

§ 26. Нестацыянарныя зоркі

1. Агульная характарыстыка пераменных зорак. Многія зоркі змяняюць свае фізічныя характарыстыкі на працягу адносна кароткага перыяду часу. Такія зоркі называюцца **нестацыянарнымі**. У адрозненне ад зацьменна-падвойных зорак (гл. § 24) яны змяняюць сваю святільнасць у выніку фізічных працэсаў, што адбываюцца ў саміх зорках. З гэтай прычыны іх называюць **фізічнымі пераменнымі зоркамі**.

У залежнасці ад характару працэсаў, якія праходзяць унутры зоркі, фізічныя пераменныя зоркі падзяляюць на пульсуючыя і эруптыўныя.

Пульсуючыя пераменныя зоркі — фізічныя пераменныя зоркі, у якіх адбываюцца перыядычныя ваганні бляску (напрыклад, цэфеіды, зоркі тыпу *RR* Ліры, мірыды).

Эруптыўныя зоркі — фізічныя пераменныя зоркі, якія праяўляюць сваю пераменнасць у выглядзе ўспышак, што тлумачацца выкідамі рэчыва (напрыклад, новыя і звышновыя зоркі).

Усе пераменныя зоркі маюць спецыяльныя абазначэнні, калі раней ім не былі прысвоены літары грэчаскага алфавіта. У кожным сузор'і першыя 334 пераменныя зоркі абазначаюцца паслядоўнасцю літар лацінскага алфавіта *R, S, T, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, ..., AZ, ..., QQ, ..., QZ* з дабаўленнем назвы адпаведнага сузор'я. Наступныя пераменныя зоркі, якім не хапіла камбінацый гэтых літар у сузор'і, абазначаюцца *V 335, V 336* і г. д.

2. Пульсуючыя пераменныя зоркі. Першая пульсуючая зорка была адкрыта нямецкім астраномам Давідам Фабрыцыусам у 1596 г. у сузор'і Кіта і названа Мірай. Перыяд змянення бляску гэтай зоркі складае 331,6 сутак.

Доўгаперыядычныя пераменныя зоркі (з перыядам ад некалькіх тыдняў да году і болей; зоркі тыпу Міры Кіта) называюцца **мірыдамі**. Практычна ўсе зоркі гэтага тыпу — чырвоныя гігanty велізарных памераў і вялікай святільнасці. Амплітуды змянення бляску такіх зорак могуць дасягаць дзесяці зорных велічынь.

Пры эвалюцыйным ператварэнні зоркі ў зорку-гіганта адбываецца павелічэнне яе аб'ёму і памяншэнне сярэдняй шчыльнасці рэчыва. У гэты час унутраная будова зоркі змяняецца карэнным чынам, што можа суправаджацца парушэннем раўнавагі паміж сіламі гравітацыйнага прыцяжэння і прамянёвага ціску. Гэта прыводзіць да перыядычных ваганняў аб'ёму зоркі: яе абалонка то расшыраецца, то сціскаецца. Пульсаванне зоркі адбываецца дзякуючы клапаннаму механізму, калі непразрыстасць вонкавых слаёў зоркі затрымлівае частку выпраменьвання ўнутраных слаёў. Пры награванні вонкавы слой становіцца празрыстым, паток

выходзячага выпраменьвання павялічваецца. Але гэта прыводзіць да ахаладжэння і сціскання, з-за чаго слой зноў становіцца непразрыстым і ўвесь працэс паўтараецца спачатку.

Вялізны клас вельмі яркіх пераменных зорак-звышгігантаў і гігантаў класаў F і G называецца **цэфеідамі**. Гэта пульсуючыя пераменныя зоркі, бляск якіх плаўна і перыядычна змяняецца ад 0,5 да 2 зорных велічынь. Перыяд змянення бляску складае ад 1,5 да 70 сутак. Назва паходзіць ад зоркі δ Цэфея — адной з найбольш тыповых для гэтага класа пераменных зорак.

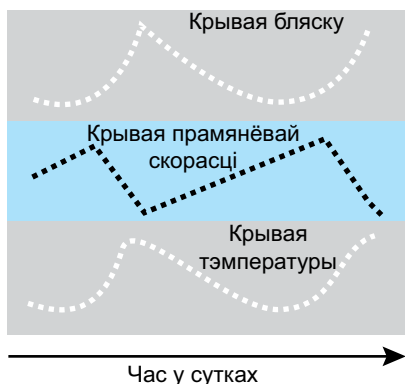
Адначасова з бачнай зорнай велічынёй у цэфеід змяняецца іх спектр і тэмпература (у сярэднім на 1500 градусаў) (рыс. 131).

Перыяд пульсацый зоркі залежыць ад сярэдняй шчыльнасці яе рэчыва і падпарадкоўваецца наступнай заканамернасці:

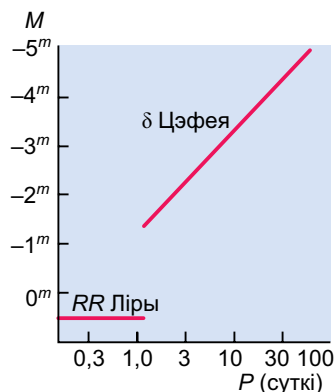
$$P = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho}} = \frac{0,12}{\sqrt{\rho}},$$

дзе P — перыяд пульсацый (у сутках), ρ — сярэдняя шчыльнасць (у адзінках сярэдняй шчыльнасці Сонца). Сярэдняя шчыльнасць рэчыва цэфеід складае каля 10^{-2} кг/м³.

Цэфеіды з большай масай маюць большую свяцільнасць, большы радыус, але меншую шчыльнасць і, адпаведна, большы перыяд пульсацый, г. зн. цэфеіды маюць важную залежнасць «перыяд—свяцільнасць» (рыс. 132). Гэта залежнасць апісваецца выразам: $M = -1,43 - 2,81 \cdot \lg P$, дзе P — перыяд змянення бляску ў сутках, а M — сярэдняя абсалютная зорная велічыня. Такім чынам, па



Рыс. 131. Графікі змянення бляску, прамянёвай скорасці і тэмпературы цэфеід



Рыс. 132. Залежнасць «перыяд—свяцільнасць» у цэфеід і зорак тыпу RR Ліры

вядомым з назіранняў перыядзе можна вызначыць абсалютную зорную велічыню або свяцільнасць зоркі. Пры параўнанні яе з бачнай зорнай велічынёй можна вызначыць адлегласць да цэфеіды. Высокая свяцільнасць і пераменнасць бляску даюць магчымасць выявіць цэфеіды на адлегласці да 20 Мпк. Іх назіраюць у найбліжэйшых галактыках і такім чынам вызначаюць адлегласці да гэтых зорных сістэм.

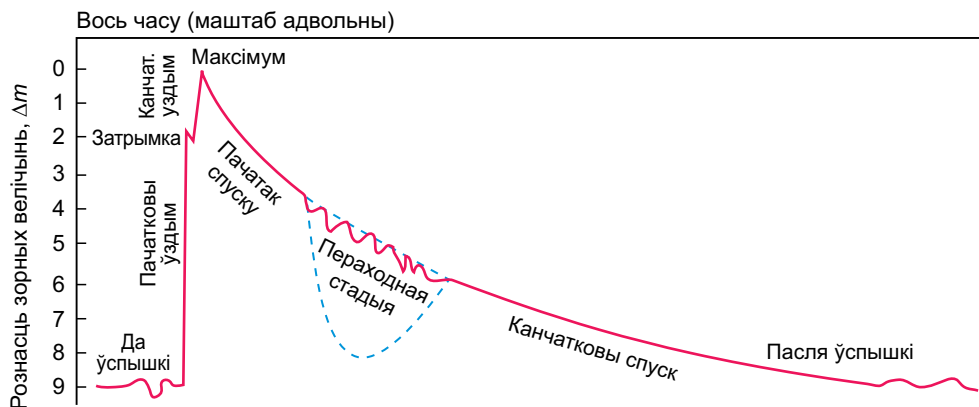
Цэфеіды вобразна называюць маякамі Сусвету. На сённяшні дзень у нашай Галактыцы вядома звыш 800 цэфеід.

Другой разнавіднасцю пульсуючых пераменных зорак з'яўляюцца **зоркі тыпу RR Ліры**, якія маюць больш кароткія перыяды: ад 0,2 да 1,2 сутак. Практычна ўсе зоркі гэтага тыпу — гіганты спектральнага класа А. Яны вельмі хутка змяняюць бляск. Амплітуда змянення бляску дасягае 1-й зорнай велічыні. У гэтых зорак, як і ў цэфеід, існуе залежнасць паміж перыядам і свяцільнасцю (гл. рыс. 132).

3. Новыя зоркі. Зоркі, бляск якіх раптоўна павялічваецца ў тысячы і мільёны разоў за некалькі сутак, пасля чаго памяншаецца да першапачатковага ўзроўню на працягу года і больш, называюцца **новымі зоркамі**.

Тэрмін «новая зорка» не падразумявае, што зорка нарадзілася. Так называюць зоркі, у якіх раптам павялічыўся бляск. Напрыклад, адна з новых зорак, якая ўспыхнула ў чэрвені 1918 г., павялічыла свой бляск за чатыры дні з 11-й да $-0,5$ -й зорнай велічыні (г. зн. у 40 тыс. разоў), а потым прыняла папярэдняе значэнне бляску за перыяд, крыху большы за 1,5 года.

Назіранні паказваюць, што новымі зоркамі, якія ўспыхваюць, з'яўляюцца гарачыя белыя карлікі спектральных класаў O — B , абсалютная зорная велічыня якіх парадку 4^m — 5^m . У час успышкі гэтыя зоркі павялічваюць свой бляск на 7^m — 16^m зорных велічынь (рыс. 133). За час успышкі новая зорка



Рыс. 133. Графік змянення бляску новай зоркі



Рис. 134. Крабападобная туманнасць — рэшткі ад выбуху звышновой зоркі

абсалютнай зорнай велічыні ад -18^m да -19^m . Асобныя звышновыя ў максімуме бляску перавышаюць свяцільнасць Сонца ў дзясяткі мільярдаў разоў, дасягаючы абсалютнай зорнай велічыні $M = -21^m$.

У кітайскіх летапісах згадваецца раптоўнае з'яўленне ў 1054 г. у сузор'і Цяльца «зоркі-госці», якая назіралася кітайскімі і японскімі астраномамі, здавалася ярчэйшай за Венеру і была бачная нават удзень. Праз два месяцы гэта зорка пачала гаснуць, а яшчэ праз некалькі месяцаў зусім знікла з поля зроку. У наш час пры дапамозе дастаткова магутных тэлескопаў у гэтым сузор'і можна бачыць туманнасць мудрагелістай формы, якая нагадвае краба, што плыве ў вадзе. Туманнасць так і назвалі — Крабападобная (рыс. 134). Назіранні паказалі,



Рис. 135. Звышновая SN 1987A у Вялікім Магеланавым Воблаку (паказана стрэлкай)

выпраменьвае энергію каля 10^{38} Дж (такая энергія выпраменьваецца Сонцам прыблізна за 100 тыс. гадоў!).

Прычынай выбуху новых зорак з'яўляецца абмен рэчывам паміж кампанентамі цесных падвойных пар, да якіх належаць усе дэтальна даследаваныя былыя новыя зоркі. Многія новыя зоркі ўспыхваюць неаднаразова. Калі ўспышка паўтараецца, такую зорку называюць паўторнай новай.

4. Звышновыя зоркі. Звышновыя зоркі — адна з самых грандыёзных і захапляльных касмічных з'яў. **Звышновымі** называюцца зоркі, якія ўспыхваюць падобна да новых і дасягаюць у максімуме абсалютнай зорнай велічыні ад -18^m да -19^m . Асобныя звышновыя ў максімуме бляску перавышаюць свяцільнасць Сонца ў дзясяткі мільярдаў разоў, дасягаючы абсалютнай зорнай велічыні $M = -21^m$. У кітайскіх летапісах згадваецца раптоўнае з'яўленне ў 1054 г. у сузор'і Цяльца «зоркі-госці», якая назіралася кітайскімі і японскімі астраномамі, здавалася ярчэйшай за Венеру і была бачная нават удзень. Праз два месяцы гэта зорка пачала гаснуць, а яшчэ праз некалькі месяцаў зусім знікла з поля зроку. У наш час пры дапамозе дастаткова магутных тэлескопаў у гэтым сузор'і можна бачыць туманнасць мудрагелістай формы, якая нагадвае краба, што плыве ў вадзе. Туманнасць так і назвалі — Крабападобная (рыс. 134). Назіранні паказалі, што яна расшыраецца. З улікам скорасці расшырэння можна зрабіць выснову, што Крабападобная туманнасць — гэта рэшткі выбуху звышновой 1054 г.

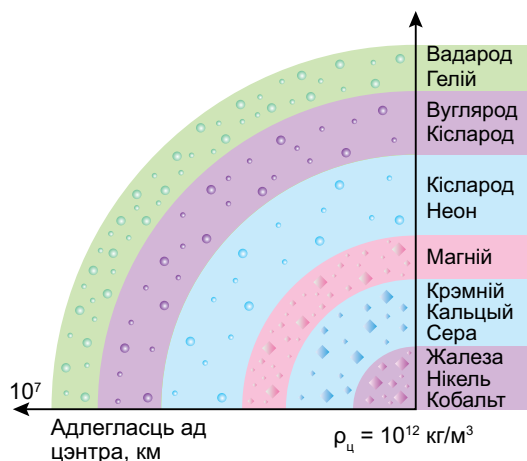
У нашай Галактыцы за апошніяе тысячгагоддзе зарэгістравана некалькі выпадкаў успышак звышновых зорак. Найбольш яркая звышновая зорка, якая назіралася пры дапамозе сучаснай тэхнікі, з'явілася ў 1987 г. у адной з найбліжэйшых галактык — Вялікім Магеланавым Воблаку (рыс. 135).

Зорка ўспыхвае з прычыны калапсу (хуткага сціскання) свайго масіўнага ядра. Адбываецца гэта наступным чынам. На розных этапах жыцця масіўнай зоркі ў яе ядры працякаюць тэрмаядзерныя рэакцыі, пры якіх спачатку вадарод ператвараецца ў гелій, а потым гелій — у вуглярод і гэтак далей да ўтварэння ядзер элементаў групы жалеза (Fe, Ni, Co). Паступова зорка ўсё больш і больш «расслойваецца» (рыс. 136).

Ядзерныя рэакцыі з утварэннем яшчэ больш цяжкіх хімічных элементаў ідуць з паглыннаннем энергіі, таму зорка пачынае ахалоджвацца і сціскацца. Унутраныя слаі нібыта абвальваюцца да цэнтра зоркі, адбываецца тэрмаядзерны выбух, узнікае ўдарная хваля, якая рухаецца адваротна ад цэнтра. У выніку вонкавыя слаі зоркі выкідваюцца з велізарнай скорасцю і назіраецца ўспышка звышновай.

Пры выбуху выдзяляецца энергія парадку 10^{46} Дж. Такую колькасць энергіі Сонца здольна выпраменіць толькі за мільярды гадоў. Ад велізарнай зоркі застаюцца толькі газавая абалонка, якая расшыраецца з вялікай скорасцю, і нейтронная зорка (або чорная дзіра).

Калі маса зоркі невялікая, то сілы гравітацыі параўнальна слабыя, і сцісканне зоркі (гравітацыйны калапс) спыняецца. Пры вельмі высокай шчыльнасці рэчыва электроны злучаюцца з пратонамі і ўтвараюць нейтральныя часціцы — нейтроны. У хуткім часе амаль уся зорка будзе складацца з адных нейтронаў, так цесна прыціснутых адзін да аднаго, што велізарная маса зоркі будзе сканцэнтравана ў вельмі невялікім шары памерам парадку дзесяці кіламетраў (рыс. 137). Шчыльнасць утворанага шара — **нейтроннай зоркі** — можа складаць $10^{17}—10^{18}$ кг/м³.



Рыс. 136. Расслаенне масіўных зорак



Рыс. 137. Адносныя памеры белага карліка і нейтроннай зоркі



Рыс. 138. Адносны памеры нейтроннай зоркі і чорнай дзіры

Калі такая зорка мае магутнае магнітнае поле і знаходзіцца ў падвойнай сістэме, рэчыва суседкі можа захоплівацца і падаць уздоўж ліній магнітнага поля, ствараючы ў раёне магнітнага полюса гарачую пляму, якая выпраменьвае ў радыёдыяпазоне. У такім выпадку назіраецца **пульсар** — нейтронная зорка, якая хутка верціцца і выпускае радыёімпульсы. У вядомых сёння пульсараў перыяд выпускавання радыёімпульсаў ляжыць у дыяпазоне ад 0,0014 да 11,8 с.

Калі ў нетрах зоркі адсутнічаюць сілы, якія процідзейнічаюць яе сцісканню пад дзеяннем сіл гравітацыі, то зорка і далей будзе сціскацца. Шчыльнасць рэчыва будзе працягваць павялічвацца. У выніку масіўная зорка (найменшая вядомая маса складае 5 мас Сонца) на заключным этапе сваёй эвалюцыі ператвараецца ў аб'ект, які нястрымна сціскаецца, — **чорную дзіру** (рыс. 138). Поле прыцягнення на мяжы чорнай дзіры настолькі вялікае, што сігналы ад гэтага аб'екта не выходзяць вонкі (адсюль паходзіць яе назва), нават святло не ў стане яго пераадолець.

Крытычны радыус, да якога павінна сціснуцца зорка, каб ператварыцца ў чорную дзіру, называецца **гравітацыйным радыусам** (r_g) або **радыусам Шварцшыльда**. Для масіўных зорак r_g складае некалькі дзясяткаў кіламетраў і разлічваецца па формуле:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

дзе G — гравітацыйная пастаянная, M — маса зоркі, c — скорасць святла.

З тэорыі адноснасці вынікае, што рэчыва павінна быць сціснута ў мікраскапічна малым аб'ёме прасторы ў цэнтры чорнай дзіры. Гэты стан называецца **сінгулярнасцю**. Мяжу чорнай дзіры называюць **гарызонтам падзей**.



Рыс. 139. Схема чорнай дзіры ў падвойнай сістэме

Часцей за ўсё чорную дзіру выяўляюць двума спосабамі. Па-першае, калі чорная дзіра ўтварылася ў падвойнай сістэме зорак, то яе месцазнаходжанне можна вызначыць па абарачэнні другога кампанента вакол «пустога месца» (рыс. 139). Па-другое, пры падзенні рэчыва на чорную дзіру павінна ўзнікаць магутнае рэнтгенаўскае выпраменьванне. Крыніцы такога выпраменьвання

(Лебедзь X-1, Скарпіён X-1 і інш.) зарэгістраваны як «кандыдаты» ў чорныя дзіры, якія таксама могуць існаваць і назірацца як аб'екты, што пастаянна ўзаемадзейнічаюць з рэчывам у ядрах галактык.

У 2019 г. быў атрыманы прадказаны тэорыяй відарыс ценю звышмасіўнай чорнай дзіры ў цэнтры галактыкі М 87.

! Галоўныя вывады

1. Зоркі, якія змяняюць свае фізічныя характарыстыкі на працягу адносна кароткага перыяду часу, называюцца нестацыянарнымі. Яны бываюць пульсуючымі і эруптыўнымі.
2. Фізічныя пераменныя зоркі — гэта пульсуючыя зоркі, якія змяняюць сваю святільнасць за кароткія прамежкі часу ў выніку фізічных працэсаў, што адбываюцца ў саміх зорках.
3. Эруптыўныя зоркі — фізічныя пераменныя зоркі, якія праяўляюць сваю пераменнасць у выглядзе ўспышак. Да іх адносяцца новыя і звышновыя зоркі.
4. Нейтронныя зоркі ўтвараюцца пры выбухах звышновых зорак. Некаторыя з іх назіраюцца як пульсары, для якіх характэрна магутнае вузканакіраванае пульсуючае радыёвыпраменьванне.
5. Чорная дзіра — частка замкнутай прасторы, утвораная гравітацыйным полем масіўнага цела, якую не могуць пакінуць ні часціцы, ні выпраменьванне.
6. У працэсе эвалюцыі зорак (у выніку тэрмаядзерных рэакцый і выбухаў) адбываецца ўтварэнне хімічных элементаў.

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Чым адрозніваюцца фізічныя пераменныя зоркі ад зацьменна-падвойных зорак?
2. Якая прычына пульсацый цэфеід?
3. Чым адрозніваецца новая зорка ад звышновой?
4. Як утварылася Крабападобная туманнасць?
5. Якія прычыны выбуху новых і звышновых зорак?
6. Растлумачце механізм радыёвыпраменьвання пульсара.
7. Які аб'ект называюць чорнай дзірой? Якія ўласцівасці характэрны для чорнай дзіры?
8. Вызначце сярэднюю шчыльнасць цэфеіды, калі яе перыяд пульсацый складае 20 сут.
9. Вызначце радыус Шварцшыльда для зоркі з масай, роўнай 3 масам Сонца.
10. Святільнасць звышновой перавышае святільнасць Сонца ў 10^{11} разоў. Калі б гэта зорка з'явілася на нашым небе з яркасцю, роўнай сонечнай, то на якой адлегласці ад Сонца яна павінна была б знаходзіцца? $M_c = 4^m,8$; $m_c = -26^m,8$.
11. Цэфеіда ζ Блізнят мае перыяд змянення бляску $P = 10^d,15$ і сярэднюю бачную зорную велічыню $m = 3^m,93$. На якой адлегласці ад Сонца яна знаходзіцца?