

Методи дослідження планет

1. Визначення мас і діаметрів планет

При вивченні планет, з фізичної точки зору, перш за все необхідно знати їх розміри і масу. Знаючи те і інше, можна знайти і середню густину планети.

Визначення мас планет, що мають супутники, проводиться на основі третього закону Кеплера в його точній формі.

Якщо M_{\square} – маса Сонця, m_1 і m_2 маси планети і супутника, P_1 і P_2 – періоди обертання планети навколо Сонця і супутника навколо планети, a_1 і a_2 – великі півосі їх орбіт, то третій закон Кеплера можна записати в формі:

$$\frac{P_1^2(M_{\square} + m_1)}{P_2^2(m_1 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

оскільки маси планет значно менші маси Сонця, а маси супутників, як правило, значно менші мас планет, то ми можемо знехтувати малими величинами і записати.

$$\frac{m_1}{M_{\square}} = \frac{P_1^2 a_2^3}{P_2^2 a_1^3}.$$

Знаючи масу Землі, ми можемо знайти масу Сонця, а потім і тих планет, у яких є супутники.

Визначення мас планет, які не мають супутників, а також самих супутників і астероїдів, є складнішою задачею.

Зокрема, маси Меркурія і Венери були з самого початку визначені за тими збуреннями, які вони викликають у русі інших планет.

Одним із методів визначення маси планет є аналіз траєкторії космічного апарата при прольоті поблизу них.

Щодо маси Землі, то її можна знайти за формулою для прискорення вільного падіння:

$$g = G \frac{M_{\oplus}}{R^2} \Rightarrow M_{\oplus} = \frac{gR^2}{G},$$

де G – гравітаційна стала. Згідно з цими розрахунками $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{27}$ г.

Лінійний діаметр планети визначають, знаючи відстань до неї та вимірявши її кутовий діаметр:

$$D_{nl} = \Delta \sin \alpha \approx \Delta d'' \sin 1'' \approx \frac{\Delta d''}{206265},$$

де Δ – відстань планети до Землі;

d'' – її кутовий діаметр виражений в секундах дуги;

D_{nl} – лінійний діаметр; $1'' = \frac{1}{206265}$ [рад].

Оскільки кутові діаметри планет дуже малі, то вимірювання проводять за допомогою окулярного мікрометра, який розміщують у фокальній площині телескопа.

Вимірювання кутових діаметрів планет можна проводити і за фотознімками. Щоб перевести виміряні на фотоплатівці лінійні розміри в кутові одиниці, потрібно знати масштаб знімка. Масштаб зображення в фокальній площині телескопа задається співвідношенням:

$$l = F \operatorname{tg} \alpha \approx F\alpha \text{ [рад]}.$$

Для зображень, отриманих за допомогою ПЗЗ камер (ПЗЗ – прилади із зарядовим зв'язком, *англ.* CCD – charge coupled device), корисно знати величину, обернену до масштабу зображення $\mu = l/l$, яку вимірюють у кутових секундах на один елемент зображення – піксел (*англ.* “pixel” – picture element). Тоді кутовий діаметр зображення планети буде $\alpha = \mu N$, де N – число пікселів, що займає планета.

2. Фотографування планет

Атмосферна турбулентність, яка обмежує роздільну здатність великих телескопів, невеликі розміри планетних зображень і зернистість фотографічної емульсії ставлять обмеження на можливість вивчати планети за фотографіями. Крім того, довгі експозиції додатково призводять до замивання дрібних деталей планети внаслідок впливу атмосфери. Швидке обертання планет-гігантів навколо осі (Юпітер, Сатурн)

також накладає обмеження на тривалість експозиції. При фотографуванні освітленість фокального зображення задається формулою $E(\lambda) = t(\lambda)p(\lambda)B(\lambda)\left(\frac{D}{F}\right)^2$, де $B(\lambda)$ – яскравість даної ділянки диску планети, $t(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання оптики телескопа, $p(\lambda)$ – пропускання атмосфери. Квадрат відношення D/F називають світлосилою об'єктива.

На знімках планет, особливо Юпітера і Сатурна, завжди помітне сильне падіння яскравості до краю диска. Це пояснюється тим, що край диска для зовнішніх планет освітлюється Сонцем косо, під великим кутом, $z_{\odot} \approx 90^\circ$.

Зараз фотоемальсії майже повністю витіснені сучасними напівпровідниковими приймачами зображення – наприклад, матрицями ПЗЗ. Такі прилади мають високу квантову ефективність (до 95%, порівняно з 1 – 2% для фотоемальсій), широкий спектральний діапазон чутливості; дуже зручно, що результатом спостережень є зображення у вигляді цифрового файлу, придатного для обробки на комп'ютері.

Для покращення фотографічних зображень планет (підвищення співвідношення сигнал/шум) використовують метод накладання знімків. Метод полягає в тому, що із серії фотографій планет вибирають декілька найкращих, і ці негативи друкують на один позитив, завдяки чому підвищується контрастність деталей, в той час як випадкові дефекти негативів і ефект зернистості емульсійного шару практично пропадають. Очевидно, що в наші дні подібну процедуру набагато простіше виконати з файлами зображень на комп'ютері.

Крім фотографування планети в видимих променях, отримують знімки в ультрафіолетових і інфрачервоних променях.

Вже перші польоти міжпланетних станцій до планет дозволили отримати зображення планет та їх супутників з невеликої відстані, без обмежень земної атмосфери, з практично необмеженою роздільною здатністю.

3. Фотометрія

Слово фотометрія означає вимірювання світла. За допомогою фотометричного методу вимірюємо інтенсивність світла, що надходить до нас від небесних тіл взагалі і від планет зокрема. Так, в області вивчення планет фотометричний метод дозволяє розв'язати наступні задачі.

- 1) Вимірювання блиску планети (тобто тієї освітленості, яку світло планети створює в точці спостереження). Результат виражають у вигляді видимої зоряної величини m , яка пов'язана з освітленістю E рівністю $m = m_0 - 2.5 \lg E$.
- 2) Визначення сферичного альbedo – величини, що виражає середню відбивну здатність оберненої до Землі півкулі планети.
- 3) Оцінка ймовірних розмірів супутників планет і астероїдів за їх блиском і прийнятим значенням альbedo, коли об'єкт спостережень має кутові розміри, менші за роздільну здатність інструмента.
- 4) Дослідження обертання малих планет за періодичними коливаннями їх блиску.

Припустимо, що планета знаходиться на відстані r від Сонця і на відстані Δ від Землі, і ми бачимо повний диск планети (тобто її фаза = 1, а кут фази $\alpha = 0$), тоді освітленість планети буде

$$J_0 = \Gamma \frac{\pi D^2}{4} \frac{J_{\square}}{r^2},$$

де Γ – коефіцієнт пропорційності, що виражає відбивну властивість планети, $\frac{\pi D^2}{4}$ – поперечний переріз планети.

Освітленість від планети в точці спостереження буде

$$E_0 = \frac{J_0}{\Delta^2} = \Gamma \frac{\pi D^2}{4} \frac{J_{\square}}{r^2 \Delta^2};$$

якщо $\alpha \neq 0$, то освітленість буде залежати і від фази: $E = E_0 f(\alpha)$

Мірою відбиваючої здатності планети є сферичне альbedo A (відношення кількості світла розсіяного планетою в усіх напрямках до кількості падаючого світла за одиницю часу). Із коефіцієнтом пропорційності Γ вона пов'язана співвідношенням:

$$A = \pi \Gamma q = pq,$$

Множник p в цій формулі визначається відбивними властивостями планети і називається геометричним альбедо, тоді як множник q залежить лише від вигляду функції фази $f(\alpha)$ і називається фазовим інтегралом. Спостерігати при всіх значеннях кута α з Землі можна лише внутрішні планети. Вже для Марса цей кут не перевищує 47° , а для Юпітера – 11° , тому для зовнішніх планет сферичне альбедо визначають із інших міркувань (супутникові методи).

Знаючи величину E і вважаючи функцію фази відомою, ми можемо знайти E_0 , а, потім знаючи J_0 , r , Δ , можемо записати значення для добутку GD^2 , і, якщо діаметр планети відомий із безпосередніх вимірювань, то ми будемо мати G і альбедо.

І, навпаки, прийнявши певне значення альбедо, можна знайти діаметр планети (використовується для астероїдів, вибираючи значення альбедо з певних міркувань, наприклад, $A = 0.07$, як для Місяця).

4. Спектральний аналіз та поляриметрія

Світло, відбите від поверхні планети і розсіяне її атмосферою, буде мати спектр, відмінний від сонячного.

Для отримання спектра користуються астрономічними спектрографами та спектрометрами. Отримання планетних спектрів пов'язане з певними труднощами:

- 1) УФ частина спектру починаючи з довжини хвилі 290 нм поглинається озоном земної атмосфери;
- 2) ІЧ частину спектра планет важко вивчати через її невисоку інтенсивність, молекулярні смуги поглинання складових земної атмосфери вносять додаткові ускладнення;
- 3) отриманий спектр планети містить лінії різного походження: лінії спектра Сонця, лінії поглинання газів в атмосфері планети (звичайно, якщо вона є) і телуричні лінії, тобто лінії поглинання газами земної атмосфери.

Для виділення планетних ліній використовується багато методів, найпростішим з яких є порівняння спектра планети із спектром Місяця, який отримано в аналогічних умовах (тією ж апаратурою і в той же час). В результаті в спектрах обох тіл будуть лінії: для планети і супутників з атмосферою – сонячні + телуричні + планетні; для Місяця і планет та супутників без атмосфери – сонячні + телуричні. Різниця таких двох спектрів і дасть нам планетні лінії.

Аналіз параметрів ліній (смуг) поглинання дає інформацію про хімічний склад планетних атмосфер, атмосферний тиск, вертикальну структуру атмосфер та так звану обертальну температуру.

Відомо, що при відбиванні та розсіюванні світла змінюється не лише спектр випромінювання, а і його поляризація. Тому вивчення поляризації світла від планет дає багато додаткових можливостей для дослідників. Особливо інформативною може бути спекрополяриметрія. Саме вона є єдиним дистанційним методом визначення дійсної частини показника заломлення та параметрів функції розподілу частинок за розмірами.

5. Радіометричні спостереження

Для вимірювання сумарної радіації всіх довжин хвиль використовуються такі приймачі випромінювання, як болометри. Самі ж методи вимірювання повної радіації (інтеграл по спектру) називають радіометричними. Сучасні болометри – це охолоджувані напівпровідникові детектори, які можуть працювати, базуючись на різних фізичних принципах – від терморезистора до гетеродинних методів. Детектор встановлюється в фокусі дзеркала телескопа. Радіометричні методи дають можливість визначити температури планет, супутників, кілець планет. При цьому необхідно враховувати, що планетна радіація складається з двох частин: сонячного випромінювання, відбитого та розсіяного планетою, і власного випромінювання планети. Виділити із загального випромінювання планети власне можна за рахунок того, що обидві складові припадають на різні ділянки спектра. Щоб їх розділити, необхідно використати світлофільтр, або ж отримати спектр, що охоплює видимий та ІЧ діапазон (методи спектрофотометрії). Наземні ІЧ спостереження дуже спотворюються земною атмосферою, більше інформації можна отримати при спостереженнях з КА, особливо при спостереженні планет з невеликої відстані (штучні супутники планет та міжпланетні станції).

6. Радіоастрономічні методи дослідження

Відомо, що нагріте тіло є джерелом електромагнітних (ЕМ) хвиль. Тіла, що мають високу температуру, випромінюють світло у видимому діапазоні. Більш холодні – здатні випромінювати

інфрачервоне випромінювання та радіохвилі. Точніше, для кожної температури є певний розподіл енергії по спектру, що виражається формулою Планка. Для області інфрачервоних та радіохвиль користуються наближенням Релея-Джинса:

$I \approx x \frac{2kT}{\lambda^2}$, де T – температура, λ – довжина хвилі, k – стала Больцмана, x – коефіцієнт поглинання

тіла. Для абсолютно чорного тіла $x = 1$, для реальних тіл $x < 1$.

В радіоастрономії часто використовують поняття яскравісної температури T_y , тобто температури абсолютно чорного тіла, що має на даній довжині хвилі таку ж інтенсивність випромінювання (яскравість), як і тіло, що досліджується. Із цього визначення випливає, що $T_y = xT$, тобто яскравісна температура планети менша за істинну ($T_y < T_{істинн}$).

Радіовипромінювання планети може бути тепловим і нетепловим (теплове випромінювання виникає в результаті хаотичного теплового руху заряджених частинок).

Нетеплове радіовипромінювання утворюється в результаті електромагнітних процесів: плазмові коливання в атмосфері планети, синхротронне та циклотронне випромінювання при гальмуванні електронів в її магнітному полі.

Для спостережень радіовипромінювання небесних тіл використовують радіотелескопи.

7. Радіолокація планет

За допомогою антени радіотелескопа можна не тільки приймати, але і передавати сигнали. Чим більша площа антени і потужність передавача, тим потужніший сигнал буде надісланий до іншої планети. Сигнал, що дійшов до планети, відіб'ється від неї, і частина відбитого сигналу повернеться назад та може бути прийнята тією ж антеною. Зрозуміло, що прийнятий сигнал буде набагато слабший від надісланого за рахунок того що:

- 1) інтенсивність ЕМ випромінювання послаблюється обернено пропорційно квадрату відстані (це стосується як і падаючого, так і відбитого сигналу);
- 2) планета – не ідеально відбиваюча поверхня, вона характеризується деяким коефіцієнтом відбиття та розсіяння ЕМ випромінювання;
- 3) відбите випромінювання розподіляється по різних напрямках нерівномірно, і тому вводять коефіцієнт направленості $\tilde{g}p$.

Із врахуванням всіх цих особливостей потужність сигналу, що дійшов до нас буде

$P_0 = P_n \frac{\tilde{G}\tilde{A}\tilde{g}p\pi R_{пл}^2}{(4\pi r^2)^2}$, де P_n – потужність передавача, \tilde{A} – ефективна площа антени, $R_{пл}$ – радіус

планети, r – відстань до неї, \tilde{G} – коефіцієнт підсилення передавальної антени, рівний $\tilde{G} = \frac{4\pi\tilde{A}}{\lambda^2}$, де λ

– довжина хвилі, на якій проводиться радіолокація.

Так, в перших радіолокаційних експериментах з локації Венери, при таких параметрах: $R_{пл} = 6050$ км, $r = 100$ млн. км, $\tilde{g}p = 0.1$ (для $\lambda = 12.5$ см), потужність $P_n = 100$ кВт, параболічна антена з діаметром $d = 22$ м, її ефективна площа $\tilde{A} = 380$ м², коефіцієнт підсилення антени $\tilde{G} = 3 \cdot 10^5$, отримаємо $P_0 = 8 \cdot 10^{-26} \cdot P_n \approx 10^{-20}$ Вт. Це дуже мале значення, але нині можна аналізувати сигнали потужністю до 10^{-26} Вт.

Спочатку радіолокація планет (головним чином Венери) використовувалась для уточнення величини астрономічної одиниці. Визначаючи час проходження сигналу від Землі до Венери і назад та точне значення швидкості поширення ЕМ хвиль у вакуумі, можна знайти відстань між планетами в кілометрах. Всі попередні астрономічні вимірювання відстаней не давали змоги безпосередньо визначити відстань, метод паралаксів пов'язаний з вимірюваннями кутів.

Наступною задачею, успішно розв'язаною методами радіолокації, було визначення радіусів планет, зокрема радіуса Венери, поверхня якої закрита від нас густою атмосферою. (Радіус планети визначається з тих же спостережень, що і відстань до неї).

Третьою задачею радіолокації планет було визначення періодів обертання Венери і Меркурія. Період обертання Венери був зовсім невідомим, для Меркурія мали 88 діб, який виявився невірним.

В результаті обертання планети відбитий сигнал виявляється модульованим за частотою внаслідок ефекту Доплера, оскільки край планети, який через обертання наближається до нас, дає зміщення частоти відбитого сигналу в бік більших частот, а той який віддаляється, в сторону менших частот. Ширина смуги розмитого спектра сигналу пропорційна швидкості обертання планети. Аналіз спостережень цим методом за тривалий період дозволяє визначити напрямок обертання і положення осі планети.

Інший метод полягає в тому, що на записі відбитого сигналу з'являються характерні особливості, наприклад невеликі піки, викликані підвищеною відбивною здатністю окремих деталей поверхні планети. Слідкуючи за поступовим зміщенням цих піків, по кривій запису сигналу можна визначити період обертання планети.

8. Дослідження планет космічними апаратами

Використання космічних апаратів розширило можливість дослідження планет. Основними методами наукових досліджень із використанням космічних апаратів є:

1. Пряме фотографування планети з більш чи менш близької відстані чи невеликих частин її поверхні, як з орбіти, так і з самої поверхні планети.
2. Вимірювання тиску і температури атмосфери планети (проводяться при спуску) як за допомогою приладів, які безпосередньо вимірюють ці параметри (манометри, термометри і т.п.), так і за допомогою непрямих методів. Наприклад, параметри атмосфери планети та їх зміна з висотою можуть бути визначені за швидкістю спуску апарата (оскільки аеродинамічні характеристики його відомі).
3. Вимірювання хімічного складу атмосфери за допомогою газоаналізаторів різних типів. Зазвичай кожен газоаналізатор використовують для визначення вмісту якогось певного газу.
4. Вивчення верхніх шарів атмосфери за радіопросвічуванням. Проходячи крізь атмосферу планети радіохвиля зазнає ослаблення внаслідок заломлення та розсіяння. Якщо планета має іоносферу, то в іоносферних шарах може відбуватися, навпаки, фокусування радіопромменя і підсилення сигналу.
5. Спектральні спостереження світіння газів атмосфери в УФ променях, що дозволяють зареєструвати найінтенсивніші, так звані, резонансні спектральні лінії. До них належать лінія водню L_{α} (121.6 нм), триплет кисню з довжиною хвилі 130.2–130.5 нм. Наземні спостереження в УФ діапазоні практично неможливі.
6. Вимірювання вмісту заряджених частинок в атмосфері і навколоземному просторі за допомогою іонних пасток, вимірювання швидкості і потоку заряджених частинок у магнітосфері планети.
7. Прямі вимірювання напруженості магнітного поля планети і вивчення структури її магнітосфери за допомогою чутливих магнітометрів.
8. Різні методи вивчення фізичних властивостей і складу ґрунту планети, що включають в себе визначення елементного складу порід за допомогою рентгенівських та гамма-спектрометрів, визначення діелектричної проникності ґрунту за допомогою бортового радіолокатора, хімічний аналіз проб ґрунту.
9. Вивчення рельєфу Марса за інтенсивністю смуг поглинання головної компоненти його атмосфери – вуглекислого газу.
10. Вивчення гравітаційного поля планети за рухом її штучних супутників чи міжпланетних космічних апаратів на пролітних траєкторіях.
11. Вивчення власного теплового радіовипромінювання планети з близьких відстаней.

Література:

1. Козак Л.В. Основи фізики планет: навчальний посібник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр „Київський університет”, 2007. – 204 с.
2. Бронштэн В.А. Планеты и их наблюдение. – Москва: Наука, 1979. – 240 с.
3. Мороженко О.В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. – Київ: Наукова думка, 2004. – 647 с.
4. Андрієвський С.М., Климишин І.А. Курс загальної астрономії. – Одеса: Астропринт, 2007. – 476 с.

Огляд підготувала к.ф.-м.н. Л.Козак