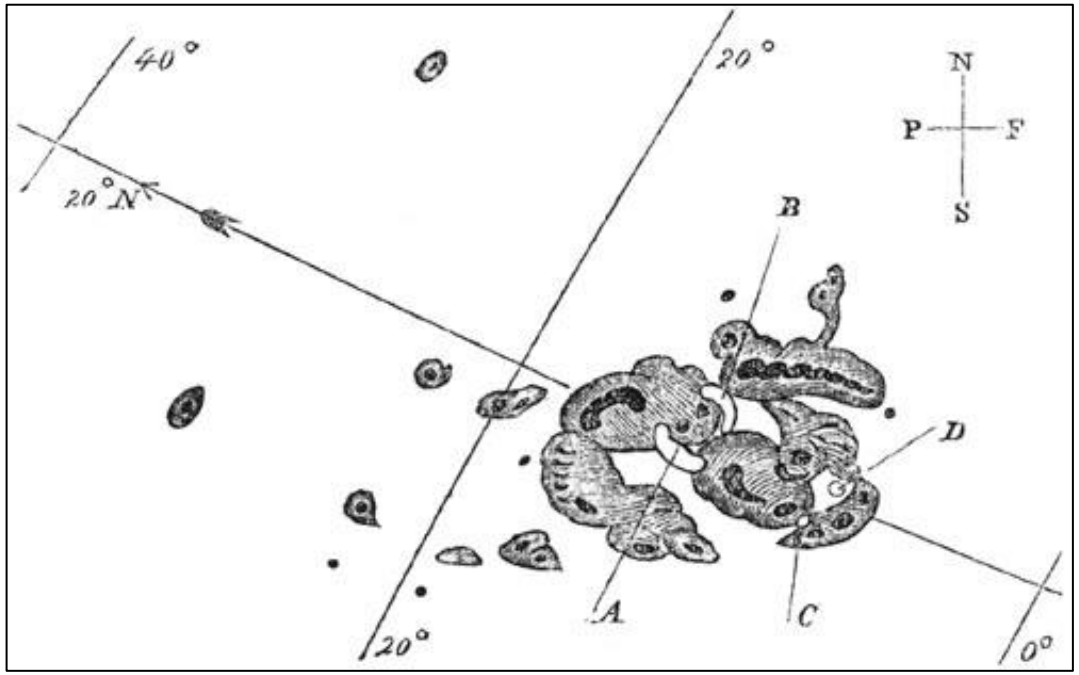


Наблюдения с Земли – структура пятен



Наблюдения с Земли – вспышки

(очень редко: 1 -2 события за 10 лет)



Вспышка Кэррингтона

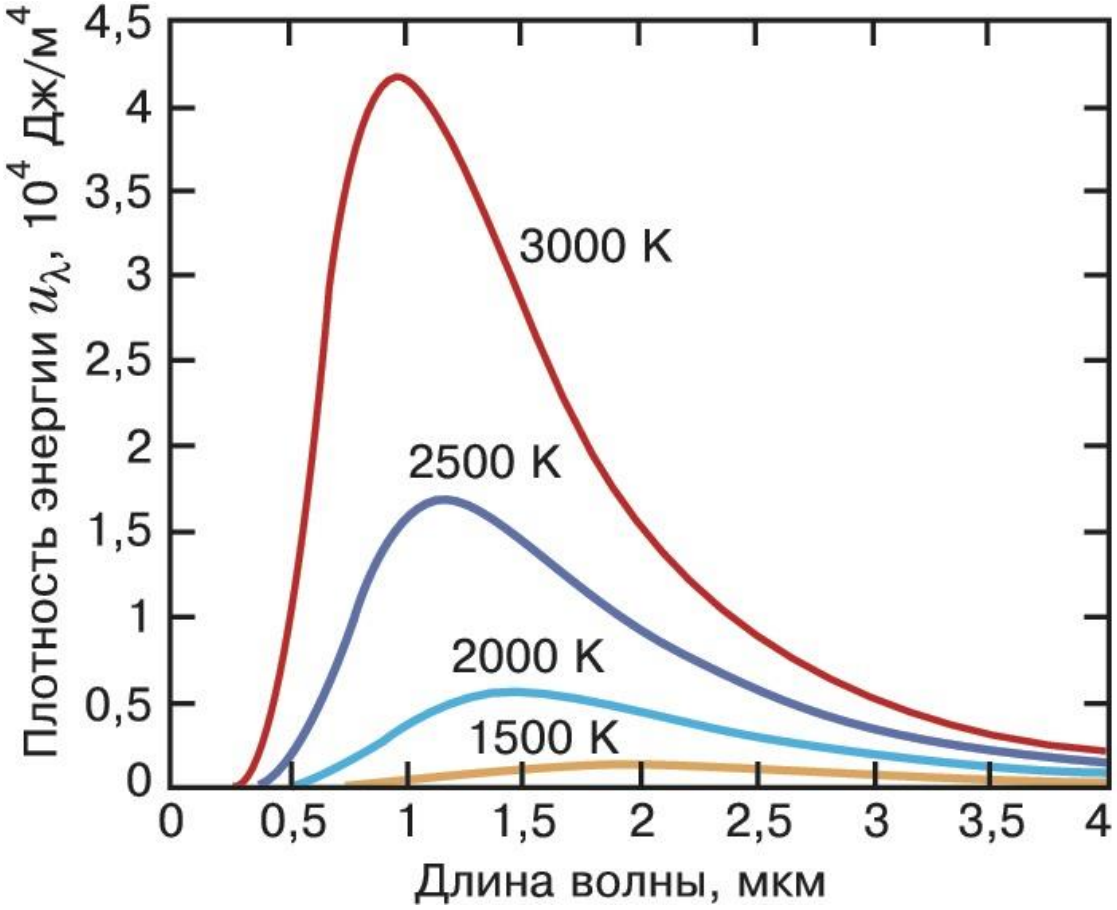
1 сентября 1859 года

Магнитная буря Кэррингтона

1—2 сентября началась крупнейшая за всю историю регистрации геомагнитная буря, вызвавшая отказ телеграфных систем по всей Европе и Северной Америке[5]. Северные сияния наблюдались по всему миру, даже над Карибами; также интересно, что над Скалистыми горами они были настолько яркими, что свечение разбудило золотоискателей, которые начали готовить завтрак, думая, что наступило утро.

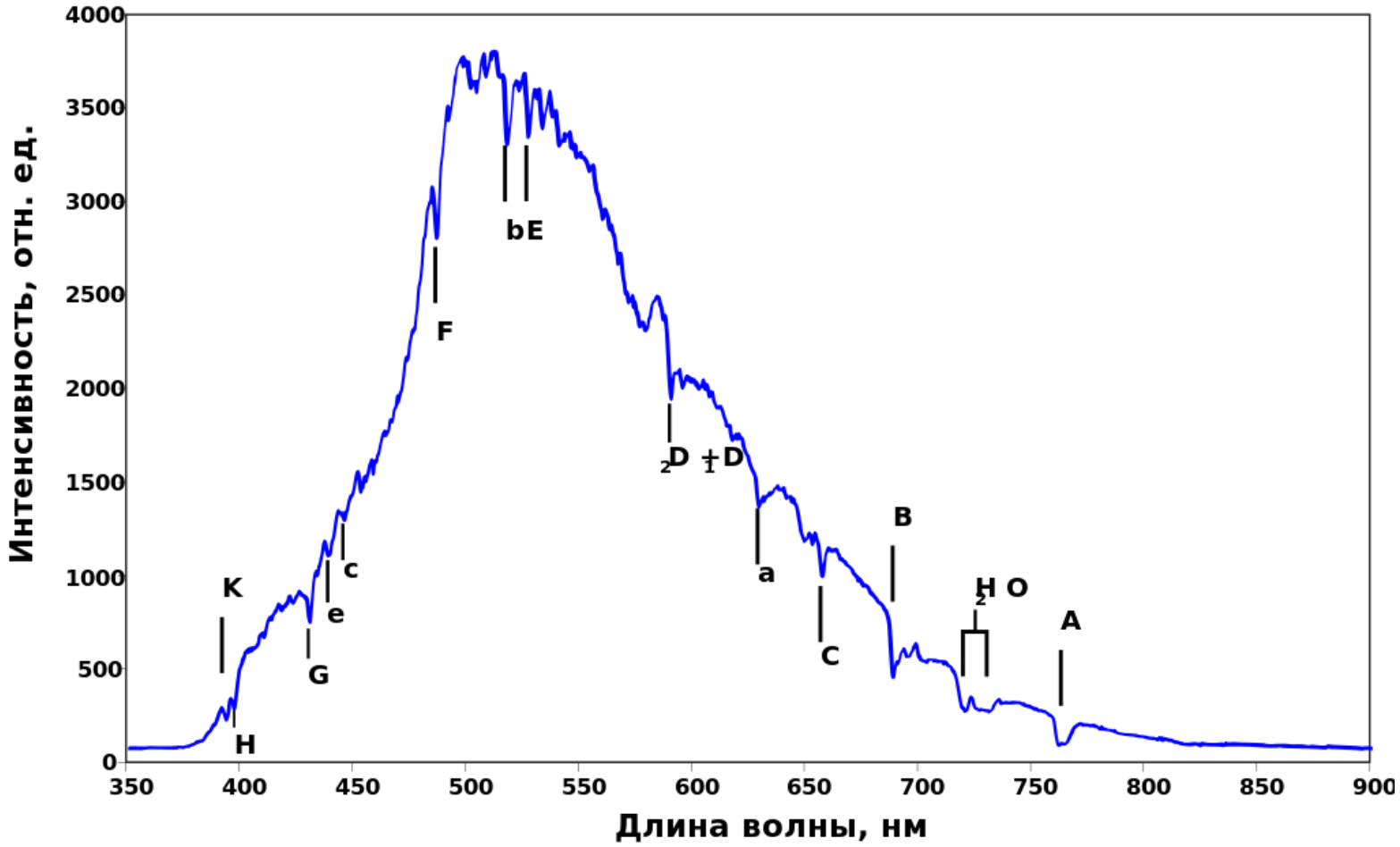
(Википедия)

Наблюдения Солнца с Земли - спектр



Непрозрачное тело формирует **непрерывный спектр без линий**, так как из-за частых столкновений возбуждённый атом не успевает переизлучить фотон, а отдаёт энергию в тепло.

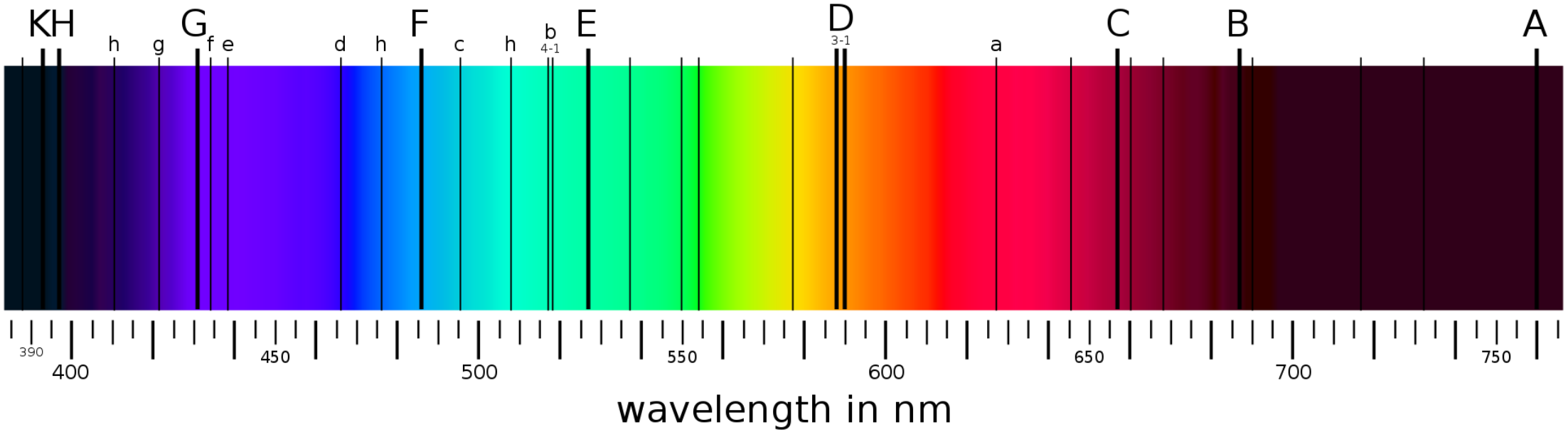
Спектр Фраунгофера



Открыт в 1814 году Йозефом Фраунгофером при спектроскопии неба.

Для него это был не спектр Солнца, а спектр неба.

Спектр Фраунгофера



Самые известные линии:

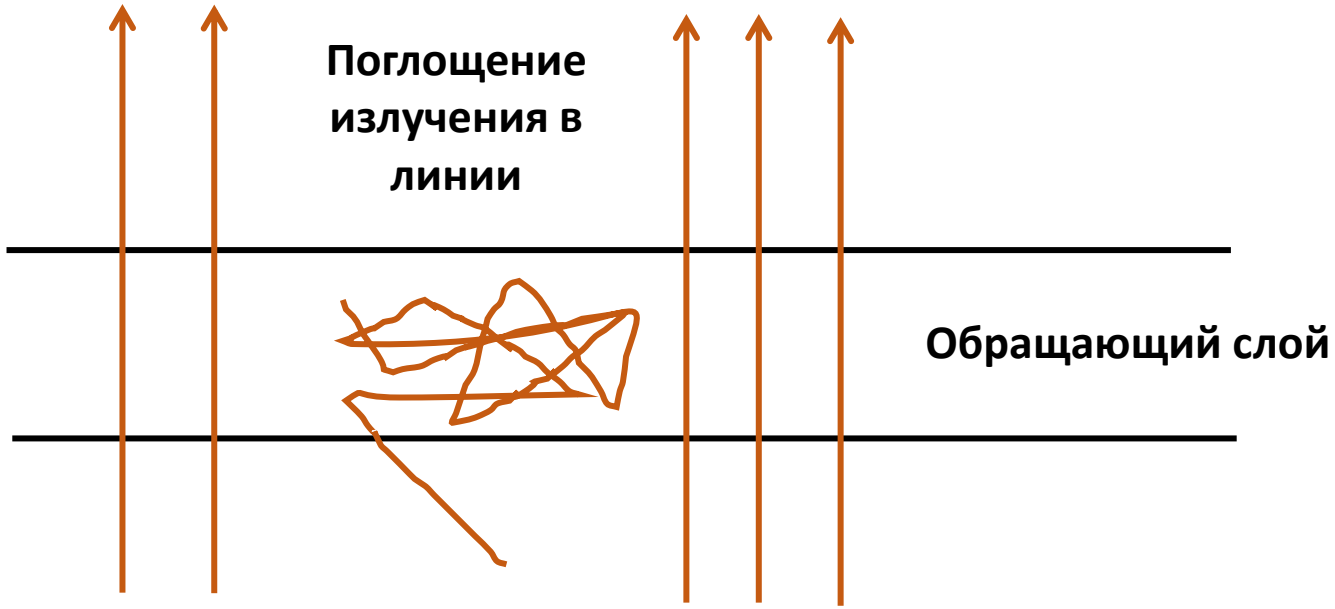
Дублет Na I: D_1 = 5895,93 A и D_2 = 5889 A – жёлтые линии.

Дублет Ca II: H = 3968,47 A и K= 3933,68 A – фиолетовые линии.

Линия H_α = 6562,81 A (красная) – линия C в спектре Фраунгофера

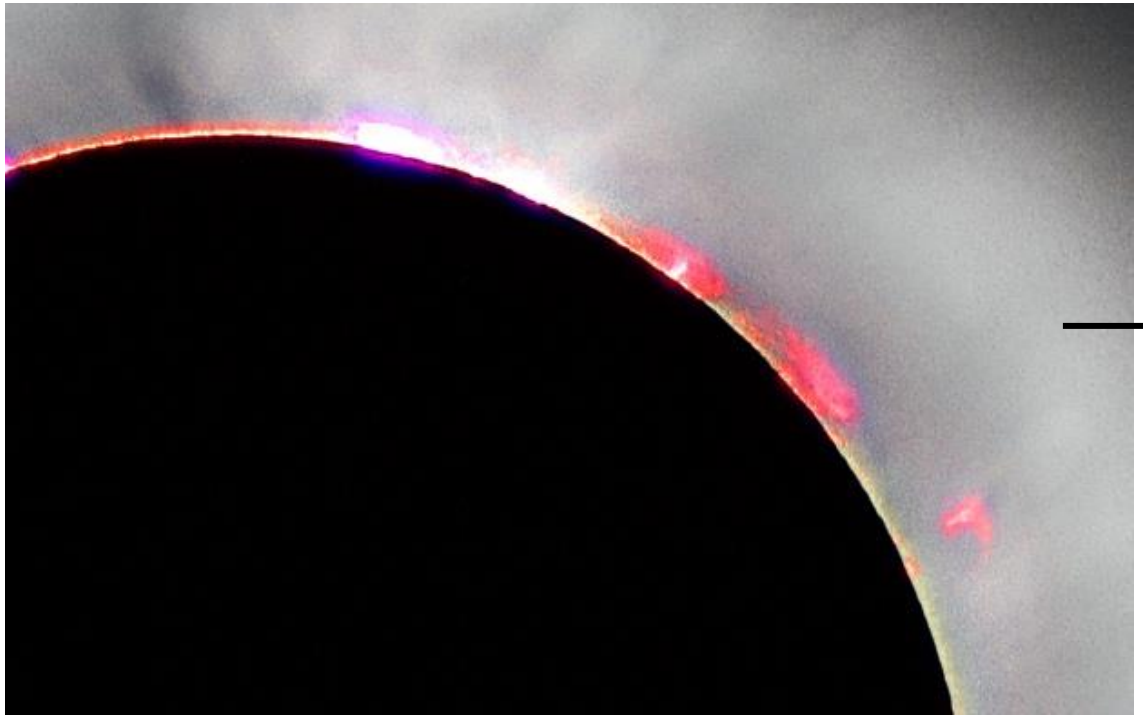
Линия D3 = 5875,62 – линия Гелия (открыт в 1868 году, Пьер Жансен; обнаружен на Земле через 27 лет в 1895 году

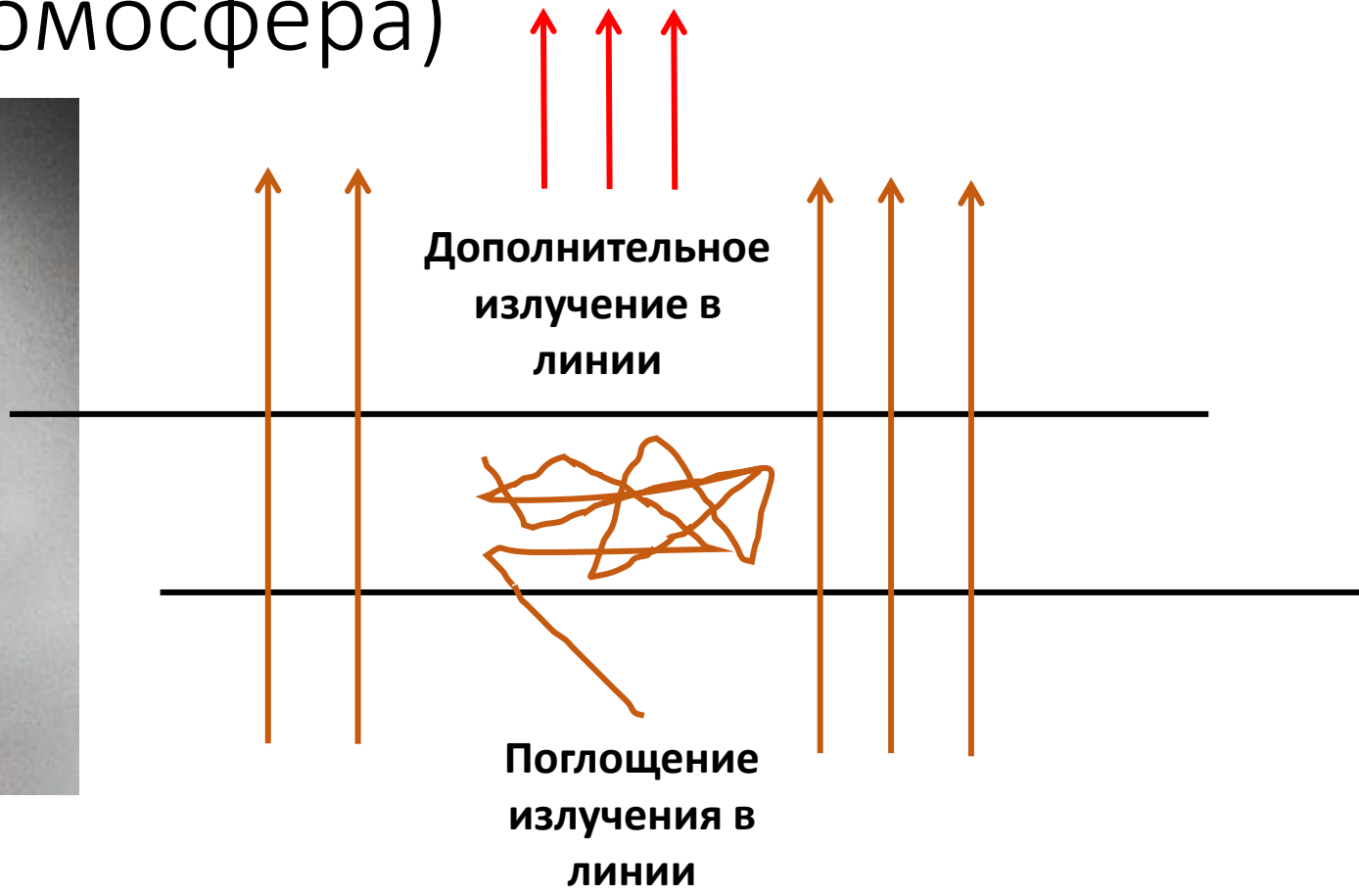
Основы формирования спектра звёзд
обращающий слой



Если непрозрачное тело окружено газовой прозрачной оболочкой, то в ней формируется спектр поглощения.
Фотоны в линиях испытывают когерентное рассеивание, в результате чего увеличивается их путь в слое и растёт вероятность поглощения.
Поглощение происходит на отрицательном ионе водорода.
Линии отражают химический состав обращающего слоя.

Спектр излучения (хромосфера)

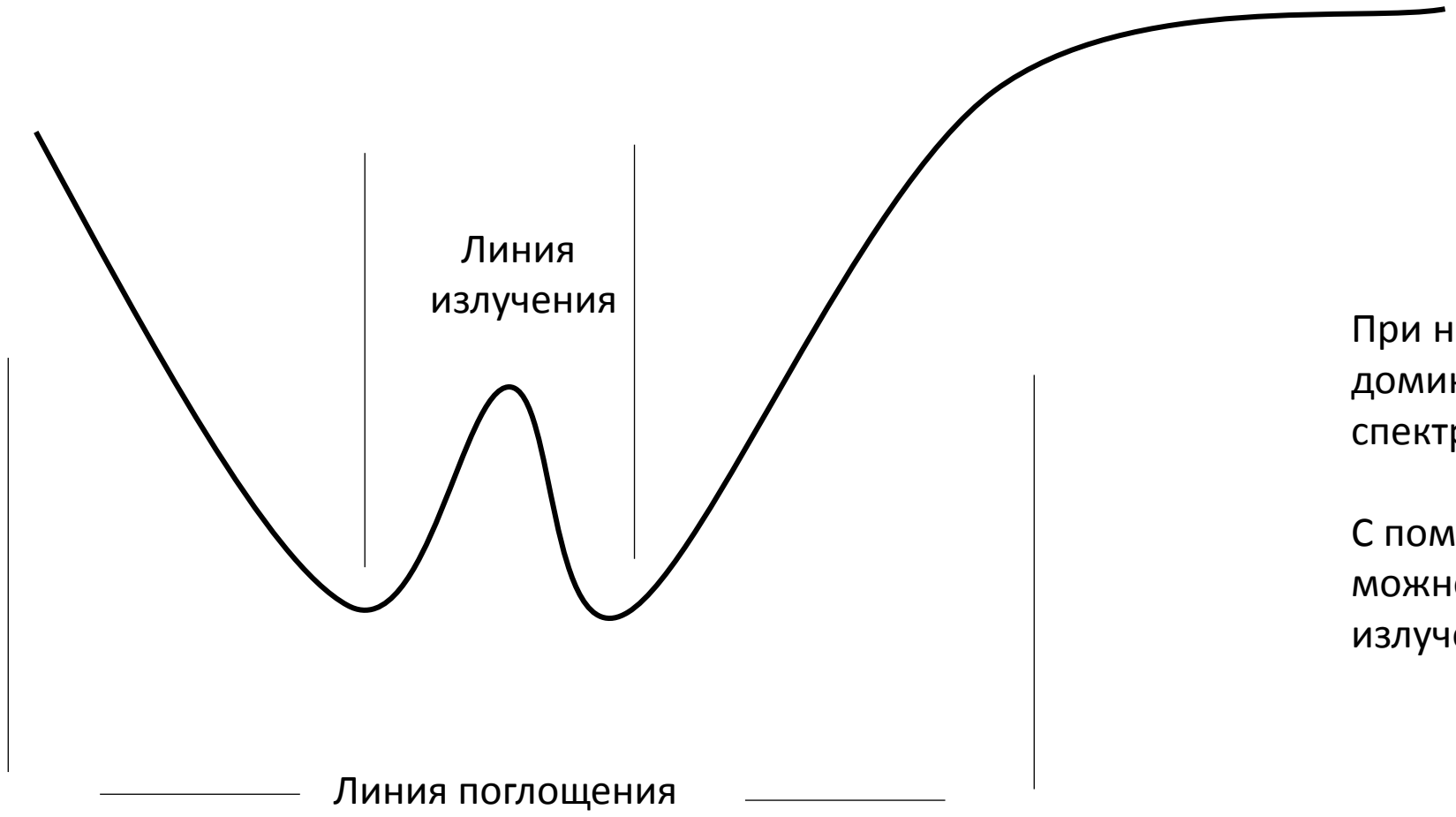




Газовая оболочка, окружающая Солнце, не является холодной – обладает собственным спектром излучения. Спектр излучения определяется химическим составом хромосферы и совпадает со спектром поглощения.

Красный цвет – линия водорода H_alpha.

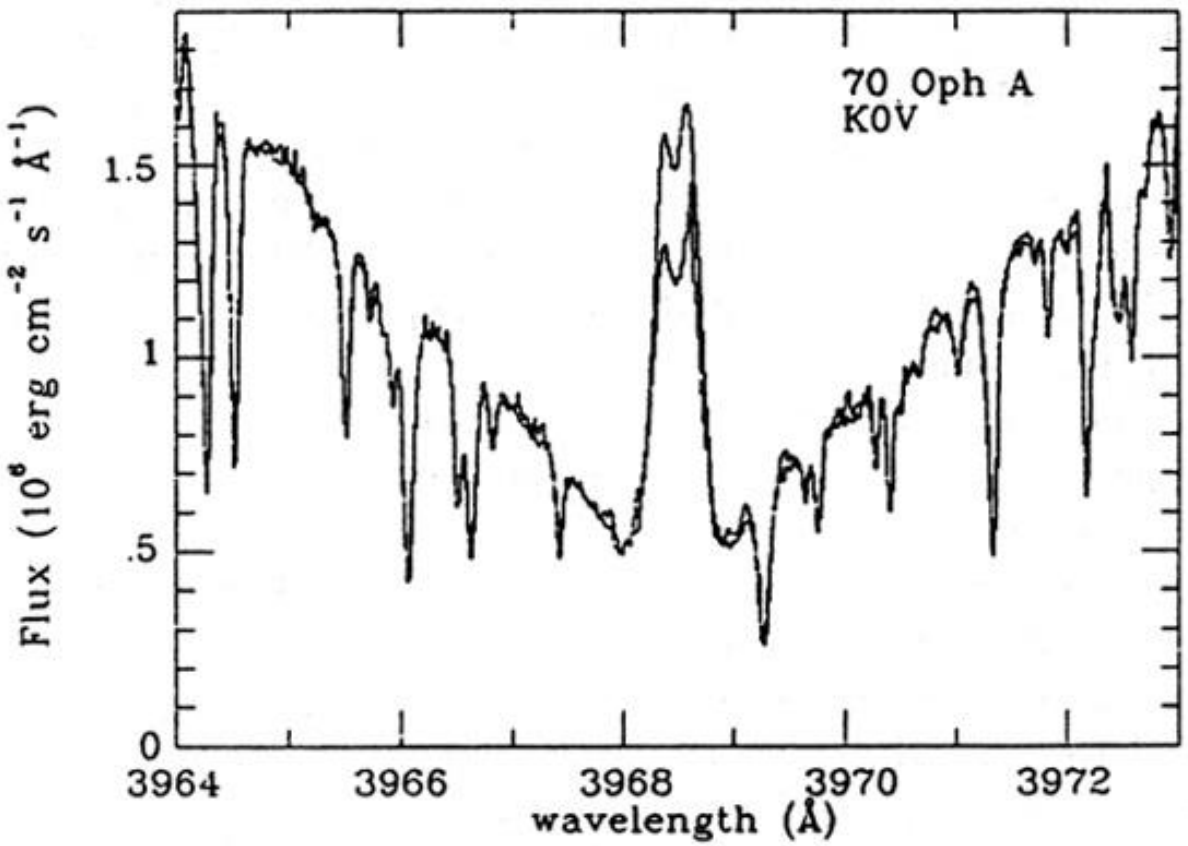
Спектр излучения (хромосфера)

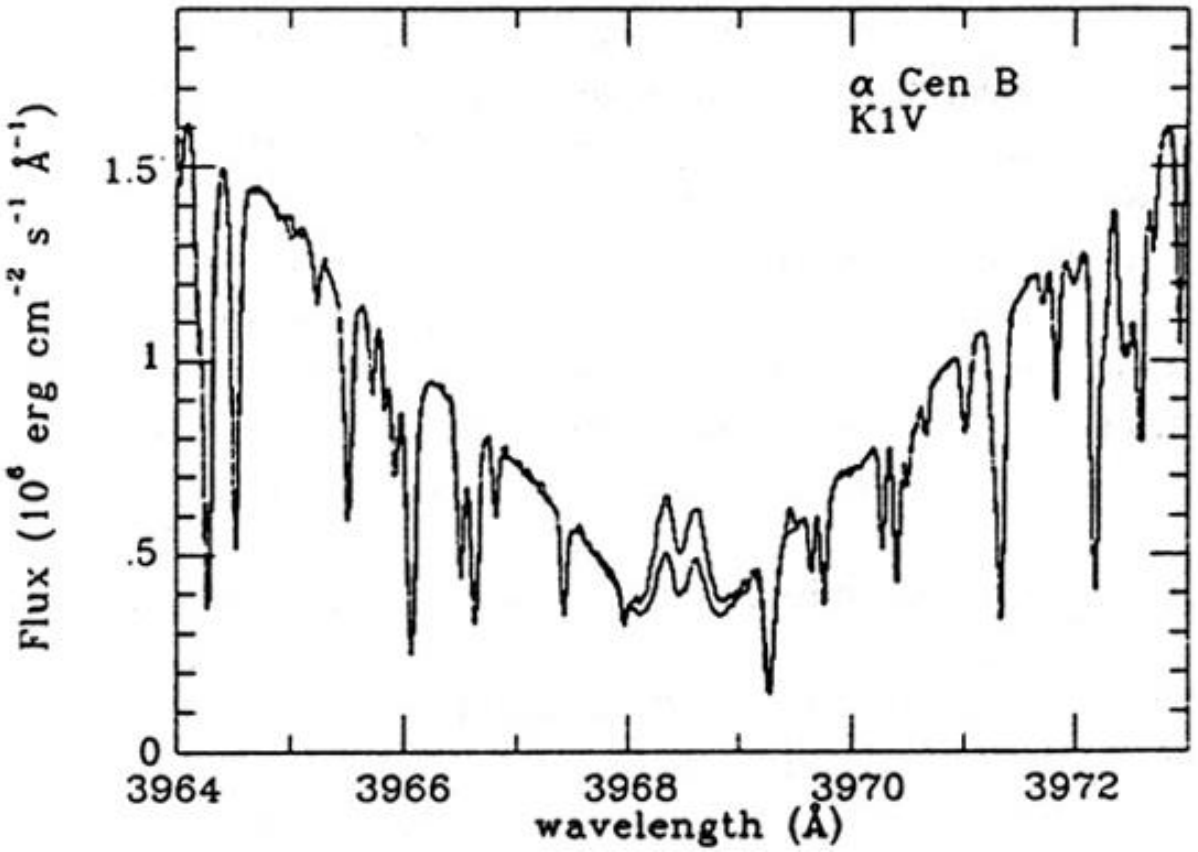


При наблюдении без фильтра доминирует непрерывный спектр.

С помощью узкого фильтра можно выделить линию излучения.

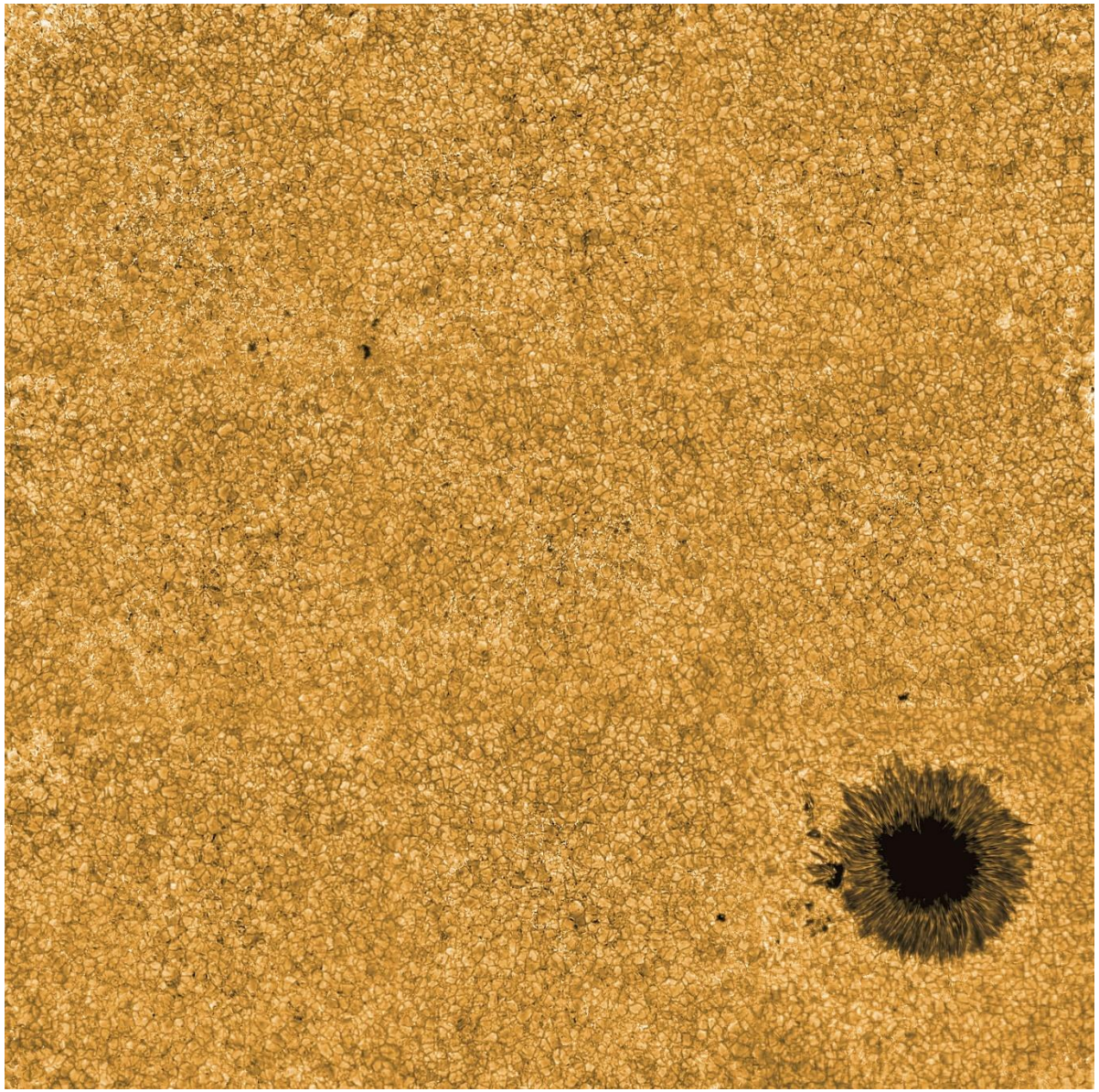
Спектр излучения (хромосфера)

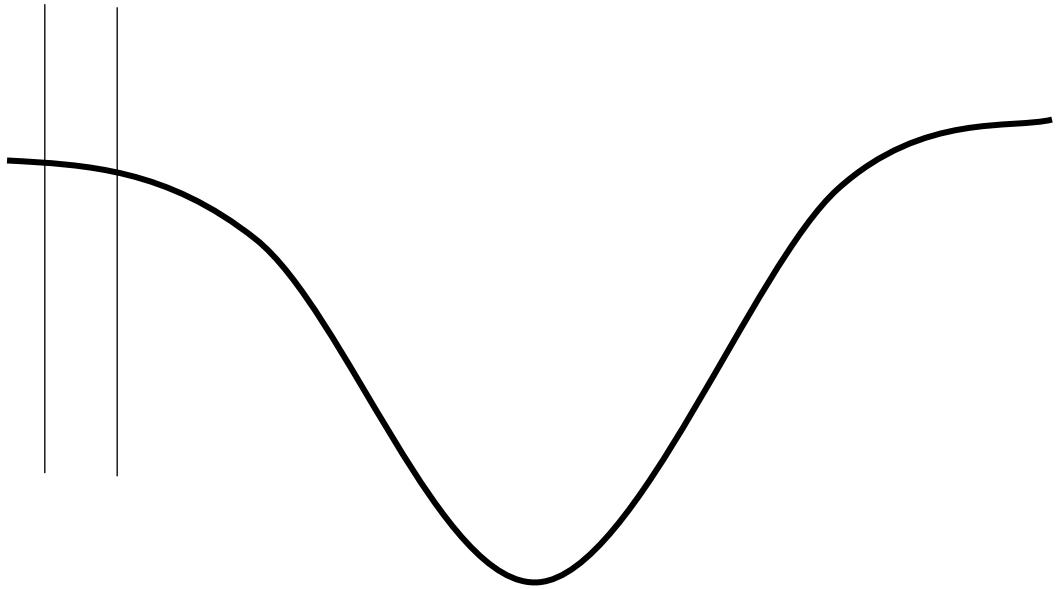




Провал в центре линии – двойное обращение

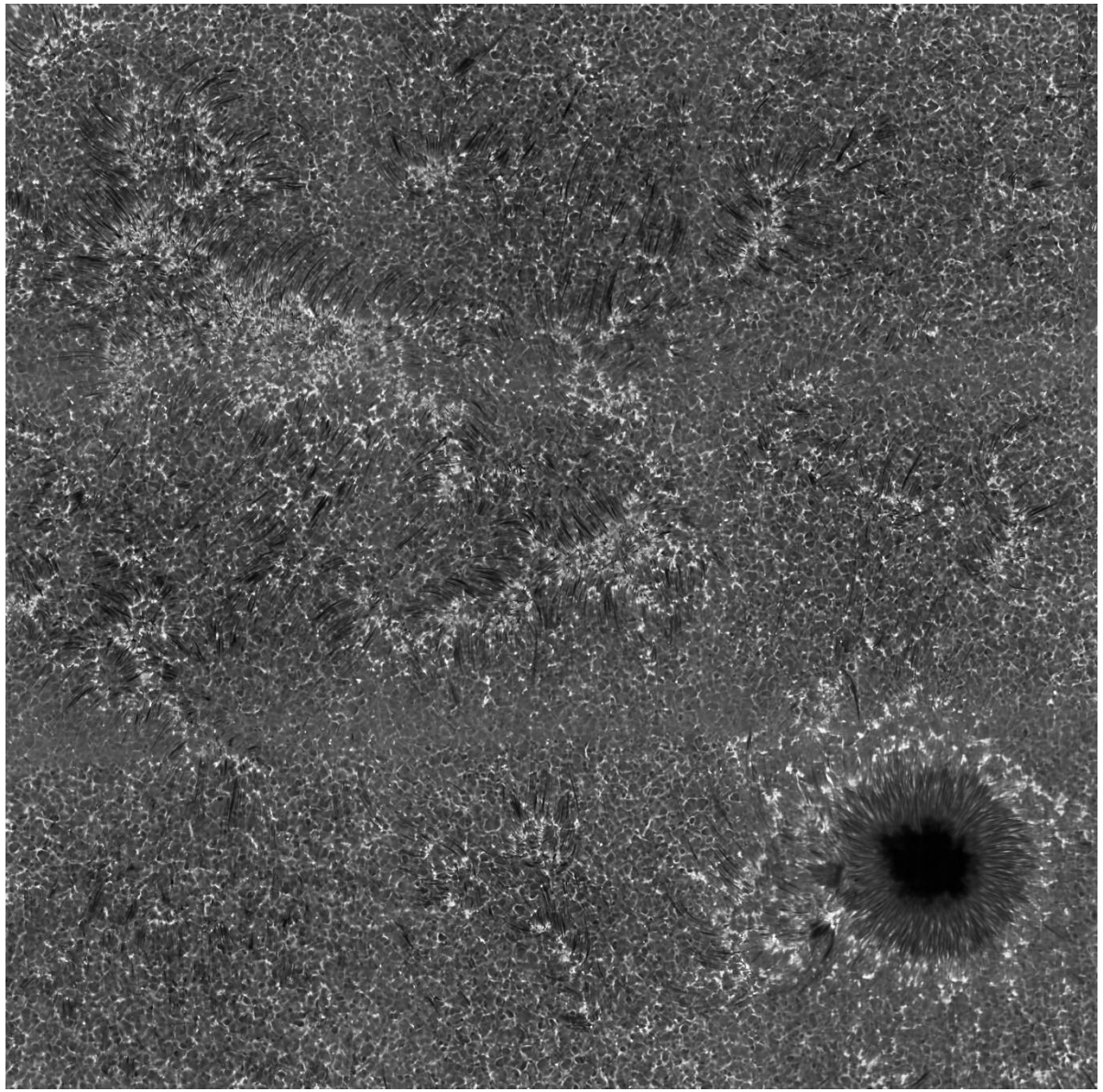
Спектр излучения (хромосфера)

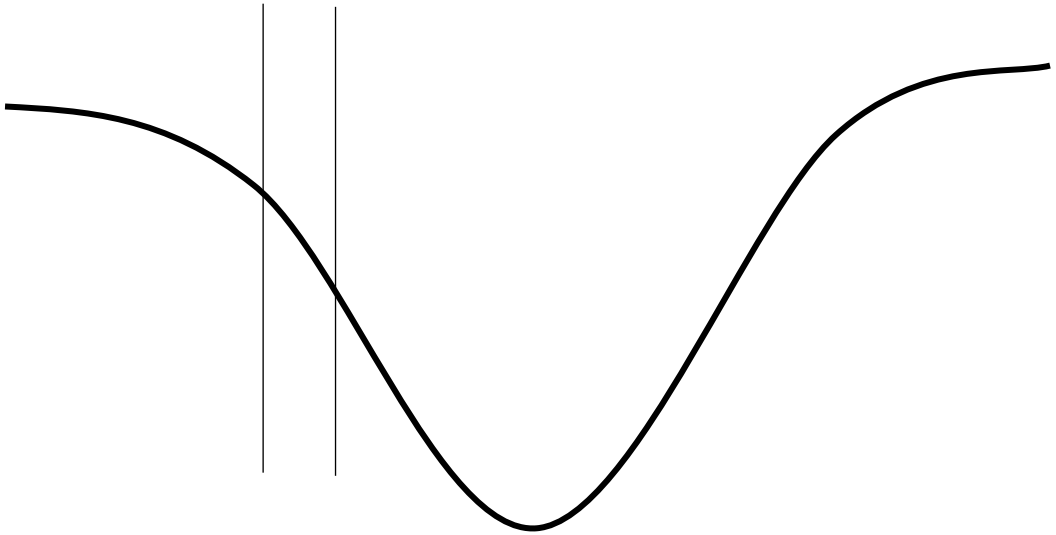




Фильтр наведён на край линии – вблизи непрерывного спектра. Видна поверхность Солнца (фотосфере).

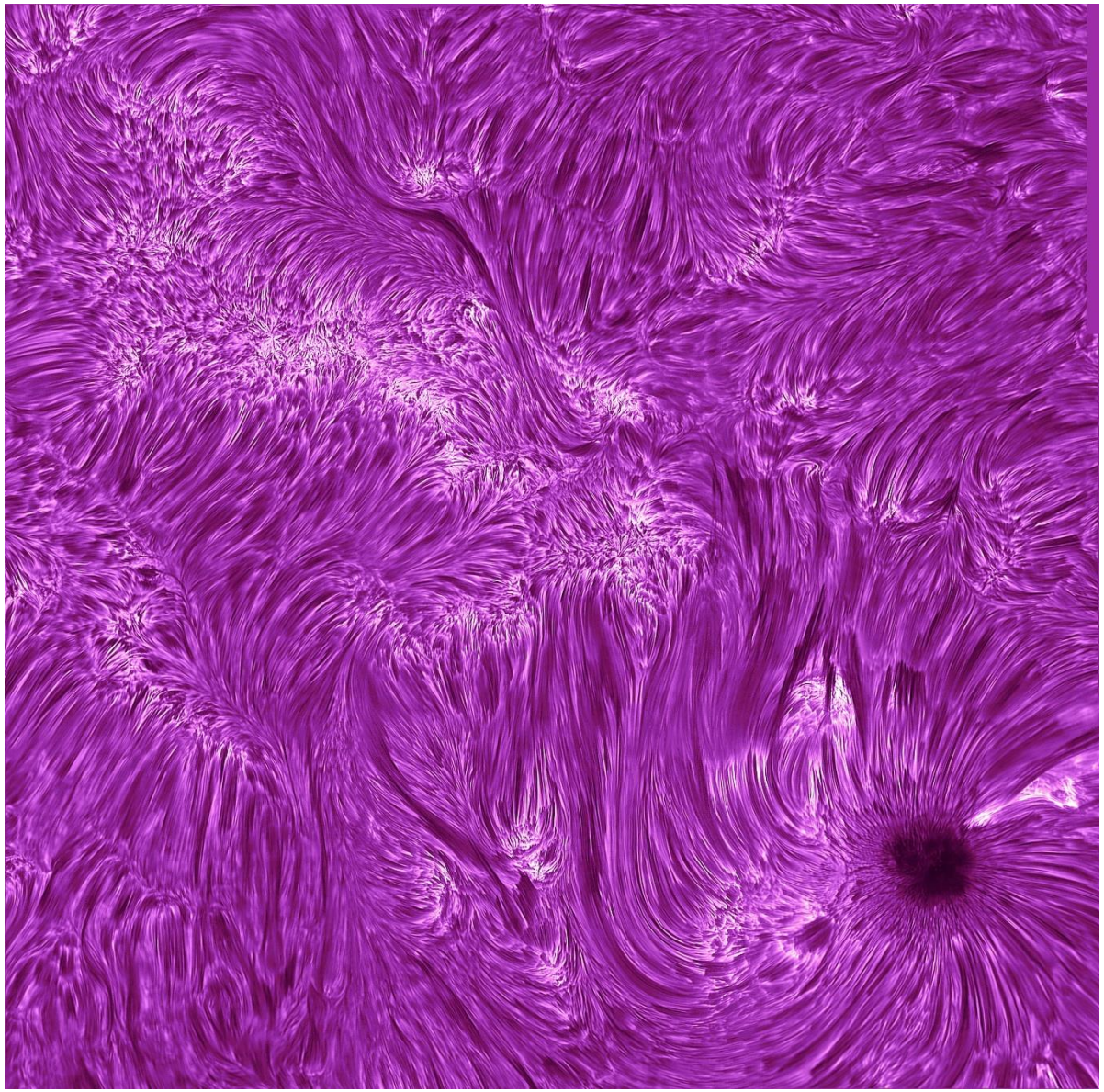
Спектр излучения (хромосфера)

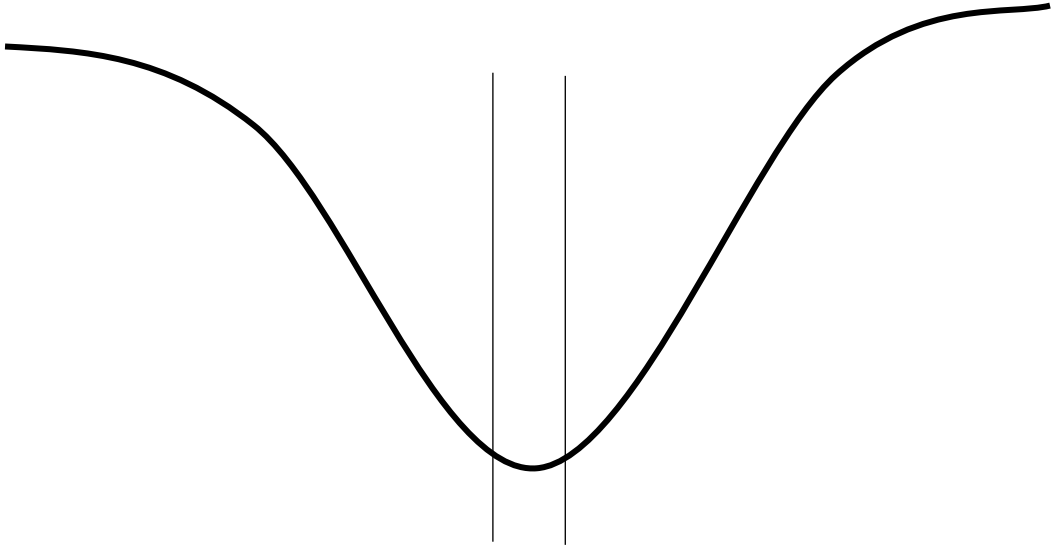




Фильтр смещён. Виден более высокий слой – промежуточная хромосфера.

Спектр излучения (хромосфера)

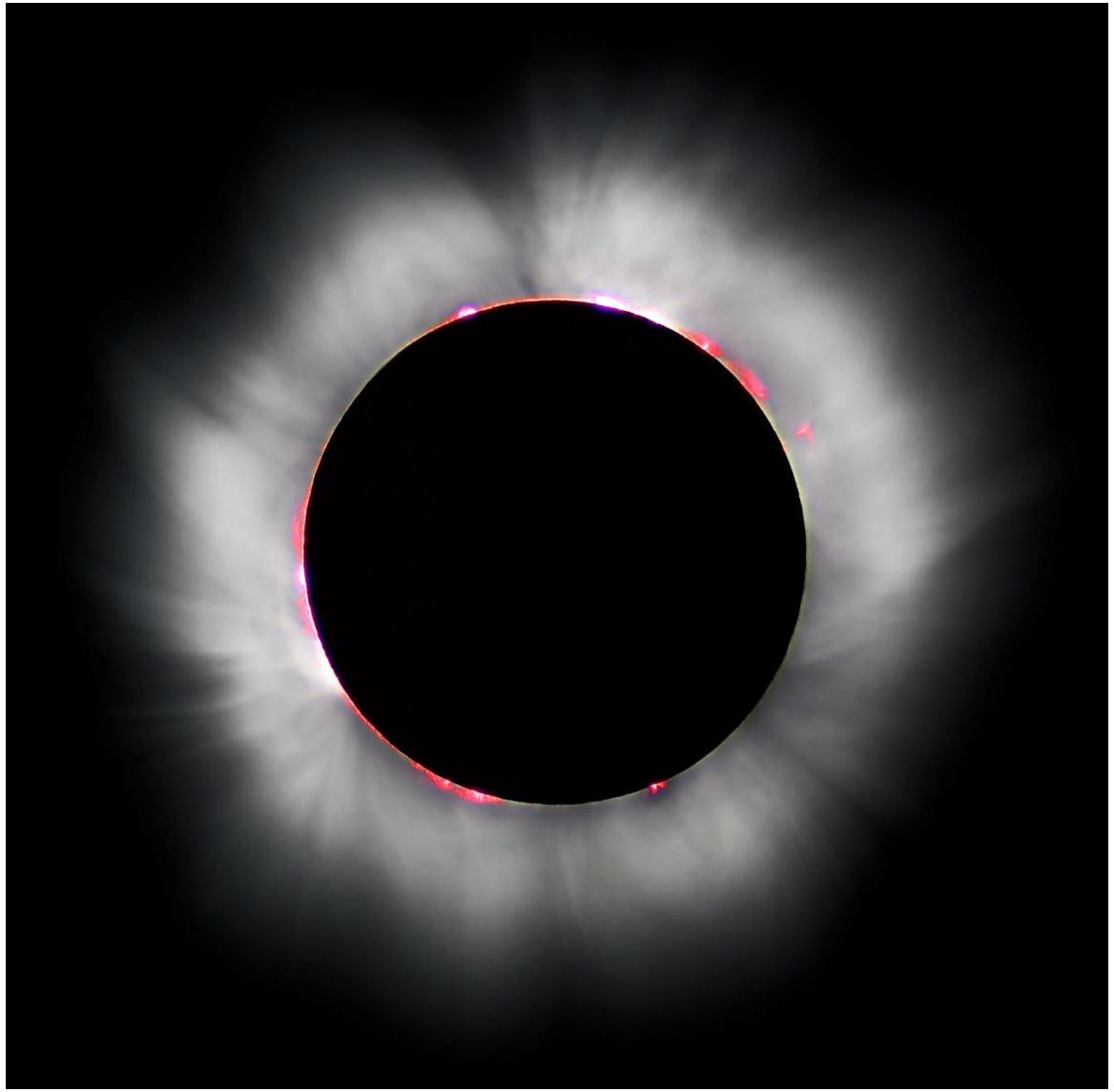




Фильтр наведён на центр. Виден самый высокий слой – верхняя хромосфера.

Полуширина линии H_a около 0.5 A. Ширина фильтров от 1 A (в любительской астрономии до 0.1 A – профессиональная)

Корона Солнца



Корона Солнца – внешняя разреженная часть атмосферы Солнца.

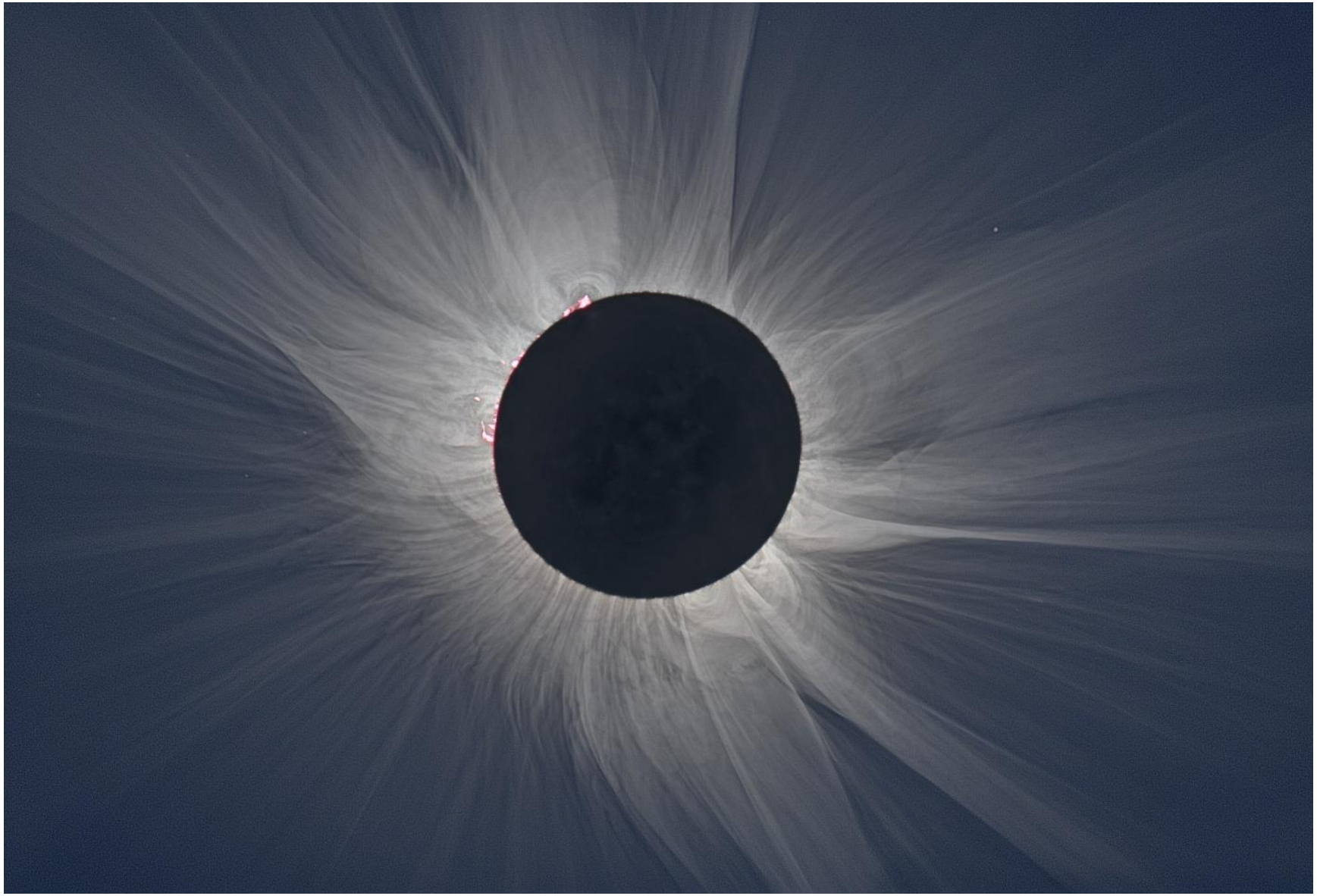
Корона наблюдается:
Визуально в оптическом диапазоне – до нескольких радиусов Солнца
По поляризационным измерениям – до 20 радиусов Солнца.
По покрытию зодиакальных радио источников – до 100 солнечных радиусов (для сравнения – 1 а.е. = 215 радиусов).

Крабовидная туманность – в 1.5 градусах от эклиптики.

Корона Солнца

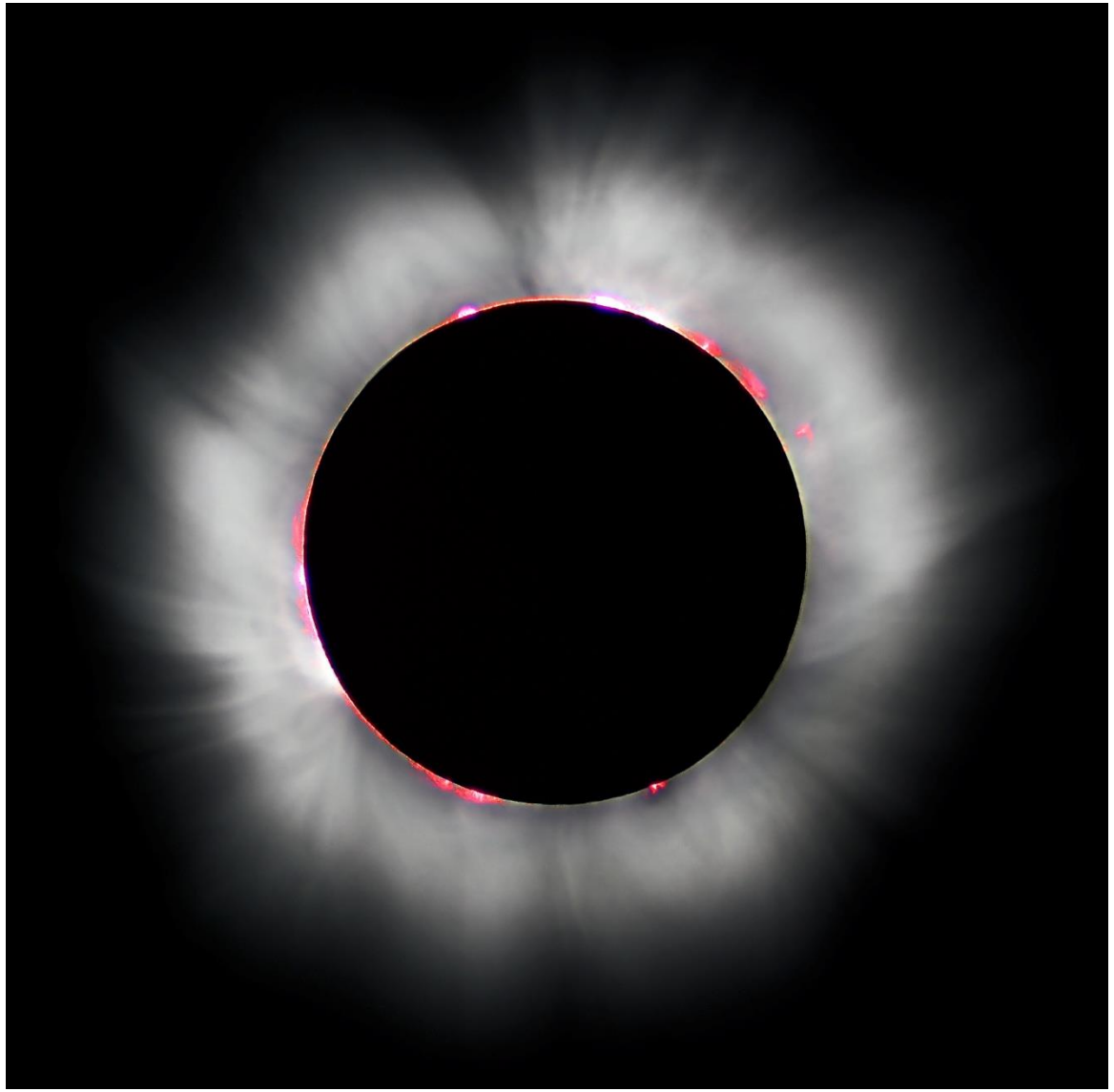
Рассеянное излучение Солнца в атмосфере – главное препятствие для наблюдения короны Солнца.

Корона Солнца



Пример синтезированного изображения

Корона Солнца



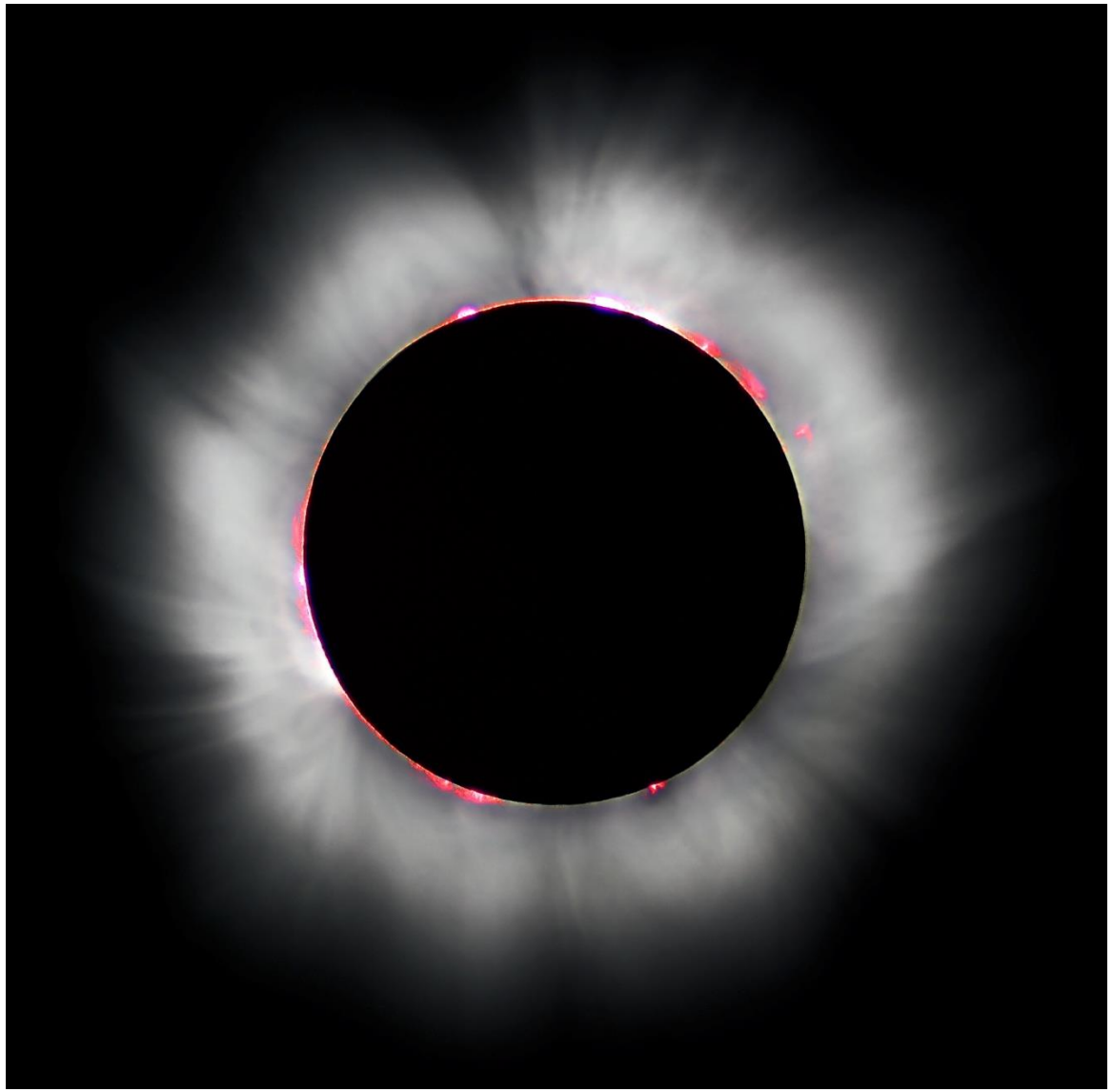
Светимость короны:
Фотосфера = 1
Хромосфера = 0.005
Корона = 10^{-6}

Полное число частиц в короне:
10^{42} частиц.
Масса – 10^{15} кг.

Для сравнения:
В столбе 1 см^2 короны содержится 10^{19} частиц – столько же, сколько в 1 см^3 воздуха.

Масса всей короны равна массе воздуха в слое высотой 2 метра.

Корона Солнца



Характеристики короны

Температура:
Основание – 1 млн. К
На высоте 1 радиус – 1.8 млн. К
На высоте 10 радиусов – 1 млн. К.

Концентрация частиц:
Основание – 10^9 см$^{-3}$
+ 70 тыс. км – 10^8 см$^{-3}$
+ 0.5 радиуса – 10^7 см$^{-3}$
+ 2.5 радиуса – 10^6 см$^{-3}$
+ 5 радиуса – 10^5 см$^{-3}$
+ 10 радиусов – 10^4 см$^{-3}$

Вывод:
Температура меняется слабо, то есть высокая теплопроводность.
Плотность падает барометрически.

Корона Солнца как физический объект

Физические характеристики:

B = 10 Гс

n= 108 см-3

T = 106 К

Скорости плазмы – не более 600 км/с

Виды энергии:

Тепловая = 3 n k T = 0.014 эрг / см^3

Магнитная = $B^2/8\pi$

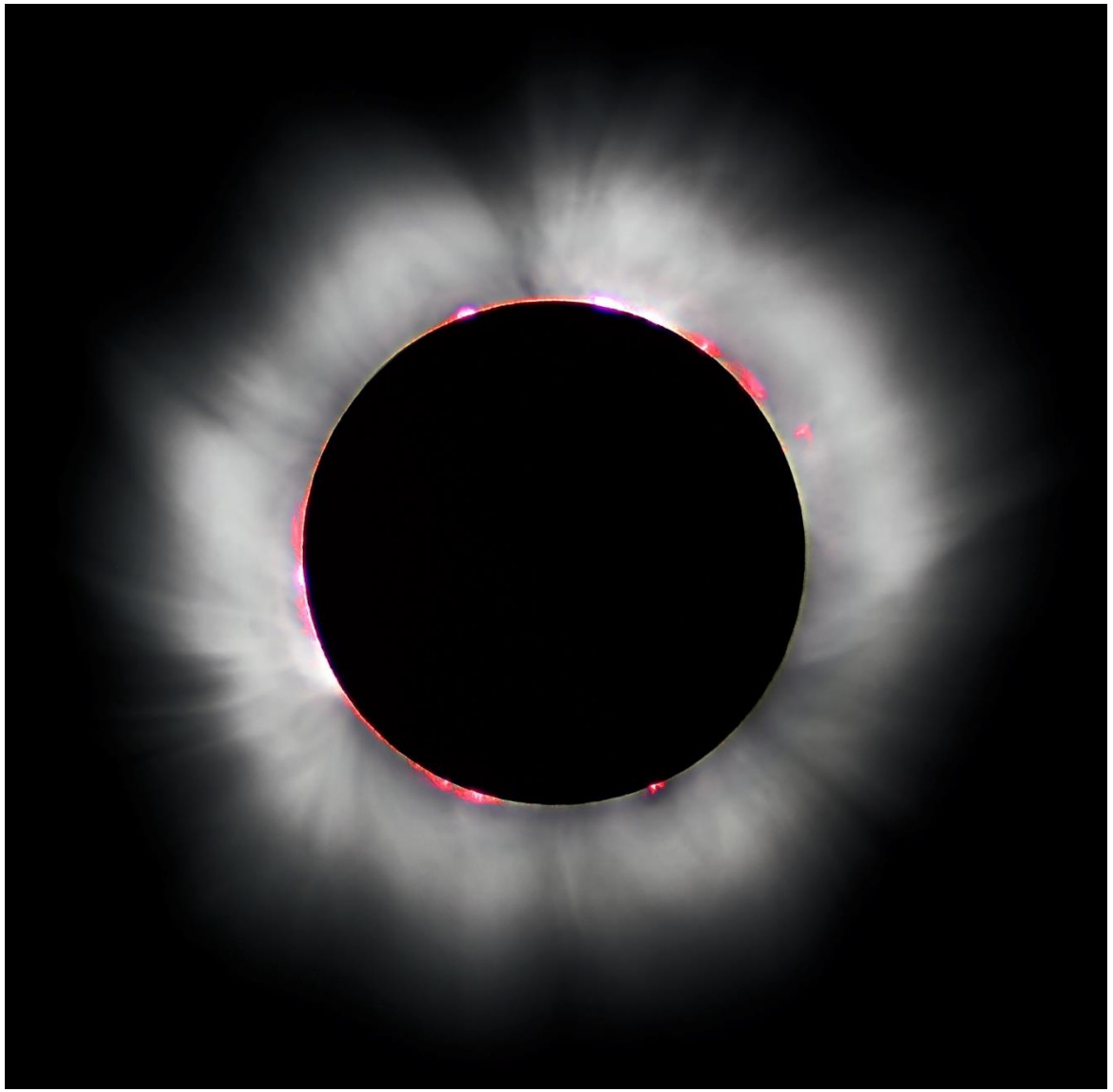
3 n k T = 0.014 эрг / см^3 = 4 эрг / см^3

Кинетическая = m V^2/ 2 = 0.18 эрг / см^3

Гравитационная = G M m / R = 0.17 эрг / см^3

Магнитная энергия превышает все остальные виды. Магнитное поле полностью контролирует плазму.

Почему видна корона



Корона с температурой 1 млн. К в принципе не может формировать оптическое излучение.

Видимая корона – томсоновское рассеивание света фотосферы на электронах короны (*фонарик подсвечивает пыль*).

Данная корона называется **К- корона**.

Её особенности:

1. Нет фраунгоферовых линий (замыты тепловыми движениями)
2. Излучение поляризовано – особенности томпсоновского рассеивания.

F - корона

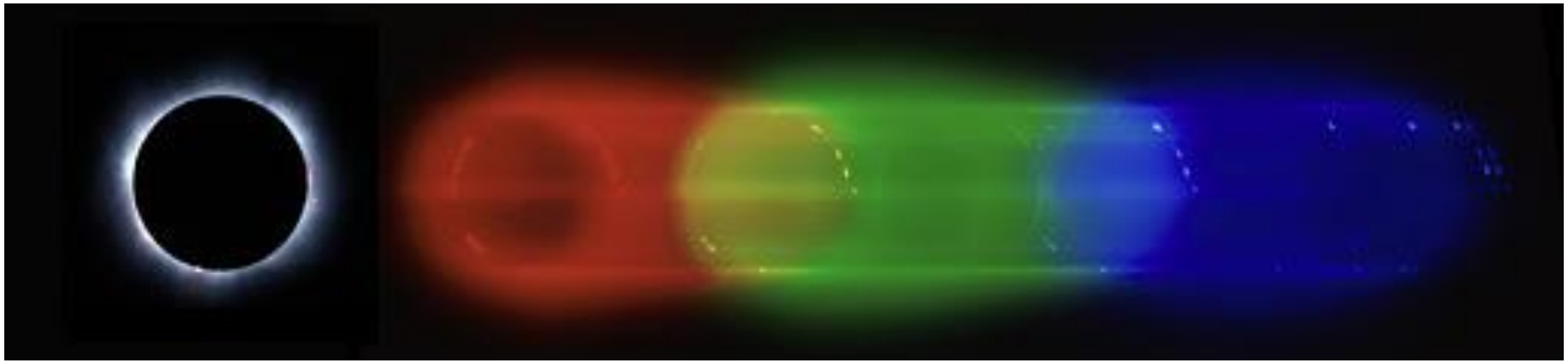
F - корона

Зодиакальный свет.

1. Присутствуют линии фраунгофера.
2. Нет поляризации.

Объяснение – рассеивание на линзе пыли.

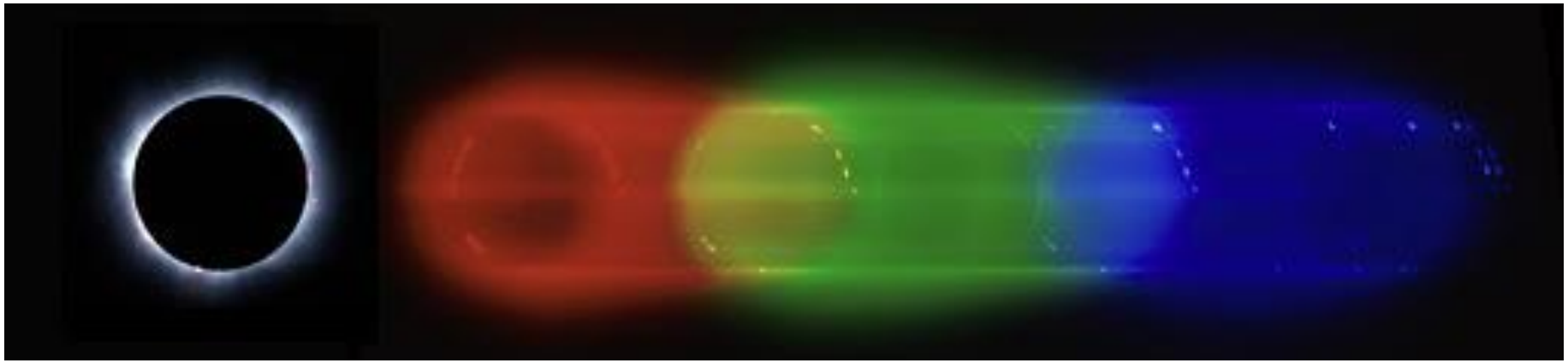
L - корона



В короне вопреки ожиданиям наблюдается несколько (около 20) оптических линий.
Самые известные:
6374 А – красная линия короны
5303 А – зелёная линия короны

После открытия – предположение о существовании на Солнце неизвестного химического элемента – корония.

L - корона

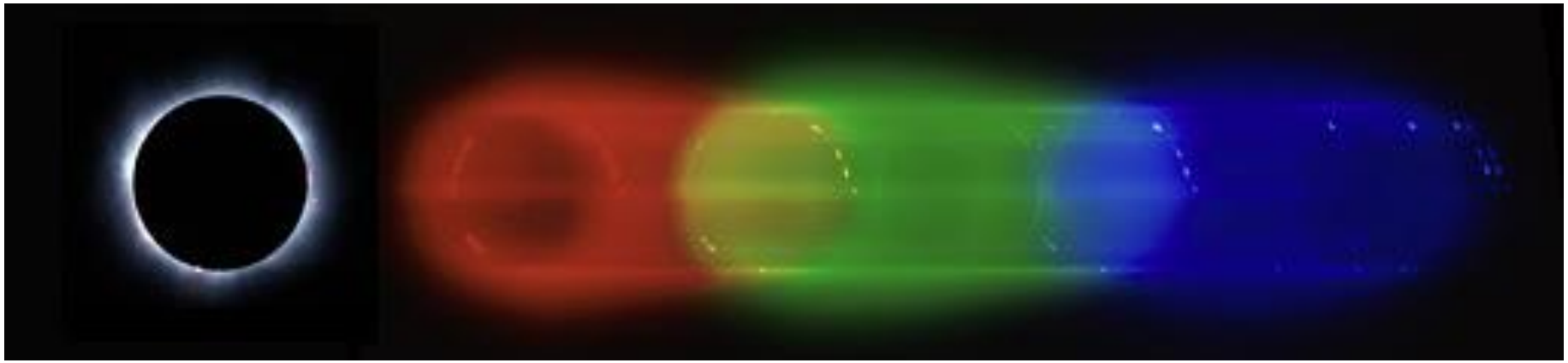


Объяснение

Вальтер Гротриан – обнаружил красную линию (6374) в спектре новой звезды

Бент Элден – первым измерил термы основного состояния иона Fe X и показал, что линия 6563 А возникает при расщеплении основного состояния.

L - корона



Объяснение

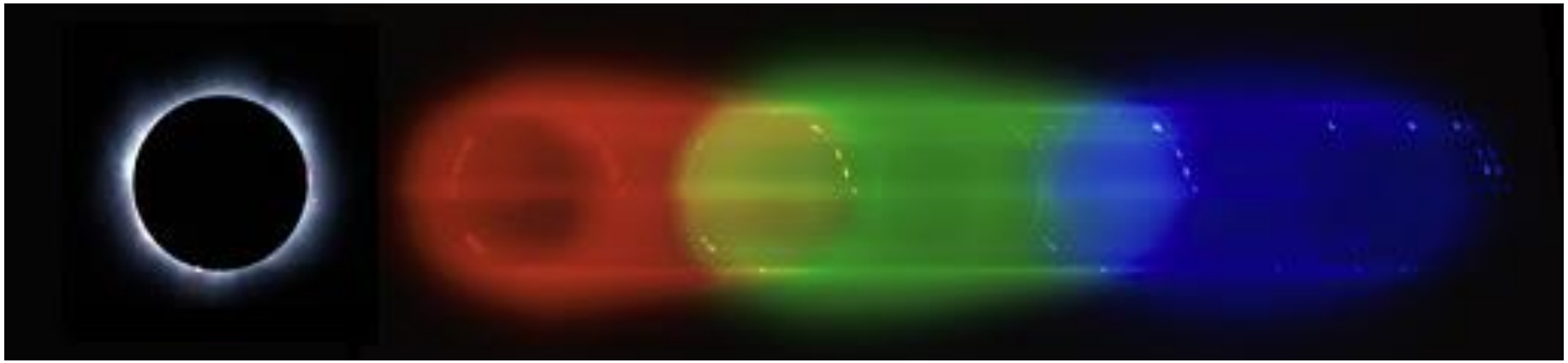
Запрещённые линии (магнитодипольные).

Правила отбора: n – главное квантовое число, L – орбитальное квантовое число от 0 до n-1 (S, P, D, F, …), S – оператор спина (1/2), J = L + S – полное квантовое число

Обычные правила отбора: $\Delta L = \pm 1$, $\Delta J = 0, \pm 1$

Магнитодипольные: $\Delta L = 0$, $\Delta J = 0, \pm 1$ (вероятность 10^{-5})

L - корона



Красная линия

Fe X (17 электронов): 1s2 2s2 2p6 3s2 3p5

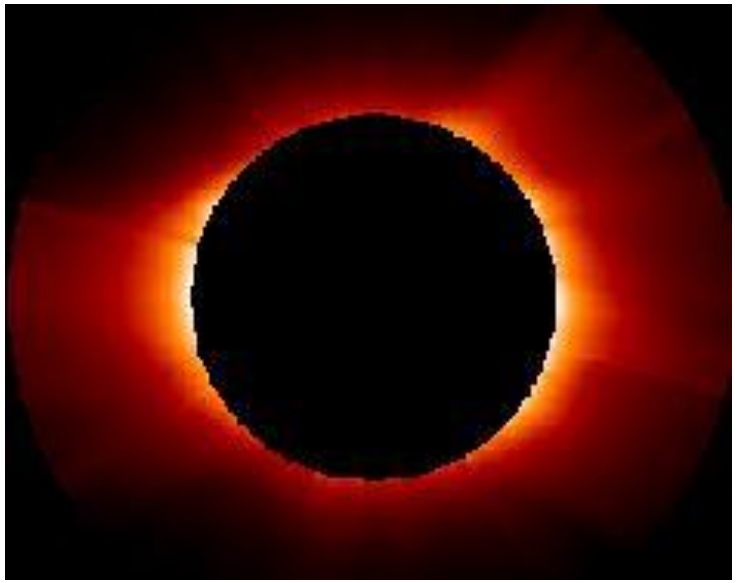
Основной уровень 3p5 расщепляется на $3P_{3/2}$ и $3P_{1/2}$. Между ними возможен магнито-дипольный переход Δ L = 0. Так как расщепление тонкое, то энергия перехода мала и соответствует оптическому диапазону с длиной волны 6563 А.

Зелёнвя линия

Fe XIV (13 электронов): 1s2 2s2 2p6 3s2 3p

Основной уровень 3p расщепляется на $3P_{3/2}$ и $3P_{1/2}$. Между ними возможен магнито-дипольный переход Δ L = 0. Так как расщепление тонкое, то энергия перехода мала и соответствует оптическому диапазону с длиной волны 5303 А.

Наземные внезатменные коронографы



Работают в оптических линиях L короны – обычно в красной или зелёной.

Позволяют наблюдать корону вне затмений.

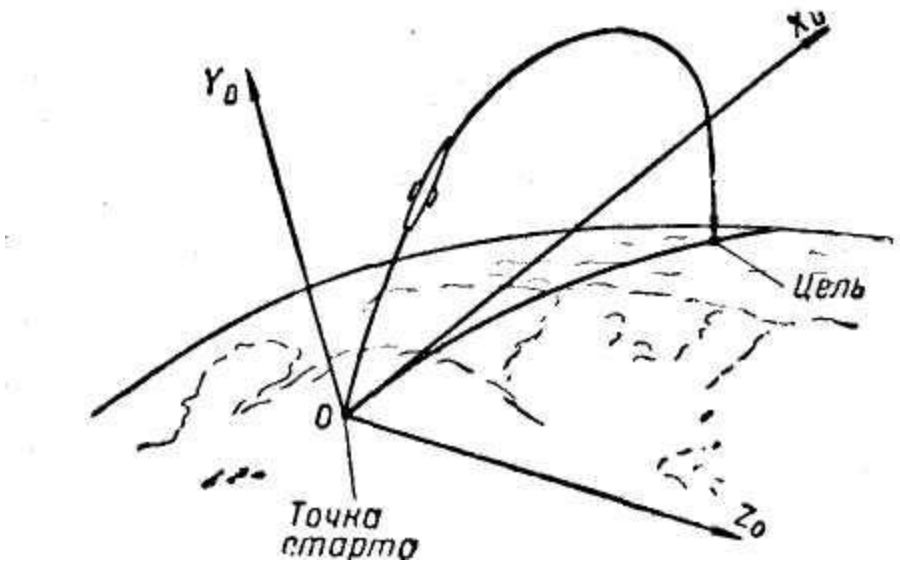
Наблюдения Солнца из космоса

Первые эксперименты – Р1

Ракета Р-1 на установщике.
1948 г.
РГАНТД. Ф.35, оп.3, д.14.

ФИАН – первая организация в нашей стране, которая начала научные эксперименты в космосе. Первые запуски научной аппаратуры были проведены в **1947 на первых советских ракетах Р**1 (копия V-2).

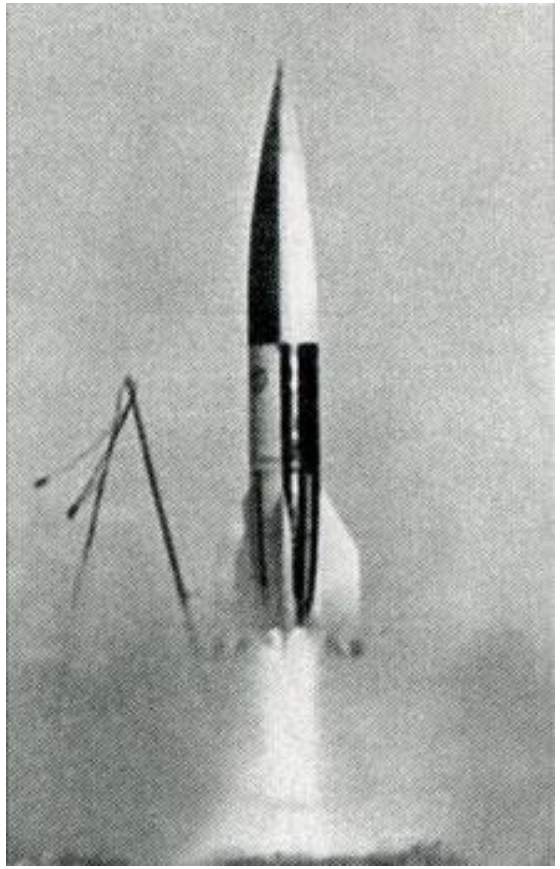
Первые эксперименты – Р1



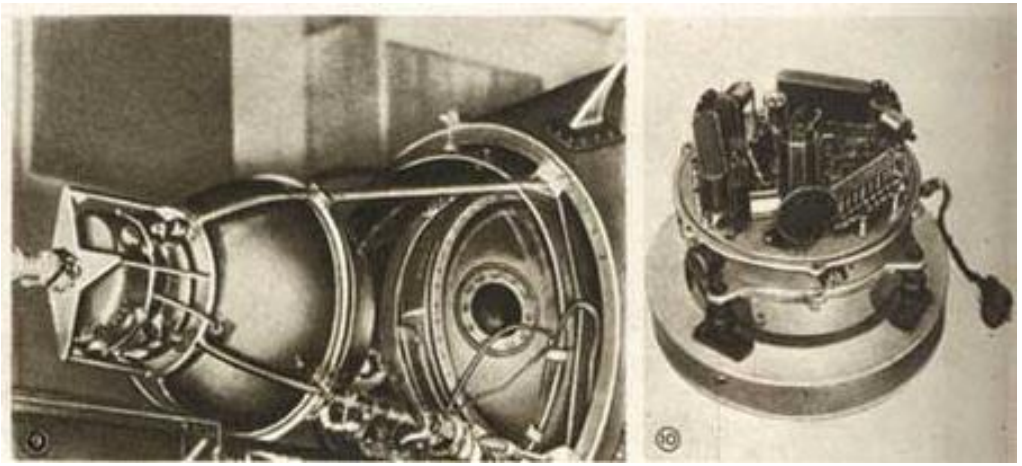
Высота полета ракет позволяла использовать их для исследования верхней атмосферы и рентгеновского излучения Солнца.

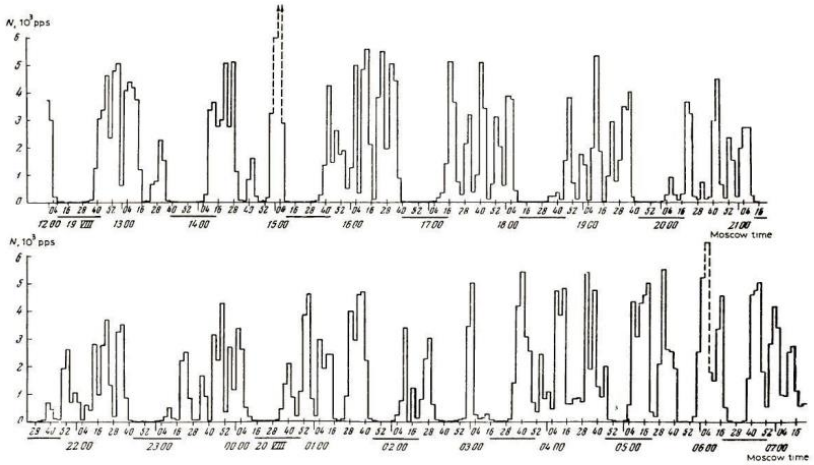
Год – 1947
Число ракет - 6
Полигон – Капустин Яр

Дальность Р1 – 200 км
Высота – 80 км



ПЕРВЫЙ СПУТНИКОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

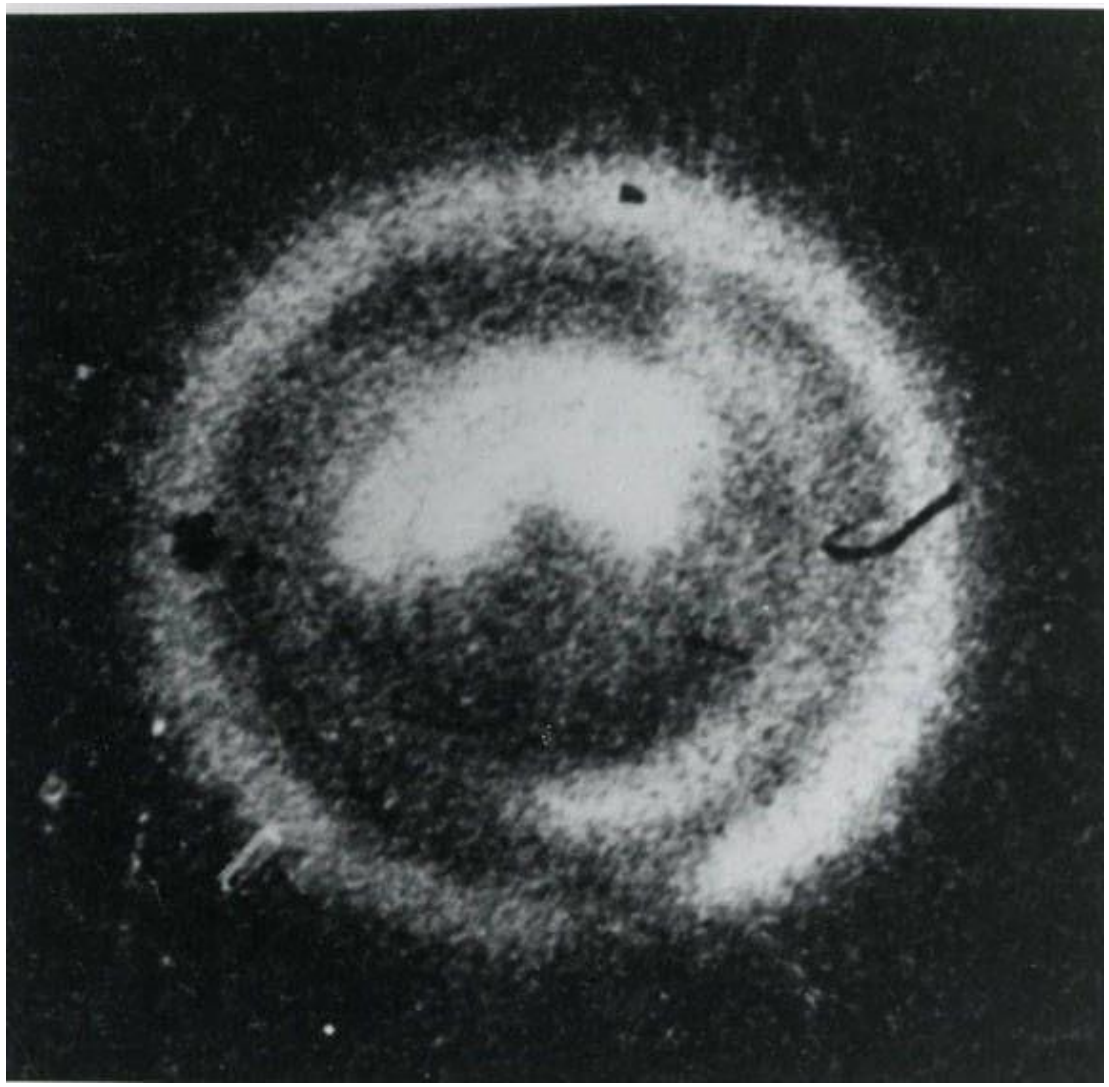




Counting rates from the second spaceship-satellite

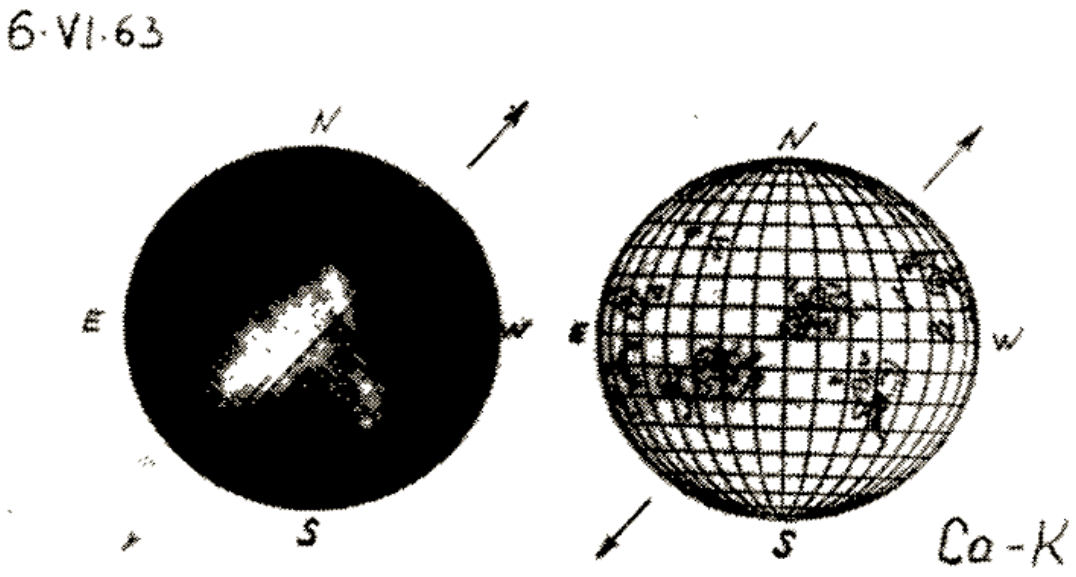
- Первый в истории человечества спутниковый эксперимент был проведен на втором советском ИСЗ, запущенном 3 ноября 1957 г
- Научная аппаратура эксперимента была разработана в ФИАН (С.Л. Мандельштам) и ГОИ (А.А.Лебедев) для регистрации излучения Солнца в диапазоне от 1 до 120 Å
- Было зарегистрировано множество сигналов, которые все оказались не связаны с Солнцем, а производились энергичными частицами радиационных поясов Земли
- Эти наблюдения радиационных поясов были первыми в истории

ПЕРВАЯ В МИРЕ РЕНТГЕНОВСКАЯ ФОТОГРАФИЯ СОЛНЦА

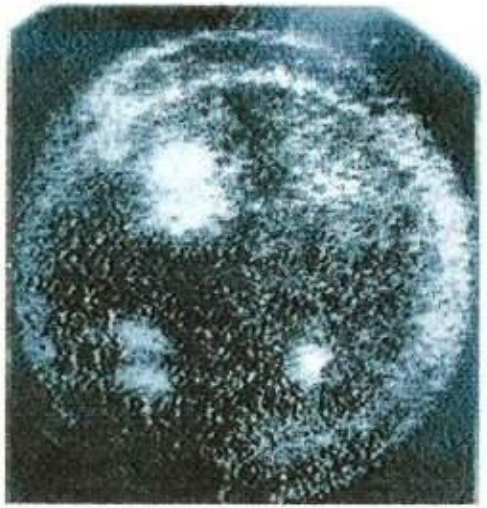


- Получена **в 1960 году в США**.
- Аппаратура – камера обскура.

ПЕРВАЯ В СССР РЕНТГЕНОВСКАЯ ФОТОГРАФИЯ СОЛНЦА



1965г., камера-обскура на ракете $\lambda < 20$ **A**



- Первое в СССР изображение Солнца в рентгеновском диапазоне было получено в Физическом институте Академии наук **6 июня 1963 года** в ходе эксперимента на геофизической ракете
- Изображение получено в диапазоне 170-400 Å с помощью камеры-обскура
- Благодаря трехосной стабилизации аппаратуры удалось получить наиболее четкие на тот момент фотографии
- Положение источников рентгеновского излучения совпало с положением областей повышенной яркости (так называемых флоккулов), видимых в линии К ионизованного кальция CaII 3934 Å

SKYLAB

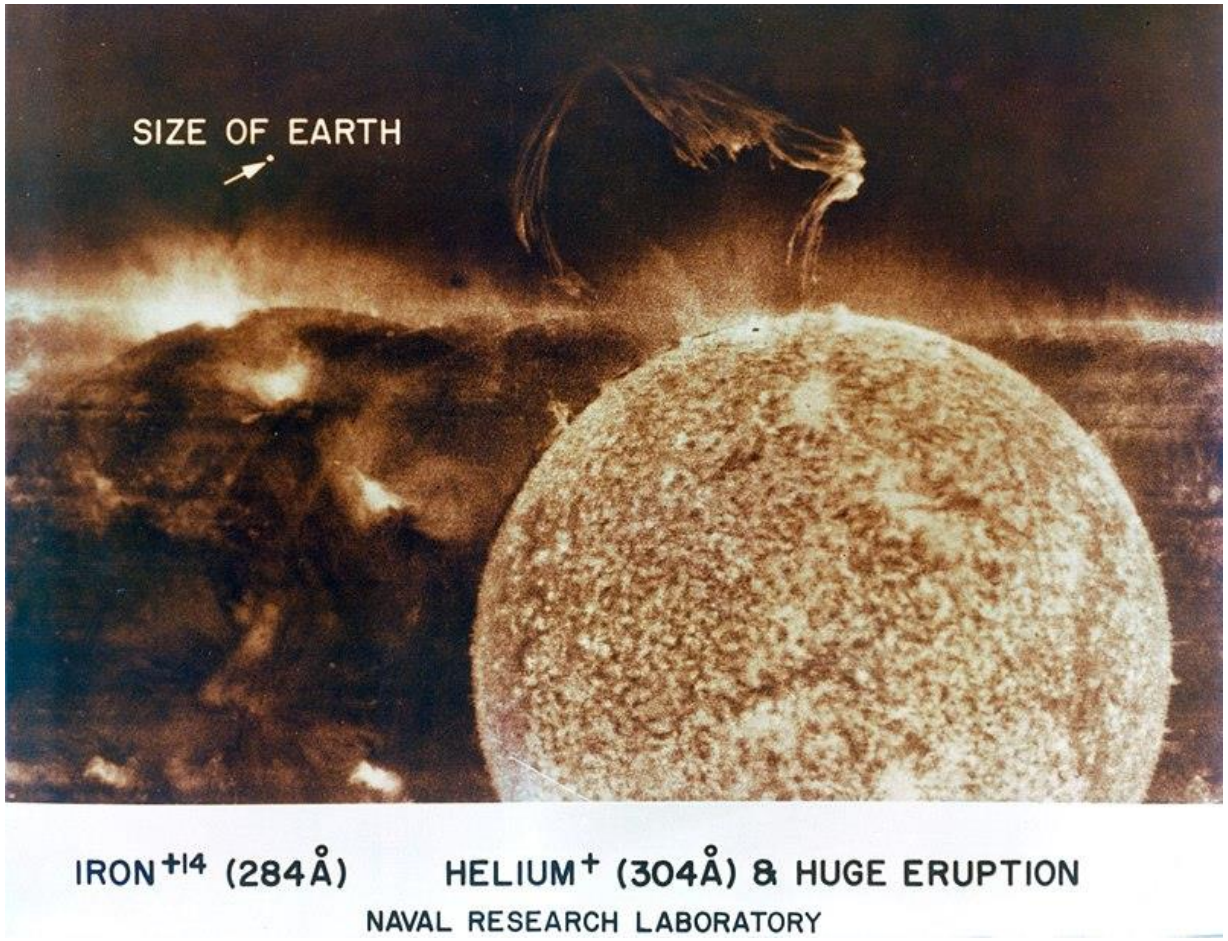
Первая и единственная национальная орбитальная станция США, предназначенная для технологических, астрофизических, медико-биологических исследований, а также для наблюдения Земли.
Запущена **14 мая 1973 года**, приняла три экспедиции на кораблях «Аполлон» с мая 1973 по февраль 1974 года, сошла с орбиты и разрушилась 11 июля 1979 года.

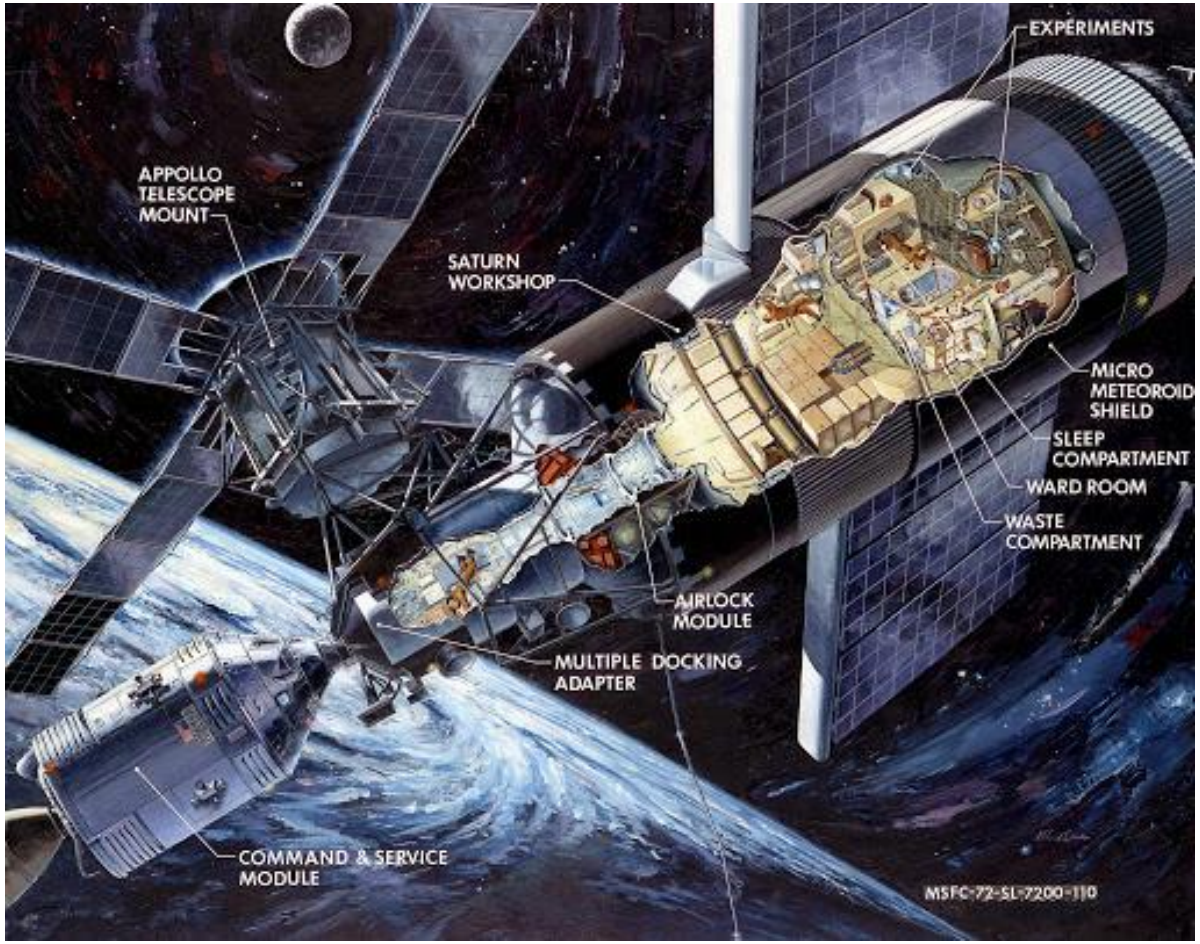
SKYLAB

После отмены лунных экспедиций Аполлон-18, -19, -20 в распоряжении НАСА остался запас из трёх сверхтяжёлых ракет Сатурн-5, которая легко могла вывести полностью оснащённую орбитальную станцию.

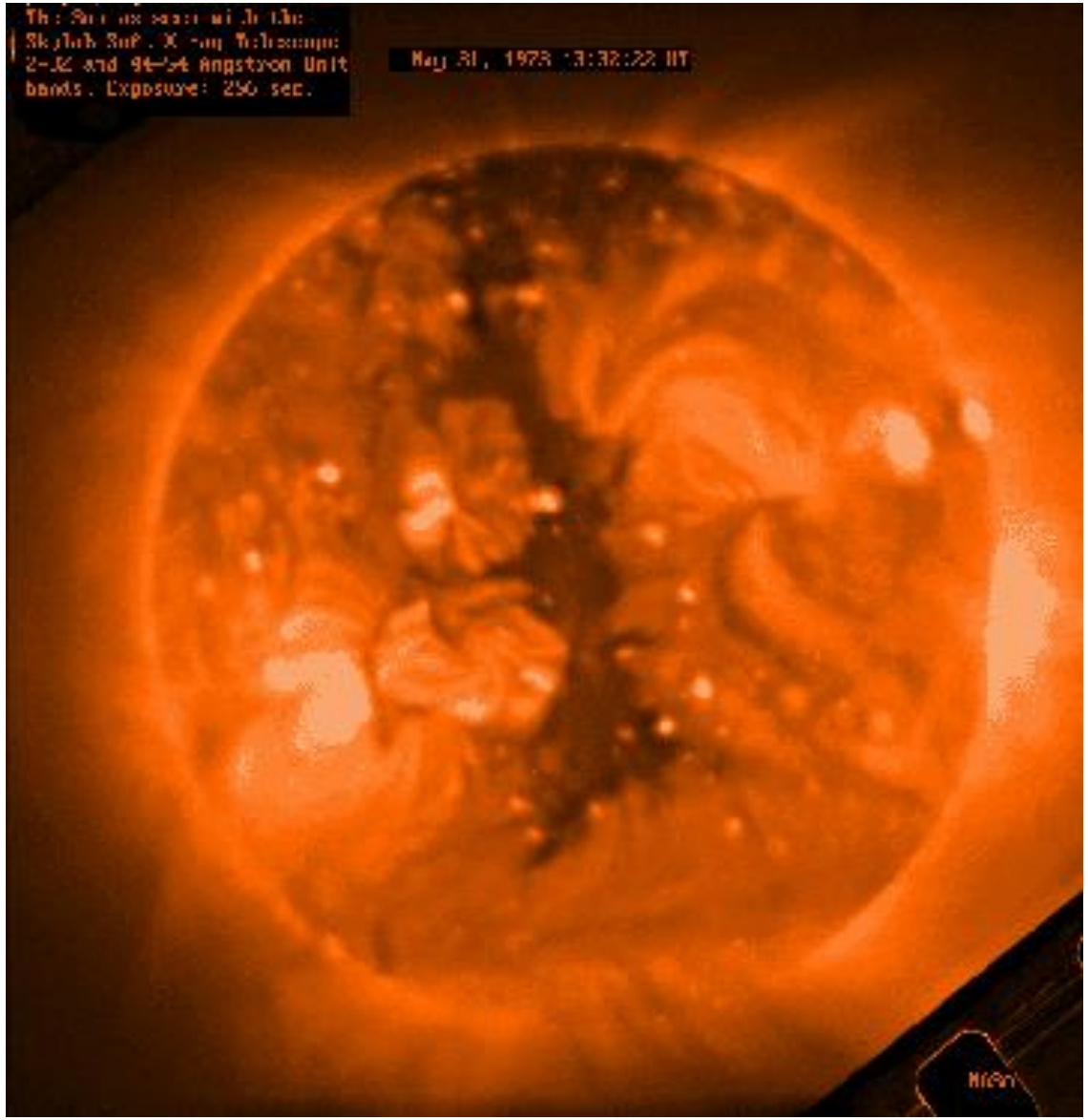
Сатурн 5 в космическом центре имени Джонсона, Хьюстон

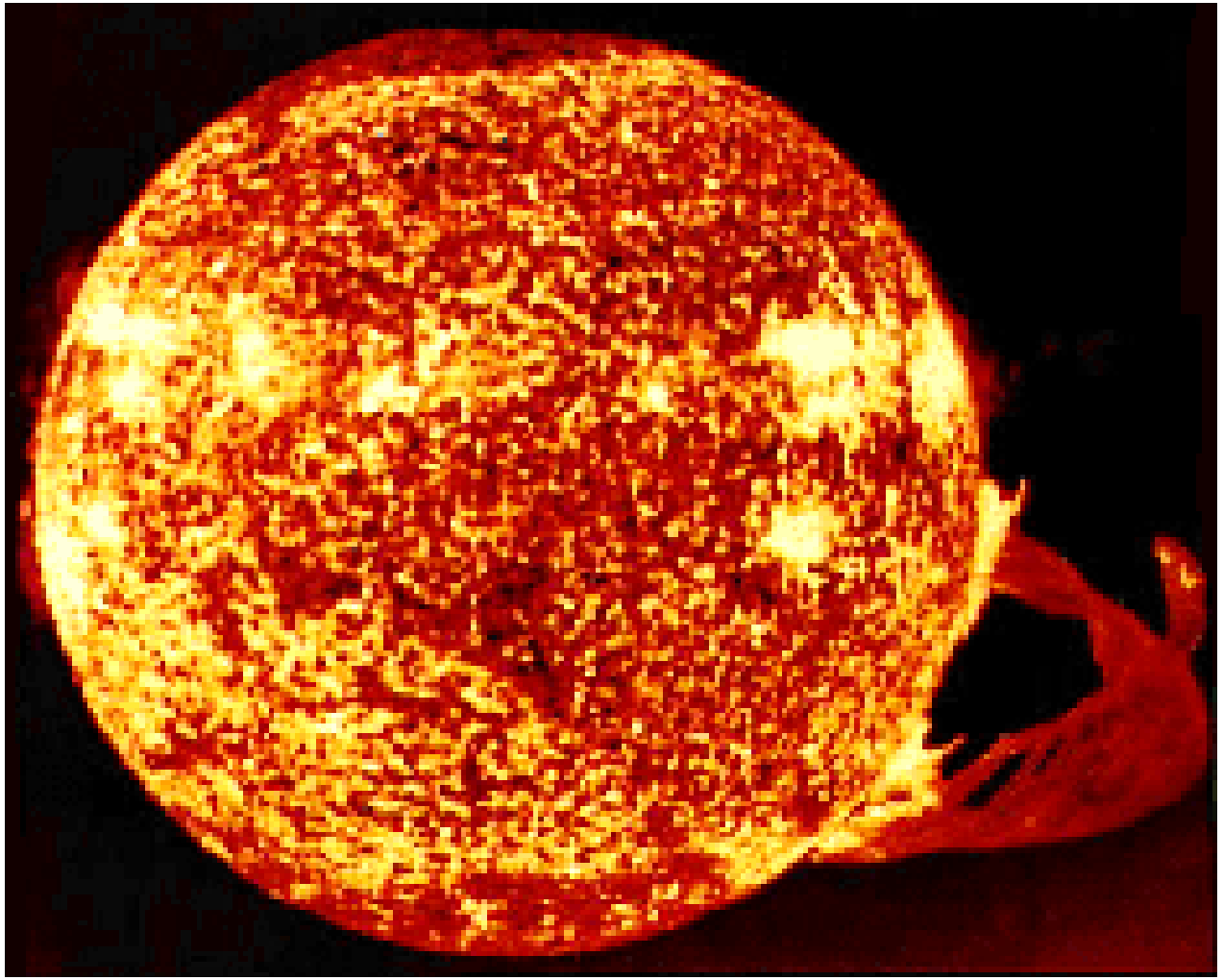
SKYLAB - ATM


SIZE OF EARTH
IRON +14 (284Å)
HELIUM + (304Å) & HUGE ERUPTION
NAVAL RESEARCH LABORATORY


EXPERIMENTS
APPOLLO TELESCOPE MOUNT
SATURN WORKSHOP
MICRO METEOROID SHIELD
SLEEP COMPARTMENT
WARD ROOM
WASTE COMPARTMENT
AIRLOCK MODULE
MULTIPLE DOCKING ADAPTER
COMMAND & SERVICE MODULE
MSFC-72-SL-7200-110

SKYLAB - ATM





Примеры изображений Skylab – Солнце из космоса

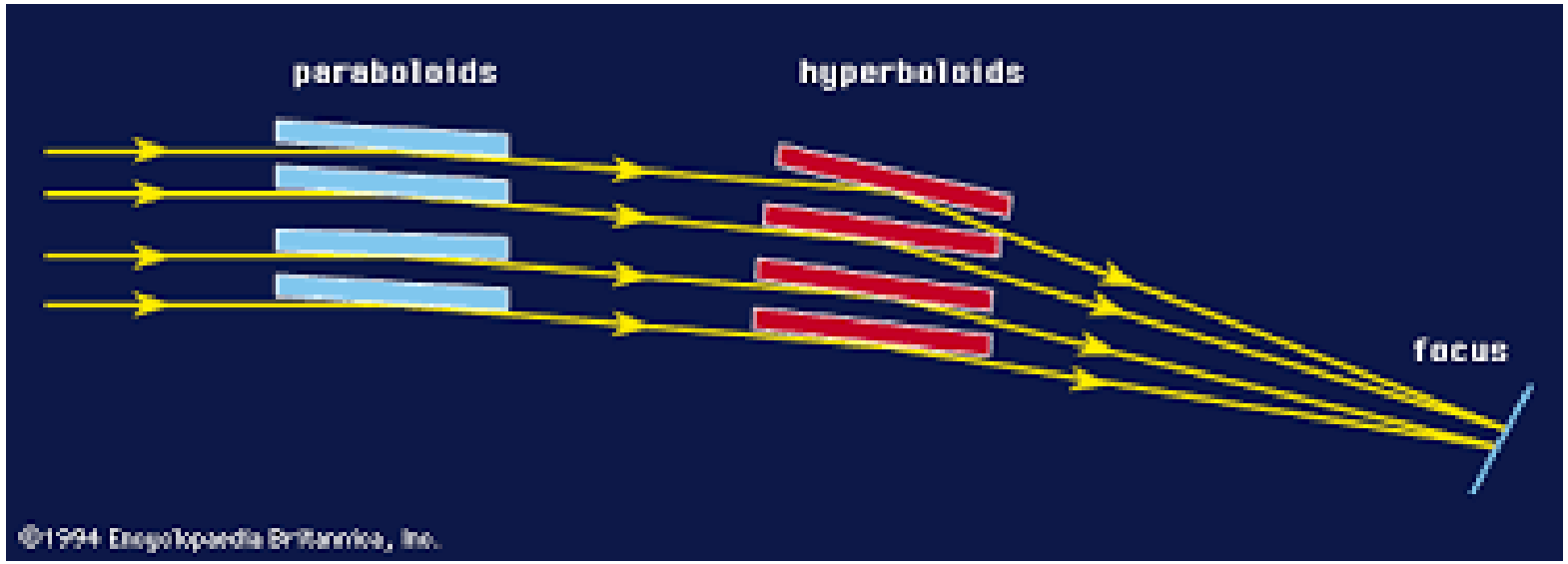
SKYLAB – Э.Гиббсон

Издательство МИР, 1977 год

Бывший астронавт НАСА, американский пилот, инженер и физик.

Совершил один космический полёт — в качестве научного сотрудника на космическом корабле «Скайлэб-4», в 1974 году установил рекорд пребывания и работы в космосе — 84 дня на орбитальной станции «Скайлэб», совершил три выхода в открытый космос.

SKYLAB – Технология получения изображений

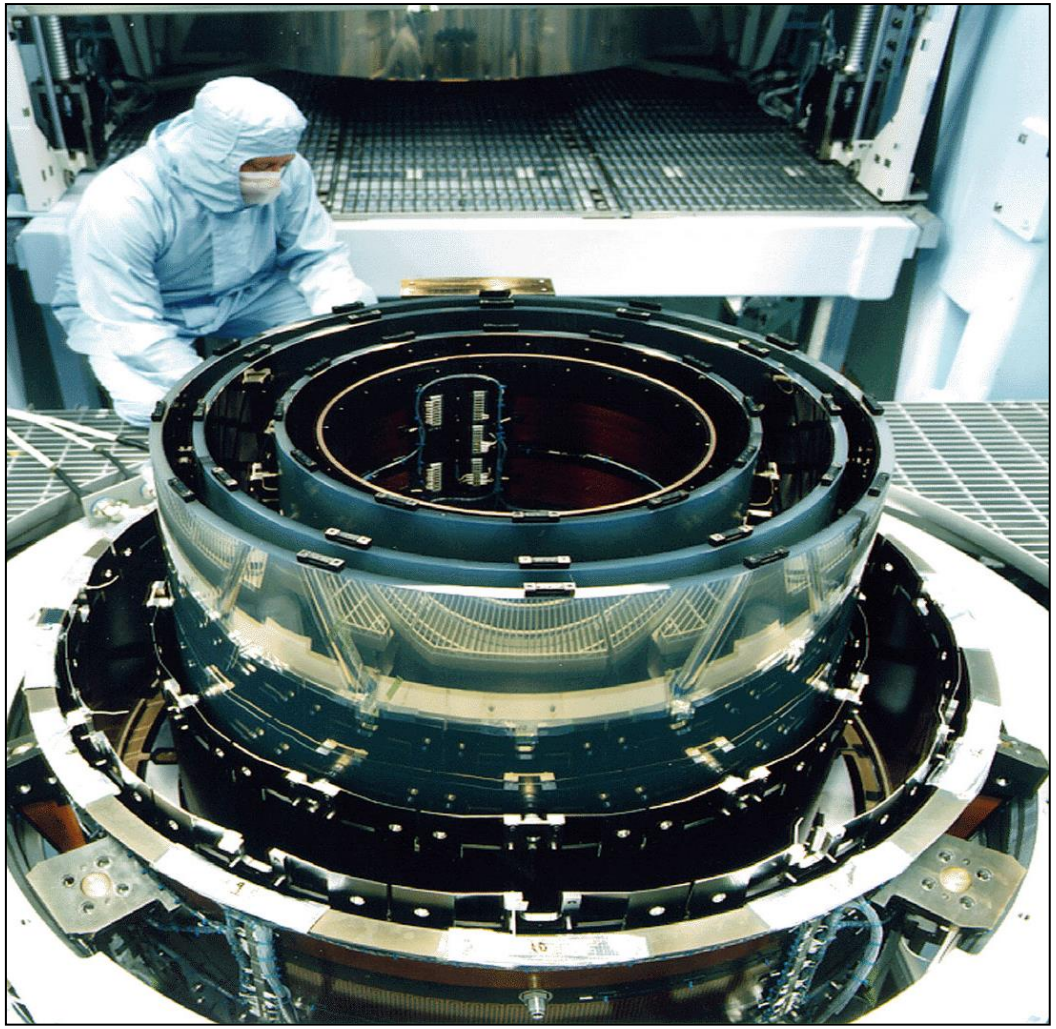


Используется возможность металлических зеркал отражать коротковолновое излучение, падающее под очень небольшим углом.

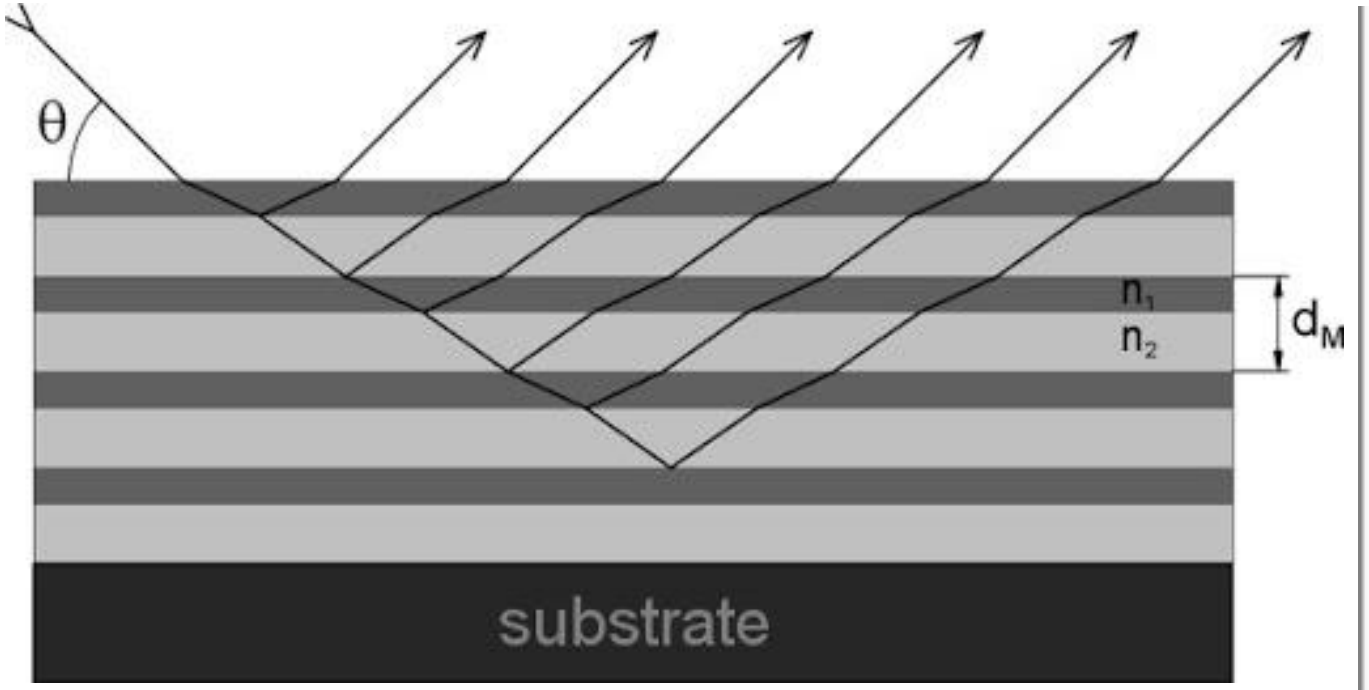
Минусы – малая эффективная площадь.

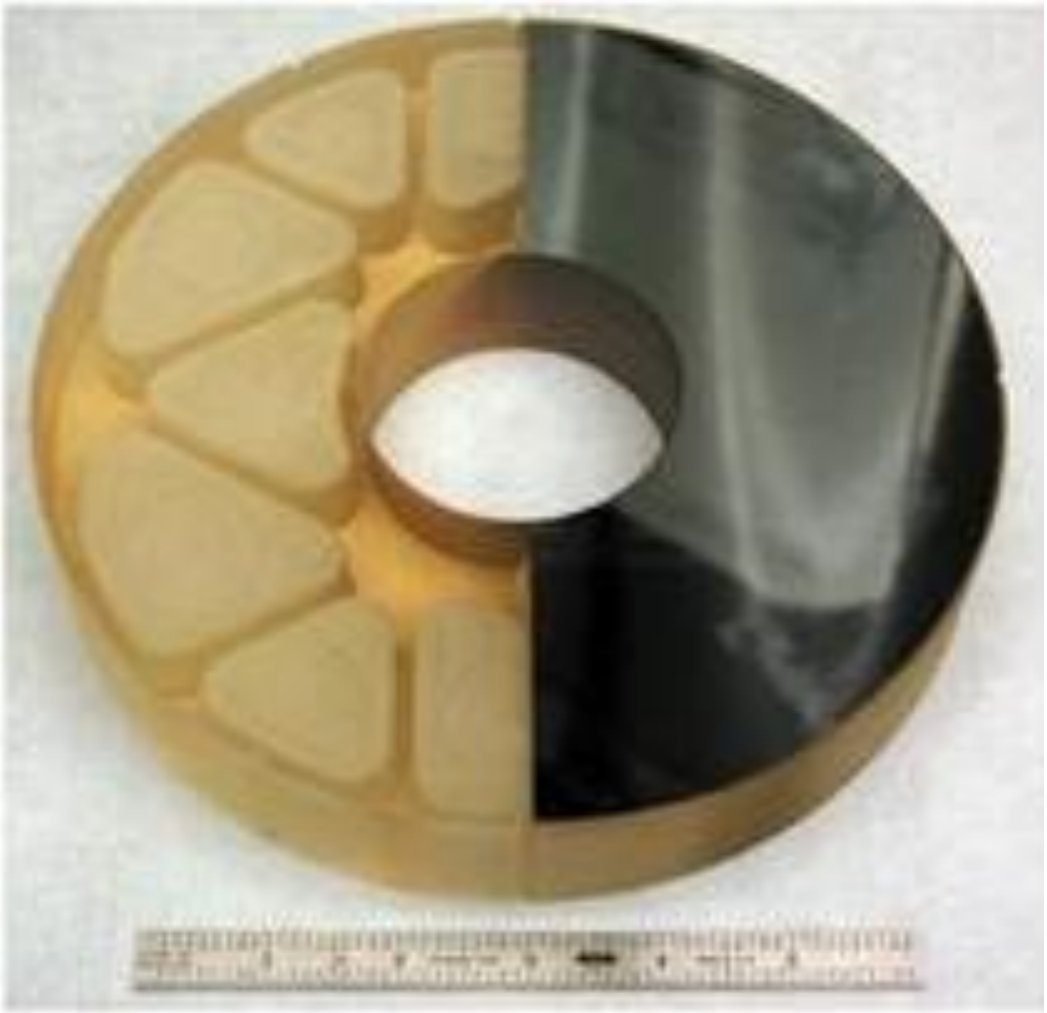
Зеркало АТМ.
Изготовлено в Marshall Space в 1967.
Диапазон 5 – 60 А

Обсерватория Chandra (1999 год)



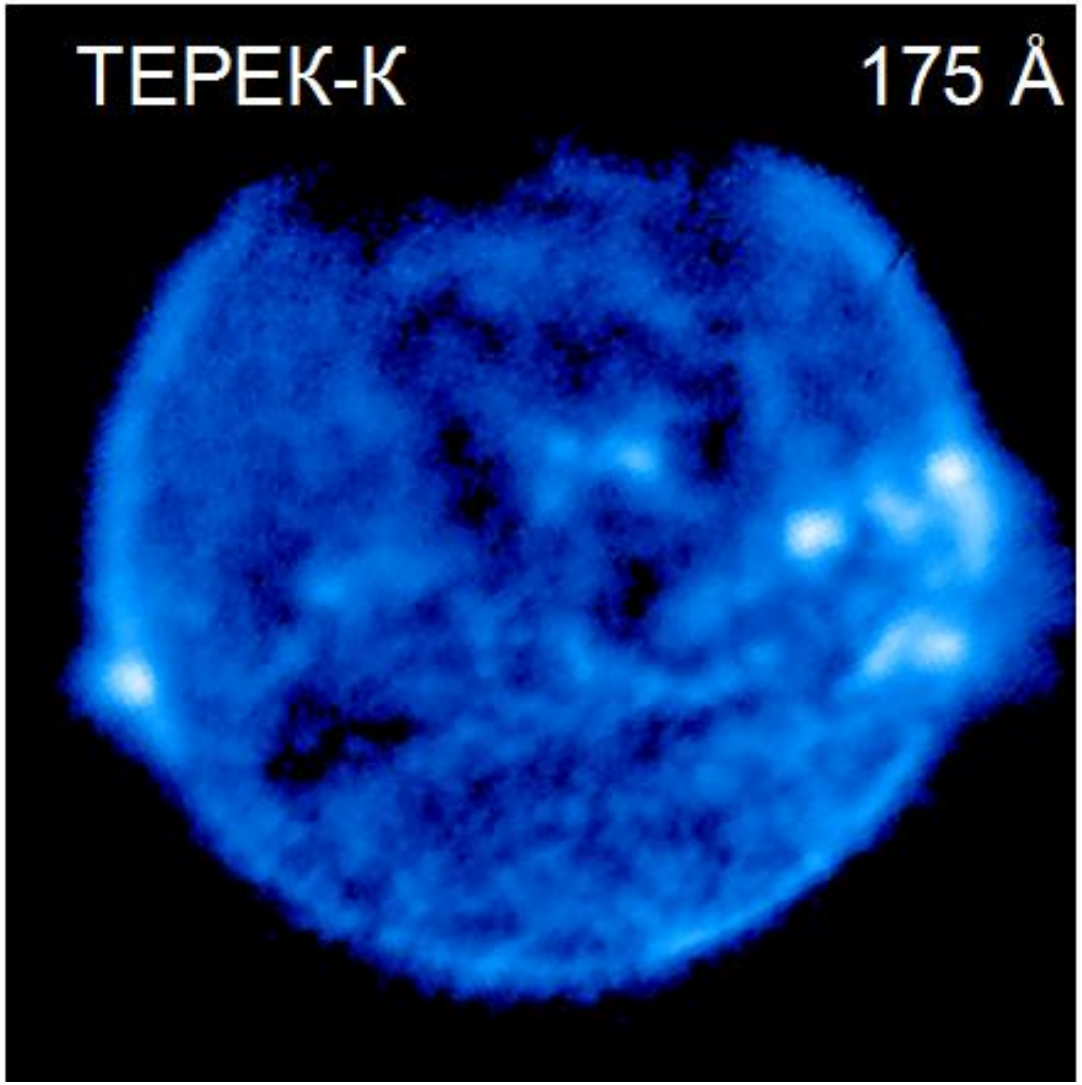
Многослойные зеркала





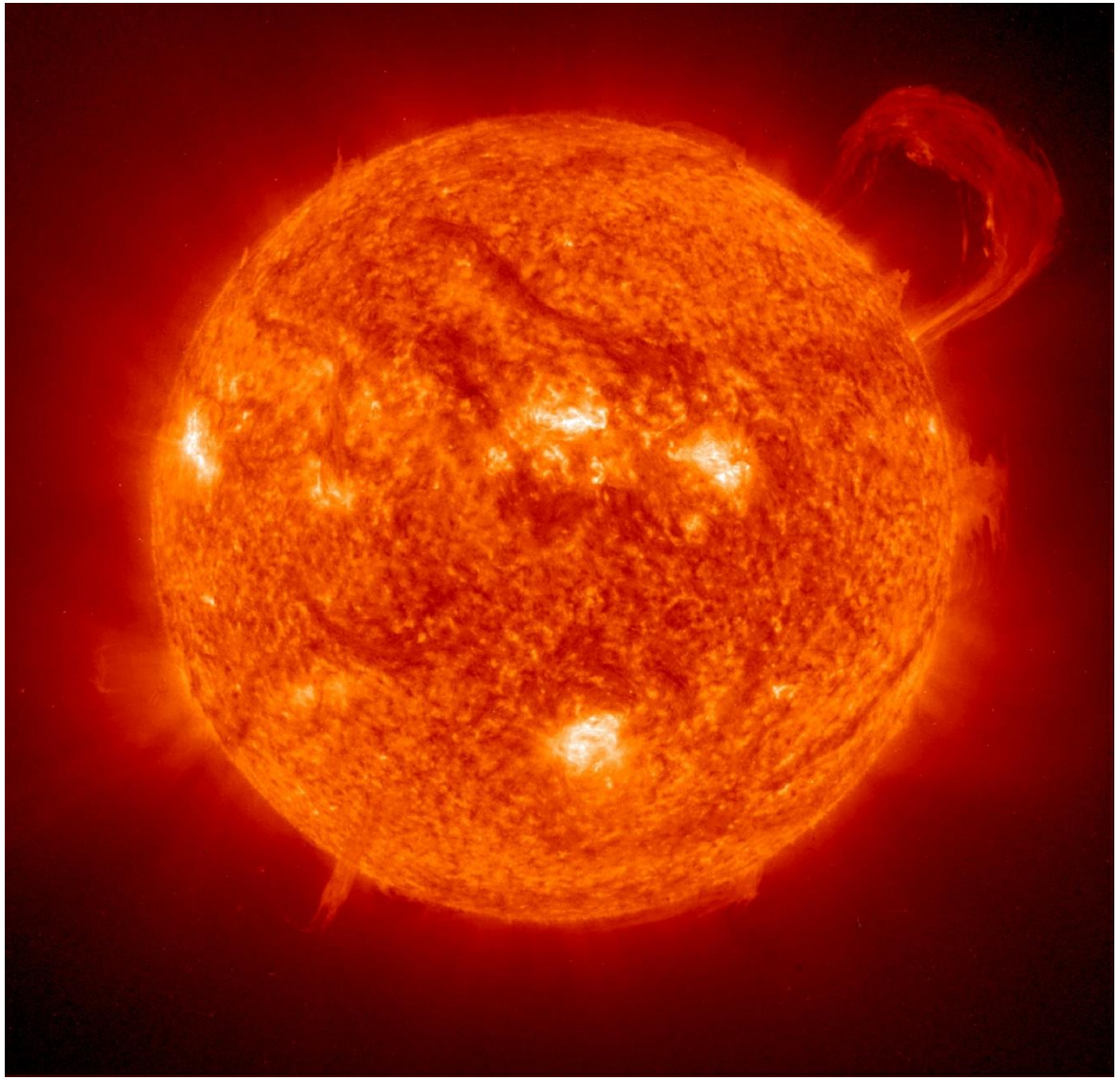
Наносится множество (сотни) слоёв металла толщиной несколько нм. Получившаяся подложка эффективно отражает выбранный узкий диапазон длин волн. В остальных длинах зеркало прозрачно.

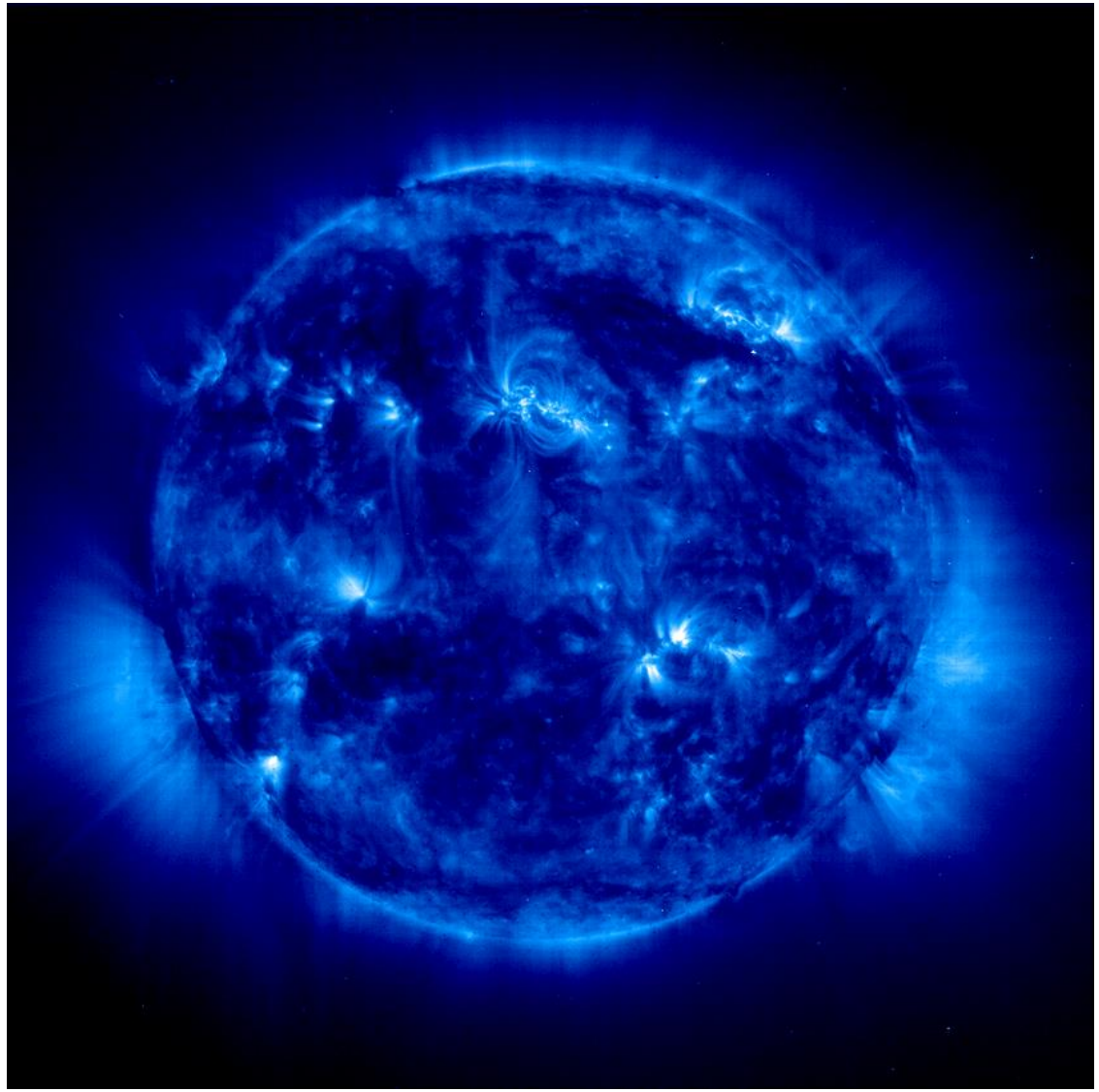
КОРОНАС-И (1994 год)



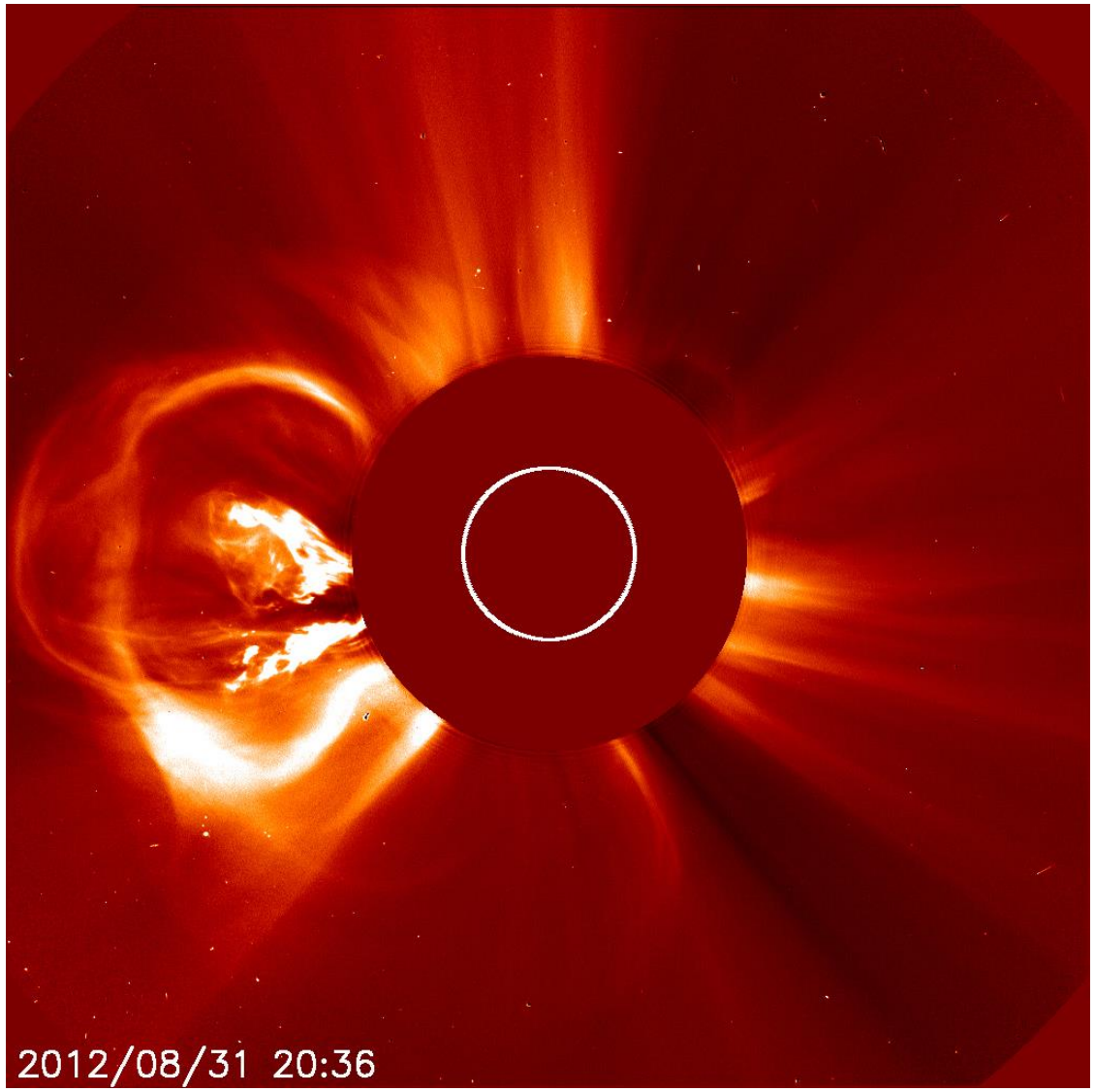
Получено прибором ТЕРЕК на борту обсерватории КОРОНАС-И (РФ) в 1994 году.

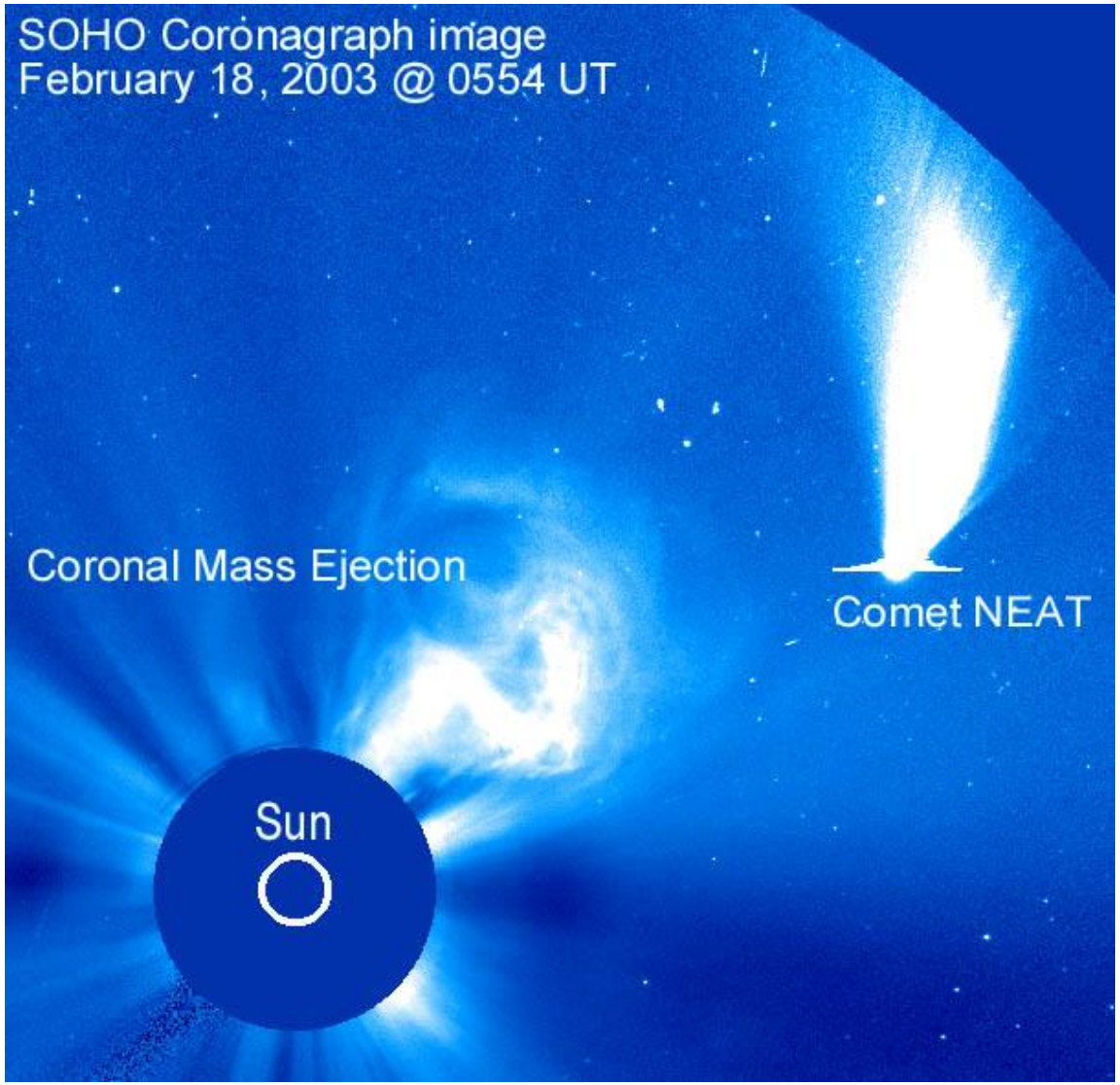
SOHO (запуск - 1996 год)



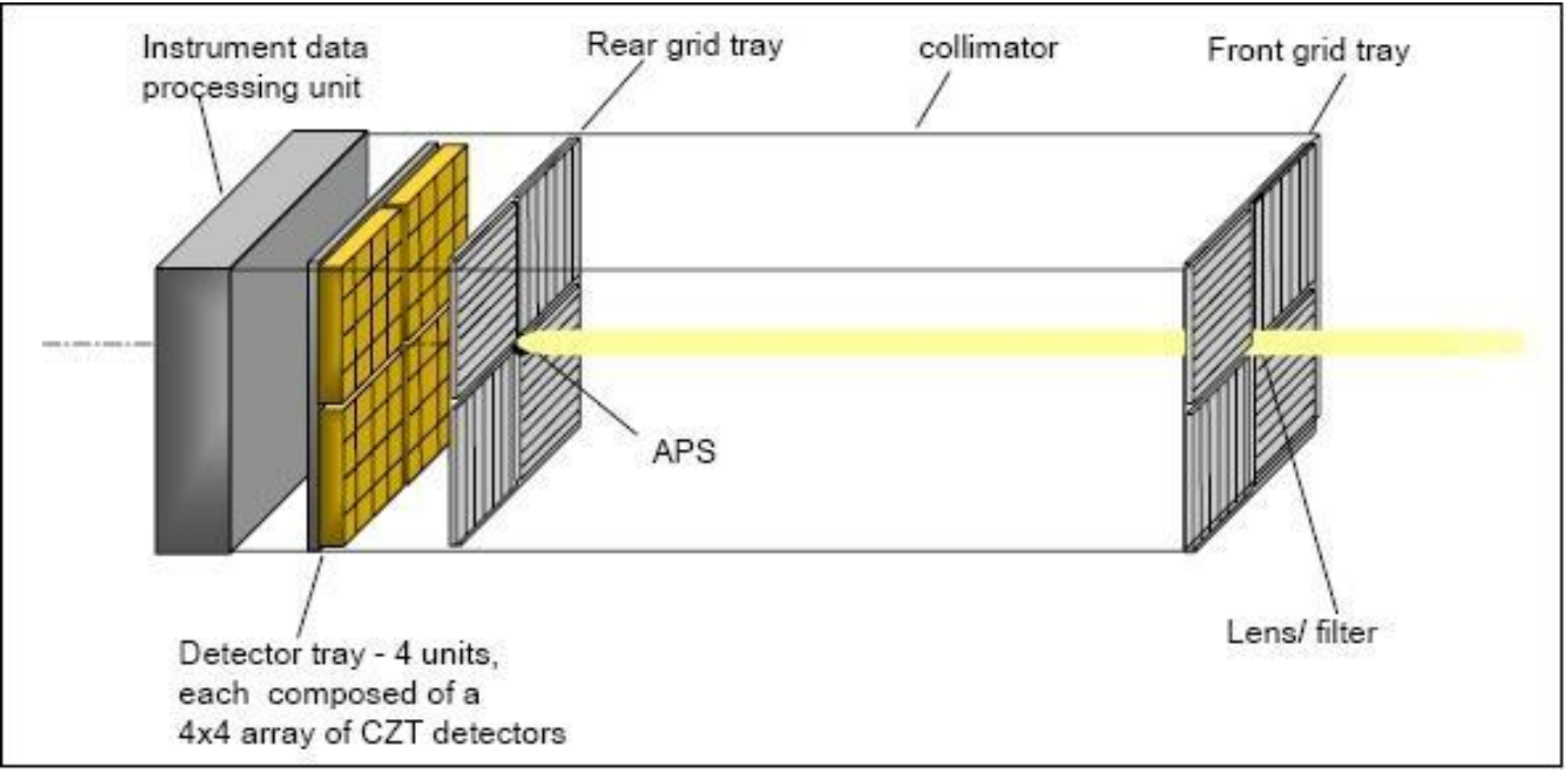


SOHO (запуск - 1996 год)



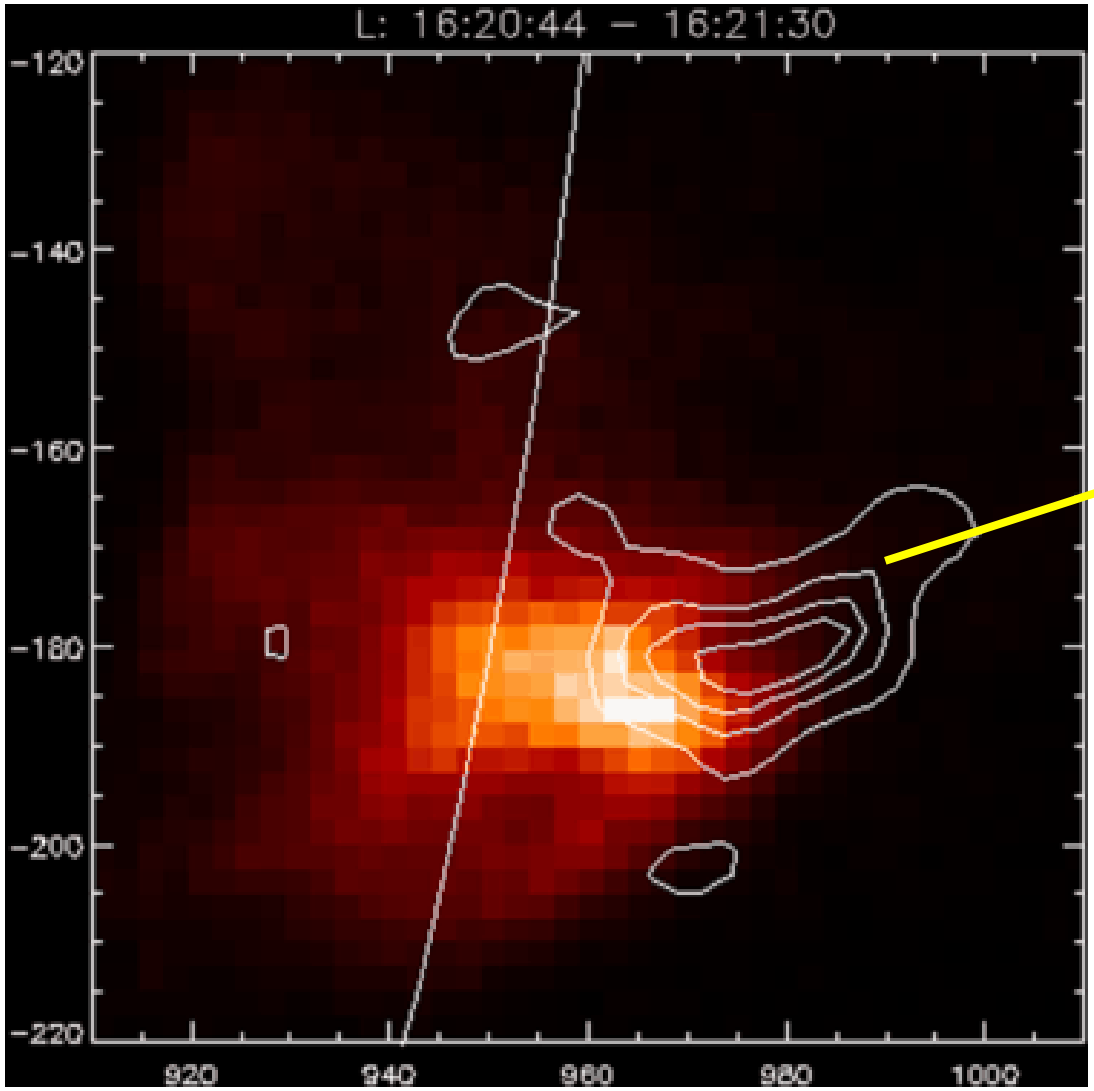


YOHKOH (Япония) – запущен в 1991 году



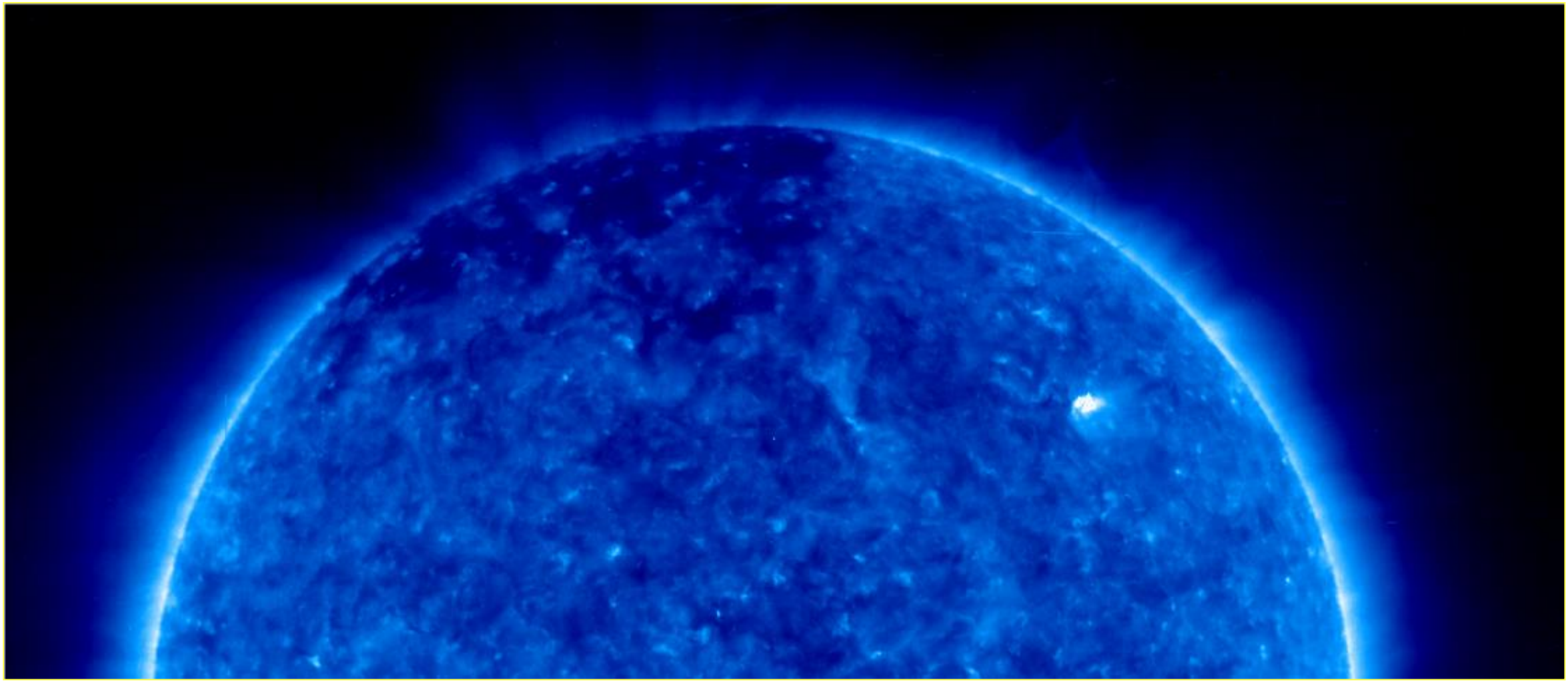
Излучение Солнца

YOHKOH (Япония) – запущен в 1991 году



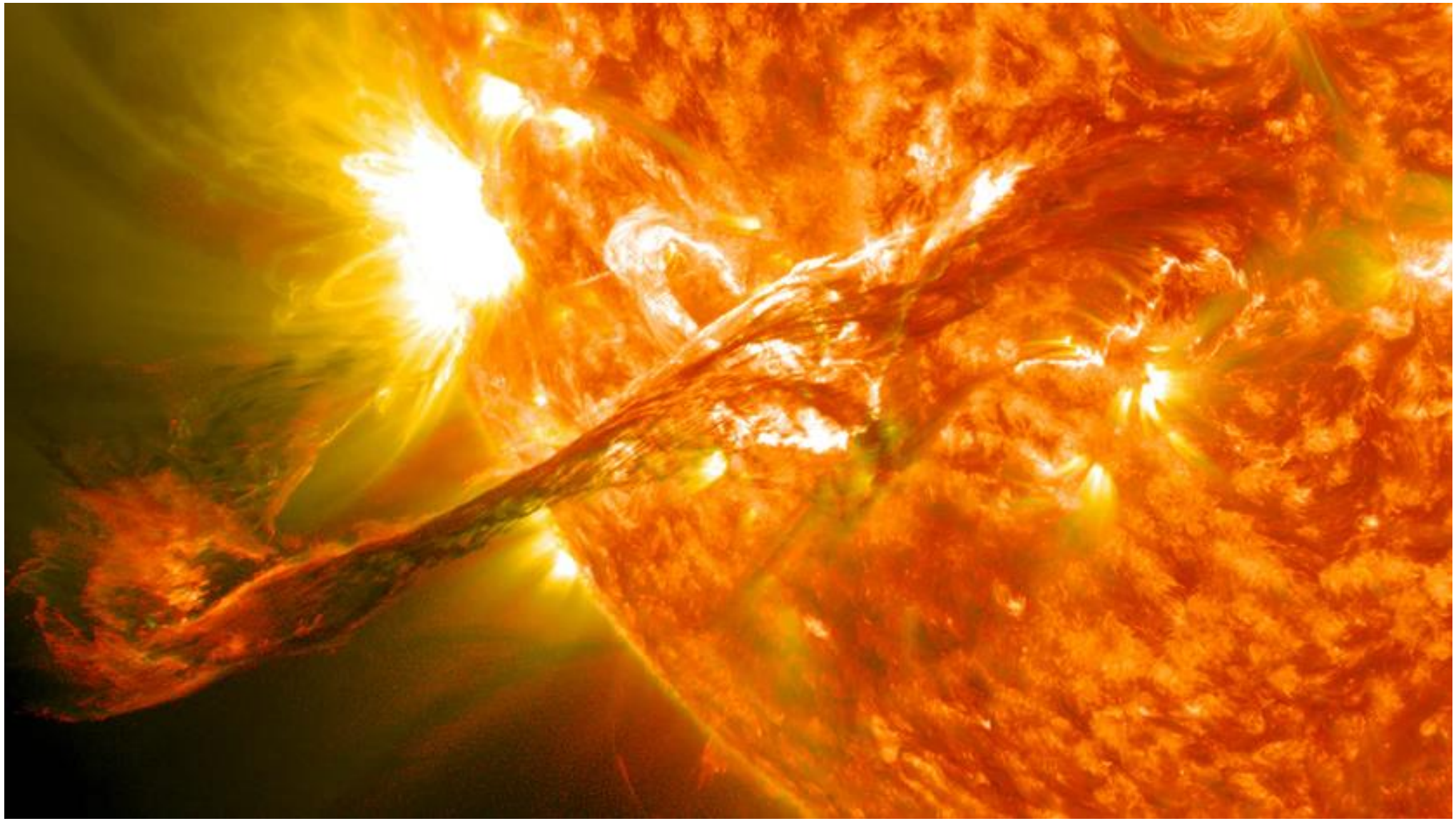
Жёсткое рентгеновское излучение
(10 – 100 кэВ)

КОРОНАС-Фотон (2009 год)



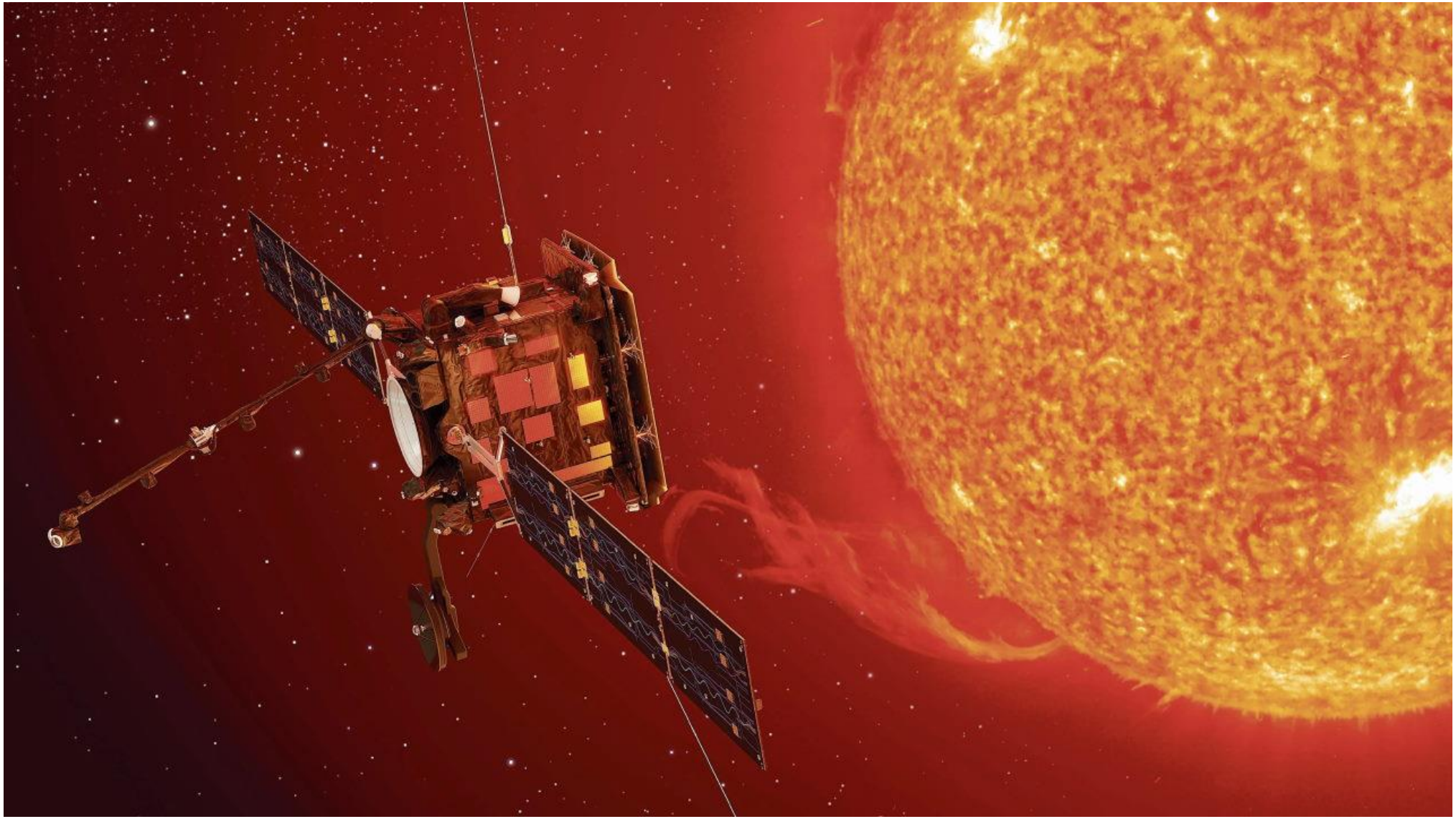
Последняя специализированная солнечная обсерватория РФ. Была запущена в 2009 году.

SDO (2010 год) - NASA



Наиболее современная солнечная обсерватория мира. Запущена в 2010 году.

SOLAR ORBITER



Запущен 10.02.2020. Будет выведен на орбиту вокруг Солнца.

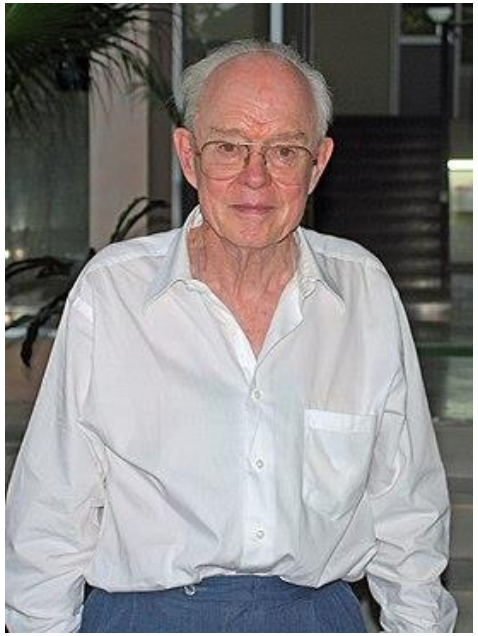
НА ОРБИТЕ

Работают на орбите:

1. SOHO (Европа) – 1996 год.
2. RHESSI (НАСА) – 2002 год.
3. STEREO (НАСА) – 2006 год.
4. HINODE (Япония) – 2006 год.
5. SDO (НАСА) – 2010 год.

Находятся на подлёте:

1. SOLAR ORBITER – 2020 год.
2. PARKER SOLAR PROBE - 2018



СПАСИБО