

свяцільнасцях. У інтэрвале мас $0,5M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$ свяцільнасць зоркі прапарцыянальна чацвёртай ступені яе масы $L \approx M^4$. Пры $M > 10M_{\odot}$ паказчык ступені роўны 2, г. зн. $L \approx M^2$.

3. Маса зоркі ў момант яе фарміравання з'яўляецца найважнейшым параметрам, які вызначае далейшую эвалюцыю зоркі.

4. Радыусы зорак маюць вельмі шырокія межы, таму сярэдняя шчыльнасць зорак вагаецца ад $5 \cdot 10^{-2}$ да $3 \cdot 10^8$ кг/м³ (параўнайце з Сонцам — $1,4 \cdot 10^3$ кг/м³).



Галоўныя вывады

1. Дзве зоркі, якія адрозніваюцца ад іншых блізкасцю сваіх бачных месцазнаходжанняў, называюцца падвойнай зоркай. Падвойныя зоркі з'яўляюцца прыватным выпадкам кратных зорак.
2. Фізічныя падвойныя зоркі — сістэма дзвух зорак, якія звязаны сіламі прыцягнення і абарачаюцца вакол агульнага цэнтра мас.
3. У залежнасці ад метаду назірання падвойныя зоркі падзяляюцца на візуальна-падвойныя, зацьменна-падвойныя, спектральна-падвойныя, астраметрычна-падвойныя.
4. Кампаненты фізічных падвойных зорак выконваюць бачны адносны рух па эліпсе ў адпаведнасці з законамi Кеплера і падпарадкоўваюцца закону сусветнага прыцягнення.
5. Вывучэнне падвойных зорак дазваляе вызначаць масы зорак.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Якія зоркі называюцца падвойнымі? Прывядзіце іх класіфікацыю.
2. Што такое амплітуда і перыяд пераменнасці зацьменна-падвойных зорак?
3. Дайце тлумачэнне: чаму адбываецца зрушэнне ліній у спектрах спектральна-падвойных зорак?

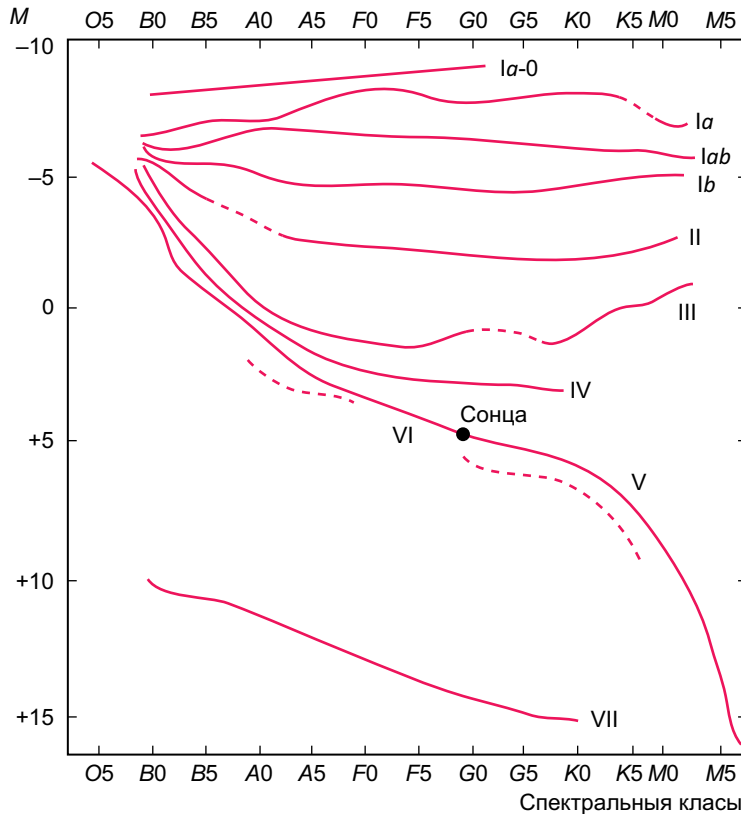
§ 25. Эвалюцыя зорак

1. **Дыяграма «спектр—свяцільнасць».** Існуе залежнасць паміж асноўнымі фізічнымі характарыстыкамі зорак. На аснове назіранняў вызначаюцца спектральныя класы зорак, а па вядомай адлегласці — абсалютныя зорныя велічыні, або свяцільнасці зорак.

У пачатку XX ст. незалежна адзін ад аднаго дацкі астраном Эйнара Герцшпрунга, а крыху пазней амерыканскі астрафізік Генры Расел устанавілі сувязь паміж гэтымі характарыстыкамі. Гэту залежнасць можна прадставіць у выглядзе дыяграмы (рыс. 128): па гарызантальнай восі адкладваецца спектральны клас (або тэмпература) зорак, а па вертыкальнай — іх святлівасць (у абсалютных велічынях). Кожнай зорцы адпавядае пункт на дыяграме. Такая дыяграма называецца **дыяграмай Герцшпрунга—Расела** або **дыяграмай «спектр—святлівасць»** (гл. форзац 4).

Зоркі на дыяграме не размяркоўваюцца выпадковым чынам па ўсёй яе плошчы, а ўтвараюць некалькі груп, якія называюцца **паслядоўнасцямі**.

Большасць зорак на дыяграме знаходзіцца ў межах выразна выяўленай паласы, выцягнутага ад левага верхняга да правага ніжняга вугла, якая называецца **галоўнай паслядоўнасцю**.



Рыс. 128. Дыяграма «спектр—святлівасць» з указаннем класаў святлівасці

У левай верхняй частцы галоўнай паслядоўнасці знаходзяцца масіўныя гарачыя зоркі спектральнага класа O , свяцільнасць якіх у дзясяткі тысяч разоў перавышае свяцільнасць Сонца. Такія зоркі называюць гарачымі звышгігантамі. З памяншэннем тэмпературы свяцільнасць зорак падае. Потым паласа галоўнай паслядоўнасці праходзіць праз вобласць, дзе знаходзяцца падобныя да Сонца зоркі класа G . І нарэшце, галоўная паслядоўнасць апускаецца да ніжняй правай часткі дыяграмы. Тут знаходзяцца зоркі класа M і L з малой масай і адносна нізкай тэмпературай. Гэтыя зоркі называюць чырвонымі і карычневымі карлікамі.

Да зорак галоўнай паслядоўнасці адносяцца добра вядомыя зоркі — Сірыус (α Вялікага Пса), Вега (α Ліры), Сонца. Зоркі з адносна нізкай тэмпературай фотасферы ($3\text{—}5 \cdot 10^3$ К) і свяцільнасцю ў $100\text{—}1000$ разоў большай за свяцільнасць Сонца ўтвараюць **паслядоўнасць чырвоных гігантаў**. Да гэтай паслядоўнасці адносяцца, напрыклад, Арктур (α Валапаса), Альдэбаран (α Цяльца).

У верхняй частцы дыяграмы «спектр—свяцільнасць» знаходзіцца **паслядоўнасць звышгігантаў** (гл. рыс. 128). Гэта зоркі з вельмі высокай свяцільнасцю, нізкай шчыльнасцю і з дыяметрамі, у дзясяткі і сотні разоў большымі за сонечны. Да звышгігантаў адносіцца зорка Бэтэльгейзе (α Арыёна).

У левай ніжняй частцы дыяграмы размешчаны гарачыя зоркі слабай свяцільнасці — **паслядоўнасць белых карлікаў**. Іх памеры параўнальныя з памерамі Зямлі, а масы блізкія да масы Сонца. Таму сярэдняя шчыльнасць белых карлікаў перавышае шчыльнасць зямных парод у сто тысяч разоў. З іншага боку, сярэдняя шчыльнасць зорак-звышгігантаў вельмі нізкая — у тысячы разоў меншая за шчыльнасць зямной атмасферы. Шчыльнасць рэчыва ў атмасферы зоркі ўплывае на шырыню спектральных ліній. Таму, напрыклад, у чырвоных карлікаў спектральныя лініі шырэйшыя, чым у гігантаў і звышгігантаў. Такім чынам, па выглядзе спектральных ліній вызначаецца, якой паслядоўнасці належыць зорка (галоўная, карлікі, гіганты).

Па паслядоўнасці ацэньваецца абсалютная зорная велічыня (гл. формулу 6, § 22), а потым і адлегласць. Гэты метадад вызначэння адлегласцей называецца **метадам спектральных паралаксаў**.

Найбольшая частка зорак адносіцца да чырвоных карлікаў: на 10 млн чырвоных карлікаў прыпадае каля 1 млн белых карлікаў, прыблізна 1000 гігантаў і толькі 1 звышгігант.

У Еркскай абсерваторыі распрацавана двухмерная спектральная класіфікацыя, у якой кожны спектр зоркі ўлічвае асаблівасці спектральных ліній і свяцільнасць зорак (гл. рыс. 128). Гэта класіфікацыя падзяляе ўсе зоркі на шэраг **класаў свяцільнасці** (ад I да VII):

Ia-0 — самыя яркія звышгіганты;

Ia — яркія звышгіганты;

Iab — сярэднія звышгіганты;

Ib — слабыя звышгіганты;

II — яркія гіганты;

III — слабыя гіганты;

IV — субгіганты;

V — галоўная паслядоўнасць;

VI — субкарлікі;

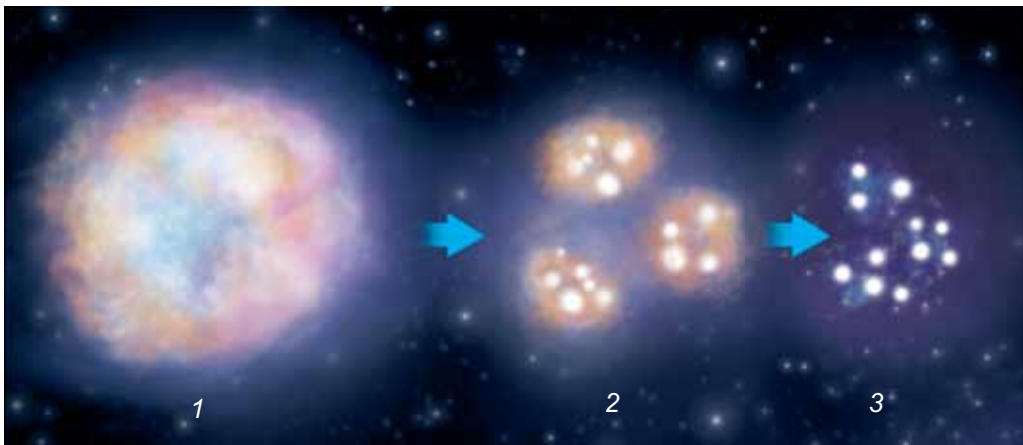
VII — белыя карлікі.

2. Нараджэнне зорак. Працэс зоркаўтварэння адбываецца ў Галактыцы бесперапынна — з моманту яе ўзнікнення. Пацвярджэннем нараджэння зорак у наш час з’яўляецца існаванне масіўных гарачых зорак класаў *O* і *B*, працягласць жыцця якіх не перавышае 10 млн гадоў.

Працягласць жыцця зорак складае ад мільёнаў да дзясяткаў мільярдаў гадоў. Гэты час занадта вялікі, каб прасачыць жыццёвы шлях зорак або іх **эвалюцыю**. Таму асноўным метадам даследавання эвалюцыі зорак з’яўляецца пабудова **мадэлей унутранай будовы зорак**.

Пры пабудове мадэлі задаюць пачатковыя ўмовы фізічнага стану газу: хімічны склад, ціск (шчыльнасць), тэмпературу, масу. Потым на аснове фізічных законаў (газавых законаў, закону прыцягнення) разлічваюць змяненні гэтых параметраў з цягам часу.

Паводле сучасных уяўленняў зоркі ўтвараюцца ў выніку сціскання (гравітацыйнай кандэнсацыі) рэчыва міжзоркавага асяроддзя (рыс. 129, 1). Зоркі



Рыс. 129. Утварэнне зорак з газыпавага комплексу

нараджаюцца групамі з гіганцкіх газапылавых комплексаў памерамі да 100 пк і масай у дзясяткі, а часам і сотні тысяч сонечных мас. Газ у гэтых комплексах знаходзіцца ў малекулярным стане з тэмпературай каля 10 К.

Пад дзеяннем гравітацыйных сіл комплекс сціскаецца, шчыльнасць яго расце, і ён распадаецца на асобныя згусткі, або газапылавыя воблакі (рыс. 129, 2).

У газапылавым воблаку выпадкова ці пад дзеяннем знешніх прычын узнікаюць гравітацыйна-няўстойлівыя фрагменты, якія працягваюць сціскацца. Знешнімі прычынамі, якія стымулююць зоркаўтварэнне, могуць быць сутыкненні малекулярных воблакаў; зорны вецер ад маладых гарачых зорак; ударныя хвалі, выкліканыя ўспышкамі звышновых зорак. Пры дастаткова вялікай масе фрагмента адбываецца далейшы распад на асобныя фрагменты-згусткі (рыс. 129, 3).

Фрагменты зоркавай масы, якія сціскаюцца пад дзеяннем уласнага прыцягнення, называюцца **пратазоркамі**. Пры гравітацыйным сцісканні газ у пратазорцы разаграваецца, і яна пачынае выпраменьваць у інфрачырвоным дыяпазоне спектра. Рэчыва, якое акружае ядро пратазоркі, падае на яго, што павялічвае масу і тэмпературу ядра. Калі ціск, што ствараецца выпраменьваннем зоркі, робіцца дастаткова вялікім, падзенне рэчыва спыняецца. Ціск выпраменьвання абмяжоўвае масу будучых зорак велічынёй у некалькі дзясяткаў мас Сонца. Працягласць стадыі сціскання залежыць ад масы пратазоркі: пры масе, меншай за сонечную, — сотні мільёнаў гадоў, пры большай — сотні тысяч гадоў.

Вярчэнне пратазорак адыгрывае важную ролю ў іх далейшай эвалюцыі. Часта ў пратазорцы, што верціцца, вакол цэнтральнага згустка ўтвараецца працяглы газапылавы дыск, з якога потым развіваецца планетная сістэма. Зорка, якая фарміруецца, у канцы стадыі сціскання мае значныя памеры пры яшчэ адносна нізкай тэмпературы паверхні. Сцісканне пратазоркі спыняецца, калі тэмпература ў цэнтры ядра дасягае некалькіх мільёнаў градусаў; тады ўключаюцца тэрмаядзерныя крыніцы энергіі, рэакцыі пратон-пратоннага цыкла. Момент пачатку тэрмаядзерных рэакцый ёсць момант нараджэння зоркі. Цяпер тэмпература і шчыльнасць унутраных слаёў робяцца такімі, што іх сіла пругкасці можа процідзейнічаць вазе вонкавых слаёў. Пасля пачатку вадародных рэакцый і ўстанаўлення раўнаважнага стану зорка трапляе на галоўную паслядоўнасць дыяграмы «спектр—свяцільнасць». Нованароджаныя зоркі з'яўляюцца на галоўнай паслядоўнасці па ўсёй яе даўжыні (у залежнасці ад іх масы).

3. Эвалюцыйныя перамяшчэнні. Ад масы ў першую чаргу залежыць, якую тэмпературу будзе мець ядро зоркі ў момант устанаўлення ўстойлівай раўнавагі. Чым большая маса газапылавога комплексу, які сціскаецца, а потым пратазоркі і нарэшце зоркі, тым большую вагу слаёў, што ляжаць вышэй, даводзіцца

вытрымліваць яе ядру. Таму патрэбна больш высокая тэмпература, каб газавы ціск мог процістаяць гэтай вазе.

Самыя масіўныя зоркі (памерам у 30—50 мас Сонца) з'яўляюцца найбольш гарачымі зоркамі класа *O*. Тэмпература цэнтральных зон такіх зорак складае 30—35 млн градусаў.

Большую частку часу зорка знаходзіцца на галоўнай паслядоўнасці. Але паколькі запасы вадароду прапарцыянальны масе, а расход энергіі (свяцільнасць) прапарцыянальны чацвёртай ступені масы, то вадарод у масіўных зорак выгарае хутчэй. Час знаходжання зоркі на галоўнай паслядоўнасці вызначаецца прастай залежнасцю

$$t = 10^{10} \frac{1}{M^3} \text{ (гадоў)},$$

дзе M — маса зоркі ў масах Сонца.

Па прыведзенай вышэй формуле можна падлічыць, што Сонца вычарпае свой запас вадароднага паліва прыблізна за 10 млрд гадоў (такім чынам, Сонца, узрост якога ацэньваецца прыблізна ў 5 млрд гадоў, «пражыло» на галоўнай паслядоўнасці толькі палову свайго жыцця). Зоркі з масамі, роўнымі 10 масам Сонца, вычарпаюць свой запас вадароднага паліва ўсяго за 10 млн гадоў; чырвоныя карлікі масай каля 0,5 масы Сонца, якія слаба выпраменьваюць, — за 80 млрд гадоў. Гарачых маладых зорак-гігантаў назіраецца меней з-за малага часу іх існавання. Таму найбольш запоўнена ніжняя правая частка галоўнай паслядоўнасці дыяграмы «спектр—свяцільнасць».

Пасля выгарання вадароду ў нетрах зоркі ўтвараецца гарачае геліевае ядро. Далейшая эвалюцыя зоркі залежыць ад масы гэтага ядра. Калі яна меншая за 1,4 масы Сонца, то пад дзеяннем гравітацыйнага сціскання геліевае ядро зноў разагрываецца (тэмпература падымаецца да 100 млн градусаў). Вонкавыя слаі зоркі пры гэтым расшыраюцца і ахалоджваюцца. Зорка быццам бы разбухае. Яе свяцільнасць узрастае, а тэмпература падае. Зорка сыходзіць з галоўнай паслядоўнасці і ў залежнасці ад масы становіцца чырвоным гігантам (рыс. 130) ці звышгігантам.

Атмасфера зоркі разрастаецца і паступова аддаляецца ад ядра, утвараючы **планетарную туманнасць**. Канечнай стадыяй эвалюцыі гэтых зорак з'яўляюцца белыя карлікі. **Белы карлік** — кампактная зорка з масай да 1,4 масы Сонца, радыусам,



Рыс. 130. Эвалюцыя зорак рознай масы

прыблізна ў 100 разоў меншым за радыус Сонца. Шчыльнасць такіх зорак больш чым у 100 тыс. разоў перавышае шчыльнасць вады.

Як і ўсе зоркі, Сонца праходзіць стадыі эвалюцыі. Праз 5—8 млрд гадоў яно ператворыцца спачатку ў чырвоны гігант, а потым, скінуўшы абалонку, стане белым карлікам. Зоркі, нашмат больш масіўныя за Сонца, у працэсе эвалюцыі ператвараюцца ў нейтронныя зоркі (пры масе ад 1,4 да 2,7 масы Сонца) або ў чорныя дзіры (пры масе, большай за 2,7 масы Сонца), праходзячы стадыю звышновай.



Галоўныя вывады

1. Паміж рознымі фізічнымі характарыстыкамі зорак існуе сувязь. Дыяграма залежнасці спектральных класаў зорак (або тэмператур) ад іх свяцільнасці называецца дыяграмай «спектр—свяцільнасць».
2. Эвалюцыя зорак — паступовае змяненне з цягам часу фізічных характарыстык, унутранай будовы і хімічнага складу зорак.
3. Зоркі ўтвараюцца ў выніку гравітацыйнага сціскання рэчыва з газыпылавых комплексаў.
4. Зоркі ў працэсе эвалюцыі праходзяць стадыі ад пратазорак да канечных стадый (у залежнасці ад масы) — белых карлікаў, нейтронных зорак або чорных дзір.
5. Пераход зорак з рознай масай на дыяграме «спектр—свяцільнасць» з адной паслядоўнасці на іншую пры змяненні іх параметраў з цягам часу называецца эвалюцыйным перамяшчэннем.
6. Класы свяцільнасці — зоркавыя групы, якія ўлічваюць асаблівасці спектральных ліній і свяцільнасць зорак.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Па якім прынцеце будзеца дыяграма «спектр—свяцільнасць» (дыяграма Герцшпрунга—Расела)?
2. Як на дыяграме «спектр—свяцільнасць» размяшчаюцца зоркі розных памераў?
3. Дайце кароткую характарыстыку зоркам: звышгігантам, чырвоным гігантам, белым карлікам, чырвоным карлікам.
4. Што разумеюць пад эвалюцыяй зорак?
5. Апішыце ў агульных рысах працэс утварэння зорак.
6. Што разумеюць пад класамі свяцільнасці?
7. Якой павінна быць скорасць рэчыва, каб яно магло пакінуць белы карлік, маса якога 10^{30} кг, а радыус $4 \cdot 10^4$ км?