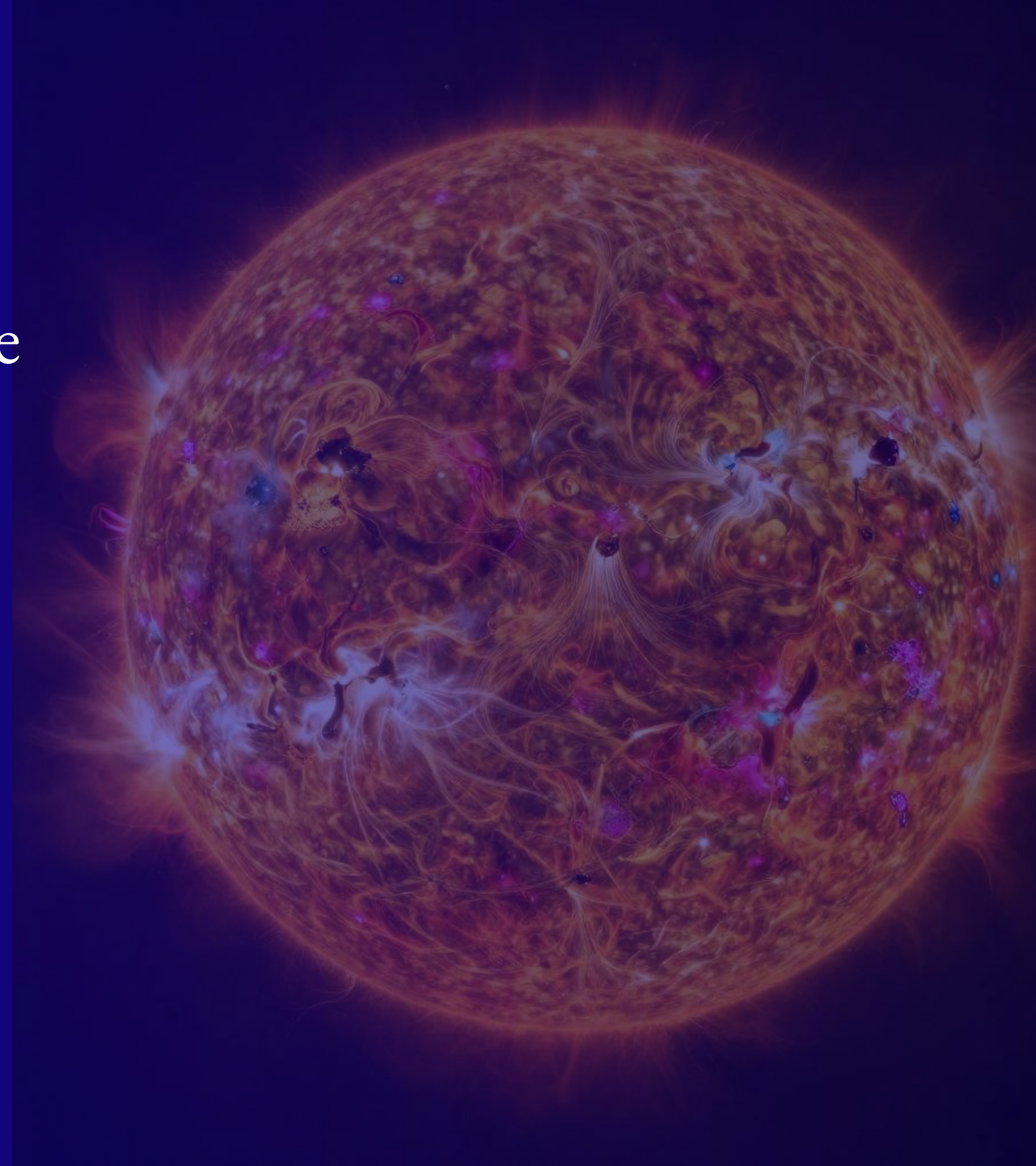


Общее введение в строение солнечных оболочек

Солнце состоит из нескольких оболочек с уникальными физическими свойствами, влияющими на всю солнечную активность.

Почему важно изучать солнечные оболочки

Изучение оболочек Солнца открыло понимание процессов генерации энергии и магнитной активности, влияющей на жизнь и технологии на Земле.



Основные слои Солнца и их характеристики

Ядро — источник энергии Солнца

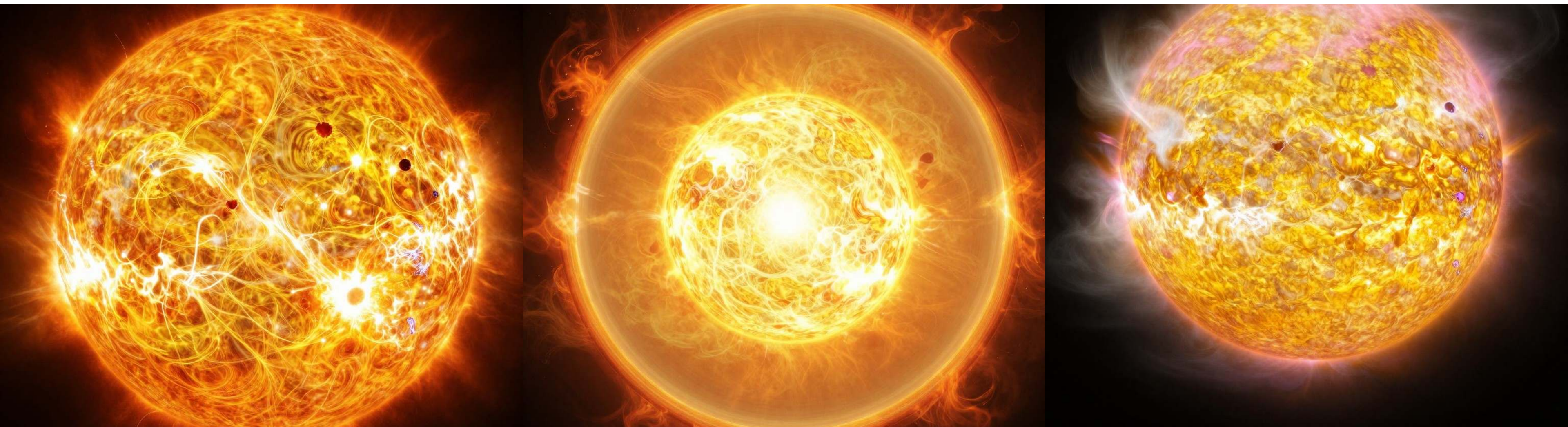
В центре Солнца находится ядро, где происходят термоядерные реакции. Здесь температура достигает миллионов градусов, обеспечивая энергию для всего светила.

Зоны переноса энергии

Лучистая зона передает энергию из ядра путем излучения, а зона конвекции обеспечивает передачу энергии потоками горячей плазмы к поверхности.

Внешние оболочки — фотосфера, хромосфера и корона

Фотосфера — видимый солнечный слой, дальше идет более разреженная хромосфера, а затем высокая и разреженная корона с экстремальными температурами.



Фотосфера: ключевой видимый слой Солнца

Толщина фотосферы примерно 500 км, при температуре около $5\,500^{\circ}\text{C}$ она излучает основной видимый свет Солнца.

Поверхность фотосферы демонстрирует грануляцию — мелкоклеточную структуру, связанную с конвекцией плазмы внутри.

В фотосфере возникают солнечные пятна — области пониженной температуры и высокой магнитной активности, влияющие на солнечную динамику.

Температурные и толщинные характеристики оболочек Солнца

Оболочка	Толщина	Температура
Фотосфера	~500 км	~5 500 °C
Хромосфера	~2 000 км	4 500–25 000 °C
Корона	до миллионов км	1–2 млн °C

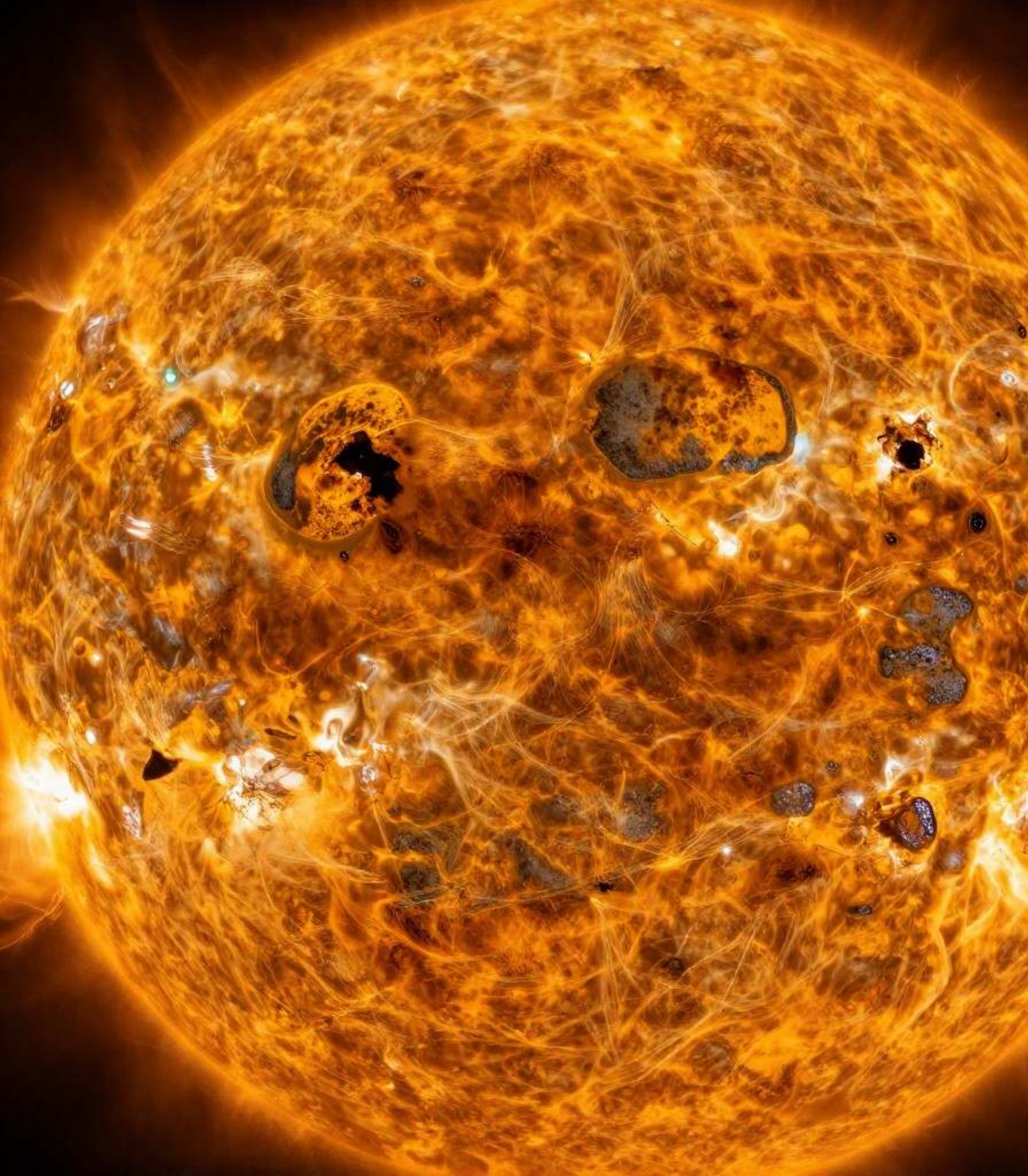
В таблице представлены размеры и температуры основных оболочек Солнца, демонстрируя резкий рост температуры во внешних слоях.

Температура резко возрастает в переходе от фотосферы к короне, несмотря на удаление от ядра.

Грануляция фотосферы: проявления и наблюдения

- Поверхность фотосферы усеяна гранулами размером около 1 000 км, возникающими вследствие конвективных течений горячей плазмы.
- Гранулы быстро меняются, исчезая через 8–20 минут, что свидетельствует о постоянной динамике солнечной поверхности.





Солнечные пятна и их магнитная природа

1. Солнечные пятна — это тёмные области с пониженной температурой (3 000–4 500 °C), вызванные подавлением конвекции сильными магнитными полями.
2. Количество и размер пятен меняются по 11-летнему циклу, что отражает цикличность магнитной активности Солнца.

Хромосфера: структура и проявления

Хромосфера простирается до 2 000 км, видна как красноватый ободок во время солнечного затмения.

В ней активно движется газ, формируя спиккулы — вертикальные струи плазмы.

Наблюдаются всплески и волны, которые помогают поддерживать высокую температуру короны.

Эти процессы связаны с магнитной активностью и играют важную роль в динамике солнечных оболочек.

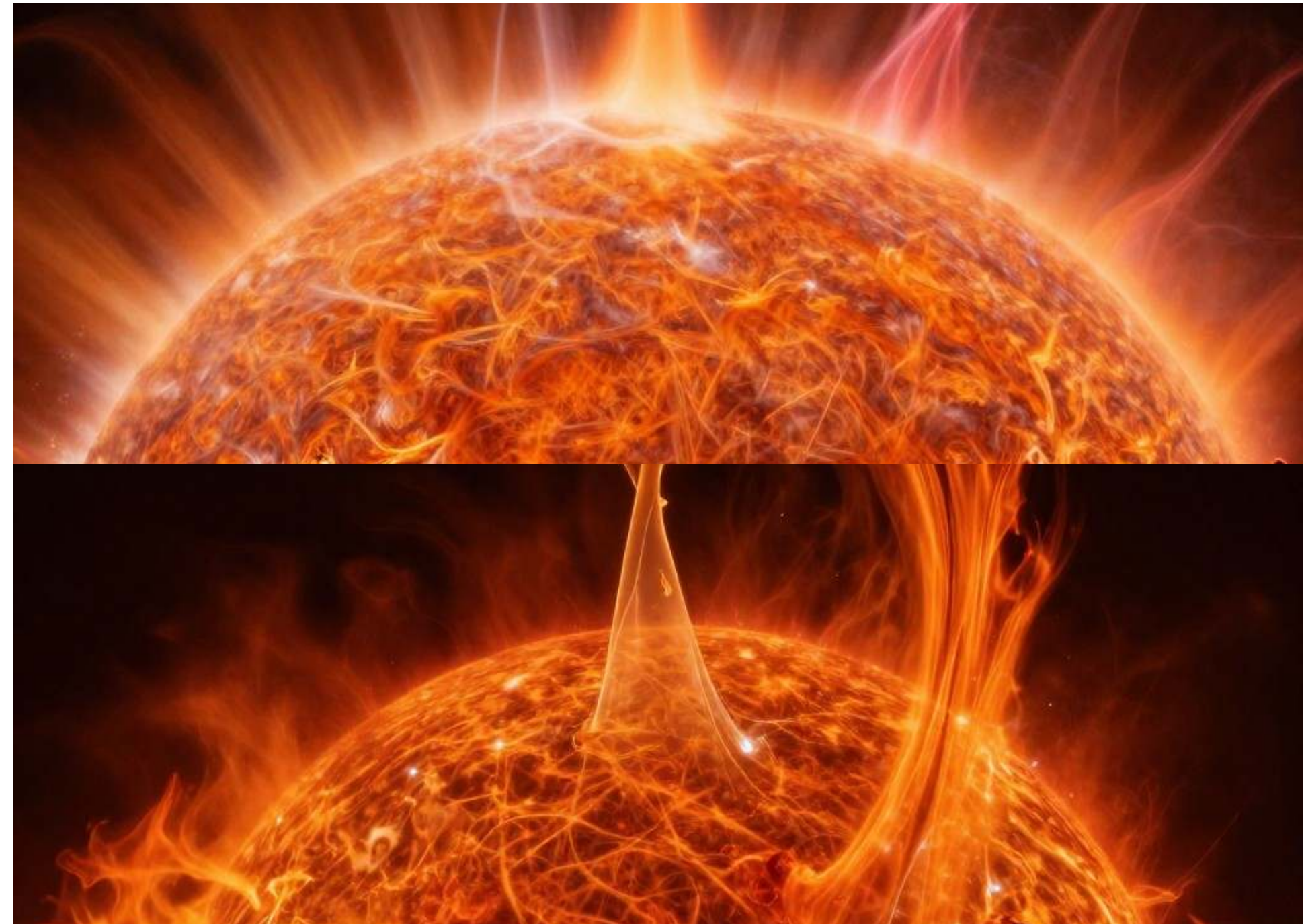
Спикулы и протуберанцы хромосферы: динамика и наблюдения

Спикулы — кратковременные плазменные выбросы

Спикулы представляют собой узкие вертикальные струи плазмы высотой до 10 000 км, существующие несколько минут. Они активно участвуют в переносе энергии и массы в верхние слои солнечной атмосферы.

Протуберанцы — крупные устойчивые структуры

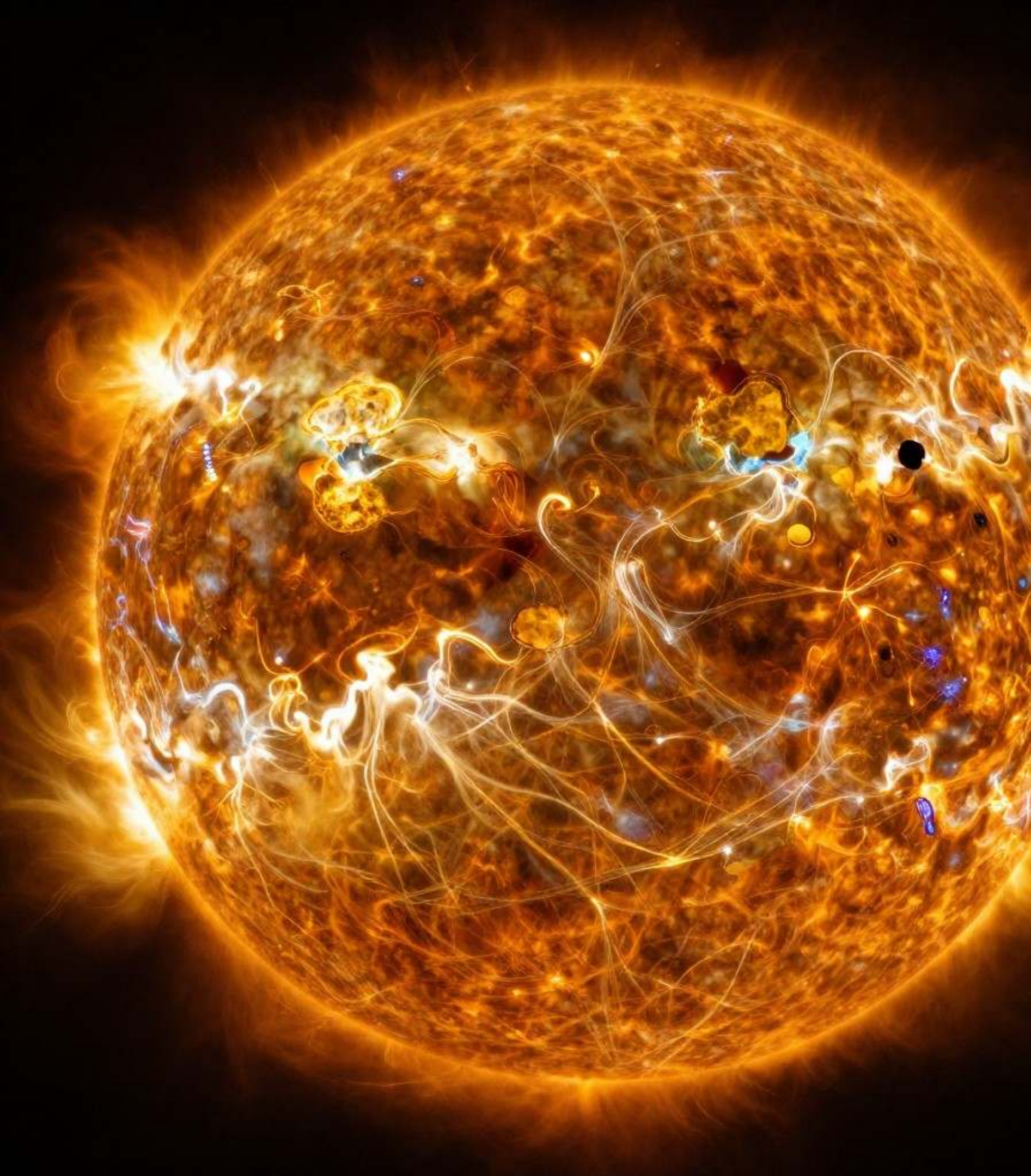
Протуберанцы — широкие дуговые образования, наблюдаемые при затмениях и с фильтрами. Они состоят из горячей, магнитно связанной плазмы и могут сохраняться часы и дни, являясь достоверными индикаторами солнечной активности.



Корона, простирающаяся на миллионы километров, состоит из разреженной ионизированной плазмы, видимой только при затмениях или специальной аппаратурой.

1–2 млн
°C

Температура короны
достигает миллионов
градусов, многократно
превышая температуру
фотосферы.



Строение короны и корональные дыры

Неоднородная структура короны

Корона обладает сложной структурой с плотными зонами, образующими петли и ветви из горячей плазмы. Эти области связаны с магнитными полями и активно меняются под воздействием солнечной активности.

Корональные дыры и их значение

Корональные дыры — области с пониженной плотностью плазмы, где магнитное поле открыто; они служат основными источниками быстрого солнечного ветра, оказывающего влияние на межпланетное пространство.

Причины высокой температуры короны

1960-е: Теории волнового нагрева

Предложены объяснения высокого нагрева короны за счёт акустических и магнитогидродинамических волн, переносимых из нижних слоёв и рассеивающихся в короне.

1980-е: Магнитные рекомбинации

Выдвинута гипотеза, что внезапные изменения магнитного поля высвобождают энергию, нагревая корону до миллионов градусов.

2020: Миссия Parker Solar Probe

Запущенный зонд собирает данные о плазме и магнитных полях для выявления механизмов передачи энергии вблизи Солнца.

2021: Solar Orbiter

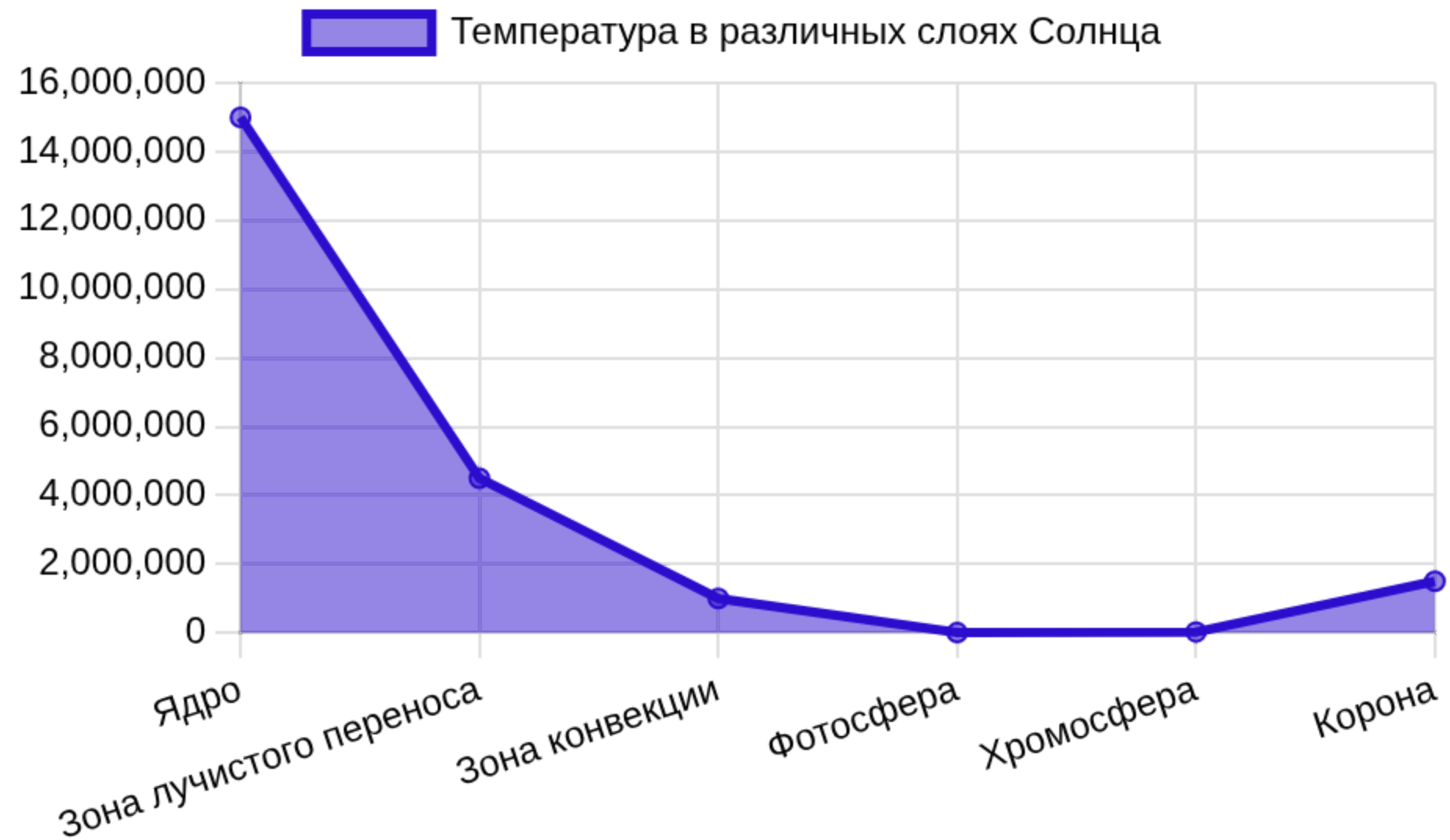
Исследует мельчайшие структуры короны и связывает наблюдения с процессами нагрева и формирования солнечного ветра.

Путь передачи энергии в солнечных оболочках

Источник: современные модели солнечной физики



Изменение температуры от центра к короне



Наблюдается резкое повышение температуры начиная с верхних слоёв хромосферы и достигающее максимума в короне. Это противоречит интуитивному ожиданию охлаждения наружных слоёв.

Данные подтверждают экстремальный нагрев внешней атмосферы Солнца, указывая на сложные процессы передачи и высвобождения энергии вне ядра.

Солнце как источник ультрафиолетового и рентгеновского излучения

Ультрафиолетовое излучение короны и хромосферы

Корона и хромосфера испускают интенсивное ультрафиолетовое излучение, фиксируемое телескопами на орбите Земли. Оно раскрывает детали динамики плазмы и магнитных структур.

Рентгеновское излучение и его применение

Рентгеновские лучи, также испускаемые солнечной атмосферой, используются для изучения вспышек и процессов нагрева. Эти данные важны для прогнозирования солнечной активности.



Влияние солнечных оболочек на формирование солнечного ветра

- Солнечный ветер — поток заряженных частиц, исходящий из короны, где высокие температуры и магнитные поля ускоряют плазму до скоростей 400–800 км/с.
- Этот поток достигает Земли за 2–4 суток, взаимодействуя с магнитосферой и вызывая геомагнитные явления, влияющие на технологии и природные процессы.



Влияние солнечной активности на Землю

Солнечные вспышки высвобождают огромные количества энергии, вызывая радиационные помехи и поднимая уровень космической радиации.

Выбросы корональной массы (СМЕ) приводят к магнитным бурям, способным нарушать работу спутников, навигации и электросетей.

Активность Солнца создаёт полярные сияния, являющиеся видимым следствием взаимодействия солнечных частиц с атмосферой Земли.

Современные методы наблюдения солнечных оболочек

Космический зонд SOHO

SOHO обеспечивает непрерывные наблюдения солнечной короны и солнечного ветра с 1995 года, выявляя динамические процессы и структуру внешних слоёв Солнца.

Телескопы с адаптивной оптикой

Земные обсерватории оснащены адаптивными системами, позволяющими компенсировать атмосферные искажения для подробного изучения фотосферы и хромосферы.

Миссии Parker Solar Probe и Solar Orbiter

Эти зонды приближаются к Солнцу ближе, чем когда-либо, собирая данные о магнитных полях, плазме и температуре для улучшения понимания корональных процессов.



Будущие перспективы исследований солнечных оболочек

2024–2026: Расширение спектральных наблюдений

Планируется запуск инструментов, фиксирующих излучение в экстремальных диапазонах, чтобы раскрыть новые аспекты динамики и структуры короны.

2027–2030: Прямое зондирование плазмы

Развитие технологий позволит получать прямые измерения параметров солнечного ветра и магнитных полей вблизи Солнца.

2031 и далее: Новые космические миссии

Создание специализированных аппаратов для изучения механизмов нагрева короны и влияния солнечной активности на Землю с целью улучшения прогнозирования.



Итоги и значение изучения солнечных оболочек

Понимание структуры и процессов в солнечных оболочках раскрывает природу активности Солнца и её воздействие на земную среду. Это способствует развитию науки и технологий для защиты цивилизации.