Зміст:

* Вступ
* Термодинамічна модель для змінних зірок (цефеїд)
* Типи пульсуючих зірок
* Цефеїди
* W Діви
* RR Ліри
* SX Фенікса
* β Цефея
* ZZ Кита
* Ο Кита (Міріди)
* Що таке міріди?
* Довгоперіодичні змінні
* Пульсації і ударні хвилі
* Емісійні спектральні лінії
* Навколозоряні оболонки
* Молекулярні мазери
* Напівправильні змінні зорі
* Космічні мазери

Пояснення змінності зірок пульсаціями виникла як гіпотеза в XIX сторіччі. Вона базувалася на відкритті у пульсуючих зірок періодичного доплерівського зміщення спектральних ліній і змін температури цефеїд протягом циклу. На початку 20 сторіччя з'явилися публікації А.С. Еддінгтона, що заклали основи теорії пульсацій. Розглянемо термодинамічну модель пульсації змінних зірок (цефеїд), запропоновану Еддінгтоном у 1926 р.

Термодинамічна модель для змінних зірок (цефеїд)

Гравітаційні сили утримують зоряну речовину від розлітання. У нормальної зорі тиск газу і сила тяжіння в точності врівноважують один одного. Проста модель дозволяє розглянути деякі особливості такої рівноваги. На мал.1 показаний рухливий важкий поршень, що може переміщатися в циліндрі. У циліндрі під поршнем знаходиться газ. Поршень стискує цей газ і заважає молекулам газу розлетітися. Сила тяжіння рухає поршень униз, проте він не може опуститися до самого дна. Він знаходиться на певній висоті над дном циліндра. Якщо поршень опуститься вниз, то газ під ним додатково стиснеться, його тиск зросте і поверне поршень в положення рівноваги. Коли поршень нерухомий, його вага в точності компенсується тиском газу під ним. Такий стан дуже схоже на рівновагу між силою ваги і тиском газу в будь-якій точці в надрах зорі.

мал. 1

Якщо ж ми тепер спеціально виведемо поршень із рівноваги і трохи притиснемо його униз, то поршень почне коливатися. Якщо поршень опуститься нижче положення рівноваги, то тиск газу перевищить його вагу і виштовхне поршень. Якщо ж він підніметься вище положення рівноваги, то тиск газу впаде, і сила тяжіння поверне поршень униз. Тепер поршень уже не буде залишатися в положенні рівноваги. Якщо він колись почне рухатися, то потім буде по інерції поскочувати положення рівноваги і буде коливатися вгору і вниз між двома крайніми точками. Газ при цьому служить свого роду пружиною. При стиснені поршень передає газу частину своєї енергії. Під час розширення газу ця енергія повертається поршню. Втрати енергії не відбувається, оскільки в нашій моделі тертям можна знехтувати. За таких умов поршень буде переміщатися в циліндрі нескінченно довго. Якщо тертя відсутнє, то максимальне відхилення поршня від середньої точки буде постійним. Період коливань поршня залежить від характеристик нашої моделі, наприклад від маси поршня і від середньої температури газу тощо.

Поводження зірок загалом нагадує нашу модель. Якщо стиснути зірку рівномірно з усіх боків, а потім «відпустити», то й зрослий тиск газу буде розштовхувати зоряну речовину у всі сторони назовні, і діаметр зірки перевищить рівноважне значення. Після цього сила тяжіння виявиться більше тиску газу. Вона буде повертати газ до центру зірки. Зірка почне пульсувати. Якщо її колись вивести з рівноваги, то потім ці пульсації будуть продовжуватися довго. Період пульсації зірки можна обчислити за аналогією з періодом пульсації поршня, знаючи її властивості: масу, розподіл температури по глибині, а також її внутрішню будову.

Проте ми занадто спростили нашу модель — як для поршня, так і для зірки. На поршень, звісно ж, діють сили тертя. Розмах його коливань буде поступово зменшуватися під дією цих сил, і, нарешті, коливання загаснуть. Через деякий час поршень зупиниться (див. мал. 2*).* У надрах зірки також відбуваються процеси, подібні тертю, що гальмують її коливання. Можна розрахувати, що якщо штучно вивести зірку з положення рівноваги, то вона здійснить всього 5-10 тисяч коливань. Щоб повернутися в рівновагу, зірці буде потрібно лише біля 100 років. Проте спостереження показують, що зірка Дельта Цефея, відкрита в 1784 р., пульсує з незмінною силою. Що ж служить мотором, який підтримує пульсації цих зірок, хоча вони, здавалося б, повинні були загаснути за відносно короткий час? Еддінгтон запропонував у своїй книзі один із можливих засобів пояснення такого процесу. Крізь зовнішні прошарки кожної зірки проникає випромінювання, що виникає в її центрі. Щоб імітувати цей процес за допомогою нашої моделі, уявимо собі, що циліндр виготовлений із прозорого матеріалу, а крізь нього проходить потужне світлове випромінювання (див. мал. 3). Газ всередині циліндра, як і зоряна речовина, не зовсім прозорий. Він поглинає частину цього випромінювання.



мал. 2

При цьому газ у циліндрі нагрітий так сильно, що різниця температур між газом і навколишнім середовищем дуже велика, і циліндр випромінює за кожну секунду рівно стільки ж енергії, скільки одержує газ за рахунок часткового поглинання світлових променів.

Тепер виведемо поршень із рівноваги і трохи стиснемо газ. При цьому тиск і температура газу зростуть. Тоді, в принципі, можуть реалізуватися два різних випадки. Стиснутий газ може поглинати випромінювання сильніше або слабше, ніж розріджений. Розглянемо перший випадок. Якщо поглинання зростає при стиснені, то, коли поршень опуститься, температура газу буде підвищуватися швидше, ніж в положенні рівноваги. При цьому газ нагріється, і його тиск зросте більше, ніж просто під впливом поршня. Надлишковий тиск сильніше виштовхне поршень назовні, ніж у другому випадку. Після того, як поршень мине положення рівноваги, газ стане розрідженим, а його температура впаде. При цьому він буде поглинати менше енергії, ніж у положенні рівноваги. Газ остигне, його тиск зменшиться, і поршень швидко опуститься, долаючи силу тертя.

мал. 3

Те ж саме справедливо і для зірок. Якщо зоряна речовина в певному прошарку зірки буде при стиснені поглинати більше енергії і розігріватися, то ця зірка зможе пульсувати, а пульсації будуть підтримуватися випромінюванням, що виникає в її надрах. Якщо така зірка стиснеться, то випромінювання, що йде з її надр до поверхні, не буде так само легко проходити крізь її зовнішні шари. При цьому газ розігріється і зірка розшириться. Розширення наступає після фази стиснення. Речовина стає більш прозорою, вона пропускає більше енергії в навколишній простір, внутрішні частини зорі охолоджуються, і сила тяжіння знову призведе до стиснення зірки. Зоряна речовина служить свого роду вентилем для проникаючого назовні випромінювання. Цей вентиль відчиняється і закривається в ритмі пульсацій зірки.

Такий механізм Еддінгтон описав у своїй книзі вже в 1926 р. Однак теорія Еддінгтона не цілком пояснювала явища пульсації. Одна з розбіжностей полягає в такому. Знаючи світність у температуру, можна обчислити радіус фотосфери. Тому можна було обчислити криву зміни фотосферного радіуса з кривою блиску. З іншого боку, сумуючи зміни радіуса по кривій зміни променевої швидкості, можна побудувати другу криву зміни радіуса того прошарку, у якому утворяться спектральні лінії поглинання, а він повинен прилягати до фотосфери. Виявляється, що ці криві розходяться по фазі, вони зміщені в часі.

Друга хиба теорії Еддінгтона полягає в тому, що вона не вказує джерела енергії, що спроможна підтримувати коливання. Вільні ж коливання повинні були б незабаром згасати.

Еддінгтон припускав, що зірка пульсує цілком, а виявилося, що пульсують тільки зовнішні прошарки, а глибокі надра зірки в пульсації не беруть участь. На це вперше звернув увагу радянський учений С. А. Жевакін і зробив відповідні розрахунки.

Розглянемо на якій основі цей механізм здійснюється в зірках. Для цього ми повинні пригадати процеси, що відбуваються в надрах зірок протягом їхньої еволюції.

Як відомо, у надрах зірок відбуваються термоядерні реакції, внаслідок яких із легких елементів утворяться більш важкі. Цей процес продовжується, поки в результаті таких реакцій може виділятися енергія, що протистоїть гравітаційній силі. Для того, щоб “зайнявся" визначений елемент (тобто запаси цього елемента почали перетворюватися в більш важкі елементи), потрібна відповідна температура, а отже і густина, в центрі зорі. Тому від початкової маси зірки залежить, на якому елементі зупиняться термоядерні реакції.

Спочатку в надрах зірки “горить" водень, перетворюючись у гелій. При цьому зірки займають на діаграмі Герцшпрунга-Рессела (див. мал. 4) смугу, що називають головною послідовністю. Коли в ядрі зірки залишається занадто мало водню, щоб йшли реакції, гравітаційна сила «перевішує», зірка стискується, густина і температура в середині підвищується, і створюються сприятливі умови для “горіння" гелію й утворення вуглецю. При цьому зірка роздувається, переходячи в область гігантів.

Але в зовнішніх прошарках ще продовжується перетворення водню на гелій. Джерелом порушення пульсації є саме двічі іонізований гелій у зоні, що знахо­диться на гли­бині декілька сотень тисяч кілометрів під поверхнею зірки. Чим далі в глибину цієї зони, тим вище температура і сильніше іонізо­ваний гелій, і, нарешті, він ціл­ком іонізується. Саме завдяки іонізованому гелію утворюю­ться сприятливі умови для так званого “клапанного механізму": при випадковому невеликому стиснені, тобто при підвищенні тиску і температури, у зоні збільшується поглинання випромінювання, що перешкоджає відводові тепла назовні. Ця додаткова енергія змушує розширюватися газові прошарки, і виносить їх назовні за початкове положення. Це, у свою чергу, знижує температуру і тиск, що призводить до стиснення. Так продовжується періодичний процес пульсацій.

мал. 4

Положення пульсуючих зір на діаграмі Герцшпрунга-Рессела “спектр-світність".

В процесі пульсацій змінюється і радіус, і температура зірки, внаслідок чого росте її блиск. Але максимуми температури і радіуса не співпадають, і ця різниця залежить від глибини зони іонізації гелію і інших внутрішніх умов зірки. Тому для різноманітних типів зірок зсув між кривою блиску і кривої променевих швидкостей (який відображає швидкість змін радіуса) різний. Це також спричинило за собою і різноманітну форму кривих блиску.

Всі класичні пульсуючі зірки знаходяться в так званій смузі нестабільності на діаграмі Герцшпрунга-Рессела. Саме там створюються сприятливі умови для пульсацій. Її блакитна межа визначається утриманням іонізованого гелію в зовнішніх шарах і масою зірки, а червона — конвекцією, що перешкоджає пульсаціям.

Але в такому виді теорія пульсацій добре придатна тільки для класичних пульсуючих зірок, зокрема цефеїд, що зовсім нещодавно лишили головну послідовність. Складніше пояснити пульсації довгоперіодичних зірок, що перебувають у більш пізній стадії еволюції, коли гелій горить у прошарку навколо ядра, у якому гелій уже цілком перетворився на вуглець. Тяжко пояснити нестабільність їх кривих блиску і періодів. Існують гіпотеза про внесок у пульсації зони іонізованого водню, а також про внесок графітових частинок у непрозорість.

Ще важче пояснити пульсації білих карликів (ZZ Кита) і найбільше загадкових пульсуючих зірок типу β Цефея, що знаходяться далеко від смуги нестабільності. Для них поки що не існує теорії пульсацій.

Типи пульсуючих зірок

У таблиці для різноманітних типів пульсуючих зірок приведені основні характеристики і їх клас світності, що визначається по діаграмі Герцшпрунга-Рессела. Типи зірок приведені в порядку зменшення їхніх періодів.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Період** |  **Амплітуда** |  **Спектральний клас** |  Клас світності |  **Позначення типу по ЗКЗЗ[[1]](#footnote-1)** |
|  **Довгоперіодичні пульсуючі зірки** |  Неправильні |  -- |  1-2 |  F,G,K,M,S | Надгіганти і яскраві гіганти | L |
| Міріди (тип О Кита) | 100-1000 d | > 2.0 | Me, Se | Гіганти | M |
| Напівправильні  | 30-1000\* d | 1-2 | F,G,K,M,S | Надгіганти і яскраві гіганти | SR |
| тип RV Тільця | 30-200\* d | 1-2 | F,G,K | Надгіганти і яскраві гіганти | RV |
| **Класичні пульсуючі зорі** | тип δ Цефея | 1-70 | 1-2 | F5-K0 | Надгіганти | D Cep |
| тип W Діви | 1-70 | 1-2 | F5-K0 | Надгіганти | CW |
| тип RR Ліри | .2-1.0 | .5-2 | A7-F5 | Надгіганти | RR |
| тип SX Фенікса | .05-.2 | .2-1.2 | A – F | Субкарлики | SX Phe |
| тип δ Щита | <0.3 | 0.001-0.3 | A – F | Карлики | D Sct |
| **Зірки з не радіальними пульсаціями** | тип β Цефея | 3-7 | 0.1 | B0-B5 | Гіганти і субгіганти | B Cep |
| тип ZZ Кита | 100-1000 s | 0.3 | DA | Білі карлики | ZZ |

 Цефеїди

Цефеїди (або зірки типу δ -Цефея) є найбільш вивченими зірками, у яких більшість явищ добре пояснюються пульсаціонною теорією.

Це жовті надгіганти, що порівняно нещодавно вийшли з головної послідовності. Їхні радіуси 10-150 радіусів Сонця, маси 3-16 маси Сонця.

Криві блиску, як правило, дуже асиметричні. В районі періоду в 2 дні з'являється горб на спадній гілці, у районі 9 днів - плоский максимум, а при великих періодах - горб на спадній гілці. Це пояснюють наявністю двох коливань, що змінюються місцями з амплітудою біля 9 днів. Тому ж у районі цього періоду спостерігається мінімум амплітуди, через те, що коливання гасять один одного.

Загалом, амплітуда росте з періодом, що пояснюється просуванням по діаграмі Герцшпрунга-Рессела (див. малюнок ).

Існують зорі, наприклад RU Cam, у яких коливання припинялися, а через деякий час відновилися. Це пов'язано з виходом її за межі смуги нестабільності при еволюційному русі по діаграмі ГР.

Існують так звані s-цефеїди, у яких крива синусоїдальна і амплітуди малі. Передбачено, що вони проходять через смугу нестабільності перший раз, на відміну від інших, що вже побували в стадії червоного надгіганта (із глибокою конвективною зоною), збільшивши при цьому вміст гелію в зовнішніх шарах.

Існують зорі, що пульсують із двома періодами. В останньому випадку циклічні зміни періоду і форми кривої блиску (амплітуди і асиметрії) пояснюються інтерференцією періодів. В загалі зміни періоду малі — у цефеїд найбільш стабільні криві блиску з усіх пульсуючих зірок.



мал. 6

Залежність між періодом і формою кривої блиску для цефеїд в Магелланових Хмарах (отримана К. Пейн-Гапошкиной).

мал. 5

Залежність між

періодом і амплітудою цефеїд (отримана Ю.Н. Ефремовим)

Для цефеїд існує певна залежність “період - світність", що дозволяє точно визначати відстані до них (знаючи світність, тобто абсолютну зоряну величину, і видиму зоряну величину, можна обчислити відстань до зірки). На цій залежності базується точний метод визначення відстаней до інших галактик Місцевої групи Магелланових Хмар, туманності Андромеди, відомої спіральної галактики в Трикутнику (M 33) і інших. Якщо вийти за межі Місцевої групи, де навіть за допомогою потужних інструментів не різняться окремі зірки, то і там калібрування відстаней у першу чергу визначається залежністю “період - світність", установленої для близьких областей.

Тип W Діви

У зірок типу W Діви маси істотно менше, ніж у цефеїд — біля 0,5 маси Сонця і також менші їхньої світності. Вони знаходяться нижче з права на діаграмі Герцшпрунга-Рессела.

На кривих блиску присутні горби і подвійні максимуми, а в спектрі емісійні лінії. Це свідчить про утворення ударних хвиль в атмосфері зірок, що зменшують стабільність кривої блиску.

Тип RR Ліри

Їх називають також змінними в скупченнях, тому що вони достатньо характерні для кульових зоряних скупчень. Виділяють підкласи RRab, що мають асиметричну криву з горбом на початку висхідної гілки і RRc із більш плавною кривою (див. мал. 7).

Характерною рисою є відмінність визначення спектрального класу по металах і водню.

мал. 7

Основні форми кривих блиску зірок типу RR Ліри.

Променеві швидкості, виміряні по водню і по металах, показують різні криві, що пов'язано з різними коливаннями водневого і металевого шарів, причому металевий шар залягає глибше. Внаслідок сутички цих коливань з'являються ударні хвилі, що призводять до розігрівання речовини і появи емісійних ліній. Все це вносить додаткову нестабільність в криву блиску.

Зміни періоду бувають із стрибкоподібними переключеннями, зустрічаються прогресивні зміни в обидві сторони, іноді неправильні зміни. Характерні циклічні зміни періоду і кривої блиску, викликані так званим ефектом Блажко. Цей ефект виникає внаслідок інтерференції двох коливань із різними періодами (основного і того що обурює), що вивчаються по металевому прошарку, що залягає близько до фотосфери зірки. Відбувається інтерференція змін радіуса, тому криву блиску не можна однозначно розкласти на два коливання.

Сам період Блажко також змінюється внаслідок зміни двох періодів, що інтерферують.

мал. 8

 Крива зміни O-C для зворі SZ Гідри типу RR Ліри (отримана В.П. Цесевичем).

Для досліджень змін періодів часто використовують так звані діаграми O-C (observed - calculated: спостережене мінус обчислене), тобто різниці між моментами максимумів, отриманими по спостереженнях і обчисленими, використовуючи середній період. Якщо період змінюється стрибкоподібно, то діаграма має вид ламаної лінії, як це показано на малюнку.

У випадку ефекту Блажко ця діаграма буде мати синусоїдальний вид.

Тип SX Фенікса

Це проміжний тип між δ Щита і RR Ліри. Знаходяться під головною послідовністю (субкарлики). Іноді їх називають "карликовими" або "короткоперіодичними" цефеїдами. Маса менше Сонячної.

Криві блиску мають особливості, характерні і для δ Щита і для RR Ліри (ефект Блажко).

Спектральний клас різний по лініях металів і водню, але в середньому більш пізній, чим у RR Ліри, і більш схожий на δ Щита.

Тип β Цефея

До нього належать гарячі гіганти і надгіганти, що знаходяться досить далеко від смуги нестабільності.

Характерні малі періоди (часи) і амплітуди, симетричні криві блиску. Періоди можуть належати множині нерадіальних пульсацій.

Причина пульсацій невідома, тому що клапанний механізм не є ефективним при таких великих температурах і високому положенні зони іонізації гелію.

Тип ZZ Кита

Це пульсуючі білі карлики з температурою 120 000 K, масою 0.6 сонячної і густиною біля 1 млн. м./см3. Більшість має спектральний клас DA (для білих карликів існує своя спектральна класифікація, що відбивається буквою D (від англійського White Dwarf — білий карлик), друга літера відповідає положенню на діаграмі Герцшпрунга-Рессела. Мультиперіодичні пульсації схожі на пульсації у RR Ліри, але з меншим масштабом змін. Також у зірках типу ZZ Кита спостерігаються нерадіальні пульсації. Фотоелектричні виміри показують — крива, що спостерігається, може бути пояснена тільки коливанням температури без коливання радіуса.

Ці зірки знаходяться на продовженні смуги нестабільності в область білих карликів. Вони займають той діапазон температур, у якому при еволюційному охолодженні білих карликів в їхніх зовнішніх шарах утворюється зона іонізації водню, і отже, можна припустити, що пульсаціями управляє той же клапанний механізм.

У білих карликів переважним елементом в атмосфері є гелій. Певне, серед цих об'єктів зустрічаються об'єкти з не радіальними пульсаціями.

Тип О Кита (Міріди)

Міріди є холодними гігантами на пізній стадії еволюції, переважно класу М (титанові зірки), зустрічаються також класи G (вуглецеві) і S (цирконієві).

В спектрах всіх мірід присутні емісійні лінії, що свідчать про проходження в атмосферах цих зірок ударних хвиль.

Криві блиску показують сильну нестабільність від циклу до циклу, хоча крива може бути описана одним середнім періодом (див. мал. 9).

Подібна нестабільність може бути пов'язана з порушенням пульсацій у зоні іонізованого водню в протяжній атмосфері зірки і проходженням ударних хвиль. Проте, остаточної теорії пульсацій подібних зірок, також як і інших довгоперіодичних змінних, не існує.

мал. 9

Фрагмент кривої блиску Міріди X Змієносця.

У багатьох зір іноді присутній горб на висхідній ділянці, який зв’язують з проходженням ударної хвилі.

Зміни періодів мають різноманітний характер: стрибкоподібні і плавні неправильні зміни (найбільш частий тип), циклічні стрибкоподібні зміни, циклічні плавні (синусоїдальні зміни). Цикли цих змін у тих зірок, у яких вони можуть передбачатися складають значення 13000-22000 d.

Що таке міріди?

У еволюції зірок із масами порядку сонячної або більшими є стадія, коли зірка стає дуже активною. Світило, яке раніше було подібне до нашого Сонця, за порівняно короткий час “розбухає”, збільшуючи свої розміри в сотні разів і перетворюючись у холодну червону зірку гігант. Більшість зірок у цій стадії виявляє нестабільність — пульсує. Їхній візуальний блиск більш-менш регулярно змінюється на декілька зоряних величин із періодами від сотні днів до півтора-двох років.

Першою такою змінною зорею, на яку звернули увагу астрономи, була Міра Кита. Вона надалі і дала назву цілому класу змінних зірок. У серпні 1596-року німецький астроном Давид Фабріціус помітив у сузір'ї Кита зірку, яку не зміг знайти ні на зоряних картах, ні в каталогах. Але через декілька місяців блиск зірки ослаб настільки, що вона перестала бути видимою неозброєним оком. У 1603 році Йоганн Байер при упорядкуванні свого знаменитого зоряного атласу (першого атласу, де зірки одержали позначення у виді грецьких букв) знову помітив ту ж зірку, яку він, не підозрюючи про відкриття Фабріціуса, заніс в атлас як зірку 3-й величини і привласнив їй позначення О Кита. В лютому 1609 року її знову спостерігав Фабріціус; тоді ж він і назвав її Мiга (від латинського “дивна”).

Хоча Фабріціусу і належить честь першовідкривача Міри, спеціальних спостережень він не вів. Регулярні спостереження Міри Кита вперше виконали Хольвард і Фулленіус у Нідерландах — ці роботи відносяться вже до 1630-х — 1640-х років. Першим же, хто знайшов періодичність у змінах блиску Міри Кита, був французький астроном Буйо. Період зірки він визначив у 333 дня, що близько до нині прийнятого значення (331,6). К XVII- XVIII сторіччям відносяться відкриття ще декількох довгоперіодичних змінних — χ Лебедя (цю зірку раніш нерідко називали “Міра Лебедя”), а також R Гідри і R Льва.

Легко зрозуміти, чому Міру й інші подібні їй зірки були в числі перших змінних зірок, відкритих астрономами і систематично дослідженими. Це пояснюється, насамперед, великою амплітудою змін їхнього блиску. Самі яскраві з мірід у максимумі можуть бути помітні навіть неозброєним оком, у той час як у мінімумі бувають доступні не всякому телескопу. Рекорд належить зірці χ Лебедя: у максимумі її блиск досягає візуальної величини 3,3m, а в мінімумі падає майже до 14m, тобто амплітуда блиску досягає без малого 11 зоряних величин!

Міріди займають особливе місце серед виявлених і вивчених змінних зірок. Так, у 4-му виданні “Загального каталогу змінних зірок” (ЗКЗЗ) із 28455 включених у нього зірок 5829 — міріди (більше 20%). Причина значного числа відомих мірід криється в порівняній легкості їхнього виявлення: по-перше, завдяки великим амплітудам зміни блиску, а по-друге, міріди — це зірки гіганти високої світності (десятки тисяч сонячних), тобто вони можуть спостерігатися на величезних відстанях, у сотні і тисячі парсек. Міріди — холодні червоні зірки, що пройшли довгий шлях еволюції. Температура їхньої поверхні біля 2000-3000К, Більшість відноситься до спектрального класу М. Це зірки, багаті киснем. Але зустрічаються серед мірід і вуглецеві зірки, що належать до спектрального класу G.

Довгоперіодичні змінні

Довгоперіодичні змінні зірки, як випливає із самої назви, змінюють свій блиск достатньо повільно, із періодами в сотні днів (частіше усього зустрічаються періоди від 150 до 700 діб). Клас таких змінних містить у собі множину досить різноманітних по своїх характеристиках зірок.

Довгоперіодичні змінні діляться на два підкласи: **змінні типу Міри Кита** (або власне міріди) і **напівправильні змінні.** Одним із критеріїв, по якому зірку відносять до тієї або іншої категорії, служить амплітуда коливань блиску. До мірід звичайно належать зірки з амплітудою більшої 2,5m, до напівправильних — зорі, амплітуда зміни блиску котрих менше 2,5m. При цьому треба відзначити, що міріди в середньому мають великі періоди і змінюють блиск із більшою регулярністю, ніж напівправильні зірки. Таким чином, між двома підкласами існують реальні фізичні розходження.

мал. 10

Крива блиску мірід.

 Форма кривих змінюється від одного циклу змінності до другого, висота максимумів також різна.

Відносно регулярну криву блиску мають лише деякі міріди. Для більшості ж зірок цього типу зміна блиску відзначена різноманітними іррегулярностями, що з однаковою можливістю можуть зустрічатися як на висхідній гілці кривої, так і на спадної, і не мають періодичностей. Криві блиску мірід можна розділити на три типа:

* I — одна з гілок кривої йде крутіше, ніж інша;
* II — крива блиску більш-менш симетрична;
* III — крива блиску має “горб” на однієї з гілок, або у її два максимуми протягом одного періоду.

У напівправильних змінних звичайно немає стійкої форми кривої блиску. Якщо порівняти криві блиску зірок типу Міри Кита і криві блиску напівправильних змінних, очевидно, як сильно вони різняться. Треба сказати, що всі довгоперіодичні змінні дуже зручні для візуальних спостережень за допомогою бінокля, підзорної труби або невеличкого телескопа. У максимумі вони досягають 5-ї — 7-ї зоряної величини, а довгі періоди дозволяють спостерігати декілька зірок одночасно.

Різноманітні фізичні процеси, що протікають у надрах і особливо в оболонках цих зірок, безумовно, відбиваються на їхній кривій блиску. У більшості мірід (наприклад, у R Лева, U Оріона, U Геркулесу) змінюється висота максимуму. А у зірки U Геркулесу може змінюватися положення і форма “горба” на висхідній гілці, іноді “горб” зникає зовсім. Аналогічно поводиться крива блиску зірки R Лева. B свою чергу у R Орла дуже сильно змінюється період. А оскільки періоди нестабільні у багатьох мірід, то важливе значення мають щільні ряди спостережень, що дозволяють точно визначити момент настання максимуму.

Не менше цікаві напівправильні змінні, що змінюються, як правило, на 1,5-2m, вони дають можливість із скромними спостережливими засобами простежити весь хід кривої блиску від максимуму до мінімуму і уточнити період, що частіше за все встановлений із великою похибкою. До того ж у цих зірок у змінах блиску можуть існувати додаткові періоди, що відрізняються від основного на ціле число: Р/2, Р/3 і так далі. Ці періоди можна виділити, тільки маючи безупинний ряд послідовних спостережень.

Пульсації і ударні хвилі

Дотепер ми не розглядали фізичні процеси, які призводять до зміни блиску довгоперіодичних змінних. Одна з можливих причин коливань блиску — **пульсації зірок.** Теорія пульсації добре пояснила змінність цефеїд. Але механізм, що призводить до коливань блиску мірід, дотепер точно не встановлений. Одна з гіпотез пояснює пульсації подібних зірок нестійкістю ядерних реакцій горіння гелію в сферичному прошарку в надрах зорі, а на поверхні ця нестійкість виявляється у виді коливань.

При пульсаціях поверхні зірки в її атмосфері можуть утворитися ударні хвилі. Пояснимо, що це таке. Збудження невеличкої сили передаються в газі у виді звукових хвиль. Якщо, наприклад, створити в якомусь місці простору надлишковий (порівняно з навколишнім середовищем) тиск, то він передається, унаслідок теплового руху молекул, частинкам у сусідніх областях простору; ті, в свою чергу, передадуть надлишок тиску сусідам і так далі. Швидкість звука в газі відповідає середньої швидкості теплових рухів молекул газу, і в атмосферах мірід, де Т ≈ 1000-2000 К, швидкість звука складає 1,5-3 км/с (нагадаємо, що в земній атмосфері у поверхні ця швидкість дорівнює 0,33 км/с).

Якщо шару газу додати швидкість руху, що перевищує швидкість звука, то виникне якісно інше явище. Цей шар газу полетить, загрібаючи перед собою все нові і нові порції газу, подібно тому, як снігова лавина, що несесеться вниз по схилу гори, створює перед собою сніговий вал, який постійно збільшується. Густина газу на межі “вала” наростає стрибкоподібно — такий “вал” як би вдаряє по спокійному, незбудженому газу, прискорюючи його. Тому поверхню, де відбувається стрибок, називають **ударним фронтом,** а саме явище надзвукового поширення стрибка густини — **ударною хвилею**.

мал. 11

Механізм виникнення хвиль в газі можна показати на прикладі поршня, що рухається в трубі, заповненою газом. Якщо поршень робить коливальні рухи (із швидкістю, меншої, ніж швидкість звука **s**), у трубі виникає звукова хвиля, що складається з періодичних згущень і розрідженні газу (а). Густина газу уздовж труби змінюється при цьому так, як показано на графіку (б). Якщо ж поршень робить різкий короткий рух зі швидкістю v, більшої чим s, у трубі починає поширюватися з тією ж швидкістю стрибок густини — ударна хвиля (в). Пульсуюча поверхня міріди також діє подібно поршню, створюючи в атмосфері зірки сферичну ударну хвилю (р)

Емісійні спектральні лінії

Є данні астрономічних спостережень, які показують, що в оболонках мірід поширюються ударні хвилі. У спектрах цих зірок спостерігаються чисельні лінії поглинання, характерні для холодного газу — лінії слабко збуджених атомів і молекул. Головна особливість таких спектрів — потужні смуги молекул окису титана ТiО. Проте час від часу вигляд спектру мірід помітно змінюється. Поблизу мінімуму блиску спалахують емісійні лінії водню, іонізованого заліза й інші елементи, а інтенсивність смуг поглинання окису титана починає падати. Зірка збільшує свій блиск, проходить максимум, після чого емісійні лінії в спектрі слабшають і на спадній гілці кривій блиску пропадають; смуги TiО, навпроти, посилюються. В наступному мінімумі цикл починається знову.

Таке поводження спектра можна пояснити проходженням ударної хвилі через атмосферу міріди. При коливанні поверхні зірки, у той проміжок часу, коли поверхня рухається назовні з надзвуковою швидкістю, над нею виникає ударний фронт у вигляді сфери, центр якої збігається з центром зірки. Швидкість ударної хвилі спочатку велика, 60-100 км/с, тобто в десятки разів перевищує швидкість звука. З віддаленням від поверхні хвиля поступово витрачає свою енергію. Приблизно половина енергії хвилі іде на прискорення все нових і нових шарів газу, друга половина — на нагрів його. При великій швидкості хвилі газ за її фронтом нагрівається до високої температури. Ця температура залежить від швидкості хвилі і може приймати значення від 15-20 тис. К (при швидкості в 30 км/с) до 100 тис. К (при швидкості в 100 км/с). У газі за фронтом хвилі відбувається дисоціація (розпад) молекул і іонізація нейтральних атомів. Зникнення молекул окису титана за фронтом призводить до ослаблення смуг TiО і як би просвітлює атмосферу зірки у візуальній області спектра — блиск зірки наростає. У той же час іонізовані атоми водню і металів рекомбінують з електронами, що супроводжується сильним випромінюванням в лініях цих елементів — тільки в лінії водню (Нα) може випромінюватися до 1 % всієї світності зірки!

Але от зірка закінчує півперіод своїх коливань. Її поверхня починає спадати, радіус зменшується. За цей час ударна хвиля встигає відійти від поверхні на декілька радіусів зірки. Запас енергії хвилі зменшується, її швидкість падає до 10 - 15 км/с. Така хвиля вже не спроможна нагріти газ настільки, щоб викликати іонізацію. Газ, прискорений хвилею, гальмується, а потім під дією сил тяжіння починає “осідати” знову до поверхні. Остигання газу призводить до рекомбінації атомів і до відновлення молекул TiО. Внаслідок цього емісійні лінії пропадають, а блиск зірки зменшується. І тоді ж, поблизу мінімуму, зірка починає черговий цикл коливань, її поверхня “спухає” і посилає в атмосферу новій ударну хвилю — все повторюється спочатку.

Можна сказати, що мінімум блиску міріди — це, очевидно, і є її нормальний, звичайний стан; а максимум блиску — “збуджений”, що швидко проходить, як тільки зникає джерело збудження — ударна хвиля. Така картина дозволяє легко зрозуміти і розходження у висоті максимумів блиску в одній і тієї ж міріди, а також зсуви максимумів в часі щодо очікуваних моментів: ударна хвиля “відправлялася” трохи пізніше або трохи раніше, її швидкість була більше або менше, ніж у попередньому циклі, відповідно великим або меншим виявився її руйнівний вплив на атмосферу зірки.

Зауважимо ще, що у мірід сильно змінюється тільки оптичний блиск. Якщо ж брати болометричну зоряну величину (тобто сумарну в широкому діапазоні довжин хвиль, включаючи інфрачервону область), то вона змінюється мало. Молекули TiO — своєрідний клапан для оптичного випромінювання; їхня поява або зникнення призводить у кінцевому рахунку лише до перерозподілу енергії між різними діапазонами спектра.

У спектрах напівправильних довгоперіодичних змінних емісійні лінії спостерігаються дуже рідко. Мабуть, пульсують ці зірки слабше, і сильних ударних хвиль в їхніх атмосферах немає. Тому й амплітуда коливань їхнього блиску менше, оскільки молекули TiО присутні майже постійно.

Навколозоряні оболонки

Ударні хвилі призводять ще до одного слідства, дуже важливого для зірки. Вони як би то розштовхують, розганяють газ, із якого складається атмосфера, протидіючи силі тяжіння. У результаті атмосфера стає дуже протяжної і слабко пов'язаної з зіркою. Самі по собі ударні хвилі не можуть віднести помітну кількість газу. Але достатньо ще лише невеличкого впливу — і роздута атмосфера почне вилітати в міжзоряний простір. Отут важливу роль може зіграти навколозоряний пил.

мал. 12

Будова навколозоряної оболонки міріди - мазера. В центрі — фотосфера (видима в оптичному діапазоні поверхня зірки). Рисками показана область оболонки, де виникають мазерні емісійні лінії молекул Н2O и SiO; приблизно на тій же відстані від фотосфери температура газу зменшується настільки, що в газі конденсуються пилові частинки. Масштаб на малюнку не зберігається; фотосфера міріди має радіус 1-2 а.о., оболонка Н2О—SiO розміщена на відстані 6—10 а.о. від центра зорі, а зовнішній радіус оболонки ОН досягає 1000 а.о.

На відстанях порядку 10а.о. від поверхні зірки газ вже достатньо холодний, його температура не перевищує 1000К. Ударні хвилі сюди якщо і доходять, те дуже ослабленими. У таких умовах починається конденсація атомів і молекул (окислів кремнію і металів) у тверді частки — порошини. Ці порошини під тиском випромінювання зірки поступово прискорюються назовні. Зштовхуючись з атомами і молекулами, вони захоплюють за собою газ. У результаті виникає витікання речовини з атмосфери. На зміну йому виноситься газ із внутрішніх частин атмосфери, але і його сягає та ж доля. Таким чином, зірка втрачає масу. Швидкість зменшення маси може бути значної, 10-6-10-5 М•/рік. У міжзоряне середовище з мірід потрапляє величезна кількість пилу й атомів важких елементів, що істотно впливає на склад і структуру міжзоряного газу. Недарма в однієї з найбільше узвичаєних гіпотез про походження міжзоряного пилу джерелом її вважаються атмосфери червоних гігантів.

Очевидно, що стадія інтенсивної втрати речовини не може продовжуватися довго: за сотню тисяч років зірка з масою порядку сонячної встигне розтрачувати значну частину своєї речовини. Тому і термін життя зірки у виді червоного пульсуючого гіганта порівняно нетривалий. Зрештою відбудеться повне скидання зовнішніх шарів зірки і залишиться гаряче компактне ядро — білий карлик, — оточене протяжною хмарою світного газу, або планетарною туманністю.

В процесі винесення речовини навколо міріди утвориться газопилова оболонка, що розширюється, швидкість її розльоту досягає декількох кілометрів у секунду. Навколозоряна оболонка має досить низьку температуру, нижче 1000 К. Концентрація газу там невелика, порядку 1012 часток на 1 см3 у внутрішніх прошарках, а далі від зірки вона змінюється обернено пропорційно до квадрату відстані. Велика частина водню об'єднана в молекули Н2. Крім Н2 в оболонках мірід, багатих киснем, присутні молекули, що містять атом О (СО, ОН, Н2О, SiO). Сама оболонка нічим не виявляє себе в оптичній області спектра. Її присутність виявляється головним чином по лініях поглинання СО, ОН і Н2О в інфрачервоному діапазоні.

Крім того, дуже цікаву інформацію про навколозоряну оболонку можна одержати в радіодіапазоні. Спостереження на хвилях 2,6 мм і 1,3 мм показали, що багато мірід — це джерела випромінювання в лініях молекули СО. У деяких зірок вдалося виміряти і кутові діаметри областей , що випромінюють — вони відповідають лінійним розмірам у сотні і тисячі астрономічних одиниць.

Молекулярні мазери

Самим несподіваним виявилося потужне мазерне випромінювання довгоперіодичних зірок у лініях молекул ОН, Н20 і SiО. У молекул ОН воно відбувається в лініях на хвилі 18 см, у H2O — 1,55 см, у SiО — у міліметровому діапазоні на хвилях 7 мм, 3,5 мм і більш коротких. Умови в навколозоряній оболонці такі, що верхні рівні відповідних квантових переходів у цих молекул виявляються перенаселеними стосовно нижніх рівнів (тобто має місце постійне “накачування” молекул на верхні рівні). Якщо через шар газу, підготовлений таким чином, проходить радіовипромінювання з частотою, рівній частоті “накачаного” переходу, то воно викликає ланцюгову реакцію індукованих переходів у молекулах; в результаті випромінювання багаторазово посилюється. Аналогічний процес має місце в лабораторних квантових генераторах — лазерах і мазерах.

Всього мазерне випромінювання гідроксилу було знайдено приблизно у трьохсот довгоперіодичних змінних. Випромінюванням молекул води або окису кремнію володіють біля ста зірок. Майже всі вони розташовані не далі 300-500 пк від Сонця. Чутливість сучасних радіотелескопів не дозволяє виявляти міріди-мазери на великих відстанях, хоча є підстави вважати, що практично всі відомі міріди спектрального класу М (тобто багаті киснем і молекулами з киснем) можуть бути джерелами мазерного випромінювання.

Умови для збудження молекул ОН, Н2О і SiО різноманітні, тому мазери, що породжують лінії цих молекул, розташовані на різних відстанях від зірки: Н2О і SiО — у внутрішніх частинах оболонки, ближче усього до зірки; а ОН — у самих зовнішніх. Такий розподіл підтверджується безпосередніми спостереженнями з високою кутовою роздільною здатністю навколозоряних мазерів у мірідах (соті і тисячні долі секунди дуги).

Молекули в навколозоряній оболонці чуйно реагують на зміну навколишніх умов (змінність випромінювання зірки, проходження ударної хвилі і т.д.). Всі три види навколозоряних мазерів — ОН, Н2О і SiO — володіють змінністю випромінювання. Зміни їхньої інтенсивності, безсумнівно, пов'язані зі змінністю зорі, але природа цього зв'язку ще далеко не вияснена. Більш-менш ясно тільки те, що “накачування” молекул ОН здійснюється інфрачервоним випромінюванням зорі. При зміні випромінювання зорі змінюється й інтенсивність емісії ОН, причому зміни мазера повторюють зміни блиску зорі із деяким запізненням, що відповідає часу поширення випромінювання від зірки до зовнішніх меж навколозоряної оболонки (декілька діб або десятків діб).

Зв'язок змінності мазерів SiО і Н2О із змінністю самих зірок також просліджується, але він складніше. Максимум мазерного випромінювання звичайно наступає через 2-3 місяця після максимуму візуального блиску, але не в кожному циклі змінності зірки. Інтенсивні спалахи мазерів частіше за все бувають пов'язані з більш яскравими максимумами. Часом мазерне випромінювання (особливо випромінювання H2О) слабшає або навіть пропадає на один-два періоду оптичної змінності, (як це трапилося наприкінці 1970-х років із мірідою U Оріона). Можна припускати, що мазери дуже чутливі до впливу ударних фронтів, що проходять у внутрішній області оболонки. Але інформації для рішення цієї задачі поки недостатньо — адже міріди спостерігаються в лініях Н20 і SiО лише 10-15 років, тобто протягом 10-15 циклів змінності, причому в відомостях про мазерне випромінювання багатьох із них є великі прогалини. От чому так важливі систематичні рівномірні спостереження мірід в різних ділянках спектра — в радіолініях молекул, в оптичному й інфрачервоному діапазонах.

Напівправильні змінні зорі

Будь-які засоби класифікації зірок по типах змінності спираються на загальний вид кривої блиску і спектральний клас. Проте, такий підхід не завжди вдалий, якщо мова йде про напівправильні змінні. Для них часто не можна розглядати загальну криву блиску, тому що вона містить ділянки, характерні для зірок різноманітних типів. Відбувається це, мабуть, тому що напівправильні змінні зорі здебільшого, по-перше, мультиперіодичні і всі компоненти цієї мультиперіодичності виявляють себе дуже активно, тобто мають амплітуду, порівнянну з головним коливанням. А, по-друге, у багатьох зірок цього типу пульсації або ще не установилися, або по якимось причинах не стабільні, і період основного коливання також змінюється.

Але все таки ці зірки дуже схожі на зірки типу Міри Кита. Якби можна було "зібрати" всі неправильності мірід і збільшити їх у декілька разів, то утворилися б саме змінні з напівправильним типом зміни блиску. Термін *"напівправильні змінні"* з'явився наприкінці двадцятих років. Їм позначалися зірки, які, на перший погляд, мали якусь періодичність, але з іншої сторони їхнє поводження мало такі неправильності, що цю періодичність не вдавалося класифікувати. Поступово таких зірок ставало все більше, але до нашого часу накопичився також і великий спостережливий матеріал. Стало ясно, що всі ці зірки є червоними гігантами або надгігантами і належать до зірок AGB або RGB.

На сьогоднішній день є дуже груба класифікація SR-зірок (від англійського *"semiregular"* - напівправильний), яку можна узагальнити, використовуючи три фундаментальні роботи: *"Пульсуючі зірки"* за редакцією *Б.В.Кукаркина*, *"Загальний каталог змінних зірок"*, складений групою московських астрономів і виданий у 1985 році і книга *"Змінні зірки" Гоффмейстера, Ріхтера і Венцеля*, переведена на російську мову в 1990 році. Утворюється така схема (див. таблицю). Якщо додати до неї напівправильні змінні типу RV Тільця, що є надгігантами і перебувають у стадії гілки червоних гігантів (RGB), то одержимо повну сучасну класифікацію напівправильних змінних зірок.

Вже по цій схемі очевидно, що підкласи SR-зірок сильно змішані. Особливо це стосується зірок підтипів SRb. Існує їхній розподіл на "червоні" і "блакитні", що запропонували австрійські учені *Ф. Кершбаум* і *І. Хрон* у 1992 році, базуючись на статистичних дослідженнях періодів, амплітуд, температур, темпів втрати маси, присутності навколозоряного пилу й особливостей спектрів. Вони вказують, що SRa-зірки є проміжними об'єктами між мірідами і SRb-зірками.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **SRa** | M, G спектри, P приблизно постійні, амплітуди малі, форма кривій блиску сильно змінюється, мають емісійні лінії  | дуже схожі на зірки типу Міри Z Aqr, P=136. 9 днів, M1e-M3e  |
| **SRb** |  M, G, S спектри, P-? цикли різної тривалості, три види поводження: квазіперіодичні, постійне, хаотичне  | RR Cr AF Cyg  |
| **SRc** |  Пізні спектри, надгіганти  | mu Cep RS Cnc P=1700 днів  |
| **SRd** |  F, G, K спектри, відрізняються від інших відсутністю або дуже слабкими смугами окису титана, великими швидкостями і світностями; гіганти і надгіганти  | UU Her AG Aur  |

Варто зауважити, що SRc-клас фактично відзначає тільки зорі - надгіганти, частіше за все зі змінністю типу SRa.

Крім того, зірка AF Cyg цілком може бути прототипом окремого класу зірок (як, наприклад, RV Tau). Цей об'єкт показує послідовне "переключення" коливань, значення періодів котрих ніяк не залежать один від одного. Один період зміняє інший або який не будь час обидва періоди можуть діяти одночасно. Часто спостерігається чергування глибоких і вторинних мінімумів; середній період біля 160 днів. З останніх досліджень самої AF Cyg видно, що відбулася двічі стрибкоподібна зміна періоду: 89, 164, 93 днів. Час дії кожного з періодів приблизно однаковий, а повна тривалість усього циклу "переключень" складає біля 1915 днів, тобто 5,3 року.

Таким чином, великий і неоднорідний клас напівправильних змінних потребує уважного підходу і ревізії, що цілком успішно можна провести, використовуючи сучасні математичні методи і вже наявний спостережливий матеріал.

Отже, мабуть, самий однорідний клас серед напівправильних змінних являють собою зірки типу RV Тельця. Криві блиску цих зірок хоч і мають сильні неправильності, але в них можна легко помітити визначену закономірність. Вона проявляється в тому, що більш глибокі (головні) мінімуми заміняються менш глибокими (вторинними). Глибина цих мінімумів може змінюватися так, що головні мінімуми можуть перетворюватися в повторні і навпаки; повна амплітуда змін блиску може досягати 3-4 зоряних величин у візуальній області. Періоди між двома сусідніми головними мінімумами (вони називаються формальними) знаходяться в межах від 30 до 150 днів. До підтипу RVa відносять зірки, середній розмір яких не змінюється (як у AC Her). Середній блиск зірок підтипу RVb (сама RV Tau) повільно змінюється з періодом від 600 до 1500 днів і амплітудою до 2 зоряних величин. Дуже цікава в цьому відношенні зірка DF Лебедя (мал.3). Її швидке коливання має період 49.8 днів. Друге, повільне, має період 780. 2 днів. Саме ж цікаве, що амплітуда швидкого коливання — змінна! У максимумі повільного коливання вона велика, а в мінімумі загасає і зменшується до 0.3 зоряної величини. Зірки типу RV Tau по деяких ознаках схожі на зірки типу Міри Кита. Проте, RV-зірки не мають таких щільних і холодних пилових оболонок, які містять велике число різноманітних молекул. У той же час зірки типу RV Tau схожі і на цефеїди. Наприклад вуглецева зірка RU Жирафа, що вважається цефеїдою, раптом на час припинила коливання блиску, що властиво об'єктам типу RV Tau. Об'єкти типу RV Тельця належать до RGB. Можливо, це зірки, що знаходяться на стадії перетворення в червоного гіганта. Вони мають достатньо протяжні оболонки (але більш гарячі і менше щільні, ніж у мірід) і, можливо, також як і міріди є пращурами планетарних туманностей.

Незважаючи на те, що інші напівправильні змінні розбиті на чотирьох великі групи, існує ряд об'єктів, який володіє деякими характеристиками, що належать відразу декільком групам або, навпаки, їх не можна приписати жодної з класифікацій. Наприклад, довгий час до типу RV Tau відносили зірку UU Her. Вона цікава тим, що в неї два різноманітних періоди діють поперемінно. Період 90 днів замінився інтервалами хаотичної зміни блиску, що потім замінився інтервалом регулярних коливань із періодом 71 день. Після цього період знову став 90 днів. Проте по змінах показників кольору цю зірку не можна віднести до типу RV Tau, скоріше це окремий підтип SRd.

Більшість зірок із групи SRc раніш відносились до неправильних змінних. Характерними представниками є α Ori, α Her, μ Cep. З однієї сторони вони подібні з підтипом AІ Sco (RV Tau), тому що виявляють невеличкі коливання блиску з амплітудою 0,2-0,5 зоряних вуличин і з періодом 50-200 днів, що накладаються на добре виражені зміни блиску з періодом 700-2500 днів і з амплітудою 1-2 зоряних величин. Але всі SRc-зірки належать до спектральному класу М, і якби не було довгоперіодичних коливань блиску, зірки цього типу були б дуже подібні зі змінними типу AF Cyg.

На зірки типу AF Cyg дуже схожі зірки типу RS Cnc, але періодичність у них дотримується набагато краще і форма кривої блиску більш стійка. Характерним для цих зірок є те, що іноді після цілого ряду більш-менш правильно минулих періодів форма кривої блиску раптом порушується, а амплітуда зменшується від 1,0 до 0,2 зоряних величин і навіть ще менше. Блиск зірки в такий час відчуває неправильні дрібні коливання. Після декількох місяців зірка знову починає показувати звичайні напівправильні зміни.

Часто між зірками різних типів, але однакових підтипів і однакових спектральних класів існують, швидше за все, тільки фотометричні розходження, фізична ж природа може бути однаковою. Наприклад, SRb-зірки спектрального класу М мають ту ж середню світність, що і Lb-зірки такого ж спектрального класу. Крім цього, у них збігається і просторовий розподіл. Ще одна загальна властивість — це те, що серед усіх довгоперіодичних змінних, крім RV Tau, є джерела *мазерного* випромінювання в лініях молекул *окису кремнію, водяного пару і гидроксилу*. Загальною рисою можна вважати також емісію в спектрах, що характерна не тільки для мірід, але і для SR-зірок, правда в менших випадках.

Що стосується повільних неправильних змінних типів Lb і Lc, те швидше за все, це просто недостатньо вивчені зірки. Багато хто з них при подальшому дослідженні можуть виявитися напівправильними або пульсуючиими інших типів.

Космічні мазери

Світлові хвилі - це лише мала частина величезного діапазону довжин хвиль, що випромінюються і поглинаються різноманітними космічними об'єктами. Значну інформацію про ці об'єкти несуть радіохвилі. Радіовипромінювання носить шумовий характер і має неперервний спектр, що охоплює широкий діапазон. Радіотелескоп виділяє на робочій довжині хвилі з цього спектра порівняно вузьку смугу радіочастот. Радіохвилі з довжиною хвилі більше 30 метрів не проходять через іоносферу Землі, а радіохвилі з довжиною хвилі менше 1 сантиметра поглинаються молекулами атмосферних газів. Основне призначення антени радіотелескопа - зібрати максимальну кількість енергії, принесеної радіохвилями від об'єкта. Ця кількість енергії прямо пропорційна ефективній площі антени.

Радіоспостереження за останні 30 років призвели до істотного перегляду поглядів на структуру міжзоряного середовища. Зокрема, відкриття мазерного радіовипромінювання молекул дало початок цілому напрямку сучасної астрофізики і по праву ставиться в один ряд із такими видатними досягненнями, як виявлення квазарів, реліктового випромінювання і пульсарів.

Назва "мазер" походить від початкових букв англійської назви молекулярних квантових генераторів "*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" - посилення мікрохвиль за рахунок змушеного випромінювання. Це явище було передбачено А. Ейнштейном у 1917 році. А лабораторний мазер був створений у 1951 році американським вченим Чарльзом Таунсом для хронометражу часу з високою точністю і для посилення слабкого мікрохвильового випромінювання. Космічні мазери були відкриті в 1965 році. Американські вчені виявили в спектрах радіовипромінювання деяких нічим не примітних туманностей дуже яскраві і вузькі лінії випромінювання з довжиною хвилі 18 см. Спочатку навіть припустили, що це випромінювання належить невідомій речовині, що було названо "*містеріум*". Але буквально через декілька тижнів "містеріум" розділив долю своїх "оптичних братів" - "*небулія*" і "*коронія*". Дослідження показали, що незвичні лінії належать міжзоряному гідроксилу ОН, а їхні аномальні властивості обумовлені мазерним механізмом випромінювання.

Як же виникає мазерне випромінювання? Для того щоб пояснити це, необхідно зробити невеличкий відступ в область хімії і квантової механіки. Якщо система тіл, що випромінюють і поглинають (у нашому випадку це атоми і молекули в зірці) замкнута, то фотони, за допомогою яких тіла обмінюються енергією, повинні бути в рівновазі з атомами, що родять ці фотони. У обміні енергією беруть участь фотони всіх енергій, що теж саме — електромагнітні хвилі всіх довжин. Умова теплової рівноваги, що рано або пізно наступає в замкнутій системі, потребує, щоб відношення енергії поглинання до енергії випромінювання було однаковим для всіх довжин хвиль. Цю теорему довів у 1860 році німецький фізик Густав Кірхгоф. Зміст цього закону полягає в тому, що число поглинених фотонів даного сорту (тобто даної енергії) при тепловій рівновазі дорівнює числу випроменених фотонів того ж сорту. Звідси випливає, що якщо предмет сильно поглинає які-небудь промені, то ці ж промені він сильно випромінює. Випромінювання відбувається, коли система переходить із стана з більшою енергією в стан із меншою енергією. Якщо атом поглинає фотон з енергією hν, то він переходить у збуджений стан (його електрони переходять на більш віддалені від атомного ядра орбіти). У цьому збудженому стані атом існує деякий невизначений час, а потім знову повертається на низький рівень. Цей процес називається спонтанним випромінюванням. Така рівновага називається динамічною. Атом поводиться, як кулька, яку важко утримувати на шпичастій вершині гірки: незначний подув — і рівновага порушена. Кулька вкотиться в ямку, здебільшого в найглибшу, з котрої його можна витягти лише сильним ударом. Про атом, що спустився на найнижчу сходинку, говорять: атом знаходиться в стабільному стані. Проте, крім положень "на вершині" і в "глибокій ямі" існує ще і проміжна ситуація: кулька може знаходитися в неглибокій ямі, відкіля її можна визволити невеличким поштовхом. Таке положення називається метастабільним. Так що крім збудженого і стабільного існує ще і третій вид рівнів енергії — метастабільний. Закон збереження енергії потребує, щоб число переходів зверху вниз дорівнювало числу переходів знизу вверх. Чим визначається число переходів вверх? Двома факторами: числом атомів на нижньому поверсі і числом ударів, що піднімуть на верхній поверх. Ну, а число переходів униз? Воно визначається числом атомів на верхньому поверсі, і начебто б більше ні від чого не залежить. Проте на досвіді кінці з кінцями не сходилися. Число переходів нагору росло з температурою куди швидше, чим число переходів униз. Модель призводила до нісенітниці. Виходило, що рано або пізно всі атоми будуть загнані на верхній рівень: система буде знаходитися в хитливому стані, а випромінювання не буде. От цей неможливий висновок і призвів Ейнштейна до думки, що на переходи атома з верхнього поверху на нижній впливає ще якась обставина. Залишалося припустити, що крім спонтанного переходу на низький рівень існує і перехід змушений (або індукований).

От що це таке. Система знаходиться на верхньому рівні. До нижнього рівня її відокремлює різниця *E2-E1=hν*. Надається, якщо на систему падає фотон з енергією, рівної *hν*, то він змусить перейти систему на ніжний рівень. Сам падаючий фотон при цьому не поглинеться, а піде далі в супроводі з новими, породженими атомами при переході, точно такої ж частоти як і перший.

 Спектри атомів виникають у результаті електронних переходів. Як тільки ми переходимо від атомів до молекул, відразу ж виникає необхідність в урахуванні ще двох складових енергії. Отже, фізичний стан молекули визначається її енергією, тобто спроможністю взаємодіяти з навколишнім середовищем, і її положенням у просторі, тобто — орієнтацією (мал.13). Молекула може обертатися в просторі і атоми можуть чинити коливання по відношенню один до одного. Таким чином, стан молекули описується станом її електронної хмари (електронні рівні), станом коливального руху (коливальні рівні) і станом обертання (обертальні рівні). Треба оперувати трьома типами даних, можна сказати "номером будинку", "поверху" і "квартири". Але що грає яку роль? Які енергетичні рівні розділені великими проміжками (при яких переходах потрібна велика енергія фотона, а отже, довжина хвилі випромінюється більш коротка), а які малими (менша енергія фотона і великої довжини хвилі)? Два електронних рівні e' і e'' — "номера будинків". "Поверхи" — коливальні рівні, а "номера квартир" — обертальні рівні. Як очевидно, проміжки між обертальними рівнями самі маленькі. Саме тут і виникає радіовипромінювання. Для того щоб це радіовипромінювання було мазерним, необхідна участь як мінімум трьох рівнів енергії, позначимо їх 1, 2 і 3, і відсутність теплової рівноваги між молекулами, що випромінюють, і навколишнім середовищем. Це значить, що в середовищі діє якійсь процес, котрий весь час переводить молекули на верхній (третій) рівень енергії, тобто в збуджений стан. Такий процес називається механізмом накачування. Це можуть бути процеси зштовхування або інфрачервоне випромінювання зірки. При переходах молекул у більш низький енергетичний стан вони можуть "затриматися" на деякому проміжному метастабільному рівні (на рівні 2). При цьому випромінювання не буде, а енергія молекул перейде в енергію обертання або коливання. Якщо на метастабільному рівні 2 збирається значно більше молекул, чим на основному (рівень 1), то говорять, що виникла інверсна перенаселеність і тоді фотон, що відповідає частоті переходу із метастабільного рівня 2 на основний 1 не поглинеться, а, навпаки, призведе до того, що молекули почнуть переходити на основний рівень із випромінюванням таких же самих фотонів. Виникає лавина індукованих переходів, що призводить до багатократного посилення випромінювання в лінії 2-1 (мал.13). Це і є мазерне випромінювання. Його основна особливість це — гостра спрямованість потоку випромінювання, недосяжна ні в яких устроях, оскільки підсилити можна тільки випромінювання, що йде в строго визначеному напрямку.

У нашої і у сусідніх галактиках виявлено декілька сотень космічних мазерів. Їх можна розділити на два основних типи: 1) мазери, що випромінюються молодими (вік менше 105 років) гарячими ОВ - зорями і хмарами зореутворення; 2) мазери, пов'язані з холодними зірками великої світності, що сильно проеволюціонували. Мазери 1-го типу знаходяться на периферії газо-пилових комплексів, у безпосередній близькості від компактних зон HII випромінювання. Наприклад, *туманність Оріона*, області зореутворення *W3, W49, W51, Стрілець B2*, спіральна галактика *NGC 253*, пекулярна галактика з подвійним ядром *IC 4553* і ін. Найвидатніший мазер на небі — це мазер на молекулах водяного пари, що йде від області **HII**, що позначається *W49*. Потужність його випромінювання у вузькому спектральному діапазоні порівнянна зі світністю Сонця у всьому спектрі електромагнітного випромінювання.

мал. 13

Космічні мазери 2-го типу знаходяться в оболонках , що розширюються, зір-надгігантів типу VY Великого Песа або змінних зірок типу Міри Кита. Ці мазери більш багаточисленні, причому зміна потужності мазерного потоку змінюється разом із зміною візуального й інфрачервоного блиску цих зірок. У оболонках холодних зірок мазерні лінії випромінюють в основному три види молекул. Це молекули гідроксилу (ОН), води (H2O) і окису кремнію (SiО). Всього мазерне випромінювання було знайдено майже у 400 зірок.

Література:

1. В. П. Цесевич “Переменные звезды и их наблюдение” Москва “Наука” 1980
2. Р. Киппенхан “100 миллиардов солнц рождение, жизнь, и смерть звезд” Москва “Мир” 1990
3. В.И.Марсакова (журнал "Наше небо")
4. Л.С.Кудашкина (журнал "Наше небо")

Інформаційні джерела:

1. Одеській Астроклуб (http://www.astroclub.odessa.ua)
2. Астрофізичний науковий архівно-дослідницький центр високих енергій (HEASARC) при NASA (http://heasarc.gsfc.nasa.gov)
3. Національне управління по аеронавтиці і дослідженню космічного простору США — NASA (http://www.nasa.gov)
1. ЗКЗЗ – Загальний Каталог Змінних Зірок [↑](#footnote-ref-1)