

Магнітні поля зірок та методи їх вимірювання

М.Ю. Скульський¹, Й.І. Романюк²

¹Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

²Спеціальна Астрофізична обсерваторія, Нижній Архиз, Росія

Дається коротка історія та основні етапи досліджень зоряного магнетизму від первинного виявлення його в сонячних плямах до отримання сучасних характеристик глобальних магнітних полів та вивчення їх топології. Розглядаються проблеми методики і техніки вимірювання магнітних полів зір та загальні питання спектрополяриметрії. Основна увага приділяється ефекту Зеемана і проявленню його в спектрах зір, зокрема, розщепленню і поляризації спектральних ліній у зоряних спектрах, а також фотоелектричному вимірюванню в них параметрів Стокса. Розглянуті деякі інші методи діагностики магнітних полів та перспективи їх розвитку. Приводяться конкретні результати досліджень магнітного поля деяких зір та інтерпретації на цій основі інших характеристик природи цих об'єктів.

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ, Скульский М.Ю., Романюк И.И. — Дается короткая история и основные этапы исследований звездного магнетизма от первичного обнаружения его в солнечных пятнах до получения современных характеристик глобальных магнитных полей и изучения их топологии. Рассматриваются проблемы методики и техники измерения магнитных полей звезд и общие вопросы спектрополяриметрии. Основное внимание уделяется эффекту Зеемана и проявлению его в спектрах звезд, в частности, расщеплению и поляризации спектральных линий в звездных спектрах, а также фотоелектрическому измерению в них параметров Стокса. Рассмотрены некоторые другие методы диагностики магнитных полей и перспективы их развития. Приводятся конкретные результаты исследований магнитного поля некоторых звезд и интерпретации на этой основе других характеристик природы этих объектов.

STELLAR MAGNETIC FIELDS AND THEIR MEASUREMENT TECHNIQUES, by Skulsky M.Yu., Romanyuk I.I. — A short history and main steps of stellar magnetic field study (from first discovery in solar spots to modern investigations of general magnetic fields and their topology) are described. The problems of magnetic measurements technique and general questions of spectropolarimetry are discussed. Main attention is given to Zeeman-effect manifestation in stellar spectra, in particular, splitting and polarization of spectral lines and photoelectric measurements of Stokes parameters. Some other diagnostic techniques of magnetic field are discussed. A few concrete results of magnetic field study for some stars and interpretation of observation are demonstrated.

1. МАГНЕТИЗМ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Магнетизм — поширене явище як в окремих космічних об'єктах, так і в зоряних системах. Достатньо добре вивчена структура магнітного поля Галактики, знайдені і досліджені поля кількох сотень зір. Величини вимірюваних полів складають від мікрогауссів у міжзоряному середовищі, через одиниці гауссів (глобальне поле Сонця) до десятка кілогауссів на поверхні невідроджених зір, і, врешті, до сотень мільйонів гауссів на поверхні білих карликів й ще значно більше в нейтронних зорях та магнетарах. Але основне питання — як виникло та еволюціонує магнітне поле зір — не вирішене до сьогодні. Існують дві конкуруючі гіпотези: а) магнітне поле реліктове, воно утворилось разом із зорею із міжзоряного середовища; б) у конвективному ядрі зір працює механізм динамо, а згенероване магнітне поле виноситься на поверхню зорі і спостерігається. Відповідь на нього бачиться у вивченні магнітних полів невідроджених зір різної маси, температури, швидкості осьових обертань, віку і просторового розташування в Галактиці та наслідків роботи цих двох механізмів. Найбільше для цього підходять хімічно-пекулярні (СР) зорі Головної послідовності. СР-зорі мають аномальний вміст хімічних елементів (понижений чи підвищений іноді на кілька порядків). В сучасних каталогах налічується понад 6000 об'єктів їх різних типів у діапазоні спектральних класів В2–F0, а приблизно половину з них відносять до класу магнітних або Ар-Вр зір. Прямі виміри магнітного поля за 60 років спостережень проведені для 800 із них, а магнітне поле зафіксоване приблизно в 350 об'єктах (на початок 1980-х років їх було 130, а на 2000 рік — понад 210). Приріст магнітних зір у нашій сторіччі відбувся за рахунок спостережень на 6-м телескопі САО (Росія) та на 3.6-м і 8-м нових телескопах ESO (Чілі), тобто за рахунок збільшення розмірів телескопів і розвитку техніки спостережень. Із 350 магнітних зір 100 зір є слабші за 8 зоряну величину, а найслабша — біля 13 величини.

Область активних спостережень магнітних зір у Галактиці знаходиться всього в межах 100 — 400 пк, зрідка сягає 700 пк, тобто наразі стосується тільки локальної Місцевої системи зір, центр

якої має галактичні координати $l = 275^\circ$, $b = +12^\circ$. На теперішній час вже мають деякі зв'язки між топологією і орієнтацією магнітного поля окремих зір та структурою магнітного поля Галактики. Відомим є розподіл поляризації в Галактиці. Радіоастрономічні дослідження показали, що в ній поляризація лінійна. Вона виникає при розсіянні світла на пилинках міжзоряного середовища, орієнтованих під дією загального магнітного поля Галактики, яке направлене вздовж спіральних рукавів. В нульових точках $l = 40^\circ$ та $l = 220^\circ$ знак поляризації міняється на зворотній. В локальну область Галактики входять три рукави молодих зір: Персея, Оріона (тут в центрі рукава Сонце — 8 кпк від центру Галактики, 20 пк над площиною Галактики) та Стрільця (1.2 кпк в напрямі на центр Галактики). Місцева система зір має розміри приблизно 200×500 пк, її центр знаходиться на відстані біля 100 пк від Сонця.

Просторовий розподіл магнітних зір (за галактичними координатами) у залежності від типу пекулярності показує, що концентрація цих зір росте до галактичної площини і до центру Місцевої системи зір. Такий же розподіл спостерігається і для хімічно пекулярних зір (CP-зір) із вимірними магнітними полями. Це відповідає просторовому розподілу нормальних зір тих же температур і спектральних класів. Розподіл магнітних CP-зір за променевими швидкостями теж аналогічний — ці зорі обертаються синхронно з іншими зорями Місцевої системи навкруги центру Галактики. Немає відмінностей у швидкостях осьового обертання, у віці та масах магнітних і немагнітних зір. Отже, магнітні зорі і по просторовому розподілу, і по кінематиці не є прибулими, а утворились у Місцевій системі зір і разом з іншими еволюціонують у ній. Магнітні зорі не показують якихось скупченостей чи переважної орієнтації за кутами нахилу осі обертання або магнітної осі. Можна зробити висновок, що аномальний хімічний вміст на поверхні зір утворюється не із міжзоряного середовища, а в процесі еволюції самих зір.

2. ІСТОРІЯ ТА ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗОРЯНОГО МАГНЕТИЗМУ

1892 року Юнг побачив, що одні й ті ж лінії спектру Сонця в його плямах розширені, деякі з них навіть розщеплюються на дві, а поза плямами на поверхні Сонця вони вузькі й різкі. Однак фізика явища виявилась лише за експериментами Зеємана та їх поясненнями Лоренцом, які 1901 року отримали за них (другу після отримання Рентгеном 1900 року) Нобелівську премію з фізики. 1896 року Зеєман експериментував із лампами та магнітами. Він побачив, що сильні лінії натрію (коли світила натрієва лампа) при накладанні магнітного поля розширились (або й розщепились на дві компоненти), а краї ліній стали поляризованими. 1897 року Лоренцу для пояснення явища Зеємана вперше (з часів Демокріта) довелось припустити, що атом подільний (складається з позитивного ядра і негативного електрона), і тоді в межах класичної теорії вдалось пояснити простий ефект Зеємана (складний ефект Зеємана в межах тієї ж теорії був пояснений після створення Бором планетарної моделі атома 1913 року).

1908 року Гел застосував перед щілиною спектрографа сонячного телескопа ромб Френеля і призму Ніколя і записав: “При повороті призми Ніколя на 90 градусів відносна інтенсивність дублетів у плямах помінялась. Деякі з розширених ліній зсунулись при обертанні призми Ніколя, показуючи, що світло в крилах цих ліній циркулярно поляризоване в протилежних напрямках. Зміщення розширених ліній проходить точно так, як виявлено Зеєманом при його перших спостереженнях випромінювання в магнітному полі”. Виміряне магнітне поле в плямах Сонця мало кілька кГс, що відповідає дійсності до цих пір. Плями на Сонці займають дуже незначну площу, тому 1913 року Гел пробував виміряти загальне магнітне поле Сонця, але зеєманівський зсув у лініях вимірювався трудно і Гел зафіксував поле біля 50 Гс (тільки 1953 року Бебкок за допомогою нової фотоелектричної методики показав, що магнітне поле Сонця як зорі складає одиниці гауссів). Гел пробував розробити апаратуру для вимірів і магнітних полів зір, але фактично до робіт Бебкока [2, 3] магнітні поля зір не мірялись. Трудність полягала в тому, що зорі, на відміну від Сонця, фактично розглядаються як точки і треба було шукати зорі з великим загальним магнітним полем. Кандидати у магнітні зорі запропонував Бебкок серед A-зір, виходячи із домінуючої на той час гіпотези, що загальне магнітне поле Сонця генерується механізмом динамо з причини його осьового обертання. Періоди обертання цих зір приблизно у 30 разів менші за сонячний, тому поле мало бути у стільки ж більшим (тобто виходило з невірної тепер положення про те, що величина магнітного поля зорі обернено пропорційна періоду її осьового обертання). Але розрахунок показав, що навіть очікуване поле в 1500 Гс через розширення ефектом Зеємана вузьких спектральних ліній A-зір виміряти мікроскопом не вдасться. І Бебкок вирішує проблему, запропонувавши вимірювати повздовжню компоненту загального поля зорі. Для цього він сконструював спеціальний диференціальний аналізатор для проявлення явища Зеємана не по розщепленню компонент спектральних ліній, а по їх круговій та лінійній поляризації.

При чому, якщо зоря має вузькі лінії та орієнтована так, що спостерігається в основному повздовжне поле, то ефективніше використати аналізатор кругової поляризації. Це дозволяє поміряти відносне зміщення поміж лівим і правим обертанням електричного вектора в кожній досліджуваній лінії. На той час вже були відомі хімічно-пекулярні Ар-зорі, в яких лінії спектру були не тільки вузькими, але й значно інтенсивнішими за лінії нормальних А-зір. На диво, перше ж спостереження Ар-зорі 78 Діви із аналізатором кругової поляризації принесло Бебкоку очікуваний результат — магнітне поле величиною в 1500 Гс! З того часу прямий спектральний метод — дослідження ефекту Зеемана в різних його проявах — дозволяє надійно вимірювати магнітні поля (в даний час понад 350) таких зір. Їх поля досягають декількох десятків кГс, а кількість цих зір росте по експоненті до межі виявлення магнітного поля в 100 Гс.

Десь до 1990 року основним детектором у вимірах магнітного поля була фотопластинка при відношенні сигнал/шум (С/Ш) біля 20 (стандартна точність біля 5%). Якісне вимірювання магнітного поля на поверхні зорі залежало від кількості вимірних ліній у спектрі і, в кращому разі, при великій кількості вузьких ліній точність виміру сягала 200 Гс. На фотопластинках не можна було детально розглядати форму профілів переважно металічних вимірюваних ліній, а тільки їх еквівалентні ширини та відносні зсуви — доплерівські (що давали променеві швидкості) та зееманівські (вони, власне, і давали повздовжне магнітне поле).

Новим кроком стало застосування магнітографа до фотоелектричного вимірювання магнітних полів зірок через аналіз ефекту Зеемана методами спектрополяриметрії за параметрами Стокса (започатковані вперше в кінці 1960-х років у Кримській Астрофізичній обсерваторії). Прилад, на жаль, був одноканальним, тобто сканувався профіль однієї лінії. Але важливим був не сам точний профіль, а можливість знайти поляризацію та її розподіл по профілю лінії. Ступінь кругової поляризації в спектральній лінії цим методом з часом вже міряли з точністю до 0.01%, накопичуючи відношення С/Ш до сотень мільйонів фотоелектронів (їх статистика задовольняла розподілу Пуассона і точність визначалась коренем квадратним із кількості набраних фотоелектронів). Але в наш час і фотоелектричні вимірювання магнітних полів вже майже не проводяться.

В кінці 1980-х років практично всюди, починаючи з великих телескопів, як детектор стали застосовувати ПЗЗ-матриці. Стандартна точність спостережень на них становить біля 0.3% (тобто сигнал/шум зріс до 300–500). Це означає, що така точність є в кожному елементі матриці. Якщо, скажімо, при 1% кругової поляризації (V-параметр Стокса) маємо 500 Гс, то точність виміру складе 150 Гс. При вимірюванні 100 ліній одержимо, поділивши на корінь квадратний із ста, загальну точність в 15 Гс. Це дозволяє вивчити профіль лінії і розподіл поляризації в ній з точністю, принаймні, на порядок вищою, ніж на фотопластинці. Але як і на фотопластинці, на ПЗЗ-матриці можна одночасно працювати з багатьма спектральними лініями. Правда, в кожному каналі матриці точність значно нижча, як на фотопомножувачі, бо не дозволяє динамічний діапазон. Проте мається багато каналів (сучасні ПЗЗ-матриці мають, наприклад, в САО 2000 × 2000 елементів). Якщо на фотографічних спектрах практично не можна було вивчати магнітні поля складної структури, то до аналізу ПЗЗ-спектрів тепер застосовують вельми складні і великі математизовані програми. Це і зв'язано перш за все з тим, що почали аналізувати профілі ліній (отримуючи інколи зі спостережень всі чотири параметри Стокса), а не просто їх зміщення в спектрі. Аналіз ПЗЗ-спектрів значно ускладнився, але нові методи програмування і моделювання дозволяють водночас складати на поверхні зір карти магнітного поля складної конфігурації та карти вмісту хімічних елементів в утворених поверхневих аномаліях.

3. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЗІР

В наш час немає сумніву в існуванні великомасштабних магнітних полів у Галактиці й за її межами. Отримані надійні докази про існування загальних і локальних полів у зір різних типів. Найбільш поширеним способом вивчення магнітних полів у космосі є аналіз проявів явища Зеемана в лініях різних хімічних елементів методами спектрополяриметрії.

3.1. Явище Зеемана

Видима картина розщеплення спектральних ліній в явищі Зеемана (яке повністю описується квантовою теорією) залежить від напрямку спостереження по відношенню до напрямку магнітного поля. У випадках відносно слабких полів (до 10 кГс) реалізується L–S-зв'язок і маємо два види зееманівського розщеплення: нормальний та аномальний. При спостереженні перпендикулярно магнітному полю (поперечний ефект) всі компоненти лінії поляризовані лінійно: центральна частина паралельно полю (π -компоненти), а частина компонент, симетричних відносно π -компоненти, перпендикулярно до поля (σ -компоненти). При спостереженнях вздовж поля (повздовжній ефект) видимими є тільки бокові

σ -компоненти, але натомість з круговою поляризацією. Якщо лінія при поперечному ефекті розщеплюється тільки на три компоненти — це і є нормальний ефект Зеемана (реалізується для синглетних ліній, для яких спин $S=0$), а розщеплення лінії в магнітному полі на більшу кількість компонент називають аномальним ефектом Зеемана. Але незалежно від типу зееманівських картин розщеплення, останні є симетричними відносно центру лінії. Таке розщеплення в лінії може у першому наближенні бути описане параметром z — ефективним фактором Ланде, від якого залежить число компонент у лінії та відносна віддаль між ними, їх інтенсивність і поляризація. Переважно величини z для різних ліній знаходяться в межах 0.5–2.0 (в одиницях магнетона Бора) і характеризують магнітну чутливість лінії (зрозуміло, що для вимірів магнітного поля вибирають лінії з великими значеннями фактора z). В той же час, масштаб картини розщеплення лінії пропорційний до величини магнітного поля.

Так як у спектрі найпростіше вимірювати зміщення ліній, то основним методом визначення магнітного поля зорі є вимірювання повздовжнього ефекту Зеемана з використанням аналізаторів кругової поляризації. Цей метод вперше і був запропонований і реалізований Бебкою, який в якості фазозосувачого елемента використав слюдяну пластинку (тому він міг працювати лише в обмеженій до 200 ангстрем якійсь ділянці спектра). Цей класичний аналізатор (з яким Бебкок працював і на найпотужнішому в той час 5-м Паломарському телескопі) в подальшому був замінений на більш досконали ахроматичні ромби Френеля, виготовлені з ісландського шпата (вони використовуються, зокрема, на 6-м телескопі Спеціальної та на 2.6-м телескопі Кримської Астрофізичних обсерваторій). З допомогою цих аналізаторів світло зорі розкладається на два промені і отримуються два, а саме, лівоциркулярно та правоциркулярно поляризовані спектри (розташовані на спектрограмі, як правило, між спектрами порівняння). При наявності на поверхні зорі магнітного поля вимірюється зееманівський зсув у цих двох спектрах як різниця $\Delta\lambda$ між положеннями $(\sigma+)$ - та $(\sigma-)$ -компонент кожної окремої лінії. Оскільки зсув $\Delta\lambda$ строго пропорційний повздовжнім компоненті напруженості ефективного магнітного поля B_e , а треба було на спектрограмі вимірювати дуже малі очікувані зсуви в лініях при спостереженні відносно слабкого магнітного поля, усередненого по поверхні зорі, то Бебкок і почав із спостережень Ар-зір. Вони характеризуються вузькими, але аномально глибокими (сильними) лініями порівняно із лініями нормальних А- і В-зір, тому й точність вимірів для них вища (при цьому він вважав спочатку, що бачить зорі із полюса, тобто орієнтованими вздовж силових ліній поля). Величина повздовжнього магнітного поля визначається за формулою, теж запропонованою Бебкою: $\Delta\lambda = 4.67 \cdot 10^{-13} \lambda^2 z B_e$, де B_e — величина повздовжньої компоненти ефективного магнітного поля в гауссах (воно рівне $0.311 B_p$, де B_p — магнітне поле на полюсі зорі), $\Delta\lambda$ — зсув ліній у протилежно поляризованих спектрах в ангстремах, z — фактор Ланде відповідного енергетичного переходу. З формули бачимо теж, що $\Delta\lambda$ пропорційне до λ^2 , але практично більшість вимірів проводилися в синьому участку спектру, в якому є найбільше зручних для вимірювання ліній металів. Цей прямий метод вимірювання магнітних полів невідроджених зір називається класичним фотографічним, хоч ця ж методика застосовується тепер на ПЗЗ-матрицях, тим більше, що використання цифрової реєстрації даних дозволило автоматизувати процес вимірювань магнітних полів та на порядок підняло точність цих вимірів.

З часом стало ясно, що Бебкок дуже вдало підібрав об'єкти для пошуку зоряного магнетизму: тільки в A_p - і B_p -зорях були виявлені регулярні, впорядковані великомасштабною структурою, достатньо великі магнітні поля (виміряні переважно від одиниць до кількох десятків кілогауссів). Важливе значення при цьому має порівняння нових і старих даних, збереження системи магнітних вимірювань, що є необхідним при дослідженні довгоперіодичної змінності магнітних зір. Отримані цим методом магнітні поля СР-зір, як правило, досить добре інтерпретуються геометрично простими дипольними полями.

В дуже сильних магнітних полях (від 10 кГс і далі) вимірювання магнітного поля зір ускладнюється. Слід тут враховувати явище Пашена–Бака, що виникає в результаті розриву L–S-зв'язку в сильному магнітному полі (магнітне розщеплення стає більшим за мультиплетне), і аномальний ефект Зеемана перетворюється в нормальний. Це характеризується несиметричністю розщеплень спектральних ліній відносно їх центру, зміною інтенсивності ліній, зміщенням довжини хвилі лінії в цілому. Для суперсильних магнітних полів білих карликів та нейтронних зір (10^6 – 10^8 Гс) можна вимірювати і квадратичний ефект Зеемана як зсув ліній (він пропорційний B_e^2) у короткохвильову область шкали довжин хвиль. Однак, це окреме питання.

3.2. Фотоелектрична методика вимірювання поляризації в крилах ліній

Цей метод вперше розроблений у Кримській Астрофізичній обсерваторії Северним [17]. Він застосував сонячний магнітограф до фотоелектричного вимірювання магнітних полів зірок, перенесений

згодом на 2.6-м телескоп. Світло, зібране телескопом, проходить через електромодулятор, що грає роль чвертьхвильової пластинки — періодична зміна знаку напруги аналогічна обертанню поляроїда. Далі промінь світла проходить аналізатор, напрям поляризації в якому має бути під кутом 45° до осей модулятора. Аналізатор пропускає світло, поляризоване лінійно вздовж заданого напрямку, і не пропускає перпендикулярно поляризоване світло. Потім світло входить у спектрограф, на виході з якого після вузької щілини розташований фотопомножувач. Різниця сигналів від двох ліво- і право-поляризованих спектрів дає V -параметр Стокса, а їх сума — I -параметр Стокса в тому ж елементі. Щілина може рухатися вздовж спектра. Цим методом вимірюється кругова поляризація в крилах ліній. Величина магнітного поля може бути визначена двома методами: диференціальним та інтегральним. В диференціальному методі вимірюється поляризація в крилі лінії, визначається крутизна профіля лінії в цій же точці крила і на їх основі величина магнітного поля. В інтегральному методі магнітне поле визначається як зсув центрів ваги у розподілі V -параметра Стокса в лівім і правім крилах лінії, що нагадує методику класичних фотографічних спостережень.

У зв'язку з попереднім вже час коротко охарактеризувати параметри Стокса, які стали потужно використовуватися в дослідженні магнітних полів зір. Поляризація світла в загальному випадку описується вектором Стокса, що складається з чотирьох елементів, які мають розмірність інтенсивності. Перший вектор Стокса I визначає загальну інтенсивність променя світла, другий і третій параметри Q і U дають інтенсивність світла, яке лінійно поляризоване в різних площинах, а четвертий параметр V дорівнює інтенсивності циркулярно поляризованої складової світла. При наявності параметрів V , Q і U — світло еліптично поляризоване. Для реєстрації спостережень використовується оптична система, що працює як поляроїд і стоїть перед щілиною спектрографа. Щоби отримати, наприклад, параметр Q , необхідно отримати профілі спектральної лінії при взаємно перпендикулярних положеннях поляроїда. Різниця цих профілів і дасть профіль параметра Q . Щоб отримати тепер профіль параметра U , треба повернути вісь поляроїда на 45° відносно початкового положення і знову повторити спостереження при взаємно перпендикулярних положеннях поляроїда та взяти їх різницю. Отримані профілі лінійної поляризації містять багато деталей, складних для їх інтерпретації, але мають значно меншу амплітуду, ніж профілі кругової поляризації. Цим пояснюється більш широке використання кругової поляризації для досліджень геометрії магнітного поля зір, а також і тим, що, на відміну від попередніх двох параметрів, параметр V є інваріантом відносно повороту осі аналізатора в картинній площині.

Фотоелектричний магнітометр дозволяє вимірювати дуже слабку кругову поляризацію в крилах спектральних ліній (тобто V -параметр Стокса) з точністю до 0.01%. Перейшовши за певною методикою (використовуючи, зокрема, параметр крутизни лінії) до зееманівських зсувів, можна отримати для яскравих об'єктів точність вимірів магнітного поля до 5 Гс. Однак головна причина її обмеженого застосування — одноканальність приладу (тобто в певний момент спостереження за зорею ведуться сканування профіля тільки однієї конкретної лінії спектру). Якщо цим методом вимірювати кругову поляризацію у вузьких крилах ліній металів, то потрібно мати дуже вузьку щілину перед фотопомножувачем. Це потребує великого спектрального розділення і потужного потоку світла в лінії. Отже, спостереження і інтерпретація результатів значно ускладнюються порівняно з прямими вимірами зееманівських зсувів у цих лініях. Більш ефективними виявились спостереження на магнітометрах, що працюють у крилах широких водневих ліній із широкою щілиною і великим потоком світла. Це особливо важливо для вимірювань магнітних полів білих карликів і швидкообертючих СР-зір, бо не потребують при спостереженнях надто високого спектрального розділення (перший у світі водневий магнітометр був створений у Канаді Енджелом і Ландстрітом [10], а другий — в САО, який активно використовувався на 6-м телескопі [21]).

З появою багатоканальних цифрових детекторів — ПЗЗ-матриць стало можливим вимірювати поляризацію одночасно в багатьох лініях. Зокрема, для пошуків дуже слабких магнітних полів на поверхні зір розроблений так званий LSD-метод, в якому сигнали від багатьох ліній сумуються як експериментально, так і математично. При цьому росте співвідношення С/Ш. Наприклад, для дуже яскравих холодних зір зафіксовані виміри поляризації, що відповідають повздовжньому магнітному полю в 0.5 Гс. Великим досягненням у розвитку спостережувальних засобів магнітометрії став побудований в обсерваторії Пік-дю-Міді ешелле-спектрополяриметр MuSiCoS [9]. На ньому спостерігаються IQUV-спектри, тобто всі чотири параметри Стокса, в області спектру понад 2000 ангстрем з розділенням в 35000. Для редукції цих спектрів були розроблені нові кореляційні методи.

4. МЕТОДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ПОВЕРХНІ ЗІР

Для вивчення конфігурації магнітного поля на поверхні зорі і його зв'язку з аномаліями її хімічного складу необхідно знати ці величини в окремих точках поверхні зорі. Це і досягається методом доплер-зеєманівського (Д-З) мапування (картування) поверхонь зір, що з точки зору математики відноситься до класу некоректно поставлених задач. Вперше математична модель рішення оберненої задачі з використанням локальних (а не інтегральних) профілів ліній була запропонована Хохловою (1983). А в роботах Піскунова (2001) і О.П.Кочухова [12] вже розроблені якісні програми, що дозволяють, наприклад, водночас мапувати вектор магнітного поля та визначати вміст хімічних елементів. Ландстрит [15] з цією метою рішає пряму задачу методом одночасного підбору хімічної карти та конфігурації магнітного поля (цей метод надто трудомісткий). Метод реконструкції магнітних полів пекулярних зір, що базується на прямому моделюванні профілів Стокса, запропонував Баньюло [1]. Гертом та Глаголевським [8] розроблено метод моделювання магнітних полів, що базується на розподілі "магнітних зарядів". Всі ці методи виходять з того, що із-за обертання зорі лінії в її спектрі бачаться розширеними. Якщо зоря обертається із температурними, хімічними та магнітними плямами на поверхні, то, провівши спостереження вздовж періоду обертання, можна виміряти періодичну змінність блиску, дослідити змінність спектральних ліній та виміряти поляризацію в них. Використовуючи спостереження та математичні методи моделювання, можна виміряти і дослідити поверхневі магнітні поля різної величини та складної конфігурації. В принципі, це має теж дати поняття про фізичні процеси в атмосферах зір із магнітними полями, зокрема, про джерела їх енерговиділення. Для цього необхідно мати спостережуваний матеріал дуже високої якості, зокрема, IQUV-спектри з високим спектральним розділенням і відношенням С/Ш, із щільним покриттям по фазі осьового періода для кожної зорі. В перспективі із застосуванням телескопів-інтерферометрів в оптичному діапазоні з базою від кількох до десятків кілометрів можна чекати прямого спостереження дисків магнітних СР-зір та сонячно-подібних зір, а звідси, плям розподілу хімічних елементів і конфігурації магнітного поля на їх поверхні.

5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ПРИРОДИ ДЕЯКИХ ЗІР

Практичні задачі, які пов'язані з вивченням магнітних, зокрема, СР-зір вельми широкі: від аналізу швидкостей обертання магнітних хімічно пекулярних зір, аналізу хімічного складу, дослідження стратифікації хімічних елементів в атмосферах зір, картування атмосферних неоднорідностей, вивчення вертикального градієнта магнітного поля і до пошуку нових магнітних зір та статистичних досліджень розподілу магнітних полів зір і їх орієнтації в локальній області Галактики. Деякі сучасні результати основних статистичних досліджень магнітних зір ми привели у вступній частині. Однак наші уявлення про природу зір із магнітним полем складаються також на підставі вивчення окремих зір та навіть подвійних систем, причому деколи вони нас небезпідставно інтригують, будучи стимулом до вивчення зоряного магнетизму як цілісного явища. Ми спробуємо привести деякі аргументи на користь цього.

5.1. Магнетизм Сонця

Як нам вже відомо, магнітне поле в плямах Сонця почав міряти Гел 1908 року, Воно мало різні значення в межах кількох кГс, що відповідає дійсності до цих пір. Але плями на Сонці складають біля процента його поверхні, тому ще 1913 року Гел пробував вимірювати загальне магнітне поле (ЗМС) Сонця і зафіксував в областях без плям поле біля 50 Гс. Тільки 1953 року Бебкок показав, що магнітне поле Сонця складає одиниці гауссів. Однак детальне вивчення глобального магнітного поля Сонця як зорі почали 1968 року в Кримській астрофізичній обсерваторії Северний із його співробітниками (спеціальною методикою зводячи поверхню Сонця до точки). На теперішній час каталог вимірів загального магнітного поля Сонця в шести обсерваторіях світу складає понад 18 тисяч добових значень. За даними спостережень і усередненими вимірами на чотирьох обсерваторіях середня величина ЗМС складає всього 0.45 Гс, з амплітудою зміни ЗМС в (0.22 ± 0.03) Гс [20]. Однак, як виявили ці ж дослідники, піврічні усереднені величини магнітного поля за 34 роки спостережень показують складні варіації поля в межах біля ± 0.5 Гс синхронно з 11-річним циклом сонячної активності. Ці дані добре корелюють із секторною структурою міжпланетного магнітного поля, міняючись синусоїдально з головним періодом сонячного обертання у 26.891 дня [11] (цей період знаходиться в тісних резонансах 2:7 та 3:7 із орбітальним та осьовим обертаннями Меркурія; ЗМС володіє також вторинними періодичностями, близькими до орбітальних періодів Землі та Венери; маються й інші резонанси).

5.2. Магнетизм CP-зір

Хоч CP-зорі є класом найбільш вивчених магнітних зір, та вони настільки різноманітні, що важко знайти дві зорі, схожі між собою. Їх вивчення залишається і надалі актуальним. Їх магнітні поля досить сильні і мають, як правило, просту структуру. Це дозволяє вивчати різні тонкі ефекти, наприклад, магнітну дифузію хімічних елементів. Вона, маючи швидкість біля 0.01 м/с, за мільйони років в умовах стабільної атмосфери дозволяє створити на поверхні зорі плями різних хімічних елементів у залежності від величини та конфігурації магнітного поля.

Приведемо два приклади хімічно-пекулярних зір, які були відкриті як магнітні за програмою спостережень на 6-м телескопі Спеціальної Астрофізичної обсерваторії.

Перша з них HD178892 є відносно холодною CP-зорею з ефективною поверхневою температурою в 7700 K із аномально підсиленими спектральними лініями SrCrEu. Спостереження показали [13], що ця зоря володіє одним із найбільших виявлених магнітних полів. Вузькі спектральні лінії ($v \sin i = 9$ км/с, що вказує на повільне обертання зорі) дозволили знайти розщеплені зееманівські компоненти, які вказують на поле 17.5 кГс на поверхні зорі. Повздовжній компонент магнітного поля B_e міняється вздовж осевого періоду обертання від +2 до +7 кГс за синусоїдальним законом — див. рис.1. Побудована модель магнітного поля підтверджує, що воно є дипольним і досягає по величині до 23 кГс на полюсах диполя. При цьому вісь обертання зорі є нахиленою на кут $i = 36^\circ$ до напрямку на спостерігача, а вісь магнітного диполя є нахиленою до осі обертання зорі на кут $\beta = 37^\circ$ (так звана модель нахиленого ротатора).

Друга зірка — HD 45583 [14]. Це приклад зорі з виявленою незвичайною, тобто несинусоїдальною кривою зміни повздовжнього компонента магнітного поля B_e , який міняється в межах від -2 до $+4$ кГс — див. рис.2. Поблизу фази 0.0 періоду осевого обертання, рівного 1.177d, на кривій зміни магнітного поля мається вторинний мінімум. Ця зоря більш гаряча за попередню, з ефективною температурою на поверхні в 13000 K та аномальними лініями кремнію. Вона належить до розсіяного зоряного скупчення NGC 2232 з віком біля 30 мільйонів років, тобто теж молодша за попередню (більш молоді зорі мають тенденцію до складніших кривих магнітного поля). Для опису спостережень прийшлося створити відносно складну модель структури магнітного поля цієї зорі, яку можна коротко описати так: мається дипольний компонент поля, який зсунутий по відношенню до центра зорі на 0.6 її радіуса, а співосно з диполем розташований октуполь. Магнітне поле є значно сильнішим на полюсах октуполя, ніж на полюсах диполя, а саме: поле на полюсах диполя складає 17 кГс, тоді як на полюсах октуполя — аж 45 кГс. Вісь обертання цієї зорі нахилена під кутом 45° до променя зору спостерігача, а кут між віссю диполя та віссю обертання зорі становить 120° . Безумовно, така цікава зоря продовжує інтенсивно вивчатися і її попередня модель може дещо змінитися.

5.3. Магнітне поле в подвійних зорях

Сучасні дослідження показують, що доля подвійних зірок серед магнітних CP-зір приблизно в два рази менша, як серед нормальних зір. Тим цікавіші дослідження окремих подвійних зоряних систем.

Одним із найважливіших результатів новітніх спостережень масивної взаємодіючої системи β Ліри, як одного з найбільш досліджуваних об'єктів астрофізики, є відкриття і дослідження магнітного поля [18]. Це було першим визначенням магнітного поля яскравого компонента у подвійній зорі. Ця подвійна (із поволі зростаючим орбітальним періодом, близьким тепер до 12.94 дня) знаходиться

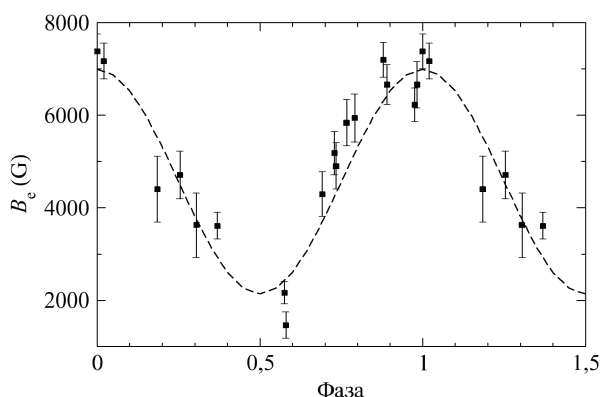


Рис. 1. Змінність повздовжньої компоненти магнітного поля зорі HD 178892 з фазою періоду осевого обертання

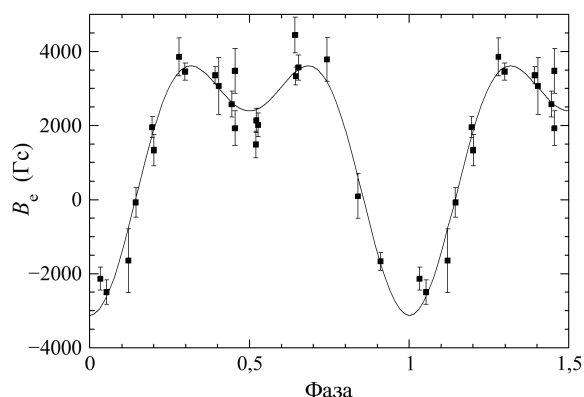


Рис. 2. Змінність повздовжньої компоненти магнітного поля зорі HD 45583 з фазою періоду осевого обертання

на завершальній стадії первинного переносу речовини від більш яскравого компонента-донора класу ВІІІ (з масою в 3 сонячні) до значно масивнішого (13.5 сонячних мас), але значно меншої світності акретора. Швидка втрата і перенос маси (10^{-5} мас Сонця за рік) призвели до спостереження розвинених навколосоряних газових структур: потоків поміж компонентами, оболонки, що розширюється від подвійної системи, та масивного диску, яким акретор замаскований від спостерігача. Виміри зееманівських розщеплень спектральних ліній атмосфери донора (на спектрограмах, отриманих на 6-м телескопі Спеціальної Астрофізичної обсерваторії) виявили змінне магнітне поле із усередненою величиною за період в 1.2 кГц. Ці виміри апроксимувались квазісинусоїдальною кривою з максимумами поля у фазах орбітального періода 0.355P та 0.855P, що могло свідчити про дипольний характер магнітного поля донора. Виявилось, що змінне магнітне поле явно корелює із змінними характеристиками інших фізичних параметрів у цій системі та впливає на характер формування газових структур в околі обох компонентів. Але звернемо увагу на незвичний зв'язок магнітного поля із вторинною періодичністю різних фізичних процесів на часах як менших, так і більших від орбітального періоду, що теж за останні десятиліття відкриті та досліджені як нове явище у системі β Ліри [19]. Там показано, скажімо, що один із добре визначених вторинних періодів, а саме 282.425-денний період, виявлений із кривої блиску системи, може бути рівним водночас періоду припливної хвилі на поверхні донора та періоду обертання газового диску навкруги акретора. Це може свідчити і про синхронізацію цих періодів. Цікаво, що 282.425-денний період є першою гармонікою періоду биття між орбітальним періодом та осьовим періодом донора. І саме осьовий період донора можна було вперше визначити на підставі досліджень магнітного поля на його поверхні. В подальшому, виміри магнітного поля за допомогою ПЗЗ-матриць хоч і зменшили величину магнітного поля, але підтвердили його присутність і складний характер змінності. На частотному спектрі потужності магнітного поля було виявлено нові періоди, що свідчить про наявність резонансних явищ у активно взаємодіючій системі β Ліри.

Другим прикладом є дослідження магнітного поля зорі γ Пегаса (Альгеніб). Це класична низькоамплітудна змінна зоря типу β Цефея, що пульсує в чисто радіальній моді з періодом $P_{\text{puls}} = 0.1517d$. Більш того, γ Пегаса — це подвійна зоря з орбітальним періодом, рівним 6.8161d. Яскравий компонент подвійної системи є гарячою зіркою класу В2ІV з практично нормальним хімічним складом, масою біля 8.3 мас Сонця та радіусом біля 7 радіусів Сонця. Він на порядок яскравіший за свого менш масивного компонента. Дуже вузькі лінії із $v \sin i \leq 4$ км/с добре надаються до точного визначення повздовжньої компоненти напруженості ефективного магнітного поля B_e на поверхні яскравого компонента. Однак довгий час магнітне поле γ Пегаса не було виявлене. Лише нові точні методи ПЗЗ-спостережень і дослідження слабкого магнітного поля зір, розвинуті в Кримській Астрофізичній обсерваторії, привели до надзвичайно цікавих результатів. Бутковська і Плачинда [5] вперше виявили магнітне поле і, на основі цього, вперше вичислили період осьового обертання яскравого компонента (6.6538d), що є на 2.4% меншим за орбітальний (який теж уточнено). Не дивлячись на невелику амплітуду (поле міняється в межах від -10 до $+30$ Гс), чітко видно синусоїдальну змінність магнітного поля з осьовим періодом, тобто яскравий компонент є нахиленим ротатором. Тому, хоч амплітуда спостережуваної величини повздовжньої складової магнітного поля складає всього два десятки Гс, проведене авторами моделювання методом “розподілу магнітних зарядів” показує глобальне поле на полюсі величиною до 570 Гс при куті нахилу осі обертання до променя зору $i = 9^\circ$ та куті між віссю обертання та віссю диполя $\beta = 85^\circ$. Вперше в такого роду дослідженнях γ Пегаса із високою надійністю виявлена також змінність магнітного поля в межах 14 Гс із періодом радіальної пульсації. Це означає, що на криву змінності загального магнітного поля яскравого компонента з осьовим періодом в 6.6538d більше 40 разів накладається пульсаційна складова зміни поля з періодом в 0.1517d із меншою в три рази амплітудою. Уяву про ці нові результати дає рис.3, який люб'язно скомпонували В.Бутковська та С.Плачинда за нашим проханням.

6. ЗАВЕРШУЮЧЕ СЛОВО

Підсумовуючи, можемо підкреслити, що історично склалось так, що найбільш дослідженими є магнітні поля хімічно пекулярних зір, що належать до спектральних класів А і В. Завдяки вузьким і сильним спектральним лініям вони найбільш інтенсивно спостерігаються і вивчаються. Однак не менший інтерес тепер вже має пошук і дослідження магнітного поля в зорях іншої фізичної природи та інших спектральних класів. Сучасні більш досконалі апаратура та методи виявлення слабких магнітних полів дозволили, по-перше, виявити магнітне поле величиною від кількох сотень до 1 кГц вже у більше двох десятків хімічно нормальних гарячих зір. Для деяких з них добре вивчені глобальні характеристики поля і, як правило, виявлено, що повздовжня складова їх магнітного поля

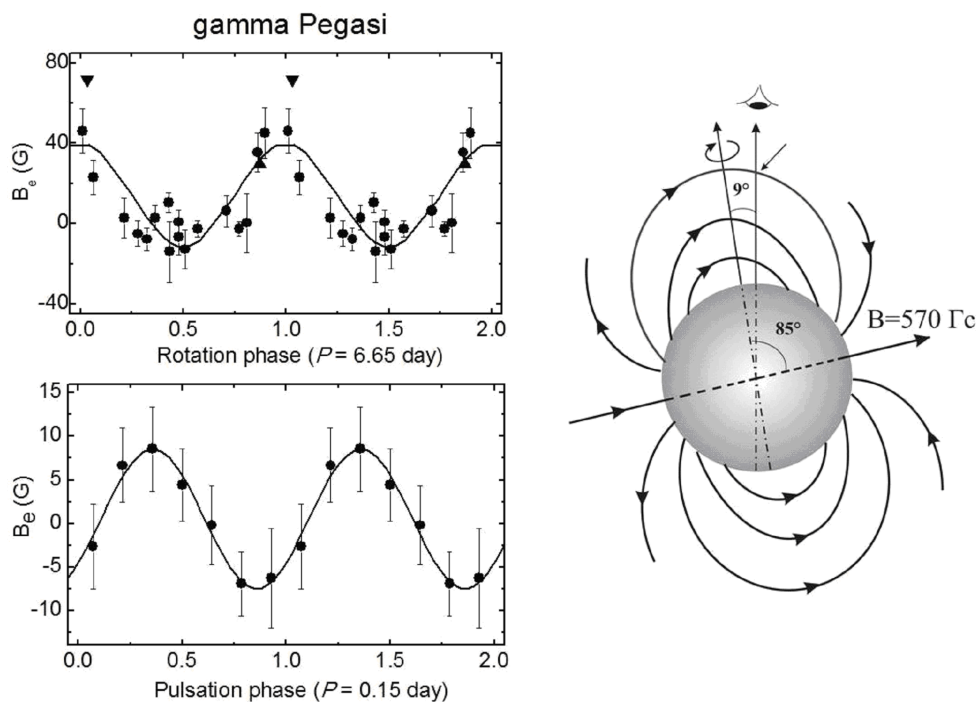


Рис. 3. Зліва, зверху вниз: зміна повздовжнього магнітного поля яскравого компонента γ Пегаса з періодом осевого обертання (середнє значення поля становить 11 Гс з амплітудою зміни в 20 Гс) та з періодом радіальної пульсації цього компонента (амплітуда зміни поля складає 7.2 ± 0.2 Гс). Справа: ілюстрація дипольного магнітного поля яскравого компонента γ Пегаса — нахилений ротатор: зорю практично видно з полюса обертання та з магнітного екватора

мінється синусоїдально з періодами осевого обертання зір (див., скажімо, дослідження магнітного поля β Цефея чи зорі ω Огі класу B2IIIe — [16]). Такий характер зміни поля добре описується математично і свідчить про дипольну конфігурацію великомасштабного магнітного поля на зорі як нахиленому ротаторі. По-друге, не менш важливими з точки зору питань загальної еволюції зір та походження їх зоряного магнетизму є спостереження магнітних зір сонячного типу та ще холодніших зір із розвинутими конвективними оболонками. Наприклад, зараз виявлені магнітні поля холодних зір головної послідовності класів G–K, які покривають десятки процентів їх поверхні (на Сонці — 1%). Величини їх магнітного поля, як і в сонячних плямах, складають 1–3 кГс. Ясно, що ці магнітні поля не можуть бути у вигляді трубок, як це є на сонячних плямах. Зараз відомо понад 50 магнітних зір класів G–K. Стає вельми актуальним дослідження таких об'єктів зі складною топологією їх зашлямлених поверхонь як у сенсі дослідження структури і природи їх магнітного поля, так і розподілу різних хімічних елементів по поверхні зорі. Має сенс нагадати тут і про об'єкти з надпотужними магнітними полями в сотні мільйонів гауссів — білі карлики. Цікаві фізичні процеси, що відбуваються в них, теж потребують всестороннього вивчення.

Таким чином, можна стверджувати, що магнетизм — явище дуже поширене в Галактиці і його дослідження має незаперечний інтерес для фундаментальної фізики та розуміння еволюційних процесів у Всесвіті. Однак найближчим часом основні наші знання про структуру та природу магнітного поля зір будуть продовжувати одержуватись із спектральних даних, в яких зорі досліджуються як світні точки. Тут у перспективі бачиться побудова ще потужніших телескопів із великими спектрографами та з досконалішою і чутливішою спектрополяриметричною апаратурою. Однак для безпосереднього дослідження поверхні зір повинні бути збудовані оптичні інтерферометри із базою від кількох до десятків кілометрів, що є перспективою на найближчі десятки років.

1. *Bagnulo S.* // In: "Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram", eds.: G.Mathys, S.K.Solanki, D.T.Wckramasinghe, ASP Conf. Series. — 2001. — **248**. — P.287.
2. *Babcock, H.W.* // *Ap.J.* — 1947. — **105**. — P.105.
3. *Babcock, H.W.* // *PASP.* — 1947. — **59**. — P.112.
4. *Babcock, H.W.* // *Ap.J.* — 1953. — **118**. — P.387.
5. *Butkovskaya V.V., Plachinda S.I.* // *As.Ap.* — 2007. — Manuscript N5563, ESO.

6. *Hale G.E.* // *Ap.J.* — 1908. — **28**. — P.315.
7. *Hale G.E.* // *Ap.J.* — 1913. — **38**. — P.27.
8. *Gerts E., Glagolevsrij Yu.V.* // In: “Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram”, eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe / *ASP Conf. Series.* — 2001. — **248**. — P.333.
9. *Donati J.-F., Catala C., Wade G.A., Gallou G., Delaique G., Rabou P.* // *As.Ap.Suppl.Ser.* — 1999. — **134**. — P.148.
10. *Angel J.R.P., Landstreet J.D.* // *Ap.J.* — 1970. — **162**. — P.261.
11. *Kotov V.A.* // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* — 2007. — **103**, № 2. — С.295.
12. *Kochukhov O.P.* // In “Magnetic stars”, eds.: Yu.V. Glagolevsrij, D.O. Kudryavtsev, and I.I. Romanyuk. — *Nizynij Arkhyz.* — 2004. — P.64
13. *Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I.* // In “Physics of magnetic stars”, Proceed of Intern. Conference, (Eds.: D.O. Kudryavtsev and I.I. Romanyuk), *Nizhnij Arkhyz.* — 2007. — P.283.
14. *Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Semenco E.A.* // *Scalnat Pleso Contribution.* — 2008. — **38**. — P.427.
15. *Landstreet J.D.* // *Ap.J.* — 1990. — **352**. — P.15.
16. *Neiner C., Hubert A.-M., Fremat Y., Floquet M., Jankov S., Preuss O., Henrichs H.F., Zores J.* // *As.Ap.* — 2003. — **409**. — P.275.
17. *Severny A.B.* // *Ap.J.* — 1970. — **159**. — P.179.
18. *Скульский М.Ю.* // *Письма в Астрон. Ж.* — 1982. — **8**. — С.238.
19. *Skulsky M.Yu.* // In “Physics of magnetic stars”, Proceed of Intern. Conference, (Eds.: D.O. Kudryavtsev and I.I. Romanyuk). — *Nizhnij Arkhyz.* — 2007. — P.223.
20. *Haneychuk V.I., Kotov V.A., Tsap T.* // *As.Ap.* — 2003. — **403**. — P.1115.
21. *Штоль В.Г., Бычков В.Д., Викульев Н.А., Георгиев О.Ю., Глаголевский Ю.В., Драбек С.В., Найденов И.Д., Романюк И.И.* // *Астрофизические исследования (Изв. САО).* — 1985. — **19**. — С.66.

Надійшла до редакції 5.08.2008