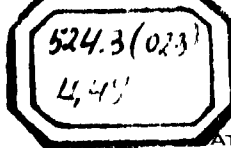


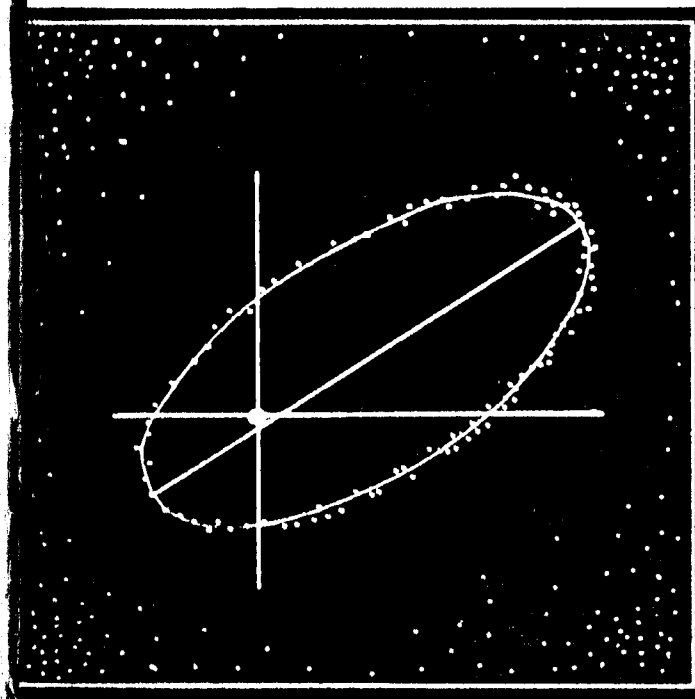
9 коп.

74034



О «ЗНАННЯ» УКРАЇНСЬКОЇ РСР

СЕРІЯ VIII, № 2



В. П. ЦЕСЕВИЧ

ТІСНІ ПОДВІЙНІ ЗІРКИ

ТОВАРИСТВО «ЗНАННЯ» УКРАЇНСЬКОЇ РСР

В ЛАБОРАТОРІЯХ УЧЕНИХ, СЕРІЯ VIII, № 2

В. П. ЦЕСЕВИЧ,
член-кореспондент АН УРСР

ТІСНІ ПОДВІЙНІ ЗІРКИ

КИЇВ
1980

Тематичний цикл

«ПЕРЕТВОРЕННЯ НАУКИ У БЕЗПОСЕРЕДНЮ ПРОДУКТИВНУ СИЛУ»

Ц49 Цесевич В. П. *Тесные двойные звезды. К., общество «Знание» Украинской ССР, 1980, 48 с. (Серия «В лабораториях ученых»).*

В брошюре в свете решений XXV съезда КПСС освещаются достижения современной астрофизики, в частности, рассказывается о затменно-двойных, спектрально-двойных, а также рентгеновских звездах, пульсарах, полярах и т. д.

Рассчитана на лекторов, пропагандистов и широкий круг читателей.

ЗМІСТ

	Стор.
Фізика зірок	4
Подвійні зірки	19
Унікальні подвійні системи	37
Література	48

Ц 95 — 018
М 281 (04) — 80 95 — 80

© ТОВАРИСТВО «ЗНАННЯ»
УКРАЇНСЬКОЇ РСР, 1980

В лабораториях ученых

Владимир
Платонович
Цесевич

Відповідальний редактор
доктор фізико-математичних наук
Т. Т. Попович
Завідуючий редакцією В. А. Бойченко
Редактор А. В. Жукова
Молодший редактор С. М. Ковбаса
Художній редактор В. Д. Лелеко
Технічний редактор Л. А. Марчук
Коректор Н. А. Захаревич

ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ
ЗВЕЗДЫ

(На украинском языке)

Здано до набору 02.01.80. Підписано до друку 13.02.80. БФ 31195. Формат 84×108/32. Папір газетний. Шрифт літературний. Друк високий. Фіз. друк арк. 1,5. Ум. друк. арк. 2,52. Обл.-вид. арк. 2,6. Тираж 10202. Зам. 89. Ціна 9 коп.

Товариство «Знання» Української РСР.
252005, Київ-5, Червоноармійська, 57/3.

Орденa Леніна комбінат друку видавництва
«Радянська Україна».
252006, Київ-6, Андрі Барбюса, 51/2.

Першочерговим завданням радянської науки є розширення і поглиблення досліджень закономірностей природи і суспільства, збільшення її вкладу в розв'язання найважливіших проблем будівництва матеріально-технічної бази комунізму. В Основних напрямках розвитку народного господарства СРСР на 1976—1980 роки поставлене завдання: «...розвивати теоретичні і експериментальні дослідження в галузі ядерної фізики, фізики плазми, твердого тіла, низьких температур, радіофізики і електроніки... оптики, астрономії з метою прискорення науково-технічного прогресу...»¹. Успіхи цих галузей знань були поштовхом до бурхливого розвитку астрофізики, вони допомагають поліпшувати спостереження за небесними тілами, проникати дедалі глибше у космос. Завдяки досягненням сучасної техніки астрофізика як наука добилася величезних успіхів у дослідженні та пізнанні законів Всесвіту.

Астрономія — одна з стародавніх наук на Землі. За словами Ф. Енгельса, вона виникла в зв'язку з практичними потребами людей. Без знання астрономії немислимі були б морські та океанські подорожі, здійснювані з незапам'ятних часів. В сиву давнину розвиток землеробства і скотарства регулювався такими сезонними явищами, як розливи великих річок, настання періоду дощів, зміни теплої і холодної погоди, полуденної висоти Сонця протягом року. Коли ще не був створений годинник, люди визначали час по Сонцю, а вночі — по зірках. Астрономічні спостереження лягли в основу календарів. Тисячолітнє вивчення Всесвіту дало можливість пізнати

¹ Матеріали XXV з'їзду КПРС. К., Політвидав України, 1976, с. 241.

основні закони природи. Так, Галілей відкрив свій відомий принцип інерції завдяки астрономічним спостереженням. Вони ж допомогли відкрити Ньютону фундаментальний закон природи — закон всесвітнього тяжіння. Дані астрономії лягли в основу революційної фізичної теорії — теорії відносності.

Нині вивчення космосу сприяє виявленню багатьох невідомих раніше на Землі фізичних умов і станів речовин, джерел енергії. Прискорений розвиток не тільки фізики, радіофізики, хімії, а й біології, медицини тощо теж значною мірою пояснюється успіхами дослідження зіркового Всесвіту. А. Ейнштейн з цього приводу відзначав, що інтелектуальні знаряддя, без яких був би неможливим розвиток сучасної техніки, прийшли до нас в основному від спостережень за зірками.

ФІЗИКА ЗІРОК

На зорі людства, коли астрономія тільки-но зароджувалася, земляни, не розуміючи природи небесних тіл, не знаючи законів розвитку суспільства, справжніх причин тяжких хвороб, воєн, обожнювали світила, приписували їм здатність впливу на долі людей і народів. В зв'язку з цим народилося й чимало казкових легенд про зірки. Наприклад, три сузір'я-осіннього зоряного неба — Кассіопея, Персей та Андромеда об'єднані в чудовій легенді. Дочка Кассіопеї — красуня Андромеда була принесена в жертву морському чудовиську. Прикута до скелі, вона з жахом очікувала появи з морської безодні злого чаклуна. Але Андромеду побачив Персей і поспішив на допомогу. У нього була чарівна зброя — потворна голова Медузи. Кожний, хто бачив її, перетворювався на камінь.

Коли чудовисько виходило з моря, готуючись вбити Андромеду, воно побачило голову Медузи і окам'яніло. Так Андромеда була врятована.

На старовинних зоряних глобусах збереглося зображення персонажа цієї романтичної легенди: Персея, який ніс в руці голову Медузи. На місці ока в неї виблискувала досить яскрава зірка — Алголь (β в сузір'ї Персея) (рис. 1). Алголь у перекладі з арабської означає злий дух. Через кожні 2 доби 20 год 49 хв. він мерк-

не, щоб потім розгорітися. Цю особливість, мабуть, помітили античні астрономи. Адже розмістили вони цю зірку на місці ока Медузи, що заснула.

У 1669 році італійський астроном Монтарі встановив цю незвичайну властивість Алголя. Однак причина мін-

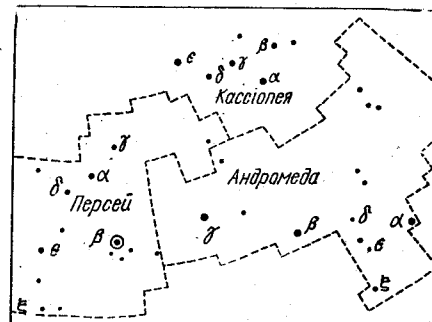


Рис. 1. Три осінніх сузір'я. Колом обведена Алголь — β Персея.

ливості блиску Алголя була з'ясована тільки через 113 років англійським астрономом Гудрайком. Послаблення блиску, яке періодично повторюється, викликане затемненням яскравої зірки її темнішим супутником. Так було відкрито першу затемнено-подвійну перемінну зірку. Нині таких об'єктів відомо понад тисячу.

Короткі періоди орбітального руху свідчать про взаємну близькість компонент подвійної системи — головної зірки та її супутника. Справді, відстань між центрами компонент порівнянна з кожною з останніх. Тому системи дістали назву тісних подвійних зірок. Їх систематичне вивчення дало можливість відкрити багато дивовижних властивостей і явищ. Однак для глибшого розуміння природи тісних подвійних систем слід спочатку розглянути властивості поодиноких зірок і Сонця.

Явища, що відбуваються на Сонці

Найближча і тому найбільш вивчена зірка — Сонце. Ми бачимо його диск і плями, факели, пори, гранули на ньому. Завдяки великій яскравості сонячного диска ми можемо спроектувати його зображення на екра-

ні в досить великому масштабі й побачити дрібні деталі. Диск Сонця вкритий найдрібнішими яскравими «зернятками». За образним висловом одного з астрономів, його можна порівняти з білою скатертиною, на якій розсіяні зерна рису. Це гранули. Іноді на диску з'являються між гранулами невеликі темні простори — пори. Після виникнення вони швидко зникають, хоч іноді й збільшуються, перетворюючись на пляму — величезний вихор, що має потужне магнітне поле. Часто сонячна пляма подрібнюється на групу плям, оточених загальною протяжною півтінню.

Як окрема сонячна пляма, так і група їх — утворення тимчасові. Вони з'являються, існують більш чи менш тривалий відрізок часу, а потім поступово руйнуються і зникають.

Спостерігаючи за видимим переміщенням плям по сонячному диску, бачимо, що Сонце рухається навколо осі, роблячи один оберт за 25 діб 9 год 8 хв. У світила є два полюси, екватор. З'ясувалося, що Сонце обертається навколо осі не як тверде тіло. В екваторіальних областях період осьового обертання значно коротший, ніж в областях, близьких до полюсів.

Кількість плям, так би мовити, «заплямованість» Сонця змінюється за періодом, близьким до 11,3 року. Іноді диск його буває чистим. В цей час сонячна активність — мінімальна. Потім з'являються плями, спочатку в областях, віддалених від екватора, — починається новий цикл сонячної активності. Через 3—4 роки заплямованість стає найбільшою: настає максимум сонячної активності. Після нього плями рідшають і поступово зникають через 7—8 років.

Коли сонячні плями групуються недалеко від краю сонячного диска, то стають помітними оточуючі їх факельні поля — ділянки, світліші за диск. Це дещо більш нагріті місця в сонячній атмосфері.

Під час повних сонячних затемнень, коли темний диск Місяця закриває диск Сонця, помітними стають протуберанці (виступи) і сонячна корона, що простягається на багато сотень кілометрів. В цей час видні зовнішні оболонки Сонця. Диск Місяця, що закриває Сонце, оточений оранжево-червоним бордюром. Це хромосфера, прилегла до сонячної фотосфери. Тут народжуються протуберанці, які бувають двох типів — спокійні

та активні. Особливий інтерес становлять останні. Іноді вони рухаються з великими швидкостями і можуть долати сонячне притягання. Спостерігалися випадки, коли активний протуберанець піднімався на 1 млн. 700 тис. км над поверхнею фотосфери. У сонячній короні, яка простягається на відстань до кількох радіусів Сонця, швидкості хаотичного руху частинок, що входять до її складу, зокрема електронів, настільки великі, що корона стає джерелом надзвичайно потужного радіовипромінювання.

Описання явищ, які відбуваються на Сонці, буде не повним, якщо не згадати про спалахи. З ряду причин деякі сусідні з плямами ділянки на короткий час стають джерелом потужного випромінювання потоків частинок, які рухаються з надто великими швидкостями. Місце і час спалаху завбачити поки що не можна. Фотосферні спалахи супроводжуються потужними короткочасними посиленнями радіовипромінювання.

Зазначені явища ми можемо спостерігати в деталях тому, що відстань від Сонця до нас (яка становить майже 150 млн. км і приймається за астрономічну одиницю виміру відстаней *a*) надзвичайно мала порівняно з відстанями, що відділяють нас від зірок. Так, відстань до найближчої зірки приблизно дорівнює 275 000 астрономічних одиниць. Промінь світла долає її за $4\frac{1}{3}$ року. Тому ми бачимо зірки як безрозмірні виблискуючі крапки.

Всі вони надто різноманітні за своїми властивостями. Однак знання явищ, що відбуваються на Сонці, допомагає при поясненні результатів спостережень за зірками.

Сонце — зірка-карлик. Діаметр його дорівнює 1 392 000 км; він у 109,12 раза більший за діаметр Землі. Маса світила становить $1,99 \times 10^{33}$ г, тобто більша за масу Землі майже в 333 тисячі раз. Середня густина речовини Сонця — 1,41 г/см³. Тому вважається, що речовина Сонця перебуває в газоподібному стані. Вона не розлітається в космічний простір внаслідок дії загальної сили тяжіння, спрямованої по радіусах до його центра. Прискорення сили тяжіння на поверхні Сонця 273,8 м/сек², тобто в 27,9 раза більше за прискорення сили тяжіння Землі. Для того, щоб частинка подолати сонячне тяжіння і відірвалася від поверхні Сонця в світовий простір, їй потрібна швидкість, яка б становила 617,7 км/с.

Температура на поверхні Сонця дорівнює 5807° (надалі використовуватимемо округлене значення рівне 6000°). Потужність сонячного випромінювання становить $3,88 \times 10^{33}$ е/с. Отже, Сонце — величезна нагріта і випромінююча куля.

Яка ж його будова і які джерела його випромінювання?

Сила тяжіння не тільки перешкоджає розлітання газоподібної речовини, а й стискує Сонце. Зовнішні шари тиснуть на внутрішні. У міру заглиблення в його надра збільшується тиск і густина речовини. При цьому підвищується і температура. В центрі Сонця густина речовини дорівнює 132 г/см^3 , а температура досягає $14,8$ млн. град.

Отже, природним було припущення про те, що при такій високій густині речовина могла б перейти з газоподібного в рідкий і навіть твердий стани. Проте вона залишається газоподібною, оскільки значне підвищення температури викликає іонізацію речовини. Внаслідок бурхливих теплових рухів атоми співударяються між собою і розщеплюються на складові частини — ядра і електрони. Таким чином, зіркова речовина (в надрах зірок) є сумішшю атомних ядер, електронів і фотонів. Середні відстані між цими частинками набагато перевищують їх власні розміри, а це сприяє збереженню газоподібного стану речовини.

Що ж заважає ще більшому стисненню Сонця? Насамперед тиски газу і випромінювання, спрямовані з надр назовні. Отже, Сонце перебуває в стані рівноваги: сили тяжіння і тиску врівноважують один одного. Надзвичайно велика густина, що дорівнює 132 г/см^3 , не є занадто великою для «зіркової речовини». При розрахунках характеристик «сонячної речовини» використовуються закони ідеальних газів. Тиск визначається за формулою $p = R\rho T$, де R — газова стала. Ця закономірність застосовується при розрахунках «моделі Сонця».

Джерелом променистої енергії, яке «живить» Сонце вже протягом майже 6 млрд. років, є термоядерні реакції, що відбуваються в ньому. Основна реакція полягає в перетворенні водню у гелій. При цьому чотири протони об'єднуються і, загубивши під час реакції два позитрони, народжують так звану α -частинку — ядро атома гелію. До того ж протони втрачають частину своєї маси, яка народжує еквівалентне випромінювання.

Що відбувається потім з народженими фотонами? Вони, багаторазово відбиваючись і випромінюючись, поступово проникають у зовнішні шари, пристосовуючись до умов середовища, через яке вони рухаються назовні. Зіркове середовище непрозоре, тому фотон витрачає дуже багато часу, перш ніж досягне поверхні Сонця. Однак, досягнувши її, тобто фотосфери (шару, з якого випромінювання поширюється у космічний простір), фотони починають рухатися із швидкістю близькою до 300 тис. км/с.

Така в загальних рисах будова Сонця і багатьох, так би мовити, звичайних зірок — карликів і велетнів.

Описані явища (плями, факели, спалахи і т. п.) поверхневі, зв'язані в основному з магнітними силами, які діють у зовнішніх шарах Сонця і зірок.

Основна характеристика зірок — світність, тобто потужність випромінювання. Щоб визначити її, необхідно знати відстані від зірок до Землі. Є кілька способів визначення їх. В загальних рисах світність зірок L — це відношення потужності випромінювання останніх до потужності випромінювання Сонця (як відзначалося, вона дорівнює $3,88 \times 10^{33}$ е/с). Обчислені світності зірок виявилися дуже різноманітними. Наприклад, у супутника зірки $+4^\circ 4048$ каталога Боннського огляду неба світність дорівнює $1/575\,000$ ($\log L = -5,76$). Це означає, що потужність зазначеного випромінювання в 575 тис. раз менша за сонячну. З іншого боку, світність зірки ζ Скорпіон дорівнює майже 480 тис. ($\log L = 5,68$).

Друга важлива характеристика зірок — температура (T) випромінюючого зовнішнього шару — фотосфери. Існує кілька способів визначення її. Один з них базується на аналізі кольору зірки. Чим вища температура фотосфери, тим блакитніша зірка, чим нижча — тим червоніша вона. Встановлено, що в червоній зірці температура становить близько 3000° , у білій — $12\,000^\circ$, а в блакитній — $25\,000^\circ$. Є зірки, температура яких досягає $150\,000^\circ$. Розроблено способи точного визначення кольорів зірок і відповідних температур.

Якщо відома світність і температура фотосфери, то можна розрахувати і радіус R зірки. Один із законів теоретичної фізики стверджує, що потужність випромінювання I одиниці поверхні (скажімо, 1 м^2) нагрітого

тіла пропорціональна четвертому степеню температури. $J = \sigma T^4$, де σ — певна постійна кількість. Оскільки диск зірки має форму кола радіуса R , то світна площа $S = \pi R^2$, а потужність випромінювання диска $S \cdot J = \sigma \pi R^2 T^4$.

Потужність випромінювання Сонця становить $\sigma \pi R_c^2 T_c^4$, де R_c і T_c — радіус і температура Сонця. Його світність

$$L = (R/R_c)^2 (T/T_c)^4 \cdot \frac{\kappa}{R_c} = \sqrt{L} \left(\frac{6000}{T} \right)^4.$$

Радіуси зірок, як і їх світності, досить різноманітні. Є зірки, радіуси яких у десятки і сотні разів більші за радіус Сонця. Такі зірки називаються гігантами. Однак вони не дуже численні. Переважають зірки, порівнянні з Сонцем. Це зірки-карлики. І карлики, і гіганти належать до «звичайних зірок».

Однак є зірки, радіуси яких набагато менші за соляний і порівнянні з радіусом Землі. Колір їх білий, тому назвали їх білими карликами. Останнім часом виявлені зірки з радіусом порядку 30 км. Це нейтронні зірки, про які йдеться далі. Останні, як і білі карлики, вже відносяться до «незвичайних зірок», хоч їх, мабуть, не менше, ніж зірок «звичайних».

Четверта характеристика зірок — маса визначається за величиною орбітального руху.

До речі, маси багатьох зірок не настільки різні, як їх світності та об'єми. Крім того, з'ясувалося, що маса і світність звичайних зірок статистично залежні. Якщо виразити масу зірки M у частках маси Сонця, то одержимо залежність вигляду $L = M^n$, де n — число, що знаходиться між 3 і 4.

П'ята фізична характеристика — середня густина речовини ρ зірки. Для її визначення слід розділити масу на об'єм. І тут ми зустрічаємося з неочікуваним і дивовижним фактом. Середні густини зірок виявилися вкрай різноманітними. Так, у червоної зірки-гіганта вона надзвичайно мала і становить від 10^{-9} до 10^{-6} г/см³. Це дуже розріджені і протяжні газові хмари, в яких густина речовини порівнянна з густиною лабораторного вакууму.

А «звичайні», подібні до Сонця, зірки-карлики мають середню густину речовини, що знаходиться в межах від 0,1 до 10 г/см³.

У білих карликів ця характеристика коливається в межах від 50 тис. до 1 млн. г/см³, тобто досягає 1 т/см³.

Але ще більш дивовижними виявилися нейтронні зорі — в них середня густина речовини 10^{14} г/см³.

Такі значні розбіжності властивостей вимагали пояснення, і воно було знайдено.

У першій чверті нинішнього століття два астрономи незалежно один від одного — Герцшпрунг і

Рессел зробили графічне зіставлення двох основних характеристик зірок — світності й так званого спектрального класу. Щоб уникнути необхідності докладного описання спектрів зірок та їх класифікації, розглянемо зіставлення світностей і температур (температур фотосфери). Справа в тому, що спектральний клас зірки визначається в основному за температурою фотосфери і прилеглого до неї зовнішнього шару, а теоретичні міркування пов'язані не із спектральним класом, а з температурою випромінювального шару. Отже, побудуємо діаграму Герцшпрунга—Рессела (діаграму Г—Р) у координатах $\log T$ та $\log L$.

З цією метою відкладемо на горизонтальній осі графіка величини $\log T$, а на вертикальній — $\log L$ (рис. 2). Кожній зірці з відомими зазначеними параметрами відповідатиме точка. При розгляданні еволюції зірки теоретично змінюватиметься положення точки на графіку, внаслідок чого утвориться еволюційний трек. Очевидно, зірки із значною світністю розташуються у верхній частині діаграми. Чим, так би мовити, гарячіша зірка, тим лівіше вона розміститься на діаграмі.

Складена за таким принципом діаграма Г—Р виявилася досить своєрідною. На ній точки розташувалися поблизу основних ліній. Одна з них — лінія масового розміщення точок, спрямована на діаграмі ліворуч і вгору, інша йде праворуч і вниз. Вона дістала назву головної послідовності, або послідовності зірок-карликів. У ній знаходиться й точка, відповідна Сонцю.

У верхній частині діаграми Г—Р згруповані точки зірок-гігантів. Це послідовність гігантів та надгігантів. Ліворуч внизу знаходяться точки гарячих зірок малої

світності білих карликів. Дещо проміжне становище між головною послідовністю і послідовністю гігантів займають точки особливого типу зірок-субгігантів.

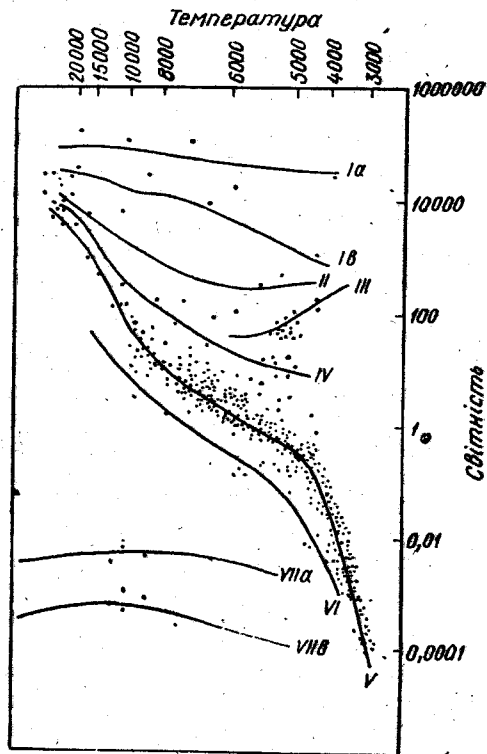


Рис. 2. Діаграма Г—Р. Символами Iа, Iб позначені ділянки зірок-надгігантів; II — гігантів; III — слабких гігантів; IV — субгігантів; V — головна послідовність зірок-карликів; VI — субкарликів; VIIа і VIIб — білих карликів.

Слід відзначити, що діаграма досить повно відображає описані вище фізичні властивості зірок.

Еволюція поодиноких зірок

Міжзоряний простір не порожній, а заповнений дифузною речовиною — газом і пилом. Їх присутність виявляється кількома способами, в тому числі методами радіоастрономії. Найкраще вивчені дифузні хмари водню. Вони випромінюють радіохвилі довжиною 21 см. Другий спосіб — оптичний. Дифузні хмари газу частково поглинають світло зірок, розташованих позаду них. Якщо ж так звана оптична густина газопилової хмари досить велика, то на фоні зоряного неба виникає прогалина — темна пляма, що повністю закриває від нас зірки. Ці темні «туманності», які іноді називають «вугільними мішками», є, за сучасними уявленнями, предками «новонароджених» зірок, що утворюються. Речовина темної туманності неоднорідна. В ній спостерігаються щільніші згустки. Їх вважають зародками зірок. Внаслідок притягання такого згустка розсіяна речовина ущільнюється і кінець кінцем народжується протозірка.

Перший етап її еволюції — контракційний. На ньому щойно сформована протозірка починає стискуватися. При цьому вона розігрівается. Потенціальна енергія тяжіння переходить у теплову. Тривалість цього етапу еволюції залежить від маси утвореного тіла. У зірок з великою масою стиск відбувається швидше, ніж у зірок з малою масою. Тому процес стиску і розігрівання в перших триває 10^4 — 10^5 років, в других — 10^7 років.

Що ж станеться з точкою на діаграмі Г—Р, яка відповідає першому етапу еволюції зірки? Оскільки на початку еволюції протозірка ще не розігрівалася, то ми її не бачимо. Коли вона почне випромінювати, температура увесь час підвищуватиметься, і, отже, відповідна точка спочатку розташується на діаграмі Г—Р в ділянці малих температур, тобто в правій частині, а потім пересуватиметься ліворуч. У протозірки, що стискається, досить швидко зменшується поверхня. Тому світність останньої зменшуватиметься, і точка на діаграмі зміститься ліворуч вниз. Такий характерний еволюційний трек на першому, контракційному етапі.

У зірок більшої маси трек на діаграмі Г—Р буде розташований вище і проходитиме під час еволюції швидше (рис. 3).

Зазначений етап еволюції закінчується в той момент, коли центральна температура зірки досягає кількох

мільйонів градусів і стає достатньою для початку термоядерних реакцій перетворення водню на гелій. Тоді точка на діаграмі Г—Р виходить на так звану початкову

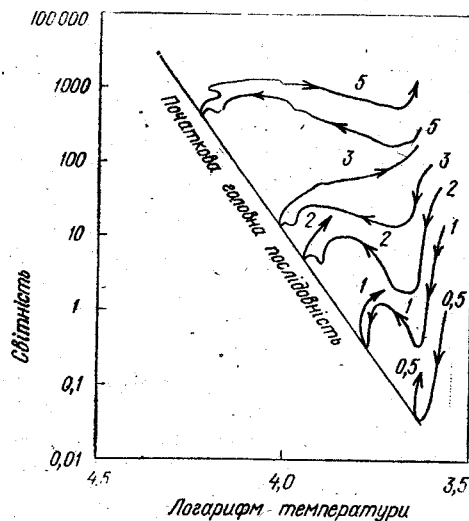


Рис. 3. Схематичне зображення еволюційних треків на діаграмі Г—Р; позначені маси зірок, виражені в частках маси Сонця. Стрілки вказують напрям еволюції.

ву головну послідовність, де знаходиться дуже довго, протягом мільйонів і навіть мільярдів років. Сонце, що існує майже 6 млрд. років, перебуває нині на головній послідовності. Місце виходу точки на головну послідовність залежить від маси зірки. Чим вона більша, тим вище розташована відповідна точка (рис. 4).

Описану закономірність яскраво ілюструє діаграма Г—Р для молодого зіркового скупчення Плеяд. Воно складається тільки із зірок головної послідовності. Масивні і середні зірки уже закінчили перший етап еволюції, менші ще не встигли вийти на початкову головну послідовність і знаходяться на стадії гравітаційного стиску. Академік В. А. Амбарцумян та його співробітники на основі тривалих спостережень довели, що всі зірки незначної маси знаходяться в нестійкому стані: в них

відбуваються короточасні сильні спалахи, що повторюються нерегулярно. Це бурхливі вибухи явищ, характерних для контракційного етапу еволюції.

Але повернімося до другого етапу еволюції зірки. В цей час вона стійка. Еволюційні зміни, що в ній відбуваються, майже не позначаються на положенні точки на діаграмі Г—Р. І тільки тоді, коли значна частина водневого вмісту «вигорить», перетвориться в гелій, почнеться третій етап еволюції — відхід точки від головної послідовності в ділянку зірок-гігантів. При цьому відбувається диференціація речовини зірки, що супроводжується перебудовою її структури. Поступово утворюється гелієве ядро, розпухає оболонка. Розміри зірки збільшуються, її світність посилюється, середня густина зменшується, а температура поверхні спадає. Зірка з карлика перетворюється на гіганта. Цей процес відбувається швидше в зірок з більшими масою і світністю. Еволюційний трек спрямовується ліворуч, праворуч і вгору.

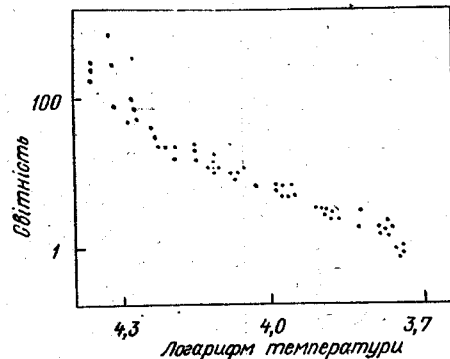


Рис. 4. Діаграма Г—Р зоряного скупчення Плеяд.

Що ж станеться з зіркою потім? Найімовірніше, що її зовнішня оболонка розсіється в космічний простір, а видимим буде її оголене ядро — білий карлик. Відбувається цей процес «спокійно» чи внаслідок «вибухів», сказати важко. Що ж до останніх, то вони спостерігаються досить часто. Іноді ми бачимо появу нової зірки і більш або менш тривалий спалах блиску, викликаний вибухом.

Білі карлики
і нейтронні зірки

Так звані нерухомі зірки зовсім не нерухомі. Кожна з них рухається з деякою швидкістю, хоч і дуже повільно, вздовж дуги великого кола небесної сфери. Це так званий власний рух зірки. Величина його за-

лежить від просторової швидкості зірки і відстані від неї до спостерігача.

У 1844 році Бессель встановив нерівномірність власного руху Сіріуса, поступальний рух якого додається до орбітального руху, навколо загального центра маси Сіріуса і його невидимого супутника. Останній відкритий відомим американським оптиком А. Кларком 31 січня 1862 року при випробуванні виготовленого ним об'єктива. Взагалі подвійні зіркові системи — зовсім не дивина. Їх відомо досить багато.

Однак це відкриття відіграло важливу роль в історії зіркової астрономії і теоретичній астрофізиці. Справа в тому, що супутник Сіріуса виявився білою зіркою, тобто такою, що має високу температуру фотосфери і незначну світність. Це пояснювали тільки малим радіусом зірки. Проте ще Бессель вважав масу супутника Сіріуса досить великою. Згодом виявилось, що вона близька до маси Сонця. А це вже свідчить про надзвичайно велику середню густину його речовини.

Так був відкритий перший в історії астрономії білий карлик — надщільна зірка, яких відомо тепер кілька сотень. Можливо, їх дуже багато. Але внаслідок слабкої світності ми бачимо тільки найближчі до нас, тобто такі, що знаходяться в порівняно малому обсязі простору.

Чим пояснити надто високу густину речовини білого карлика? Якщо при розрахунках внутрішньої будови «звичайної» зірки можна користуватися законами, справедливими для ідеальних газів, то для пояснення структури білого карлика слід користуватися законами квантової фізики.

Так, відомо, що маса протона дорівнює $1,672 \times 10^{-24}$ г. Припустимо, зоряний газ складається тільки з водню, а його густина дорівнює 10^n г/см³. Якщо розділити останнє число на попереднє, то одержимо значення кількості протонів в одному кубічному сантиметрі:

$$N = 10^n : (1,67 \times 10^{-24}) \cong 6 \times 10^{n+23}.$$

Хай Δ — середня відстань між двома протонами. Обведемо кожний з протонів сферою радіуса Δ , тоді об'єм цієї сфери $V = \frac{4}{3} \pi \Delta^3$.

Тепер неважко оцінити величину Δ . Перемноживши V на N , ми повинні одержати 1 см³. Отже,

$$VN = 4,2\Delta^3 \times 6 \times 10^{n+23} = 1.$$

А після простих обчислень встановлюємо, що

$$\Delta = 0,74 \times 10^{-8 - \frac{n}{3}} \text{ см.}$$

В атомі водню біля протона рухається електрон. Найкоротша відстань між ними (радіус першої електронної Борівської орбіти),

$$a_0 = 0,53 \times 10^{-8} \text{ см.}$$

Якщо $n=0$, то $\Delta : a_0 = 1,42$ і середня відстань більша, ніж a_0 майже в півтора рази. Але це означає, що густина газу $\rho \cong 10^n$ в даному випадку дорівнює 1 г/см³ (оскільки $n=0$).

Якщо ж $\rho = 1000 = 10^3$, то $\Delta : a_0 = 0,142$ і середня відстань становитиме 0,14 a_0 . Протони зближені більше. Ще істотніше зближення при $n=6$, $\rho = 10^6$ г/см³. В цьому випадку $\Delta = 0,0142 a_0$.

Отже, при такому великому тиску не можна нехтувати розмірами частинок і силами їх взаємодії. Тиск в надрах зірки визначається тиском електронного газу. А електронний газ описується за зовсім іншою закономірністю, ніж ідеальний. Перший називається виродженим. Його основна властивість полягає в тому, що ні густина, ні тиск, зв'язані між собою певною залежністю, не залежать від температури. Остання обставина й дає можливість газу стискатися до величезних густин речовини.

Перетворення зірки на білого карлика вважається останньою стадією зіркової еволюції. Однак не всяка зірка може стати білим карликом. Для цього треба, щоб її маса була менше граничної, рівної 1,44 маси Сонця.

Ще одна різновидність «незвичайних» зірок — нейтронні. Відкриття першої нейтронної зірки зв'язано з подією, яка сталася в 1054 році. В літописах відзначається, що того року китайські і японські астрономи спостерігали випромінювання наднової зірки, що спалахнула в сузір'ї Тільця. Вона була настільки яскравою у своєму

максимумі блиску, що видимою була навіть вдень. Гігантський спалах повністю зруйнував оболонку зірки й утворив навколо неї велетенську хмару газу, що розлітався, — так звану крабоподібну туманність. На місці наднової зірки залишилося її надшільне ядро. Воно помітне тільки в найбільші телескопи.

При вивченні цього дивовижного явища визначне відкриття було зроблено радіоастрономами. Виявилось, що крабоподібна туманність — джерело радіовипромінювань. Крім того, ледь помітна зірочка виявилася пульсаром. Пульсації її радіовипромінювання мають дуже короткий період — лише 0,033 с.

Пульсар — це нейтронна зірка із середньою густиною речовини, що досягає 10^{14} г/см³, ущільненої в сфері радіуса 30 км. Використавши формулу для середньої взаємної відстані протонів (приймавши для спрощення розрахунку $n=15$, а не 14), одержимо $\Delta=0,7 \times 10^{-13}$ см, величину радіуса протона. Інакше кажучи, густина речовини нейтронної зірки близька до густини ядерної речовини. Періодичні зміни радіовипромінювання і блиску відбуваються з періодом, який дорівнює 0,033 с, і пояснюються осьовим обертанням намагніченої зірки — пульсара. Він посилає нам спрямоване випромінювання електронів, які рухаються в сильному магнітному полі.

Як могла утворитися зірка з такою значною густиною? Відповідь на питання була дана на основі квантової фізики. Справа в тому, що при стискуванні речовини білого карлика йому протидіють електростатичні сили відштовхування одноіменно заряджених протонів. При дуже великих густинах речовини протони об'єднуються з електронами в нейтральні (без заряду) частинки — нейтрони. Одержані в прискорювачах у земних лабораторіях, вони нестійкі і порівняно швидко розпадаються. При дуже високих густинах речовини зірок нейтрони стають стійкими, а відсутність у них заряду дає можливість силі гравітації без перешкод стискати речовину небесного тіла.

Можливий і дальший колапс речовини, який приведе до того, що випромінювання не зможе подолати впливу гравітації. Тоді зірка стане невидимою, перетвориться на невидимую, але гравітуючу «чорну діру». Це — останній етап існування зірки.

Візуально подвійні системи

На рис. 1 зображені сузір'я Касіопеї, Персея, Андромеди. Одна із зірок останнього сузір'я позначена грецькою буквою γ . Дивлячись на неї в телескоп, помічаємо, що вона складається з двох близьких одна до одної зірок: більш яскравої жовтої і менш яскравої — блакитної. Виявилось: у останньої є ще супутник. Таким чином, система γ Андромеди складається з трьох компонентів.

Здебільшого у аналогічних випадках обидві компоненти не взаємозв'язані, а їх близькість на небі пояснюється ефектом перспективи. Такі подвійні зірки не викликають інтересу, їх називають оптичними подвійними.

У фізичних подвійних системах обидві компоненти зв'язані силами притягання і беруть участь в орбітальних рухах, які підлягають законам небесної механіки.

Слід відзначити, що обидві компоненти рухаються по орбітах навколо центра мас подвійної системи, весь час знаходячись по різні боки його. Позначимо маси компонент через M_1 та M_2 , а їх відстань від центра маси через r_1 і r_2 . Тоді спостерігатиметься таке співвідношення $r_1 M_1 = r_2 M_2$.

Обидві орбіти лежать в одній площині, яка також проходить крізь центр мас подвійної системи.

Кожна з компонент описує навколо центра мас еліптичну орбіту, причому останній перебуває у фокусі еліптичних орбіт. Коло — окремий випадок еліпса. Для спрощення припустимо, що орбіти мають форму кіл.

Врахуємо третій закон Кеплера, який відображає зв'язок розмірів орбіт з масою подвійної системи і періодом орбітального обертання й описується формулою:

$$\frac{(r_1 + r_2)^3}{P^2 (M_1 + M_2)} = \frac{G}{4\pi^2}$$

Тут P — період обертання подвійної системи; M_1 , M_2 — маса компонент, величина G — стала притягання, що дорівнює $6,677 \times 10^{-11}$ м³/кгр сек; π — звичайне відношення довжини кола до його діаметра, яке дорівнює 3,14; r_1 і r_2 — радіуси кругових орбіт (формула вірна і для руху по еліпсах, але тоді r_1 і r_2 — великі півосі орбіт).

У цій формулі r_1 і r_2 вимірюються в метрах, P — в секундах, а M_1 і M_2 — в грамах. Якщо ж виразити радіуси в частках радіуса Сонця, маси — в частках маси Сонця, а P — у добах, то формула для визначення суми мас системи набуде такого вигляду:

$$M_1 + M_2 = 0,00398 (r_1 + r_2)^3 : P^2.$$

Остання широко застосовується при обчисленні мас зірок. Але при цьому треба знати радіуси орбіт. Необхідні дані збираються під час візуальних спостережень за допомогою спеціальних приладів. Одним з них вимірюється кутова відстань між компонентами.

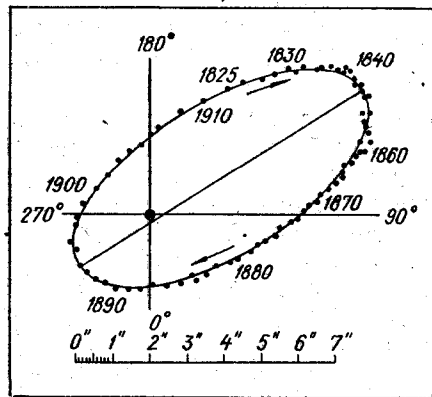


Рис. 5. Відносна видима орбіта подвійної зірки. Стрілкою вказаний напрямок руху. Внизу зображено масштаб (в секундах дуги).

На рис. 5 зображена відносна орбіта подвійної зірки № 70 в сузір'ї Змієносеця, що вивчалася з 1825 по 1910 рік. Період орбітального руху цієї зіркової пари триває 87,85 року. Кутові розміри орбіти 4,55 секунди дуги. Щоб визначити $r_1 + r_2$, слід знати відстань, що відділяє подвійну систему від дослідника. Однак при таких спостереженнях не можна встановити, де знаходиться центр мас системи, тобто не вдається окремо розрахувати r_1 і r_2 . Для цього робляться фотографічні спостереження. На знімках видно, як рухається кожна з компонент, що допомагає обчислити $r_1 : r_2$ і, зрештою, масу кожної з зірок.

Спектрально-подвійні зірки

При вивченні подвійних зірок робляться спектральні дослідження. До них вдаються навіть тоді, коли необхідно вивчити й такі тісні подвійні системи, які не здатний «розділити» жоден телескоп.

В основу методу покладений добре відомий принцип Доплера. При русі джерела випромінювання вздовж променя зору довжини хвиль спектральних ліній змінюються пропорційно променевій швидкості v , відповідно

до формули $\frac{v_r}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, де λ — довжина хвилі, $\Delta\lambda$ — її змін-

на, а c — швидкість світла. При віддаленні джерела світла $\Delta\lambda$ позитивна, довжина хвиль збільшується і, отже, спектральні лінії зсуваються в червону частину спектра. При наближенні джерела $\Delta\lambda$ негативна і спектральні лінії зсуваються до фіолетової ділянки.

Ці зміщення незначні, але можуть бути виміряні.

Якщо промінь зору не дуже нахилений до площини орбіти подвійної системи, при орбітальному русі її компонент проєкції швидкості на промінь зору періодично змінюватимуться.

На рис. 6 зображено зіркову систему, що складається з компонент А і В. С — центр мас системи, навколо якого рухаються обидві компоненти по своїх орбітах. Чотири положення компонент, позначені римськими цифрами І—ІV, зафіксовані у чотири послідовні моменти часу.

Почнемо з розгляду положення І, коли компонента А віддаляється від нас, і її спектральні лінії змістяться

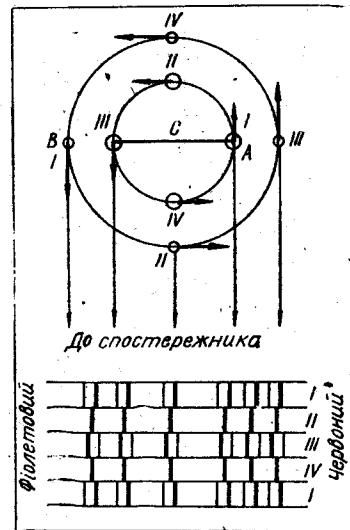


Рис. 6. Рух подвійної зірки. Змін в загальному спектрі системи.

в червоний бік. В цей час компонента B рухається до нас. Спектральні лінії в її спектрі наближені до фіолетової частини спектра. В нижній частині рисунка зображений загальний спектр обох компонент. Спектральні лінії компоненти A більш жирні.

У положенні II швидкості орбітального руху обох компонент перпендикулярні до променя зору, тому променеві швидкості дорівнюють нулю. За такої умови доплерівське зміщення не відбуватиметься і спектральні лінії зіллються. Загальний спектр обох компонент знаходиться в нижній частині рисунка і позначений символом II. У положенні III компоненти поміняються місцями: компонента A наближатиметься, а B — віддалятиметься. Лінії знову роздвоються, але в протилежні, порівняно з положенням I, боки.

Таке визначення подвійності може застосовуватися і в тому випадку, коли світності компонент настільки різні, що спостерігається спектр лише яскравої зірки. Спектральні лінії не роздвоюватимуться, але зберігатиметься зміщення (що періодично змінюється) спектральних ліній більш яскравої компоненти A .

Отже, в положеннях I і III променеві швидкості стають максимальними і рівними орбітальним швидкостям компонент v_A і v_B . Якщо помножити їх на період, то одержимо довжини орбіт $l_A = v_A \cdot P$ та $l_B = v_B \cdot P$.

Припустимо, що орбіти кругові і швидкості орбітальних рухів постійні. Тоді

$$l_A = 2\pi r_A i \quad l_B = 2\pi r_B i$$

де r_A і r_B — радіуси орбіт. Їх обчислюють з співвідношень

$$r_A = \frac{v_A \cdot P}{2\pi} \quad i \quad r_B = \frac{v_B \cdot P}{2\pi}$$

Обидва радіуси визначені в абсолютних одиницях у кілометрах. Підставивши їх значення у формулу третього закону Кеплера, визначимо суму мас компонент, а з формули

$$M_A \cdot r_A = M_B \cdot r_B$$

масу кожної зірки.

Недоліком спектрального методу аналізу випромінювання подвійних зірок є те, що, застосовуючи його, ми не можемо виявити подвійність системи, розташованої в просторі так, що промінь зору перпендикулярний її орбіті: очевидно, при орбітальному русі зірок променеві швидкості дорівнюватимуть нулю. Точніше, вони не змінюватимуться і дорівнюватимуть променевій швидкості руху всієї системи як цілого, тобто просторового руху центра мас.

При виконанні розрахунків припускалося, що промінь зору розташований у площині орбіти. Якщо ж і він нахилений до останньої, то обчислення радіусів орбіт слід проводити з врахуванням додаткового невідомого множника — косинуса нахилу променя зору до площини орбіти. Отже, хоч описаному методу і притаманна деяка невизначеність, однак він широко використовується при дослідженнях. До того ж з його допомогою одержано дуже цінні дані.

Так, встановлено, що ζ Великої Ведмедиці (друга від кінця «ковша») — Мицар є шестикратною зірковою си-

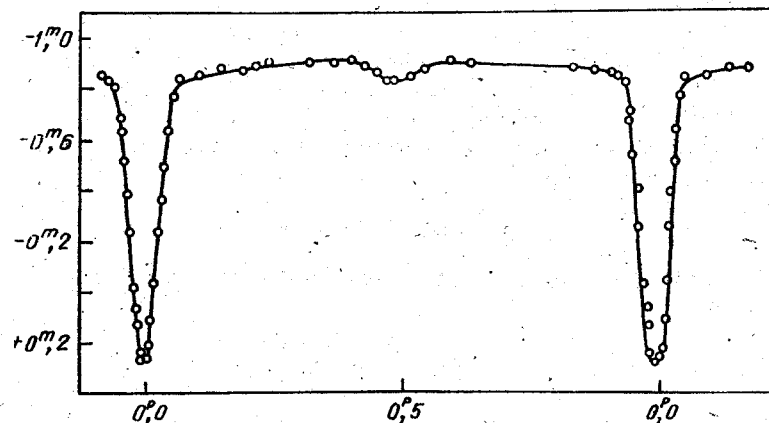


Рис. 7. Крива зміни блиску Алголя.

стею. Біля Мицара знаходиться (на відстані 12 дугових хвилин від нього) слабка зірочка, яку видно неозброєним оком на границі зору — Алькор. Сам Мицар при спостереженні в телескоп навіть при невеликому збіль-

шенні діляться на дві компоненти — Мицар A і Мицар B , що відстоять одна від одної на 14 дугових секунд. Спектральний аналіз свідчить, що Мицар A — спектрально подвійна з періодом обертання, рівним 21 доби, а Мицар B — спектрально потрійна. Найближчі компоненти обертаються навколо центра мас з періодом 128,33 доби, а більш віддалена третя — рухається навколо них з періодом 1350 діб.

Без спектрального дослідження виявити дивовижні властивості описаної зіркової системи було б неможливо.

В процесі вивчення спектрально-подвійних зірок виміряні значення променевих швидкостей і моментів спостережень наносяться на графік, який називається кривою променевих швидкостей (рис. 9).

Алголь та йому подібні Алголь (так називається зірка в Персея) був першою затемнено-подвійною тісною системою, виявленою в XVII столітті. В загальних рисах її характеристики вивчено понад сто років тому.

Мінливість її блиску, як і інших перемінних зірок, зображується графічно. Для цього на вертикальній осі відкладаються значення блиску (так щоб воно зростало знизу вгору), а на горизонтальній — час. В результаті утворюється так звана крива блиску. Оскільки зміни останнього в затемнених зірок відбуваються періодично, то завжди можна передбачити момент початку мінімуму блиску. Для цього розрахунки здійснюються за формулою

$$M_E = M_0 + PE,$$

де M_0 — відомий із спостережень момент мінімуму, P — період, E — натуральні числа 1, 2, 3 ..., M_E — передбачений момент мінімуму з номером E .

Зручні для спостережень на Україні моменти мінімумів Алголя обчислюються заздалегідь, а повідомлення про настання їх друкуються в «Короткому астрономічному календарі», що видається видавництвом «Наукова думка». Користуючись цією таблицею моментів мінімуму, можна простежити, як змінюється блиск Алголя.

Зробивши спостереження в момент T , можна встановити найближчий попередній момент мінімуму M_E і, від-

нявши його значення від T , одержати так звану фазу спостереження, тобто час, що минув від найближчого мінімуму. Одержане значення знаходиться в межах від нуля до величини періоду. Така операція дає можливість зо-

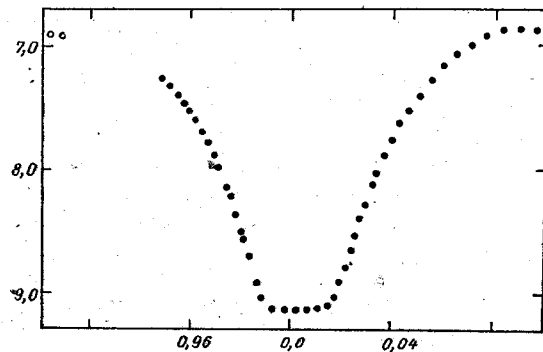


Рис. 8. Частина кривої зміни блиску U Цефея. Помітно вплив повного затемнення.

бразити всі спостереження, в тому числі і спектральні, разом і, як кажуть, побудувати середню криву.

Дуже часто замість фази визначають відносну фазу. Для цього величину фази необхідно поділити на величину періоду P . Очевидно, відносні фази перебувають у межах від нуля до одиниці.

На рис. 7 зображена середня крива Алголя. На горизонтальній осі відкладені відносні фази, а на вертикальній — різниця так званих зоряних величин Алголя і зірки порівняння. Зоряна ж величина зв'язана простою формулою з логарифмом блиску.

На рисунку видно, що блиск Алголя має тривалий час майже незмінне максимальне значення, яке переривається двома мінімумами — головним, первинним і невеликим вторинним (близько до фази 0,95). Мінімуми тривають порівняно недовго — близько 0,1 частки періоду, тобто близько шести годин.

Яксьне описання кривої блиску дуже просте. Дві компоненти — яскрава і слабка — рухаються по орбітах навколо центра маси системи, періодично закриваючи одна одну від спостерігача. Якщо затемнюється яскрава зірка,

настає головний — глибокий мінімум, а коли зірки міняються місцями і яскрава проектується на диск слабкої, відбувається вторинне затемнення. Але в цей час загальний блиск системи ослаблюється незначно.

Негайне посилення блиску після поступового його зменшення свідчить про те, що затемнення — часткове, тобто навіть при найменшому блиску з-за диска темнішої зірки видна частина диска яскравої зірки, що затемнюється.

Однак серед численних затемнених перемінних зірок типу Алголя є й такі, в яких відбувається повне затемнення. Тоді під час повної фази первинного затемнення блиск протягом деякого часу залишається постійним і мінімальним. До таких зірок належить перемінна зірка *U* Цефея. На рис. 8 зображені її мінімальна частина кривої блиску *U* Цефея, повна фаза затемнення. В максимумі блиску *U* Цефея — зірка 6,63 зоряної величини, а в мінімумі — 9,79. Якщо прийняти блиск (світність) системи за одиницю, то виявляється, що під час повної фази затемнення, коли до нас доходить випромінювання тільки від слабкої компоненти, блиск зменшується до 0,0545. Отже, на частку яскравої компоненти припадає 0,9455 блиску системи. Світність яскравої компоненти в 17 разів більша за світність слабкої.

Порівнюючи тривалість всього затемнення і його повної фази, можна визначити радіуси зірок, прийнявши відстань між їхніми центрами за одиницю.

Виявляється, радіус яскравої зірки становить 0,180, а слабкої — 0,302 відстані між центрами компонент. Таким чином, просвіт між тілами компонент становить 0,518 од відстані між центрами зірок. Це і є приводом для зарахування *U* Цефея до тісних подвійних систем.

Велика складова — менш яскрава, в той час як менша компонента в 17 разів яскравіша за неї. Це пояснюється відмінністю їх температур: слабкої — 4540° , а яскравої — $12\,000^{\circ}$.

Дослідження форми кривої блиску дає можливість визначити надзвичайно важливу величину — нахил променя зору до площини орбіти. Він, як правило, незначний. При великих нахилах просто не було б затемнень.

Оскільки нахил променя зору до площини орбіти малий, то кожна затемнена перемінна зірка повинна бути одночасно спектрально подвійною. На рис. 8 зображені

криві променевих швидкостей *U* Цефея. На горизонтальній осі відкладені фази спостережень, а на вертикальній — променеві швидкості. Точками позначені швидкос-

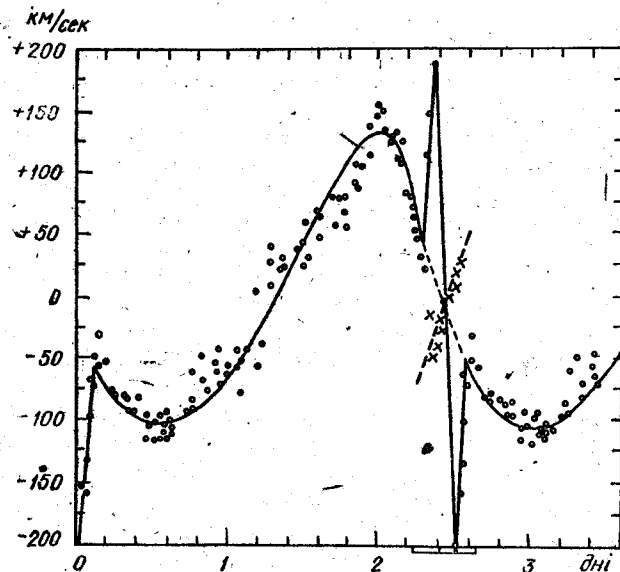


Рис. 9. Криві зміни променевих швидкостей компонент *U* Цефея. Хрестиками нанесено променеві швидкості менш яскравої компоненти, спектр якої спостерігається тільки під час повної фази затемнення яскравої компоненти.

ті яскравої компоненти, а хрестиками — слабкої, спектр якої через її малу світність спостерігається тільки під час повної фази затемнення. Тривалість останньої позначена додатково рисочкою під горизонтальною віссю між віками 2,2—2,6 діб. Суцільна крива відображає зміну променевих швидкостей яскравої компоненти: на плавну криву, подовжену пунктиром на час повної фази, накладено розривну криву, ніби «вуса». Перша відповідає орбітальному руху. В середині мінімуму блиску променева швидкість майже дорівнює нулю. Адже в цей час орбітальна швидкість зірки перпендикулярна до променя зору. Перед мінімумом блиску променева швидкість по-

зитивна і досягає максимальної швидкості віддалення, близької до 135 км/с, оскільки перед затемненням яскрава компонента віддаляється від нас. Після головного мінімуму вона наближається, і тут зміщення спектральних ліній у фіолетовий бік спектра дає максимальну швидкість наближення — близько 120 км/с. Півсума абсолютних значень забезпечує орбітальну швидкість руху цієї компоненти, що дорівнює 128 км/с.

Про швидкість орбітального руху слабкої компоненти можна наближено судити за нахилом пунктирної лінії, проведеної по точках, зображених хрестиками. Становить вона близько 200 км/с.

З міркувань, наведених вище, робимо висновок про те, що радіуси орбіт яскравої компоненти $r_1 = 4\,120\,000$ км, слабкої $r_2 = 61\,050\,000$ км; відстань між центрами зірок — $10\,225\,000$. Відстань між центрами зірок приймали за одиницю. Звідси радіус кожної зірки (в кілометрах) $R_1 = 2\,210\,000 = 3,18$ радіуса Сонця, $R_2 = 3\,160\,000 = 4,54$ радіуса Сонця. По третьому закону Кеплера маса системи дорівнює 6,88 маси Сонця, відношення мас компонент

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{v_2}{v_1} = 1,6,$$

тому яскрава компонента містить 4,30, а слабка — 2,58 маси Сонця.

Знаючи радіуси і маси, можна було обчислити й середню густину речовини: у яскравій зірці вона — $0,189$ г/см³, слабкої — $0,039$ г/см³.

Таким чином, система складається з гарячого карлика і слабого субгіганта.

Залишається останнє: як пояснити появу «вусів» на кривій променевої швидкості? Це явище пояснюється осьовим обертанням яскравої компоненти. Якщо зірка обертається навколо осі, то частина її диска (скажімо, права) віддаляється від нас, в той час як ліва — наближається. Доплерівські зміщення розширюють спектральні лінії у сумарному спектрі зірок.

Розглянемо, що відбувається в системі під час розвитку окремих фаз повного затемнення. Диск яскравої компоненти заходить за диск слабкої, але більшої за розмірами зірки. Спочатку на лівому краї її диска з'яв-

ляється виймка. Вона дедалі більше росте і після того, як закривається центр диска, до нас доходить випромінювання правої серпоподібної незатемненої її частини. Надалі серп ставатиме дедалі вужчим. Припустимо, що яскрава компонента обертається навколо осі, перпендикулярної до площини орбіти. Тоді правий незакритий край диска віддалятиметься від нас і випромінювальна швидкість зростатиме. Так пояснюється поява лівої частини «вусів». Після закінчення повної фази затемнення з-за диска компоненти, що затемнює, спочатку виходить ліва, що наближається до нас, серпоподібна частина диска яскравої зірки і променева швидкість стає від'ємною, найбільшою. Так пояснюється поява правої частини «вусів».

Таким чином можна визначити екваторіальну швидкість обертання яскравої компоненти. В $\bar{U}$ Цефея вона приблизно дорівнює 200 км/с. Отже, період осьового обертання в 4,5 раза коротший, ніж орбітального.

Під час повної фази затемнення у багатьох зірок типу Алголь в спектрі видно більш або менш яскраві спектральні лінії випромінювання. Це «світяться» розріджена оболонка яскравої зірки. З особливостей цих ліній можна зробити висновок, що навколо яскравої обертається газове кільце.

Повернімося до описання деяких явищ в системі Алголь. Як і Мицар, Алголь — не подвійна, а тісна кратна система, що складається з трьох, а може й з чотирьох зірок. Навколо центра мас системи рухаються по орбітах кілька компонент. Яскрава гаряча A має близького до неї супутника — субгіганта B , а ще далі від них є така ж слабка, як B , компонента C , настільки віддалена від них, що робить орбітальне обертання за 1,873 року.

Параметри системи Алголь

Компоненти	A	B	C
Радіус	3,0	3,2	1,2
Маса	5,0	1,0	1,3

За одиниці вимірювання прийняті радіус і маса Сонця.

За допомогою нових технічних засобів, які характеризуються високою точністю вимірювань блиску, були відкриті нерегулярності в змінах блиску деяких затем-

нених зірок. Ці нерегулярності можна пояснити тільки утворенням плям на їхніх дисках, схожих на сонячні.

На відміну від Сонця ці «зіркові плями» займають більшу відносну площу. Отже, в тісних подвійних системах існують магнітні поля. Підтвердженням такого висновку є виявлені великі спалахи радіовипромінювання як Алголя, так і деяких інших зірок його типу. Це пояснюється існуванням у цих зірок корон, подібних сонячній, але тільки потужніших.

Бета Ліра

Друга затемнена зірка β у сузір'ї Ліри відкрита Джоном Гудрайком 10-вересня 1784 року. Вона змінює блиск в границях від зоряної величини 3,40 до 4,34 з періодом, що дорівнює 12,907 доби. Як з'ясувалося пізніше, зазначений період збільшується. На рис. 10 зображена крива зміни її блиску. Обидва мінімуми блиску пояснюються затемненнями. Головна ж відміна цієї зірки від Алголя полягає в тому, що її блиск змінюється безперервно, і

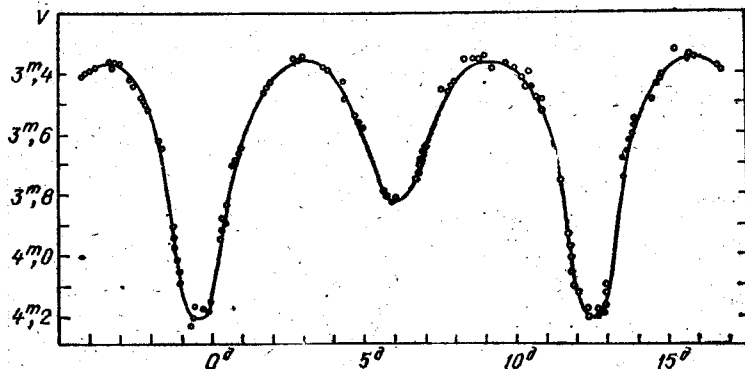


Рис. 10. Крива зміни блиску β Ліри.

крива блиску має округлу форму максимальної частини, оскільки під впливом припливних сил обидві компоненти набувають не кульової форми, а витягнутої в напрямку, що з'єднує їх центри. Таким чином, обидві зірки мають овальну форму. При орбітальному русі змінюються площі дисків компонент, що приводить до безперервної зміни блиску. Вже розроблені математичні способи обчислення витягнутості зірок і врахування її впли-

ву на блиск. Отже, можна проаналізувати виправлену криву блиску, застосувавши той самий спосіб, за допомогою якого вивчена U Цефея.

Променеві швидкості яскравої компоненти змінюються при її орбітальному русі з амплітудою 360 км/с. За цією величиною можна розрахувати її орбіту. Виявилося, що відстань від центра зорі до центра тяжіння системи — 30 млн. км, радіус головної зірки — 50 млн. км, центр тяжіння системи — знаходиться майже на поверхні головної компоненти.

У первинному мінімумі блиску повинно відбуватися кільцеподібне затемнення і менш яскрава компонента має проектуватися на диск яскравішої і закривати значну його частину. Тому в цей час повинен спостерігатися спектр меншої компоненти. Однак він не спостерігається. Така суперечність привернула увагу астрофізиків, які почали ретельно вивчати спектр β Ліри. Описані явища вдалося пояснити тим, що обидві компоненти обмінюються потоками речовини і що вся система занурена в загальну газову оболонку, яка поступово розширюється. Так було відкрито найважливіше явище — обмін речовини в тісних подвійних системах.

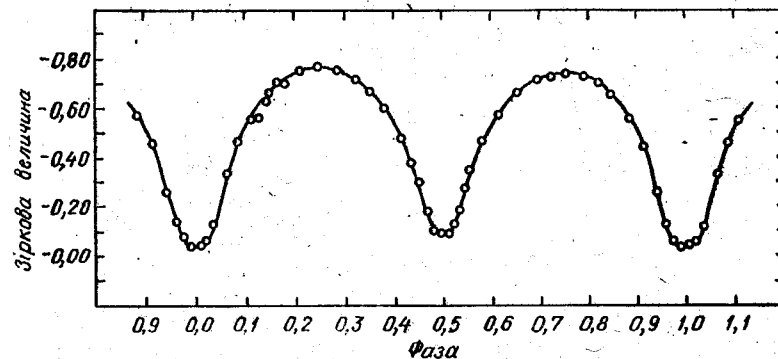


Рис. 11. Крива зміни блиску W Великої Ведмедиці.

На початку нашого століття була відкрита не менш цікава перемінна зірка W Великої Ведмедиці. Її крива блиску зображена на рис. 11. Ця затемнена система подібна у деяких відношеннях до β Ліри, тільки її компо-

ненти майже стикаються одна з одною і, очевидно, занурені в загальну газову оболонку. Період орбітального обертання цієї зірки короткий — лише 8 год.

Подібних до неї зіркових систем багато, значно більше, ніж зірок типу β Ліри. Воно й не дивно, адже β Ліри — гігант, яких порівняно небагато, а система W Великої Ведмедиці складається з двох зірок-карликів. Останніх набагато більше, ніж гігантів.

Еволюційні зміни в системі β Ліри супроводжуються повільним розсіюванням речовини в просторі, що позначається на збільшенні періоду обертання. При втрачанні маси тяжіння послаблюється.

У W Великої Ведмедиці 26 квітня 1964 року відбувся раптовий спалах випромінювання, коли її блиск короткочасно (протягом 7 хв) збільшився на 1,5 зоряної величини. При цьому її орбітальний період стрибком змінився, що викликано вибухоподібним викидом частини речовини зірки в космічний простір.

Порожнина Роша Хоч відстань від Місяця до Землі перевищує в 60 разів радіус земної кулі, взаємне тяжіння двох небесних тіл викликає припливні явища, механізми яких дуже складні. На Землі припливні риси викликають відчутні припливи і відливи.

Цілком природно, що в таких тісних подвійних системах, як β Ліри і W Великої Ведмедиці, ці припливні сили діють значно сильніше, ніж у системі Земля — Місяць. Перед астрономами постало дещо спрощене завдання, яке називається обмеженою проблемою руху трьох тіл. Постановка задачі така. Є два тіла, що притягаються і обертаються навколо центра мас системи по кругових орбітах. Як рухатиметься тіло надзвичайно малої маси в спільному полі тяжіння двох центрів? Це встановити легше, ніж повністю врахувати припливні сили.

Розрахунки свідчать, що кожна з компонент створює навколо себе овальну порожнину, яка називається поверхнею (або порожниною) Роша. Вони стикаються одна з однією в так званій точці лібрації, розташованій на прямій лінії між компонентами, а відстані цієї точки од тієї чи іншої компоненти залежать від відношення мас.

В цій точці лібрації частинка легше переходить з однієї порожнини в іншу, і через неї відбувається обмін масами компонент. Якщо ж частинка знаходиться поза

порожнинами, то вона описує найскладнішу орбіту навколо центра маси всієї системи. Існують дві точки лібрації, де частинці легше всього потрапити в світовий простір за спіралеподібною траєкторією. Частинка, що перебуває всередині порожнини, рухається навколо центральної компоненти.

Ця теоретична схема пояснила ряд явищ, що відбуваються в системах, подібних до β Ліри і W Великої Ведмедиці, зокрема, виникнення газових потоків речовини всередині системи.

Модель Роша покладена в основу класифікації тісних подвійних систем. Коли обидві компоненти глибоко занурені всередину порожнин, то така система називається розділеною. Якщо одна з компонент занурена в її порожнину, а друга заповнює свою порожнину, тоді система називається напіврозділеною. Така, наприклад, U Цефея. Якщо обидві компоненти повністю заповнюють свої порожнини Роша, то система називається контактною. Такі β Ліри і W Великої Ведмедиці (рис. 12).

Після вивчення багатьох затемнено-подвійних систем і статистичного зіставлення одержаних даних постало питання про еволюцію тісної подвійної зірки. При цьому був виявлений парадоксальний факт: розміщення точок, які зображують затемнені системи, на діаграмі Г—Р суперечить прийнятій теорії зіркової еволюції.

Оскільки третій етап еволюції починається з відходу зірки від головної послідовності у бік зірок-гігантів, то гіганти виявляються старшими від зірок-карликів. Еволюція зірок високої світності відбувається швидше, ніж зірок меншої світності. Поглянемо з цієї точки зору на систему U Цефея. В неї світність меншої компоненти в 17 разів більша світності менш яскравої. Її маса становить 4,3 маси Сонця, температура поверхні близько $12\,000^\circ$, а середня густина речовини $0,189\text{ г/см}^3$. Ці величини характерні для зірок-карликів, що містяться на головній послідовності.

Менш яскрава, але більша за розмірами компонента містить 2,58 маси Сонця (менша, ніж маса яскравої компоненти), температура поверхні близько 4540° , а середня густина речовини — $0,039\text{ г/см}^3$. Ця зірка субгігант і з еволюційної точки зору. Адже вона вже пройшла весь другий етап еволюції і наближається у бік вітки гігантів, тобто «старша» від яскравої компоненти.

Однак немає сумніву, що обидві компоненти є рівес-
ниціями.

Припустимо, що менш яскрава компонента пройшла
еволюційний шлях швидше яскравої. Як же це могло ста-
тися, якщо її маса менша? Адже швидше еволюціону-
ють зірки з вищою світністю, а отже, і більшою масою.
Згідно з еволюційною тео-
рією, субгігантом повинна бу-
ти більш яскрава компонента.
Пояснення цього парадокса
зроблено на основі «гіпотези
передачі мас» у процесі ево-
люції тісної подвійної сис-
теми.

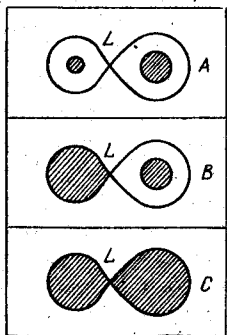


Рис. 12. Порожнини Роша і
пояснення класифікації тіс-
них подвійних систем. Че-
рез L — точка лібрації. A —
розподілена система; B —
напіврозподілена система;
 C — контактна.

Щоб краще описати цю
гіпотезу і її наслідок, назвемо
більш яскраву компоненту лі-
терою A , а менш яскраву — B .
Нині A має більшу масу, ніж
 B . Остання у далекому мину-
лому мала велику масу й ево-
люціонувала швидше. Вона
першою відійшла від головної
послідовності і стала перетво-
рюватися на гіганта. Як відо-
мо, такий процес супроводжується двома ефектами:
збільшенням розмірів і зниженням середньої густини ре-
човини. Слід відзначити, що коли розміри компоненти
зірки настільки збільшилися, що її речовина повністю
заповнила порожнину Роша, речовина почала прони-
кати через точку лібрації до компонента A і, кінець кін-
цем, осідати на ній. Таким чином, компонента A збіль-
шувала свою масу за рахунок компонента B . Цей
процес тривав досить довго і привів систему в той стан,
в якому ми її спостерігаємо.

Таким чином було знайдено пояснення суперечності
еволюційної теорії.

Особливі випадки. Можливо, між тісними подвійни-
ми системами і широкими зірко-
вими парами немає різкої відміни. Широкі пари дуже
рідко стають затемненими перемінними зірками внаслі-
док великих відстаней між компонентами.

Дійсно, найшвидша з візуально подвійних зірок в Кита
має орбітальний період 2,62 року, тоді як затемне-
на перемінна зірка з Візничого має період зміни блиску,
який дорівнює 972 добам, а VV Цефея, що складається
з холодного надгіганта (радіус його в 1943 рази біль-
ший сонячного) і гарячого карлика високої світності
(радіус його в 20 разів перевищує радіус Сонця) здій-
снює орбітальний обхід за 20,4 року.

Затемнені перемінні зірки використовуються астро-
фізиками не тільки для визначення мас і розмірів зірок.
Іноді, в рідких випадках, вони допомагають анатомува-
ти зірку, що затемнює.

З цієї точки зору найефективніша — подвійна сис-
тема ζ Візничого. Її період орбітального обертання — 972
доб. Затемнення повне. Його часткові фази тривають
1,5 доби, а повна фаза — 38 днів. Це результат того, що
діаметр зірки, яка затемнює холодного надгіганта, — в
190 разів більший від сонячного, а гарячої зірки, яка
затемнюється, — тільки в сім разів.

Надгігант має протяжну оболонку. Під час частко-
вих фаз затемнення світло проходить крізь оболонку,
але при цьому воно поглинається. Це призводить до ут-
ворення в її спектрі додаткових ліній вбирання, яке дає
можливість вивчити розподіл різних хімічних елементів
і фізичні умови (швидкості теплового руху, розподіл тем-
ператур і густини) на різних висотах над фотосферою
надгіганта, що затемнює. Так, наприклад, встановлено: на
висоті, яка дорівнює 120 радіусам Сонця, міститься ба-
гато атомів металів, і вони перебувають у стані швид-
кого турбулентного руху. Це дає можливість анатомува-
ти зовнішню оболонку зірки.

Але є ще інший спосіб, який дає можливість «загля-
нути» в надра зірок і дізнатися, як розподілена густина
речовини під їх поверхнями на великій глибині. Це мож-
ливо завдяки існуванню тісної подвійної системи, яка
складається з двох зірок-карликів, — RU Єдиногого.

Як показали дослідження радянських астрономів
О. Д. Дубяго та Д. Я. Мартинова, компоненти цієї сис-
теми рухаються за еліптичними орбітами. Внаслідок
другого закону Кеплера їх орбітальна швидкість непомі-
тна. Вона більша, коли зірки зближуються, і менша,
коли вони далеко одна від одної. Тому за кожний період

обертання спостерігаються два мінімуми — первинний і вторинний, неоднаково віддалені за часом.

На рис. 13 ілюструється, як змінювалася форма кривої блиску з 1907 по 1965 рік. Вторинний мінімум кривої змінював своє положення з часом. У правій частині рисунка зображено положення відносної орбіти (коли приймається, що одна з компонент, умовно її називаємо «головною», вважається нерухомою). Ми бачимо, як оберталася в її площині еліптична орбіта. Було з'ясовано, що повний оберт відбувається за 284 роки. Таке обертання орбіти пов'язано з тим, що в тісній подвійній системі зірки не можна розглядати як притягаючі математичні точки, бо вони є тілами з певним розподілом густини в їх надрах.

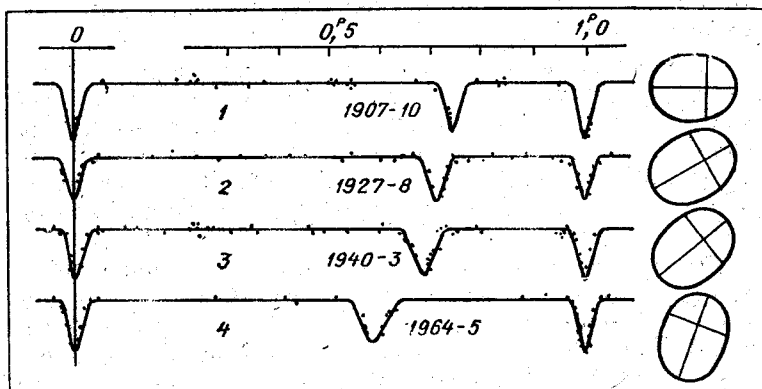


Рис. 13: Повільні зміни положення орбіти і їх вплив на форму кривої блиску.

Відповідні обчислення, виконані Д. Я. Мартиновим, свідчать, що в надрах тиск p і густина речовини ρ зв'язані формулою $p = k\rho^{1.32}$. Це підтверджує висновки теорії внутрішньої будови зірок.

УНІКАЛЬНІ ПОДВІЙНІ СИСТЕМИ

Ми розглянули такі подвійні зіркові системи, які можна назвати стаціонарними. Еволюція останніх відбувається повільно порівняно з тривалістю людського життя. Однак поряд із стаціонарними системами відкрито і нестаціонарні, в яких еволюція відбувається швидко. З'ясуємо їх властивості.

Тіхі вибухи

На самому початку нашого століття відкрита неправильна змінна зірка V Стріли. Її крива блиску дуже складна. На повільні коливання з великою амплітудою накладаються більш швидкі, циклічні, що мають меншу амплітуду. Спектр зірки складний, у ньому помітно інтенсивні лінії випромінювання атомів водню, гелію, кисню і азоту, що свідчить про високу температуру, яка дорівнює $44\,000^\circ$.

У 1965 році встановлено, що V Стріли є водночас і затемнено-подвійною змінною з періодом обертання, який дорівнює 0,514195 доби і амплітудою близько однієї зіркової величини. Однак ця «затінна перемінність» спостерігається тільки тоді, коли неправильні коливання блиску досягають свого мінімуму і згасає при зростанні повного блиску зірки.

Вивчення затемненої кривої блиску і кривих зміни променевих швидкостей показало, що обидві компоненти відстоять одна від одної на 4,11 радіуса Сонця, а їх радіуси дорівнюють 1,07 і 1,40 радіуса Сонця. Таким чином, V Стріли — тісна подвійна система. Температури компонент високі — $44\,000^\circ$ і $22\,000^\circ$. Більш масивна компонента має більші розміри.

Неправильна змінність блиску пояснюється підняттям з надр меншої зірки великих мас газу, який окутує всю систему оболонкою. Вона розсіюється в світовому просторі за спіралеподібною траєкторією. Під час піднімання газових мас — «тихого вибуху» — непрозора оболонка закриває від нас подвійну систему, і затінна перемінність тимчасово не спостерігається. Після розсіювання оболонки вона відновлюється з тим самим періодом. Повторюється це відшарування оболонок в середньому через кожні 580 діб.

У 1934 році спалахнула дуже яскрава нова зірка на границі сузір'їв Ліри і Геркулеса. До спалаху вона була зіркою 15-ї величини. Під час вибуху її блиск збільшився на 13 зоряних величин. Після максимуму почалося зменшення блиску, а потім блиск зорі знову посилюється (рис. 14)

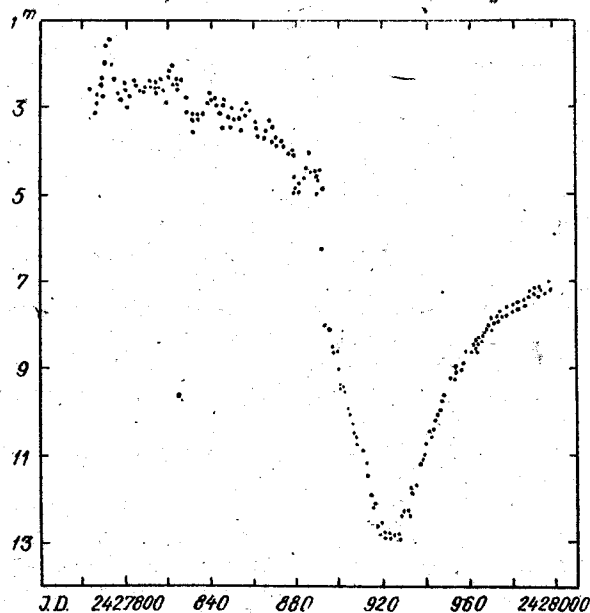


Рис. 14. Крива зміни блиску DQ Геркулеса.

і досяг передспалахового стану. Зірка дістала назву DQ Геркулеса.

У 1954 році американський астроном М. Уокер спостерігав за допомогою потужного телескопа Лікської обсерваторії дивовижне явище. Дослідник встановив, що DQ Геркулеса — затемнено-подвійна зірка з дуже коротким періодом обертання, який дорівнює 0,1936 доби, тобто 4 год 39 хв. У спектрі зірки видно головним чином яскраві емісійні лінії водню та іонізованого гелію, які періодично (з тим самим періодом) зміщуються. Швидкість орбітального руху досягає 300 км/с. Подвій-

на система складається з червоної зірки і гарячого блакитного супутника. Маса компонент становить 0,22—0,24 маси Сонця. Тому DQ Геркулеса дістав назву карликової нової зірки.

Точніша інтерпретація променевих швидкостей показала, що яскраві лінії випромінюються не блакитним супутником, а газовим кільцем, яке обертається навколо нього і схоже на кільце Сатурна. Є в системі і загальна воднева оболонка.

Крім затемнень, відбувається найрегулярніша пульсація блиску з періодом, що дорівнює 71 секунд, з невеликою амплітудою.

Можливо, причиною вибуху DQ Геркулеса було дроблення поодинокі зірки і утворення подвійної? Проте це не так. Зірку знайдено на старих знімках неба, на яких вона була в стані ще до спалаху. Вивчення цих знімків показало, що й тоді вона була затемненою перемінною, тобто подвійною.

Відкриття затемненої перемінності DQ Геркулеса нагадало астрономам про забуті «старі» нові зірки, які перебувають у стані після спалаху. Справді, у великі телескопи вдалося побачити, що деякі з цих зірок, подібно до DQ Геркулеса, затемнено-подвійні. Отже, подвійність нових зірок, очевидно, не є винятком, а загальним правилом.

Нові зірки дуже різноманітні за своїми фізичними властивостями. Для порівняння наведемо деякі дані про них. В таблиці вказані назви зірок, роки їх вибухів, світності до спалаху L_1 і під час найбільшого блиску L_2 , радіус до спалаху R_1 , зоряна величина до спалаху m , в максимумі блиску M і період орбітального обертання, якщо була відкрита затемнена подвійність зірки.

Неважко побачити, що початкові умови дуже різноманітні: тут є карликові зірки, такі як DQ Геркулеса та «нормальні», які в стані до спалаху за розмірами можна порівняти із Сонцем.

Влітку 1975 року спостерігався спалах ще однієї яскравої нової зірки в сузір'ї Лебеда. Вона належить до класу швидких нових зірок, що недовго зберігають максимальний блиск.

У зміні її блиску спостерігалися дві особливості, властиві, мабуть, тільки їй. По-перше, на старих знімках зоряного неба вона була знайдена як надзвичайно

слабенька зірочка. Потім блиск її підвищився на кілька зоряних величин і зберігався таким дуже довго, протягом кількох років, до моменту спалаху. Цей факт досі не має пояснення. По-друге, відразу ж після максимуму помітними стали невеличкі періодичні коливання блиску, одночасно з її систематичним ослабленням. Ці коливання зберігаються і тепер. Пояснюють їх затемненою подвійністю зірки. До речі, швидкі коливання блиску *DQ* Геркулеса з періодом 71 секунда можна пояснити осьовим обертанням однієї з компонент подвійної системи.

Зорі, що вибухають повторно

При вивченні перемінних зірок, що вибухають, дуже цінними є колекції знімків зоряного неба —

склотеки. Це своєрідні «скляні бібліотеки». Регулярно знімки неба стали збирати з кінця минулого століття в Гарвардській обсерваторії (США) і в Москві. Потім такі склотеки створювалися в Зоннеберзі (НДР), Душанбе та Одесі. Нині загальна кількість нагромаджених знімків досягає кількох сотень тисяч.

Ці колекції дають можливість відновити колишню історію кожної чимось визначної зорі. Наприклад, було встановлено, що деякі зірки, раніше слабкі, за порівняно короткий час (близько року або півроку) розгорілися і залишаються яскравими вже протягом десятків років. Такою є *FU* Оріона. За її ім'ям такі об'єкти стали називатися фуорами. На їх знімках виявлено існування повторних нових зірок, спалах в яких відбувався кілька разів. Зірка *T* Північної корони спалахнула в 1868 році, а потім майже через 80 років — у 1946 році. Ця система складається з червоного холодного гіганта і блакитного карлика, оточеного газовим кільцем. Період орбітального руху пари дорівнює 227,6 доби.

Нещодавно ще раз спалахнула повторна нова зірка *WZ* Стріли і досягла блиску зірок восьмої величини. Вона теж подвійна зіркова система з найкоротшим орбітальним періодом, що триває 1 год 22 хв.

Зазначені спалахи нових зірок відбуваються порівняно рідко. Частіше спалахують новоподібні зірки типу *U* Близнят. Остання відкрита на знімках неба Московської обсерваторії Л. П. Цераського.

Звичайно, зірки цього типу зберігають мінімальний блиск, ніби нагромаджуючи енергію для наступного вибуху. Потім виникає нетривалий вибух (рис. 15). Вибу-

хи повторюються, але періоду немає. Можна тільки встановити середню тривалість інтервалу часу між наступними спалахами блиску, так званий цикл.

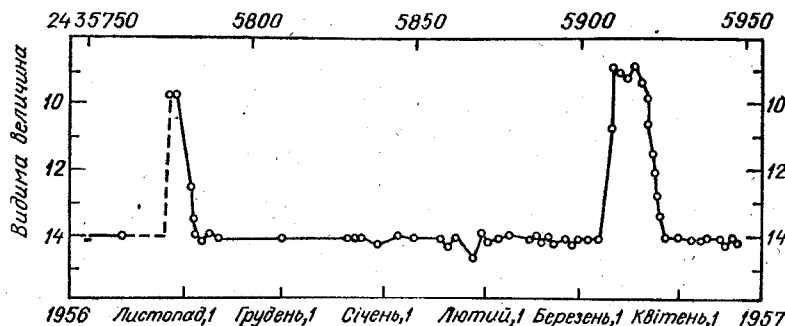


Рис. 15. Крива зміни блиску *U* Близнят — зображено два спалахи блиску.

Зірок типу *U* Близнят не мало. Наведемо перелік, що характеризує ті об'єкти, які добре вивчені.

Чисельність зірок залежно від величини циклу

Границі циклу (в днях)	Число	Границі циклу (в днях)	Число
11—20	24	41—50	6
21—30	20	51—60	8
31—40	6	61—70	3

Найцікавішою виявилася *U* Близнят. Польський астроном В. Кшемінський встановив, що вона затемнено-подвійна і має період обертання 4 год 14 хв. Затемнення, при якому блакитний «супутник» заходить за жовту зірку, триває дуже недовго (вузький мінімум на кривій блиску на рис. 16), оскільки його діаметр у 25 разів менший діаметра головної зірки. Блиск у максимумі не залишається постійним, а повільно змінюється, але не так, як у зірки типу *W* Великої Ведмедиці. Форма максимумів несиметрична і їх висота неоднакова. Можливо, самого супутника ми навіть не бачимо, а випромінювання відбувається з оточуючої його оболонки — кільця, що обертається навколо нього. Якщо кільце має неоднорід-

Деякі дані про нові зірки

Зірка	Рік	L_1	L_2	R_1	R_2	m	M	ρ
GK Персея	1901	1,20	251000	0,46	170	14,0	0,2	0,685
DN Близнят	1912	3,31	100000	0,76	186	15,0	3,6	—
V 603 Орла	1918	8,32	479000	1,2	320	10,8	-1,1	0,1385
V 476 Лебедя	1920	1,59	692000	0,52	320	16,2	2,0	—
RR Живописця	1925	1,32	91200	0,48	300	12,8	1,2	0,1450
DQ Геркулеса	1934	0,06	17400	0,10	95	15	1,3	0,1938
CP Яшірки	1936	2,75	525000	0,69	280	15,6	2,1	—
CP Корми	1942	0,06	436000	0,10	310	(17)	0,5	—

Знаком (показано, що зірка слабша 17 зіркової величини.

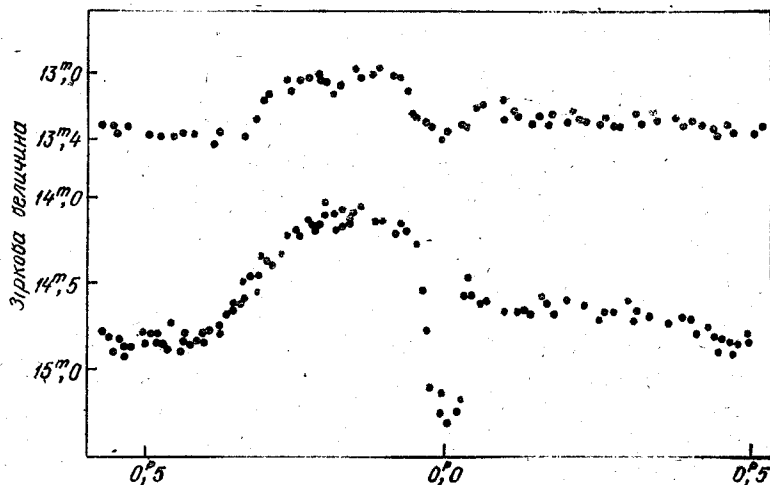


Рис. 16. Криві швидкої зміни блиску U Близнят, викликані затемненнями. При спалаху (верхня крива) глибина затемненого мінімуму зменшується.

ний розподіл яскравості, то форма кривої зовсім не схожа на класичну, характерну для витягнутих припливними силами зірок, що затемнюються.

Ще більш цікаві явища відбуваються при спалаху. Коли загальний блиск системи збільшується, глибина «затемненого» мінімуму зменшується, а це свідчить про те, що змінюється світність не блакитного супутника, а жовтої зірки. Збільшення її блиску при вибуху викликане підвищенням температури від 5600 до 15 000°.

Таким чином, зірки типу U Близнят, хоч і нагадують нові, часто називаються новоподібними, істотно відрізняються від останніх. У нових зірок значне збільшення об'єму, а в новоподібних збільшення блиску викликане підвищенням температури.

В. Кшемінський оцінив параметри системи U Близнят (рис. 17). Ось вони:

радіус орбіти	— 1 240 000 км,
— блакитної зірки	— 18 000 км,
— жовтої зірки	— 418 000 км,
маса жовтої зірки	— 1,3 маси Сонця.
Середня густина речовини жовтої зірки	— 3,6 г/см ³ ,
блакитної	— 96 000 г/см ³ .

Остання величина не викликала б сумніву, якби була впевненість у тому, що ми бачимо світло супутника, а не кільця, що його охоплює. Можливо, видно не сам супутник, а лише його оболонку, яка випромінює емісійний спектр. У такому випадку супутник ще менший і відповідно щільніший.

Після цих двох супутників були проведені пошуки й інших затемнено-подвійних систем серед зірок типу U Близнят. У деяких випадках вони увінчалися успіхом. Нижче наведено дані про тривалість циклів і орбітальних періодів деяких об'єктів.

Наведені дані свідчать, що чим коротший орбітальний період, тобто чим ближче компоненти одна до одної, тим рідше відбуваються спалахи блиску. Останнім ча-

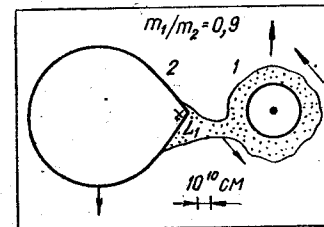


Рис. 17. Тісна подвійна система U Близнят. Блакитний супутник обведений газовим кільцем — «диском».

Зірки	Тривалість циклу (в добах)	Орбітальний ріод (у частках добі)	пе- (у частках добі)
SS Лебеда	50 ^d 2	0 ^d 2762	
SS Візничого	56,8	. 1806	
RU Пегаса	67,8	. 3708	
U Близнят	103	. 1769	
X Хамелеона	104	. 0745	
EX Гідри	465	. 0682	

сом встановлено, що U Близнят — джерело рентгенівського випромінювання, яке може виникати при виняткових обставинах.

Рентгенівські подвійні системи

Після виведення на навколосемні орбіти спеціалізованих штучних супутників і орбітальних обсерваторій, оснащених апаратами для реєстрації рентгенівських променів, зроблено багато відкриттів. Зокрема, виявлені космічні джерела рентгенівських променів. Серед них виділяються рентгенівські пульсари. Інтенсивність їх випромінювання перемінна. Відкрито також рентгенівські подвійні зірки.

Найцікавішим є рентгенівський пульсар X—I у зір'ї Геркулеса. Його вивченню присвячено багато досліджень. Порівняно невелика роздільна здатність рентгенівської апаратури не дає можливості визначити точні координати джерела. Можна лише припустити, що джерело міститься десь всередині ділянки з стороною порядку 2 дугових хвилин. Тому астроном, який відкрив рентгенівське джерело випромінювання, шукає в цьому квадраті найближчий «оптичний» об'єкт, хоч не завжди це вдається.

Всередині такого квадрата, що оточує X—I Геркулеса, є неправильна перемінна зірка HZ Геркулеса, відкрита давно. У неї змінювався блиск від 13 до 15 зоряної величини, тобто незначно. Рентгенівський пульсар X—I регулярно «миготить» з періодом в 1,24 секунди. Крім того, через кожні 1,7 доби його випромінювання пропадає приблизно на 6 год, можливо, внаслідок затемнення.

Радянський астроном Н. Ю. Курочкін вивчив характер блиску перемінної зірки по знімках неба Московської склотеки і встановив, що вона змінює блиск з періодом, який дорівнює 1,70017 доби. Крива її блиску має незвичайну для затемнених зірок форму (рис. 18). Це під-

тверджено О. Ю. Манделем по знімках Одеської склотеки. HZ та X—I утворюють тісну подвійну систему, в якій «звичайна» зірка HZ періодично затемнює рентгенівську.

Проте зображена на рис. 18 крива блиску ніби не має нічого спільного з кривими блиску затемнених зірок. Її особлива форма зна-

йшла пояснення після вивчення властивостей компоненти X—I за допомогою ефекту відбивання, а точніше, перевипромінювання променевої енергії. Справа в тому, що в небі пульсара X—I компонента HZ займає великий тілесний кут, тобто значна кількість рентгенівського випромінювання надходить на півкулю HZ, звернену до X—I. Це випромінювання поглинається і переробляється, підвищуючи температуру фотосфери. Вона ж у свою чергу розсіює в простір під-

вищену кількість променевої енергії. Коли X—I перебуває в затемненні, до нас повернута темніша півкуля компоненти HZ. Якщо ж X—I розташована між HZ і нами, то до нас повернута півкуля HZ — відбувається максимум блиску. Однак згаданого припущення виявилось не досить. Тоді поклали за можливе існування в системі ще одного випромінювача — газового диска, що оточує пульсар X—I. Як відзначалося, такий диск виявлений в системі U Близнят (рис. 17).

Звідки береться речовина цього диска? Згадаємо, що зірка, яка заповнила порожнину Роша, скидає потік речовини другої компоненти. Таким чином, HZ передає

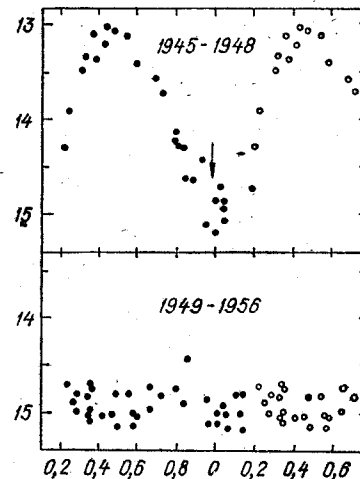


Рис. 18. Дві криві блиску HZ Геркулеса. На горизонтальній осі відкладені віки спостережень у частках періоду, а на вертикальній — блиск. Рентгенівське випромінювання відбувається при нулі.

зайву речовину компоненті Х—І. Проте Х—І — білий карлик, або, можливо, нейтронна зірка. Її гравітаційне поле настільки потужне, що в її околицях потоки речовини набувають величезних швидкостей, які відповідають температурам 10^5 — 10^6 градусів і, стикаючись з речовиною оболонки Х—І, примушують її випромінювати рентгенівські промені.

Але й цього пояснення недостатньо, оскільки в даній подвійній системі відкрите ще одне унікальне явище — періодично повторюється тимчасове припинення рентгенівського випромінювання. Період цього явища дорівнює 35,3 доби. Протягом 12 діб воно спостерігається, а 23 — його немає. На подив дослідників, в оптичному діапазоні цього явища не відзначено.

Для пояснення його можна припустити, що рентгенівське випромінювання має «кинджальний» характер. Подібно до вогнів маяка, воно поширюється у вигляді вузько спрямованого променя. Це може відбуватися в сильному магнітному полі компоненти Х—І.

Якщо вісь магнітного диполя не збігається з віссю обертання і прецесує з періодом, що дорівнює 35,3 доби, то рентгенівський промінь не досягає земного спостерігача.

Майже такі явища відбуваються і в системі іншої рентгенівської затемнено-подвійної системи — АМ Геркулеса, в якій орбітальний період дорівнює 0,1289 доби. Тільки в цієї перемінної зірки спостерігається поляризація світла, що свідчить про наявність магнітного поля з дивовижною напругою 10^{12} гаус.

Обидві рентгенівські зірки мають ще одну властивість: вони на більш чи менш тривалий час ослаблюють свій блиск. В цей час крива блиску (рис. 18) значно змінюється. Очевидно, вся система обгортається непрозорою оболонкою та приховує від нас обидві компоненти. На жаль, не відомо, як поводить себе в цей час рентгенівське випромінювання.

Для науки велике значення має пізнання природи подвійних зірок. Можливо, дальші дослідження в цьому напрямі допоможуть встановити досі нез'ясовану причину вибуху нових і наднових зірок. Не виключено, що

серед цих зіркових систем як компоненти є невідомі тіла, так звані «чорні дірки», гравітаційне поле яких настільки потужне, що ні промінь світла, ні мала частинка не можуть його подолати і вийти в світовий простір. Найімовірніше, такі «застиглі» зірки знайдуться саме в складі деяких «наднезвичайних» серед «незвичайних» зіркових пар. Остаточне розкриття цих таємниць належить майбутньому. Радянська наука має у своєму розпорядженні найдосконаліші технічні засоби, які допоможуть розв'язати поставлені завдання.

Детальне, глибоке вивчення Землі, Сонячної системи, Всесвіту увійде в скарбницю світової фундаментальної науки, розкриє нові неосяжні перспективи для наукового пізнання, космічної навігації і, зрештою, допоможе піднятися цивілізації на нашій планеті на вищий щабель і при тому зберегти нашу землю, передати «її молодому поколінню в усьому її багатстві й красі»¹. В авангарді досліджень, результати яких матимуть для людства таке велике значення, крокує радянська наука.

¹ Л. І. Брежнев. Промова на XVIII з'їзді Всесоюзної Ленінської Комуністичної Спілки Молоді 25 квітня 1978 року. К., Політвидав України, 1978, с. 16.

ЛІТЕРАТУРА

- Матеріали XXV з'їзду КПРС. К., Політвидав України, 1976.
- Матеріали XXV з'їзду Комуністичної партії України. К., Політвидав України, 1976.
- Про 60-у річницю Великої Жовтневої соціалістичної революції. Постанова ЦК КПРС від 31 січня 1977 року. К., Політвидав України, 1977.
- Брежнев Л. І. Гордість вітчизняної науки. Промова на урочистому засіданні в Кремлівському Палаці з'їздів, присвяченому 250-річчю ювілеєві Академії наук СРСР, 7 жовтня 1975 року. К., Політвидав України, 1975.
- Брежнев Л. І. Великий Жовтень і прогрес людства. Доповідь на спільному урочистому засіданні Центрального Комітету КПРС, Верховної Ради СРСР і Верховної Ради РРФСР у Кремлівському Палаці з'їздів 2 листопада 1977 року. К., Політвидав України, 1977.
- Брежнев Л. І. В ім'я щастя радянських людей. Промова на зустрічі з виборцями Бауманського виборчого округу м. Москви 2 березня 1979 року. К., Політвидав України, 1979.
- Щербицький В. В. Примножувати продуктивну силу науки, зміцнювати її зв'язок з практикою. Виступ на загальних зборах АН УРСР. — «Радянська Україна», 17. III 1977 р.
- Боцула Р. А. Двойные звездные системы с атмосферным затмением типа с Возничего. М., «Наука», 1968.
- Левитт И. За пределами известного мира: от белых карликов до квазаров. М., «Мир», 1978.
- Крат В. А. Фигуры равновесия небесных тел. М., — Л.; Изд-во Техничко-теоретической литературы, 1950.
- Шульберг А. М. Тесные звездные системы с шаровыми компонентами. М., «Наука», 1971.