

# ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА



*Михайло Міщенко*  
доктор фіз.-мат. наук,  
головний науковий співробітник  
Годдардівського інституту  
космічних досліджень НАСА,  
м. Нью-Йорк, США,  
Головна астрономічна  
обсерваторія НАН України, м. Київ



*Віра Розенбуш*  
доктор фіз.-мат. наук,  
провідний науковий співробітник  
Головної астрономічної  
обсерваторії НАН України, м. Київ



*Микола Кисельов*  
доктор фіз.-мат. наук,  
головний науковий співробітник  
Головної астрономічної  
обсерваторії НАН України,  
м. Київ

## НЕВИДИМИЙ, АЛЕ НЕЗАМІННИЙ ПОМІЧНИК ДОСЛІДНИКІВ

**Х**марні й аерозольні частинки відіграють величезну роль у формуванні клімату Землі та інших планет. Мікроскопічні частинки, які складають реголітові поверхні більшості тіл Сонячної системи та атмосфери комет, радикально впливають на перебіг багатьох фізичних і хімічних процесів. Більше того, вони є “живими свідками” історії утворення та еволюції Сонячної системи і можуть багато “розповісти” про події, котрі відбувалися протягом останніх 5 мільярдів років у навколишній частині Всесвіту. Тому детальне й точне знання фізичних і хімічних властивостей таких частинок має першочергове наукове і прикладне значення.

Досить часто безпосереднє збирання частинок та їхній лабораторний аналіз для отримання необхідної інформації неможливі. Тому у більшості випадків доводиться покладатися на теоретичну інтерпретацію дистанційних вимірювань характеристик світла, розсіяного частинками. Важливим є те, що світлорозсіювальні властивості частинок сильно залежать від їхнього розміру, форми, орієнтації та складу. В результаті дистанційне зондування виявляється надзвичайно корисним, а найчастіше й єдиним засобом визначення фізичних характеристик і хімічного складу частинок для геофізичних та астрофізичних досліджень Сонячної системи.

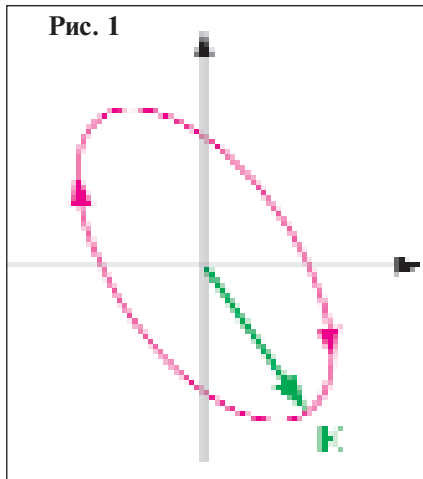
Тривалий час такі дослідження ґрунтувалися на вимірюваннях лише таких характеристик світла як інтенсивність (яскравість) і її залежність від довжини хвилі. Проте з часом прийшло розуміння того, що поляризаційні

характеристики розсіяного світла несуть набагато більше інформації про такі визначальні властивості частинок як розмір, форма і показник заломлення.

### *Явище поляризації світла*

Людське око реагує лише на інтенсивність (яскравість) світла, котре падає на кристалик, і є “поляризаційно сліпим”. Дати наочне визначення поляризації так само важко, як пояснити людині з повною кольоровою сліпотою, що таке колір. Тому нам доведеться скористатися фундаментальним фізичним фактом, що світло є одним із різновидів електромагнітного випромінювання і описується певним просторовим розподілом електричного та магнітного полів. Найпростішим прикладом є лазерний промінь, оскільки його можна розглядати як електромагнітну хвилю, в якій магнітний вектор завжди перпендикулярний до електричного вектора й обидва вектори перпендикулярні до напрямку розповсюдження світла.

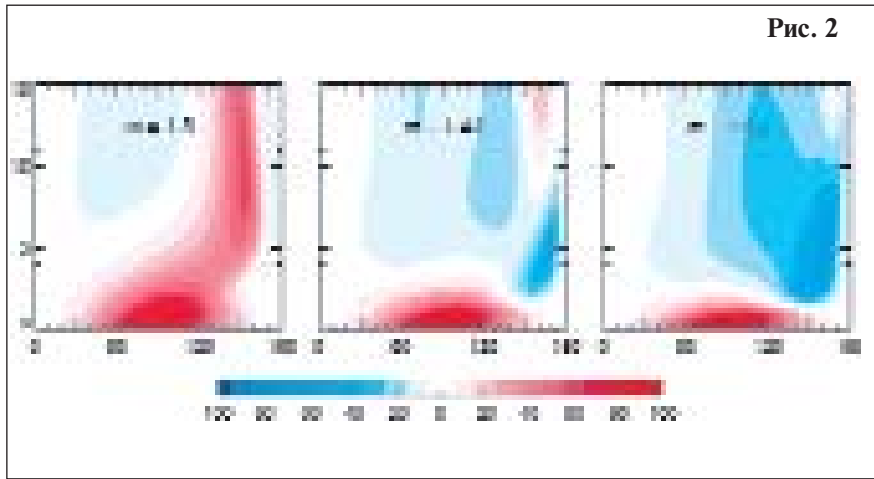
Візьмемо довільну точку в межах такої хвилі. Виявляється, що за кожний проміжок часу  $\lambda/c$  (де  $\lambda$  — довжина хвилі, а  $c$  — швидкість розповсюдження світла) кінець електричного вектора  $E$  повністю описує, в загальному випадку, деякий еліпс. Це показано схематично на рис. 1, припускаючи, що світло розповсюджується в напрямі від читача. Інтенсивність хвилі дорівнює сумі квадратів півосей еліпса. Саме на цю характеристику хвилі і реагує людське око, отримуючи, таким чином, лише малу частину інформації, котра міститься у промені.



Іншими, невидимими оку, проте визначальними характеристиками хвилі є форма (витягнутість) і нахил еліпса, а також напрямок обертання електричного вектора. Тому для максимально повного опису світлової хвилі вчені використовують набір із чотирьох т. зв. параметрів Стокса [1]. Перший із них, позначений  $I$ , є звичайною інтенсивністю. Другий і третій параметри,  $Q$  і  $U$ , описують лінійну полярizaцію хвилі, тобто, різницю між квадратами більшої та меншої півосей і нахил еліпса. Четвертий параметр, позначений  $V$ , описує кругову полярizaцію хвилі: цей параметр додатний, якщо електричний вектор обертається за годинниковою стрілкою (як на рис. 1), і від'ємний, якщо обертання відбувається проти годинникової стрілки.

Звичайні промені світла складаються з багатьох накладених одна на одну електромагнітних хвиль. У більшості випадків фази цих хвиль слабо залежать одна від одної, й параметри Стокса променя отримують складенням параметрів Стокса окремих хвиль. Таким чином, хоча кінець сумарного електричного вектора променя вже не описує фіксований еліпс, результуючі параметри Стокса променя задають деякий "переважний" еліпс з "переважною" лінійною та круговою полярizaцією. Іншими словами, в площині рис. 1 буде мати місце асиметрія в кутовому розподілі електричних векторів і/чи асиметрія в розподілі напрямків обертання електричних векторів. На відміну від лазерного променя звичайне світло (наприклад, сонячне) може бути повністю неполяризоване. У таких випадках параметри Стокса  $Q$ ,  $U$  і  $V$  обертаються в нуль.

Практична користь параметрів Стокса полягає в тому, що їх можна виміряти, навіть незважаючи на те, що більшість технічних детекторів світла, таких як фотопомножувачі і ПЗЗ-мат-



риці, реєструють лише інтенсивність світла, яке на них падає. Справді, існують спеціальні оптичні елементи (поляроїди, призми, фазові пластинки), котрі можна використовувати для зміни інтенсивності вихідного променя так, що вона стане пропорційною одному з параметрів Стокса  $Q$ ,  $U$  чи  $V$  падаючого променя.

### Інформативність полярizaції

Розглянемо тепер, чому полярizaція розсіяного світла містить більше інформації про фізичні властивості частинок, ніж інтенсивність. Припустимо, що неполяризоване світло з довжиною хвилі  $\lambda$  падає на невелику групу сферичних частинок з деяким показником заломлення  $m$  (відповідним певному хімічному складу) та середнім радіусом  $r$ . Частинки розсіюють світло, що падає, в усіх напрямках, причому кут між напрямком падіння і певним напрямком розсіяння називається кутом розсіяння  $\Theta$ . Для визначення властивостей частинок за вимірюваннями розсіяного світла вчені розв'язують так звану обернену задачу, тобто використовують теорію розсіяння світла частинками [2,3] для виявлення моделі частинок, яка забезпечує найкраще узгодження розрахунків з вимірюваннями.

Виявляється, що за винятком дуже малих кутів розсіяння, відповідних напрямку розсіяння прямо вперед, інтенсивність розсіяного світла досить слабо залежить від  $m$  і безрозмірного хвильового параметра частинок  $x = 2\pi r/\lambda$ . В результаті розв'язок оберненої задачі шляхом аналізу вимірюваної інтенсивності часто виявляється проблематичним чи навіть неможливим, оскільки теоретичні розрахунки інтенсивності для широкого набору фізичних параметрів частинок показують однаково добре узгодження з результатами вимірювань. Проте ситуація радикально змінюється, якщо вико-

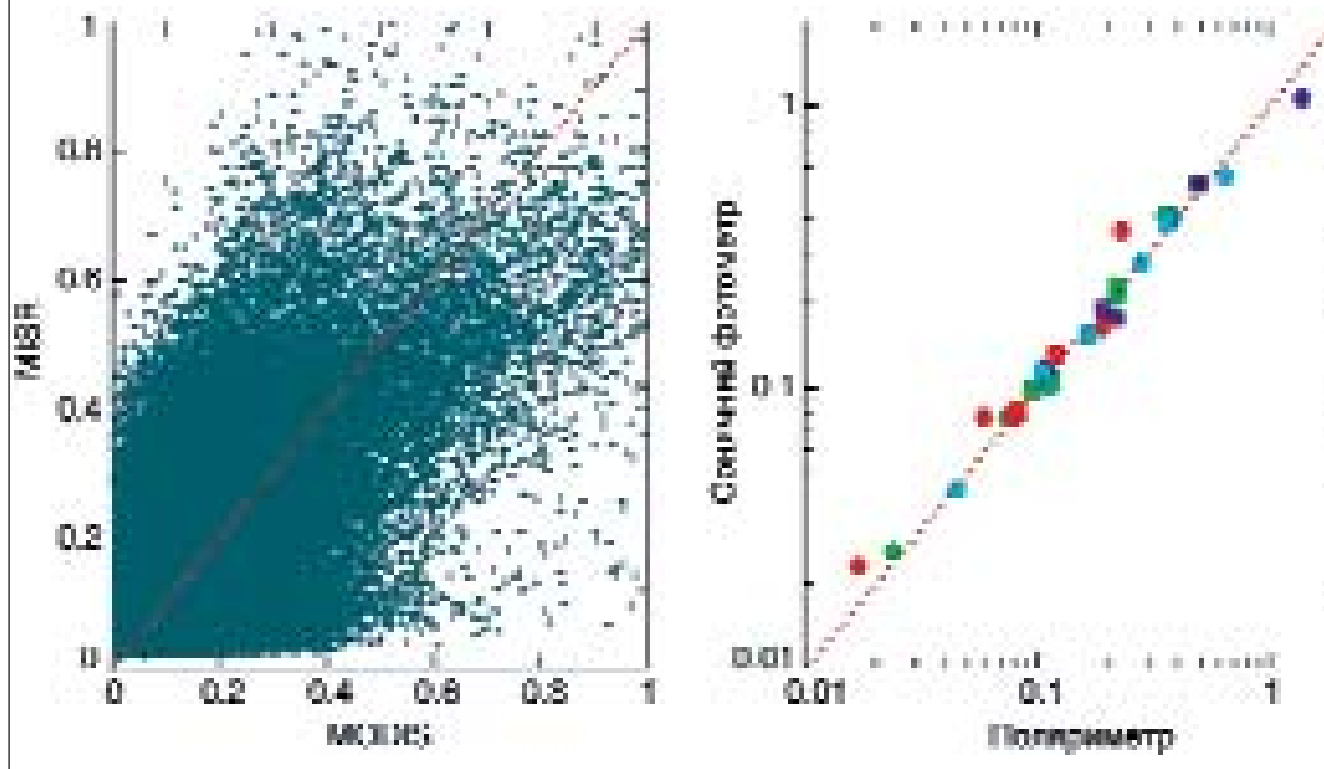
ристовувати полярizaційне відношення  $P = -Q/I$ , яке часто називають *ступенем лінійної полярizaції розсіяного світла*.

На рис. 2 показані теоретичні розрахунки цього відношення в процентах (див. кольорову шкалу в нижній частині рисунка) як функції хвильового параметра частинок  $x$  (вертикальні осі) та кута розсіяння  $\Theta$  (у градусах, горизонтальні осі) для трьох значень показника заломлення  $m$ . Видно, що  $P$  може варіювати у широких межах залежно від  $m$ ,  $\Theta$  і  $x$ , причому може змінюватися не лише абсолютне значення полярizaції, але навіть її знак. У результаті вимірювання полярizaції у широкому діапазоні кутів розсіяння і в досить великому діапазоні довжин хвиль дозволяють однозначно розв'язати обернену задачу і визначити розмір та показник заломлення частинок з надзвичайно високою точністю. В свою чергу, знання  $m$  дозволяє встановити хімічний склад частинок. Наприклад, значення  $m$ , близькі до 1.33, можуть свідчити про наявність водяних крапель, тоді як показники заломлення 1.43 і 1.55 типові для сульфатних аерозолів та мінеральних частинок відповідно.

### Полярizaційні властивості тропосферних аерозолів в атмосфері Землі

Значну перевагу поляриметричних методів дистанційного зондування можна продемонструвати на прикладі такої важливої задачі як визначення властивостей тропосферних аерозолів у атмосфері Землі з орбітальних супутників. Справді, сильний вплив аерозольних та хмарних частинок в атмосфері Землі на погоду, клімат і ступінь забруднення навколишнього середовища широко відомий. Глобальний характер аерозольних ефектів і глобальна взаємозалежність процесів, які контролюють розподіл аерозоль-

Рис. 3



них частинок, роблять необхідним безупинне дистанційне зондування аерозолів з супутників. На сьогодні з цією метою широко використовують два прилади НАСА, названі Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) і Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR).

Однією з найважливіших характеристик аерозолів є його оптична товщина  $\tau$ , оскільки величина  $e^{-\tau/\cos\theta}$  описує ослаблення прямого сонячного випромінювання, яке досягло поверхні, де  $\theta$  — зенітний кут Сонця (кут, під яким сонячне світло падає на атмосферу). Як MODIS, так і MISR вимірюють лише інтенсивність розсіяного сонячного випромінювання. В результаті ці інструменти не дозволяють отримати надійні оцінки розміру та показника заломлення аерозольних частинок, що призводить до значних похибок в оцінці оптичної товщини. Останнє продемонстровано на лівій діаграмі рис. 3 [4], де кожний хрестик порівнює дві оцінки оптичної товщини, отримані з вимірювань MODIS і MISR для однієї й тієї самої площадки на земній поверхні в один і той же момент часу. Тоді як необхідна точність визначення  $\tau$  становить 0.02, рис. 3 наочно показує, що різниця між оцінками оптичної товщини, отриманими за допомогою найсучасніших супутникових фотометрів, часто перевищує 0.5.

Для вирішення цієї проблеми НАСА планує незабаром запустити орбітальний супутник *Glory*, показаний на рис. 4 праворуч, оснащений унікальним інструментом — Aerosol Polarimetry Sensor (APS) [5]. Цей поляриметр показано на рис. 4 ліворуч. Концепція APS ґрунтується як на останніх досягненнях у теорії розсіяння [2,3], так і на новітній технології поляриметричних вимірювань. Хоча APS ще не запущений, існує його робочий макет, який був багаторазово використаний при вимірюваннях з висотних літаків з метою детальної апробації відповідних методик супутникового дистанційного зондування. Отримані результати переконливо продемонстрували виняткові можливості інструментальної концепції APS. Як приклад, права діаграма на рис. 3 показує порівняння оптичних товщин аерозолів, виміряних за допомогою наземних сонячних фотометрів, котрі безпосередньо дають дуже точні значення оптичної товщини  $\tau$ , і відтворених з поляриметричних вимірювань. Вимірювання на довжинах хвиль 410/443, 500, 673 і 865 нм показані синіми, блакитними, зеленими і червоними символами відповідно. Круги відповідають вимірюванням над землею, а квадрати — вимірюванням над океаном. Досягнута точність відтворення оптичної товщини з дистанційних спостережень є безпрецедентною:

у всіх випадках похибка не перевищує 0.015. Більше того, висока точність відтворення залежності  $\tau$  від довжини хвилі вказує на високу точність відтворення розміру аерозольних частинок.

### Поляриметрія небесних тіл

Поляриметрія знайшла широке застосування при вивченні фізичних характеристик безатмосферних космічних тіл (БКТ) — планет, супутників і кілець планет, астероїдів, транснептунових об'єктів. Зокрема, вона допомагає визначити альbedo  $p$ , яке характеризує відбивну здатність реголітової поверхні БКТ. Виявляється, що **чим менше альbedo реголітової поверхні безатмосферних космічних тіл, тим вище відповідний ступінь поляризації**. Оскільки повна інтенсивність світла, відбитого від поверхні, пропорційна альbedo поверхні, то вираз для максимального ступеня лінійної поляризації записується у вигляді:

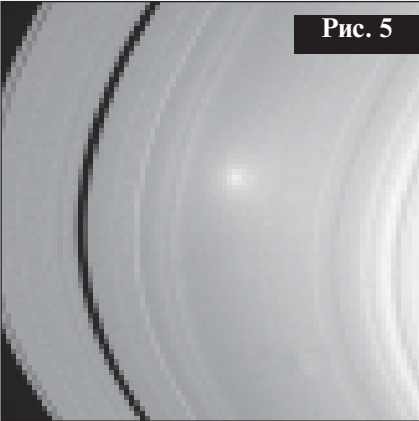
$$P_{\max} = I_p/I = I_p/kp,$$

де  $I_p = (Q^2 + U^2)^{1/2}$  — інтенсивність лінійно поляризованої компоненти випромінювання. Альbedo визначається процесами багаторазового розсіяння світла частинками реголіту, тоді як поляризація переважно визначається першим порядком розсіяння. Саме тому  $I_p$  у першому наближенні є сталою величиною, так що

Рис. 4



Рис. 5



$$dP_{max}/P_{max} = - dp/p$$

або

$$\log p = -\log P_{max} + const.$$

Точніше співвідношення має вигляд:

$$\log p = c_1 \log P_{max} + c_2.$$

Коефіцієнти  $c_1$  і  $c_2$  надійно визначені за лабораторними вимірюваннями земних і місячних зразків, так що спостережуваний ступінь поляризації дозволяє знайти альbedo. До того ж, повний блиск БКТ залежить від відбивної здатності поверхні та її розміру. Таким чином, вимірювання як яскравості, так і поляризації дають можливість оцінити розміри космічного тіла.

### Фотометричний та поляриметричний опозиційні ефекти

Одним із найкрасивіших оптичних явищ у планетній астрофізиці є фотометричний опозиційний ефект (ФОЕ), який спостерігається як різке збільшення яскравості об'єкта зі зменшенням так званого фазового кута (кут між напрямками "об'єкт → Сонце" та "об'єкт → спостерігач") до нуля. Рисунок 5 показує ФОЕ для кільця Сатурна, сфотографований з космічного апарата НАСА Cassini [6]. Фазовий кут дорівнює нулю точно в центрі яскравої плями посередині знімка і збільшується з віддаленням від цієї точки. Малий розмір плями вказує на дуже малу кутову ширину ФОЕ.

Аналогічні за кутовою шириною й амплітудою ФОЕ були знайдені й для інших об'єктів Сонячної системи: галілеєвих супутників Юпітера, супутника Сатурна Япет, головних супутників Урана, високоальбедних астероїдів. Кутова ширина ФОЕ для цих об'єктів настільки мала, що її неможливо пояснити в рамках простих променевих моделей розсіяння світла, які ґрунтуються на геометричній оптиці. Тому було запропоновано інше, інтерференційне пояснення ФОЕ [7, 8], яке ґрунтується на допущенні, що поверхні цих небесних тіл покриті досить товстим шаром найдрібніших реголітових частинок. Сутність цього пояснення показана на рис. 6, де одиничний вектор  $n_c$  позначає напрям падіння сонячного світла, а  $n_{cn}$  — одиничний вектор у напрямі спостерігача.

Розглянемо дві світлові хвилі, котрі прийшли від Сонця і розсіяні вздовж однієї й тієї ж групи з  $n$  частинок реголітової поверхні (позначених їхніми координатами  $r_1, r_2, \dots, r_n$ ), але в протилежних напрямках. В точці спостереження ці дві сполучені хвилі проінтерферують, причому результат буде залежати від відповідної різниці фаз  $2\pi(r_n - r_1)(n_c + n_{cn})/\lambda$ . Залежно від вибору послідовності частинок результат інтерференції буде коливатися від додатного до від'ємного, так що взаємодія пар сполучених хвиль, усереднена за всіма можливими послідовностями частинок, виявиться нейтральною. Проте в напрямі точно назад ( $n_{cn} = -n_c$ ) різниця фаз тотально дорівнює нулю для будь-якої послідовності частинок. В результаті, *інтерференція завжди додатна і обумовлює вузький пік інтенсивності, який призводить до ФОЕ. Цей цікавий ефект отримав назву слабкої локалізації (СЛ) електромагнітних хвиль або когерентного зворотного розсіяння.*

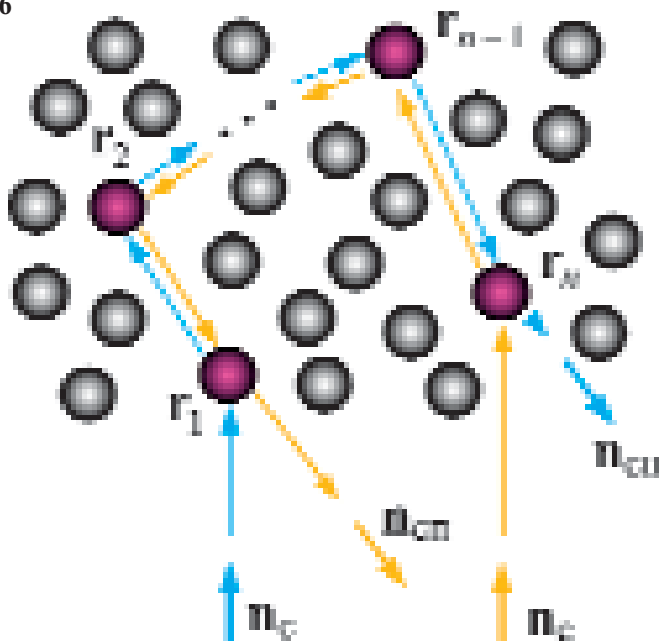
Хоча пояснення аномально вузького ФОЕ в рамках механізму СЛ ви-

глядає дуже привабливим, необхідно було знайти додаткове і незалежне підтвердження інтерференційної природи цього явища. Аналіз строгої теорії СЛ дозволив передбачити, що якщо розмір частинок достатньо малий, а матеріал частинок слабопоглинаючий, то ФОЕ повинен супроводжуватися поляризаційним опозиційним ефектом (ПОЕ) у вигляді дуже вузького локального мінімуму поляризації, розташованого на фазових кутах, близьких до нуля [8]. Важливість цього теоретичного передбачення відразу ж стала зрозумілою для українських астрофізиків, котрі провели цілеспрямовану програму спостережень з метою його перевірки. *Результатом стало відкриття поляризаційного опозиційного ефекту для більшості об'єктів, які показують аномально вузький ФОЕ* [9-11]. Як приклад, на рис. 7 показані результати поляриметрії супутника Юпітера Європи на малих фазових кутах. Добре видно теоретично передбачений вузький мінімум поляризації (пунктирна крива), накладений на значно ширшу гілку від'ємної поляризації, типову для більшості безатмосферних тіл Сонячної системи (суцільна крива). У повній відповідності до теорії мінімум поляризації спостерігається на фазовому куті  $< 1^\circ$ , (менше 1 градуса), близькому до кутової півширини ФОЕ для Європи. Таким чином, відкриття ПОЕ для цілого класу високоальбедних об'єктів дозволило довести, що ефект слабкої локалізації електромагнітних хвиль є визначальним механізмом розсіяння в природному середовищі Сонячної системи.

### Кругова поляризація комет

Вище ми навели приклади використання вимірювань лінійної поляризації розсіяного світла. Зовсім дивними виявилися результати вимірювань *кругової* поляризації випромінювання комет 1P/Галлей, C/1995 O1

Рис. 6



(Хейл-Бопп), C/1999 S4 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), 8P/Туттля, 73P/Швассмана-Вахманна 3 і 9P/Темпеля 1. Була знайдена переважно лівостороння кругова поляризація розсіяного світла.

Про що може свідчити цей неочікуваний факт?

Складні органічні молекули існують у природі у двох формах: L (лівосторонній) і D (правосторонній), котрі ідентичні у всіх відношеннях за винятком того, що вони по-різному “закручені” і виглядають як дзеркальні відбиття одна одної. Іншими словами, ці дві форми співвідносяться між собою як ліва та права рука (рис. 8). Ця властивість називається *кіральністю* (від грецького *χειρ* — рука), а дві форми молекул — оптичними ізомерами. Важливо, що неорганічні системи зазвичай містять рівні кількості L і D ізомерів таких молекул, тоді як усі амінокислоти земних молекул біологічного походження є лівообертальними. Чому біологічні молекули мають властивість переважного напрямку обертання, до цього часу залишається загадкою, хоча ця властивість була відкрита *Пастером* 150 років тому.

Відомо, що метеорити, міжпланетний пил та комети містять у великій кількості складні органічні сполуки. До того ж, в амінокислотах, які містяться у метеоритах Murchison і Murchey, було знайдено надлишок L ізомерів (більше сотні амінокислот виявилися лівосторонніми), що дозволило припустити про його походження з протосонячної туманності [12]. Ця ідея була підтверджена, коли була ви-

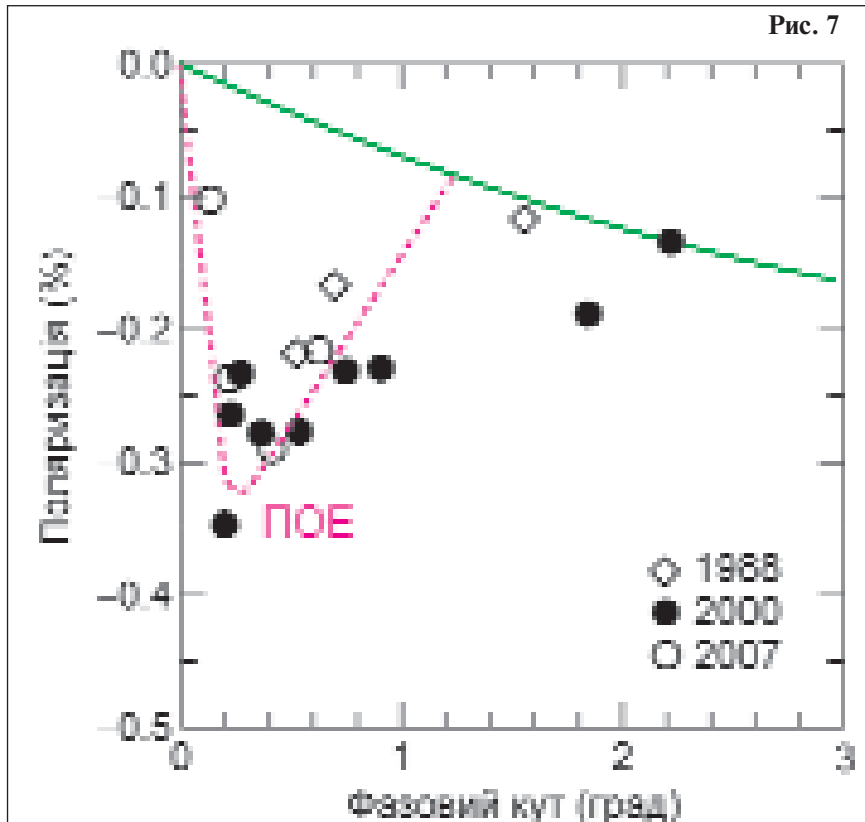
міряна висока кругова поляризація в областях зореутворення [13]. Ці відкриття привели багатьох дослідників до ідеї, що переважна кіральність частинок може бути результатом опромінення космічної органіки у протопланетній туманності ультрафіолетовим циркулярно-поляризованим світлом. *Як вважають деякі автори, а лабораторні експерименти підтверджують, асиметричний фотоліз амінокислот під впливом жорсткого ультрафіолетового опромінення може призводити до*

*надлишку певного типу ізомерів у добіологічних молекулах.* Таким чином, кометний пил, як релікт утворення Сонячної системи, також може містити надлишок L ізомерів в органіці, який і є причиною спостережуваної лівосторонньої поляризації [14]. *Це узгоджується з гіпотезою, що джерелом добіологічної органіки на Землі (а можливо й життя!) були комети. Цілком можливо, що така органіка потрапила на Землю в епоху інтенсивного астероїдно-кометного бомбардування.* З цього погляду виявлення лівосторонньої кругової поляризації випромінювання різних комет у Сонячній системі має велике значення. Про важливість цієї гіпотези свідчить те, що пошук надлишку L ізомерів у кометній органіці є однією з цілей космічної місії Rosetta до комети Чурюмова-Герасименко.

**Важливість поляриметричної діагностики частинок**

Зрозуміло, загальні фізичні закони, що описують розсіяння поляризованого світла, цілком застосовні і до частинок біологічного чи штучного походження, таких як бактерії, клітини і синтетичні порошки. Саме тому не дивно, що методи теоретичного розрахунку одноразового і багаторазового розсіяння поляризованого світла і методи поляриметричної діагностики частинок, розроблені астрофізиками (зокрема авторами цієї статті), знаходять широке застосування в інших

Рис. 7



галузях науки і техніки. У першу чергу варто згадати нанотехнологію, біомедицину, нанобіотехнологію, біофотоніку та хімію колоїдів і суспензій [15,16]. Таким чином, відносно скромні вкладення коштів у вигляді фінансування астрофізичних досліджень принесли і продовжують приносити величезний практичний прибуток у вигляді точних, неруйнівних і ефективних методик діагностики частинок, застосованих у широкому діапазоні фундаментальних і прикладних дисциплін.

Можна було б навести багато інших прикладів успішного практичного використання поляриметрії. Всі вони свідчать, що на сьогодні поляриметрия стала чи не найефективнішим, точним та інформативним видом дистанційного зондування в геофізичних і астрофізичних дослідженнях. При цьому велику і в більшості випадків визначальну роль зіграли теоретичні та прикладні дослідження українських астрофізиків. Результатом їхніх багаторічних зусиль стало створення української наукової школи поляриметричного дистанційного зондування, котра отримала широке міжнародне визнання.

Підсумком комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, що сприяли вирішенню широкого кола фундаментальних та прикладних проблем науки, є наукова праця "Розвиток теоретичних основ, розробка та застосування поляриметричних методів і апаратури для дистанційного зондування об'єктів Сонячної системи наземними та аерокосмічними засобами", що висунута Харківським націо-

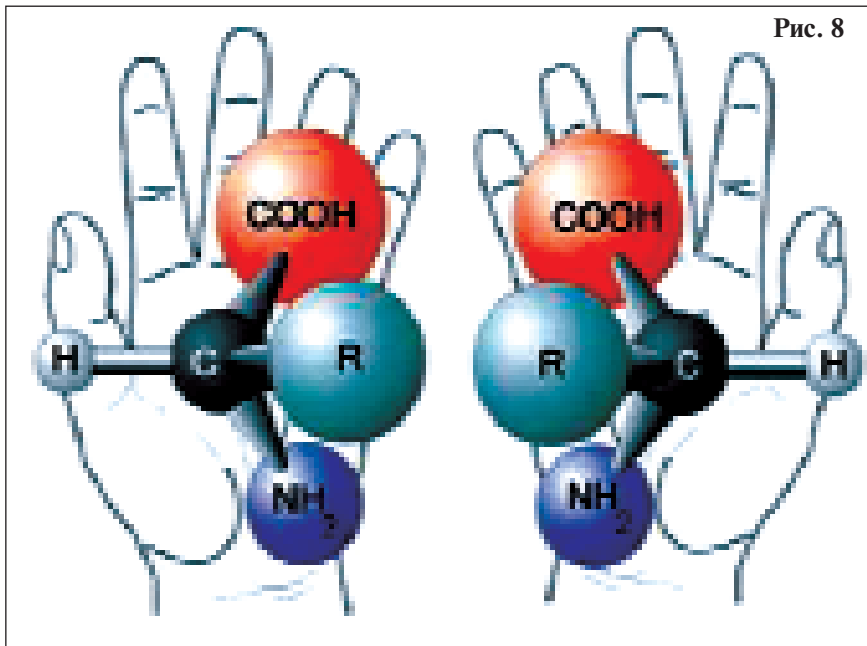


Рис. 8

нальним університетом ім.В.Н.Каразіна на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки за 2009 рік.

У цій роботі представлено завершену строгую теорію розсіяння електромагнітних хвиль дисперсними середовищами і точні методи аналізу результатів поляриметричних вимірювань. Розвинуто теоретичні основи і принципи вимірювання поляризованого випромінювання, ґрунтуючись на яких створено унікальну прецизійну апаратуру для спостережень. Отримання та аналіз великого обсягу наземних і аерокосмічних спостережень дозволили вперше визначити оптичні та фізичні характеристики поверхонь і атмосфер багатьох тіл Сонячної системи (планети, супутники планет, кілька

Сатурна, астероїди, транснептунові об'єкти й комети) та відкрити цілий ряд нових явищ і ефектів. Розроблено та впроваджено принципово нові поляриметричні методи дистанційного зондування аерозольних і хмарних частинок в атмосфері Землі з літаків та орбітальних супутників. Співавторами роботи є науковці НДІ астрономії ХНУ ім. В.Н. Каразіна (*І.М. Бельська, В.Г. Кайдаш, Д.Ф. Луїшко*), Головної астрономічної обсерваторії НАНУ (*М.М. Кисельов, В.А. Кучеров, В.К. Розенбуш*), НДІ "Кримська астрофізична обсерваторія" МОН України (*Ю.С. Єфімов, М.М. Шаховський*), Радіоастрономічного інституту НАНУ (*В.П. Тишковець*) та Годдардівського інституту космічних досліджень

#### Література

1. *Stokes G.G.* On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources. /Trans. Cambridge Philos. Soc., 1852.— V.9.— p. 399-416.
2. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A.* Scattering, absorption, and emission of light by small particles. Cambridge, Cambridge University Press, 2002.
3. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A.* Multiple scattering of light by particles: radiative transfer and coherent backscattering. Cambridge, Cambridge University Press, 2006.
4. *Liu L., Mishchenko M. I.* Toward unified satellite climatology of aerosol properties: direct comparisons of advanced level 2 aerosol products. / J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2008, 109, p. 2376-2385.
5. *Mishchenko M.I., et al.* Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission. /Bull. Am. Meteorol. Soc., 2007, 88, p. 677-691.
6. <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08247>.
7. *Шкуратов Ю.Г.* Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой. /Кинем. физ. неб. тел., 1984, 5, с. 33-38.
8. *Mishchenko M.I.* On the nature of the polarization opposition effect exhibited by Saturn's rings. /Astrophys. J., 1993,

411, p. 351-361.

9. *Rosenbush V.K., et al.* Polarization properties of the Galilean satellites of Jupiter: observations and preliminary analysis. /Astrophys. J., 1997, 487, p. 402-414.
10. *Rosenbush V.K., Kiselev N.N.* Polarization opposition effect for the Galilean satellites of Jupiter. /Icarus, 1995, 179, p. 490-496.
11. *Rosenbush V.K., et al.* Polarization and brightness opposition effects for the E-type Asteroid 64 Angelina. /Icarus, 2005, 178, p. 222-234.
12. *Cronin J.R., Pizzarello S.* Amino acids of the Murchison meteorite. III. Seven carbon acyclic primary alpha-amino aliphatic acids. /Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50, p. 2419-2427.
13. *Hough J.H., et al.* Circular polarization in star-forming regions: possible implications for homochirality. /Advances Space Res., 2001, 27, p. 313-322.
14. *Rosenbush V.K., et al.* Circular polarization in comets: Observations of Comet C/1999 S4 (LINEAR) and tentative interpretation. /Icarus, 2007, 186, p. 317-330.
15. *Лонатин В.Н., Приезжев А.В., Анонасенко А.Д.* Методи светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред. —М.: Физматлит, 2004.
16. *Tuchin V.* Tissue optics. Bellingham, SPIE Press, 2007.