

СОНЦЕ – НАША РІДНА ЗОРЯ

Протягом усієї історії розвитку людської цивілізації в багатьох культурах Сонце було об'єктом поклоніння. Його обожнювали, про нього складали гімни, на його честь проводили свята. Потужний культ Сонця існував у Давньому Єгипті, де сонячними божевами були **Ра** (Сонце) та **Амон** (сонячний диск). Згідно з грецькою міфологією, бог Сонця Геліос щодня проїжджав небом на своїй колісниці. У слов'ян теж було два сонячних божества – **Хорс** (власне Сонце) і **Дажбог** (сонячне світло).

Деякі фізичні характеристики Сонця

Сонце – джерело енергії, життєдайна сила, центральне тіло Сонячної системи. Як і всі масивні небесні тіла, наша зоря має майже ідеальну сферичну форму і складається в основному з гарячого іонізованого газу, „переплетеного” магнітними полями складної конфігурації. „Коктейль” з атомів іонізованого газу та зовнішніх електронів, які вони втратили, разом з магнітними полями називають плазмою. **Плазма** – четвертий агрегатний стан речовини (разом з твердим, рідким та газоподібним).

Діаметр Сонця майже 1,4 млн км (у 109 разів більший, ніж земний); маса приблизно $2 \cdot 10^{30}$ кг (у 333 тис. разів більша, ніж маса Землі, та у 750 разів більша маси всіх планет Сонячної системи разом). Маса Сонця становить майже 99,866 % від загальної маси всіх тіл Сонячної системи. Відстань від Землі до Сонця приблизно 149,6 млн км, а видимий кутовий діаметр Сонця (так само, як і Місяця) трохи більший, ніж півградуса. Завдяки такому збігові на Землі можна побачити і повні, і кільцеподібні сонячні затемнення.

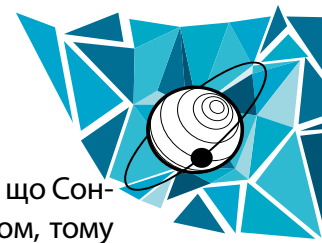
Сонце перебуває на відстані приблизно 26 тис. світлових років від центру нашої Галактики (Молочного Шляху) й обертається навколо неї з періодом приблизно 235 млн років (галактичний рік). У нашій Галактиці налічується понад 300 млрд зір, 85 % яких менші, ніж Сонце (здебільшого – червоні карлики). Орбітальна швидкість Сонця відносно центру Галактики дорівнює 217 км/с. Наразі Сонце перебуває у внутрішньому краї спірального рукава¹ Оріона нашої Галактики, між рукавом Персея і рукавом Стрільця, у так званій Місцевій міжзоряній хмарі. Ця ділянка підвищеної щільності розташована у Місцевому міхурі – зоні розрідженого високотемпературного міжзоряного газу. Є припущення, що проходження Сонця крізь спіральні рукави, де спостерігається підвищена концентрація зір, метеороїдів та космічного міжзоряного пилу і газу, збігаються з масовими вимираннями живих істот на Землі. Можливо, через зіткнення з космічними тілами, що розташовані в галактичних рукавах.

Час існування Сонця в статусі зорі (при сучасних, приблизно стабільних характеристиках випромінювання) за аналізом комп'ютерних моделей зоряної еволюції становить приблизно 4,57 млрд років. Зоря такої маси, як Сонце, перебуває у стабільному стані орієнтовно 10 млрд років. Таким чином, зараз Сонце на середині свого еволюційного шляху і є порівняно молодим (за зорями мірками!) світилом.

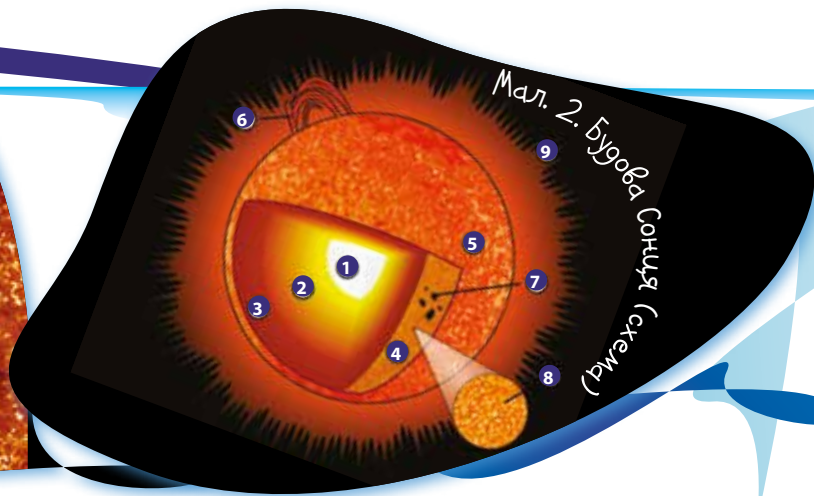
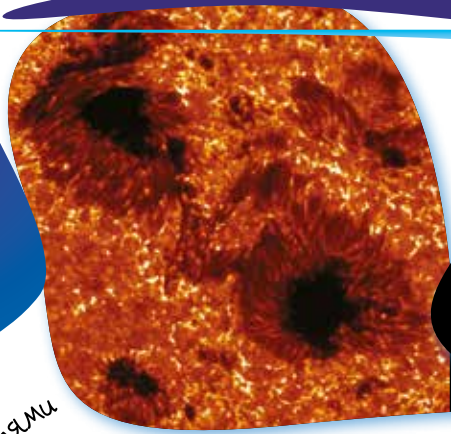
Подальша доля Сонця

Водневе паливо в ядрі Сонця вигорає. Згідно з теоретичними підрахунками, через 4–5 млрд років його зовнішня оболонка почне розширюватися, а ядро – стискатися й нагріватися. Сонце перетвориться на червоного гіганта – велику за розмірами та доволі прохолоду на поверхні (знову ж таки за зорями мірками) зорю.

¹Галактичний рукав – структурний елемент спіральної галактики. У рукавах є значна частина пилу та газу, молодих зір, а також багато зоряних скупчень.



Мал. 1. Сонячні плями



Десь через 7,8 млрд років температура в ядрі досягне приблизно 100 млн градусів (зараз – понад 14 млн градусів), і в його надрах почнеться термоядерна реакція синтезу вуглецю з гелію. Астрофізики передбачають, що на той час втрата Сонцем маси на випромінювання призведе до того, що Земля перейде на більш віддалену від Сонця орбіту і, можливо, не буде поглинута зовнішніми шарами сонячної атмосфери. Але вся вода на Землі за таких умов перейде в газоподібний стан, а більша частина її атмосфери розсіється в космічному просторі. Процес вигорання Гелію та утворення Карбону супроводжується термічними пульсаціями². Тому після фази червоного гіганта наша зоря скине зовнішню оболонку, яка перетвориться на планетарну туманність³. У центрі цієї туманності буде дуже гарячий залишок Сонця – білий карлик, вуглецево-гелієве ядро, яке протягом мільярдів років згасатиме і врешті перетвориться на чорного карлика.

Будова Сонця

Сонце складається з Гідрогену (~ 73 % від загальної маси і ~ 92 % від загального об'єму), Гелію (~ 25 % від маси і ~ 7 % від об'єму), Феруму, Нікелю, Оксигену, Азоту, Силіцію, Сірки, Магнію, Карбону, Неону, Кальцію, Хрому (менше 2 % від загальної маси). Середня густина Сонця становить 1400 кг/м³. Це значення близьке до густини води та в 1000 разів більше густини повітря поблизу поверхні Землі. У зовнішніх шарах Сонця густина в мільйони разів менша, а в центрі – у 100 раз більша, ніж середня.

Спостерігаючи в телескоп за сонячними плямами (мал. 1), великий італійський учений Галілео Галілей помітив, що вони пересува-

ються вздовж видимого диску Сонця. Він зробив висновок, що Сонце обертається навколо своєї осі. Сонце не є твердим тілом, тому період його обертання різний на різних широтах (таке обертання називають диференціальним, а сонячні широти – геліографічними): що далі від екватора, то повільніше обертання. Деталі сонячної поверхні на екваторі здійснюють повний оберт за 25 днів, а поблизу полюсів зоряний період обертання Сонця збільшується до 30 днів.

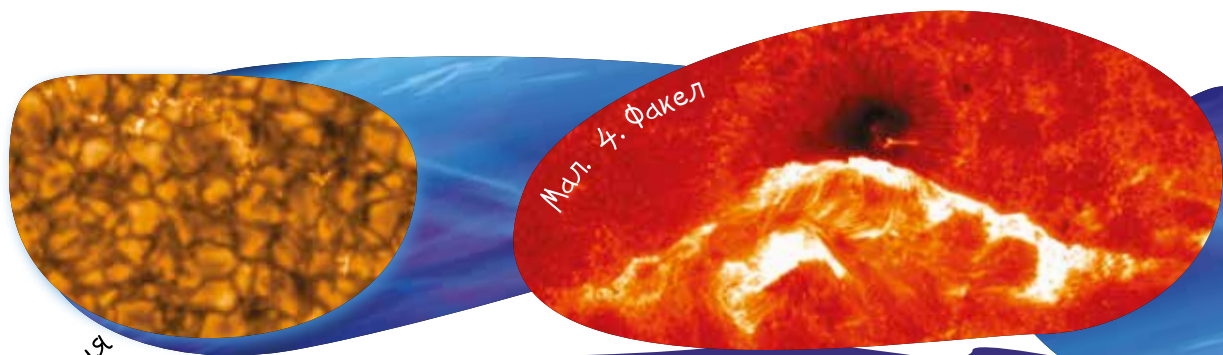
За температурою, тиском та характером процесів Сонце можна умовно поділити на декілька частин (мал. 2). Внутрішня, центральна частина називається ядром. Ядро Сонця (позначене цифрою 1 на мал. 2) має радіус приблизно 150–175 тис. км. Густина речовини ядра становить приблизно 150 000 кг/м³, а температура в центрі ядра, як вже зазначалось, – понад 14 млн градусів. За таких великих тисків і температур в ядрі розпочинаються термоядерні реакції синтезу гелію з водню, вивільняється величезна кількість енергії. Ці реакції є джерелом енергії Сонця на сучасному етапі його еволюції. Внаслідок цього кількість гелію в центральній частині Сонця поступово збільшується, а водню – зменшується. Щосекунди в надрах Сонця приблизно 4 млн тонн речовини перетворюється на енергію випромінювання. Потік енергії з центральних областей Сонця поступово „просочується” в зовнішні шари й розподіляється на дедалі більший об'єм, тому температура сонячної плазми зменшується з віддаленням від центра.

Над ядром на відстанях від 1/3 до 2/3 радіуса Сонця розташована промениста зона (позначена цифрою 2 на мал. 2), в якій енергія передається назовні внаслідок послідовних актів поглинання і випромінювання квантів електромагнітної енергії – фотонів. Взаємодіючи з іонами плазми, фотони, що утворилися в ядрі, фантастично заплутаними та звивистими шляхами можуть мільйони років пробиратися до видимої поверхні Сонця. Але в середньому цей процес триває 170 тис. років.

Над променистою зоною розташована конвективна зона (позначена цифрою 3 на мал. 2), яка простягається майже до видимої поверхні Сонця. У цій зоні температура швидко зменшується з наближенням до видимої поверхні, концентрація нейтральних атомів зростає, а речовина стає прозорішою для фотонів. Водночас густина речовини вже недостатньо велика для повного перенесення енергії випромінюванням. У дію вступає інший механізм

²Коливання речовини (нестійкості) зумовлені тепловими ефектами.

³Планетарна туманність – астрономічний об'єкт, що складається з іонізованої газової оболонки й центральної зорі – гарячого білого карлика, що збуджує світіння туманності.



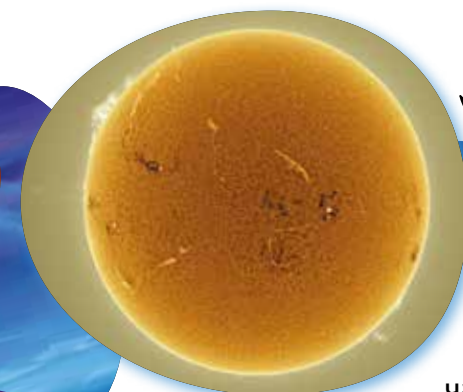
Мал. 4. Факел

передачі енергії назовні – конвекція. Конвективні рухи плазми супроводжуються її вихровим перемішуванням. Плазма піднімається вгору, охолоджується на поверхні Сонця, її густина збільшується, і вона „тоне”, занурюючись вглиб конвективної зони, знову нагрівається і піднімається вгору. На поверхні температура плазми спадає в середньому до 6 000 °С.

Вище конвективної зони розташована сонячна атмосфера, яка сягає далеко за межі видимого диска Сонця. Найглибший шар атмосфери, товщиною 200–300 км називається фотосферою (позначена цифрою 4 на мал. 2). З поверхні фотосфери випромінюється майже вся енергія видимої області спектру. Фотосфера утворює видиму поверхню Сонця і визначає його розміри. Із наближенням до зовнішнього краю фотосфери температура зменшується від 6 900 °С до 4 700 °С. Через зниження температури від центра Сонця до його поверхні сонячний диск на краю здається темнішим.

Висхідні потоки плазми в конвекційній зоні на поверхні Сонця завершуються гранулами (мал. 3; позначені цифрою 8 на мал. 2), які мають розмір приблизно 1 000 × 1 000 км. Гранули розмежовані вузькими темними проміжками з меншою температурою. Швидкість конвекційних потоків становить в середньому 1–2 км/с, а час життя гранули приблизно 10–15 хвилин. За цей час залишки іонізованого газу встигають обійти гранулу по периметру. Рухи цих заряджених частинок породжують магнітне поле Сонця, що має складну структуру. Такий механізм утворення магнітного поля називають гідромагнітним конвективним динамо. Цим же механізмом пояснюється 22-річна циклічність сонячного магнітного поля (двічі за цей час магнітні полюси Сонця змінюють своє положення на діаметрально протилежне).

Магнітні силові лінії разом з плазмою підіймаються у фотосферу, утворюють зони підвищеного тиску і гальмують конвективний підйом нових порцій речовини з надр Сонця. Тому температура в таких зонах поступово падає і утворюється об'єкт, який називають



Мал. 5. Хромосфера

сонячною плямою. Пляма здається чорною (мал. 1; позначена цифрою 7 на мал. 2), адже її температура на 2000 градусів нижча, ніж середнє значення температури фотосфери. Сонячна пляма розташована дещо нижче умовної поверхні Сонця, адже магнітні силові лінії чинять неабиякий тиск на плазму, продавлюючи її. Найбільшу групу сонячних плям за всю історію спостережень зафіксували у квітні 1947 року у південній півкулі Сонця. Її максимальна довжина становила 300 тис. км, а ширина – 145 тис. км. Плями було добре видно неозброєним оком у вечірні та вранішні години при заході та сході Сонця. Загальна площа плям у цей час приблизно в 36 разів перевищувала площу поверхні Землі.

У фотосфері спостерігають яскраві поля навколо сонячних плям – факели (мал. 4). Вони яскравіші, ніж фон, бо мають більшу температуру. Зазвичай факели розташовані поблизу областей із сильними магнітними полями.

Вище фотосфери температура й відповідно іонізація знову зростають. Інтенсивне нагрівання цього шару пояснюють ефектом магнітного роз'єднання та нового зчеплення силових ліній під впливом ударних хвиль, які утворюються в плазмі при зіткненні двох протилежно напрямлених струменів у конвекційних потоках, а також при перетворенні кінетичної енергії ударних хвиль у внутрішню. Частина сонячної атмосфери, в якій підвищується температура й послідовно іонізуються Гідроген, Гелій та інші елементи, називається хромосферою (позначена цифрою 5 на мал. 2). Її температура становить десятки й сотні тисяч градусів. Під час повних сонячних затемнень можна спостерігати хромосферу (через спеціальні сонцезахисні прилади!) у вигляді блискучої блакитної або рожево-білої облямівки навколо темного диска Місяця (мал. 7). У хромосфері часто спостерігають утворення, як от флокули, спікули та волокна (мал. 5). Флокули (або хромосферні факели) – волокнисті утворення в хромосфері Сонця. Флокули мають високу яскравість, густину та концентрацію і є продовженням фотосферних факелів у хромосфері. Хромосферні волокна – темні витягнуті структури конденсованої густішої і холоднішої, ніж навколишня речовина,

Мал. 6. Протуберанець

Мал. 7. Сонячна корона

Мал. 9. КА SOHO

Мал. 10. Сонце в X та U γ



плазми. Волокна піднімають вгору над сонячною поверхнею петлі силових ліній магнітного поля. Спікули – основні елементи тонкої структури хромосфери Сонця. Вони зазвичай спостерігаються як досить тонкі в масштабах Сонця (діаметром від 500 до 1 200 км) стовпчики плазми, що яскраво світяться. Спікули викидаються магнітним полем з нижньої хромосфери зі швидкістю приблизно 20 км/с на 5–10 тис. км вгору. Час життя спікул 5–10 хвилин.

Вище хромосфери температура сонячних газів становить $(1-2) \cdot 10^6$ °C і далі майже не змінюється. Тут розпочинається розріджена й гаряча оболонка – сонячна корона. Сонячну корону (надзвичайно гарне видовище!) можна побачити під час повної фази затемнення Сонця (мал. 7). Корона змінюється залежно від фази циклу сонячної активності: у періоди максимальної активності вона має округлу форму, а в мінімумі – витягнута вздовж сонячного екватора.

У короні на краю сонячного диска доволі часто з'являються протуберанці – світлі утворення з розжарених газів у вигляді яскравих виступів різноманітної форми (мал. 6; позначені цифрою 6 на мал. 2). На фоні сонячного диска протуберанець, який має нижчу температуру плазми, здається темнішим. „Випаровуючись” у міжпланетний простір, гази сонячної корони утворюють потік гарячої розрідженої плазми – сонячний вітер.

Сонячна активність

Явища, викликані генерацією потужних магнітних полів на Сонці та їх динамікою, називають сонячною активністю. Із сонячною активністю пов'язані також зміни геомагнітної активності (зокрема, магнітні бурі та полярні сяйва), які є наслідком збурень міжпланетного середовища, що досягають Землі.

Загальний рівень сонячної активності змінюється з характерним квазіперіодом (циклом), приблизно рівним 11 років. У XX столітті цикл сонячної активності був ближчим до 10 років, а за останні 300 років змінювався від 9 до 13,7 років. Астрономи надають циклам сонячної активності послідовні номери, починаючи від

умовно обраного першого циклу, початок якого датується березнем 1755 року. У 2009 році почався 24-й цикл сонячної активності. Існують також варіації сонячної активності більшої тривалості, фізична природа яких досі невідома. З 1645 по 1715 роки сонячна активність була значно меншою (так званий мінімум Маундера). У цю епоху в Європі спостерігалось суттєве зниження середньорічних температур (малий льодовиковий період).

Позаатмосферні дослідження Сонця

Астрономи регулярно спостерігають та вивчають процеси на Сонці в наземних обсерваторіях. Зважаючи на те, що атмосфера Землі поглинає електромагнітне випромінювання в багатьох діапазонах, найбільш детальну та цінну інформацію про природу та активність нашої найближчої зорі отримують за допомогою орбітальних телескопів та космічних апаратів (КА).

Перші позаатмосферні спостереження Сонця були проведені другим штучним супутником Землі „Супутник-2” у 1957 році. В 1959 році КА „Луна-1” і „Луна-2” виявили сонячний вітер. Перші спеціалізовані космічні апарати для вивчення Сонця і сонячного вітру серії „Піонер” з номерами 5–9 були створені NASA і запуснені у 1960–1968 роках.

У жовтні 2006 року розпочалася місія Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) (мал. 8). Щоб отримати стереозображення Сонця і вивчати в 3D-форматі корональні викиди на ньому, два однакові апарати запустили на орбіту Землі навколо Сонця: один у напрямку руху планет, інший – в протилежному. Японський супутник Hinode, запуснений у 2006 році, вивчає динаміку магнітних полів Сонця, варіацію його світності, характеристики сонячного вітру. Аналіз даних, здійснений місією КА SOHO (мал. 9), довів, що швидкість обертання ядра Сонця навколо своєї осі значно вища, ніж на поверхні. Космічний апарат SOHO також провів „фотосесію” Сонця в ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах (мал. 10). Дослідження нашої рідної зорі Сонце тривають.

Мал. 8. КА STEREO

