



ISSN 1607–2855

Том 8 • № 2 • 2012 С. 136 – 148

УДК 523.4

Магнітне поле планет, супутників і астероїдів

А.П. Відьмаченко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Розглянуто походження магнітного поля на тілах Сонячної системи, особливості і структура магнітного поля планет земного типу, планет-гігантів, Місяця, галілеєвих супутників та астероїдів.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПЛАНЕТ, СПУТНИКОВ И АСТЕРОИДОВ, Видьмаченко А.П. — Рассмотрены происхождение магнитного поля тел Солнечной системы, особенности и структура магнитного поля планет земного типа, планет-гигантов, Луны, галилеевых спутников и астероидов.

MAGNETIC FIELD OF PLANETS, SATELLITES AND ASTEROIDS, by Vidmachenko A.P. — Origin of magnetic field of the solar system bodies, features and structure of magnetic field of planets of terrestrial type, giant planets, Moon, galilean satellites and asteroids are considered.

Ключевые слова: магнитное поле; планета; спутник; астероид.

Key words: magnetic field; planet; satellite; asteroid.

1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МАГНІТНЕ ПОЛЕ І ЙОГО УТВОРЕННЯ

Ще в античну епоху людям був відомий магнетит — намагнічене залізо. У китайських трактатах, датованих XII століттям до н.е., зустрічаються фрагменти, які можна витлумачити як свідчення застосування компаса з метою навігації. Проте перші з відомих описів компасу з'явилися в Китаї лише в XI, а в Європі у XII столітті. Першим достовірним повідомленням про магнітний компас ми зобов'язані англійському ченцеві Олександру Неккему (1157–1217) — молочному брату короля Англії Річарда Левиного Серця. Він в 1187 р. описав пристрій, який складався з плаваючої стрілки, що завжди вказувала певний напрямок. Причому, про компас Неккем пише не як про щось нове, а як про досить поширений і добре відомий читачеві предмет із залізною голкою, протягнутою через плаваючу у воді соломинку. У написаному в 1269 р. П'єром Де Мерікуром листі говорилося, що природний магніт має два полюси, які намагаються встановитися вздовж географічного меридіана, вказуючи на північний і південний полюси Землі. В 1600 р. особистий лікар англійської імператриці Єлизавети I Вільям Гільберт на основі своїх численних дослідів прийшов до думки про те, що найбільшим магнітом є сама Земля. У XVII столітті королівський астроном при англійському дворі Едмунд Галлей численними вимірюваннями магнітного поля у Лондоні і в інших пунктах земної поверхні довів, що воно систематично і закономірно змінюється. В 1947 р. відомий фізик Я.І. Френкель для пояснення причин виникнення магнітного поля нашої планети запропонував гіпотезу земного динамо (рис. 1), яка згодом була розвинута й істотно доповнена іншими вченими та перетворилася в струнку теорію походження геомагнітного поля. Однак походження магнітного поля Землі все ще залишається загадкою для вчених, хоча існує багато гіпотез для його пояснення (див в [4]).

Магнітне поле, що реєструється на земній поверхні, є сумарним полем, утвореним за рахунок наступних джерел: 1) струмів, що перетинають поверхню Землі (так званого «вихрового» поля); 2) зовнішніх, космічних джерел, не пов'язаних із Землею; 3) магнітного поля, обумовленого причинами внутрішньої динаміки Землі. На сьогодні відомо, що якраз останнє джерело вносить найбільший вклад у формування геомагнітного поля й саме його генезису присвячена більшість гіпотез. Вважається, що одним з факторів утворення магнітного поля планети є форма планети та її окремих оболонок. Якщо планета має форму «сплюсненого» еліпсоїда обертання навколо короткої осі, то такий еліпсоїд має не два точкових фокуси, а фокальне кільце, що представляє собою своєрідний провідний контур, швидкість руху часток усередині якого визначається швидкістю обертання планети. Тоді розбіжність магнітних полюсів з віссю обертання планети можна пояснити відхиленням форми планети від «правильного» сплюсненого еліпсоїда обертання, а також не співвісністю фокальних кілець окремих еліптичних оболонок планети і її обертанням.

Зараз формування магнітного поля Землі переважно пояснюється за допомогою моделі магнітного гідродинамо, спрощено зображеного на рис. 1. Тут у первісному слабкому магнітному полі (позначено векторами), спрямованому приблизно вздовж осі А, обертається провідящий диск. Між щіткою В і віссю обертання А відповідно до закону індукції Фарадея утвориться різниця потенціалів, яка викликає

електричний струм у ланцюзі DA' . Виникає при цьому магнітне поле (замкнуті лінії) буде його підсилювати, і тим більше, чим швидше обертання. Звичайно, реальні процеси в земному ядрі набагато складніші й описуються законами магнітогідродинаміки, що вивчає магнітні й електричні властивості проводящої рідини. Так, гіпотеза однодискового магнітного гідродинамо навіть не пояснює зміну знаку полярності магнітного поля Землі, що відіграє важливу роль у палеомагнітології [1, 5]. Вважається, що в геологічному минулому величина напруженості могла коливатися, але не більше ніж на порядок величини. Так, геомагнітне поле Землі за останні 2,5 млрд. років (що становить більше половини її геологічної історії) принципово не змінювалося. Однак зміну знаку геомагнітного поля не можна пояснити в рамках теорії однодискового динамо. В 60-х роках ХХ століття японський геофізик Т.Рікітакі [6] припустив, що кожен конвективну область у рідкому зовнішньому ядрі можна вважати окремим диском динамо і тоді вдається моделювати можливість інверсій магнітного поля. На сьогодні гіпотеза виникнення геомагнітного поля за рахунок конвекції провідної рідкої речовини зовнішнього ядра при обертанні Землі є найбільш розробленою й загально визнаною.

Напруженість магнітного поля визначається або в системі СІ (в теслах), або в гаусовій системі — в гаусах (Гс), інколи в ерстедах. Відношення «тесла»/«гаус» становить 10^{-4} . Оскільки напруженість магнітного поля чисельно дорівнює індукції поля у вакуумі і оскільки планетні поля — це слабо-магнітні утворення, то вважається допустимим вказувати напруженість магнітного поля, у тому числі, і в гаусах.

В Сонячній системі найбільше по величині магнітне поле має Сонце. Крім гелію, в плазмі сонячного вітру (СВ) знаходиться величезна кількість вільних електронів та протонів з різною енергією. Досягаючи планети, потоки частинок вторгаються в магнітосферу планети. Магнітне поле самих планет поступово зменшується при віддаленні від видимої поверхні. Проте завжди можна вказати відстань, де починається взаємодія сонячної плазми з магнітосферою планети. Відбувається це там, де тиск магнітного поля даної планети врівноважується газодинамічним тиском набігаючої сонячної плазми. Обидві ці величини змінюються з часом. Вздовж цієї границі розташовується так званий струмовий шар, по якому проходить електричний струм. Між Сонцем та планетою набігаюча плазма утворює ударну хвилю і на границі ударної хвилі сонячна плазма дуже сильно нагрівається. Наприклад, для Землі така ударна хвиля утворюється з боку Сонця на відстані приблизно $70\,000 \pm 10\,000$ км в залежності від циклу сонячної активності.

2. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПУ

Земля. Магнітне поле Землі в основному є дипольним із напруженістю на екваторі 31 000 нТл (0,31 Гс), біля північного полюса 58 000 нТл (0,58 Гс) і біля південного полюса 68 000 нТл (0,68 Гс) [4, 6]. Окрім дипольної, є також складові вищих порядків — квадрупольна та октупольна. Відношення квадрупольної та октупольної компонент до дипольної — оцінюються біля поверхні Землі як 0,14 і 0,09. Магнітний диполь нахилений на $11,5^\circ$ до осі обертання планети; в північній півкулі розташовується південний полюс диполя; південний магнітний полюс Землі (на який направлений північний кінець стрілки компаса) не збігається з північним географічним полюсом, а перебуває в пункті з координатами

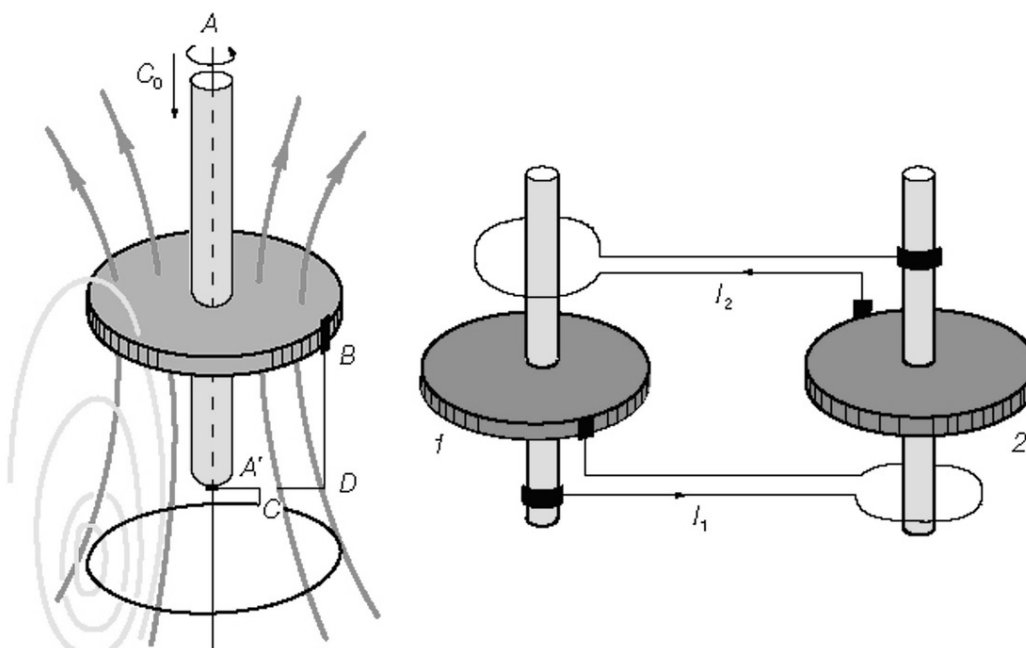


Рис. 1. Моделі однодискового (ліворуч) і дводискового (праворуч) динамо [4]

приблизно 76° пн. ш. й 101° зх. д. Нинішню полярність Земля набула ~ 12000 років тому. У першому наближенні магнітне поле Землі подібне до поля намагніченого диполя, зміщеного щодо центру Землі до Тихого океану і нахиленого до земної осі; в даний час цей зсув складає близько 450 км (рис. 2). Вісь диполя прецесує з періодом біля 9000 років. Палеомагнітними вимірюваннями встановлено, що полярність диполя нерегулярно змінюється на протилежну. Причому, за останні 70 млн. років такі інверсії відбувалися в середньому 3 рази за 1 млн. років. Цей факт вказує на нестабільність процесів, які збуджують магнітне поле Землі. Однак, сама напруженість магнітного поля і нахил диполя до осі в період між інверсіями залишається практично незмінними протягом інтервалу часу, по крайній мірі, в 2,7 млрд. років. Сам проміжок часу, під час якого змінюється полярність, порівняно короткий (менше 1000 років), а стабільний період, звичайно, продовжується від 100 000 років до 1 млн. років.

Окрім вікових змін існують дуже швидкі зміни напруженості магнітного поля з амплітудою приблизно 100 нТл: це місяці, можливо, роки. Такі зміни викликаються деякими явищами в іоносфері і магнітосфері планети, збуреннями міжпланетного магнітного поля та місячно-сонячною періодичністю припливів в іоносфері Землі. Відкриті в 1905 р. короткочасні зміни магнітного поля привели до висновку, що воно зароджується в рідкому зовнішньому ядрі планети. Адже лише там порівняно швидкі рухи можуть відбуватися без катастрофічних наслідків.

Силові лінії магнітного поля Землі (рис. 3) утворюють своєрідні пастки для потоків часток сонячного вітру, що рухаються до планети. Затримані магнітним полем частки утворюють радіаційні пояси. Різкі зміни магнітного поля Землі називаються магнітними бурями. Магнітні бурі часто починаються через добу чи дві після хромосферних спалахів на Сонці і викликаються потоками часток, що рухаються з великою швидкістю від Сонця. Ці заряджені частки, ковзаючи уздовж силових магнітних ліній, можуть проникнути в атмосферу, де, зіштовхуючись з атомами атмосфери, викликають світіння, яке називають полярним сяйвом.

Нині магнітне поле на поверхні нашої планети і його зміни вивчені досить докладно. Підтверджено, що ці варіації безпосередньо пов'язані з діяльністю Сонця. Так, в «спокійні магнітні дні» взаємодія сонячного вітру з іоносферними струмами викликає плавні, регулярні зміни компонентів магнітного поля з періодом, близьким до 24 годин. А магнітні бурі (нерегулярні спорадичні збурювання магнітосфери Землі) починаються в моменти, коли різко змінюється тиск сонячного вітру на магнітосферу й вона виявляється не в змозі «відвести» потік високоенергійних частинок від Землі, порушуючи регулярну структуру навколосемних електричних струмів. Магнітні бурі бувають різної інтенсивності й тривалості, але, як правило, повне відновлення «спокою» геомагнітного поля відбувається через 2–3 доби після початку бурі. Протягом року в моменти весняного й осіннього рівнодень спостерігається два періоди різкого підвищення магнітної активності, коли кількість магнітних бурь значно зростає. Якщо в середньому на місяць відбуваються 1–2 магнітні бурі, то в березні й вересні їхнє число зростає в кілька разів, причому осінній пік магнітної активності більш енергійний (до 7–8 за місяць). Дуже сильний вплив на частоту виникнення бур здійснює також глобальний 11-літній цикл сонячної активності, який багато в чому визначає всі природні процеси на Землі. Крім таких короткочасних коливань магнітного

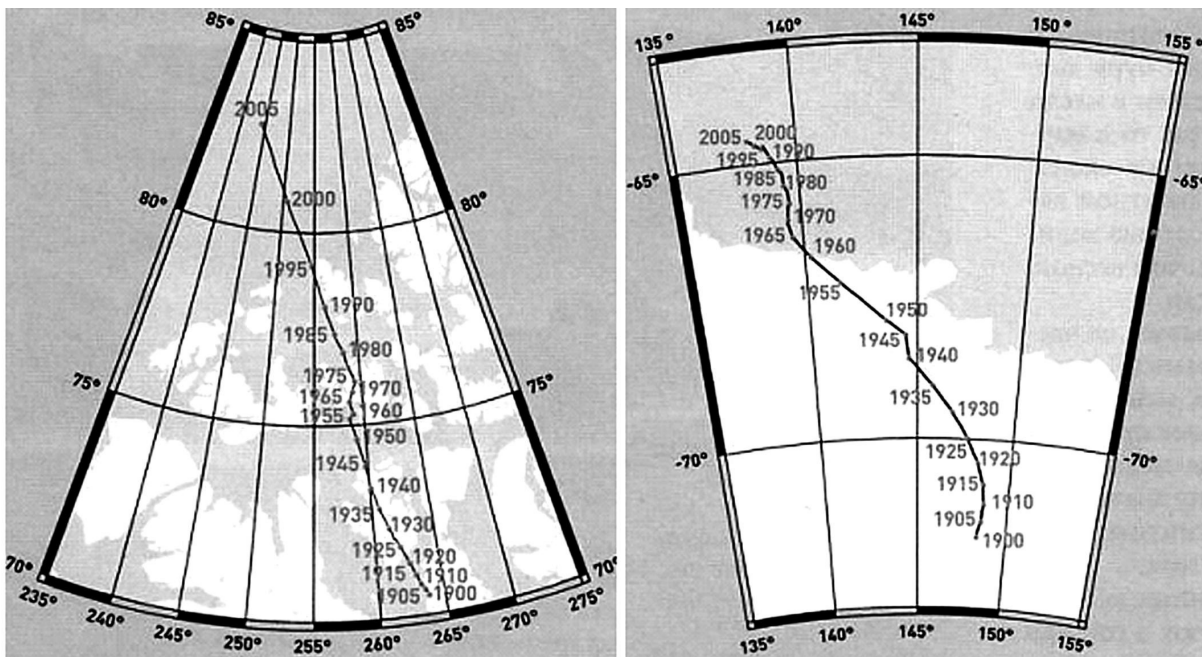


Рис. 2. Місцезнаходження Північного і Південного магнітних полюсів і їхнє переміщення з 1900 по 2005 рік [4].

поля існують і набагато повільніші плавні зміни його параметрів з періодом у кілька сотень років. Вони пов'язані з процесами всередині Землі і названі віковими варіаціями.

Меркурій. У свій час сюрпризом виявилися отримані космічним апаратом (КА) «Марінер-10» дані, які показали, що Меркурій має магнітне поле, величина якого становить близько 1% від земного. Нахил осі диполя до осі обертання Меркурія склав 12° , а напрямки магнітних диполів Землі й Меркурія однакові. Магнітний дипольний момент Меркурія дорівнює $4,9 \cdot 10^{22}$ Гс·см³, що приблизно на чотири порядки менше, ніж для Землі. Напруженість магнітного поля Меркурія вимірювалась під час трьох зближень КА «Марінер-10» (29.03.1974, 21.09.1974 та 17.03.1975 рр.) Воно виявилось дещо відмінним під час кожного із зближень: від 300 нТл до 700 нТл. Середні значення були вираховані такі: $3,5 \cdot 10^{-3}$ Гс на екваторі і $7,0 \cdot 10^{-3}$ Гс біля полюсів. При порівнянні магнітного поля Меркурія при різних зближеннях КА «Марінер-10» були виявлені вказівки на можливу присутність і не дипольних складових. Так, ретельне вивчення магнітного поля планети показало, що воно має складнішу структуру, ніж земне. Крім дипольного (двополюсного) — у ньому присутні ще й поля з чотирма й вісьмома полюсами. Звичайно, це може говорити і про короткострокову нестабільність дипольного магнітного поля планети. Але з іншого боку, короткостроковість пролітних траєкторій КА «Марінер-10» залишало й таку можливість, як наявність «різнокаліберного» так званого «вмороженого» магнітного поля — різного в різних кластерах поверхні Меркурія.

Незважаючи на повільне обертання планети, більшість фахівців вважає, що її магнітне поле збуджується таким же динамо-механізмом, що й магнітне поле Землі. Цей механізм зводиться до утворення кільцевих електричних струмів у рідкому ядрі планети при її обертанні, які й генерують магнітне поле. Якщо вважати, що магнітне поле найближчої до Сонця планети Сонячної системи утворюється так само, як і для Землі (за рахунок своєї динамо-машини), то необхідна наявність обертання розплавленого заліза в ядрі планети. Але за розрахунками спеціалістів за таких умов потужність магнітного поля Меркурія повинна була б бути в тридцять разів більшою спостережуваною; однак, вона становить менше одного відсотка від потужності магнітного поля Землі. Згідно гіпотезі, запропонованій німецьким вченим Ульріхом Христенсеном [9], секрет криється в структурі ядра Меркурія. Христенсен вважає, що зовнішні шари ядра утворені стабільними оболонками, ізольованими від тепла, що йде від внутрішнього ядра. В результаті, лише у внутрішній частині ядра відбувається ефективне перемішування матеріалу, що й створює магнітне поле.

Наявність недипольних складових магнітного поля Меркурія виявилась дещо несподіваною, тому що існуючі теорії магнітного динамо вимагають наявності струмопровідного рідкого ядра, на яке, по різних оцінках приходиться від 50 до 62% загальної маси планети. Разом з тим, розрахунки по деяких моделях показують, що за час, що пройшов від моменту утворення планети до наших днів, рідке ядро повинно було б прохолонути й затвердіти внаслідок теплових втрат у сфері такого невеликого розміру. І це могло б відбутися ще в перші 300–600 млн. років. А в твердому ядрі магнітне поле Меркурія

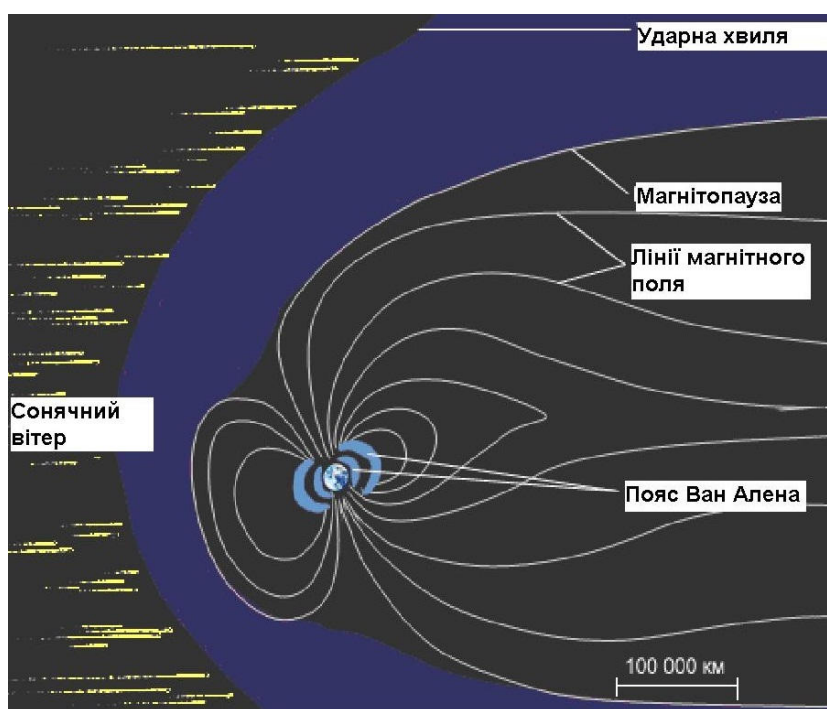


Рис. 3. Радіаційні пояси й магнітосфера Землі

згенеруватись вже ніяк не змогло б. Проте останнім часом можливе пояснення знайшли в тому, що в його металічному ядрі повинна знаходитися значна кількість легуючих домішок, і основна із них — сірка. Саме завдяки легуванню сіркою залізо-нікелевого сплаву значно знижується температура його затвердіння, тому ядро може ще довго зберігати свій рідкий стан. Проте багато протиріч залишаються невіршеними і в такому випадку. Одне з них — це організація конвекції в ядрі та збудження магнітного динамо в умовах дуже повільного обертання планети. В 1996 р. була запропонована ще одна гіпотеза, яка може пояснити як існування магнітного поля Меркурія, так і його нестабільність. Вона стосується великого ексцентриситету орбіти та інтенсивності розігріву кори планети за рахунок припливів. В цій гіпотезі пропонується, що основна частина ядра — тверда, а його зовнішня частина і мантія знаходяться в умовах фазового переходу, тобто періодично «підплавляються» на певних ділянках орбіти, викликаючи періодичні коливання напруженості магнітного поля.

В 1998 р. Л.В.Ксанфомаліті запропонував гіпотезу [16], яка пояснює нестабільність магнітного поля Меркурія наявністю індукції, що утворюється в певних місцях всередині планети окремими залишковими магнітними полями, які збереглися в корі планети з часу поступового ослаблення та затухання магнітного поля ядра. Причому, на Меркурії повинні існувати кілька окремих районів із залишковою намагніченістю з незалежними магнітними полями різної орієнтації. Інакше дуже важко пояснити, яким саме чином лише один диполь може привести до утворення магнітного поля Меркурія з наявністю не двох, а шести, а можливо, й восьми полюсів магнітного поля на планеті. Таке пояснення не потребує необхідності появи гіпотетичної нестабільності власного поля планети та впливу якихось дуже потужних короткотермінових процесів у магнітосфері планети. В рамках запропонованої гіпотези вирішується також проблема незбереження рідкого стану ядра планети та присутність магнітного поля планети без наявності магнітного динамо. На потужність динамо також впливає повільне обертання планети. А отже, найбільш правдоподібним поясненням природи меркуріанського магнітного поля може бути наявність у надрах планети частково розплавленого металічного ядра.

КА «Месенджер» 18 березня 2011 р. вийшов на високоеліптичну полярну орбіту навколо Меркурія при найменшій висоті над поверхнею близько 200 км. Для того, щоб зробити вибір між існуючими на сьогодні гіпотезами магнітне поле Меркурія з магнітометром цього КА детально вимірюватиметься з орбіти протягом кількох меркуріанських років. При цьому визначається його точне значення і зміна з положенням на планеті та висотою. Так, передані на Землю у 2011 р. дані вже дозволили виявити, що в північній півкулі поле сильніше, ніж у південній, а магнітний екватор планети знаходиться на 480 км (на 0,2 радіуса) ближче до північного полюсу від географічного. Тобто південний полюс Меркурія менше захищений від бомбардування зарядженими частинками сонячного вітру і тому його поверхня більше піддається «космічному вивітрюванню». Дуже здивувала й величезна кількість сірки на поверхні Меркурія. Це означає, що планета формувалась з частини Протопланетної хмари з меншим складом кисню, ніж інші внутрішні планети Сонячної системи. Можливо, що поява сірковмісних елементів на Меркурії викликана вулканічними процесами на планеті. А це є додатковим підтвердженням гіпотези про наявність в надрах планети значної кількості такої легуючої домішки, як сірка. І якраз вона дозволяє перебувати ядру у рідкому стані.

У XIX столітті з'явилася гіпотеза про те, що Меркурій раніше міг бути супутником Венери. В 1976 р. було зроблено математичний розрахунок цієї гіпотези, який показав можливість пояснити втрату обертального моменту в Меркурія і Венери, великий ексцентриситет орбіти Меркурія та резонансний характер руху Меркурія навколо Сонця. «Втікання» Меркурія могло відбутися близько 500 млн. років тому і супроводжувалося величезним виділенням енергії, яке розігрівало і Венеру, і її «супутник». Ця гіпотеза також допомагає пояснити й наявність магнітного поля в Меркурія та хімічний склад його ядра.

Венера має оболонкову будову. Потужність її кори близько 16–30 км, мантія (силікатна оболонка) простягається на глибину ~3300 км до границі з залізним ядром. Моделі її будови припускають наявність частково розплавлених порід на глибинах 250–500 км і досить твердої нижньої мантії. Первинна кора Венери швидше за все базальтового складу (хоча не виключено, що місцями вона має більш різноманітний склад: аж до так званих гранітоїдів) — більше 500 млн. років тому піддалася інтенсивній деформації, сформувавши на поверхні планети окремі плями з материків і островів. Сучасна модель планети прийнята тришаровою: ядро, нижня й верхня мантія. На ядро приходить ~12% маси планети (для Землі 16%). Передбачається, що воно складається з розплавленого заліза, але в ньому чомусь не збуджується магнітне поле (ймовірно, через повільне обертання Венери). Венера й Земля — близькі за розмірами: середня щільність і навіть внутрішня будова практично однакові, проте Земля має досить сильне магнітне поле, а Венера — дуже слабке.

По одній із сучасних теорій напруженість дипольного магнітного поля залежить від прецесії полярної осі й кутової швидкості обертання. Саме ці параметри на Венері мізерно малі. Але навіть при цьому вимірювання вказують на ще нижчу напруженість, ніж пророкує така теорія. Проте все ж магнітне поле, хоча й досить слабке, на Венері є. В її іоносфері, яка може представляти собою імовірний стру-

мопровідний шар, міжпланетним магнітним полем і сонячним вітром наводиться магнітне поле. Тобто міжпланетне магнітне поле напруженістю близько 10 нТл взаємодіє з іоносферою планети, що рухається в ньому. Оскільки іоносфера — це провідник, то в ній з'являються електричні струми, які, у свою чергу, збуджують магнітні поля невеликої напруженості (15–20 нТл). Проте вони мають локальний характер і випадково орієнтовані. Взаємодія цих полів з плазмою сонячного вітру ще більше ускладнює існуючу картину. Отже, магнітне поле Венери незначне, її магнітний дипольний момент менший, ніж для Землі аж на п'ять порядків.

Хімічний склад **Марса** типовий для планет Земної групи, хоча, звичайно, існують і специфічні відмінності. Тут відбувся ранній перерозподіл речовини під впливом гравітації, на що вказують, наприклад, збережені сліди первинної магматичної діяльності. Середня густина Марса складає $3,94 \text{ г/см}^3$, що істотно менше, ніж для Землі — $5,52 \text{ г/см}^3$. Однак такі значення допускають наявність невеликого (радіус $\sim 800\text{--}1000 \text{ км}$) багатого залізом і сіркою рідкого електропровідного ядра з масою $\sim 0,1$ маси планети. Відповідно до сучасних теоретичних оцінок формування ядра тривало близько мільярда років і збіглося з періодом раннього вулканізму на планеті. Ще такий же по тривалості період зайняло часткове плавлення мантійних силікатів, яке також супроводжувалося інтенсивними вулканічними й тектонічними явищами. Близько 3 млрд. років тому цей період в основному завершився. І хоча ще протягом майже мільярда років на Марсі тривали глобальні тектонічні процеси (зокрема, виникали величезні вулкани), тоді вже почалося поступове охолодження планети, що мабуть, триває й понині. Мантія Марса збагачена сірчаним залізом, помітні кількості якого виявлені й у досліджених поверхневих породах. В той же час вміст металевого заліза помітно менший, ніж на інших планетах земної групи. Товщина літосфери Марса складає кілька сотень кілометрів, включаючи приблизно 100 км її кори. Кора багата олівіном і залізистими окислами (які надають планеті «іржавого кольору»); кремнію 21%, заліза 12,7%, сірки 3,1%. Досить швидкий період обертання ($T = 24 \text{ год. } 39,5 \text{ хв.}$) дозволяв припустити можливість існування власного магнітного поля Марса. Воно було предметом численних досліджень. Так, в 1965 р. при прольоті КА «Марінер-4» біля Марса на відстані 13200 км від його центра (при значенні радіуса $R_M = 3394 \text{ км}$) — магнітного поля планети не було знайдено. В 1972–1974 рр. на радянських КА «Марс-3» та «Марс-5» було отримано, що якщо воно і є, то його напруженість на екваторі буде меншою 45 нТл, а орієнтація диполя — протилежна тій, яка спостерігається для Землі (північний полюс магнітного диполя знаходиться в північній півкулі) [2]. Дещо пізніше, в кінці 70-х на початку 80-х років появилось ряд робіт, в яких таке невелике значення напруженості магнітного поля Марса пояснювалось стисненням міжпланетного магнітного поля при його обтіканні немагнітної планети. В середині 80-х було запропоновано іншу гіпотезу: магнітне поле на Марсі зараз є малим тому, що при теперішніх дослідженнях ми якраз застали момент, коли магнітне поле Марса проходить згадуваний вище момент інверсії: тобто там зараз

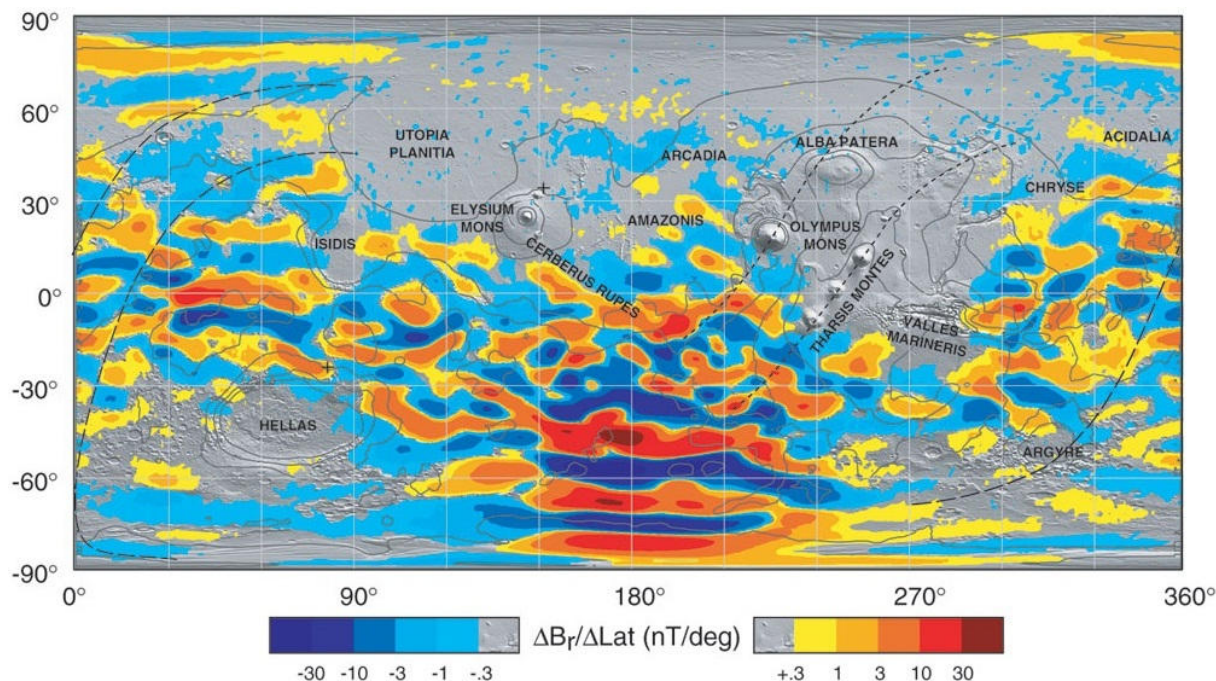


Рис. 4. Карта магнітних полів частини південної півкулі Марса за даними космічного апарату «Марс-Глобал-Сервейер» із спостережень протягом 4-х років. Смуги пролягають із сходу на захід і мають ширину близько 160 км при довжині близько тисячі км, вони позначають суміжні області кори Марса з протилежним напрямом магнітного поля [7].

відбувається «переполюсовка» магнітного поля.

За даними спостережень з КА «Марс-Глобал-Сервейер» у вересні 1997 р. з'явилися повідомлення про підтвердження існування власного магнітного поля на Марсі з напруженістю біля поверхні ~ 40 нТл, а вже в жовтні із аналізу отриманих результатів було отримано, що магнітне поле Марса є плямистим, подібно тому, як це спостерігається, наприклад, на Місяці [7]. Але напруженість магнітного поля Марса місцями значно вища, ніж на природному супутнику Землі. Так, були знайдені деякі «плями» з поверхневою напруженістю майже 400 нТл (рис. 4). Всього було зареєстровано 9 районів протяжністю в кілька сотень кілометрів, які мають зовсім незалежні різно направлені магнітні поля з відмінними значеннями магнітної напруженості. Такі райони представляють собою обширні ділянки кори Марса, яка затверділа мільйони, а то й мільярди років тому в присутності сильного магнітного поля планети [10]. Тобто вони є залишками («рудиментами») колись існувавшего магнітного поля, яке багато років тому генерувалося у тоді ще великому й рідкому металічному ядрі Марса. Ретельне дослідження такого фрагментованого магнітного поля Марса у найближчому майбутньому є дуже хорошим інструментом для дослідження історії змін на Марсі. Ці характерні особливості магнітних полів подібні тим, котрі виникають на Землі в місцях тектонічних розломів. А оскільки магнітне поле Землі міняло напрям кілька разів за мільйон років, то різні за часом розломи, мають різні напрямки магнітних полів. Щось подібне було відмічено і на Марсі. Згідно з останніми даними, орієнтація магнітного поля в різних фрагментах досить сильно відрізняється. Це можливо пояснити ще й тим, що різні спостережувані фрагменти кори Марса були утворені при різній полюсності (орієнтації) колись існувавшего магнітного поля Марса.

Марс також володіє іоносферою і тому магнітосфера Червоної планети поєднує в собі властивості як власного, так і наведеного магнітного поля. Щодо природи магнітного поля існують такі основні гіпотези: воно або генерується сучасними процесами у рідкому ядрі, або є залишком інтенсивнішого древнього магнітного поля.

Доречно зазначити, що й зараз деякі вчені достатньо обґрунтовано висловлюють сумніви стосовно існування магнітного поля, а реєстроване — приписують або збільшенню напруги поля сонячного вітру за фронтом ударної хвилі, яка створюється при обтіканні планети сонячним вітром, або його генерації в іоносфері під дією електричного поля сонячного вітру. Згідно деяким пропозиціям вважається, що основне магнітне поле Марса, четвертої планети Сонячної системи, перестало існувати мільярди років тому і воно може через деякий час відновитися.

3. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПЛАНЕТ-ГІГАНТІВ

Внутрішню будову **Юпітера** (з $R_{\text{Ю}} = 71\,000$ км) можна представити у вигляді оболонки із щільністю, що зростає в напрямку до центра планети. На дні атмосфери товщиною понад 1500 км знаходиться шар так званого «газорідкого» водню товщиною близько 7000 км. На рівні 0,88 радіуса планети при тиску 0,69 Мбар і температурі 6500 К водень переходить у рідко-молекулярний стан і ще через 8000 км — у рідкий металічний стан. Поряд з воднем і гелієм до складу шарів входить невелика кількість важких елементів. Внутрішнє оточене гелієм ядро діаметром 25 000 км — метало-силікатне, що включає воду, аміак і метан; температура в центрі складає 23 000 К, а тиск 50 Мбар. Спостереження, які безперервно велися протягом 14 місяців за допомогою інструментів КА «Галілео» і «Кассіні», дозволили з великою точністю визначити розміри магнітосфери Юпітера, зареєструвати там полярні сьйва (рис. 5) і уточнити характер її взаємодії з потоками сонячного вітру. Один з апаратів перебував у середині магнітосфери, а інший здійснював політ у безпосередній близькості від неї. Магнітне поле Юпітера величезне, навіть у пропорції з величиною самої планети — воно простягається на 650 млн. кілометрів (за орбіту Сатурна!). Якщо б магнітосфера його була видима, то із Землі вона мала б кутовий розмір, що дорівнює видимим розмірам Місяця. Магнітне поле Юпітера значно сильніше від земного. Форма магнітосфери Юпітера далека від сферичної. На відстані 177 000 км від планети зареєстрована зона найбільш інтенсивної радіації, яка в 10 000 разів потужніша, ніж у радіаційних поясах Землі. Можливо, генерація потужного магнітного поля Юпітера пов'язана із швидким обертанням центральних областей планети, що містять металічний водень і проводять струм.

Виявлене в 1955 р. радіовипромінювання Юпітера послужило першою ознакою наявності в нього сильного магнітного поля, яке було в 4000 разів сильніше земного. Його магнітний дипольний момент майже в 12 000 разів перевищує дипольний момент Землі. Але оскільки напруженість магнітного поля обернено пропорційна кубу радіуса, а він у Юпітера на два порядки більший, ніж у Землі, то напруженість біля видимої поверхні Юпітера вища, у порівнянні з Землею, тільки в 5–6 разів. Магнітна вісь нахилена до осі обертання на $10,2^\circ$. Дипольна структура магнітного поля домінує до відстаней порядку 15 радіусів планети. Таким чином, Юпітер має найсильніше власне і магнітне, і гравітаційне поля серед всіх планет Сонячної системи. Перші прямі вимірювання власного магнітного поля Юпітера були виконані в грудні 1973 р. (КА «Піонер-10») та в грудні 1974 р. (КА «Піонер-11») з відстані, відповідно для кожного з КА, 185 000 та 102 000 км. Виміряна напруженість магнітного поля в точці найближчого

зближення до Юпітера складала 18 000 нТл. Проведена екстраполяція отриманих результатів до поверхні видимих хмар Юпітера дала значення дипольної компоненти магнітного поля в 410 000 нТл (4,1 Гс). Пізніші місії КА «Вояджер-1, 2» неістотно уточнили отриманий результат. На відстані від планети більше $10 \cdot R_{\text{Ю}}$ починають проявлятися не дипольні компоненти, обумовлені зовнішніми не планетними джерелами (наприклад, «струмова силова» трубка, яка з'єднує іоносферу планети з її супутником Іо та з іонізованим газовим тором на орбіті супутника).

Інтерпретація всіх отриманих спостережних даних призводить до наступних висновків. Напруженість магнітного поля на екваторі (на поверхні видимих хмар) складає 4,0–4,2 Гс, на поверхні видимих хмар біля північного полюса — 14,4 Гс і біля південного полюса — 10,8 Гс. Така відмінність в напруженості магнітного поля між полюсами викликана наявністю квадрупольної та октупольної компонент магнітного поля. Полярність магнітного диполя Юпітера зворотна тій, що є на Землі: північний магнітний полюс знаходиться в північній півкулі. Зміщення осі магнітного диполя відносно осі обертання Юпітера складає $0,1 \cdot R_{\text{Ю}}$. Відносно більша напруженість квадрупольної та октупольної компонент магнітного поля на Юпітері, в порівнянні з Землею, вказує на те, що оболонки, в яких збуджується магнітне динамо, на Юпітері розташовуються значно ближче до поверхні.

Серед найцікавіших результатів дослідження власного магнітного поля **Сатурна** є співвісність дипольного магнітного поля планети з віссю її обертання. До відкриття цього факту, наявність нахилу магнітного диполя до осі обертання планети вважалося необхідною умовою розвитку магнітного динамо. Тому феномен Сатурна викликав широку зацікавленість. 1.09.1979 апарат «Піонер-Сатурн» (саме так було перейменовано КА «Піонер-11») пройшов на відстані 80 000 км, 12.11.1980 із Сатурном зблизився на 185 000 км КА «Вояджер-1», а 26.08.1981 на відстані 101 000 км від хмар пройшов КА «Вояджер-2». Напруженість поля в точках зближення складала 1093 нТл («Вояджер-1») та 1187 нТл («Вояджер-2»). Характер змін напруженості магнітного поля в процесі зближення та віддалення космічних апаратів говорив про переважну дипольність магнітного поля Сатурна, а квадрупольний та октупольний компоненти виявилися дуже малими. Це можна пояснити досить глибоким заляганням границі переходу водню в металічний стан.

Магнітне поле Сатурна є з високою ступінню точності осесиметричним. Напруженість дипольного компонента магнітного поля на екваторі (на поверхні видимих хмар) складає 0,22 Гс (що менше від такого на Землі: на поверхні Землі магнітне поле дорівнює 0,35 Гс); напруженість квадрупольного компонента — 0,02 Гс; напруженість октупольного компонента — 0,03 Гс. Напруженість магнітного поля на полюсі на поверхні видимих хмар складає: на північному полюсі 0,84 Гс і на південному полюсі 0,65 Гс. Нахил магнітного диполя до осі обертання Сатурна не перевищує 1° . Полярність диполя протилежна земній: північний полюс диполя знаходиться в північній півкулі. Магнітосфера Сатурна відрізняється від юпітеріанської тим, що в Сатурна вісь обертання збігається з віссю диполя. Деякі заряджені частинки, рухаючись від полюса до полюса, проходять через систему кілець і поглинаються там льодом і пилом. Тому в області кілець магнітосфера Сатурна досить порожня — у ній дуже мало заряджених часток. Але полярні саява (рис. 6) були зареєстровані й на Сатурні. Центр диполя Сатурна

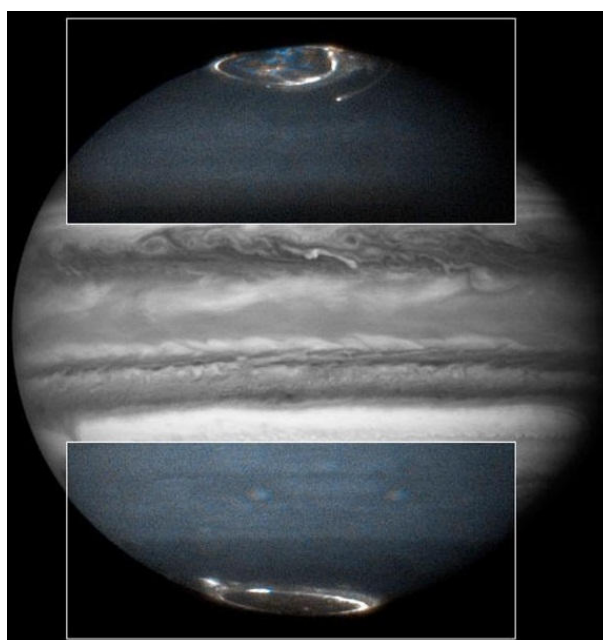


Рис. 5. Полярні саява в полярних областях Юпітера

виявився зміщений на 0,04 радіуси до півночі від геометричного центра планети.

Інтенсивність випромінювання в радіаційних поясах Сатурна виявилася в 50–1000 разів нижча, ніж у радіаційних поясах Юпітера, і була порівнянною з інтенсивністю випромінювання в радіаційних поясах Землі, хоча останні займають у 10 раз менший об'єм. Дослідження з КА «Вояджер-1» показали, що магнітосфера Сатурна за розмірами приблизно в три рази менша магнітосфери Юпітера й простягається в напрямку до Сонця приблизно на 1 млн. км. «Вояджер-1» зареєструвала ударну хвилю на відстані $26,2 \cdot R_C$ від Сатурна. Магнітопаузу КА перетнув кілька разів, останній раз на відстані $22,9 \cdot R_C$. Наблизившись до Сатурна КА «Вояджер-1» виявив ще й нетеплове радіовипромінювання його радіаційних поясів. На відміну від Юпітера, Сатурн випромінює в кілометровому діапазоні довжин хвиль. Вважається, що магнітне поле Сатурна породжується електричними струмами в надрах планети у шарі, де під впливом колосальних тисків водень перейшов у металічний стан.

Теоретична модель будови **Урану** на сьогодні прийнята така: його поверхневий шар представляє собою так звану газово-рідку оболонку, під якою знаходиться крижана мантія із суміші водяного й аміачного льодів, а ще глибше — ядро з твердих порід. Маса мантії і ядра складає приблизно 85–90% від усієї маси Урану. Зона твердої речовини простягається до $3/4$ радіуса планети. Температура в центрі Уран близька до 7000–10000 К при тиску 6–8 млн. бар). На межі ядра тиск приблизно на два порядки нижчий (біля 100 Кбар).

Стрімко промчавшись поблизу Урана, міжпланетний зонд «Вояджер-2» зібрав багато нової інформації про цю одну з найцікавіших планет. Більшість відомостей, відомих сьогодні про Уран, були отримані буквально протягом декількох годин, поки станція перебувала поблизу від планети, пролітаючи на найближчій відстані в 81 500 км від поверхні хмар зі швидкістю близько 13 км/с. Його зближення з Ураном відбулось 24.01.1986. Напруженість магнітного поля в цій точці складала 413 нТл. Перші ознаки магнітного поля поблизу Урана були зареєстровані лише за 5 земних діб до зближення із планетою на відстані всього лише $275 \cdot R_U$ ($R_U = 25\,559$ км). Через наявність великого нахилу осі обертання планети до площини орбіти ($97,8^\circ$), та орбітального положення КА «Вояджер-2», — практично вся південна півкуля Урана при цьому знаходилась в області полярної ночі. В Урана вдалося виявити майже таке ж сильне магнітне поле, як і на Землі, але його конфігурація дуже складна. Структура дипольного магнітного поля Урана — це інша крайність у порівнянні із Сатурном.

Власне магнітне поле Урана представляє собою майже граничний випадок нахиленого ротатора: напруженість дипольного компонента магнітного поля на екваторі (на рівні видимих хмар) складає 0,228 Гс; напруженість квадрупольного компонента складає майже 70% від значення дипольної напруженості, тобто майже 0,18 Гс; зміщення осі диполя від центра планети в сторону до північного полюса досягає 8000 км ($0,31R_U$), а нахил осі диполя до осі обертання складає 59° . Така складна будова магнітного поля Урана призводить до того, що напруженість магнітного поля біля поверхні хмар змінюється від 0,1 до 1,1 Гс; причому нижча напруженість магнітного поля спостерігається на денній частині півкулі планети, а більше значення напруженості — характерне для нічної частини півкулі. Оскільки значення дипольної та квадрупольної напруженості магнітного поля майже співпадають, то це призводить до того, що Уран має дві площини магнітних екваторів. Тобто компас на Урані не показуватиме на географічний полюс. Більше того: Уран відгукнувся відразу аж чотирма (!) магнітними полюсами — двома головними й двома вторинними; і лише з величезною натяжкою його можна вважати дипольним. Це дивне розташування магнітного поля Урана в сполученні з дуже сильним нахилом осі обертання самої планети

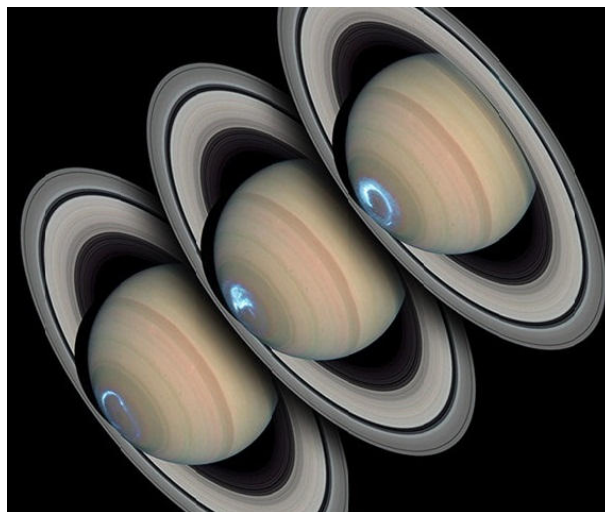


Рис. 6. Три зображення Сатурна, отримані телескопом Хаббла із проміжками у дві доби

приводить до того, що хвіст магнітосфери простягається від планети в напрямку зовнішніх границь Сонячної системи у вигляді довгого штопора. Обертання разом із планетою її магнітного поля, сильно нахиленого до осі обертання Урана, закручує магнітні силові лінії уздовж магнітосферного хвоста, як нитки всередині канату. Тобто з'ясувалося, що магнітний шлейф цієї планети влаштований зовсім унікально — силові магнітні лінії в ньому не витягнуті по прямій, як це має місце в інших планет, а закручені в подвійну спіраль. Вимірювання з КА «Вояджер-2» показали, що витягнутий під дією сонячного вітру хвіст магнітосфери Урана простягається не менше ніж на 10 млн. км у напрямку до орбіти наступної планети Сонячної системи — Нептуна.

Магнітне поле уможливує «полярні» саява, що спостерігаються у верхній частині атмосфери. Таким чином, магнітне поле Урану помітно відрізняється від магнітного поля Землі, Юпітера і Сатурна. Але якщо магнітне поле Землі і найближчих планет-гігантів викликано конвекцією в рідкому ядрі планети і є дипольним по своїй структурі (має один північний і один південний полюс), то магнітне поле Урану викликано конвекцією у водно-аміачній мантиї планети.

Про внутрішню структуру **Нептуна** відомо не так вже й багато, адже судити про неї можна тільки на основі непрямих даних, оскільки сейсмічного зондування цієї планети не проводилося. Діаметр Нептуна (49 600 км) майже в 4 рази більший, ніж у Землі. Середня густина Нептуна становить усього лише $1,6 \text{ г/см}^3$. За розрахунками, у центрі Нептуна повинне перебувати кам'яне або залізо-кам'яне ядро діаметром в 1,5–2 рази більшим нашої Землі. Основну частину Нептуна займає розташований навколо ядра шар товщиною близько 8000 км, що складається головним чином з водних, аміачних і метанових льодів, до яких, можливо, домішаний і кам'яний матеріал. Згідно розрахунків, температура в цьому шарі повинна з глибиною збільшуватися від 2800 до 5800 К. При такій температурі й тиску у кілька мільйонів бар речовина там перебуває, ймовірно, в іонному стані. Далі йде третій шар — зовнішня газова оболонка товщиною близько 5000 км. Ця атмосфера з водню й гелію переходить у крижаний шар поступово, без різко вираженої границі, у міру того, як густина речовини збільшується під тиском вище лежачих шарів. У глибоких частинах атмосфери гази перетворюються в кристали, кількість яких з глибиною стає все більшою і глибше вони повністю перетворюються в лід, що перебуває під дією величезного тиску. Перехідний шар від газової до крижаної оболонки повинен бути досить широкий — близько 3000 км. У загальній масі Нептуна на гази приходить $\sim 5\%$, на льоди $\sim 75\%$, а на кам'яний матеріал $\sim 20\%$.

Проліт КА «Вояджер-2» 25.08.1989 біля Нептуна на відстані всього лише 4900 км від поверхні його хмар дозволив досить точно визначити навіть окремі деталі дипольної структури магнітного поля та визначити напруженість квадрупольного та октупольного компонентів поля планети. Напруженість дипольного компонента магнітного поля в точці зближення (на поверхні видимих хмар) складає 0,13 Гс. Магнітний полюс планети нахилений на 47° до географічного. Передбачається, що магнітне поле Нептуна збуджується в рідкому провідному середовищі, у шарі, що перебуває на відстані 13 000 км від центра планети. А під рідким шаром перебуває тверде ядро Нептуна. Настільки сильний зсув обумовлений віддаленим розташуванням шарів рідкого водню, у якому при русі електричних заряджених частинок і генерується магнітне поле. Через наявність у Нептуна такого ж як і в Урана нахиленого ротатора в різних частинах планети напруженість магнітного поля Нептуна також змінюється в межах від 0,1 до 1,0 Гс. Радіальне зміщення осі диполя відносно осі обертання досягає рекордної величини — 13 600 км, або $0,55 \cdot R_H$ (!). Припускають, що магнітне поле Нептуна збуджується в деякій струмопровідній рідині, яка розташовується над твердим ядром планети на відстані $0,55 \cdot R_H$, тобто приблизно там же, де і на Урані. В такому середовищі збуджується дуже складне магнітне поле з багатьма полюсами та магнітними екваторами. Причому, кожен з більш складних компонентів дає все меншу напруженість магнітного поля. Оскільки магнітна вісь Нептуна відхилена від осі обертання планети майже на 47° , то магнітна вісь при обертанні Нептуна змінює своє положення в просторі майже на 90° . По цій причині за кілька

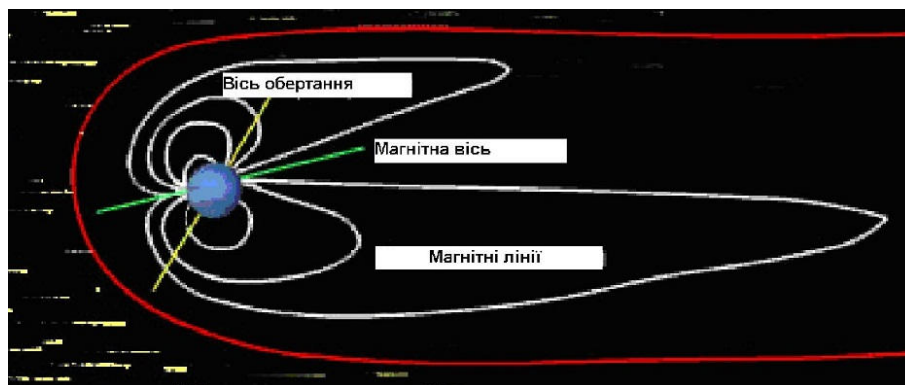


Рис. 7. Магнітосфера Нептуна

годин кардинально змінюється форма магнітосфери (рис. 7). Вона повертається до потоку заряджених частинок від Сонця (сонячний вітер) то боком, подібно магнітосфері Землі, то «верхівкою», подібно магнітосфері Урана. Повний цикл таких «танців» займає 16 год. 7 хв. У результаті цього силові лінії в магнітному хвості, витягнутому за Нептуном, йдуть то паралельно одна одній, то скручуються в джгут. Час від часу над Нептуном також виникає світіння, яке називають на Землі полярним сяйвом. Але через сильний нахил магнітної осі саява на Нептуні розташовуються зовсім не над його полюсами, а на віддалені від них на 40–50°, і тому їх уже навряд чи можна назвати полярними.

Таким чином, планети-гіганти мають дуже своєрідний набір типів власних магнітних полів, котрі істотно доповнили характеристики добре вивченого магнітного поля Землі, і, крім того, значно ускладнили здавалося б уже добре вивчений механізм утворення магнітних полів.

4. МАГНІТНЕ ПОЛЕ МІСЯЦЯ

Щільність Місяця порівнянна із щільністю земної мантії. Внутрішня будова Місяця добре вивчена за сейсмічними даними, переданими на Землю приладами космічних експедицій «Аполлон». Товщина його кори 60–100 км. Товщина верхньої мантії ~ 400 км. У ній сейсмічні швидкості залежать від глибини й зменшуються з відстанню. Товщина середньої мантії близько 600 км і там сейсмічні швидкості постійні. Нижня мантія розташована глибше 1100 км. Вважається, що ядро Місяця, що починається на глибині ~ 1500 км, за деякими даними може бути рідким, але воно майже не містить заліза. І, можливо, саме тому Місяць має дуже слабе магнітне поле, що не перевищує однієї десятитисячної частки земного магнітного поля.

Вперше магнітне поле Місяця було виміряне при підльоті до нього КА «Луна-2». Виявилось, що якщо й існує глобальне магнітне поле, то його дипольний момент повинен бути меншим від 10^{-4} від земного. Дослідження власного магнітного поля Місяця проводилося також за допомогою магнітометрів, які були встановлені на посадковому модулі «Луноход-2» і на пілотованих американських місячних експедиціях «Аполлон-12, 14, 15 і 16». Магнітне поле вивчалось також за допомогою суб-супутників, які запускали з борта КА «Аполлон-15» і «Аполлон-16». За цими даними були побудовані крупномасштабні карти місячного магнітного поля та оцінена верхня межа для дипольного магнітного моменту Місяця в $1,1 \cdot 10^{19}$ Гс·см³, який нахилений на кут 34° до осі обертання Місяця і спрямований на південь [3, 11, 17]. В той же час, були виявлені ділянки з досить великими значеннями намагніченості (так звані магнітні аномалії). Найбільше магнітне поле було виявлено у материкових районах. Так, в області кратера Декарт його напруженість знаходилась у межах від 100–300 нТл. Найменше магнітне поле (з напруженістю від 3–6 нТл) виявлено у морських районах. Наявність магнітних аномалій підтвердили й експерименти на КА «Луноход-2», характерний розмір яких становив 200–300 м.

Тобто на Місяці регулярного магнітного поля зареєстровано не було. Але були зареєстровані місцеві магнітні аномалії, якими є протяжні залишкові магнітні поля напруженістю від 3 до 327 нТл з найрізноманітнішою орієнтацією. Питання про походження такого палеомагнітного поля Місяця до сьогодні залишається невирішеним.

5. МАГНІТНІ ПОЛЯ СУПУТНИКІВ І АСТЕРОЇДІВ

Ганімед ($R_{\Gamma} = 2631$ км). Власне магнітне поле третього галілеєвого супутника Юпітера, Ганімеда була зареєстрована в 1995–1996 рр. при дослідженнях за допомогою КА «Галілео», який став першим штучним супутником Юпітера [8, 13–15]. Як зараз стало відомо, Ганімед є найбільшим природним супутником планет Сонячної системи. Період його обертання навколо власної осі та навколо Юпітера складає 7,155 земних діб, тобто цей супутник обертається синхронно — точно так же, як і Місяць навколо Землі: він завжди повернутий до планети одним і тим же боком. Середня густина складає $1,93$ г/см³.

При підготовці космічної місії до Юпітера ніяких передбачень про можливість існування магнітного поля у Ганімеда не було. Тим не менше, під час двох проходів КА «Галілео» поблизу галілеєвих супутників Юпітера, при його маневрах з метою виходу на близьку орбіту навколо Юпітера, було зареєстровано наявність магнітного поля, по крайній мірі, на деяких з них. Найбільше спостережних результатів і з найкращою точністю було отримано для Ганімеда. У цього супутника було виявлено власне магнітне поле з напруженістю біля його поверхні 750 нТл, що вдвоє більше, ніж для Меркурія (!). Виявилось, що вісь магнітного диполя Ганімеда нахилена до осі обертання супутника під кутом 10°. Результати таких магнітометричних спостережень дозволили оцінити розмір ядра Ганімеда: наявне дипольне магнітне поле можна пояснити присутністю металічного ядра з розміром $R_{\text{я}} = 0,2R_{\Gamma}$. Основою для такого твердження стали спостережні дані про дуже мале значення так званого безрозмірного моменту інерції для Ганімеда: $I_{\Gamma} = 0,3105$. Таке мале значення вказує на дуже високу ступінь концентрації важких елементів у центрі небесного тіла, причому значну більшу, ніж для Землі (для неї $I_3 = 0,3309$).

Численними модельними розрахунками було показано, що найбільш підходящим є склад ядра, утвореного із левоганого сіркою заліза. Саме такий хімічний склад може дозволити так довго існувати

залізного ядру в рідкому стані.

Іо. Оцінити власне магнітне поле найближчого до Юпітера із галілеєвих супутників супутника Іо дуже утруднюють електромагнітні явища в оточуючому його потужному плазмовому торі, який дуже сильно маскує власне магнітне поле супутника Іо [19]. Про можливість існування власного магнітного поля на супутнику Іо може говорити менше ніж у Місяця значення безрозмірного моменту інерції: $I_{\text{Іо}} = 0,378$, при значенні радіуса $R_{\text{Іо}} = 1815$ км і густині $\rho = 3,55$ г/см³. Відзначимо, що для Місяця $I_{\text{Місяця}} = 0,391$ і саме тому власне магнітне поле Іо цілком імовірно може бути, оскільки дуже імовірна наявність у цього супутника невеликого рідкого металічного ядра.

Європа. Безрозмірний момент інерції для третього галілеєвого супутника Юпітера — Європи — близький до того, що ми маємо для Землі: $I_{\text{Європи}} = 0,332$ при значенні радіуса $R_{\text{Європи}} = 1569$ км і густині $\rho = 1,83$ г/см³. При прольоті КА біля Європи було зареєстроване власне магнітне поле [18]; по величині воно приблизно співпадає з тим, яке було знайдене для Місяця: 20–50 нТл.

Каллісто. У четвертого галілеєвого супутника — Каллісто — магнітного поля знайдено не було. Параметри цього супутника такі: безрозмірний момент інерції $I_{\text{К}} = 0,40 \pm 10\%$, при значенні радіуса $R_{\text{К}} = 2400$ км і густині $\rho = 1,83$ г/см³.

Астероїди 951 Гаспра та 243 Іда досліджувалися під час зближення з ними КА «Галілео» [12]. Дослідження показали практичну відсутність власного магнітного поля в астероїда Іда. А в астероїда Гаспра було зареєстровано помітне залишкове магнітне поле: 2–5 нТл. Обидва ці астероїди представляють собою тіла неправильної форми: 951 Гаспра (19 × 12 × 11) км; 243 Іда (56 × 24 × 21) км.

Зонд NEAR «Шумейкер» протягом цілого року — з лютого 2000 р. по лютий 2001 р. — досліджував астероїд Ерос, знаходячись на його орбіті. 12.02.2001 зонд зробив посадку на цей астероїд. Офіційно місія зонда NEAR була закінчена 1 березня. На зонді був встановлений магнітометр, але нижче 120 м над поверхнею астероїда він не виявив помітного магнітного поля. Межа чутливості магнітометра складала 1–2 нТл. Фахівці Американського геофізичного союзу, що займалися цим проектом, вважають, що Ерос може складатися з величезного числа крихітних намагнічених тіл, але їх магнітні поля орієнтовані випадковим чином і тому результуюче магнітне поле дорівнює нулю.

Власне магнітне поле було виявлене також в астероїда Брайля.

Мають магнітне поле і більшість метеоритів, у тому числі й ті, які походять від таких же астероїдів як і Ерос. Проте існує й гіпотеза про те, що магнітне поле у метеоритів з'явилося в результаті дії високої температури і магнітного поля Землі. У експериментальних умовах «забруднити» магнітним полем вдалося майже половину досліджених зразків такого класу метеоритів, якими є хондрити. Причому значно помітніше піддаються дії зовнішніх магнітних полів дрібні зразки метеоритів.

Можливі кандидати на наявність магнітного поля у тілах Сонячної системи. Основними критеріями для відбору тіл Сонячної системи можуть бути їх розмір і маса. Серед супутників Сатурна — це, перш за все, Титан з масою $1,345 \cdot 10^{26}$ г та радіусом $R_{\text{T}} = 2575$ км. Наприклад, для Ганімеда відповідні параметри є $1,4823 \cdot 10^{26}$ г, $R_{\text{T}} = 2631$ км. Період обертання Титана — 15,95 земної доби, синхронний. Інші супутники Сатурна (та й Юпітера також) мають істотно меншу масу — в 50 і більше разів. Серед супутників Урана масивних супутників немає: найбільший з них — Титанія — має радіус всього ~ 793 км і масу $3,3 \cdot 10^{24}$ г. В системі Нептуна знаходиться єдиний, проте дуже імовірний кандидат на існування власного магнітного поля — це Тритон: його радіус $R_{\text{Тр}} = 1353$ км при масі $2,14 \cdot 10^{25}$ г.; період обертання синхронний — 5,88 земної доби і цей супутник обертається у зворотному напрямку.

Таким чином, поряд з власними магнітними полями у переважній більшості планет і у деяких супутників, було знайдене магнітне поле і в астероїдів. Останній факт заставляє повністю переглянути уявлення про походження цього класу небесних тіл, оскільки очевидно, що магнітне поле могло виникнути лише у досить масивному планетному тілі.

1. Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. — 167 с.
2. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. Магнитное поле планеты Марс по данным спутников «Марс-3», «Марс-5» // Космич. исслед. — 1975. — **13**, № 1. — С. 108–122.
3. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н., Пушков Н.В. Исследование магнитного поля Луны // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1961. — **1**, № 1. — С. 21–29.
4. Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли // Математическое просвещение. — Вып. 24. — М., 2003. — 48 с.
5. Палеомагнитология / Под ред. А.Н.Храмова. — Л.: Недра, 1982. — 312 с.
6. Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. — Л.: Недра, 1968. — 331 с.
7. Acuña M.H., Connerney J.E.P., Wasilewski P., et al. Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial Results of the Mars Global Surveyor mission // Science. — 1998. — **279**, № 5357. — P. 1676–1680.
8. Bland M.T., Showman A.P., Tobie G. The production of Ganymede's magnetic field // Icarus. — 2008. — **198**, № 2. — P. 384–399.

9. *Christensen U.R.* A deep dynamo generating Mercury's magnetic field // *Nature*. — 2006. — **444**, № 7122. — P. 1056–1058.
10. *Connerney J.E.P., Acuña M.H., Wasilewski P., et al.* Magnetic Lineations in the ancient crust of Mars // *Science*. — 1999. — **284**, № 5415. — C. 794–798.
11. *Dolginov Sh., Yeroshenko Ye.G., Sharova V.A.* Study of magnetic field, rock magnetization and lunar electrical conductivity in the Bay Le Monnier // *Moon*. — 1976. — **15**, № 1–2. — P. 3–14.
12. *Kivelson M. G., Bargatze L.F., Khurana K.K., et al.* Magnetic field signatures near Galileo's closest approach to Gaspra // *Science*. — 1993. — **261**, № 5119. — P. 331–334.
13. *Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell Ch. T., et al.* Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa // *Science*. — 2000. — **289**, № 5483. — P. 1340–1343.
14. *Kivelson M.G., Khurana K.K., Volwerk M.* The Permanent and Inductive Magnetic Moments of Ganymede // *Icarus*. — 2002. — **157**, № 2. — P. 507–522.
15. *Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell C.T., et al.* Discovery of Ganymede's magnetic field by the Galileo spacecraft // *Nature*. — 1996. — **384**, № 6609. — P. 537–541.
16. *Ksanfomaliti L.V.* The Magnetic Field of Mercury: A Revision of the Mariner 10 Results // *Solar System Research*. — 1998. — **32**, № 1. — P. 115–123.
17. *Russell C.T., Coleman P.J., Schubert G.* The lunar magnetic field // *Space es. 15. Proc. Open. Meet. Work. Groups Phys. Sci. 17th Plen. Meet. COSPAR, Sao Paulo. 1974. Berlin*. — 1975. — P. 621–628.
18. *Schilling N., Neubauer F.M., Saur J.* Influence of the internally induced magnetic field on the plasma interaction of Europa // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**, № A3. — P. 3203–3206.
19. *Wienbruch U., Spohn T.* A self-sustained magnetic field on Io? // *Planet. Space Sci.* — 1995. — **43**, № 9. — P. 1045–1057.

Надійшла до редакції 16.07.2012