

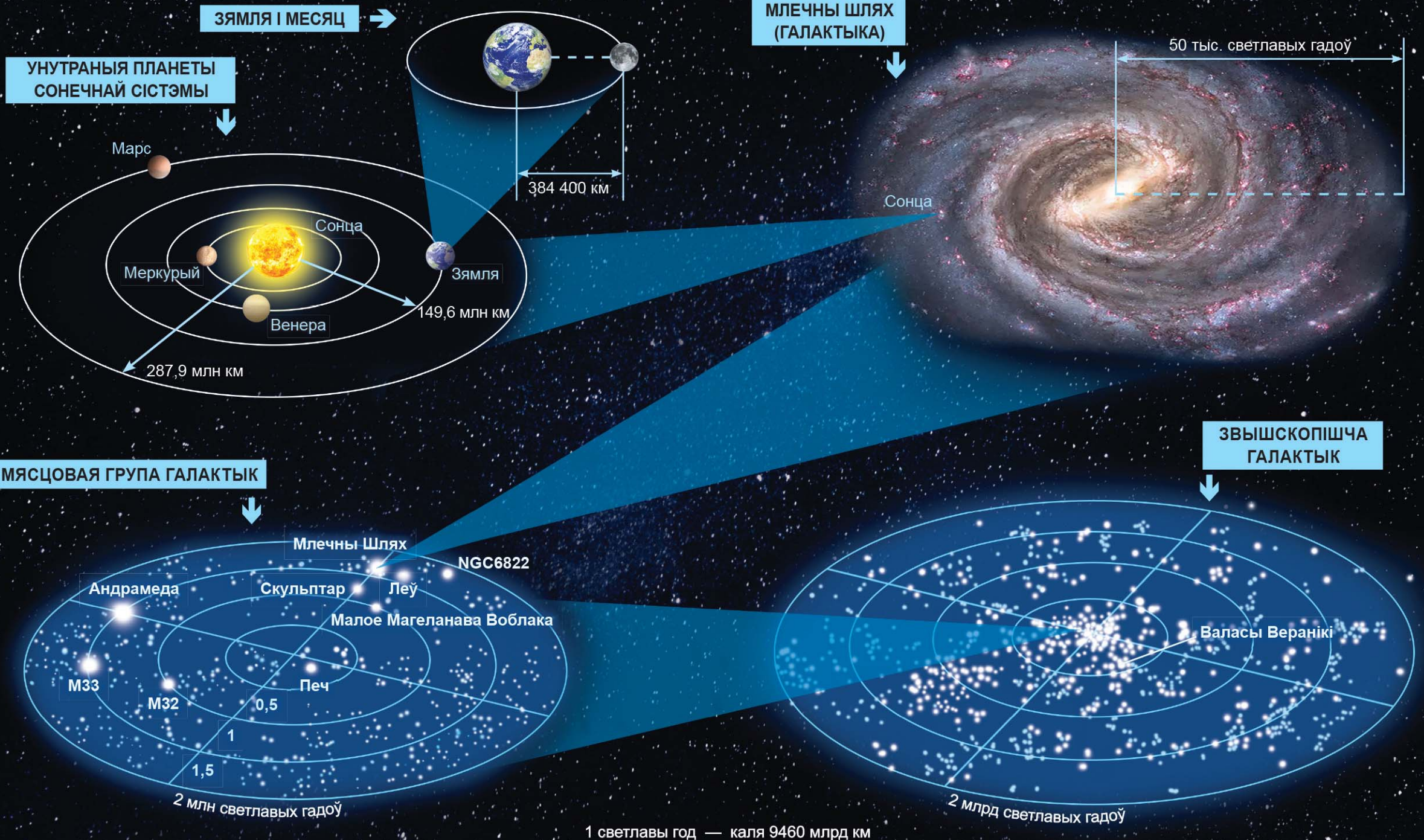
І. В. Галуза У. А. Голубеў А. А. Шымбалёў

Астраномія

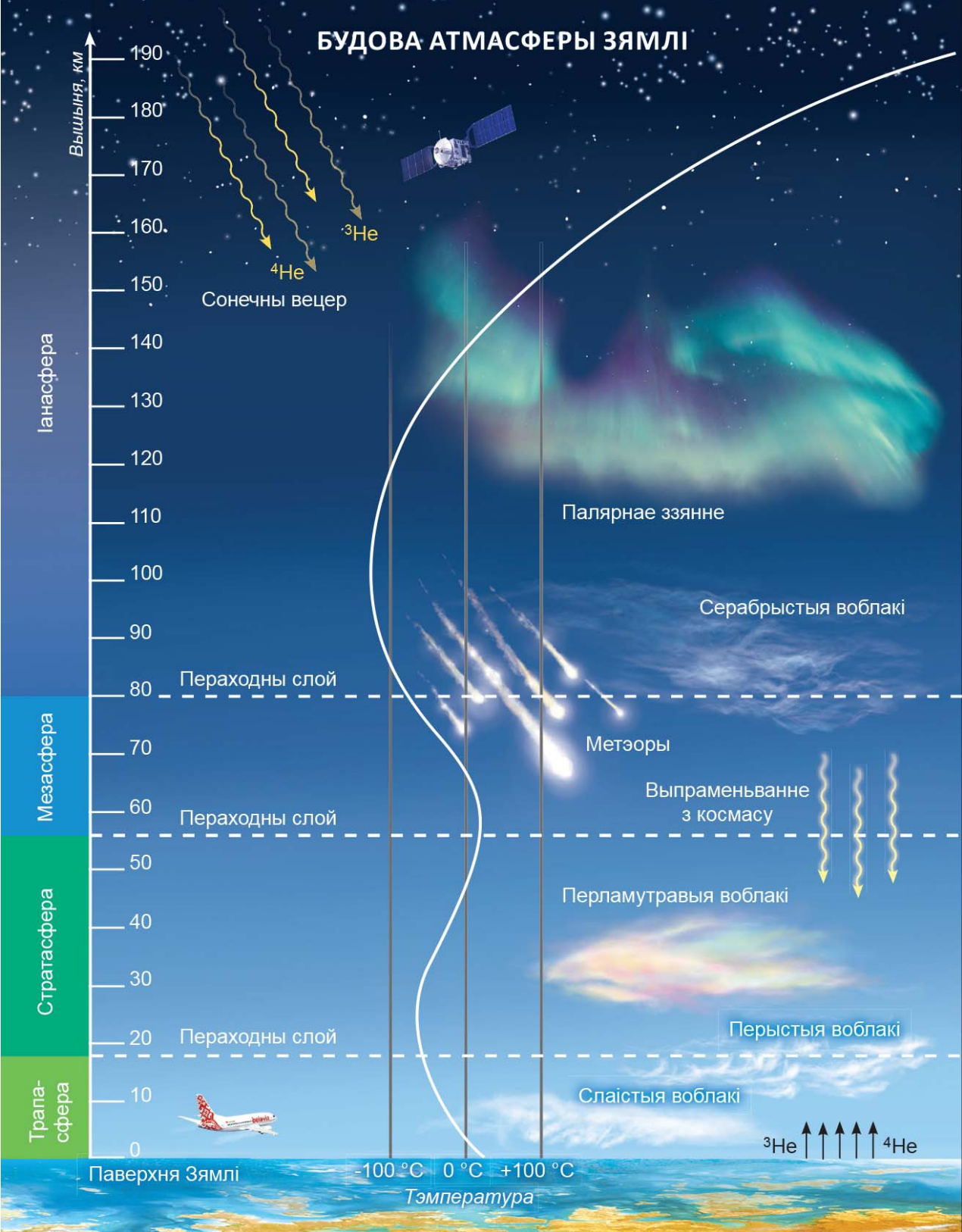
11



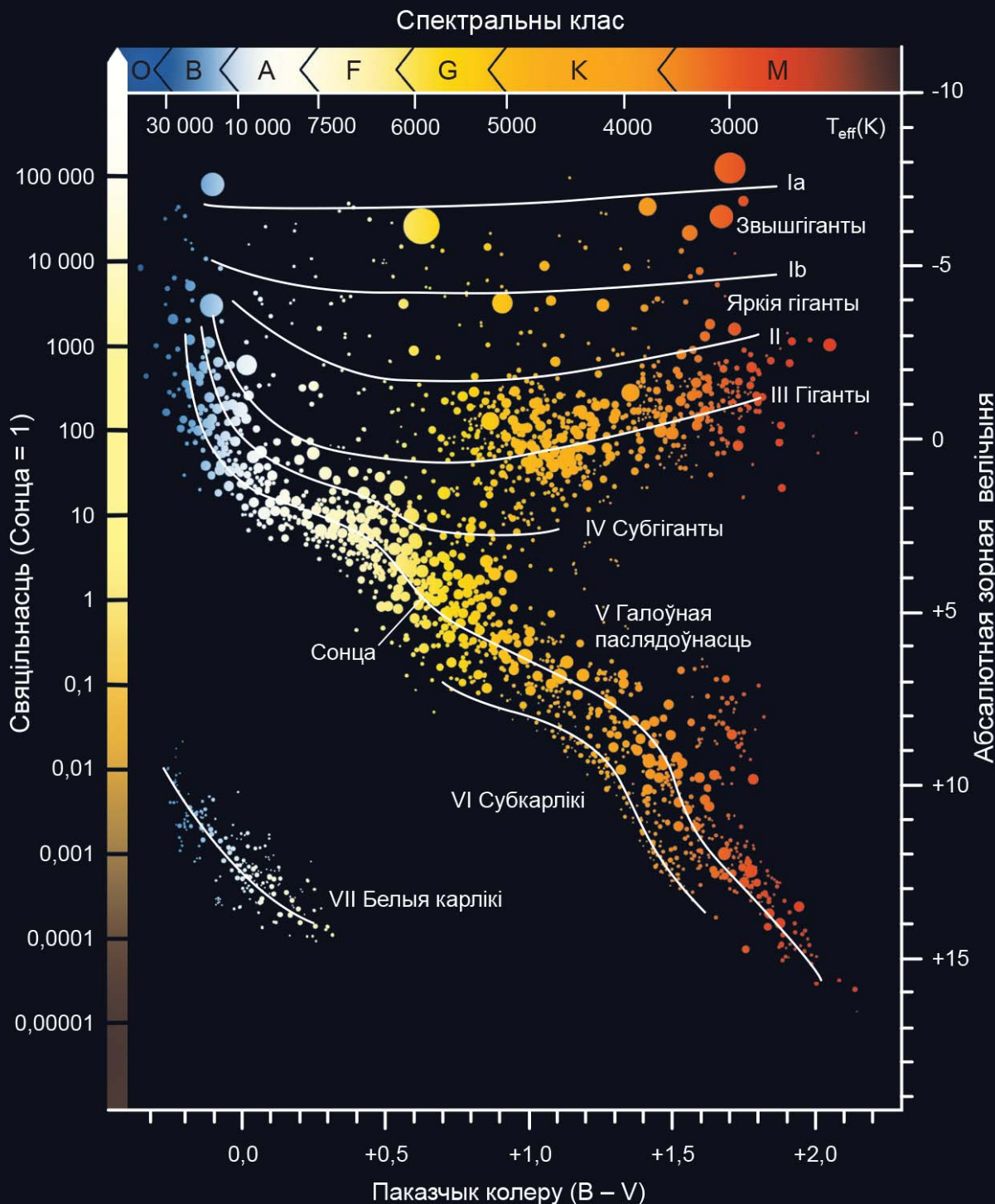
БУДОВА СУСВЕТУ



БУДОВА АТМАСФЕРЫ ЗЯМЛІ



ДЫЯГРАМА ГЕРЦШПРУНГА — РАСЕЛА



І. В. Галуза У. А. Голубеў А. А. Шымбалёў

Астраномія

Падручнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання
(базавы і павышаны ўзроўні)

*Зацверджана
Міністэрствам адукацыі
Рэспублікі Беларусь*

Мінск «Народная асвета» 2021

Правообладатель Народная асвета

УДК 52(075.3=161.3)
ББК 22.6я721
Г16

Пераклад з рускай *Н. М. Алганавай*

Рэцэнзенты:

кафедра агульнай фізікі ўстановы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (дацэнт кафедры, кандыдат фізіка-матэматычных навук *А. В. Лавыш*); настаўнік фізікі і астраноміі вышэйшай кваліфікацыйнай катэгорыі дзяржаўнай установы адукацыі «Сярэдняя школа № 49 г. Мінска» *Н. А. Шашко*

Галуза, І. В.

Г16 Астраномія : падручнік для 11-га класа ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі з беларускай мовай навучання (базавы і павышаны ўзроўні) / І. В. Галуза, У. А. Голубеў, А. А. Шымбалёў : пер. з рус. Н. М. Алганавай. — Мінск : Народная асвета, 2021. — 207 с. : іл.

ISBN 978-985-03-3643-9.

Дадзенае выданне ўдакладнена ў адпаведнасці з новымі адкрыццямі і дасягненнямі астраноміі. Да шэрага ілюстрацый дададзены QR-коды, якія не патрабуюць абавязковага прагляду і вывучэння, але дазваляюць акцэнтаваць увагу на астранамічных з'явах, задаволіць інтэлектуальныя і эстэтычныя запыты навучэнцаў, пашырыць інфарматыўныя магчымасці падручніка адкрытымі матэрыяламі з сеткі Інтэрнэт.

УДК 52(075.3 = 161.3)
ББК 22.6я721

ISBN 978-985-03-3643-9

© Галуза І. В., Голубеў У. А., Шымбалёў А. А., 2021
© Алганавы Н. М., пераклад на беларускую мову, 2021
© Афармленне. УП «Народная асвета», 2021

Правообладатель Народная асвета

Прадмова

Астраномія — адна з найстаражытнейшых навук, якая вывучае аб'екты і з'явы, што назіраюцца ў Сусвеце. Таямніцы неба заклікаюць розум чалавека да роздуму і даследавання фізічнага свету. Гэты бязмежны і пераменлівы свет мы называем Сусветам. Паняцце «Сусвет» уключае ў сябе і Зямлю з іншымі планетамі Сонечнай сістэмы, і Сонца, і іншыя зоркі, і галактыкі, і асяроддзе, у якім яны знаходзяцца. Наша планета Зямля, а значыць, і мы разам з ёю з'яўляемся часткай гэтага Сусвету.

Людзі заўсёды імкнуліся зразумець прыроду аб'ектаў і з'яў, якія яны назіралі, таму будавалі карціну навакольнага свету ў адпаведнасці з тымі данымі, якія мелі. Паступова з атрыманнем новых фактаў і тэорый з'яўляліся магчымасці праверкі гэтых ідэй праз назіранні і вымярэнні з выкарыстаннем дасягненняў навук, сумежных з астраноміяй (асабліва фізікі), дзякуючы чаму карціна поглядаў на свет удакладнялася і змянялася.

У наш час астраномія выкарыстоўвае ўсё больш дасканалую назіральную тэхніку. Сучасныя прыёмнікі выпраменьвання перадаюць інфармацыю непасрэдна ў камп'ютары.

Назіранні вядуцца не толькі ў розных дыяпазонах электрамагнітнага выпраменьвання (радыёдыяпазоне, інфрачырвоным, бачным, ультрафіялетавым, рэнтгенаўскім, а таксама ў гама-праменях), але і шляхам вывучэння гравітацыйных хваль. Адкрыты новыя аб'екты (пульсары, карычневая карлікі), выяўлены нечаканыя ўласцівасці ў многіх ужо вядомых цел, створаны ўмовы для прамога даследавання шэрага аб'ектаў Сонечнай сістэмы і г. д. І чым больш астраномы сутыкаюцца з невядомым і адкрываюць новае, тым больш з'яўляецца пытанняў, якія патрабуюць адказаў.

Сучасная астраномія вывучае надзвычай далёкія касмічныя аб'екты, і разам з тым яна не адарваная ад Зямлі. Для чалавецтва важна даследаваць актыўнасць Сонца і яго ўплыў на зямныя працэсы, адказаць на шэраг пытанняў: ці існуе жыццё на іншых планетах, як касмічныя фактары ўплываюць на існаванне жыцця на Зямлі і г. д. Актуальна праблема астэроіднай небяспекі. Зорнае неба прываблівае ўсіх, аднак раскрывае свае таямніцы толькі найбольш дапытлівым і настойлівым.

Знаёмства з астраноміяй у школе дапаможа атрымаць самыя неабходныя звесткі і ўяўленні аб гэтай старажытнай, але вечна маладой навучы.



Раздзел I

Уводзіны

§ 1. Прадмет астраноміі

1. Што вывучае астраномія. Людзі здаўна спрабавалі разгадаць таямніцу навакольнага свету, вызначыць сваё месца ў Сусвеце. Чалавек уважліва назіраў за ўсходамі і захадамі Сонца, за парадкам змены фаз Месяца, за рухам планет сярод зорак. Людзі імкнуліся зразумець заканамернасць нябесных з'яў і разгадаць іх сэнс. З гэтых разважанняў праз міфалогію і філасофію паступова нараджаліся прыродазнаўчыя веды.

Астраномія (ад грэч. **αστρον** — свяціла і **νομος** — закон) — фундаментальная навука, якая вывучае будову, рух, паходжанне і развіццё нябесных цел, іх сістэм і ўсяго Сусвету ўвогуле.

Астраномія як навука — важны від чалавечай дзейнасці, які дае сістэму ведаў аб заканамернасцях у развіцці прыроды. Мэта астраноміі — вывучыць паходжанне, будову і эвалюцыю Сусвету.

Важнымі задачамі астраноміі з'яўляюцца тлумачэнне і прагназаванне астранамічных з'яў, такіх як сонечныя і месяцавыя зацьменні, з'яўленне перыядычных камет, праходжанне паблізу ад Зямлі астэроідаў, буйных метэорных цел ці ядзер камет. Астраномія вывучае фізічныя працэсы, якія адбываюцца ў нетрах планет, на іх паверхні і ў іх атмасферах, каб лепш зразумець будову і эвалюцыю нашай планеты. Восем вялікіх планет (у тым ліку Зямля), карлікавыя планеты, іх спадарожнікі, астэроіды, метэорныя целы, каметы, міжпланетны пыл і палявыя формы матэрыі разам з Сонцам складаюць гравітацыйна звязаную Сонечную сістэму. Даследаванне руху нябесных цел дазваляе высветліць пытанні ўстойлівасці Сонечнай сістэмы, імавернасці сутыкнення Зямлі з астэроідамі і ядрамі камет. Не страчвае актуальнасць адкрыццё новых аб'ектаў Сонечнай сістэмы і вывучэнне іх руху. Важна ведаць працэсы, што адбываюцца на Сонцы, і прагназаваць іх далейшае развіццё, паколькі ад іх залежыць існаванне ўсяго жывога на Зямлі. Вывучэнне эвалюцыі іншых зорак і параўнанне іх з Сонцам дапамагаюць выявіць этапы развіцця нашага Свяціла. Даследаванні нашай зорнай Галактыкі і іншых

галактык дазваляюць вызначыць іх тыпы, эвалюцыю, месца, якое займае ў іх Сонечная сістэма, магчымасць блізкага праходжання ад Сонца іншых зорак або праходжання яго самога праз міжзоркавыя газавыя і пылавыя воблакі.

Такім чынам, астраномія вывучае будову і эвалюцыю Сусвету. Пад тэрмінам «Сусвет» разумеецца ўся назіраемая вобласць прасторы, якая ўключае ў сябе ўсе даступныя для вывучэння нябесныя целы і іх сістэмы.

2. Узнікненне астраноміі. Астраномія ўзнікла ў глыбокай старажытнасці. Вядома, што яшчэ першабытныя людзі назіралі зорнае неба і затым на сценах пячор малявалі тое, што бачылі. Назіранне зорнага неба фарміравала самога чалавека як істоту з развітым мысленнем.

Па меры развіцця чалавечага грамадства з узнікненнем земляробства з'явілася патрэба ў лічэнні часу, стварэнні календара. Заўважаныя заканамернасці ў руху нябесных святцлаў, змене выгляду Месяца дазволілі старажытнаму чалавеку знайсці і вызначыць адзінкі вымярэння часу (суткі, месяц, год) і стварыць календар, які адлюстроўваў усё культурнае і гаспадарчае жыццё грамадства. Так, у Старажытным Егіпце па з'яўленні на перадранішнім небе самай яркай зоркі Сірыус жрацы прадказвалі перыяды вясенніх разліваў Ніла, якія вызначалі тэрміны земляробчых работ (рыс. 1). У Аравіі, дзе з-за дзённай спёкі многія работы пераносіліся на начны час, істотную ролю адыгрывала назіранне фаз Месяца. У краінах з развітым мараплаўствам, асабліва да вынаходства компаса, найбольшая ўвага надавала-ся спосабам арыентавання па зорках.

У самых ранніх пісьмовых дакументах (3—2-е тысячагоддзі да н. э.) найстаражытнейшых цывілізацый Егіпта, Вавілона, Кітая, Індыі і Амерыкі ёсць сляды астранамічнай дзейнасці. У розных месцах Зямлі знаходзяць збудаванні з каменных камлыг і апрацаваных слупоў, арыентаваныя на астранамічна значныя напрамкі. Гэтыя напрамкі супадаюць, напрыклад, з пунктамі ўсходу Сонца ў дні раўнадзенстваў і сонцастаяння, што дазваляе лічыць іх старажытнымі астранамічнымі назіральнымі пляцоўкамі. Падобныя каменныя сонечна-месяцавыя паказальнікі знойдзены ў Паўднёвай Англіі — Стоўнхендж (рыс. 2), у Расіі на Паўднёвым Урале — Аркаім і іншых месцах.



Рыс. 1. Назіранне перадранішняга ўсходу Сірыуса ў Старажытным Егіпце



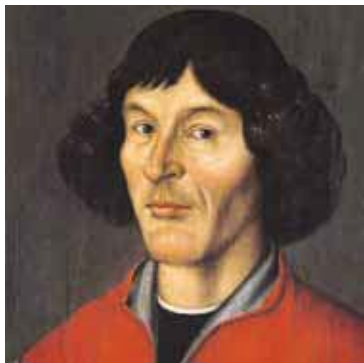
Рыс. 2. Стоўнхендж — старажытная астранамічная назіральная пляцоўка

3. Раздзелы астраноміі. Як і любая іншая навука, астраномія ўключае шэраг раздзелаў, цесна звязаных паміж сабой. Яны адрозніваюцца адзін ад аднаго прадметам даследавання, а таксама метадамі і сродкамі пазнання.

Разгледзім узнікненне і развіццё раздзелаў астраноміі ў гістарычным аспекце. Правільнае навуковае ўяўленне аб Зямлі як нябесным целе з’явілася ў Старажытнай Грэцыі. Александрыйскі астраном Эратасфен у 240 г. да н. э. вельмі дакладна вызначыў па назіраннях Сонца памеры зямнога шара. Развіццё гандлю і мараплаўства патрабавала распрацоўкі метадаў арыентавання, вызначэння геаграфічнага становішча назіральніка, дакладнага вымярэння часу на аснове астранамічных назіранняў. Рашэннем гэтых задач стала займацца **практычная астраномія**.

Геліяцэнтрычная сістэма свету Мікалая Каперніка, выкладзеная ў працы «Аб абарачэннях нябесных сфер» (1543 г.), дала ключ да спазнання Сусвету. Аднак стагоддзямі ўсталяваны погляд аб нерухомасці Зямлі як цэнтра Сусвету доўга не саступаў месца новаму вучэнню. Канчаткова зацвердзіў тэорыю Каперніка, атрымаўшы бяспрэчныя доказы яе праўдзівасці, італьянскі фізік, механік і астраном Галілеа Галілей. Астранамічныя адкрыцці Галілея былі зроблены з дапамогай найбольш простага тэлескопа. На Месяцы вучоны ўбачыў горы і кратары, адкрыў чатыры спадарожнікі Юпітэра. Выяўленая ім змена фаз Венеры сведчыла аб тым, што гэта планета абарачаецца вакол Сонца, а не вакол Зямлі.

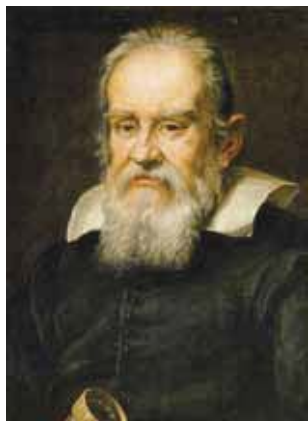
Іаган Кеплер меў доступ да высокіх па дакладнасці вынікаў назіранняў планет, якія праводзіліся астраномам Ціха Браге. Асаблівую ўвагу Кеплера прыцягнуў Марс, у руху якога выявіліся значныя адступленні ад траекторый, якія адпавядалі ранейшым тэорыям. Пасля працяглых вылічэнняў вучоны выявіў тры законы руху планет, якія адыгралі важную ролю ў развіццё ўяўленняў аб будове Сонечнай сістэмы.



Мікалай Капернік
(1473—1543)

Раздзел астраноміі, які вывучае рух нябесных цел, атрымаў назву **нябеснай механікі**. Нябесная механіка дазволіла растлумачыць і папярэдне вылічыць з вельмі высокай дакладнасцю амаль усе рухі, назіраемыя як у Сонечнай сістэме, так і ў Галактыцы.

Для астранамічных назіранняў выкарыстоўваліся ўсё больш дасканалыя тэлескопы. Глядзельная труба Галілея была ўдасканалена Кеплерам, а затым Хрысціянам Гюйгенсам. Ісаак Ньютан вынайшаў новы від тэлескопа — тэлескоп-



Галілео Галілей
(1564—1642)



Іоган Кеплер
(1571—1630)



Ісаак Ньютон
(1643—1727)

рефлектар. З дапамогай мадэрнізаваных аптычных прыбораў былі зроблены новыя адкрыцці, якія адносяцца не толькі да цел Сонечнай сістэмы, але і да свету слабых і далёкіх зорак. У 1655 г. Х. Гойгенс разгледзеў кольцы Сатурна і адкрыў яго спадарожнік Тытан. У 1761 г. М. В. Ламаносаў адкрыў атмасферу ў Венеры і правёў даследаванне камет. Прымаючы за эталон Зямлю, вучоныя параўноўвалі яе з іншымі планетамі і спадарожнікамі. Так зараджалася **параўнальная планеталогія**. У канцы XX ст. былі выяўлены планеты ў суседніх зорак, што спрыяла развіццю **пазасонечнай планеталогіі**.

Вялізныя магчымасці вывучэння фізічнай прыроды і хімічнага складу зорак прадаставіла адкрыццё спектральнага аналізу (1859—1862). Дэталёвыя даследаванні цёмных ліній у спектры Сонца, выкананыя нямецкім вучоным Ёзафам Фраўнгоферам, сталі першым крокам у вывучэнні спектральнай інфармацыі аб нябесных целах. Хуткае развіццё лабараторнай спектраскапіі і тэорыі спектраў атамаў і іонаў на аснове квантавай механікі прывяло да развіцця фізікі зорак і ў першую чаргу фізікі зорных атмасфер.

У 60-я гг. XIX ст. спектральны аналіз становіцца асноўным метадам у вывучэнні фізічнай прыроды нябесных цел. Раздзел астрономіі, які вывучае фізічныя з'явы і хімічныя працэсы, што адбываюцца ў нябесных целах, іх сістэмах і ў касмічнай прасторы, называецца **астрафізікай**.



Міхаіл Васільевіч
Ламаносаў (1711—1765)

Далейшае развіццё астраноміі звязана з удасканаленнем тэхнікі назіранняў. Фотаэлектронныя памнажальнікі, электронна-аптычныя пераўтваральнікі, ПЗС-матрыцы (прыборы з зарадавай сувяззю) павысілі дакладнасць і адчувальнасць фотаметрычных назіранняў і яшчэ больш пашырылі спектральны дыяпазон рэгіструемых выпраменьванняў. Узніклі новыя напрамкі астраноміі: зорная астраномія, касмалогія і касмагонія.

Часам зараджэння **зорнай астраноміі** прынята лічыць 1837—1839 гг., калі незалежна ў Расіі, Германіі і Англіі былі атрыманы першыя вынікі ў вызначэнні адлегласцей да зорак. Зорная астраномія вывучае заканамернасці ў прасторавым размеркаванні і руху зорак у нашай зорнай сістэме — Галактыцы, даследуе ўласцівасці і размеркаванне іншых зорных сістэм.

Касмалогія — раздзел астраноміі, які вывучае паходжанне, будову і эвалюцыю Сусвету як адзінага цэлага. Інтэнсіўна гэты раздзел астраноміі стаў развівацца ў першай палове XX ст., пасля распрацоўкі агульнай тэорыі адноснасці Альбертам Эйнштэйнам.

Касмагонія — раздзел астраноміі, які вывучае паходжанне і развіццё нябесных цел і іх сістэм. Пры даследаванні зорак і галактык выкарыстоўваюцца вынікі назіранняў многіх падобных аб'ектаў, якія ўзнікаюць у розны час і знаходзяцца на розных стадыях развіцця.

Касмаганічныя гіпотэзы XVIII—XIX стст. тычыліся галоўным чынам паходжання Сонечнай сістэмы. Затым развіццё фізікі і астрафізікі дазволіла прыступіць да сур'ёзнага вывучэння паходжання і развіцця зорак. У 60-я гг. XX ст. пачалося даследаванне паходжання і развіцця галактык, прырода якіх была высветлена толькі ў 20-я гг. XX ст.

У канцы XX — пачатку XXI ст. развіўся новы раздзел — **гравітацыйна-хвалевае астраномія**, — які вывучае касмічныя аб'екты шляхам даследавання іх гравітацыйнага выпраменьвання пры дапамозе рэгістрацыі яго прамога ўздзеяння на дэтэктары гравітацыйных хваль. Метады гэтага раздзела дазваляюць больш даведацца аб нейтронных зорках, чорных дзірах і іншых аб'ектах, аб выбухах звышновых і аб іншых працэсах, якія тычацца ранняга і сучаснага Сусвету.

4. Астранамічныя назіранні. Асноўным спосабам даследавання нябесных аб'ектаў і з'яў служачь астранамічныя назіранні. **Астранамічныя назіранні** — гэта мэтанакіраваная і актыўная рэгістрацыя інфармацыі аб працэсах і з'явах, якія адбываюцца ў Сусвеце. Такія назіранні выступаюць асноўнай крыніцай ведаў на эмпірычным узроўні.

На працягу тысячагоддзяў астраномы вывучалі месцазнаходжанні нябесных аб'ектаў на зорным небе і іх узаемнае перамяшчэнне з цягам часу. Дакладныя вымярэнні месцазнаходжанняў зорак, планет і іншых нябесных цел даюць ма-

тэрыял для вызначэння адлегласцей да іх і іх памераў, а таксама для вывучэння законаў іх руху. Вынікамі вугламерных вымярэнняў карыстаюцца ў практычнай астрономіі, нябеснай механіцы, зорнай астрономіі.

Для правядзення астранамічных назіранняў і апрацоўкі атрыманых даных у многіх краінах створаны спецыяльныя навукова-даследчыя ўстановы — **астранамічныя абсерваторыі**.

У сучасных абсерваторыях выкарыстоўваюць назіральныя інструменты (тэлескопы), святлопрыёмную і аналізуючую апаратуру, дапаможныя прыборы для назіранняў, электронна-вылічальную тэхніку і інш. (рыс. 3).

Аптычныя тэлескопы служаць для збірання святла даследуемых нябесных цел і атрымання іх відарысаў. Тэлескоп павялічвае вугал зроку, пад якім бачны нябесныя целы, і збірае ў шмат разоў больш святла, што прыходзіць ад святла, чым простае вока назіральніка. Дзякуючы гэтаму ў тэлескоп можна разглядаць нябачныя з Зямлі дэталі паверхні бліжэйшых нябесных цел, а таксама мноства слабых зорак.

Пасля Другой сусветнай вайны бурна развівацца пачала радыёфізіка. Удасканаленыя прыёмнікі, антэны і радыёлакатары маглі прымаць радыёвыпраменьванне Сонца і далёкіх касмічных аб'ектаў. Так узнікла **радыёастрономія** — адна з галін астрафізікі. Укараненне радыёназіранняў у астрономію (мал. 4) дало мноства выдатных адкрыццяў.

Надзвычайна пашырылі аб'ём інфармацыі аб фізічнай прыродзе нябесных цел і іх сістэм астранамічныя назіранні ў адкрытым космасе. Навуковыя прыборы і тэлескопы, усталяваныя на касмічных апаратах, дазволілі даследаваць ультрафіялетавае, рэнтгенаўскае і гама-выпраменьванне Сонца, іншых зорак і галактык. У пачатку XX ст. сталі прымяняцца дэтэктары гравітацыйных хваль, што збіраюць інфармацыю аб Сусвеце, якую немагчыма атрымаць праз электрамагнітныя хвалі.



Рыс. 3. Адзін з найбуйнейшых аптычных тэлескопаў свету — Вялікі паўднёваафрыканскі тэлескоп з люстрам памерам $11 \times 9,8$ м (ПДАР)



Рыс. 4. 100-метровы радыётэлескоп абсерваторыі Грын Бэнк (ЗША)

5. Значэнне астраноміі. Ва ўсе часы астраномія аказвала вялікі ўплыў на практычную дзейнасць чалавека, але галоўнае яе значэнне заключалася і заключаецца ў фарміраванні навуковага светапогляду. Гэта можна прасачыць, разглядаючы развіццё асобных раздзелаў астраноміі. Метады арыентавання, якія распрацоўваюцца практычнай астраноміяй, прымяняюцца ў мараплаўстве, авіяцыі і касманаўтыцы. Пятрабаванні да дакладнасці вызначэння каардынат нябесных аб'ектаў (зорак, квазараў, пульсараў) значна ўзраслі ў сувязі з тым, што па іх арыентуюцца касмічныя аўтаматычныя апараты, скорасці якіх і пераадолюемыя адлегласці непараўнальныя з зямнымі. У сувязі з асваеннем цэлы Сонечнай сістэмы ўзнікае неабходнасць складання падрабязных карт Месяца, Марса, Венеры.

Праца службы часу таксама звязана з астраноміяй. У задачы дадзенай службы ўваходзяць вызначэнне, захоўванне і перадача сігналаў дакладнага часу, што не страціла актуальнасці і цяпер. Атамны гадзіннік, дакладнасць ходу якога дасягае 10^{-18} с, дазваляе вывучаць гадавыя і векавыя змяненні вярчэння Зямлі, а значыць, уносіць папраўкі ў адзінкі вымярэння часу.

Па меры асваення касмічнай прасторы павялічваецца колькасць задач, рашаць якія павінна нябесная механіка. Адна з іх — вывучэнне адхіленняў арбіт штучных спадарожнікаў Зямлі (ШСЗ) ад разліковых. Вышыня палёту ШСЗ над зямной паверхняй залежыць ад сярэдняй шчыльнасці залягаючых парод, што паказвае на раёны магчымага пошуку нафты, газу або жалезнай руды.

Даследаванне атмасфер цэлы Сонечнай сістэмы дапамагае лепш пазнаваць законы дынамікі атмасферы Зямлі, дакладней будаваць яе мадэль, а значыць, больш упэўнена прадказваць надвор'е. Практычную цікавасць маюць для метэаролагаў, напрыклад, пытанні ўтварэння сярністых воблакаў на Венеры, якія выклікаюць «парніковы эфект», або пытанні глабальных марсіянскіх пылавых бур, якія ахалоджваюць паверхню гэтай планеты.

Развіццё астрафізікі стымулюе распрацоўку найноўшых тэхналогій. Так, даследаванне крыніц энергіі Сонца і іншых зорак падказала ідэю стварэння кіруемых тэрмаядзерных рэактараў. У працэсе вывучэння сонечных пратуберанцаў нарадзілася ідэя цеплаізаляцыі звышгарачай плазмы магнітным полем, стварэння магнітагідрадынамічных генератараў. Вынікі назіранняў Службы Сонца — міжнароднай каардынуючай сеткі па рэгістрацыі актыўнасці Сонца — выкарыстоўваюцца ў метэаралогіі, касманаўтыцы, медыцыне і іншых галінах чалавечай дзейнасці (рыс. 5).

Наша Зямля не ізаляваная ў прасторы, на яе ўздзейнічаюць часціцы і палі, якія ідуць ад Сонца і іншых зорак. Многія зоркі ў канцы сваёй эвалюцыі выбухаюць (так званыя звышновыя), вылучаючы велізарную колькасць энергіі за

некалькі секунд. Так, тыповая ўспышка звышновай зоркі на адлегласці 26 светлавых гадоў ад Зямлі здольна паменшыць таўшчыню аэравага слоя нашай планеты ў 2 разы, што ў сваю чаргу прывядзе да нарастання патоку ультрафіялетавага выпраменьвання, які дасягае Зямлі.

Зорная астраномія вывучае склад, агульныя заканамернасці будовы, дынаміку і эвалюцыю зорак і зорных сістэм у нашай Галактыцы.

Зямля — гэта ўнікальная планета, дзе развілася чалавечая цывілізацыя, і калі прырода Зямлі ўнікальная, то і велізарная адказнасць людзей за яе захаванне.



Рыс. 5. Успышка на Сонцы.
Фатаграфія NASA



Галоўныя вывады

1. Астраномія — фундаментальная навука, якая вывучае фізічныя целы, з'явы і працэсы, што адбываюцца ў Сусвеце.
2. Астраномія складаецца з шэрага раздзелаў, напрыклад нябесная механіка, параўнальная планеталогія, астрафізіка, касмалогія, гравітацыйна-хвалевая астраномія і інш.
3. Асноўны спосаб даследавання нябесных аб'ектаў — астранамічныя назіранні, якія выконваюцца з дапамогай сучасных наземных і касмічных тэлескопаў.
4. Асноўнае прызначэнне астраноміі — фарміраванне навуковага светапогляду людзей.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што вывучае астраномія? Пералічыце найважнейшыя асаблівасці астраноміі.
2. Як узнікла навука астраномія? Ахарактарызуйце асноўныя перыяды яе развіцця.
3. Якія аб'екты і іх сістэмы вывучае астраномія? Пералічыце іх у парадку павелічэння памераў.
4. З якіх раздзелаў складаецца астраномія? Кратка ахарактарызуйце кожны з іх.
5. Што такое тэлескоп і для чаго ён прызначаны?
6. Якое значэнне астраноміі для практычнай дзейнасці чалавецтва?



Раздзел II

Асновы практичнай астраноміі

§ 2. Зорнае неба

1. Сузор'і і яркія зоркі. На небе ў беззоблачную ноч ззяюць мірыяды зорак, і, здаецца, немагчыма разабрацца ў гэтай велічнай зорнай карціне. Успамінаюцца натхнёныя радкі рускага вучонага і паэта М. В. Ламаносава:

*Раскрылась бездань зорак поўна,
Не бачна дна ў бездонні зорным.*

Старажытныя назіральнікі бачылі на зорным небе асобныя спалучэнні яркіх зорак і ў думках аб'ядноўвалі іх у розныя фігуры. Каб было лягчэй арыентавацца на зорным небе, групам зорак, або сузор'ям, людзі давалі назвы жывёл, птушак, розных прадметаў. Назвы некаторых фігур былі звязаны з міфічнымі героямі. Яшчэ ў III ст. да н. э. старажытнагрэчаскія астраномы прывялі назвы сузор'яў у адзіную сістэму. Гэтыя назвы пазней запазычыла еўрапейская навука. Таму ўсе сузор'і, якія змяшчаюць яркія зоркі і бачны ў сярэдніх шыротах Паўночнага паўшар'я Зямлі, атрымалі імёны герояў старажытнагрэчаскіх міфаў і легенд (напрыклад, сузор'і Цэфея, Андромеды, Пегаса, Персея). На старажытных зорных картах можна таксама знайсці Вялікую Мядзведзіцу і Малую Мядзведзіцу, нябеснага паляўнічага Арыёна, галаву зорнага быка — Цяльца і інш. (рыс. 6). У працы «Альмагест» («Вялікая матэматычная пабудова астраноміі ў XIII кнігах», II ст. н. э.) грэчаскі астраном Клавдзіў Пталемей згадвае 48 сузор'яў. Гэта Вялікая Мядзведзіца і Малая Мядзведзіца, Дракон, Лебедзь, Арёл, Цялец, Шалі і інш.

Найбольш прыкметныя сузор'і ў многіх народаў атрымалі свае назвы. Так, старажытным славянам Вялікая Мядзведзіца ўяўлялася ў выглядзе Лася або Алёны. Часта коўш Вялікай Мядзведзіцы параўноўваўся з возам, адсюль і назвы гэтага сузор'я: Воз, Калёсы, Калясніца.



Рыс. 6. Фрагмент нябеснага атласа А. Цэларыуса з выявай сузор'яў

А, напрыклад, сузор'е Касіяпеі, названае ў гонар міфічнай царыцы (рыс. 7), беларусам уяўлялася ў выглядзе двух касцоў (рыс. 8).

На сучасных астранамічных картах няма выяў міфічных вобразаў сузор'яў, але захаваны іх старажытныя назвы.

Менш яркія сузор'і былі названы еўрапейскімі астраномамі ў XVI—XVIII стст. Усе сузор'і Паўднёвага паўшар'я (нябачныя ў Еўропе) атрымалі



Рыс. 7. Сузор'е Касіяпеі.
Гравюра з атласа Яна Гевелія



Рыс. 8. Сузор'е Касіяпеі
ва ўяўленні беларусаў



назвы ў эпоху Вялікіх геаграфічных адкрыццяў, калі еўрапейцы пачалі асвойваць Новы Свет.

Аднак з цягам часу склалася няпростая сітуацыя — у розных краінах выкарыстоўваліся розныя карты сузор'яў. Паўстала неабходнасць уніфікаваць падзел зорнага неба. Канчатковы лік і межы сузор'яў былі вызначаны на асамблеях Міжнароднага астранамічнага саюза ў 1922 і 1928 гг. Уся сферычная паверхня зорнага неба была ўмоўна падзелена на 88 сузор'яў.

У цяперашні час пад **сузор'ем** разумеецца ўчастак зорнага неба з характэрнай назіраемай групой зорак. Гэтыя пляцоўкі-сузор'і носяць назвы або старажытнагрэчаскіх сузор'яў, якія знаходзіліся (або знаходзяцца) у сучасных межах, або назвы, прысвоеныя еўрапейскімі астраномамі. Для палягчэння запамінання і пошуку сузор'яў у падручніках па астраноміі і астранамічных атласах яркія зоркі, якія ўтвараюць сузор'і, злучаны ўмоўнымі лініямі ў фігуры, якія лёгка пазнаць на небе. Сузор'і, зоркі якіх утвараюць канфігурацыю, што выразна вылучаецца на зорным фоне, або тыя, якія ўтрымліваюць яркія зоркі, адносяцца да галоўных сузор'яў (рыс. 9).



Рыс. 9. Схема ўзаемнага размяшчэння галоўных сузор'яў і яркіх зорак, бачных у сярэдніх геаграфічных шыратах

Над гарызонтам на ясным зорным небе простым вокам можна ўбачыць каля 3000 зорак. Яны адрозніваюцца па сваім бляску: адны прыкметныя адразу, іншыя ледзь заўважныя. Таму яшчэ ў II ст. да н. э. Гіпарх — адзін з заснавальнікаў астраноміі — увёў умоўную **шкалу зорных велічынь**. Самыя яркія зоркі былі аднесены да 1-й велічыні, наступныя па бляску (слабейшым прыкладна ў 2,5 раза) лічацца зоркамі 2-й зорнай велічыні, а самыя слабыя, бачныя толькі ў бязмесяцавую ноч, — зоркамі 6-й велічыні.

Многім яркім зоркам старажытнагрэчаскія і арабскія астраномы далі назвы: Вега, Сірыус, Капэла, Альтаір, Рыгель, Альдэбаран і інш. Пазней яркія зоркі ў сузор'ях сталі абазначаць літарамі грэчаскага алфавіта, як правіла, па меры памяншэння іх бляску. З 1603 г. дзейнічае прапанаваная нямецкім астраномам Іаганам Баерам сістэма абазначэння зорак. У сістэме Баера назва зоркі складаецца з дзвюх частак: назвы сузор'я, якому належыць зорка, і літары грэчаскага алфавіта. Пры гэтым першая літара грэчаскага алфавіта α адпавядае самай яркай зорцы ў сузор'і, β — другой па бляску зорцы і г. д. Напрыклад, Рэгул — α Ільва — гэта самая яркая зорка ў сузор'і Льва, Дэнебола — β Ільва — другая па бляску зорка ў гэтым сузор'і.

Па меры развіцця навукі і ў сувязі з вынаходствам тэлескопаў колькасць даследуемых зорак усё павялічвалася. Для іх абазначэння ўжо не хапала літар грэчаскага алфавіта. І тады зоркі пачалі абазначаць лацінскімі літарамі. Калі ж скончыліся і яны, зоркі сталі абазначаць лічбамі (напрыклад, 61 Лебедзь).

2. Бачны сутачны рух зорак. Пры назіранні зорнага неба на працягу адной-дзвюх гадзін мы пераконваемся ў тым, што яно паварочваецца як адзінае цэлае такім чынам, што з аднаго боку зоркі падымаюцца, а з другога — апускаюцца. Для нас, жыхароў Паўночнага паўшар'я, зоркі падымаюцца з усходняй часткі гарызонту і зрушваюцца направа. Далей яны дасягаюць найвышэйшага становішча ў паўднёвай частцы неба і затым апускаюцца ў заходняй частцы гарызонту. На працягу сутак Зорнае неба з усімі свяціламі, што знаходзяцца на ім, выконвае адзін абарот. Такім чынам, *бачнае сутачнае вярчэнне зорнага неба адбываецца з усходу на захад, калі стаяць тварам на поўдзень*, г. зн. па гадзіннікавай стрэлцы.

У паўночнай частцы неба можна адшукаць Палярную зорку. Здаецца, што ўсё неба верціцца вакол яе (рыс. 10). На самай жа справе вакол сваёй восі верціцца Зямля з захаду на



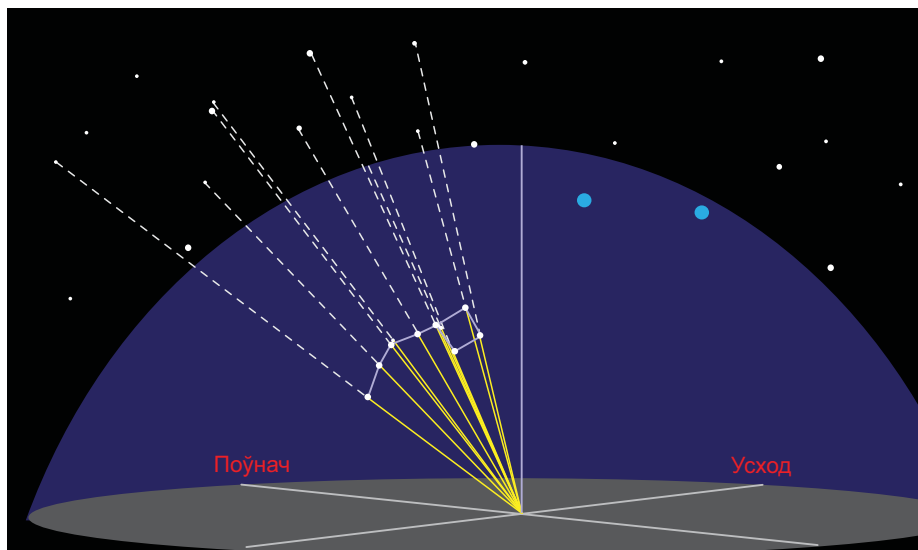
Рыс. 10. Сутачныя дугі свяцілаў у палярнай вобласці неба

ўсход, а ўвесь небасхіл верціцца ў адваротным напрамку з усходу на захад. Палярная зорка для дадзенай мясцовасці застаецца амаль нерухомай і на адной і той жа вышыні над гарызонтам. Відавочна, што **сутачны рух зорак** (святцілаў) — назіраемая ўяўная з'ява вярчэння нябеснага купала — адлюстроўвае сапраўднае вярчэнне зямнога шара вакол сваёй восі.

3. Асноўныя пункты, лініі і плоскасці нябеснай сферы. Нам здаецца, што ўсе зоркі размешчаны на некаторай сферычнай паверхні неба і аднолькава аддалены ад назіральніка. На самай справе яны знаходзяцца ад нас на розных адлегласцях. Таму ўяўную паверхню небасхілу сталі называць нябеснай сферай.

Нябесная сфера — гэта ўяўная сфера адвольнага радыуса, цэнтр якой у залежнасці ад рашаемай задачы сумяшчаецца з тым ці іншым пунктам прасторы. Цэнтр нябеснай сферы можа быць выбраны ў месцы назірання (вока назіральніка), у цэнтры Зямлі або Сонца і г. д. Паняццем нябеснай сферы карыстаюцца для вуглавых вымярэнняў, для вывучэння ўзаемнага размяшчэння і руху касмічных аб'ектаў на небе.

На паверхню нябеснай сферы праецыруюцца бачныя месцазнаходжанні ўсіх святцілаў, а для зручнасці вымярэнняў на ёй будуць шэраг пунктаў і ліній. Напрыклад, некаторыя з зорак «каўша» Вялікай Мядзведзіцы знаходзяцца далёка адна ад адной, але для зямнога назіральніка яны праецыруюцца на адзін і той жа ўчастак нябеснай сферы (рыс. 11).



Рыс. 11. Схема праецыравання зорак у сузор'і Вялікай Мядзведзіцы на нябеснай сферы

Прамая, якая праходзіць праз цэнтр нябеснай сферы (рыс. 12) і супадае з напрамкам ніткі адвеса ў месцы назірання, называецца **адвеснай** або **вертыкальнай лініяй**. Яна перасякае нябесную сферу ў пунктах **зеніту** (верхні пункт перасячэння адвеснай лініі з нябеснай сферай) і **надзіра** (пункт нябеснай сферы, процілеглы зеніту). Плоскасць, якая праходзіць праз цэнтр нябеснай сферы і перпендыкулярна да адвеснай лініі, называецца плоскасцю **сапраўднага** або **матэматычнага гарызонту**.

Вялікі круг нябеснай сферы, які праходзіць праз зеніт, свяціла і надзір, называецца **кругам вышыні**, **вертыкальным кругам** або проста **вертыкалам** **свяціла**.

Вось свету — прамая, якая праходзіць праз цэнтр нябеснай сферы паралельна восі вярчэння Зямлі і перасякае нябесную сферу ў двух дыяметральна процілеглых пунктах.

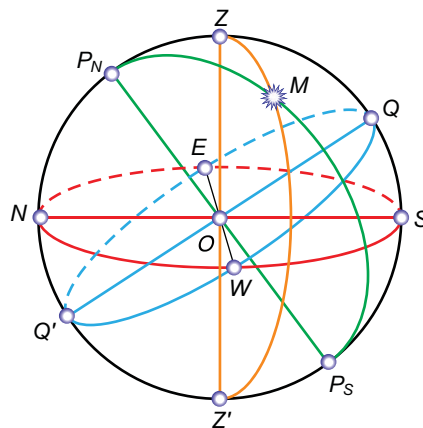
Пункт перасячэння восі свету з нябеснай сферай, паблізу ад якой знаходзіцца Палярная зорка, называецца **Паўночным полюсам свету**, процілеглы пункт — **Паўднёвым полюсам свету**. Палярная зорка знаходзіцца ад Паўночнага полюса свету на вуглавой адлегласці, меншай за 1° (дакладней $44'$).

Вялікі круг, які праходзіць праз цэнтр нябеснай сферы і перпендыкулярны да восі свету, называюць **нябесным экватарам**. Ён дзеліць нябесную сферу на дзве часткі: **Паўночнае паўшар'е** з вяршыняй у Паўночным полюсе свету і **Паўднёвае** — з вяршыняй у Паўднёвым полюсе свету.

Круг схілення свяціла — вялікі круг нябеснай сферы, які праходзіць праз полюсы свету і свяціла.

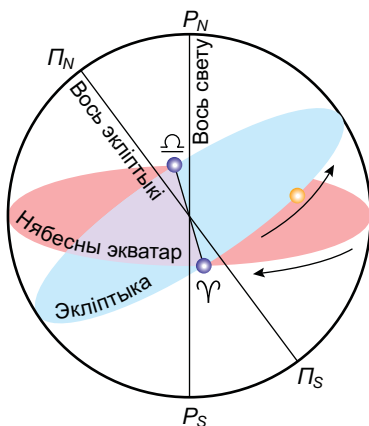
Сутачная паралель — малы круг нябеснай сферы, плоскасць якога перпендыкулярна да восі свету.

Вялікі круг нябеснай сферы, які праходзіць праз пункты зеніту, надзіра і полюсы свету, называецца **нябесным мерыдыянам**. Нябесны мерыдыян



Рыс. 12. Нябесная сфера:

O — цэнтр нябеснай сферы (месцазнаходжанне назіральніка); P_N — Паўночны полюс свету; P_S — Паўднёвы полюс свету; $P_N P_S$ — вось свету; Z — зеніт; Z' — надзір; E — усход; W — захад; N — поўнач; S — поўдзень; Q — верхні пункт нябеснага экватара; Q' — ніжні пункт нябеснага экватара; ZZ' — вертыкальная лінія; ZMZ' — круг вышыні; $P_N M P_S$ — круг схілення; NS — паўдзённая лінія; M — свяціла на нябеснай сферы



Рыс. 13. Экліптыка

перасякаецца з сапраўдным гарызонтам у двух дыяметральна процілеглых пунктах. Пункт перасячэння сапраўднага гарызонту і нябеснага мерыдыяна, бліжэйшы да Паўночнага полюса свету, называецца **пунктам поўначы**. Пункт перасячэння сапраўднага гарызонту і нябеснага мерыдыяна, бліжэйшы да Паўднёвага полюса свету, называецца **пунктам поўдня**. Лінія, якая злучае пункты поўначы і поўдня, называецца **паўдзённая лініяй**. Яна ляжыць на плоскасці сапраўднага гарызонту. Па напрамку паўдзённой лініі падаюць цені ад прадметаў апоўдні.

З нябесным экватарам сапраўдны гарызонт таксама перасякаецца ў двух дыяметральна процілеглых пунктах — **пункце ўсходу** і **пункце за-**

хаду. Для назіральніка, які стаіць у цэнтры нябеснай сферы тварам да пункта поўначы, пункт усходу будзе размешчаны справа, а пункт захаду — злева. Памятаючы гэтыя правіла, лёгка арыентавацца на мясцовасці.

Бачныя гадавы шляхі Сонца сярод зорак называецца **экліптыкай**. У плоскасці экліптыкі ляжыць шлях Зямлі вакол Сонца, г. зн. яе арбіта. Яна нахілена да нябеснага экватара пад вуглом $23^{\circ}26'$ і перасякае яго ў пунктах вясенняга (Υ , каля 21 сакавіка) і асенняга (ϖ , каля 23 верасня) раўнадзенстваў (рыс. 13).



Галоўныя вывады

1. Сузор'е — участак неба з характэрнай назіраемай групай зорак і іншых астранамічных аб'ектаў, якія пастаянна знаходзяцца ў ім, вылучаны для зручнасці арыентавання і назірання зорак.
2. Шкала зорных велічынь, прапанаваная Гіпархам, дазваляе адрозніваць зоркі па іх бляску.
3. Назіраемы сутачны рух зорак з'яўляецца адлюстраваннем сапраўднага вярчэння Зямлі вакол сваёй восі.
4. Нябесная сфера — уяўная сфера адвольнага радыуса з цэнтрам у выбраным пункце прасторы.
5. Бачныя гадавы шляхі Сонца сярод зорак называецца экліптыкай.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што разумеюць пад сузор'ем?
2. Якім чынам сузор'і атрымалі свае назвы? Прывядзіце прыклады назваў сузор'яў.
3. Па якім прынцыпе будзеца шкала зорных велічынь Гіпарха? Што разумеюць пад зорнай велічынёй?
4. У чым заключаецца сутнасць сістэмы класіфікацыі зорак, прапанаванай І. Баерам?
5. Апішыце бачны сутачны рух зорак. Па якой прычыне адбываецца назіраемая з'ява сутачнага руху зорак?
6. Што разумеюць пад нябеснай сферай? Дайце азначэнні асноўным пунктам, лініям і плоскасцям нябеснай сферы.

§ 3. Нябесныя каардынаты

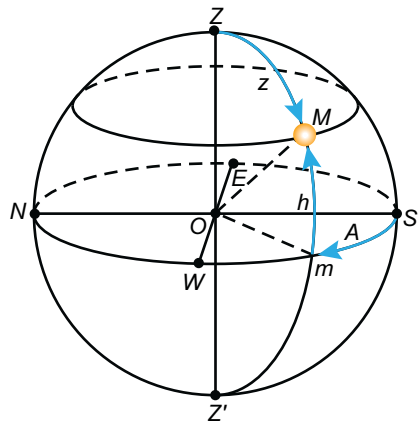
1. Сістэмы каардынат. Месцазнаходжанне свяцілаў вызначаецца адносна пунктаў і кругоў нябеснай сферы (гл. рыс. 12). Для гэтага ўведзены нябесныя каардынаты, падобныя да геаграфічных каардынат на паверхні Зямлі.

У астраноміі карыстаюцца некалькімі сістэмамі каардынат. Адрозніваюцца яны адна ад адной тым, што будуецца адносна розных кругоў нябеснай сферы. Нябесныя каардынаты адлічваюцца дугамі вялікіх кругоў або цэнтральнымі вугламі, якія ахопліваюць гэтыя дугі.

Нябесныя каардынаты — цэнтральныя вуглы або дугі вялікіх кругоў нябеснай сферы, з дапамогай якіх вызначаюць месцазнаходжанне свяцілаў адносна асноўных кругоў і пунктаў нябеснай сферы.

Гарызантальная сістэма каардынат. Пры астранамічных назіраннях месцазнаходжанне свяцілаў зручна вызначаць адносна гарызонту. Гарызантальная сістэма каардынат выкарыстоўвае ў якасці асноўнага круга сапраўдны гарызонт. У гэтай сістэме каардынатамі з'яўляюцца **вышыня** (h) і **азімут** (A).

Вышыня свяціла — вуглавая адлегласць свяціла M ад сапраўднага гарызонту, вымераная ўздоўж вертыкальнага круга (рыс. 14). Вышыня вызначаецца ў градусах, мінутах і секундах. Яна адлічваецца ў межах ад 0 да $+90^\circ$ да зеніту, калі свяціла знаходзіцца ў бачанай



Рыс. 14. Гарызантальная сістэма каардынат: h — вышыня свяціла M над гарызонтам; z — зенітная адлегласць; A — азімут

частцы нябеснай сферы, і ад 0 да -90° да надзіра, калі свяціла знаходзіцца пад гарызонтам.

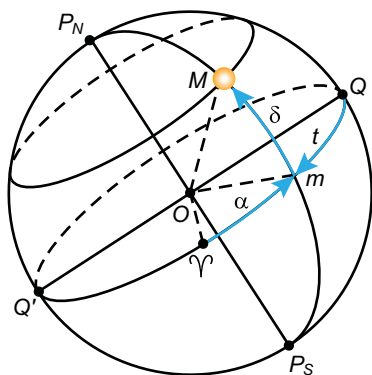
Для вымярэння азімутаў за пачатак адліку прымаецца пункт поўдня. **Азімут свяціла** — вуглавая адлегласць, вымераная ўздоўж сапраўднага гарызонту, ад пункта поўдня да пункта перасячэння гарызонту з вертыкальным кругам, які праходзіць праз свяціла M (гл. рыс. 14). Азімут адлічваецца на захад ад пункта поўдня ў межах ад 0 да 360° .

Гарызантальная сістэма каардынат выкарыстоўваецца пры тапаграфічнай здымцы, у навігацыі. З прычыны сутачнага вярчэння нябеснай сферы вышыня і азімут свяціла з цягам часу змяняюцца. Такім чынам, гарызантальныя каардынаты маюць пэўнае значэнне толькі для пэўнага моманту часу.

Вуглавая адлегласць ад зеніту да свяціла, вымераная ўздоўж вертыкальнага круга, называецца **зенітнай адлегласцю** (z) (гл. рыс. 14). Яна адлічваецца ў межах ад 0 да $+180^\circ$ да надзіра. Вышыня і зенітная адлегласць звязаны суадносінай $z + h = 90^\circ$.

Экватарыяльная сістэма каардынат. Для пабудовы зорных карт і складання зорных каталогаў за асноўны круг нябеснай сферы зручна прымаць круг нябеснага экватара (рыс. 15). Нябесныя каардынаты, у сістэме якіх асноўным кругам з'яўляецца нябесны экватар, называюцца экватарыяльнай сістэмай каардынат. У гэтай сістэме каардынатамі служаць **схіленне** (δ) і **прамое ўзыходжанне** (α).

Схіленне свяціла — вуглавая адлегласць свяціла M ад нябеснага экватара, вымераная ўздоўж круга схілення. Схіленне адлічваецца ў межах ад 0 да $+90^\circ$ да Паўночнага полюса свету і ад 0 да -90° да Паўднёвага полюса свету.



Рыс. 15. Экватарыяльная сістэма нябесных каардынат: δ — схіленне свяціла M ; α — прамое ўзыходжанне; t — гадзінны вугал

За пачатковы пункт адліку на нябесным экватары прымаецца пункт вясенняга раўнадзенства Υ , дзе Сонца бывае каля 21 сакавіка.

Прамое ўзыходжанне свяціла — вуглавая адлегласць, вымераная ўздоўж нябеснага экватара, ад пункта вясенняга раўнадзенства да пункта перасячэння нябеснага экватара з кругам схілення свяціла. Прамое ўзыходжанне адлічваецца ў бок, процілеглы сутачнаму вярчэнню нябеснай сферы, у межах ад 0 да 360° у градуснай меры або ад 0 да 24 г у гадзіннай меры.

Для некаторых астранамічных задач (звязаных з вымярэннем часу) замест прамого ўзыходжання (α) уведзіцца гадзінны вугал (t)

(гл. рыс. 15). **Гадзінны вугал** — гэта вуглавая адлегласць, вымераная ўздоўж нябеснага экватара, ад верхняга пункта нябеснага экватара да круга схілення свяціла. Адлічваецца гадзінны вугал па напрамку бачнага сутачнага вярчэння нябеснай сферы, г. зн. у бок захаду, у межах ад 0 да 24 г у гадзіннай меры.

Каардынаты зорак (α , δ) у экватарыяльнай сістэме каардынат не звязаны з сутачным рухам нябеснай сферы і змяняюцца вельмі павольна. Таму яны выкарыстоўваюцца для складання зорных карт і каталогаў. **Зорныя карты** ўяўляюць сабой праекцыі нябеснай сферы на плоскасць з нанесенымі на яе аб'ектамі ў пэўнай сістэме каардынат. Набор зорных карт сумежных участкаў неба, якія пакрываюць усё неба або некаторую яго частку, называецца **зорным атласам**. У спецыяльных спісах зорак, якія называюцца **зорнымі каталогамі**, прыводзяцца каардынаты іх месца на нябеснай сферы, зорная велічыня і іншыя параметры. Напрыклад, Каталог апорных зорак The Guide Star Catalog (GSC) змяшчае каля 20 млн аб'ектаў.

2. Месяцава-сонечная прэцэсія. Вось вярчэння Зямлі нахілена да плоскасці арбіты пад вуглом $66^{\circ}34'$. Пад уздзеяннем прыцяжэння Месяца і Сонца з-за неаднароднасці размеркавання шчыльнасці масы ўнутры Зямлі вось апісвае конус. Паколькі напрамак восі Зямлі змяняецца, то перпендыкулярная да яе плоскасць экватара таксама будзе зрушвацца, што прыводзіць да перамяшчэння пункта вясенняга раўнадзенства. Гэта з'ява называецца **месяцава-сонечнай прэцэсіяй**. Пункт вясенняга раўнадзенства перамяшчаецца насустрач бачнаму гадавому руху Сонца на $50,3''$ за год або на 1° за 71,6 года, выконваючы поўны абарот па экліптыцы за 25 765 гадоў. Полюсы свету таксама перамяшчаюцца сярод зорак. У цяперашні час Паўночны полюс свету знаходзіцца каля Палярнай зоркі, а праз 10 тыс. гадоў ён перамесціцца да Вегі (α Ліры).

3. Вышыня полюса свету над гарызонтам. Мы ўжо ведаем, што Палярная зорка, якая знаходзіцца паблізу ад Паўночнага полюса свету, застаецца амаль на адной вышыні над гарызонтам на дадзенай шыраце пры сутачным вярчэнні зорнага неба. Пры перамяшчэнні назіральніка з поўначы на поўдзень, дзе геаграфічная шырата меншая, Палярная зорка апускаецца да гарызонту, г. зн. існуе залежнасць паміж вышынёй полюса свету і геаграфічнай шыратой месца назірання.

На рысунку 16 зямны шар і нябесная сфера паказаны ў сячэнні плоскасцю нябеснага мерыдыяна месца назірання. Назіральнік з пункта O бачыць полюс свету на вышыні $\angle NOP = h_p$. Напрамак восі свету OP паралельны зямной восі. Вугал пры цэнтры Зямлі $\angle OO'q$ адпавядае геаграфічнай шыраце месца назірання ϕ . Паколькі радыус Зямлі ў пункце назірання перпендыкулярны



Галоўныя вывады

1. Для вызначэння месцазнаходжання нябесных цел на нябеснай сферы выкарыстоўваецца сістэма каардынат, аналагічная географічнай. На нябеснай сферы магчымы толькі вуглавая вымярэнні.
2. Вуглавая вышыня полюса свету над гарызонтам роўна географічнай шыраце месца назірання.
3. Усход і захад свяціла — з’явы перасячэння свяцілам гарызонту.
4. Зорныя карты — праекцыі нябеснай сферы на плоскасць з нанесенымі на яе аб’ектамі ў пэўнай сістэме каардынат. Іх наборы — зорныя атласы.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Якія сістэмы нябесных каардынат вам вядомы? У чым заключаецца прынцыповая розніца паміж рознымі сістэмамі нябесных каардынат?
2. Дайце апісанне гарызантальнай і экватарыяльнай сістэм каардынат. Якія каардынаты выкарыстоўваюцца ў гэтых сістэмах?
3. Чаму ў астраноміі выкарыстоўваюць розныя сістэмы каардынат?
4. Визначце вышыню полюса свету над гарызонтам у вашым населеным пункце.
5. Якія зоркі называюць узыходзячымі і заходзячымі, неўзыходзячымі і незаходзячымі?
6. Визначце схіленні зорак, даступных для назірання на шыраце вашага населенага пункта.

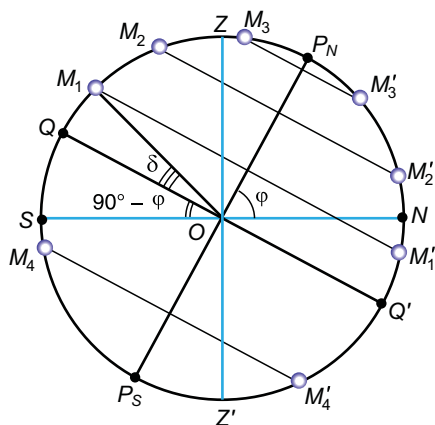
§ 4. Визначенне географічнай шыраты

1. Кульмінацыя свяцілаў. Пры сутачным вярчэнні вакол восі свету свяцілы двойчы за суткі перасякаюць нябесны мерыдыян. З’ява праходжання свяцілам нябеснага мерыдыяна называецца **кульмінацыяй**.

Адрозніваюць верхнюю і ніжнюю кульмінацыі. У **верхняй кульмінацыі** свяціла пры сутачным руху знаходзіцца ў найвышэйшым пункце над гарызонтам, найбліжэйшым да зеніту. **Ніжняй кульмінацыя** адбываецца праз палову сутак пасля верхняй кульмінацыі.

Пункт перасячэння сутачнай паралелі свяціла з усходняй часткай сапраўднага гарызонту называецца **пунктам усходу свяціла**, а пункт перасячэння з заходняй часткай сапраўднага гарызонту — **пунктам захаду свяціла**.

Для Сонца і Месяца, якія маюць прыкметныя бачныя памеры, усходам (або захадам) лічыцца момант з’яўлення (або знікнення) на гарызонце верхняга пункта краю дыска.



Рыс. 17. Кульмінацыя свяцілаў

Незаходзячыя зоркі (рыс. 17) бачны ў верхняй (M_2, M_3) і ніжняй (M'_2, M'_3) кульмінацыях. Для ўзыходзячых і заходзячых зорак ніжняя кульмінацыя (M'_1) адбываецца пад гарызонтам. У неўзыходзячых зорак абедзве кульмінацыі M_4 і M'_4 нябачныя, г. зн. адбываюцца пад гарызонтам.

Знойдем вышыні зорак у верхняй і ніжняй кульмінацыях.

Паколькі кульмінацыя свяцілаў адбываецца пры перасячэнні нябеснага мерыдыяна, плоскасць рысунка 17 супадае з плоскасцю нябеснага мерыдыяна. Сутачныя шляхі зорак паказаны адрэзкамі, паралельнымі нябеснаму экватару QQ' . Няхай зорка знаходзіцца

ў верхняй кульмінацыі M_1 . Вышыня полюса свету роўна геаграфічнай шыраце φ . З рысунка вынікае, што $\angle SOQ$ роўны $(90^\circ - \varphi)$ і ўяўляе сабой нахіл нябеснага экватара да плоскасці гарызонту. Дуга SM_1 (або $\angle SOM_1$) — гэта вышыня свяціла над гарызонтам. Гэта дуга складаецца з дзвюх дуг: $SM_1 = SQ + QM_1$. Як бачна з рысунка, дуга SQ роўна $(90^\circ - \varphi)$, а дуга QM_1 вызначаецца велічынёй схілення δ . Атрымаем формулу для вызначэння вышыні зоркі ў яе верхняй кульмінацыі:

$$h_{\text{в}} = (90^\circ - \varphi) + \delta. \quad (1)$$

Для незаходзячай зоркі ніжняя кульмінацыя M'_2 вымяраецца дугой NM'_2 або адпаведным цэнтральным вуглом ($\angle NOM'_2$). Гэты вугал, як вынікае з рысунка, роўны рознасці δ — схілення свяціла і велічыні $(90^\circ - \varphi)$ — нахілу нябеснага экватара да плоскасці гарызонту. Значыць, вышыня зоркі ў ніжняй кульмінацыі роўна:

$$h_{\text{н}} = \delta - (90^\circ - \varphi). \quad (2)$$

Калі абедзве кульмінацыі незаходзячай зоркі знаходзяцца з аднаго боку ад зеніту (напрыклад, M_3 і M'_3), то яе верхняя кульмінацыя вызначаецца з суадносіны: $h_{\text{в}} = 180^\circ - [(90^\circ - \varphi) + \delta]$, або пасля спрашчэння:

$$h_{\text{в}} = 90^\circ + \varphi - \delta. \quad (3)$$

Суадносіны (1—3) звязваюць геаграфічную шырату з вышынёй і схіленнем зорак падчас іх кульмінацыі. Адзначым, што на рысунку 17 азімуты зорак

у верхній кульмінації M_1 і M_2 роўны 0° , а азимуты зорак у ніжняй кульмінації M'_1 і M'_2 роўны 180° . Азимуты зоркі M_3 у верхняй і ніжняй кульмінаціях роўны 180° .

2. Визначення географічної широти па астранамічных назіраннях.

Пры састаўленні географічных і тапаграфічных карт, пракладванні дарог і магістралей, разведванні радовішчаў карысных выкапняў і ў шэрагу іншых выпадкаў неабходна ведаць географічныя каардынаты мясцовасці. Гэту задачу можна рашыць з дапамогай астранамічных назіранняў. Разгледзім найбольш простыя спосабы.

Першы спосаб. Визначыць географічную ширату можна зыходзячы з назіранняў Палярнай зоркі. Калі лічыць, што Палярная зорка паказвае Паўночны полюс свету, то набліжана вышыня Палярнай зоркі над гарызонтам дае нам географічную ширату месца назірання. Калі вымераць вышыню Палярнай зоркі ў верхняй і ніжняй кульмінаціях, то атрымаецца больш дакладнае значэнне шираты месца назірання:

$$\varphi = \frac{h_{\text{в}} + h_{\text{н}}}{2}. \quad (4)$$

Гэта роўнасць атрымана з роўнасцей (2) і (3). Формула (4) прыдатная для ўсіх незаходзячых зорак, у якіх верхняя і ніжняя кульмінацыі знаходзяцца з аднаго боку ад зеніту.

Другі спосаб. Визначыць географічную ширату можна зыходзячы з назіранняў верхняй кульмінацыі зорак. З роўнасцей (1) і (3) атрымваем, што

$$\varphi = \delta \pm (90^\circ - h_{\text{в}}). \quad (5)$$

Знак «+» ставіцца, калі зорка кульмінуе на поўдзень ад зеніту, а знак «−» — пры кульмінацыі зоркі на поўнач ад зеніту. Калі зорка праходзіць праз зеніт, то $\varphi = \delta$.



Галоўныя вывады

1. Кульмінацыя — гэта з'ява праходжання свяціла праз нябесны мерыдыян.
2. Географічную ширату можна вызначыць зыходзячы з назіранняў як Палярнай зоркі, так і верхняй кульмінацыі зорак.
3. Схіленне зоркі, якая праходзіць праз зеніт, роўна шыраце месца назірання.



Кантрольныя пытанні і заданні

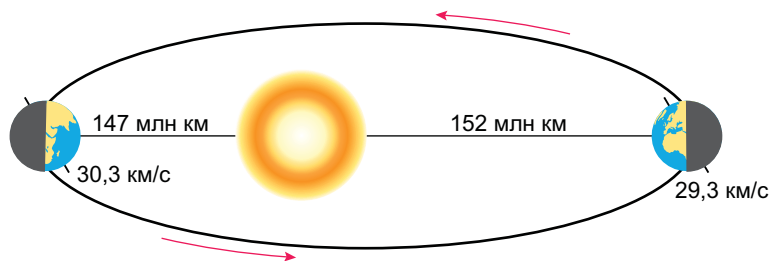
1. Што такое кульмінацыя свяціла?
2. Якія пункты называюцца пунктамі ўсходу і захаду свяціла?
3. Як змяняюцца пры сутачным руху свяціла яго вышыня, прамое ўзыходжанне, схіленне?
4. Як можна набліжана вызначыць геаграфічную шырату месца, назіраючы за Палярнай зоркай?
5. Знайдзіце інтэрвал схіленняў зорак, якія на дадзенай шыраце:
 - а) ніколі не ўзыходзяць;
 - б) ніколі не заходзяць;
 - в) могуць узыходзіць і заходзіць.
6. Вызначце геаграфічную шырату месца назірання, калі зорка Вега праходзіць праз пункт зеніту.
7. Вышыня Сонца ў моманты верхняй і ніжняй кульмінацыі адпаведна роўна 37° і 10° . Вызначце геаграфічную шырату месца назірання, схіленне Сонца і дату назірання.

§ 5. Вымярэнне часу. Вызначэнне геаграфічнай даўгаты

1. Вымярэнне часу. Усё наша жыццё звязана з часам і рэгулюецца перыядычнай зменай дня і ночы, фаз Месяца, а таксама пор года. На гэтых прыродных паўторных з'явах грунтуецца асноўныя адзінкі вымярэння часу — суткі, месяц, год. Шырока выкарыстоўваемая адзінка для вымярэння часу — суткі — звязана з перыядам вярчэння Зямлі вакол сваёй восі.

Момант верхняй кульмінацыі цэнтра Сонца называецца **сапраўдным поўднем**, момант ніжняй кульмінацыі — **сапраўдны поўначчу**. Прамежак часу паміж дзвюма паслядоўнымі аднайменнымі кульмінацыямі цэнтра Сонца называецца **сапраўднымі сонечнымі суткамі**. Час, што прайшоў ад моманту ніжняй кульмінацыі цэнтра сонечнага дыска да любога іншага яго месцазнаходжання на адным і тым жа геаграфічным мерыдыяне, называецца **сапраўдным сонечным часам** ($T_\odot$).

Неабходна адзначыць, што сапраўдныя сонечныя суткі перыядычна змяняюць сваю працягласць. Гэта выклікаецца дзвюма прычынамі: па-першае, нахілам плоскасці экліптыкі да плоскасці нябеснага экватара, па-другое, эліптычнай формай арбіты Зямлі. Калі Зямля знаходзіцца на ўчастку эліпса, найбліжэйшым да Сонца (на рысунку 18 гэтае месцазнаходжанне паказана злева), то яна рухаецца хутчэй. Праз паўгода Зямля будзе ў процілеглай частцы эліпса і будзе рухацца па арбіце больш павольна. Нераўнамерны рух Зямлі па сваёй арбіце



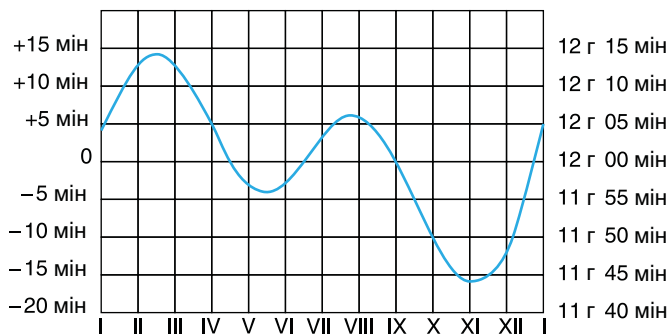
Рыс. 18. Прычыны змянення працягласці сапраўдных сонечных сутак

выклікае нераўнамернае бачнае перамяшчэнне Сонца па нябеснай сферы, г. зн. у розныя поры года Сонца перамяшчаецца з рознай скорасцю. Таму працягласць сапраўдных сонечных сутак бесперапынна змяняецца і карыстацца імі ў якасці адзінкі вымярэння часу нязручна. З гэтай прычыны ў штодзённым жыцці карыстаюцца не сапраўднымі, а сярэднімі сонечнымі суткамі, працягласць якіх прынята пастаяннай. Задаюцца яны рухам **сярэдняга экватарыяльнага Сонца** — уяўнага пункта, які рухаецца раўнамерна па нябесным экватары і ў пунктах вясенняга і асенняга раўнадзенстваў супадае з цэнтрам сапраўднага Сонца. Верхнюю кульмінацыю сярэдняга экватарыяльнага Сонца называюць **сярэднім поўднем**, а прамежак часу паміж двума паслядоўнымі сярэднімі поўднямі — **сярэднімі сонечнымі суткамі**. Працягласць іх заўсёды аднолькавая. Сярэднія сонечныя суткі дзеляць на 24 гадзіны. Кожная гадзіна сярэдняга сонечнага часу ў сваю чаргу падзяляецца на 60 мінут, а кожная хвіліна — на 60 секунд. За пачатак сярэдніх сонечных сутак прымаецца **сярэдня поўнач**, г. зн. момант ніжняй кульмінацыі сярэдняга экватарыяльнага Сонца. Час, які прайшоў ад моманту ніжняй кульмінацыі сярэдняга экватарыяльнага Сонца да любога іншага яго месцазнаходжання на адным і тым жа геаграфічным мерыдыяне, называецца **сярэднім сонечным часам** ($T_{\text{сяр}}$).

Рознасць паміж сярэднім сонечным часам і сапраўдным сонечным часам у адзін і той жа момант называецца **ўраўненнем часу**. Яно абазначаецца грэчаскай літарай η . Можна запісаць наступную роўнасць:

$$\eta = T_{\text{сяр}} - T_{\odot}.$$

Значэнне ўраўнення часу η звычайна прыводзіцца ў астранамічных календарых. Прыблізна яго можна вызначыць пры дапамозе графіка (рыс. 19 на с. 28), з якога таксама вынікае, што чатыры разы за год значэнне гэтага ўраўнення роўна нулю. Гэта бывае прыкладна 14 красавіка, 14 чэрвеня, 2 верасня і 24 снежня. Найбольшае значэнне ўраўнення часу η прымае каля 14 лютага ($\eta = +14$ мін) і 3 лістапада ($\eta = -16$ мін).



Рыс. 19. Графік ураўнення часу

Адрозніваюць таксама **зорныя суткі** (каля 23 г 56 мін 4 с). Зорныя суткі роўны прамежку часу паміж дзвюма паслядоўнымі аднайменнымі кульмінацыямі пункта вясенняга раўнадзенства. Момент верхняй кульмінацыі гэтага пункта, прыняты за пачатак адліку зорных сутак, лічыцца нулём гадзін зорнага часу. Час, які прайшоў ад моманту верхняй кульмінацыі пункта вясенняга раўнадзенства да любога іншага яго месцазнаходжання на гэтым жа геаграфічным мерыдыяне, называецца **зорным часам**.

2. Вызначэнне геаграфічнай даўгаты. Вымярэнне часу сонечнымі суткамі звязана з геаграфічным мерыдыянам. Час, вымераны на дадзеным мерыдыяне, называецца **мясцовым часам дадзенага мерыдыяна**. Ён аднолькавы для ўсіх пунктаў, што знаходзяцца на гэтым мерыдыяне. Кульмінацыя любога пункта нябеснай сферы адбываецца ў розны час на розных мерыдыянах зямнога шара. Пры гэтым чым больш на ўсход размешчаны зямны мерыдыян, тым раней у пунктах, што ляжаць на ім, адбываецца кульмінацыя ці пачынаюцца суткі. Паколькі Зямля кожную гадзіну паварочваецца на 15° , рознасць часу двух месцаў у 1 гадзіну адпавядае рознасці даўгот у 15° (у гадзіннай меры 1 гадзіна). Адсюль можна зрабіць вывад: рознасць мясцовага часу двух пунктаў на Зямлі лікава роўна рознасці значэнняў даўгаты, выражаных у гадзіннай меры. Для пунктаў зямной паверхні, размешчаных на геаграфічных даўготах λ_1 і λ_2 , атрымаем:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (1)$$

За пачатковы (нулявы) мерыдыян для адліку геаграфічнай даўгаты прыняты мерыдыян, што праходзіць праз Грынвіцкую абсерваторыю каля Лондана. Мясцовы сярэдні сонечны час Грынвіцкага мерыдыяна называецца **сусветным часам**.

Усе сігналы дакладнага часу супадаюць па мінутах і секундах з сусветным часам. У астранамічных календарых і штогодніках моманты большасці з'яў прыводзяцца менавіта па сусветным часе. Моманты гэтых з'яў па мясцовым часе якога-небудзь пункта лёгка вызначыць, калі вядома даўгата гэтага пункта, адлічаная ад Грынвіча.

Калі ў дадзены момант на Грынвіцкім мерыдыяне сусветны час будзе T_0 , то ў мясцовасці з геаграфічнай даўгатай λ будзе T_λ . Адапаведна формула (1) пры $\lambda_0 = 0$ набывае выгляд:

$$\lambda = T_\lambda - T_0. \quad (2)$$

Дадзеная формула дазваляе вылічваць геаграфічную даўгату па сусветным часе (T_0) і па мясцовым часе (T_λ), які вызначаецца з астранамічных назіранняў.

З іншага боку, па вядомых даўгаце месца назірання (λ) і сусветным часе (T_0) можна вылічыць мясцовы час (T_λ):

$$T_\lambda = T_0 + \lambda.$$

Адрозненне паміж мясцовым часам населеных пунктаў, размешчаных нават не вельмі далёка адзін ад аднаго, стварае нязручнасці ў штодзённым жыцці. Напрыклад, мясцовы час у Брэсце і Віцебску адрозніваецца на 26 мін. Жыхары гэтых гарадоў пры паездцы ў госці адзін да аднаго павінны былі б пастаянна пераводзіць стрэлкі гадзіннікаў. Адсюль узнікла неабходнасць увядзення **паяс-ной сістэмы** лічэння сярэдняга сонечнага часу. Паводле гэтай сістэмы ўвесь зямны шар падзелены на 24 гадзінныя паясы, кожны з якіх мае працягласць па даўгаце 15° (або 1 г). Гадзінны пояс Грынвіцкага мерыдыяна лічыцца нулявым. Астатнім паясам у напрамку ад нулявога на ўсход нададзены нумары ад 1 да 23. Ва ўсіх пунктах у межах аднаго паяса ў кожны момант паясны час аднолькавы. У суседніх паясах ён адрозніваецца роўна на адну гадзіну. Межы паясоў у маланаселеных месцах, на морах і акіянах праходзяць па мерыдыянах, якія знаходзяцца на адлегласці $7,5^\circ$ на ўсход і на захад ад цэнтральнага мерыдыяна дадзенага гадзіннага паяса. У астатніх раёнах для большай зручнасці межы паясоў праходзяць па дзяржаўных і адміністрацыйных граніцах, горных хрыбтах, рэках і іншых натуральных межах.

Калі ведаць сусветны час (T_0) і нумар паяса дадзенага месца (n), можна вылічыць паясны час:

$$T_n = T_0 + n. \quad (3)$$

Калі з формул (1) і (3) выключыць T_0 , то атрымаецца суадносіна, якая дазваляе вызначаць геаграфічную даўгату па паясным часе (T_n) і часе для мясцовасці з геаграфічнай даўгатай λ (T_λ):

$$\lambda = T_\lambda - T_n + n. \quad (4)$$

У мэтах эканоміі і рацыянальнага выкарыстання электраэнергіі на працягу сутак на летні перыяд у некаторых краінах вясной стрэлкі гадзіннікаў пераводзяць на гадзіну наперад — уводзяць **летні час**, а восенню — на гадзіну назад.

Існуе мяжа, якая адкрывае новую дату і дзень тыдня. Міжнародная **лінія змены дат** праходзіць праз Берынгаў праліў паміж астравамі Ціхага акіяна ад Паўночнага полюса да Паўднёвага полюса (мерыдыян 180°).

Найбольш надзейным і дакладным часам лічыцца **атамны час**, які быў уведзены Міжнародным камітэтам мер і вагаў у 1964 г. За эталон прыняты атамны (квантавы) гадзіннік. Па такім гадзінніку секунда — гэта прамежак часу, за які адбываецца 9 192 631 770 ваганняў электрамагнітнай хвалі, што выпраменьваецца атамам цэзію-133. З 1 студзеня 1972 г. усе краіны зямнога шара вядуць адлік часу па атамным гадзінніку.

Атамны час вельмі зручны для даследавання Зямлі, паколькі з яго дапамогай можна вывучаць нераўнамернасці ў вярчэнні нашай планеты. Памылка ходу атамнага гадзінніка невялікая — прыкладна 1 с за 300 млн гадоў.

3. Каляндар. Каляндар — гэта сістэма лічэння працяглых прамежкаў часу, у аснове якой ляжаць перыядычныя астранамічныя з'явы: вярчэнне Зямлі вакол сваёй восі, змены фаз Месяца, абарачэнне Зямлі вакол Сонца. Любая каляндарная сістэма абапіраецца на тры асноўныя адзінкі вымярэння часу: сярэднія сонечныя суткі, сінадычны (або месяцавы) месяц і трапічны (або сонечны) год.

Сінадычны месяц — гэта прамежак часу паміж дзвюма паслядоўнымі аднолькавымі фазамі Месяца. Ён роўны ў сярэднім 29,5306 сутак.

Трапічны год — прамежак часу паміж двума паслядоўнымі праходжаннямі цэнтра Сонца праз пункт вясенняга раўнадзенства. Ён роўны 365,2422 сутак. З-за павольнага руху пункта вясенняга раўнадзенства насустрач Сонцу, выкліканага прэцэсіяй, Сонца аказваецца ў тым самым пункце неба адносна зорак праз прамежак часу, на 20 мін 28 с большы за трапічны год. Ён называецца **зорным годам** і змяшчае 365,2564 сярэдніх сонечных сутак.

Сінадычны месяц і трапічны год не маюць цэлага ліку сярэдніх сонечных сутак, таму немагчыма падабраць такі цэлы лік трапічных гадоў, у якіх змяшчаўся б цэлы лік сінадычных месяцаў і цэлы лік сярэдніх сонечных сутак. Імкненне ўзгадніць паміж сабой суткі, месяц і год прывяло да таго, што ў розных эпохі ў розных народаў было створана мноства розных календароў, якія можна ўмоўна



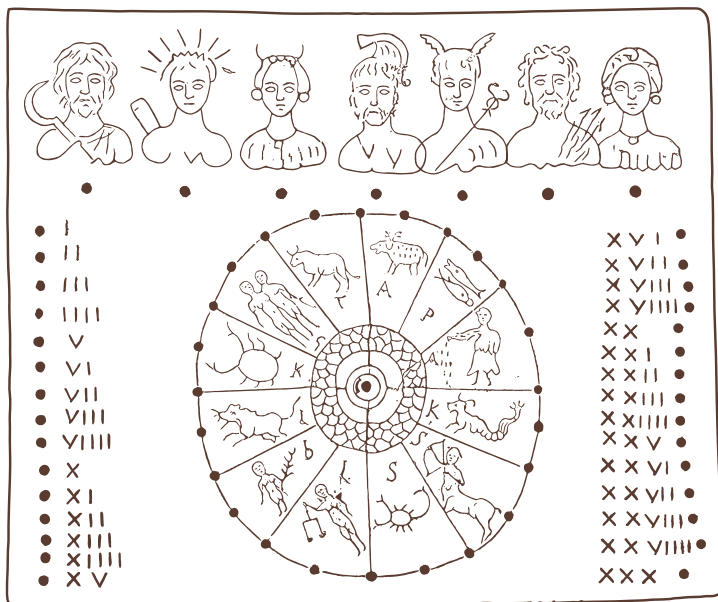
Рис. 20. Антыкітэрскі механізм
(фрагмент, знойдзены археолагамі, і адноўленая на яго аснове мадэль)

падзяліць на тры тыпы: месяцавыя, месяцава-сонечныя і сонечныя. На рысунку 20 паказана механічнае прыстасаванне, створанае старажытнагрэчаскімі астраномамі ў II ст. да н. э. для разліку руху Месяца, Сонца і планет у каляндарных мэтах.

У **месяцавым календары** год падзяляецца на 12 месяцаў, якія маюць папераменна 30 або 29 сутак. Усяго месяцавы каляндар мае 354 або 355 сярэдніх сонечных сутак, г. зн. ён карацейшы за сонечны год прыкладна на 10 сутак. Гэты каляндар распаўсюджаны ў краінах Бліжняга Ўсходу і прыняты ў сучасным ісламскім свеце. З-за таго што месяцавы год мае менш сутак, чым трапічны, у мусульман пачатак года пастаянна зрушваецца па сезонах і прыпадае то на вясну, то на зіму, то на лета, то на восень.

Месяцава-сонечныя календары найбольш складаныя. У іх сума пэўнай колькасці месяцавых месяцаў прыблізна адпавядае працягласці трапічнага года. Гэтыя календары грунтуюцца на наступнай суадносіне: працягласць 19 сонечных гадоў роўна працягласці 235 месяцавых месяцаў (з хібнасцю каля 2 гадзін). Год падзяляецца на 12 месяцаў, кожны з якіх пачынаецца з маладзіка. У наш час такая сістэма захавалася ў яўрэйскім календары. Ён змяшчае 12 або 13 месяцаў у годзе. Працягласць некаторых месяцаў кожны год змяняецца, пачатак года заўсёды прыпадае на восень, але не супадае з адной і той жа датай грыгарыянскага календара.

Рымляне спачатку лічылі час месяцавымі гадамі. Новы год пачынаўся 1 сакавіка. Да гэтага часу некаторыя месяцы сучаснага календара ў многіх еўрапейскіх мовах называюцца ў адпаведнасці з гэтай традыцыяй: верасень — сентябрь (рус.) — September (англ.) — «сёмы», снежань — декабрь (рус.) — December (англ.) —



Рыс. 21. Старажытнарымскі календар

«дзясяты» і г. д. Пазней першы дзень года быў перанесены на 1 студзеня, таму што са 153 г. да н. э. у гэты дзень займалі пасаду консулы (рыс. 21).

Адным з першых **сонечных календароў** лічыцца егіпецкі, створаны ў 4-м тысячагоддзі да н. э. Паводле гэтага календара год меў 12 месяцаў, па 30 дзён кожны, а ў канцы года дадавалася яшчэ 5 святачных дзён.

Сучасны календар бярэ пачатак ад сонечнага рымскага календара, які з'явіўся ў выніку рэформы Юлія Цэзара (адсюль яго назва — **юліянскі календар**), праведзенай 1 студзеня 45 г. да н. э. Сярэдняя працягласць года паводле гэтага календара была роўна 365,25 сутак, што адпавядала вядомай у тыя часы працягласці трапічнага года. Для зручнасці тры гады запар адлічвалі па 365 дзён, а на чацвёрты (высакосны) дадавалі лішаквыя суткі — 366 дзён. Год падзяляўся на 12 месяцаў: няцотныя месяцы мелі 31 дзень, цотныя — 30 дзён; толькі люты простага (невысакоснага) года меў 28 дзён.

З-за таго што юліянскі год даўжэйшы за трапічны на 11 мін 15 с, за 128 гадоў набягала хібнасць на цэлыя суткі, а за 400 гадоў — каля 3 сутак. З цягам часу календар спазняўся ўсё больш і больш. Таму ў канцы XVI ст. вясенняе раўнадзенства адбылося не 21, а 11 сакавіка. Хібнасць была выпраўлена ў 1582 г., калі кіраўнік каталіцкай царквы папа Грыгорый XIII стварыў спецыяльную камісію па рэформе календара, якая перанесла лічэнне дзён на 10 дзён уперад і вярнула вясенняе раўнадзенства на 21 сакавіка. Выпраўлены календар атрымаў назву



Рис. 22. Медаль, выпушчаны ў гонар увядзення грыгарыянскага календара

грыгарыянскага календара ці **календара новага стылю**. У гонар яго ўвядзення быў адчаканены памятны медаль (рис. 22). Сістэму адліку часу па юліянскім календары зараз называюць **старым стылем**.

Высакосны год у грыгарыянскім календары — кожны чацвёрты, за выключэннем гадоў з цэлым лікам стагоддзяў (напрыклад, 1700, 1800). Такі год лічыцца высакосным толькі тады, калі лік стагоддзяў дзеліцца на 4 без астачы.

У Расіі гэты каляндар быў уведзены з серады 31 студзеня 1918 г. Наступны дзень быў ужо 14 лютага, бо на той час каляндарная хібнасць паміж новым і старым стылямі дасягнула 13 дзён. Такое адрозненне ў 13 дзён захаваецца да 15 лютага 2100 г. па старым стылі, ці да 28 лютага 2100 г. па новым стылі. Пасля гэтай даты яно павялічыцца на адзін дзень і будзе роўным 14 суткам.

Грыгарыянскі каляндарны год даўжэйшы за сонечны на 26 с. Лішкаявыя суткі набягуць толькі ў Л. ст. н. э., паколькі розніца ў адзін дзень набягае за 3280 гадоў.

Неабходна адзначыць, што грыгарыянскі каляндар таксама не пазбаўлены недахопаў: неаднолькавая працягласць месяцаў, няроўнасць кварталаў, няўзгодненасць дат месяцаў з днямі тыдня.

Шмат пытанняў выклікаюць і прывычныя назвы месяцаў. Так, у многіх еўрапейскіх мовах ліпень (июль (рус.), July (англ.)) названы ў памяць аб рымскім правіцеле Юліі Цэзары, жнівень (август (рус.), August (англ.)) — у гонар рымскага імператара Актавіяна Аўгуста. Астатнія месяцы календара атрымалі свае назвы па-рознаму: напрыклад, студзень (январь (рус.), January (англ.)) — у гонар рымскага бога Януса, люты (февраль (рус.), February (англ.)) — у гонар паганскіх абрадаў ачышчэння, якія адбываліся кожны год, сакавік (март (рус.), March (англ.)) — па імені бога Марса, травень (май (рус.), May (англ.)) — багіні Майі, чэрвень (июнь (рус.), June (англ.)) — багіні Юноны. Назвы месяцаў з верасня па студзень — «сентябрь», «октябрь», «ноябрь», «декабрь» —

перакладаюцца з лацінскай мовы адпаведна як «сёмы», «восьмы», «дзявяты», «дзясяты» і ў цяперашні час не адпавядаюць гэтай нумарацыі.

Акрамя лічэння месяцаў у гадах, неабходна лічыць і самі гады. Для гэтага са старажытнасці выкарыстоўваліся эры, г. зн. працяглыя прамежкі лічэння гадоў. **Эрай** называецца зыходны пункт кожнага летазлічэння. У розных народаў эры былі розныя і звязваліся з якімі-небудзь знамянальнымі падзеямі або з гадамі кіравання цароў і імператараў.

Так, у Рыме выкарыстоўвалася эра ад заснавання Рыма (753 г. да н. э.) і лічэнне гадоў ад назначэння консулаў. У сярэдневяковай Еўропе была распаўсюджана эра Дыяклетыяна, якая адлічвалася ад уступлення на прастол імператара Дыяклетыяна (29 жніўня 284 г. н. э.). Яна існавала да XV ст. У старажытнай Грэцыі прымянялася эра Алімпіяд (пачатак 776 г. да н. э.). Алімпіяды праводзіліся раз у чатыры гады. Іудзеі адлічваюць пачатак эры ад стварэння свету — ад 3761 г. да н. э.

Хрысціяне выкарыстоўвалі эру ад стварэння свету, прымаючы пачатак у 5508 г. да н. э. Эру ад Нараджэння Хрыстова разлічыў папскі архіварыус Дыянісій Малы ў 525 г. Ён прыраўнаваў 248 г. эры Дыяклетыяна да 532 г. ад нараджэння Хрыста. Эра ад Нараджэння Хрыстова, або новая эра (**наша эра**), часткова пачала прымяняцца з X ст., а паўсюдна ў каталіцкіх краінах — толькі з XV ст. У Расіі яна была ўведзена ў 1700 г. указам Пятра I, згодна з якім пасля 31 снежня 7208 г. ад стварэння свету настала 1 студзеня 1700 г.

Мусульмане ўсяго свету выкарыстоўваюць сваю эру, якая называецца хіджра і вядзе адлік гадоў ад даты перасялення прарока Мухамеда з Мекі ў Медину, што адбылося ў верасні 622 г. н. э.



Галоўныя вывады

1. Прамежак часу паміж дзвюма паслядоўнымі аднайменнымі кульмінацыямі цэнтра сонечнага дыска на адным і тым жа геаграфічным мерыдыяне называецца сапраўднымі сонечнымі суткамі.
2. З-за рознай працягласці сапраўдных сонечных сутак у паўсядзённым жыцці карыстаюцца сярэднімі сонечнымі суткамі, якія маюць пастаянную працягласць.
3. Зорныя суткі — прамежак часу паміж дзвюма паслядоўнымі аднайменнымі кульмінацыямі пункта вясенняга раўнадзенства на адным і тым жа геаграфічным мерыдыяне.
4. Геаграфічная даўгата дадзенай мясцовасці вызначаецца рознасцю паміж мясцовым і сусветным часам.
5. Календар — гэта сістэма лічэння працяглых прамежкаў часу, у аснове якой ляжаць перыядычныя астранамічныя з'явы. Мы жывём па грыгарыянскім календары.

**Кантрольныя пытанні і заданні**

1. Чым адрозніваюцца сапраўдныя сонечныя суткі ад сярэдніх сонечных сутак?
2. Што называюць зорнымі суткамі?
3. Што разумеюць пад ураўненнем часу?
4. Што разумеюць пад сусветным часам?
5. Што разумеюць пад лініяй змены дат? Дзе яна праходзіць?
6. Назавіце каляндарныя сістэмы. На якіх прынцыпах яны будуцца?
7. У чым заключаецца адрозненне грыгарыянскага календара ад юліянскага?
8. Чаму немагчыма стварыць абсалютна дакладны каляндар?
9. Знайдзіце розніцу ў мясцовым часе для гарадоў Гродна і Магілёў.
10. У мясцовы поўдзень капітан карабля адзначыў 14 г 13 мін 46 с па хранометры, які ішоў па Грынвічкім часе. Вызначце геаграфічную даўгату карабля.
11. 22 чэрвеня назіральнік вызначыў, што сярэдні мясцовы поўдзень наступіў у 8 г 40 мін сусветнага часу, а вышыня Сонца ў гэты момант была роўна $62^{\circ}10'$. Схіленне Сонца ў гэты дзень $\delta = +23^{\circ}26'$. Вызначце геаграфічныя каардынаты назіральніка.

Раздзел III

Рух нябесных цел

§ 6. Геліяцэнтрычная сістэма свету Каперніка

1. Бачны рух планет. У старажытнасці простым вокам назіраліся 5 яркіх свяцілаў, якія пастаянна перамяшчаліся адносна нерухомых зорак сузор'яў. Старажытныя грэкі назвалі гэтыя свяцілы планетамі (ад грэч. $\pi\lambda\alpha\nu\eta\varsigma$ — вандроўнік) і далі ім уласныя імёны: Меркурый, Венера, Марс, Юпітэр і Сатурн.

Планеты заўсёды размяшчаюцца на небе недалёка ад экліптыкі, але ў адрозненне ад Сонца і Месяца час ад часу мяняюць напрамак свайго руху. Яны перамяшчаюцца паміж зоркамі ў асноўным з захаду на ўсход (як Сонца і Месяца), здзяйсняючы **прамы рух**. Аднак у пэўны час рух планеты запавольваецца, і яна пачынае рухацца з усходу на захад, здзяйсняючы **адваротны рух**. Затым аднаўляецца прамы рух. Зыходзячы з гэтага бачны шлях кожнай планеты на небасхіле — складаная лінія з зігзагамі і петлямі. Гэта траекторыя да таго ж змяняецца ад цыкла да цыкла, на працягу якога планета вяртаецца прыкладна на адно і тое ж месца сярод зорак (рыс. 23).



Рыс. 23. Бачны петлепадобны рух Марса.
Састаўная фатаграфія, атрыманая на працягу некалькіх месяцаў

2. Сістэма свету Пталемея. Найбольш раннія з вядомых спроб пабудовы сістэмы свету належаць старажытным грэкам — Анаксімандру, Эмпедоклу, Еўдоксу і інш.

У II ст. н. э. Клаўдзій Пталемей, выкарыстаўшы назіранні і ідэі сваіх папярэднікаў, а таксама ўласныя, распрацаваў **геацэнтрычную сістэму свету**, якая дазваляла вылічваць месцазнаходжанні планет адносна зорак на будучы час і прадказваць наступленне сонечных і месяцавых зацьменняў. Пталемей стварыў мадэль, выкарыстаўшы агульнапрынятую ў антычнасці ідэю аб тым, што свяцілы рухаюцца вакол нерухомай Зямлі, якая з'яўляецца цэнтрам сусвету і мае шарападобную форму.

Для тлумачэння складанага петлепадобнага руху планет Пталемей увёў камбінацыю двух раўнамерных кругавых рухаў: рух самой планеты па малой акружнасці (эпіцыкл) і абарачэнне цэнтра гэтай акружнасці вакол Зямлі (дэферэнт). Пры камбінацыі двух кругавых рухаў атрымлівалася эпіцыклоіда, па якой рухалася планета *P* (рыс. 24).

З назапашваннем назіранняў руху планет тэорыя Пталемея ўсё больш ускладнялася (уводзіліся дадатковыя кругі з рознымі радыусамі, нахіламі, скарасцямі і г. д.), што ў хуткім часе зрабіла яе занадта грувасткай і нязручнай.

3. Сістэма свету Каперніка. У XVI ст. польскі вучоны Мікалай Капернік адкінуў дагматычнае ўяўленне аб нерухомасці Зямлі і паставіў яе ў шэраг радавых планет. Капернік паказаў, што Зямля займае трэцяе месца ад Сонца і гэтак жа, як і іншыя планеты, рухаецца ў прасторы вакол Сонца і адначасова паварочваецца вакол сваёй восі. **Геліяцэнтрычная сістэма свету** Каперніка вельмі проста тлумачыла петлепадобны рух планет. На рысунку 25 (гл. с. 38) паказаны рух Марса на нябеснай сферы, які назіраецца з Зямлі. Аднолькавымі лічбамі пазначаны месцазнаходжанні Марса, Зямлі і пунктаў траекторыі Марса на небасхіле ў адны і тыя ж моманты часу.

Геацэнтрычная сістэма Пталемея не дазваляла вымяраць адлегласці да планет. Геліяцэнтрычная сістэма Каперніка ўпершыню дала магчымасць вылічыць прапорцыі Сонечнай сістэмы пры выкарыстанні радыуса зямной арбіты як астранамічнай адзінкі даўжыні.

Галоўная навуковая праца Каперніка «Аб абарачэннях нябесных сфер», на напісанне шасці кніг якой пайшло больш за 20 гадоў, была апублікавана

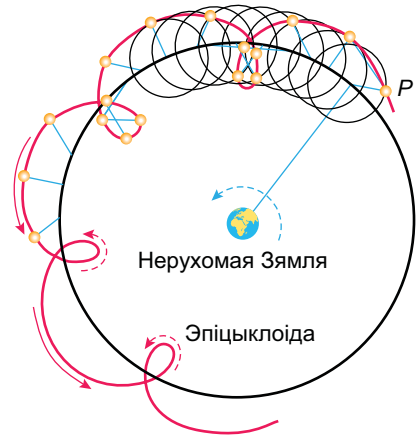


Рис. 24. Траектория планеты по вавле тэорыі Пталемея

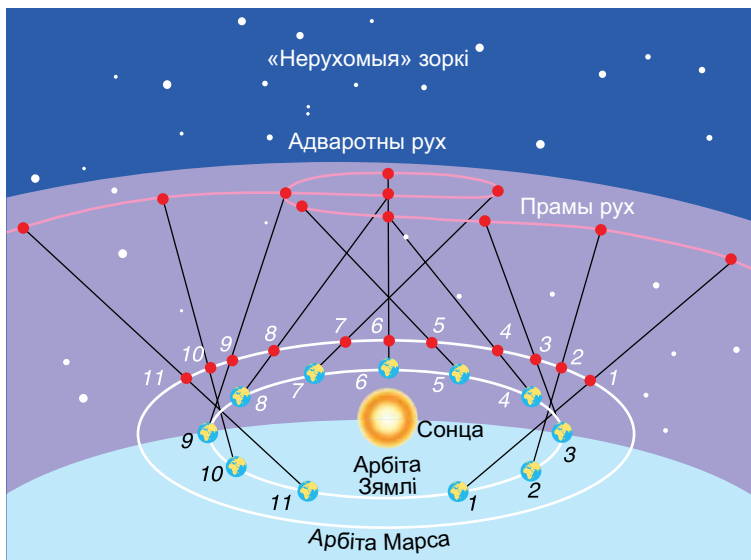


Рис. 25. Тлумачэнне петлепадобнага руху планет паводле вучэння Каперніка

ў 1543 г., незадоўга да смерці вучонага. Рэвалюцыйнасць працы Каперніка ў тым, што ў ёй новы погляд на будову Сонечнай сістэмы непарыўна звязаны з пытаннем аб месцазнаходжанні Зямлі ў Сусвеце. Прастата і стройнасць сістэмы будовы свету, выкладзенай Капернікам, хутка набыла прыхільнікаў. Вучэнне Каперніка з цягам часу вызваліла навуку ад састарэлых і схаластычных традыцый, якія тармазілі яе развіццё. Аднак сам вялікі астраном заставаўся ў палоне некаторых прадурэтых поглядаў. Напрыклад, Капернік не змог адмовіцца ад думкі, што планеты рухаюцца раўнамерна па кругавых арбітах. Таму яго мадэль Сусвету таксама мела мноства сфер — эпіцыклаў і дэферэнтаў.

Вялікі італьянскі вучоны Галілео Галілей пацвердзіў вучэнне Каперніка сваімі адкрыццямі, зробленымі з дапамогай тэлескопа.

Іаган Кеплер развіў вучэнне Каперніка, адкрыўшы законы руху планет і даказаўшы на аснове фактаў, што планеты рухаюцца па эліпсах і нераўнамерна.

Ісаак Ньютан у 1687 г. апублікаваў адкрыты ім закон сусветнага прыцягнення, які дазволіў выразіць тэорыю руху планет у выглядзе формул і назаўсёды адмовіцца ад грувацкіх геаметрычных пабудов.

4. Канфігурацыі і ўмовы бачнасці планет. Пад канфігурацыямі планет разумеюць характэрныя ўзаемныя размяшчэнні Сонца, Зямлі і іншых планет. Канфігурацыі адрозніваюцца для **ніжніх** планет (арбіты якіх знаходзяцца бліжэй да Сонца, чым арбіта Зямлі) і **верхніх** планет (арбіты якіх знаходзяцца за арбітай Зямлі).

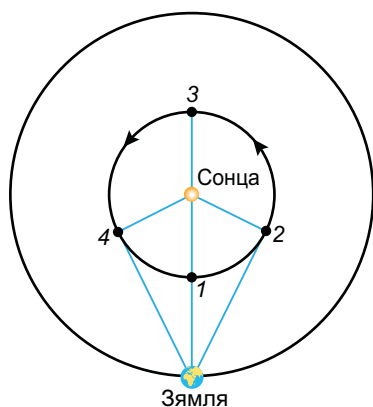
Для ніжніх планет адрозніваюць **злучэнні** і **элангацыі** (бачная вуглавая адлегласць ад планеты да Сонца) (рыс. 26).

У ніжнім злучэнні планета знаходзіцца найбліжэй да Зямлі, а ў верхнім — найдалей ад яе. Пры элангацыях вугал паміж напрамкамі з Зямлі на Сонца і на ніжнюю планету не перавышае пэўнай велічыні і застаецца вострым. З-за эліптычнасці планетных арбіт найбольшыя элангацыі не маюць пастаяннага значэння. У Венеры яны знаходзяцца ў межах ад 45° да 48° , а ў Меркурыя — ад 18° да 28° . Абедзве планеты не адыходзяць далёка ад Сонца і таму ноччу не бачныя. Працягласць іх ранішняй ці вячэрняй бачнасці не перавышае чатырох гадзін для Венеры і паўтары гадзіны для Меркурыя. Меркурый часам зусім не бачны, паколькі ўзыходзіць і заходзіць у светлую частку сутак.

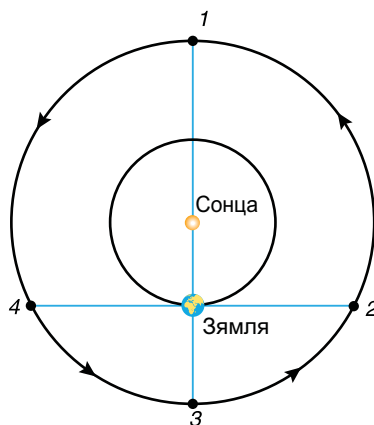
Адрозніваюць усходнюю і заходнюю элангацыі. Ва ўсходняй элангацыі планета назіраецца ўвечары пасля захаду Сонца, а ў заходняй — раніцай перад усходам Сонца.

Для верхніх планет (рыс. 27) характэрны іншыя канфігурацыі.

Калі Зямля знаходзіцца паміж планетай і Сонцам, то такая канфігурацыя называецца **процістаяннем**. Гэта канфігурацыя найбольш спрыяльная для назіранняў планеты, паколькі ў гэты час планета знаходзіцца найбліжэй да Зямлі, павернута да яе сваім асветленым паўшар'ем, размяшчаецца на небе ў процілеглым Сонцу месцы і бывае ў верхняй кульмінацыі каля поўначы. У **злучэнні** планета найбольш адалена ад Зямлі і не назіраецца, паколькі губляецца ў праменях Сонца.



Рыс. 26. Схема канфігурацый ніжніх планет:
1 — ніжняе злучэнне; 2 — найбольшая заходняя элангацыя; 3 — верхняе злучэнне;
4 — найбольшая ўсходняя элангацыя



Рыс. 27. Схема канфігурацый верхніх планет: 1 — злучэнне; 2 — заходняя квадратура; 3 — процістаянне;
4 — усходняя квадратура

Калі вугал паміж напрамкамі з Зямлі на верхнюю планету і на Сонца роўны 90° , то гавораць, што планета знаходзіцца ў **квадратуры**. Адрозніваюць заходнюю і ўсходнюю квадратуры. У канфігурацыі заходняй квадратуры планета ўзыходзіць каля поўначы, а ва ўсходняй — заходзіць каля поўначы. Моменты канфігурацый планет і ўмовы іх бачнасці штогод друкуюцца ў астранамічных даведніках і календарых.

5. Сідэрычныя і сінадычныя перыяды абарачэння планет. Прамежак часу, на працягу якога планета выконвае поўны абарот вакол Сонца па арбіце адносна зорак, называецца **зорным** або **сідэрычным** (ад лац. *sidus* — зорка) **перыядам абарачэння планеты**.

Прамежак часу паміж двюма паслядоўнымі аднайменнымі канфігурацыямі планет называецца **сінадычным** (ад грэч. *synodos* — злучэнне, збліжэнне) **перыядам абарачэння планеты**. Ён адрозніваецца ад зорнага перыяду.

Устанавім узаемасувязь сінадычнага і сідэрычнага перыядаў абарачэння планет.

Няхай T — сідэрычны перыяд абарачэння планеты, а T_0 — сідэрычны перыяд абарачэння Зямлі; S — сінадычны перыяд абарачэння планеты. Сярэдняе значэнне дугі, якую праходзіць планета за адны суткі, называецца сярэднім рухам (n) і роўна $n = \frac{360^\circ}{T}$, а сярэдні рух Зямлі — $n_0 = \frac{360^\circ}{T_0}$. У ніжніх планет $T < T_0$ і $n > n_0$. Аднайменныя злучэнні такіх планет (напрыклад, ніжнія злучэнні на рысунку 28) адбываюцца праз сінадычны перыяд абарачэння S , за які Зямля праходзіць дугу:

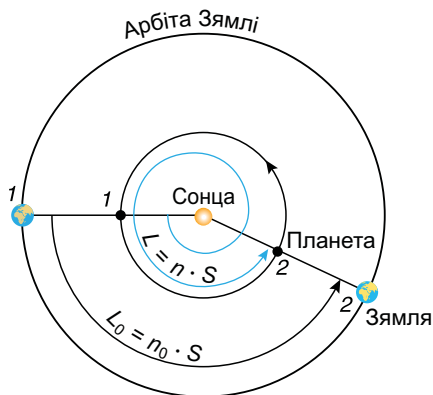
$$L_0 = n_0 \cdot S = \frac{360^\circ}{T_0} \cdot S, \quad (1)$$

а планета, якая забягае наперад, выконвае адзін абарот вакол Сонца і даганяе Зямлю, пры гэтым праходзіць вуглавую шляху $L = 360^\circ + L_0$, роўны

$$L = n \cdot S = \frac{360^\circ}{T} \cdot S. \quad (2)$$

Падставіўшы ў роўнасць $360^\circ = L - L_0$ значэнні L і L_0 , атрымаем ураўненне сінадычнага руху для ніжніх планет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}. \quad (3)$$



Рыс. 28. Сінадычны перыяд паслядоўных ніжніх злучэнняў (1 і 2) ніжняй планеты

Для верхніх планет ураўненне сінадычнага руху атрымае выгляд

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}, \quad (4)$$

паколькі $T > T_0$ і $n < n_0$.

Ураўненні (3) і (4) даюць сярэднія значэнні сінадычных перыядаў абарачэння планет. З дапамогай гэтых ураўненняў па назіраемым сінадычным перыядзе абарачэння планеты лёгка вылічыць сідэрычны перыяд яе абарачэння вакол Сонца.



Галоўныя вывады

1. Геліяцэнтрычная сістэма свету — мадэль Сонечнай сістэмы, паводле якой Зямля, як і іншыя планеты, абарачаецца вакол Сонца і, акрамя таго, верціцца вакол сваёй восі.
2. Характэрныя ўзаемныя размяшчэнні планет адносна Сонца і Зямлі на нябеснай сферы называюцца канфігурацыямі планет.
3. Адносна Зямлі Меркурый і Венера — ніжнія планеты, астатнія — верхнія. Найбольш зручна назіраць ніжнія планеты паблізу ад элангацыі, а верхнія — паблізу ад процістаянняў.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Чым адрозніваюцца прамы і адваротны рухі планет?
2. Як паводле геліяцэнтрычнай сістэмы свету тлумачыцца петлепадобны рух планет?
3. Што разумеюць пад канфігурацыямі планет? Апішыце іх.
4. Дайце азначэнні сінадычнага і сідэрычнага перыядаў абарачэння планеты. У чым іх адрозненне?
5. Зорны перыяд абарачэння Юпітэра роўны 12 гадам. Праз які прамежак часу паўтараюцца яго процістаянні?
6. Якой павінна быць працягласць сінадычнага і сідэрычнага перыядаў абарачэння планеты ў выпадку іх аднолькавай працягласці?

§ 7. Бачны рух Сонца і Месяца. Зацьменні

1. Бачны гадавы рух Сонца. Выкарыстаўшы каардынаты Сонца δ і α , якія бесперапынна змяняюцца, на нябеснай сферы можна адзначыць вялікі круг, які ўяўляе сабой бачны шлях цэнтра сонечнага дыска на працягу года. Гэты круг старажытныя грэкі назвалі экліптыкай. Паколькі гадавы рух Сонца адлюстроўвае рэальнае абарачэнне Зямлі па арбіце, экліптыка з'яўляецца следам ад сячэння нябеснай сферы плоскасцю, паралельнай плоскасці зямной арбіты. Гэта плоскасць называецца **плоскасцю экліптыкі**.

Акрамя двух пунктаў раўнадзенства, аб якіх мы ўжо гаварылі ў § 2, на экліптыцы вылучаюць два прамежавыя паміж імі і процілеглыя адзін аднаму пункты, у якіх схіленне Сонца бывае найбольшым і найменшым. У **пункце летняга сонцастаяння** Сонца мае максімальнае схіленне $\delta = +23^{\circ}26'$ (каля 22 чэрвеня). У **пункце зімовага сонцастаяння** Сонца мае мінімальнае схіленне $\delta = -23^{\circ}26'$ (каля 22 снежня).

Сузор'і, праз якія праходзіць экліптыка, называюцца **экліптычнымі сузор'ямі**. У Старажытным Міжрэччы ўзнікла раздзяленне экліптыкі з прылеглымі сузор'ямі на 12 частак. Гэты пояс атрымаў назву **Пояс Задыяка** (ад грэч. ζῳον — жывая істота). Першапачаткова задыякальныя знакі супадалі з экліптычнымі сузор'ямі, паколькі дакладных меж сузор'і не мелі. Пазней, у эпоху элінізму, складалася ўяўленне аб знаках задыяка як аб 12 роўных частках экліптыкі, кожная з якіх займае на небе па 30° дугі. Пачатак адліку знакаў устаноўлены ад пункта вясенняга раўнадзенства Υ . У наш час задыякальныя знакі і экліптычныя сузор'і не супадаюць. Экліптычных сузор'яў 13. З іх 12 (гл. табл. 1) супадаюць па назвах з задыякальнымі знакамі. Сузор'е Змеяносца з'яўляецца экліптычным, ад-

Табліца 1. Час знаходжання Сонца ў знаках задыяка

Υ — Авен (20 сакавіка — 19 красавіка)	♈ — Шалі (22 верасня — 22 кастрычніка)
♊ — Цялец (20 красавіка — 20 траўня)	♉ — Скарпіён (23 кастрычніка — 21 лістапада)
♋ — Блізняты (21 траўня — 20 чэрвеня)	♏ — Стралец (22 лістапада — 20 снежня)
♌ — Рак (21 чэрвеня — 22 ліпеня)	♐ — Казярог (21 снежня — 19 студзеня)
♍ — Леў (23 ліпеня — 21 жніўня)	♑ — Вадалей (20 студзеня — 18 лютага)
♎ — Дзева (22 жніўня — 21 верасня)	♒ — Рыбы (19 лютага — 19 сакавіка)

нак не ўваходзіць у лік знакаў задзяка. Экліптыка, праходзячы праз сузор'і, мае ў кожным з іх часткі няроўнай даўжыні. Да таго ж пункт вясенняга раўнадзенства з-за прэцэсіі пастаянна перамяшчаецца. Таму задзякальны знак Авена зараз знаходзіцца ў сузор'і Рыб.

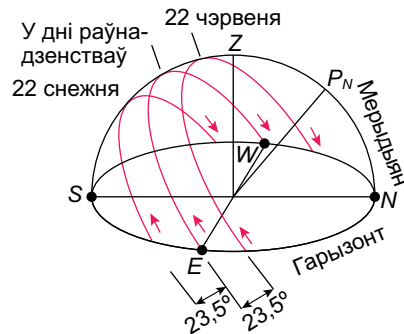
2. Сутачны рух Сонца на розных шыратах. У § 2 ужо ішла гаворка аб гадавым руху Сонца сярод зорак па ўяўнай лініі, якая называецца экліптыкай. Усю экліптыку (360°) Сонца праходзіць за год, аднак гэты рух уяўны, паколькі ён адбываецца ў выніку абарачэння Зямлі вакол Сонца.

Разгледзім сутачны рух Сонца на розных шыратах.

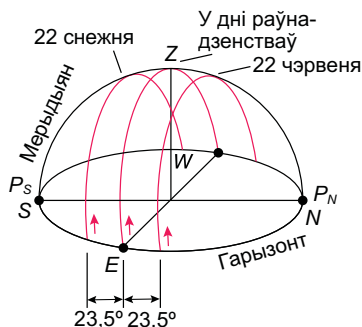
У сярэдніх шыратах Сонца ўзыходзіць заўсёды ва ўсходнім баку неба, паступова падыходзіць над гарызонтам, у поўдзень дасягае найвышэйшага месца знаходжання на небе, пасля чаго паступова апускаецца да гарызонту і заходзіць у заходнім баку неба. У Паўночным паўшар'і гэты рух адбываецца злева направа, а ў Паўднёвым наадварот — справа налева. Назіральнік у Паўночным паўшар'і Зямлі пры гэтым будзе бачыць Сонца на поўдні, а ў Паўднёвым паўшар'і — на поўначы. Дзённы шлях Сонца на небе сіметрычны адносна напрамку поўнач — поўдзень.

За палярным кругам на Зямлі, дзе $\varphi > 66,5^\circ$, сутачны шлях Сонца амаль паралельны гарызонту. На самым полюсе Сонца на працягу паўгода не заходзіць і апісвае кругі над гарызонтам. Гэта палярны дзень. Пасля гэтага Сонца заходзіць і настае палярная ноч. На экватары працягласць дня заўсёды роўна працягласці ночы, і Сонца, як і іншыя свяцілы, узыходзіць і заходзіць перпендыкулярна да плоскасці сапраўднага гарызонту.

3. Змяненне сутачнага шляху Сонца на працягу года. Змяненне сутачнага шляху Сонца над гарызонтам на працягу года для сярэдніх геаграфічных шырот Паўночнага паўшар'я паказана на рысунку 29. Калі вызначаць вышыню Сонца ў поўдзень на працягу года, то можна заўважыць, што двойчы за год яно бывае на нябесным экватары. Гэта адбываецца ў дні вясенняга (каля 21 сакавіка) і асенняга (каля 23 верасня) раўнадзенстваў. Плоскасць гарызонту падзяляе нябесны экватар папалам. Таму ў дні раўнадзенстваў шляхі Сонца над гарызонтам і пад гарызонтам роўныя (без уліку рэфракцыі), адпаведна, працягласць дня і ночы аднолькавая. Самы кароткі дзень прыпадае на 22 снежня, а самы доўгі — на 22 чэрвеня.



Рыс. 29. Сутачныя шляхі Сонца над гарызонтам у розныя поры года пры назіраннях у сярэдніх геаграфічных шыратах



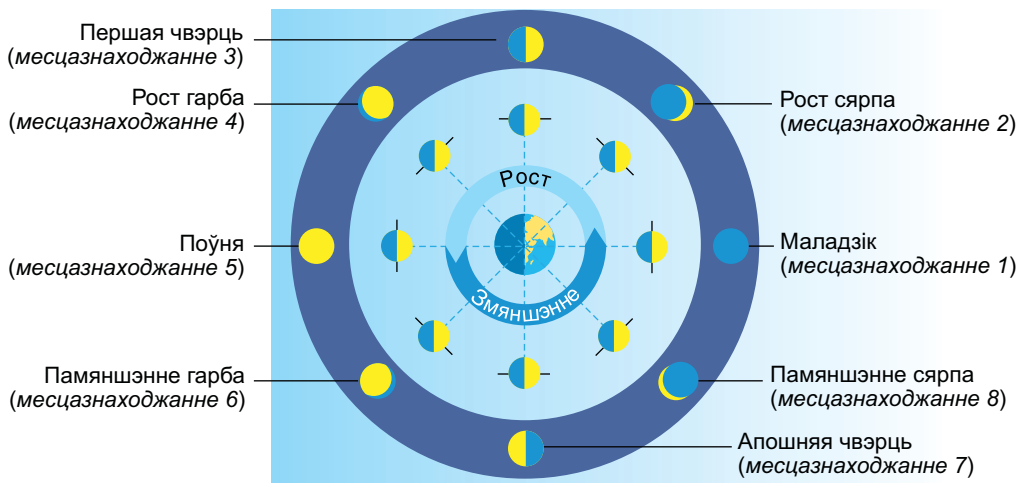
Рыс. 30. Сутачныя шляхі Сонца над гарызонтам у розныя поры года пры назіраннях на экватары Зямлі

Для назіральнікаў, што знаходзяцца на зямным экватары, сутачныя шляхі Сонца над гарызонтам на працягу года паказаны на рысунку 30.

4. Бачны рух і фазы Месяца. Месяц — натуральны спадарожнік Зямлі. Гэта найбліжэйшае да Зямлі нябеснае цела, якое свеціць адбітым сонечным святлом. Месяц рухаецца вакол Зямлі па эліптычнай арбіце ў той жа бок, у які Зямля верціцца вакол сваёй восі. Таму мы бачым Месяц, які рухаецца сярод зорак насустрач вярчэнню неба. Напрамак руху Месяца заўсёды адзін і той жа — з захаду на ўсход. Для назіральніка з Зямлі за суткі Месяц перамяшчаецца на $13,2^\circ$.

Поўны абарот па арбіце вакол Зямлі Месяц выконвае за 27,32 сутак (**сідэрычны месяц**). І за такі ж час ён выконвае адзін абарот вакол сваёй восі, таму да Зямлі заўсёды павернута адно і тое ж паўшар'е Месяца.

Рух Месяца вакол Зямлі вельмі складаны, і яго вывучэнне — адна з найцяжэйшых задач нябеснай механікі. Бачны рух Месяца суправаджаецца бесперапынным змяненнем яго выгляду — зменай фаз. Розныя формы бачнай асветленай часткі Месяца называюцца яго **фазамі**. Змена фаз Месяца абумоўлена змяненнямі ва ўмовах асвятлення Сонцам Месяца пры яго руху па арбіце (рыс. 31).



Рыс. 31. Змена месяцавых фаз

Пачнём разглядаць фазы Месяца з **маладзіка**. Гэта фаза бывае, калі Месяц праходзіць паміж Сонцам і Зямлёй і павернуты да нас сваім цёмным бокам (гл. рыс. 31, *месцазнаходжанне 1*). Месяц зусім нябачны з Зямлі.

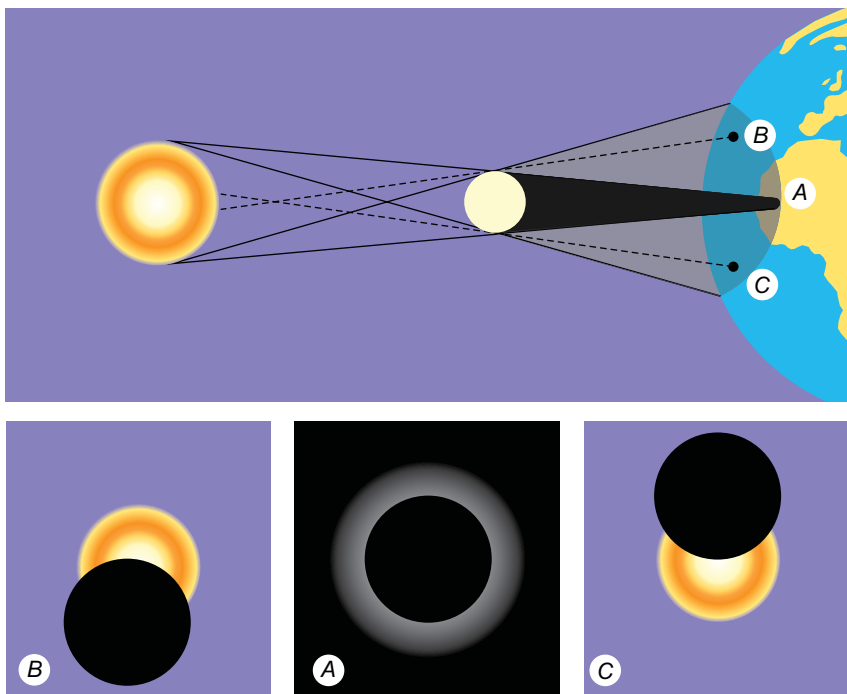
Праз адзін-два дні ў заходняй частцы неба з'яўляецца і працягвае расці вузкі яркі серп «маладога» Месяца (*месцазнаходжанне 2*). Часам на фоне неба бывае прыкметнай (з-за цмянага шараватага свячэння — так званага **попельнага святла** Месяца) і астатняя частка месяцавага дыска. З'ява попельнага святла тлумачыцца тым, што месяцавы серп асвятляецца непасрэдна Сонцам, а астатняя месяцавая паверхня — рассеяным сонечным святлом, адбітым ад Зямлі. Праз 7 сутак ужо будзе бачная ўся правая палавіна месяцавага дыска — настае **фаза першай чвэрці** (*месцазнаходжанне 3*). У гэтай фазе Месяц узыходзіць днём, вечарам бачны ў паўднёвай частцы неба і заходзіць ноччу. Далей фаза павялічваецца (*месцазнаходжанне 4*), і праз 14—15 сутак пасля маладзіка Месяц будзе ў процістаянні з Сонцам (*месцазнаходжанне 5*). Яго фаза становіцца поўнай, настае **поўня**. Сонечныя прамені асвятляюць усё месяцавае паўшар'е, павернутае да Зямлі. Поўны Месяц узыходзіць перад заходам Сонца, заходзіць пры яго ўзыходзе, а ў сярэдзіне ночы бачны ў паўднёвым баку неба.

Пасля поўні Месяц паступова набліжаецца да Сонца з захаду і асвятляецца ім злева (*месцазнаходжанне 6*). Прыкладна праз тыдзень настае фаза **трэцяй**, або **апошняй, чвэрці** (*месцазнаходжанне 7*). Пры гэтым Месяц узыходзіць каля поўначы, перад усходам Сонца знаходзіцца ў паўднёвым баку неба і заходзіць днём. Пры далейшым збліжэнні спадарожніка Зямлі з Сонцам фазы Месяца, якія змяняюцца, становяцца серпападобнымі (*месцазнаходжанне 8*). Месяц бачны толькі перад раніцай, незадоўга да ўсходу Сонца, а заходзіць у светлы час сутак перад заходам Сонца. Вузкі серп Месяца ў гэтым выпадку павернуты выпукласцю на ўсход. Пасля гэтага зноў настае маладзік, і Месяц перастае быць бачным на небе.

Ад аднаго маладзіка да наступнага праходзіць каля 29,5 сутак. Гэты перыяд змены месяцавых фаз называецца **сінадычным месяцам**.

5. Сонечныя і месяцавыя зацьменні. У сваім руху Месяц часта засланяе (або, як гавораць астраномы, накрывае) зоркі задзякальных сузор'яў. Значна радзей Месяц накрывае планеты і Сонца. Накрыванне Сонца Месяцам называецца **сонечным зацьменнем**.

Сонечнае зацьменне мае розны выгляд для розных пунктаў зямной паверхні. З-за таго што дыяметр Месяца ў 400 разоў меншы за дыяметр Сонца і Месяц знаходзіцца прыкладна ў 400 разоў бліжэй да Зямлі, на небе Сонца і Месяц здаюцца дыскамі аднолькавых памераў. Таму пры поўным сонечным зацьменні Месяц можа цалкам накрывць яркую паверхню Сонца, пакідаючы пры гэтым адкрытай сонечную атмасферу (гл. рыс. 118, с. 132).

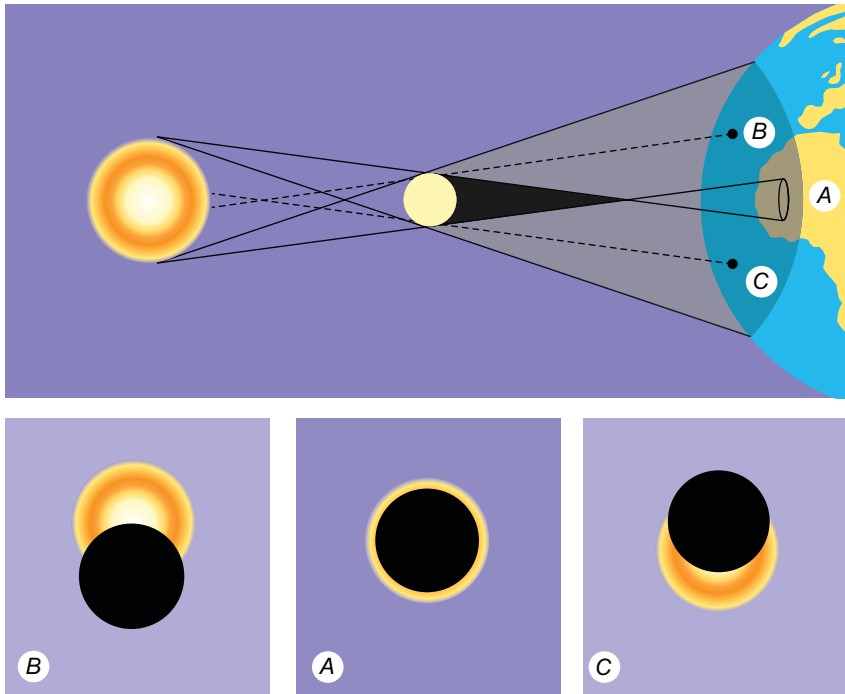


Рыс. 32. Схема поўнага сонечнага зацьмення (для назіральнікаў А, В, С)

Разгледзім схему поўнага сонечнага зацьмення (рыс. 32). Пры праходжанні паміж Сонцам і Зямлёй маленькі па памерах Месяц не можа цалкам зацяніць Зямлю. Дыск Сонца будзе цалкам закрыты толькі для назіральніка А, які знаходзіцца ўнутры месяцавага ценю, найбольшы дыяметр якога на паверхні Зямлі не перавышае 270 км. Толькі з гэтай параўнальна вузкай вобласці зямной паверхні, куды падае цень ад Месяца, будзе бачным **поўнае сонечнае зацьменне**. Там жа, куды падае паўцень ад Месяца, унутры так званага конуса месяцавага паўценню, будзе бачным (для назіральнікаў В і С) **частковае сонечнае зацьменне**.

Калі ў момант зацьмення Месяц, які рухаецца па сваёй эліптычнай арбіце, будзе знаходзіцца на значным аддаленні ад Зямлі, то бачны дыск Месяца будзе занадта малым, каб цалкам накрыць Сонца. Тады назіральнік А (рыс. 33) зможа ўбачыць вакол цёмнага дыска Месяца зіхатлівы абадок сонечнага дыска. Гэта — **кольцападобнае зацьменне**. Для назіральнікаў В і С такое сонечнае зацьменне будзе частковым.

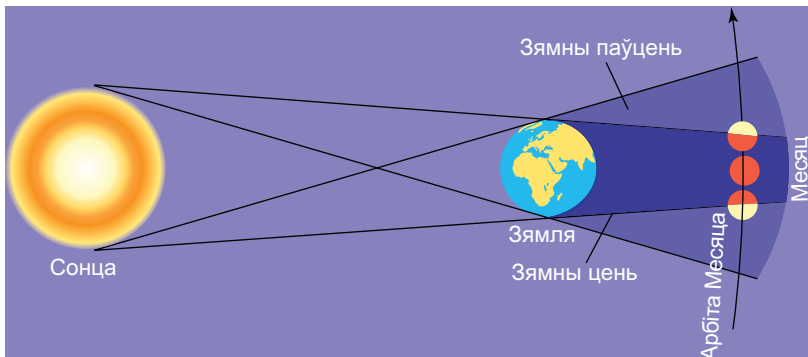
Па-за межамі месяцавага паўценню зацьменні ўвогуле не назіраюцца. Сонечнае зацьменне бачнае не на ўсёй паверхні Зямлі, а толькі там, дзе прабягаюць



Рыс. 33. Схема кольцападобнага сонечнага зацьмення (для назіральнікаў A, B, C)

цень і паўцень Месяца. Шлях месяцовага ценю па зямной паверхні называецца **паласой поўнага сонечнага зацьмення**.

Месяцавыя зацьменні адбываюцца тады, калі Месяц трапляе ў зямны цень, які таксама мае форму конуса і акружаны паўцнем (рыс. 34). Пры частковым пападанні Месяца ў зямны цень месяцавае зацьменне называецца **частковым**



Рыс. 34. Схема месяцовага зацьмення



Рыс. 35. Выгляд Месяца пры поўным
месяцавым зацьменні

ценявым, а пры поўным пападанні — **поўным ценявым зацьменнем**. З-за таго што зямны цень накіраваны ў бок, процілеглы Сонцу, Месяц можа прайсці праз яго толькі ў поўню. Месяц паступова пападае ў зямны цень, спачатку сваім левым краем. Пры поўным зацьменні ён набывае буры ці цёмна-чырвоны колер (рыс. 35), бо сонечнае святло пасля праламлення ў зямной атмасферы асвятляе Месяц пераважна чырвонымі прамянямі, якія найменш рассяйваюцца і аслабляюцца зямной атмасферай.

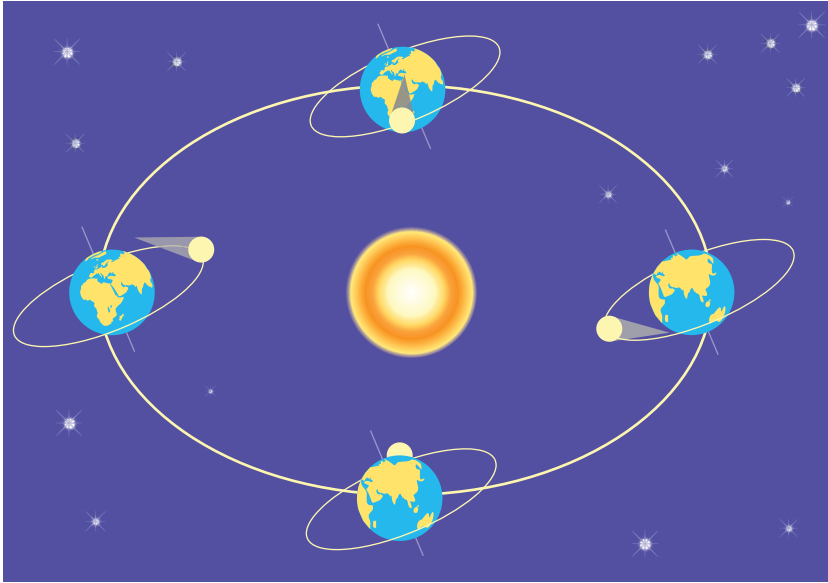
Штогод адбываецца ад двух да пяці сонечных зацьменняў. У сярэднім у адным і тым жа месцы Зямлі поўнае сонечнае зацьменне можна назіраць надзвычай рэдка — толькі адзін раз за 200—300 гадоў, а працягласць поўнага сонечнага зацьмення не перавышае 7 мін 31 с. Таму астраномы старанна рыхтуюцца да назірання зацьмення, каб паспець вывучыць знешнія разрэджаныя абалонкі Сонца.

Як правіла, штогод адбываецца адно-два месяцавыя зацьменні, але бываюць гады, калі зацьменняў не бывае зусім. Месяцавыя зацьменні бачныя з усяго начнога паўшар'я Зямлі, дзе ў гэты час Месяц знаходзіцца над гарызонтам. Таму ў кожнай мясцовасці яны назіраюцца часцей за сонечныя зацьменні, хаця адбываюцца прыкладна ў 1,5 раза радзей. Найбольшая працягласць месяцавага зацьмення дасягае 1 г 47 мін.

Яшчэ ў VI ст. да н. э. было вызначана, што прыкладна праз 18 гадоў і 11,3 сутак усе зацьменні будуць паўтарацца ў адной і той жа паслядоўнасці. Гэты перыяд паміж зацьменнямі называецца **сарасам** (ад грэч. **σάρος** — перыяд, паўтарэнне).

На працягу сарасу ў сярэднім адбываецца 70—71 зацьменне, з якіх 42—43 сонечныя (14 поўных, 13—14 кольцападобных і 15 частковых) і 28 месяцавых.

Чаму сонечныя і месяцавыя зацьменні бываюць не кожны месяц? З чым звязана з'ява сарасу? Здавалася б (гл. рыс. 32—34), што зацьменні павінны адбывацца пры кожным абароце Месяца вакол Зямлі. На самай справе гэта не адбываецца, паколькі плоскасць месяцавай арбіты не супадае з плоскасцю экліптыкі, а нахілена пад вуглом у сярэднім $5^{\circ}09'$. Таму Месяц у час маладзіка ці поўні можа знаходзіцца далёка ад плоскасці экліптыкі, і тады яго дыск (дыя-



Рыс. 36. Плоскасць месяцавай арбіты не супадае з плоскасцю экліптыкі

метрам $0,5^\circ$) праходзіць вышэй або ніжэй за дыск Сонца ці конус ценю Зямлі. Зацьменні ж адбываюцца толькі тады, калі Месяц знаходзіцца паблізу ад пунктаў перасячэння месяцавай арбіты з экліптыкай (рыс. 36). На рысунку 36 бачна, што ў маладзік месяцавы цень не заўсёды можа трапіць на Зямлю.



Галоўныя вывады

1. На экліптыцы вылучаюць чатыры асноўныя пункты: вясенняга і асенняга раўнадзенстваў, летняга і зімовага сонцастаянняў.
2. Суточныя шляхі Сонца на працягу года залежаць ад геаграфічнай шыраты месца назірання.
3. Асветленая частка месяцавага дыска (месяцавая фаза) залежыць ад узаемнага месцазнаходжання Сонца і Месяца для назіральніка з Зямлі.
4. З'ява накрывання Месяцам Сонца называецца сонечным зацьменнем.
5. З'ява праходжання Месяца праз зямны цень называецца месяцавым зацьменнем.
6. Прамежак часу (сарас), праз які ў пэўным парадку паўтараюцца сонечныя і месяцавыя зацьменні, роўны 18 гадам і 11,3 сутак.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Пералічыце асаблівасці сутачнага руху Сонца на розных шыратах.
2. Ці можа Сонца назірацца ў зеніце ў Беларусі? Чаму?
3. Чаму Месяц павернуты да Зямлі заўсёды адным і тым жа бокам?
4. У чым адрозненне сідэрычнага і сінадычнага месяцаў? Чым абумоўлена іх розная працягласць?
5. Што разумеюць пад месяцавай фазай? Апішыце фазы Месяца.
6. Серп Месяца павернуты выпукласцю ў правы бок і блізкі да гарызонту. У якім баку гарызонту ён знаходзіцца?
7. Чаму адбываюцца сонечныя і месяцавыя зацьменні?
8. Ахарактарызуйце поўныя, частковыя і кольцападобныя сонечныя зацьменні.
9. Як адрозніць фазу зацьмення Месяца ад адной з яго звычайных фаз?
10. Чаму сонечныя зацьменні адбываюцца не кожны маладзёк, а месяцавыя — не кожную поўню?
11. Што такое сарас? Якая яго перыядычнасць?

§ 8. Законы Кеплера

1. Першы закон Кеплера. Да канца XVI ст. вучоным не ўдавалася дакладна вылічыць адноснае месцазнаходжанне планет на некалькі гадоў наперад з дапамогай тэорый, якія існавалі ў той час. Тэарэтычныя вылічэнні прыкметна адрозніваліся ад вынікаў назіранняў. Прычына была ў памылковым меркаванні, што планеты раўнамерна рухаюцца па строга кругавых арбітах вакол Сонца. Кінематычныя законы руху планет былі адкрыты толькі ў пачатку XVII ст. аўстрыйскім астраномам і матэматыкам Іаганам Кеплерам. Ён першым разбурыў укаранелыя піфагарэйскія погляды аб «дасканаласці» арбіт планет, калі паказаў іх эліптычнасць.

Кеплер устанавіў, што *планеты рухаюцца па эліпсах, у адным з фокусаў якіх знаходзіцца Сонца*. Гэта заканамернасць атрымала назву **першага закону Кеплера**.

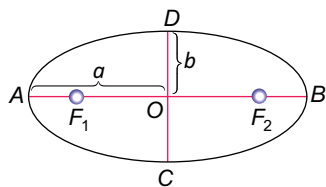


Рис. 37. Элементы эліпса

Адрэзак AB (рыс. 37) называецца **вялікай воссю**, а адрэзак CD — **малой воссю** эліпса. Адрэзкі $AO = OB = a$, $CO = OD = b$ называюцца адпаведна **вялікай і малой паўвосьмі** эліпса. Суадносіна

$$e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a} \quad (1)$$

называецца **эксцэнтрысітэтам** эліпса. Чым большы эксцэнтрысітэт эліпса, тым больш зрушаны фокусы адносна цэнтра і тым большай будзе рознасць паміж вялікай і малой паўвосьмі. Гэта значыць, што эксцэнтрысітэт з'яўляецца мерай «сплясканасці» эліпса.

Для эліпса $0 < e < 1$. Адзначым, што пры $e = 0$ можна разглядаць акружэнасць як асобны від эліпса ($b = a$).

Будзем меркаваць, што калі Сонца знаходзіцца ў фокусе F_1 , то найбліжэйшы да Сонца пункт (A) арбіты планеты называецца **перыгеліем**, а найбольш аддалены (B) — **афеліем**. Абазначым $AF_1 = q$ (q — **перыгелійная адлегласць**), а $BF_1 = Q$ (Q — **афелійная адлегласць**). З рысунка 37 вынікае, што $q + OF_1 = a$. З формулы (1) выразім $OF_1 = a \cdot e$, тады

$$q = a - a \cdot e = a(1 - e), \quad (2)$$

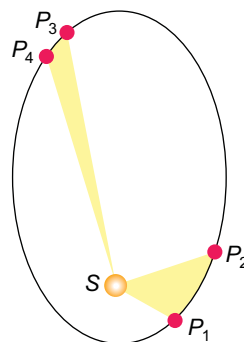
$$Q = a(1 + e). \quad (3)$$

У зямной арбіты эксцэнтрысітэт роўны 0,017. Зямля бывае ў перыгеліі ў пачатку студзеня, і перыгелійная адлегласць роўна 147 млн км, а ў афеліі — у пачатку чэрвеня, і афелійная адлегласць роўна 152 млн км.

2. Другі закон Кеплера. Пры вывучэнні руху Марса ў прасторы Кеплер заўважыў, што планета рухаецца па арбіце нераўнамерна — зімой хутчэй, чым летам. Ён пачаў шукаць заканамернасць, паводле якой адбываецца змяненне скорасці Марса, і прапанаваў гіпотэзу, што скорасць павінна быць адваротна прапарцыянальнай адлегласці ад Марса да Сонца. Для пунктаў перыгелія і афелія гіпотэза пацвердзілася. Тады Кеплер умоўна падзяліў арбіту Марса на 360 частак і пачаў правяраць сваю гіпотэзу для кожнай з гэтых частак. Назіранні і разлікі паказалі, што за роўныя прамежкі часу Марс праходзіць роўныя плошчы сектараў арбіты.

Сучасная фармулёўка гэтай залежнасці распаўсюджваецца на ўсе планеты, носіць назву **другога закону Кеплера** і гучыць наступным чынам: *радыус-вектар планеты* (лінія, што злучае цэнтр Сонца і цэнтр планеты) *апісвае за роўныя прамежкі часу роўныя плошчы*.

Другі закон Кеплера, або закон плошчаў, адлюстраваны на рысунку 38. Пры руху планеты (P) вакол Сонца (S) яе радыус-вектар за аднолькавыя



Рыс. 38. Адлюстраванне другога закону Кеплера

прамежкі часу апісвае роўныя па плошчы фігуры — P_1SP_2 і P_3SP_4 . Такім чынам, скорасць руху планеты па арбіце змяняецца і мае максімальнае значэнне ў перыгеліі, а мінімальнае — у афеліі.

3. Трэці закон Кеплера. Пры параўнанні памераў арбіт і перыядаў абарачэння планет вакол Сонца Кеплер выявіў, што квадраты перыядаў абарачэння планет прапарцыянальны кубам іх сярэдніх адлегласцей ад Сонца (або што адносіна $\frac{r^3}{T^2}$ аднолькавая для ўсіх планет).

Трэці закон Кеплера фармулюецца наступным чынам: *квадраты сідэрычных перыядаў абарачэння дзвюх планет адносяцца як кубы вялікіх паўвосей іх арбіт:*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (4)$$

Калі ў гэтай формуле прыняць сідэрычны перыяд абарачэння Зямлі вакол Сонца роўным 1 (адзін год) і вялікую паўвось зямной арбіты роўнай 1 (адна астранамічная адзінка (а. адз.), гл. § 10), то формула (4) атрымае выгляд:

$$T = \sqrt{a^3}. \quad (5)$$

На аснове адкрытых законаў пасля шматгадовых вылічэнняў Кеплер у 1627 г. склаў табліцы, па якіх можна было вызначыць месцазнаходжанне кожнай планеты на небе ў любы момант часу.



Галоўныя вывады

1. Усе планеты рухаюцца па эліптычных арбітах, у адным з фокусаў якіх знаходзіцца Сонца.
2. За роўныя прамежкі часу радыус-вектары планет апісваюць роўнавялікія плошчы.
3. Квадраты сідэрычных перыядаў абарачэння дзвюх планет адносяцца як кубы вялікіх паўвосей іх арбіт.
4. Законы Кеплера ўдакладняюць вучэнне Каперніка, у якім арбіты нябесных цел лічыліся акружнасцямі.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Сфармулюйце законы Кеплера.
2. Ці змяняецца скорасць планеты, якая рухаецца па эліптычнай арбіце? Кругавой арбіце?
3. У колькі разоў афелійная адлегласць большая за перыгелійную, калі эксцэнтрысітэт арбіты роўны 0,5?
4. У Зямлі эксцэнтрысітэт арбіты роўны 0,017, а ў Марса — 0,093. Арбіта якой з планет больш выцягнутая?
5. Прыміце арбіты Зямлі і Марса кругавымі і разлічыце працягласць года на Марсе. Пры рашэнні задачы ўлічыце, што Марс знаходзіцца ў 1,5 раза далей ад Сонца, чым Зямля.
6. Знайдзіце перыгелійную і афелійную адлегласці астероіда Беларусь, калі яго вялікая паўвось і эксцэнтрысітэт арбіты адпаведна роўны 2,405 а. адз. і 0,181. На якую мінімальную адлегласць ён набліжаецца да Зямлі?

§ 9. Закон сусветнага прыцягнення Ньютана

1. Нябесная механіка. Пасля з'яўлення работ Каперніка, Галілея і Кеплера да сярэдзіны XVII ст. скончыўся апісальны (ці геаметрычны) перыяд вывучэння руху планет. Была выяўлена кінематыка іх руху, аднак заставалася нявысветленым, чаму планеты рухаюцца. Што прымушае іх абарачацца вакол Сонца, а спадарожнікі — вакол планет? Чым тлумачыцца ўстойлівасць планетнай сістэмы?

Усе матэрыяльныя целы, калі яны нічым не падтрымліваюцца, падаюць пад дзеяннем сілы цяжару на паверхню Зямлі. Пакуль Зямля лічылася цэнтральным целам Сусвету, сіла цяжару разглядалася толькі як зямная з'ява. Аднак адкрыцці Каперніка і яго паслядоўнікаў паказалі, што Зямля — гэта радавая планета, якая рухаецца вакол Сонца, як і іншыя планеты. У сувязі з гэтым з'явілася меркаванне, што сіла цяжару ўласціва не толькі Зямлі, але і іншым нябесным целам. На матэрыяльныя целы, якія знаходзяцца каля іншых планет, Месяца ці Сонца, дзейнічае сіла цяжару, накіраваная да іх цэнтра гэтаксама, як на Зямлі. Такім чынам, дзякуючы распаўсюджанасці ўласцівасці цяжару на іншыя нябесныя целы было пастаўлена пытанне аб узаемадзеянні цел.

На аснове трэцяга закону Кеплера і закону дынамікі матэрыяльнага пункта Ньютан строга матэматычна абгрунтаваў **закон сусветнага прыцягнення**, які фармулюецца наступным чынам: *два целы прыцягваюцца адно да аднаго з сілай, прапарцыянальнай здабытку мас гэтых цел і адваротна прапарцыянальнай квадрату адлегласці паміж імі.*

Матэматычна закон сусветнага прыцягнення можна запісаць у выглядзе:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

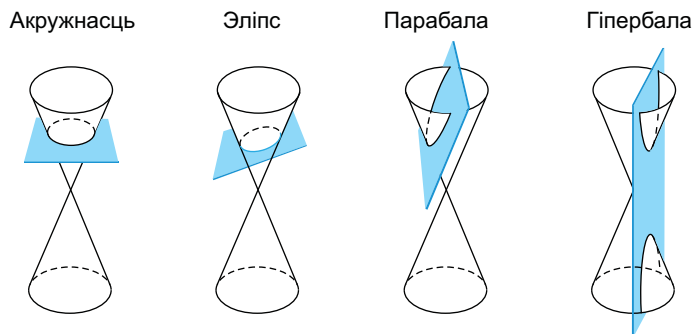
дзе m_1 і m_2 — масы двух цел, якія прыцягваюцца адно да аднаго, r — адлегласць паміж імі. Каэфіцыент прапарцыянальнасці G ($G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$) называюць **пастаяннай прыцягнення** або **гравітацыйнай пастаяннай**, ён з'яўляецца адной з асноўных фізічных канстант.

Формула (1) справядлівая для цел (матэрыяльных пунктаў), памеры якіх мізэрныя ў параўнанні з адлегласцю паміж імі. Два працяглыя шарападобныя целы са сферычна-сіметрычным размеркаваннем мас прыцягваюцца адно да аднаго гэтаксама, як матэрыяльныя пункты, г. зн. як калі б іх масы былі засяроджаны ў цэнтрах цел. Адлегласць r трэба адлічваць ад цэнтраў гэтых цел.

На аснове закону сусветнага прыцягнення і законаў механікі Ньютан матэматычна даказаў, што пад дзеяннем сілы прыцягнення цела масай m будзе рухацца адносна цела масай M па адной з крывых: эліпсе, акружнасці, парабале або гіпербале.

Такім чынам, Ньютан удакладніў і абагульніў першы закон Кеплера, які ў новай фармулёўцы гучыць так: *пад дзеяннем прыцягнення адно нябеснае цела рухаецца ў полі прыцягнення другога нябеснага цела па адным з канічных сячэнняў — эліпсе, акружнасці, парабале або гіпербале* (рыс. 39). *Пры руху па эліпсе цела, якое прыцягвае, заўсёды знаходзіцца ў адным з яго фокусаў.*

Навука, якая грунтуецца на законах Кеплера і Ньютана і вывучае рух нябесных цел, называецца **нябеснай механікай**. Нябесная механіка даследуе рух



Рыс. 39. Атрыманне арбітальных крывых пры сячэнні конуса плоскасцю

нябесных цел з улікам ствараемых імі палёў прыцягнення. Асноўная задача гэтай навукі ў тым, каб, ведаючы пачатковае месцазнаходжанне цела (матэрыяльнага пункта) і яго пачатковую скорасць, вызначыць яго месцазнаходжанне ў любы момант часу.

2. Узбурэнні ў руху нябесных цел. Рух цел, які строга падпарадкоўваецца законам Кеплера, называецца **няўзбураным**. Такая ідэалізацыя прадугледжвае ўлік узаемадзеяння толькі двух цел і апісвае, напрыклад, рух планеты пад дзеяннем толькі прыцяжэння Сонца. Задача двух цел была поўнасьцю рэшана Ньютанам (закон сусветнага прыцягнення).

Сапраўдны рух цел Сонечнай сістэмы значна больш складаны. Гэта тлумачыцца тым, што целы Сонечнай сістэмы не толькі прыцягваюцца Сонцам, але і ўзаемадзейнічаюць паміж сабой. Адхіленні ў руху цел ад законаў Кеплера называюцца **ўзбурэннямі**, а рэальны рух цел — **узбураным** рухам.

Рашэнне ўраўнення руху нават для трох цел — задача выключнай складанасці, аднак аналіз узбурэнняў дазваляе даволі дакладна вызначыць масу і месцазнаходжанне ўзбуряючага цела. Найбольш яскравым прыкладам такога аналізу стала адкрыццё планеты Нептун на аснове аналізу ўзбурэнняў у руху Урана.

Яшчэ адным прыкладам праяўлення ўзбуряючай сілы з'яўляюцца **прылівы і адлівы**. Водная абалонка і зямная кара (у меншай ступені) злёгку выцягваюцца ў абодва бакі ўздоўж лініі, што злучае Зямлю з Месяцам. Прыліўныя хвалі ў акіянах і морах ідуць адна за адной з усходу на захад з інтэрвалам каля 12 г 25 мін. Прыліўнае трэнне запавольвае вярчэнне Зямлі, што прыводзіць да павелічэння працягласці зямных сутак на 0,0014 секунды за стагоддзе.

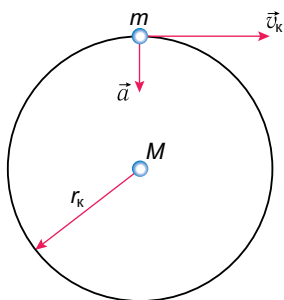
3. Вызначэнне масы Зямлі. Адной з найважнейшых характарыстык нябеснага цела з'яўляецца яго маса. Закон сусветнага прыцягнення дазваляе вызначыць масы нябесных цел, у тым ліку і масу Зямлі.

На цела масай m , якое знаходзіцца каля паверхні Зямлі, дзейнічае сіла цяжару $F = mg$, дзе g — паскарэнне свабоднага падзення. Калі цела рухаецца толькі пад дзеяннем сілы цяжару, то паводле закону сусветнага прыцягнення (1) паскарэнне свабоднага падзення роўна: $g = G \frac{M}{R_{\oplus}^2}$ і накіравана да цэнтры Зямлі.

Такім чынам, ведаючы, што паскарэнне свабоднага падзення $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ і радыус Зямлі $R_{\oplus} = 6370 \text{ км}$, можна па формуле $M = \frac{gR_{\oplus}^2}{G}$ вылічыць масу Зямлі: $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Сярэдняю шчыльнасць Зямлі можна вызначыць, ведаючы яе масу і аб'ём. Яна роўна $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

4. Вызначэнне мас нябесных цел. Масы нябесных цел можна вызначыць некалькімі спосабамі.



Рыс. 40. Кругавы
рух цел

1. Вымярэннем сілы цяжару на паверхні дадзенага нябеснага цела (гравіметрычны спосаб).

2. На аснове трэцяга абагульненага закону Кеплера. Першы спосаб у дачыненні да Зямлі мы разгледзелі вышэй.

Перш чым разглядаць другі спосаб, давайце правым выкананне трэцяга закону Кеплера для выпадку кругавога руху планеты са скорасцю v_k .

Няхай цела масай m рухаецца з лінейнай скорасцю v_k вакол цела масай M ($m \ll M$) па акружнасці радыуса r_k (рыс. 40). Гэта магчыма, калі рух адбываецца пад дзеяннем сілы, якая стварае цэнтраімклівае паскарэнне

$a = \frac{v_k^2}{r_k}$. Сілай, якая стварае цэнтраімклівае паскарэнне, з'яўляецца сіла прыцягнення, роўная $\frac{GMm}{r_k^2}$. Калі прыраўнаваць $\frac{v_k^2}{r_k}$ да паскарэння $\frac{GM}{r_k^2}$, ствараемага прыцягненнем, то атрымаецца, што

$$v_k^2 = \frac{GM}{r_k}. \quad (2)$$

Калі перыяд абарачэння цела масай m вакол цела масай M будзе роўны T , то лінейная скорасць руху гэтага цела па арбіце будзе роўна

$$v_k = \frac{2\pi r_k}{T}. \quad (3)$$

Падставіўшы (3) у (2), атрымаем: $\left(2\pi \frac{r_k}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r_k}$,

$$\frac{r_k^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}. \quad (4)$$

Для эліптычнага руху формула (4) таксама будзе справядлівай, калі замест радыуса акружнасці r_k падставіць вялікую паўвось a эліптычнай арбіты. У гэтым выпадку атрымаем суадносіну:

$$\frac{a^3}{T^2 M} = \frac{G}{4\pi^2}, \quad (5)$$

якую можна сфармуляваць наступным чынам: *адносіна куба вялікай паўвось арбіты цела да квадрата перыяду яго абарачэння і масы цэнтральнага цела ёсць велічыня пастаянная.*

Калі масу m меншага цела нельга не ўлічваць у параўнанні з масай M цэнтральнага цела, то ў трэці закон Кеплера, як паказаў Ньютан, замест масы M увойдзе сума мас $(M + m)$ і адносіна (5) атрымае выгляд

$$\frac{a^3}{T^2 (M + m)} = \frac{G}{4\pi^2}. \quad (6)$$

Абагульніўшы формулу (6) для двух нябесных цел масамі M_1 і M_2 , атрымаем удакладнены **трэці закон Кеплера**:

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (7)$$

г. зн. квадраты сідэрычных перыядаў спадарожнікаў (T_1^2 і T_2^2), памножаныя на суму мас галоўнага цела і спадарожніка ($M_1 + m_1$ і $M_2 + m_2$), адносяцца як кубы вялікіх паўвось арбіт спадарожнікаў (a_1^3 і a_2^3) (7).

На аснове ўдакладненага Ньютанам (7) трэцяга закону Кеплера другім спосабам можна вылічыць масы планет, якія маюць спадарожнікі, а таксама масу Сонца.

Масы планет, якія не маюць спадарожнікаў, можна вызначыць па ўзбурэннях, якія яны выклікаюць у руху Зямлі, Марса, астэроідаў, комет, а таксама па ўзбурэннях, якімі яны ўздзейнічаюць адна на адну.



Галоўныя вывады

1. Закон сусветнага прыцягнення і законы Кеплера — аснова нябеснай механікі.
2. Рэальны рух нябесных цел — узбураны рух, абумоўлены прыцягненнем не толькі Сонца, але і іншых нябесных цел.
3. Удакладнены Ньютанам трэці закон Кеплера дазваляе вызначаць масы планет, якія маюць спадарожнікі, масу Месяца і Сонца.

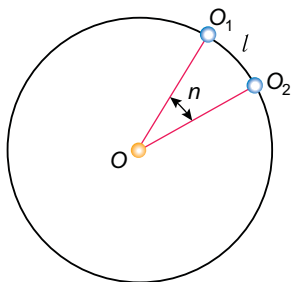
? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Якія задачы рашае нябесная механіка?
2. Сфармулюйце закон сусветнага прыцягнення. Якія асаблівасці выкарыстання гэтага закону для правядзення разлікаў?
3. Як разумеюць у астраноміі «задачу двух цел»? «Задачу трох цел»?
4. Як Ньютан абагульніў законы Кеплера?
5. Вызначце масу планеты Уран (у масах Зямлі), калі вядома, што спадарожнік Урана Тытанія абарочваецца вакол яго з перыядам 8,7 сут на сярэдняй адлегласці 438 тыс. км. Для Месяца гэтыя велічыні роўны адпаведна 27,3 сут і 384 тыс. км.
6. Вызначце сярэднюю шчыльнасць Сонца, калі перыяд абарачэння Зямлі вакол Сонца прыняць роўным 365 сут. Пры разліках прыняць радыус зямной арбіты роўным 150 млн км, а радыус Сонца — 700 тыс. км.
7. Вызначце паскарэнне сілы цяжару на паверхні Марса, калі вядома, што маса Марса роўна $6,4 \cdot 10^{23}$ кг, а яго радыус роўны 3396 км.
8. У колькі разоў менш будзе важыць чалавек на Марсе, чым на Зямлі, калі маса Марса роўна $6,4 \cdot 10^{23}$ кг, а яго радыус роўны 3396 км?

§ 10. Вызначэнне памераў нябесных цел і адлегласцей да іх у Сонечнай сістэме

1. Вызначэнне памераў Зямлі. Першы вядомы навуцы метад вызначэння памераў Зямлі выкарыстаў грэчаскі вучоны Эратасфен. Ён выбраў два гарады, што ляжаць на адным і тым жа геаграфічным мерыдыяне зямнога шара — Александрыю (O_1) і Сіену (O_2) (рыс. 41). На рысунку бачна, што калі абазначыць даўжыню дугі мерыдыяна O_1O_2 праз l , а яе вуглавое значэнне праз n (у градусах), то даўжыня дугі 1° мерыдыяна l_0 будзе роўна:

$$l_0 = \frac{l}{n},$$



а даўжыня ўсёй акружнасці мерыдыяна:

$$L = 360^\circ \cdot l_0 = \frac{360^\circ \cdot l}{n} = 2\pi R,$$

дзе R — радыус зямнога шара. Адсюль

$$R = \frac{180^\circ \cdot l}{\pi n}.$$

Рыс. 41. Вылічэнне радыуса Зямлі

Даўжыня дугі мерыдыяна паміж выбранымі на зямной паверхні пунктамі O_1 і O_2 у градусах роўна рознасці геаграфічных шырот гэтых пунктаў, г. зн. $n = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Даўжыня дугі l — адлегласць паміж Александрыяй і Сіенай — была добра вядомая. Вугал n Эратасфен вымераў, выкарыстаўшы тую акалічнасць, што Сіена ляжыць на тропіку Рака і ў дзень летняга сонцастання Сонца апоўдні тут назіраецца ў зеніце. А ў Александрыі Сонца да зеніту не даходзіць і шост, укапаны перпендыкулярна ў зямлю, кідае цень. Вымераўшы даўжыню гэтага ценю, Эратасфен атрымаў значэнне $n = 7,2^\circ$ і даўжыню акружнасці L прыкладна 45 тыс. км (сучаснае значэнне 40 тыс. км).

Сучасная геадэзія мае дакладныя метады для вымярэння адлегласцей на зямной паверхні. Вызначэнне адлегласці l паміж пунктамі O_1 і O_2 (гл. рыс. 41) абцяжарваецца наяўнасцю натуральных перашкод (гор, рэк, лясоў і да т. п.). Таму даўжыня дугі l вызначаецца шляхам вылічэнняў, якія патрабуюць вымярэння толькі адносна невялікай адлегласці — **базіса** (O_1A) — і шэрага вуглоў (рыс. 42). Гэты метады распрацаваны ў геадэзіі і называецца **трыянгуляцый** (ад лац. *triangulum* — трохвугольнік).

Сутнасць яго заключаецца ў наступным. З абодвух бакоў ад дугі O_1O_2 , даўжыню якой неабходна вызначыць, выбіраецца некалькі пунктаў ($A, B, C, \dots$) на ўзаемных адлегласцях да 50 км з такім разлікам, каб з кожнага з іх былі бачны не менш за два іншыя пункты.

Даўжыню базіса старанна вымяраюць спецыяльнымі мернымі стужкамі. Вымераныя вуглы ў трохвугольніках і даўжыня базіса дазваляюць па трыганаметрычных формулах вылічыць стораны трохвугольнікаў, а па іх — даўжыню дугі O_1O_2 з улікам яе крывізны.

У Расіі з 1816 па 1855 г. пад кіраўніцтвам В. Я. Струвэ была вымерана дуга мерыдыяна даўжынёй 2800 км. У 30-я гг. XX ст. высокадакладныя градусныя вымярэнні былі праведзены ў СССР пад кіраўніцтвам Ф. М. Красоўскага.

Трыянгуляцыйныя вымярэнні паказалі, што даўжыня дугі 1° мерыдыяна неаднолькавая на розных шыротах: каля экватара яна роўна 110,6 км, а каля полюсаў — 111,7 км, г. зн. павялічваецца да полюсаў.

Сапраўдная форма Зямлі не можа быць прадстаўлена ніякім з вядомых геаметрычных цел. Таму ў геадэзіі і гравіметрыі форму Зямлі лічаць **геаідам**, г. зн. целам з паверхняй, блізкай да паверхні спакойнага акіяна і прадоўжанай пад мацерыкамі.

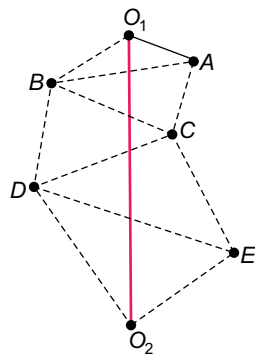


Рис. 42. Метады трыянгуляцый

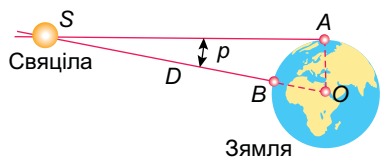


Рис. 43. Гарызантальны паралакс свяціла

У наш час створаны трыянгуляцыйныя сеткі са складанай радыёлакацыйнай апаратурай, устаноўленай на наземных пунктах, і з адбівальнікамі на геадэзічных штучных спадарожніках Зямлі, што дазваляе дакладна вылічваць адлегласці паміж пунктамі. Значны ўклад у развіццё касмічнай геадэзіі зрабіў ураджэнец Беларусі — вядомы геадэзіст, гідрограф і астраном

І. Д. Жангаловіч. На аснове вывучэння дынамікі руху штучных спадарожнікаў Зямлі ён удакладніў сцісканне нашай планеты і несіметрычнасць Паўночнага і Паўднёвага паўшар'яў.

2. Вызначэнне адлегласцей метадам гарызантальнага паралакса.

Уяўнае зрушэнне свяціла, абумоўленае перамяшчэннем назіральніка, называецца **паралактычным зрушэннем** або **паралаксам** свяціла. Паралактычныя зрушэнні свяціла тым большыя, чым яно бліжэй да назіральніка і чым большае перамяшчэнне назіральніка.

Вызначэнне адлегласцей да цел Сонечнай сістэмы грунтуецца на вымярэнні іх гарызантальных паралаксаў. Вугал p , пад якім са свяціла бачны радыус Зямлі, перпендыкулярны да праменя зроку, называецца **гарызантальным паралаксам** (рис. 43). Чым большае адлегласць да свяціла, тым меншы вугал p .

Ведаючы гарызантальны паралакс свяціла, можна вызначыць яго адлегласць $D = SO$ да цэнтра Зямлі. Адлегласць да свяціла $D = \frac{R_{\oplus}}{\sin p}$, дзе $R_{\oplus}$ — радыус Зямлі. Калі прыняць $R_{\oplus}$ за адзінку, можна выразіць адлегласць да свяціла ў зямных радыусах.

Напрыклад, паралакс Сонца $p_{\odot} = 8,794''$. Паралаксу Сонца адпавядае сярэдняя адлегласць ад Зямлі да Сонца, прыкладна роўная 149,6 млн км. Гэта адлегласць прымаецца за адну **астранамічную адзінку** (1 а. адз.). У астранамічных адзінках зручна вымяраць адлегласці паміж цэламі Сонечнай сістэмы.

Пры малых вуглах $\sin p \approx p$, калі вугал p выражаны ў радыянах. Калі вугал p выражаны ў секундах дугі, то ўводзіцца множнік

$$\sin 1'' = \frac{1}{206\,265},$$

дзе 206 265 — колькасць секунд у адным радыяне. Тады

$$\sin p'' = p'' \sin 1'' = \frac{p''}{206\,265} \quad \text{і} \quad D = \frac{206\,265''}{p''} R_{\oplus}.$$

Гэта формула значна спрашчае вылічэнне адлегласці D да свяціла па вядомым паралаксе.

3. Радыёлакацыйны метад. Для вызначэння адлегласцей да цел Сонечнай сістэмы выкарыстоўваюцца найбольш дакладныя метады вымярэнняў — **радыёлакацыйныя вымярэнні**. Калі вымераць час t , неабходны для таго, каб радыёлакацыйны імпульс дасягнуў нябеснага цела, адбіўся і вярнуўся на Зямлю, то адлегласць D да гэтага цела можна вылічыць па формуле

$$D = c \frac{t}{2},$$

дзе c — скорасць святла, роўная прыкладна $3 \cdot 10^8$ м/с.

З дапамогай радыёлакацыі вызначаны найбольш дакладныя значэнні адлегласцей да цел Сонечнай сістэмы, удакладнены адлегласці паміж мацерыкамі Зямлі, больш дакладна вызначана велічыня астранамічнай адзінкі (1 а. адз. = 149 597 870,7 км).

Метады **лазернай лакацыі** (якія выкарыстоўваюць, напрыклад, спецыяльныя адбівальнікі, дастаўленыя на Месяц) дазволілі вымераць адлегласць ад Зямлі да Месяца з дакладнасцю да некалькіх сантыметраў.

4. Вызначэнне памераў цел Сонечнай сістэмы. Пры назіраннях нябесных цел Сонечнай сістэмы можна вымераць вугал, пад якім яны бачны назіральніку з Зямлі. Калі ведаць **вуглавую радыусу свяціла** ρ (рыс. 44) і адлегласць D да свяціла, то можна вылічыць лінейны радыус R гэтага свяціла па формуле

$$R = D \cdot \sin \rho.$$

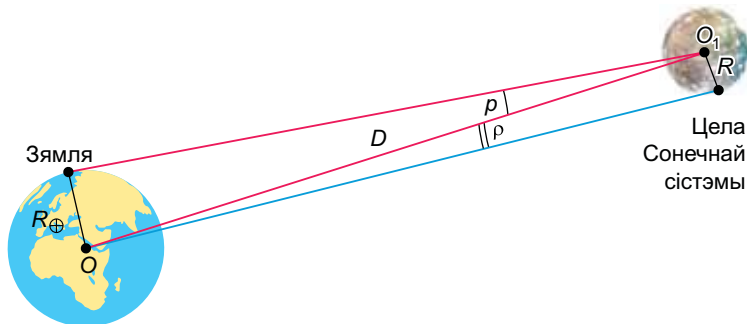


Рис. 44. Вызначэнне лінейных памераў цел Сонечнай сістэмы

Паводле азначэння гарызантальнага паралакса, радыус Зямлі $R_{\oplus}$ бачны са свяціла пад вуглом p , тады атрымаем:

$$R = \frac{\sin p}{\sin p} R_{\oplus}.$$

Паколькі значэнні вуглоў p і p малыя, канчаткова маем:

$$R = \frac{p''}{p''} R_{\oplus}.$$

Вызначэнне памераў нябесных цел такім спосабам магчыма толькі тады, калі бачны іх дыскі.

! Галоўныя вывады

1. У аснову метадаў вызначэння памераў Зямлі пакладзены градусныя вымярэнні (трыягуляцыя) даўжынь дуг на яе паверхні.
2. Вызначэнне адлегласцей да цел Сонечнай сістэмы грунтуецца на вымярэнні малых вуглоў (паралаксаў). У наш час для гэтых мэт выкарыстоўваюць метады лазернай лакацыі і радыёлакацыі.
3. Адлегласці паміж цэламі Сонечнай сістэмы вымяраюцца ў астранамічных адзінках (1 а. адз. роўна прыкладна 149,6 млн км).
4. Вызначэнне памераў цел Сонечнай сістэмы грунтуецца на вымярэннях вуглавых радыусаў і адлегласцей да іх.

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Якім чынам грэчаскі вучоны Эратасфен вызначыў памеры Зямлі?
2. Як вызначаюць даўжыню дугі мерыдыяна трыягуляцыйным метадам?
3. Што разумеюць пад гарызантальным паралаксам?
4. Як вызначыць адлегласць да свяціла, ведаючы яго гарызантальны паралакс?
5. Што такое астранамічная адзінка?
6. У чым сутнасць радыёлакацыйнага метаду вызначэння адлегласцей да нябесных цел?
7. На якой адлегласці ад Зямлі знаходзіцца нябеснае цела, калі яго гарызантальны паралакс роўны $1'$?
8. Вызначце лінейны радыус Месяца, калі падчас назіранняў стала вядома, што яго гарызантальны паралакс у гэты час роўны $57'$, а вуглавы радыус — $15,5'$. Радыус Зямлі прыняць роўным 6400 км.
9. Ацаніце адлегласць ад Сонца да Меркурыя, калі яго найбольшая элангацыя роўна 28° .
10. Вызначце дыяметр Меркурыя, калі пры праходжанні па дыску Сонца яго вуглавый дыяметр аказаўся $11,0''$, а гарызантальны паралакс у гэты момант роўны $14,3''$.

§ 11. Рух касмічных апаратаў

1. Касмічныя скорасці. Найбольш просты выпадак руху цел паблізу ад паверхні Зямлі пад дзеяннем сілы цяжару — свабоднае падзенне з пачатковай скорасцю, роўнай нулю. У гэтым выпадку цела рухаецца прамалінейна з паскарэннем свабоднага падзення ў напрамку да цэнтра Зямлі. Калі цела мае пачатковую скорасць, велічыня якой адрозная ад нуля і вектар якой накіраваны не па вертыкалі, то цела пад дзеяннем сілы цяжару пачне рухацца з паскарэннем свабоднага падзення па крывалінейнай траекторыі.

Разгледзім цела, якое знаходзіцца па-за межамі зямной атмасферы. Будзем меркаваць, што вектар пачатковай скорасці гэтага цела накіраваны па датычнай да паверхні Зямлі. У залежнасці ад значэння пачатковай скорасці далейшы рух цела можа быць розным:

- а) пры малых пачатковых скорасцях (v_{01}, v_{02}, v_{03}) цела ўпадзе на Зямлю;
- б) пры некаторым пэўным значэнні скорасці v_1 (**першая касмічная скорасць**) цела стане штучным спадарожнікам Зямлі і пачне абарачацца вакол яе аналагічна яе натуральнаму спадарожніку — Месяцу;
- в) пры яшчэ большым павелічэнні значэння скорасці і дасягненні наступнага пэўнага значэння v_2 (**другая касмічная скорасць**) цела зможа адысці ад Зямлі так далёка, што сіла зямнога прыцяжэння практычна не будзе ўплываць на яго рух. Цела пачне абарачацца вакол Сонца, як штучная планета;
- г) нарэшце, калі скорасць цела дасягне пэўнага значэння v_3 (**трэцяя касмічная скорасць**), то дадзенае цела назаўсёды пакіне межы Сонечнай сістэмы і паляціць у прастору Галактыкі.

Разгледзім выпадак, калі цела ператвараецца ў штучны спадарожнік Зямлі, г. зн. вызначым першую касмічную скорасць v_1 . Знойдзем гэту скорасць на аснове другога закону Ньютана пры ўмове, што пад дзеяннем сілы прыцягнення цела набывае цэнтраімклівае паскарэнне:

$$G \frac{mM}{R_{\text{арб}}^2} = ma_{\text{ц}}, \quad (1)$$

дзе $R_{\text{арб}} = R + h$ — сярэдні радыус арбіты цела (рыс. 45), R — радыус Зямлі, h — вышыня цела над паверхняй Зямлі, M — маса Зямлі, m — маса цела (спадарожніка).

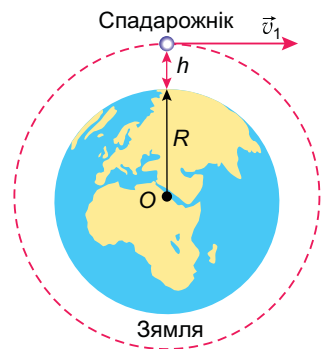


Рис. 45. Рух спадарожніка па кругавой арбіце

Для цэнтраімклівага паскарэння $a_{\text{ц}} = \frac{v_1^2}{R_{\text{арб}}} = \frac{v_1^2}{R+h}$. Падставіўшы гэты выраз у формулу (1), пасля скарачэнняў атрымаем:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}.$$

Каля паверхні Зямлі з улікам выразу для паскарэння свабоднага падзення $g = G \frac{M}{R^2}$ можна атрымаць $h = 0$. Тады першая касмічная скорасць (без уліку супраціўлення паветра) роўна:

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,8 \cdot 6,37 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Такім чынам, цела, скорасць якога роўна $7,9 \cdot 10^3$ м/с і накіравана па датычнай адносна паверхні Зямлі, становіцца штучным спадарожнікам, які рухаецца па кругавой арбіце над Зямлёй. У нябеснай механіцы першая касмічная скорасць называецца таксама **кругавой скорасцю**.

Другая касмічная скорасць вызначаецца з умовы, што цела павінна пакінуць сферу зямнога прыцягнення і стаць спадарожнікам Сонца. Разлікі даюць наступны выраз для вызначэння другой касмічнай скорасці (без уліку супраціўлення паветра):

$$v_2 = \sqrt{2gR}, \quad (3)$$

дзе R — радыус Зямлі.

Выкарыстаўшы выраз (2), знойдзем:

$$v_2 = v_1 \sqrt{2}. \quad (4)$$

Падставіўшы ў (4) ужо вядомае нам значэнне першай касмічнай скорасці, атрымаем, што каля паверхні Зямлі $v_2 \approx 11,2 \cdot 10^3$ м/с. Другая касмічная скорасць называецца таксама скорасцю вызвалення (уцякання, выслізгвання) або **парабалічнай скорасцю**.

Трэцяя касмічная скорасць, або **гіпербалічная скорасць**, — гэта найменшая пачатковая скорасць, з якой цела павінна рухацца, каб пераадолець зямное прыцягненне і выйсці на калясонечную арбіту са скорасцю, неабходнай для таго, каб назаўжды пакінуць межы Сонечнай сістэмы.

Разлікі даюць наступную формулу для знаходжання велічыні гэтай скорасці:

$$v_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_2^2}, \quad (5)$$

дзе $v \approx 29,8 \cdot 10^3$ м/с — скорасць Зямлі на кругавой арбіце руху вакол Сонца.

Падставіўшы значэнне другой касмічнай скорасці v_2 у (5) і правёўшы разлік, атрымаем, што цела павінна мець мінімальную скорасць $v_3 \approx 16,7 \cdot 10^3$ м/с, каб назаўжды пакінуць межы Сонечнай сістэмы.

2. Арбіты касмічных апаратаў. Разлікі траекторый палётаў касмічных апаратаў грунтуюцца на законах нябеснай механікі. Адзначым, што рух касмічных апаратаў апісваецца па законах нябеснай механікі толькі пасля выключэння рэактыўных рухавікоў. На пасіўным участку траекторыі (г. зн. пасля выключэння рухавікоў) касмічныя апараты рухаюцца пад дзеяннем прыцяжэння Зямлі і іншых цел Сонечнай сістэмы.

Элементы арбіты штучных спадарожнікаў Зямлі звязаны паміж сабой формулай

$$v_0^2 = GM \left(\frac{2}{r_0} - \frac{1}{a} \right), \quad (6)$$

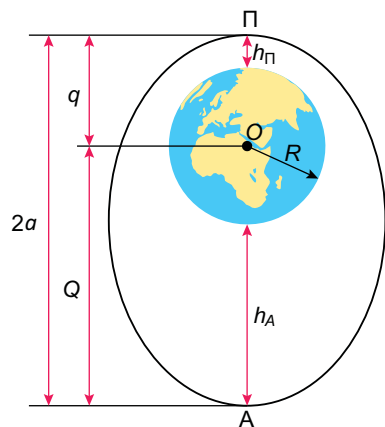
дзе v_0 — пачатковая скорасць спадарожніка, M — маса Зямлі, r_0 — адлегласць пункта выхаду спадарожніка на арбіту ад цэнтра Зямлі, a — вялікая паўвось арбіты спадарожніка. Формула (6) справядлівая для любога пункта эліптычнай арбіты.

Эксцэнтрысітэт арбіты e пры гарызантальным запуску спадарожніка роўны:

$$e = 1 - \frac{q}{a}, \quad (7)$$

дзе q — адлегласць перыгея (найбліжэйшага пункта арбіты ад цэнтра Зямлі).

У выпадку эліптычнай арбіты (рыс. 46): $q = a(1 - e) = R + h_{\text{П}}$, дзе $h_{\text{П}}$ — лінейная вышыня перыгея над паверхняй Зямлі. Адлегласць апагея (найбольш аддаленага пункта арбіты ад цэнтра Зямлі): $Q = a(1 + e) = R + h_{\text{А}}$, дзе $h_{\text{А}}$ — вышыня апагея над зямной паверхняй, R — радыус Зямлі.



Рыс. 46. Эліптычная арбіта штучнага спадарожніка Зямлі

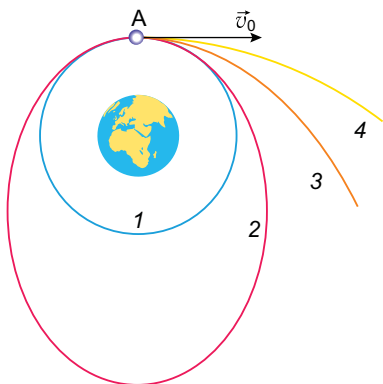


Рис. 47. Формы арбіт касмічных апаратаў: 1 — кругавая; 2 — эліптычная; 3 — парабалічная; 4 — гіпербалічная

На рысунку 47 паказаны арбіты касмічных апаратаў без уліку ўзбурэнняў, г. зн. калі апараты знаходзяцца паблізу ад Зямлі. Калі ж апарат аддаліцца ад Зямлі на значную адлегласць, то на яго далейшы рух будзе ўплываць найперш прыцяжэнне Сонца. радыус сферы дзеяння Зямлі прымаюць роўным прыкладна 930 тыс. км; на мяжы гэтай сферы ўплыў Сонца на касмічны апарат аднолькавы з уплывам Зямлі. момант дасягнення мяжы сферы дзеяння Зямлі лічыцца момантам выхаду касмічнага апарата на арбіту адносна Сонца.

Пры запуску касмічных апаратаў да іншых планет выходзяць з наступнага:

1) геацэнтрычная скорасць касмічнага апарата пры выхадзе на арбіту адносна Зямлі павінна перавышаць другую касмічную скорасць;

2) геліяцэнтрычная арбіта касмічнага апарата павінна перасякацца з арбітай дадзенай планеты;

3) момант запуску неабходна выбраць так, каб арбіта была найбольш аптымальнай з пункту гледжання тэрмінаў палёту, затрат паліва і шэрага іншых патрабаванняў.

Адным з класаў міжпланетных траекторый з'яўляюцца **энергетычна аптымальныя арбіты**, якія адпавядаюць найменшай геацэнтрычнай скорасці касмічных апаратаў у момант дасягнення мяжы сферы дзеяння Зямлі. На рысунку 48 паказана такая траекторыя пералёту на Марс, пабудаваная на меркаванні, што арбіты Зямлі і Марса кругавыя. Гэта траекторыя называецца гоманайскай у гонар нямецкага астранома Вальтэра Гомана, які займаўся тэорыяй касмічных палётаў.

У момант запуску касмічнага апарата Зямля знаходзіцца ў пункце 1. Геліяцэнтрычная скорасць v_2 касмічнага апарата павінна быць накіравана гэтак жа, як і геліяцэнтрычная скорасць Зямлі, — па датычнай да арбіты Зямлі. момант запуску трэба выбраць так, каб касмічны апарат і Марс, якія рухаюцца па сваіх арбітах, адначасова дасягнулі пункта 2. Літарай S аб-

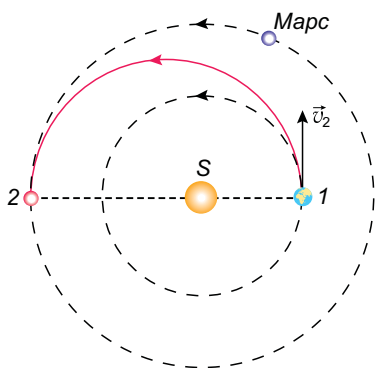


Рис. 48. Гоманайская траекторыя пералёту з Зямлі на Марс

значана Сонца. Разлікі паказваюць, што час палёту ад Зямлі да Марса па дадзенай траекторыі будзе роўны 258 суткам (без уліку параўнальна кароткага часу палёту да мяжы сферы дзеяння Зямлі).

3. Праблемы і перспектывы касмічных даследаванняў. Касманаўтыка — гэта комплексная галіна навукі і тэхнікі, якая забяспечвае даследаванні і выкарыстанне касмічнай прасторы з дапамогай аўтаматычных і пілтуемых касмічных апаратаў. Галоўнымі мэтамі касманаўтыкі (у парадку іх дасягнення) з’яўляюцца: вывадзенне штучнага спадарожніка на арбіту Зямлі, палёт чалавека ў космас, палёт чалавека на Месяц, палёт чалавека на іншыя планеты, палёт да зорак. Першыя тры мэты дасягнуты.

Пачатак касмічнай эры быў закладзены ў СССР запускам першага штучнага спадарожніка Зямлі 4 кастрычніка 1957 г. Другая найважнейшая дата касмічнай эры — 12 красавіка 1961 г. У гэты дзень Ю. А. Гагарын упершыню ў гісторыі чалавецтва выканаў палёт у космас на касмічным караблі «Усход».

Значны ўклад у даследаванні касмічнай прасторы ўнеслі касманаўты-беларусы П. І. Клімук, У. В. Кавалёнак, А. В. Навіцкі. Палёты чалавека ў космас для нас сталі ўжо амаль паўсядзённай з’явай.

Касманаўтыка спрыяла ўзнікненню і развіццю новых тэхналогій. У перспектыве — глабальны экалагічны маніторынг Зямлі, ліквідацыя пагроз астэроідна-каметнай небяспекі.

Сучасная тэорыя касмічных палётаў — **астрадынаміка** — грунтуецца на класічнай нябеснай механіцы і тэорыі кіравання рухам лятальных апаратаў.



Ю. А. Гагарын



П. І. Клімук



У. В. Кавалёнак



А. В. Навіцкі

Касманаўтыка мае патрэбу ў стараннай распрацоўцы аптымальных траекторый касмічных апаратаў з улікам шэрага ўмоў і абмежаванняў.

Стварэнне ракетна-касмічных комплексаў — вельмі складаная навукова-тэхнічная праблема. Касмічныя апараты павінны быць здольнымі да працяглага самастойнага функцыянавання ва ўмовах касмічнай прасторы. Акрамя таго, узнікае шэраг дадатковых медыка-біялагічных праблем (абарона ад касмічнага асяроддзя, жыццезабеспячэнне экіпажа і г. д.). Усё гэта патрабуе распрацоўкі спецыяльных сістэм. Для забеспячэння палётаў касмічных апаратаў неабходна шырокая сетка наземных службаў кіравання.

Па сваёй сутнасці касманаўтыка — гэта вобласць агульначалавечай дзейнасці, якая хоць і праводзіцца ў рамках нацыянальных праектаў, але закранае інтарэсы многіх краін.



Галоўныя вывады

1. Скорасць, з якой касмічны апарат рухаецца па кругавой арбіце вакол нябеснага цела, называюць першай касмічнай скорасцю.
2. Скорасць, неабходную касмічнаму апарату, каб выйсці па-за межы гравітацыйнага дзеяння Зямлі і стаць спадарожнікам Сонца, называюць другой касмічнай скорасцю.
3. Скорасць, пры якой касмічны апарат, запушчаны з паверхні Зямлі, пакідае Сонечную сістэму, называюць трэцяй касмічнай скорасцю.
4. Арбіты касмічных апаратаў уяўляюць сабой элементы эліпсаў, парабал і гіпербал.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Апішыце першую, другую і трэцюю касмічныя скорасці.
2. Па якіх арбітах могуць рухацца касмічныя апараты? Якім геаметрычным лініям адпавядаюць арбіты касмічных апаратаў для першай, другой і трэцяй касмічных скорасцей?
3. Якія арбіты касмічных апаратаў называюць гоманаўскімі?
4. Вызначце перыяд абарачэння штучнага спадарожніка Зямлі, калі найвышэйшы пункт яго арбіты над паверхняй Зямлі 36 тыс. км, а найніжэйшы — 300 км. Зямлю лічыце шарам радыусам 6370 км.
5. Разлічыце першую і другую касмічныя скорасці для Месяца. Улічыце, што маса Месяца — $7,35 \cdot 10^{22}$ кг, а яго радыус — 1738 км.
6. Штучны спадарожнік Зямлі запушчаны ў плоскасці зямнога экватара так, што ўвесь час знаходзіцца ў зеніце аднаго і таго ж пункта зямнога шара. Вызначце вышыню (h) гэтага ШСЗ над паверхняй Зямлі. Пры рашэнні параўнайце рух спадарожніка з рухам Месяца. $T_M = 27,3$ сут, $\sigma_M = 384\,000$ км. Радыус Зямлі $R_3 = 6400$ км.
7. Вызначце час палёту касмічнага апарата ад Зямлі да Марса па гоманаўскай арбіце. Вялікую паўвось арбіты Марса прыняць роўнай 1,52 а. адз.

Раздзел IV

Параўнальная планеталогія

§ 12. Агульныя характарыстыкі планет. Паходжанне Сонечнай сістэмы

1. Будова і склад Сонечнай сістэмы. Пад Сонечнай сістэмай разумеюць усю касмічную прастору і ўсю матэрыю, якая знаходзіцца ў сферы прыцяжэння Сонца. Сонечная сістэма ўключае ў сябе: зорку Сонца, што знаходзіцца ў цэнтры сістэмы; планеты са спадарожнікамі; карлікавыя планеты, малыя целы (астэроіды, каметы, метэарытныя і метэорныя целы), а таксама міжпланетны пыл, плазму і фізічныя палі ў азначаных межах.

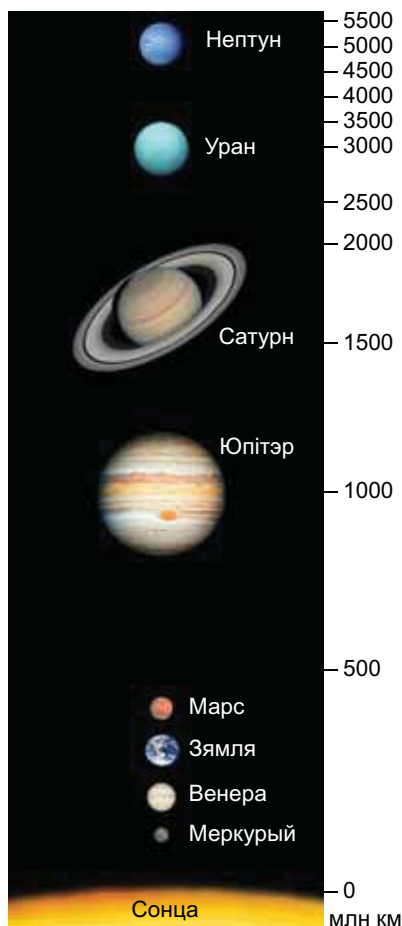
У Сонечнай сістэме ёсць 8 вялікіх планет. Па меры аддалення ад Сонца яны размешчаны ў наступным парадку: Меркурый, Венера, Зямля, Марс, Юпітэр, Сатурн, Уран, Нептун.

Планетай называюць нябеснае цела, якое рухаецца вакол зоркі ў яе гравітацыйным полі, мае форму, блізкую да сферычнай, свеціцца адбітым ад зоркі святлом і расчысціла вобласць сваёй арбіты ад іншых дробных аб'ектаў. Вылучаюць планеты зямной групы (Меркурый, Венера, Зямля, Марс) і планеты-гігanty (Юпітэр, Сатурн, Уран, Нептун). Масы планет занадта малыя, каб унутры іх маглі працякаць характэрныя для зорак ядзерныя рэакцыі. Вакол планет, акрамя Меркурыя і Венеры, абарачаюцца спадарожнікі, якіх зараз вядома ўжо больш за 200.

Па геліяцэнтральных арбітах рухаюцца карлікавыя планеты, астэроіды і метэарытныя целы. Акрамя таго, па моцна выцягнутых арбітах рухаюцца ледзяныя целы — каметы.

Планеты і іншыя целы Сонечнай сістэмы пры руху па арбітах сутыкаюцца з метэорнымі цэламі, міжпланетным пылам; узаемадзейнічаюць з электрамагнітным выпраменьваннем Сонца і плазмай, якая вылучаецца Сонцам.

2. Асаблівасці будовы Сонечнай сістэмы. Сонечная сістэма мае наступныя характэрныя рысы, вядомыя з астранамічных назіранняў і касмічных даследаванняў.



Рыс. 49. Параўнальныя памеры і адлегласці планет ад Сонца

невялікія, маламасіўныя, аднак з вялікай сярэдняй шчыльнасцю, павольным вярчэннем і малой колькасцю спадарожнікаў (або без іх). Яны размешчаны паблізу ад Сонца. **Планеты-гіганы** больш масіўныя за планеты зямной групы, буйнейшыя па памерах і з меншай сярэдняй шчыльнасцю, з вялікай скорасцю вярчэння і шматлікімі спадарожнікамі. Планеты-гіганы маюць магутныя атмасферы, якія складаюцца ў асноўным з вадароду і гелію.

5. Момент колькасці руху ($m \cdot v \cdot r$) паміж Сонцам і планетамі размяркоўваецца нераўнамерна. На долю Сонца, у якім засяроджана амаль уся маса Сонечнай сістэмы, прыпадае толькі 2 % яе поўнай колькасці руху.

1. Асноўная маса рэчыва Сонечнай сістэмы засяроджана ў Сонцы, якое ўяўляе сабой звычайную зорку. На масу ўсіх іншых складальных сістэмы прыпадае 1/750 частка масы Сонца (рыс. 49). Такім чынам, дамінуючым у Сонечнай сістэме з'яўляецца гравітацыйнае поле Сонца.

2. Арбіты планет і большасці астэроідаў ляжаць амаль у адной плоскасці, нязначна нахіленай да плоскасці сонечнага экватара. Нахіл экліптыкі да плоскасці сонечнага экватара складае $7^\circ 15'$. Арбіты планет амаль кругавыя, г. зн. іх эксцэнтрысітэты мала адрозніваюцца ад нуля.

3. Усе планеты і астэроіды абарачаюцца вакол Сонца ў адным і тым жа напрамку. Вярчэнне Сонца вакол сваёй восі адбываецца ў тым жа напрамку, што і рух планет вакол Сонца. Планеты абарачаюцца вакол сваіх восей у напрамку, які супадае з напрамкам іх абарачэння вакол Сонца. Выключэннем з'яўляюцца Венера і Уран, якія верцяцца ў процілеглы бок. Пры гэтым вось вярчэння Урана ляжыць амаль у плоскасці яго арбіты. Нахіл восі вярчэння іншых планет не перавышае 60° да плоскасці іх арбіт.

4. Планеты падзяляюцца на два тыпы: планеты зямной групы і планеты-гіганы. **Планеты зямной групы** — цвёрдыя целы, параўнальна

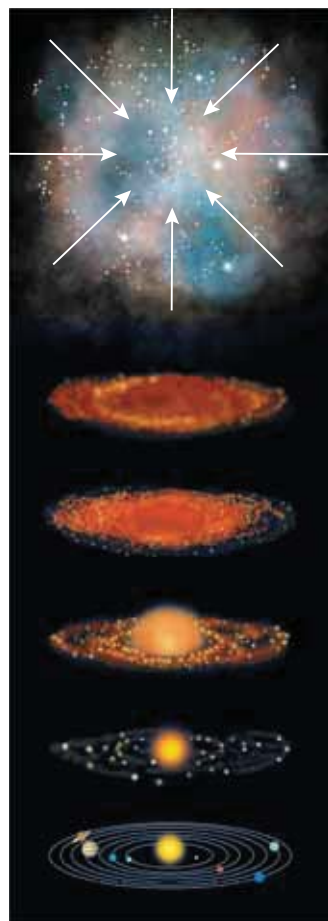
6. Арбіты большасці спадарожнікаў планет блізкія да кругавых. Рух спадарожнікаў па арбітах адбываецца ў тым жа напрамку, у якім планеты рухаюцца вакол Сонца. Арбіты буйных спадарожнікаў у асноўным маюць малы нахіл да плоскасцей экватараў сваіх планет.

Пералічаныя асаблівасці неабходна ўлічваць пры пабудове мадэлі (тэорыі) фарміравання ўсяго комплексу цел Сонечнай сістэмы.

3. Паходжанне Сонечнай сістэмы. Для пабудовы тэорыі паходжання Сонечнай сістэмы неабходна ведаць узрост нябесных цел. Паводле сучасных уяўленняў, узрост найстаражытнейшых парод Зямлі дасягае 4,64 млрд гадоў. Аналіз парод, якія былі дастаўлены з Месяца, паказаў, што іх узрост ад 2 да 4,5 млрд гадоў. Узрост жалезных і каменных метэарытаў ацэньваецца ад 0,5 да 5 млрд гадоў. Узрост Сонца і іншых асобных зорак вызначаецца на аснове тэорыі будовы і эвалюцыі зорак. Для Сонца гэта прыблізна 5 млрд гадоў, што супадае з узростам іншых цел сістэмы. Адсюль вынікае, што Сонца і планеты сфарміраваліся з аднаго воблака пылу і газу.

Упершыню ідэя аб утварэнні Сонца і планет з рэчыва адзінай газавай туманнасці была сфармулявана Імануілам Кантам у 1755 г. і дапрацавана П'ерам Сіманам Лапласам у 1796 г. Паводле гэтай гіпотэзы, Сонечная сістэма ўтварылася з гарачага газавога воблака, якое вярцелася і сціскалася пад дзеяннем гравітацыі, а потым распадалася на фрагменты (рыс. 50). Аднак гэта гіпотэза была пераканаўчай з-за мноства супярэчнасцей. Англійскі вучоны Джэймс Джынс у 1919 г. прапанаваў гіпотэзу, паводле якой планетнае рэчыва было «вырвана» з Сонца пад дзеяннем зоркі, якая прайшла блізка ад яго. Вырванае сонечнае рэчыва распалася на асобныя часткі, з якіх утварыліся планеты.

Вынікі фізіка-хімічных даследаванняў метэарытаў і зямных парод падказвалі, што гэтыя целы ўтварыліся не з газавых згусткаў, а з цвёрдага рэчыва. У 1944 г. сістэматычнай распрацоўкай тэорыі ўтварэння планет з цвёрдых часціц калясонечнага дапланетнага воблака заняўся О. Ю. Шміт. Гэта тэорыя развіваецца і ў цяперашні час.



Рыс. 50. Утварэнне Сонечнай сістэмы паводле гіпотэзы О. Ю. Шміта

Можна вылучыць наступныя асноўныя этапы паходжання і ранняй эвалюцыі Сонечнай сістэмы.

1. Каля 4,6 млрд гадоў назад адбыўся выбух звышновай зоркі паблізу ад месца нараджэння Сонечнай сістэмы. Ударная хваля ад выбуху распаўсюдзілася ў касмічнай прасторы. Пад яе ўздзеяннем пачало згушчацца газапылавое воблака, якое складалася з вадароду, гелію і розных па складзе часціц, што ўтрымлівалі металы, а таксама рэдкія ізатопы цяжкіх хімічных элементаў. У ім утварыліся ўшчыльненні, узбагачаныя рэчывам звышновай зоркі. Ушчыльненне, якое спачатку павольна вярцелася пад дзеяннем сіл гравітацыі, пачало сціскацца і ператварацца ў дыскападобнае газапылавое воблака. Пазней у цэнтры гэтага воблака ўтварыцца маладое Сонца. Утвораны вакол яго протапланетны дыск паглыне большую частку моманту колькасці руху.

2. Паступова ў дыску газапылавога воблака маленькія пылінкі пачалі аб'ядноўвацца і захопліваць газы з навакольнай прасторы. З дробных часцінак утвараліся больш буйныя камякі, а з іх фарміраваліся зародкі будучых планет (памерамі ў некалькі кіламетраў) — **планецезіمالі**, а пазней і самі планеты. Ва ўнутранай зоне лёгкія элементы (вадарод, гелій) пад дзеяннем светлага ціску пакідалі цэнтральныя часткі дыска і пераходзілі на перыферыю. Таму паблізу ад Сонца планецезіمالі фарміраваліся цалкам з камяністых мінералаў і злучэнняў металаў і ў рэшце рэшт ператварыліся ў планеты зямной групы. Часцінкі ў сярэдняй халоднай зоне пакрываліся лёдам, ядры будучых планет-гігантаў хутка раслі, захопліваючы навакольны газ. У самай халоднай вонкавай частцы дыска рэчыва, якое кандэнсавалася, было амаль цалкам ледзяным. Мноства асобных ледзяных планецезімалей і глыб утварылі ядры камет і ледзяныя астероіды.

Планеты зямной групы амаль дасягнулі сваіх памераў прыкладна праз 100 млн гадоў.

3. Далейшае гравітацыйнае сцісканне паднімала тэмпературу ў нетрах протапланет да тэмпературы плаўлення жалеза. З гэтага часу цяжкія кампаненты пачалі аддзяляцца і імкнуцца да цэнтра планет, а больш лёгкія рэчывы — паднімацца да паверхні. На працягу мільярдаў гадоў працягвалася ўтварэнне кары — вонкавага слоя планет зямной групы. Разаграванне Зямлі, напрыклад, суправаджалася выдзяленнем газаў і вадзяной пары. Паступова вадзяная пара кандэнсавалася і ўтварала моры і акіяны, а газы — атмасферу. Па складзе першасная атмасфера істотна адрознівалася ад сучаснай.

Спадарожнікі планет, якія рухаюцца ў напрамку вярчэння планет, з'явіліся ў выніку тых жа працэсаў, што і самі планеты. Спадарожнікі, якія рухаюцца ў адваротным напрамку, былі захоплены планетай.



! Галоўныя вывады

1. Сонечная сістэма — гэта матэрыя і ўся касмічная прастора, што знаходзіцца ў сферы прыцяжэння Сонца.
2. Сонечная сістэма складаецца з Сонца, вялікіх і карлікавых планет і іх спадарожнікаў, малых цел, міжпланетнага пылу, плазмы, фізічных палёў.
3. Галоўныя асаблівасці Сонечнай сістэмы заключаюцца ў тым, што яе асноўная маса засяроджана ў Сонцы, арбіты планет і большасці астэроідаў ляжаць амаль у адной плоскасці, абарачаюцца ў тым жа напрамку, што і Сонца.
4. Сярод планет Сонечнай сістэмы адрозніваюць планеты зямной групы і планеты-гігanty.
5. Сонечная сістэма ўтварылася ў працэсе эвалюцыі з газавога воблака, якое вярцелася.

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што разумеюць пад Сонечнай сістэмай?
2. Што называюць планетай? Якія планеты ўваходзяць у склад Сонечнай сістэмы?
3. Пералічыце асноўныя асаблівасці будовы Сонечнай сістэмы.
4. Які ўзрост найстаражытнейшых парод Зямлі; мінералаў, якія прывезены з Месяца; метэарытаў, што ўпалі на Зямлю?
5. У чым сутнасць гіпотэз І. Канта, П. Лапласа, Дж. Джынса, О. Ю. Шміта аб паходжанні Сонца і планет?
6. Назавіце асноўныя этапы паходжання і ранняй эвалюцыі Сонечнай сістэмы.

§ 13. Планеты зямной групы

1. Меркурый. Меркурый — самая блізкая да Сонца планета. Яна пастаянна «хаваецца» ў сонечных праменях, таму яе вельмі цяжка ўбачыць зямному назіральніку.

У Меркурыя няма атмасферы, яго паверхня не абаронена ад пякучых праменняў Сонца днём і касмічнага холаду ноччу. Удзень на паверхні планеты ў экватарыяльных раёнах тэмпература падыходзіць да $+430^{\circ}\text{C}$, а ўначы апускаецца да -170°C . Перапад тэмператур адбываецца павольна, паколькі сонечныя суткі на Меркурыі роўны 176 зямным.



Рыс. 51. Меркурый

Рыс. 52. Крутыя ўступы
на паверхні Меркурыя

Уся камяністая паверхня Меркурыя пакрыта шматлікімі кратарамі (рыс. 51). Большасць з іх утварыліся ў выніку падзення метэарытаў. Кратары на картах Меркурыя названы ў гонар славутых прадстаўнікоў сусветнай культуры (Бетховен, Гамер, Дастаеўскі, Пушкін, Талстой і інш.).

Вось вярчэння Меркурыя перпендыкулярна да яго арбіты, таму дно каляпалярных кратараў ніколі не асвятляецца Сонцам. Гэтыя зоны з'яўляюцца сховішчамі вадзянога лёду, перамяшанага з горнай пародай.

Горы, якія сустракаюцца на Меркурыі, дасягаюць вышыні ўсяго 2—4 км. На планеце выяўлены ўступы вышынёй 2—3 км, што цягнуцца на сотні кіламетраў (рыс. 52). Магчыма, яны з'явіліся пры фарміраванні планеты з-за нераўнамернага сціскання ў працэсе ахаладжэння.

Паблізу ад паверхні Меркурыя выяўлены атамы гелію і вадароду, а таксама аргону і натрыю. Іх крыніцамі з'яўляюцца сонечны вецер і рэчыва планеты, якое награвецца і абпраменьваецца Сонцам.

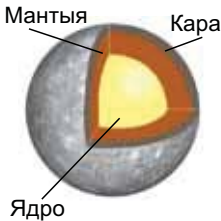
Магнітнае поле планеты надзвычай малое, яго напружанасць у 100 разоў меншая за зямную.

Параметры Меркурыя глядзіце ў табліцы 2.

Табліца 2. Параметры Меркурыя

Зорная велічыня (максімальная)	−2,2	Дыяметр па экватары	4880 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	57,9 млн км	Маса (Зямля = 1)	0,055
	0,387 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$5,43 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

Канец таблицы

Перыяд абарачэння вакол Сонца	88 зямных сутак	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	0,38
Перыяд вярчэння вакол восі	58,6 зямных сутак	Тэмпература паверхні на экватары	Ад -170°C да $+430^{\circ}\text{C}$
			



2. Венера. Венера — другая ад Сонца планета Сонечнай сістэмы (рыс. 53). Яна амаль такіх жа памераў, як Зямля, а яе маса складае каля 80 % ад зямной масы. На небе яна назіраецца раніцай ці вечарам у выглядзе вельмі яркага святла. Шчыльная атмасфера Венеры доўга захоўвала таямніцы яе паверхні. Вучоныя яшчэ ў сярэдзіне XX ст. думалі, што ўся планета пакрыта трапічнымі лясамі. Аднак савецкія касмічныя апараты «Венера», якія дасягнулі паверхні планеты, сфатаграфавалі мёртвую распаленую пустыню. Тэмпература паверхні дасягае $+464^{\circ}\text{C}$ і амаль не змяняецца на працягу сутак (гл. табл. 3 на с. 77). Шчыльныя воблакі прапускаюць мала сонечнага святла і ствараюць «змрочную» асветленасць нават тады, калі Сонца знаходзіцца высока над гарызонтам.

Большую частку паверхні займаюць раўніны. Самыя высокія горы, якія падносяцца на 11 км над сярэднім узроўнем паверхні, — Горы Максвела. На Венеры выяўлены кратары дыяметрам да соцень кіламетраў (рыс. 54). Буйныя



Рыс. 53. Венера. Фотаздымак выкананы ва ультрафіялетовых праменях



Рыс. 54. Венера. Раён Гор Максвела: вялізны кратар дыяметрам каля 100 км



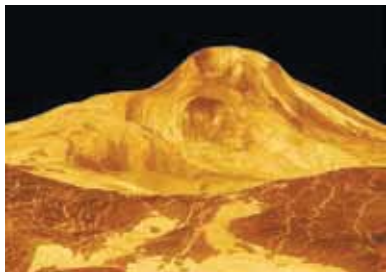


Рис. 55. Гора Маат —
патухлы вулкан на Венеры

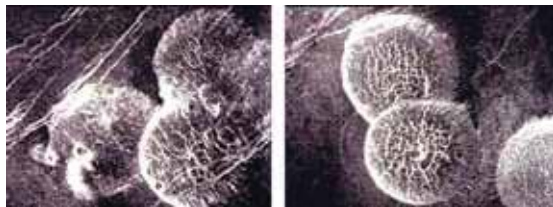


Рис. 56. Застылыя пузыры вулканічнай лавы
на Венеры. Радыёлакацыйны відарыс,
перададзены касмічным караблём «Магелан»
у 1991 г.

кратары названы ў гонар славутых жанчын свету (Ахматава, Войніч, Дункан, Арлова) ці проста жаночымі імёнамі (Антаніна, Валянціна, Зоя, Ірына, Нана, Оля і інш.). Шырокія ўзвышшы-мацерыкі маюць назвы: Зямля Афрадыты, Зямля Іштар, Зямля Лады і інш.

Каля 500 млн гадоў назад на Венеры адбылася глабальная геалагічная катастрофа. Сотні тысяч дзеючых вулканаў выверглі вялізную колькасць лавы, якая накрыла ўсю паверхню планеты. Самы высокі патухлы вулкан (рыс. 55) — гора Маат, названая ў гонар егіпецкай багіні ісціны і парадку, — уздымаецца над навакольнай раўнінай амаль на 8 км. Асобныя вулканы дасягаюць вышыні 3 км пры шырыні каля падножжа 500 км. Шматлікія застылыя пузыры лавы маюць купалападобную форму (рыс. 56).

Для даследавання рэльефу планеты выкарыстоўваўся метада радыёлакацыі. Аўтаматычная міжпланетная станцыя «Магелан» з 1990 па 1994 гг. правяла глабальную радыёлакацыю паверхні Венеры. На аснове атрыманых даных былі складзены рэльефныя карты і ўзноўлены дэталі паверхні ў аб'ёмным адлюстраванні (рыс. 57).

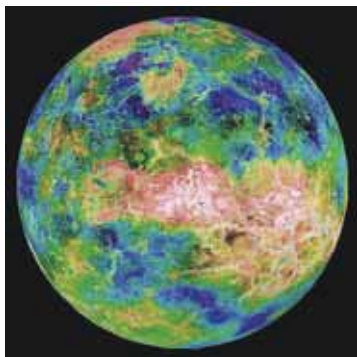


Рис. 57. Рэльефная карта
паверхні Венеры, складзеная
паводле даных радыёлакацый-
ных даследаванняў касмічнага
апарата «Магелан»

Атмасфера Венеры складаецца ў асноўным з вуглякіслага газу. Ціск каля паверхні планеты ў 92 разы вышэйшы, чым каля паверхні Зямлі. З-за такога хімічнага складу, а таксама вялікай шчыльнасці атмасфера Венеры ўяўляе сабой вялікі «парнік». Парніковы эффект і абумоўлівае высокую тэмпературу паверхні.

Воблакі Венеры маюць слаістую структуру. Яны размяшчаюцца на вышынях ад 48 да 70 км і ўтрымліваюць кропелькі сернай кіслаты. Скорасць ветру каля паверхні планеты дасягае 1 м/с. У атмасферы назіраюцца маланкі.

Магнітнае поле Венеры вельмі малое з-за павольнага вярчэння планеты вакол восі з усходу на захад. Яго напружанасць у 10^4 разоў меншая, чым у зямнога. Магнітасфера амаль поўнаасця адсутнічае, таму паток зараджаных часціц, якія ідуць ад Сонца і сутыкаюцца з атмасферай планеты, захоплівае яе рэчыва і фарміруе іонны шлейф. Касмічныя абсерваторыі вызначылі, што гэты «хвост» расцягваецца ад 190 да 270 тыс. км.

Параметры Венеры глядзіце ў табліцы 3.

Табліца 3. Параметры Венеры

Зорная велічыня (максімальная)	−4,6	Дыяметр па экватары	12 104 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	108,2 млн км	Маса (Зямля = 1)	0,815
	0,723 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$5,24 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Сонца	224,7 зямных сутак	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	0,9
Перыяд вярчэння вакол восі (адваротнае вярчэнне)	243 зямных сутак	Тэмпература паверхні	+464 °C



3. Зямля. Зямля — трэцяя ад Сонца планета Сонечнай сістэмы. З космаса наша планета выглядае прыгожым блакітным шарам (рыс. 58). Праз воблачнае покрыва можна разгледзець мацерыкі і акіяны. Акіяны займаюць амаль 71 % паверхні Зямлі.

Дэталі паверхні Зямлі і ўмовы жыцця вам добра вядомы, таму мы спынімся больш падрабязна на будове яе нетраў. Мадэлі ўнутранай будовы Зямлі і астатніх планет зямной групы падобныя.

Па запісах ваганняў зямной паверхні пры землетрасеннях — **сейсмаграмах** — было выяўлена, што ўнутраная будова планеты па вертыкалі



Рыс. 58. Фатаграфія Зямлі з космаса

слаістая. Па хімічным складзе і фізічных характарыстыках вылучаюць тры асноўныя сферычныя абалонкі: цвёрдую кару, мантыю і ядро. Самы тонкі вонкавы слой — **цвёрдая кара**. У Зямлі яна распасціраецца ў сярэднім на глыбіню 35 км (акіянічная кара — 10 км, кантынентальная кара — 70 км). Па хімічным саставе зямная кара складаецца з кіслароду (49,1 %), крэмнію (26,0 %), алюмінію (7,5 %), жалеза (4,2 %), кальцыю (3,3 %) і іншых хімічных элементаў. Агульная маса зямной кары складае ўсяго 0,8 % агульнай масы Зямлі. Кара аддзяляецца ад наступнай **мантыі** выразнай мяжой.

Ядро — найбольш шчыльная частка планетных нетраў. У цэнтры Зямлі шчыльнасць рэчыва дасягае $13\,500\text{ кг/м}^3$, а тэмпература ацэньваецца ў 6000 К. Радыус ядра складае 55 % радыуса Зямлі, а маса — каля 30 % масы планеты. Зямное ядро падзяляецца на знешняе і цвёрдае ўнутранае радыусам 1270 км. Пераходная зона паміж знешняй і ўнутранай часткамі вельмі тонкая — каля 5 км. У Венеры аналагічнае ядро. Найбольш магутнае ядро мае Меркурый, яго радыус складае 70 % радыуса, а маса — 60 % масы ўсёй планеты. У Марса невялікае ядро масай 7 % ад масы ўсёй планеты, яго радыус складае 28 % радыуса Марса. Ядры планет у асноўным складаюцца з жалеза з прымессю нікелю, серы. Вадкі знешні слой ядра, магчыма, ёсць у Меркурыя і Венеры.

Крыніцамі награвання нетраў планет з'яўляюцца:

- 1) выдзяленне цеплаты пры распадзе радыеактыўных элементаў;
- 2) энергія, якая выдзяляецца пры ўдарах цел розных памераў (астэроідаў і інш.) аб паверхню планеты;
- 3) награванне за кошт сціскання рэчыва планеты і гравітацыйнай дыферэнцыяцыі.

Гравітацыйная дыферэнцыяцыя ўяўляе сабой працэс паступовага пераразмеркавання рэчыва па шчыльнасці — цяжкія элементы імкнуцца да цэнтра, а лёгкія падымаюцца да паверхні. Гэты працэс у Зямлі яшчэ не завяршыўся. Рух рэчыва ўнутры планеты ўплывае на кару, выклікае землетрасенні, гораўтварэнне, тэктанічныя і вулканічныя працэсы.

Магнітнае поле Зямлі генеруецца ў вадкім металічным слоі ядра.

Зямная атмасфера складаецца ў асноўным з азоту (78 %) і кіслароду (21 %).

Параметры Зямлі глядзіце ў табліцы 4.

Табліца 4. Параметры Зямлі

Вугал нахілу экватара да плоскасці арбіты	23,4°	Дыяметр па экватары	12 756 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	149,6 млн км	Маса	$5,97 \cdot 10^{24}\text{ кг}$
	1 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$5,52 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$

Канец таблиці

Перыяд абарачэння вакол Сонца	365,26 зямных сутак	Тэмпература паверхні	Ад -89°C да $+57^{\circ}\text{C}$
Перыяд вярчэння вакол восі	23,93 г		



Мантыя Зямная кара
Унутранае ядро Знешняе ядро

4. Марс. Марс — чацвёртая ад Сонца планета Сонечнай сістэмы (рыс. 59). Для назіральніка яна паўстае ў выглядзе яркага чырвонага святла. З дапамогай аматырскіх тэлескопаў можна ўбачыць палярныя шапкі Марса і некаторыя буйныя дэталі яго паверхні.

Атрыманыя з дапамогай касмічных апаратаў відарысы паверхні Марса паказалі, што планета ўяўляе сабой мёртвую пустыню, значная частка якой пакрыта чырванаватым пяском і ўсеяна камянямі. Чырвоны колер паверхні Марса тлумачыцца высокім утрыманнем у глебе аксідаў жалеза.

На паверхні Марса атмасфера вельмі разрэджаная, таму адбываюцца вялікія сутачныя ваганні тэмпературы: калі ўдзень тэмпература на экватары падываецца летам да $+35^{\circ}\text{C}$, то ноччу яна апускаецца да -65°C . Зімой на паверхні Марса назіраюцца снег і іней (рыс. 60). Вада ў вадкім стане там існаваць не



Рыс. 59. Марс



Рыс. 60. Снег на паверхні Марса.
Фатаграфія зроблена спускальным
апаратам «Вікінг-2»

мога. Ціск каля паверхні планеты ў 100—170 разоў меншы, чым на Зямлі. Ва ўмовах нізкага атмасфернага ціску вада закіпае пры тэмпературы $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ і адразу ж выпараецца.

На Марсе вельмі шмат ударных кратараў вялікіх памераў. Гэта сведчыць аб тым, што планета перажыла мноства катастроф, якія змянілі ўмовы на яе паверхні. Кратары на Марсе названы ў гонар вучоных, якія прысвяцілі сваю дзейнасць вывучэнню Марса і планет Сонечнай сістэмы (напрыклад, кратар Ціхаў).

Паверхня Марса характарызуецца рэзка выяўленай асіметрыяй. Паўднёвае гарыстае паўшар'е ў сярэднім на 2 км вышэйшае за Паўночнае. На здымках марсіянскай паверхні добра бачны шматлікія буйныя і дробныя каньёны. Іх шырыня дасягае 600 км, глыбіня — 5 км. Самы вялікі з іх — Даліна Марынера — мае даўжыню амаль 5000 км (глыбіня 7—10 км, шырыня 600 км). На рысунку 59 ён бачны як цёмная структура, якая перасякае дыск планеты.

Уражваюць сваімі маштабамі патухлыя вулканы Марса. Самы высокі — гара Алімп (рыс. 61) — уздымаецца над паверхняй на 27 км. Дыяметр яго падножжа дасягае 600 км. Узрост гэтых структур — каля 400 млн гадоў.



Рыс. 61. Гара Алімп на Марсе



Рыс. 62. Высахлыя рэчышчы марсіянскіх рэк

Вядомыя палярныя шапкі Марса ўтвораны тоўстымі (парадку 3 км) слямі лёду, перамяшанага з пылам. Верхні слой палярных шапак складаецца з «сухога лёду» (замерзлага вуглякіслага газу — CO_2) з невялікай прымессю звычайнага лёду (H_2O). Тэмпература тут апускаецца ніжэй за $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$. Калі на адным з паўшар'яў пачынаецца зіма, адпаведная палярная шапка пачынае расці і дасягае 57° шыраты ў Паўночным паўшар'і і 45° у Паўднёвым. З надыходам вясны шапка пачынае раставаць. На паўднёвай палярнай шапцы назіраюцца гейзеры. Пад час фарміравання палярных шапак у атмасферы планеты можна назіраць блакітнавата-белыя воблакі.

Загадкавыя марсіянскія даліны, падобныя да высохлых рэчышчаў рэк (рыс. 62), былі створаны воднымі патокамі, якія зніклі больш мільярда гадоў назад. Аб наяўнасці вады на Марсе ў старадаўнія часы сведчаць многія факты. У 1999 г. былі апублікаваны вынікі даследаванняў, якія даказвалі, што на Марсе

раней існаваў акіян вады. Гэта высветлілася пры вывучэнні фотаздымкаў, перададзеных на Зямлю станцыяй «Марс Глобал Сурвэер», па асаблівасцях рэльефу, які ўяўляў сабой старадаўнюю берагавую лінію. Акіян мог існаваць, пакуль тэмпература паверхні Марса была дастаткова высокай. Планета пачала ахалоджвацца каля мільярда гадоў назад. Тонкая атмасфера Марса не перашкаджала «выпарэнню» вады ў міжпланетную прастору. Пры паніжэнні тэмпературы замерзлая вада ўперамешку з пяском утварыла падпаверхневую ледзяную абалонку — **крыясферу**. Крыясфера Марса ўтрымлівае колькасць вады, эквівалентную слою таўшчынёй каля 1 км па ўсёй планеце.

Атмасфера Марса мае нізкую шчыльнасць і складаецца ў асноўным з вуглякіслага газу (95 %). Скорасць ветру каля паверхні планеты не перавышае 15 м/с, а падчас пылавых бур дасягае 100 м/с. Марс — адзіная планета, дзе назіраюцца глабальныя пылавыя буры. Яны ствараюць антыпарніковы эффект, паколькі воблакі пылу не прапускаюць сонечнае выпраменьванне да паверхні. Таму паверхня моцна ахалоджваецца, а пыл і навакольная атмасфера, наадварот, разаграюцца. У атмасферы Марса назіраюцца пясчаныя віхры, якія закручваюць слупы пылу вышынёй да 8 км. Часцінкі воблакаў складаюцца з сілікатных і ледзяных пылінак. Пыл на Марсе падымаецца так высока ў атмасферу, што закрывае гару Алімп.

Марс мае слабае магнітнае поле з напружанасцю ў 500 разоў меншай, чым зямное поле.

Параметры Марса глядзіце ў табліцы 5.

Табліца 5. Параметры Марса

Зорная велічыня (максімальная)	−2,9	Дыяметр па экватары	6792 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	227,9 млн км	Маса (Зямля = 1)	0,107
	1,524 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$3,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Сонца	1,88 зямнога года	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	0,38
Перыяд вярчэння вакол восі	24,62 г	Тэмпература паверхні	Ад −153 °C да +35 °C



! Галоўныя вывады

1. Планеты зямной групы параўнальна малыя (іх агульная маса не перавышае 0,5 % ад масы ўсіх планет Сонечнай сістэмы) і ўяўляюць сабой цвёрдыя целы з высокай сярэдняй шчыльнасцю.
2. Усе планеты зямной групы маюць падобную будову і складаюцца з ядра, мантыі, цвёрдай кары.
3. Для паверхняў планет зямной групы характэрна наяўнасць кратараў, гор, вулканаў.
4. Планеты зямной групы (акрамя Меркурыя) маюць вонкавыя абалонкі: атмасферу (Венера, Зямля, Марс), гідрасферу і біясферу (Зямля), крыясферу (Марс).

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. З якіх абалонак складаюцца планеты?
2. Пералічыце крыніцы награвання нетраў планет.
3. Што называюць гравітацыйнай дыферэнцыяцыяй?
4. З якіх асноўных хімічных элементаў складаецца паверхня Зямлі; Меркурыя; Марса?
5. Апішыце паверхні планет зямной групы.
6. Якія асаблівасці маюць атмасферы планет зямной групы?

§ 14. Планеты-гігanty



Рыс. 63. Юпітэр. Цёмная пляма — цень спадарожніка Еўропа. Фатаграфія атрымана касмічным апаратам «Касіні»

1. Юпітэр. Юпітэр — самая вялікая з планет-гігантаў (рыс. 63). Яго маса значна перавышае масу ўсіх іншых планет, разам узятых. Юпітэр уяўляе сабой газападобнае цела з надзвычай магутнай атмасферай, якая складаецца ў асноўным з вадароду і гелію, што ўласціва і для іншых планет гэтай групы. Па сярэдняй шчыльнасці і перавазе вадароду і гелію Юпітэр падобны да зорак. У адрозненне ад планет зямной групы, у планет-гігантаў няма цвёрдай паверхні. Тое, што мы назіраем, — гэта вяршыні воблакаў, якія плаваюць у атмасферы. З-за хуткага вярчэння планет-гігантаў і моцных вятроў воблакі выцягваюцца



Рис. 64. Вялікая Чырвоная пляма на Юпітэры

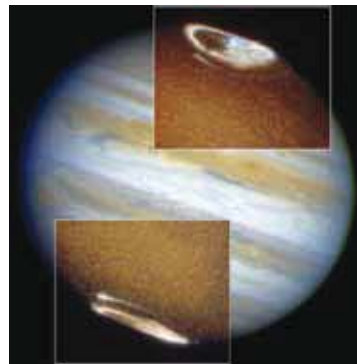


Рис. 65. Палярныя зьяні на Юпітэры. Фатаграфія касмічнага тэлескопа Хабла



ў палосы, паралельныя экватару. Афарбоўку воблакам надаюць прымесі аміячных утварэнняў, метан і іншыя складаныя злучэнні.

Светлыя і цёмныя палосы ў атмасферы Юпітэра тлумачацца рознымі зонамі ціску. Светлыя зоны — гэта вобласці высокага ціску, а цёмныя — нізкага. Цёплыя газы падыхаюцца ўгару ў вобласці светлых зон, дасягаюць верхняй мяжы воблакаў, дзе астываюць і трапляюць у суседнія палосы з нізкім ціскам.

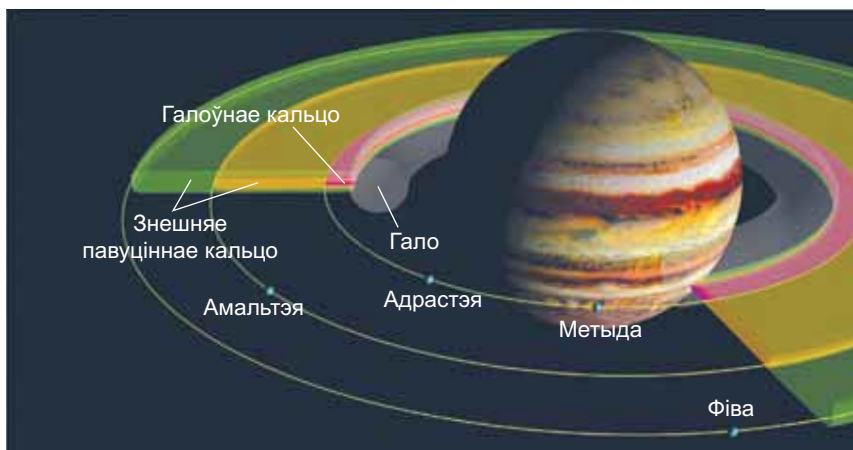
У экватарыяльнай зоне (ад $+9^\circ$ да -9°) газавыя цячэнні накіраваны строга з захаду на ўсход. Скорасць руху газавых мас дасягае 180 м/с (паводле даследаванняў міжпланетнай касмічнай станцыі «Галілео»). Паблізу ад шырот ад $+20^\circ$ да -20° рэчыва рухаецца ў адваротным напрамку, з усходу на захад, са скорасцю каля 50 м/с. Паміж асноўнымі цячэннямі існуюць віхры і струмені.

Для Юпітэра, як і для ўсіх планет-гігантаў, характэрна наяўнасць светлых і цёмных авальных плям. Найбольш прыкметная з іх — Вялікая Чырвоная пляма (рис. 64), якую назіраюць на працягу ўжо трох стагоддзяў. Гэта велізарны і надзвычай устойлівы віхор, падобны да зямнога ўрагану.

У палярных воблаках Юпітэра назіраецца з'ява, падобная да зямнога палярнага ззяння (рис. 65).

Уяўленні аб унутранай будове планет-гігантаў атрыманы на аснове назіранняў і тэарэтычных мадэлей, якія грунтуюцца на ўласцівасцях вадароду.

На дне атмасферы Юпітэра, якая ўшчыльняецца ўглыб на 1500 км, знаходзіцца слой вадкага вадароду. Далей атмасфера пераходзіць у асаблівы газава-кістан.



Рыс. 66. Схема кольцаў Юпітэра

На ўзроўні 0,77 радыуса планеты пачынаецца абалонка, дзе вадарод набывае ўласцівасці металу. Тут ён сціскаецца так моцна ($4 \cdot 10^{12}$ Па), што электроны пакідаюць свае атамы і свабодна перамяшчаюцца. Гэта прыводзіць да з'яўлення магнітнага поля Юпітэра, напружанасць якога на мяжы воблачнага слоя ў 12 разоў большая, чым у зямнога магнітнага поля.

У цэнтры Юпітэра знаходзіцца цвёрдае ядро, якое складаецца з аксідаў крэмнію, магнію і жалеза з прымесямі. Дыяметр унутранага ядра — каля 25 тыс. км, тэмпература ў яго цэнтры складае 23 000 К. Такая высокая тэмпература тлумачыцца павольным гравітацыйным сцісканнем планеты.

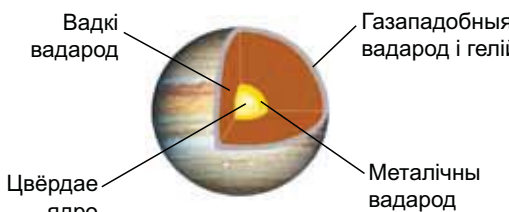
У 1979 г. касмічныя апараты «Вояджэр-1» і «Вояджэр-2» выявілі ў Юпітэра кольца (рыс. 66). Яны складаюцца з вельмі дробных пылінак (0,2—200 мкм). Гэтыя пылінкі паступова падаюць у атмасферу Юпітэра, а іх месца займаюць іншыя, якія ўтвараюцца пры сутыкненні малых спадарожнікаў, асабліва Амалятэі, з метэарытнымі цэламі.

Параметры Юпітэра глядзіце ў табліцы 6.

Табліца 6. Параметры Юпітэра

Зорная велічыня (максімальная)	–2,9	Дыяметр па экватары	142 980 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	778,5 млн км	Маса (Зямля = 1)	318
	5,204 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$1,33 \cdot 10^3$ кг/м ³

Канец таблицы

Перыяд абарачэння вакол Сонца	11,86 зямнога года	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	2,2
Перыяд вярчэння вакол восі	9,92 г	Тэмпература верхняга слоя воблакаў	-133 °C
			

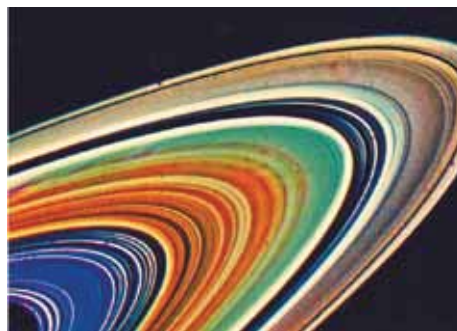
2. Сатурн. Сатурн — другая па велічыні планета-гігант, акружаная прыгожымі кольцамі (рыс. 67). Дыск планеты прыкметна сплясканы каля полюсаў. Гэта выклікана тым, што ў Сатурна самая нізкая шчыльнасць сярод усіх планет Сонечнай сістэмы.

Кольцы Сатурна (рыс. 68) заўважыў яшчэ Галілео Галілей: у 1610 г. ён назіраў з абодвух бакоў дыска незразумелыя прыдаткі. Але толькі Хрысціян Гойгенс у 1656 г. выявіў тонкае плоскае кальцо, якое не датыкалася да планеты. З Зямлі ў тэлескоп можна ўбачыць некалькі кольцаў, аддзеленых адно ад аднаго цёмнымі прамежкамі.

На аснове спектральных даследаванняў у 1895 г. рускі вучоны А. А. Белопольскі ўстанавіў, што кольцы не маналітныя, а складаюцца з асобных дроб-



Рыс. 67. Сатурн.
Фатаграфія зроблена
касмічным тэлескопам Хабла



Рыс. 68. Структура кольцаў Сатурна (кольеры ненатуральныя — яны падкрэсліваюць адрозненні мінералагічнага складу кольцаў)

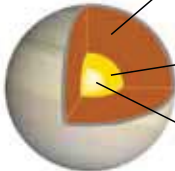
ных цел. Здымкі, атрыманыя касмічным апаратам «Вояджэр-2», паказалі, што сістэму кольцаў утвараюць тысячы тонкіх кольцаў, кожнае з якіх складаецца з бясконцага мноства абломкаў лёду памерамі ад найдрабнейшых пылінак да некалькіх метраў. Таўшчыня кольцаў не перавышае 2 км.

Плоскасць кольцаў размешчана ў плоскасці экватара Сатурна, якая мае нахіл $26^{\circ}45'$ да плоскасці арбіты. Пры руху Сатурна па арбіце кольца захоўваюць сваё месцазнаходжанне ў прасторы і двойчы за адзін абарот планеты вакол Сонца паварочваюцца да Зямлі сваім рабром. З-за сваёй малой таўшчыні ў невялікія тэлескопы яны ў гэты час не бачныя. Дыяметр па вонкавым краі кольцаў складае 272 тыс. км, а па ўнутраным — 144 тыс. км. Сумарная маса кольцаў складае каля $3 \cdot 10^{-8}$ масы Сатурна.

Напружанасць магнітнага поля Сатурна блізкая да зямной.

Параметры Сатурна глядзіце ў табліцы 7.

Табліца 7. Параметры Сатурна

Зорная велічыня (максімальная)	-0,2	Дыяметр па экватары	120 536 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	1433 млн км	Маса (Зямля = 1)	95,2
	9,59 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$0,69 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Сонца	29,46 зямнога года	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	1,1
Перыяд вярчэння вакол восі	10,57 г	Тэмпература верхняга слоя воблакаў	-140 °C
 Ячэйкі з цыркулюючымі вадародам і геліем Металічны вадарод з кропелькамі гелію Каменнае ядро			

3. Уран. Уран — трэцяя па велічыні планета-гігант. Планета мае вельмі прыгожы зеленавата-блакітнаваты колер (рыс. 69). Гэта тлумачыцца асаблівасцямі складу атмасферы планеты і яе тэмпературай. Пры тэмпературы -217°C у верхніх слаях вадародна-геліевай атмасферы ўтварылася метанавая смуга. Метан добра паглынае чырвоныя прамені і адбівае блакітныя і зялёныя. Таму планета набыла прыгожы бірузовы колер. У атмасферы Урана не назіраецца ніякіх прыкметных узбурэнняў.

У 1977 г. былі адкрыты кольцы Урана. Здымкі, зробленыя «Вояджэрам-2» у 1986 г., пацвердзілі іх існаванне. Уран акружаны адзінаццацю вузкімі кольцамі, якія размешчаны ў плоскасці экватара на адлегласці ад 42 да 51,4 тыс. км (ці 1,65—2,02 радыуса) ад цэнтра планеты. Типовая шырыня кольцаў ад 1 да 8 км, толькі ў самага вялікага яна вагаецца ад 22 да 93 км. Таўшчыня кольцаў не перавышае 1 км. Кольцы Урана складаюцца з дробнага пылу і невялікіх цвёрдых цёмных часцінак.

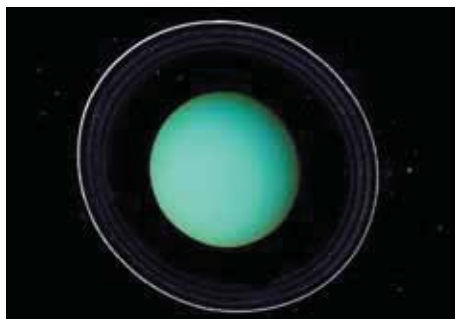


Рис. 69. Уран. Фатаграфія атрымана касмічным тэлескопам Хабла

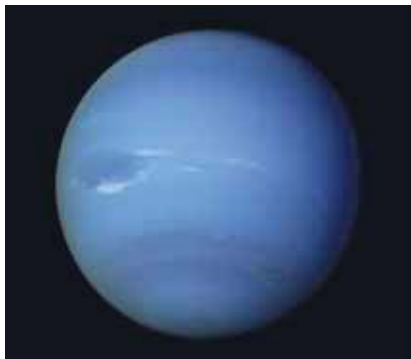
Магнітнае поле Урана мае адну цікавую асаблівасць. Вось вярчэння планеты амаль супадае з плоскасцю арбіты, і лініі магнітнага поля скручаны вярчэннем Урана ў доўгі штопар ззаду планеты. Напружанасць магнітнага поля прыблізна роўна зямной.

Параметры Урана глядзіце ў табліцы 8.

Табліца 8. Параметры Урана

Зорная велічыня (максімальная)	5,4	Дыяметр па экватары	51 120 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	2877 млн км	Маса (Зямля = 1)	14,5
	19,23 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$1,27 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Сонца	84,0 зямнога года	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	0,9
Перыяд вярчэння вакол восі (адваротнае вярчэнне)	17,24 г	Тэмпература верхняга слоя воблакаў	– 197 °С
Атмосфера з вадароду, гелію і метану Мантыя з замерзлых вады, метану і аміяку Каменнае ядро			

4. Нептун. Нептун — самы маленькі гігант. Знаходзіцца амаль на самым краі Сонечнай сістэмы і атрымлівае вельмі мала сонечнай энергіі. Аднак, нягледзячы на гэта, планета вельмі актыўная. На фатаграфіях Нептуна добра



Рыс. 70. Нептун. Вялікая Цёмная пляма. Фатаграфія зроблена касмічным апаратам «Вояджэр-1»

бачны воблакі, якія з'яўляюцца і знікаюць у атмасферы планеты. Адметнай прыкметай Нептуна з'яўляецца Вялікая Цёмная пляма (рыс. 70), падобная па структуры да Вялікай Чырвонай плямы Юпітэра.

Скорасць ветру ў атмасферы Нептуна дасягае рэкорднай велічыні — 600 м/с.

Меркаванне аб існаванні кольцаў у Нептуна было выказана ў 1984 г. на аснове назіранняў за накрываннем зорак планетай. Тры замкнутыя і адно незамкнутае кольца бачны на здымках, атрыманых касмічным апаратам «Вояджэр-2» у 1989 г. Размяшчаюцца кольца на адлегласці ад 1,7 да 2,5 радыуса планеты. Шырыня кольцаў — ад 15 да 5000 км. Яны складаюцца з дробных сілікатных пылінкаў, якія адбіваюць 6 % сонечнага святла.

Напружанасць магнітнага поля Нептуна ўтвая меншая, чым у Зямлі.

Параметры Нептуна глядзіце ў табліцы 9.

Табліца 9. Параметры Нептуна

Зорная велічыня (максімальная)	7,8	Дыяметр па экватары	49 528 км
Сярэдняя адлегласць да Сонца	4503 млн км	Маса (Зямля = 1)	17,1
	30,1 а. адз.	Сярэдняя шчыльнасць	$1,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Сонца	164,8 зямнога года	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	1,1
Перыяд вярчэння вакол восі	15,97 г	Тэмпература верхняга слоя воблакаў	-200 °C





Галоўныя вывады

1. У адрозненне ад планет зямной групы планеты-гіганты ўяўляюць сабой буйныя масіўныя газападобныя целы з малой шчыльнасцю, аддаленыя ад Сонца на значную адлегласць (ад 5 да 30 а. адз.).
2. Планеты-гіганты вельмі хутка абарачаюцца вакол сваіх восей.
3. Усе планеты-гіганты маюць кольцы.
4. Асноўнымі кампанентамі атмасфер гэтых планет з'яўляюцца вадарод і гелій.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Назавіце адрозненні ў асноўных фізічных характарыстыках планет-гігантаў і планет зямной групы.
2. У чым асаблівасць вярчэння планет-гігантаў вакол іх восей?
3. Раскажыце аб асаблівасцях будовы планет-гігантаў.
4. Што ўяўляюць сабой кольцы планет?
5. Чаму часам нават у буйныя тэлескопы не бачны кольцы Сатурна?

§ 15. Месяц. Спадарожнікі планет

1. Фізічныя ўмовы на Месяцы. Месяц — адзіны натуральны спадарожнік Зямлі. Гэта цела шарападобнай формы дыяметрам 3476 км. Маса Месяца ў 81 раз меншая за масу Зямлі. Сярэдняя шчыльнасць Месяца роўна 0,6 шчыльнасці Зямлі, а паскарэнне свабоднага падзення ў 6 разоў меншае за зямное, г. зн. на месяцавай паверхні прадметы важаць у 6 разоў менш, чым на Зямлі. Сонечныя суткі на Месяцы доўжацца сінадычны месяц (29,5 зямных сутак). На Месяцы няма вады ў вадкім стане і практычна няма атмасферы. За месяцавы дзень, які доўжыцца каля 15 зямных сутак, паверхня паспявае нагрэцца да $+127^{\circ}\text{C}$, а за ноч ахаладзіцца да -173°C . Пры высокіх тэмпературах скорасць газавых малекул перавышае другую касмічную скорасць для паверхні Месяца, роўную 2,38 км/с, таму газы, што выдзяляюцца з нетраў спадарожніка Зямлі ці ўтвараюцца пры падзенні метэорных цел, хутка пакідаюць Месяц. Без газавай атмасферы Месяц зведвае ўздзеянні ўсіх відаў электрамагнітнага выпраменьвання Сонца, а таксама ўдары метэорных цел розных памераў.

Простым вокам на месяцавай паверхні можна адрозніць светлыя і цёмныя ўчасткі. Цёмныя, адносна роўныя вобласці паверхні, якія называюць «морамі»,

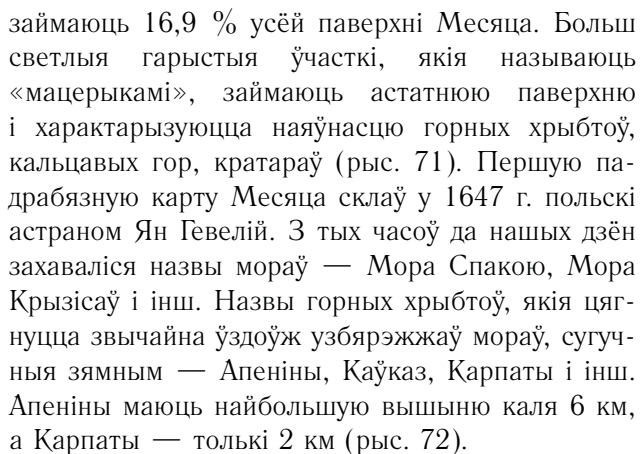
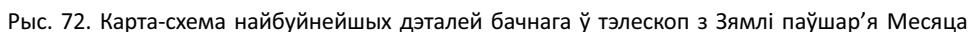


Рис. 71. Выгляд месяца ў тэлескоп





Рыс. 73. Частка паверхні Месяца.
Фатаграфія атрымана станцыяй «Зонд»



Рыс. 74. Зямля, бачная
з паверхні Месяца



Самымі шматлікімі ўтварэннямі на месяцавай паверхні з'яўляюцца кратары (рыс. 73). Іх памеры вагаюцца ад мікраскапічных да больш за 100 км у дыяметры. Кратар складаецца з кальцавага вала і ўнутранай раўніны. У большасці «малых» кратараў на дне ўзвышаюцца цэнтральныя горкі.

У час поўні ў «малых» кратараў, якія маюць метэарытнае паходжанне, можна ўбачыць прамянёвыя сістэмы — светлыя палосы, якія радыяльна адыходзяць ад кратара і цягнуцца на сотні кіламетраў.

Удар буйнога метэарыта ці невялікага астероіда аб паверхню Месяца суправаджаецца выбухам. Пры гэтым адбываецца выкід месяцавага рэчыва пад рознымі вугламі. Значная яго частка трапляе ў космас, аднак некаторая частка падае назад на паверхню Месяца. Са струменяў здробненага рэчыва і фарміруюцца прамянёвыя сістэмы. Для назіральніка прамені здаюцца больш светлымі, паколькі яны адбіваюць святло лепш, чым шчыльнае рэчыва таго ж складу.

Буйныя і сярэднія кратары названы ў гонар славутых вучоных: Пталамей, Архімед, Платон, Капернік, Ціхаў, Шміт і інш.

Касмічныя даследаванні істотна паглыбілі нашы веды аб Месяцы. У 1959 г. савецкім апаратам «Месяц-3» упершыню быў сфатаграфаваны адваротны, нябачны бок Месяца. У 1965 г. з'явілася першая поўная карта Месяца, складзеная пад навуковым кіраўніцтвам Ю. Н. Ліпскага.

Амерыканскія астранаўты Ніл Армстранг і Эдвін Олдрын сталі першымі людзьмі, якія ступілі на паверхню Месяца 20 ліпеня 1969 г. Астранаўты, якія знаходзіліся на Месяцы, маглі бачыць на яго небе Зямлю (рыс. 74). Амерыканскія касмічныя караблі серыі «Апалон» на працягу наступных трох гадоў шэсць разоў



Рыс. 75. Асноўныя тыпы часцінак
месяцавага рэгаліту

дастаўлялі ў розныя месцы Месяца экспедыцыі (12 астранаўтаў займаліся даследаваннямі ў месцах пасадак, яны сабралі больш за 360 кг месяцавых узораў; месяцавыя пароды дастаўлялі і савецкія аўтаматычныя станцыі «Месяц»).

Паверхневы слой натуральнага спада-рожняка Зямлі складаецца з дробнаабломач-нага матэрыялу — **рэгаліту** (рыс. 75) і мае таўшчыню каля 10 м. У склад месяцавага рэгаліту ўваходзяць таксама шкляныя сферыч-

ныя мікрачасцінкі. Драбненне месяцавых парод адбываецца ў асноўным з-за мікраметэарытнай бамбардзіроўкі і рэзкіх перападаў тэмпературы. Рэгаліт мае малую шчыльнасць (верхні слой — 1200 кг/м^3) і вельмі малую цеплаправоднасць (у 20 разоў меншую за паветра), таму ўжо на глыбіні каля 1 м ваганні тэмпературы практычна не адчувальныя.

Па хімічным складзе месяцавыя пароды вельмі блізкія да базальтавых парод Зямлі. Пароды месяцавых мораў адрозніваюцца высокім утрыманнем аксідаў жалеза і тытану, мацерыковыя пароды — высокім утрыманнем аксідаў алюмінію.

У апошні час касмічныя станцыі выявілі запасы вадзянога лёду ў палярных абласцях Месяца. З-за малога вугла нахілу месяцавага экватара да экліптыкі (усяго $1,5^\circ$) дно нават неглыбокіх кратараў у палярных зонах ніколі не асвятляецца сонечнымі прамянямі. Пры пастаяннай тэмпературы -173°C дно палярных кратараў пакрывае сумесь рэгаліту з лёдам. Крыніцай узнікнення і назапашвання месяцавага палярнага лёду могуць быць каметы, якія ўпалі ў гэтыя зоны і ўяўляюць сабой ледзяныя целы.

Унутраная будова Месяца вывучана на аснове запісаў страсенняў ад удараў метэарытаў, якія зафіксаваны сейсмографамі, дастаўленымі на Месяц. Пад сло-ем рэгаліту размешчана кара, таўшчыня якой на бачным (павернутым да Зямлі) баку складае 60 км, а на адваротным — 100 км. Пад карой знаходзіцца мантыя таўшчынёй каля 1000 км. Зона, глыбейшая за 1600 км, нагадвае зямную ман-тыю, мае таўшчыню 430 км і тэмпературу каля 1800 К. Апошнія даследаванні пацвердзілі, што ў цэнтры Месяца знаходзіцца металічнае ядро радыусам каля 300 км, маса якога складае каля 3 % ад агульнай масы Месяца.

Існуе некалькі гіпотэз утварэння Месяца. Паводле адной з самых папу-лярных, Месяц утварыўся разам з Зямлёй з адной планецезіمالі. Выказва-лася нават меркаванне, што Зямля падзялілася на дзве часткі і што ўпадзіна

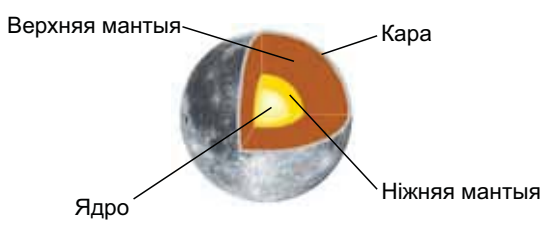
Ціхага акіяна — гэта «яма», якая засталася пасля таго, як Месяц «вырваўся» з Зямлі.

Некаторыя вучоныя мяркуюць, што Месяц утварыўся шляхам аб'яднання дробных каменьчыкаў, якія абарачаліся вакол Зямлі 4,5 млрд гадоў назад. Назапашванне часцінак пад уздзеяннем сіл гравітацыі, якія дзейнічаюць каля Зямлі, стала «паменшаным» варыянтам працэсу, які адбываўся ў першаснай сонечнай туманнасці і прывёў да нараджэння планет.

Разглядаецца і такі механізм утварэння Месяца: Зямля, якая прайшла асноўныя стадыі дыферэнцыяцыі рэчыва, сутыкнулася з буйным нябесным целам (памерамі з Марс). Косы ўдар разбурыў толькі верхнія слаі зямных нетраў. На калязямную арбіту было выкінута рэчыва зямной кары і мантыі, з якога шляхам зліцця сфарміраваўся спадарожнік Зямлі.

Параметры Месяца глядзіце ў табліцы 10.

Табліца 10. Параметры Месяца

Зорная велічыня (максімальная)	-12,7	Дыяметр па экватары	3476 км
Сярэдняя адлегласць да Зямлі	384,4 тыс. км	Маса (Зямля = 1)	0,0123
	60,3 радыуса Зямлі	Сярэдняя шчыльнасць	$3,346 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Перыяд абарачэння вакол Зямлі	27,32 зямных сутак	Сіла прыцяжэння на экватары (Зямля = 1)	0,17
Перыяд вярчэння вакол восі	27,32 зямных сутак	Тэмпература паверхні	Ад -173°C да $+127^\circ\text{C}$
			

2. Спадарожнікі планет. У Сонечнай сістэме на пачатак 2021 г. было вядома 205 натуральных спадарожнікаў планет. Сем спадарожнікаў, у тым ліку Месяц, маюць дыяметр, большы за 2500 км, а Ганімед і Тытан (гл. табл. 11 на с. 94) нават перавышаюць па памеры Меркурый.

Табліца 11. Буйныя спадарожнікі планет

Характарыстыкі	Спадарожнікі						
	Ганімед	Тытан	Каліста	Іо	Месяц	Еўропа	Трытон
Планета	Юпітэр	Сатурн	Юпітэр	Юпітэр	Зямля	Юпітэр	Нептун
Дыяметр, км	5268	5152	4820	3642	3476	3130	2700
Маса, $\times 10^{23}$ кг	1,48	1,35	1,08	0,893	0,735	0,485	0,215
Шчыльнасць, $\times 10^3$ кг/м ³	1,9	1,9	1,8	3,5	3,3	3,0	2,1
Тэмпература паверхні, °С	–163	–179	–140	–163	Ад –173 да +127	–140	–235

Невялікія спадарожнікі памерам у дзясяткі кіламетраў уяўляюць сабой каменныя або ледзяныя целы няправільнай формы. Іх паверхні ўсеяны кратарамі і пакрыты дробным пылам. Сярэднія спадарожнікі (у некалькі соцень кіламетраў) у асноўным шарападобныя і маюць малую шчыльнасць. Па знешнім выглядзе іх паверхня нагадвае месяцавую.

Разгледзім асаблівасці 7 найбуйнейшых спадарожнікаў. Па сваёй будове яны больш падобныя да планет зямной групы. Найбуйнейшыя спадарожнікі Юпітэра былі адкрыты яшчэ ў 1610 г. Галілеем. Аднак асноўныя звесткі аб прыродзе буйных спадарожнікаў планет-гігантаў атрыманы ў выніку даследаванняў з дапамогай касмічных апаратаў.

Мадэль унутранай будовы буйных спадарожнікаў прадугледжвае наяўнасць у іх трох абалонак: кары, мантыі і ядра. Ядры, якія ўтрымліваюць злучэнні жалеза і займаюць ад 0,3 да 0,6 радыуса спадарожніка, маюць Іо (рыс. 76), Еўропа (рыс. 77) і Ганімед. У Трытона і Каліста (рыс. 78) камяністыя ядры такога ж ці нават большага памеру.



Рыс. 76. Іо — спадарожнік Юпітэра. Вывяржэнне вулкана. Фатаграфія зроблена міжпланетным апаратам «Галілео»

Сілікатная (камяністая) кара Іо мае таўшчыню 30 км. Пад ёй на глыбіні 100 км знаходзіцца вадкая магма, тэмпература якой дасягае 1600 К. Магма жывіць шматлікія вулканы Іо.

Астатнія спадарожнікі пакрыты ледзяной абалонкай рознай таўшчыні, пад якой размешчана камяністая мантыя.



Рыс. 77. Еўропа — спадарожнік
Юпітэра



Рыс. 78. Каліста — спадарожнік
Юпітэра

На паверхні Трытона і Ганімеда бачны сляды тэктанічнай дзейнасці: разломы, сцісканні, расколіны, дробныя хрыбты. Каліста адрозніваецца ад іх наяўнасцю шматлікіх кратараў ударнага паходжання.

Ледзяную абалонку Еўропы перасякае сетка светлых і цёмных вузкіх палос. Гэта расколіны ў тоўстай ледзяной кары, якія выкліканы прыліўнымі ўздзеяннямі Юпітэра. Шматгадовыя назіранні за рысункам, які ўтвараюць расколіны, паказалі, што ледзяныя масы крыху зрушваюцца адны адносна іншых. Гэта азначае, што пад лёдам ёсць вада. У некаторых месцах ледзянога панцыра Еўропы касмічны апарат «Галілео» сфатаграфавалі дзіўныя хаатычныя награвашчванні старых ільдзін, умарожаных у свежы лёд. Гэтыя структуры называюцца «хаосы» (рыс. 79). Яны сведчаць аб тым, што час ад часу лёд падтае, а потым зноў застывае. Ільдзіны, якія не паспелі растаць, аказваюцца ўмарожанымі ў новы лёд. Аб тым, што ледзяная паверхня Еўропы маладая, сведчыць і амаль поўная адсутнасць на ёй ударных кратараў.

На Іо няма прымет існавання значнай колькасці вады ні ўнутры спадарожніка, ні тым больш на яго паверхні. Затое там адкрыты шматлікія вулканы. Злучэнні серы, якія выкідваюцца вулканаў і асядаюць на паверхні, надаюць спадарожніку афарбоўку ад белай да ярка-чырвонай і чорнай (гл. рыс. 76). Пры гэтым колер залежыць ад тэмпературы рэчыва. З жарала вулкана газы выкідваюцца на вышыню каля 500 км са скорасцю прыкладна 1 км/с. Газавыя гейзеры заўважаны над палярнай шапкай Трытона.



Рыс. 79. Хаосы на спадарожніку Юпітэра Еўропе





Рыс. 80. Тытан — спадарожнік Сатурна.
Мае вельмі шчыльную атмасферу



Рыс. 81. Фобас — спадарожнік Марса.
Справа ўнізе кратар Стыкні

Струмені цёмнага рэчыва вырываюцца ўверх з яго паверхні і дасягаюць вышыні 8 км.

Найбольш магутную атмасферу мае Тытан (рыс. 80). Яна на 60 % больш шчыльная, чым зямная, і прыкладна на 95 % складаецца з азоту. Ціск каля паверхні ў 1,5 раза перавышае зямны. Касмічны апарат «Гюйгенс» у 2005 г. выявіў на Тытане горныя хрыбты, рэчышчы рэк, азёры вадкага метану і этану.

Разрэджаную атмасферу з азоту і метану мае Трытон (10^{-5} зямной). Слабая атмасфера з малекулярнага кіслароду ахутвае Ганімед і Еўропу (10^{-9} і 10^{-11} зямной). Утвараецца яна так: сонечнае святло, касмічныя прамені і мікраметэарыты выбіваюць з ледзяной паверхні малекулы вады, якія пад дзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання распадаюцца на атамы вадароду і кіслароду. Атамы вадароду адразу ж пакідаюць атмасферу, а атамы кіслароду аб'ядноўваюцца ў малекулы.



Рыс. 82. Міранда —
спадарожнік Урана

Разрэджаную атмасферу з вуглякіслага газу мае Каліста, такую ж разрэджаную атмасферу з аксідаў серы і вулканічных газаў мае Іо (10^{-9} зямной).

У некалькіх буйных спадарожнікаў выяўлены ўласныя магнітныя палі.

З планет зямной групы, акрамя Зямлі, толькі Марс мае два спадарожнікі, адкрытыя ў 1877 г. амерыканскім астраномам Асафам Холам. Гэта невялікія камяністыя целы няправільнай формы памерамі $27 \times 22 \times 19$ км — Фобас (рыс. 81) і $16 \times 12 \times 10$ км — Дэймас.

Відарысы некаторых іншых спадарожнікаў планет Сонечнай сістэмы паказаны на рысунках 82—84.



Рыс. 83. Мімас — спадарожнік Сатурна.
Вялікі кратар мае дыяметр звыш 100 км



Рыс. 84. Энцэлад —
спадарожнік Сатурна



Галоўныя вывады

1. Месяц — спадарожнік Зямлі і найбліжэйшае да Зямлі нябеснае цела.
2. Па сваёй прыродзе Месяц, а таксама іншыя буйныя спадарожнікі планет блізкія да планет зямной групы.
3. Невялікія спадарожнікі планет (памерамі ў дзясяткі кіламетраў) уяўляюць сабой камяністыя або ледзяныя целы няправільнай формы.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Ахарактарызуйце фізічныя ўмовы на Месяцы. Чым яны адрозніваюцца ад умоў на Зямлі?
2. Якія дэталі на Месяцы бачныя простым вокам, а якія — у тэлескоп?
3. Прывядзіце прыклады назваў некаторых месяцавых кратараў, мораў і горных хрыбтоў.
4. Чаму адваротны бок Месяца ўдалося сфатаграфавать толькі пры яго аблёце на касмічным апарце?
5. Што ўяўляе сабой месяцавая глеба? Ці адрозніваецца яна ад зямной?
6. Апішыце ўнутраную будову Месяца. Якім чынам яе даследавалі?
7. Якія гіпотэзы ўтварэння Месяца вы ведаеце?
8. Назавіце найбуйнейшыя спадарожнікі планет Сонечнай сістэмы. Раскажыце аб некаторых характэрных асаблівасцях кожнага з іх.

§ 16. Карлікавыя планеты і малыя целы Сонечнай сістэмы

1. Карлікавыя планеты. У жніўні 2006 г. на Асамблеі Міжнароднага астранамічнага саюза было прынята новае азначэнне планеты і ўпершыню ўведзена паняцце «карлікавая планета». **Карлікавымі планетамі** лічацца аб'екты, якія абарочваюцца вакол зоркі, маюць гідрастатычна раўнаважную форму (шарападобную), але якія не расчысцілі прылеглую прастору і не з'яўляюцца спадарожнікамі вялікіх планет.

Да жніўня 2006 г. Плутон, адкрыты Клайдам Тамбо ў 1930 г., лічыўся дзявятай планетай Сонечнай сістэмы. Аднак па дынамічных і фізічных характарыстыках ён істотна адрозніваецца ад іншых планет. У 1978 г. у Плутона быў адкрыты спадарожнік — Харон. Яго дыяметр складае 1212 км, крыху больш за паўдыяметра Плутона, а суадносіны мас — 1 : 8. Некаторыя астраномы лічылі Харон спадарожнікам, а іншыя лічылі сістэму Плутон — Харон падвойнай планетай. Паводле рашэння Міжнароднага астранамічнага саюза адрозненнем падвойнай планеты ад сістэмы планета — спадарожнік (напрыклад, Зямля — Месяц) з'яўляецца месцазнаходжанне барыцэнтра — агульнага цэнтра мас. У першым выпадку гэты цэнтр знаходзіцца ў адкрытым космесе, а ў другім — унутры асноўнай планеты, якая мае спадарожнікі.

Стала відавочным, што Плутон — усяго толькі адзін з найбольш буйных вядомых у нашы дні аб'ектаў **пояса Койпера**, пры гэтым прынамсі адзін з аб'ектаў пояса (Эрыда) з'яўляецца больш буйным за Плутон (рыс. 85).



Рыс. 85. Параўнальныя памеры Зямлі і карлікавых планет



Планеты і карлікавыя планеты — гэта два розныя класы аб'ектаў Сонечнай сістэмы. Акрамя Плутона, карлікавымі планетамі лічацца Цэрэра, якая знаходзіцца паміж арбітамі Марса і Юпітэра, а таксама аб'екты пояса Койпера — Эрыда, Хаўмеа і Макемаке (іх фатаграфіі гл. у Атласе). На думку астраномаў, у вобласці пояса Койпера знаходзяцца дзясяткі карлікавых планет, падобных да Плутона.

2. Астэроіды. Усе аб'екты, акрамя планет і карлікавых планет, якія абарачаюцца вакол Сонца і не з'яўляюцца спадарожнікамі, называюць **малымі цэламі** Сонечнай сістэмы. Да гэтага тыпу адносяць большасць астэроідаў паміж Марсам і Юпітэрам, а таксама транснептунавыя аб'екты пояса Койпера, каметы і ўсе астатнія целы, што абарачаюцца вакол Сонца.

Пасля 1801 г. паміж арбітамі Марса і Юпітэра былі выяўлены карлікавая планета Цэрэра і мноства астэроідаў. **Астэроід** (малая планета) — малое цела Сонечнай сістэмы, якое мае няправільную форму і знаходзіцца на геліяцэнтрычнай арбіце. Да пачатку XX ст. было выяўлена каля 500 астэроідаў з дыяметрамі ад некалькіх дзясяткаў кіламетраў і больш. У красавіку 2019 г. каталог пранумараваных астэроідаў змяшчаў больш за 524 тыс. найменняў. Усяго вынайздзена каля 900 тыс. аб'ектаў, прыблізна 4 % з іх маюць уласныя імёны.

Значная частка (98 %) астэроідаў рухаецца ў плоскасцях, блізкіх да экліптыкі, па арбітах з малым эксцэнтрысітэтам, размешчаных паміж арбітамі Марса і Юпітэра на адлегласці 2,2—4,5 а. адз. ад Сонца. Вакол Сонца астэроіды абарачаюцца ў тым жа напрамку, што і вялікія планеты. Частка прасторы паміж арбітамі Марса і Юпітэра, дзе знаходзіцца пераважная большасць астэроідаў, называецца **Галоўным поясам астэроідаў**.

Паводле адной з гіпотэз астэроіды ўяўляюць сабой рэшткі мноства планецезімалей, якія некалі існавалі. Працэс фарміравання іх у планету быў калісьці прыпынены з прычыны ўзбурэнняў з боку гіганта Юпітэра, які хутка верціцца. У выніку гэтага аб'яднанне рэчыва змянілася на драбленне. Узбурэнні планет-гігантаў змяняюць арбіты астэроідаў, выклікаючы іх сутыкненні адзін з адным, з планетамі і іх спадарожнікамі. Паводле іншай версіі, астэроіды ўзніклі ў выніку разбурэння гіпатэтычнай планеты, якая знаходзілася паміж Марсам і Юпітэрам.

У 1951 г. Джэрард Койпер прадказаў існаванне пояса астэроідаў за арбітай Нептуна. Тэарэтычна гэты пояс павінен знаходзіцца на адлегласці 35—50 а. адз. ад Сонца. Магчыма, гэта рэшткі першапачатковай туманнасці, з якой сфарміравалася Сонечная сістэма. Сумарная маса цел пояса Койпера параўнальная з масай Зямлі.



Рыс. 86. Астэроід Іда са спадарожнікам Дактыль

Упершыню сфатаграфавалі паверхню астэроідаў міжпланетны касмічны апарат «Галілео». Пры палёце да Юпітэра ён сфатаграфавалі астэроіды Гаспра і Іда са спадарожнікам Дактыль (рыс. 86).

Першую мяккую пасадку касмічнага апарата на паверхню астэроіда ажыццявіў 12 лютага 2001 г. касмічны апарат NEAR. Астэроід Эрас аказаўся камяністым целам няправільнай формы з памерамі $33 \times 13 \times 13$ км і шчыльнасцю

$2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, блізкай да шчыльнасці парод зямной кары. Паверхня астэроіда пакрыта пылам і ўсеяна кратарамі і валунамі (дыяметрам да 100 м).

Ёсць меркаванне, што ў Сонечнай сістэме на адлегласці, якая не перавышае 100 а. адз., знаходзіцца каля 1 млн малых цел памерамі да 1 км. Арбіты астэроідаў павялічваюць свой эксцэнтрысітэт да 0,8 з-за ўздзеяння гравітацыйных сіл з боку планет-гігантаў. У выніку гэтага некаторыя астэроіды пранікаюць унутр арбіт Марса, Зямлі і нават Меркурыя. Колькасць астэроідаў з дыяметрам, большым за 1 км, якія перасякаюць арбіту Зямлі, ацэньваецца ў 6500 аб'ектаў. Такія нябесныя целы могуць сутыкацца з Зямлёй не радзей за адзін раз у 20 млн гадоў. Існуе не менш за 200 тыс. астэроідаў з папярочнікам 100 м і болей, арбіты якіх могуць перасякаць арбіту Зямлі. Імавернасць сутыкнення з такім целам — прыблізна 1 раз за 5 тыс. гадоў, пры гэтым на Зямлі ўтворацца кратар з папярочнікам каля 1 км.

29 студзеня 2008 г. на небяспечна блізкай адлегласці ад Зямлі (600 тыс. км) праляцеў астэроід памерам 0,25 км. У шэрагу краін створаны Службы сачэння за небяспечнымі астэроідамі, каб у выпадку пагрозы для Зямлі з боку якога-небудзь з іх правесці работу па змяненні яго арбіты ці знішчэнні.

Першапачаткова астэроідам давалі імёны міфалагічных багінь, потым — звычайныя жаночыя імёны. Калі скончыліся і яны, астэроіды сталі называць у гонар вядомых вучоных, розных краін і гарадоў. Ёсць астэроіды, назвы якіх звязаны з Рэспублікай Беларусь: Мінск, Беларусь, Брэст, Хатынь, Шагал, Віцебск, Алфёраў, Голубеў і інш.

3. Метэарыты. У міжпланетнай прасторы рухаецца вялікая колькасць каменных і жалезных цел, самых разнастайных па памерах, форме і складзе. Гэтыя целы атрымалі назву **метэарытных цел**. Пры ўваходжанні такога цела ў атмасферу Зямлі з касмічнай скорасцю яно ў выніку трэння аб паветра награвает

ецца, пачынае плавіцца і свяціцца — на небе з’яўляецца яркі вогненны шар. Гэта з’ява атрымала назву **балід** (ад грэч. βολιδος — кідальнае кап’ё). У начны час балід ярка асвятляе мясцовасць на дзясяткі і сотні кіламетраў навокал. Вельмі яркія баліды бачны нават удзень пры поўным сонечным асвятленні. За вогненным шарам уздоўж яго траекторыі застаецца след, які ў сваім пачатку ўяўляе сабой свячэнне іанізаваных малекул паветра і заканчваецца струменямі пылу. Пылінкі — гэта прадукты разбурэння метэарытнага цела ў час яго руху ў атмасферы, паколькі пры палёце з велізарнай скорасцю цела награвяецца да некалькіх тысяч градусаў. Рэчыва на яго паверхні бесперапынна расплаўляецца і часткова выпараецца: адразу зрываецца патокамі паветра і распырскваецца ў выглядзе найдрабнейшых кропелек. Яны і складаюць пылавы след баліда. Ушчыльненне паветра нарастае і стварае вакол метэарытнага цела ўдарную хвалю. Яна выклікае такія гукавыя з’явы, як грукат і гул.

Уцалелыя ад поўнага разбурэння рэшткі метэарытнага цела падаюць на паверхню Зямлі. Гэта і ёсць **метэарыт**. Метэарыты ўяўляюць сабой абломкі нябесных цел Сонечнай сістэмы. Як правіла, іх называюць па найбліжэйшым да месца падзення населеным пункце ці геаграфічным аб’екце.

Метэарытнае цела з велізарнай пачатковай масай у дзясяткі і сотні тысяч тон праходзіць усю тоўшчу атмасферы, захоўваючы касмічную скорасць у некалькі кіламетраў за секунду. У выніку ўдару адбываецца выбух, на месцы ўдару ўтвараецца метэарытны кратар. Ён можа мець памеры ад некалькіх метраў да 100 км. Найбольш вядомы Арызонскі кратар дыяметрам 1200 м, глыбінёй 180 м і вышынёй вала каля 50 м (рыс. 87). Магчыма, ён з’явіўся 30 тыс. гадоў назад.

Кратары вялікіх памераў (якія добра захоўваюцца на паверхні Месяца) на Зямлі выявіць складана. Яны хутка разбураюцца з-за ўздзеяння паветра, вады, ветру, расліннасці, заносзяцца слоём пяску і грунту. Вучоныя пры дапамозе касмічных здымкаў навучыліся знаходзіць старажытныя метэарытныя кратары на Зямлі. На сённяшні дзень выяўлена больш за 150 астраблем — «зорных ран», як іх вобразна называюць вучоныя.

На тэрыторыі Беларусі да астраблем адносяць Лагойскую ўпадзіну. Дыяметр гэтага старажытнага кратара 17 км. Ён знаходзіцца ў 6—8 км на паўночны захад ад г. Лагойска Мінскай вобласці.

Паводле складу метэарыты падзяляюцца на тры асноўныя класы: каменныя, жалеза-каменныя і жалезныя.



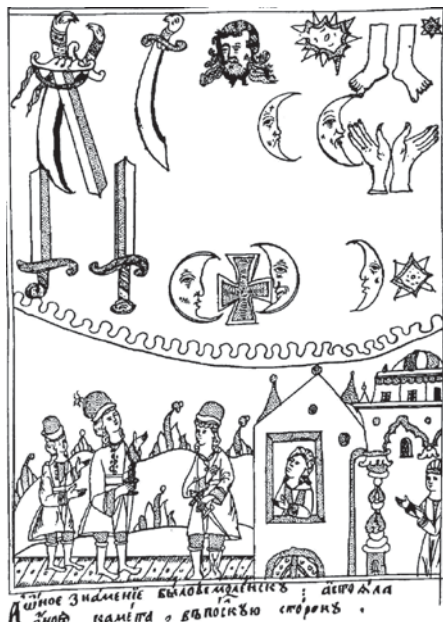
Рыс. 87. Метэарытны кратар у Арызоне (ЗША)

Каменныя метэарыты блізкія па складзе да зямных горных парод: утрымліваюць аксіды жалеза, крэмнію, магнію. Каля 85 % каменных метэарытаў утрымліваюць хондры — сферычныя часцінкі памерам ад мікраскапічных зярнят да гарошыны. Такія каменныя метэарыты называюцца **хандрытамі**, астатнія — **ахандрытамі**.

На тэрыторыі Рэспублікі Беларусь знойдзена шэсць буйных метеарытаў. Напрыклад, у 1954 г. жалезны метэарыт масай 300 кг знойдзены каля вёскі Грэск Слуцкага раёна Мінскай вобласці.

Масы большасці метэарытаў вагаюцца ад соцень грамаў да некалькіх кілаграмаў. Некаторыя буйныя целы разбураюцца ў атмасферы і выпадаюць мноствам дробных аскепкаў, як у 2013 г. у Чалябінску. Падзенне суправаджалася распаўсюджваннем серыі ўдарных хваль, якія прывялі да нязначных разбурэнняў будынкаў і раненняў людзей.

4. Каметы. Аб каметах — «хвастатых зорках» — вядома з даўніх часоў. Першыя кітайскія запісы аб каметах адносяцца да 3-га тысячагоддзя да н. э. Удалечыні ад Сонца **камета** выглядае слабым туманным аб'ектам. Пры набліжэнні да Сонца яна робіцца ярчэйшай, павялічваецца ў памерах, у яе з'яўляецца хвост, накіраваны ў процілеглы ад Сонца бок. Нечаканае з'яўленне яркай каметы, якая парушала нябесную гармонію, заўсёды прыцягвала ўвагу людзей і выклікала ў іх прымхлівы жах. Камета лічылася прадвесніцай войнаў, эпідэміі і іншых няшчасцяў (рыс. 88).



Рыс. 88. Старажытная гравюра, якая расказвае аб з'яўленні каметы ў Смаленску

За гісторыю чалавецтва ўжо назіралася каля 6500 камет. Зарэгістравана ў каталогах каля 1000 такіх аб'ектаў, вызначаны элементы іх арбіт. Амаль усе каметы рухаюцца па выцягнутых арбітах з вялікім эксцэнтрысітэтам, блізкім да адзінкі. Каметы падзяляюць на **кароткаперыядычныя** (з перыядам абарачэння, меншым за 200 гадоў) і **доўгаперыядычныя**. Першую перыядычную камету выявіў англійскі астраном Эдмунд Галей. Ён вылічыў арбіты 24 яркіх камет, заўважыў падабенства элементаў арбіт камет 1531, 1607 і 1682 гг. і выказаў меркаванне, што гэта паслядоўнае вяртанне адной і той жа каметы, якая

рухаецца па вельмі выцягнутай эліптычнай арбіце з перыядам амаль 76 гадоў. У поўнай адпаведнасці з прадказаннем Галея яе ўбачылі ў 1758 г. За гэтай каметай замацавалася назва «камета Галея» (рыс. 89). Яна рухаецца па арбіце з вялікай паўвоссю $a = 17,94$ а. адз. у напрамку, процілеглым руху Зямлі.

У будове каметы вылучаюцца наступныя элементы: ядро, галава і хвост.

Ядро каметы — гэта невялікае цвёрдае ледзяное цела, якое ўключае тугаплаўкія часцінкі і арганічныя злучэнні. Да 80 % ядра каметы складае вадзяны лёд, а таксама замерзлы вуглякіслы газ (CO_2), чадны газ, метан, аміяк і ўкрапанія ў лёд металічныя часцінкі. Па выніках даследаванняў, выкананых касмічнымі апаратамі, ядро каметы Галея ўяўляе сабой маналітнае цела няправільнай формы памерамі 16×8 км, масай каля $3 \cdot 10^{14}$ кг і малой шчыльнасцю парадку 600 кг/м^3 .

Для вызначэння характарыстык ядзер камет у 2004 г. да каметы Чурумава—Герасіменкі быў запушчаны касмічны апарат «Разета». У 2014 г. ад «Разеты» аддзяліўся спускальны зонд «Філы». Ён выканаў пасадку на паверхню каметы (рыс. 90).

Пры набліжэнні да Сонца на адлегласць у некалькі астранамічных адзінак у каметы ўтвараецца галава. Яна ўзнікае ў выніку награвання ядра, выпарэння і выдзялення з яго паверхні газаў і пылу. Бачныя папярочнікі галоў камет з набліжэннем да Сонца дасягаюць памераў 10^4 — 10^6 км. Пад дзеяннем ціску сонечнага выпраменьвання на газы, якія акружаюць галаву каметы, утвараецца хвост. Хвасты яркіх камет цягнуцца на сотні мільёнаў кіламетраў.

У залежнасці ад формы каметных хвасты падзяляюць на некалькі *тыпаў*.

1. Хвост утвараецца пры паскарэнні сонечным ветрам каметных іонаў і накіраваны ў бок, процілеглы Сонцу.

2. Хвост крыху выгнуты, складаецца з пылінак, якія маюць памеры ад долей да дзясяткаў мікраметраў.

3. Хвост складаецца з больш буйнога пылу, вельмі выгнуты пад уздзеяннем магнітнага поля.

4. «Антыхвост» — выкід з галавы каметы накіраваны праміа да Сонца.



Рыс. 89. Камета Галея.
8 сакавіка 1986 г.



Рыс. 90. Касмічны апарат
«Разета» і спускальны зонд
«Філы» выконваюць даследаванне каметы
Чурумава—Герасіменкі



Рыс. 91. Разбурэнне каметы Шумейкераў—Леві-9 у наваколлі Юпітэра і падзенне яе фрагментаў на планету

Кожнае вяртанне каметы да Сонца не праходзіць бяспследна. Ядро каметы губляе каля $\frac{1}{1000}$ сваёй масы. Таму, напрыклад, працягласць існавання каметы Галей ацэньваецца ў 20 тыс. гадоў. Але каметы могуць існаваць і меншы час, паколькі яны разбураюцца з-за ўнутраных напружанняў, якія ўзнікаюць з-за нагрэву Сонцам ці прыліўнага ўздзеяння Сонца і планет-гігантаў. Гінуць каметы таксама пры падзенні на Сонца, сутыкненні з планетамі і метэарытнымі цэламі. Дакументальна зарэгістравана больш за 30 камет, якія распаліся на асобныя кампаненты на вачах назіральнікаў. Так, у 1992 г. камета Шумейкераў—Леві-9 зблізілася з Юпітэрам і развалілася на 22 фрагменты. Праз два гады, абмінуўшы па арбіце Юпітэр, аскепкі ўвайшлі ў атмасферу планеты са скорасцю 60 км/с (рыс. 91). У выніку ўзніклі гіганцкія віхравыя

цёмныя ўтварэнні, параўнальныя па памерах з Зямлёй. Існуе імавернасць сутыкнення ядзер камет і з Зямлёй.

5. Метэоры і метэорныя патокі. Пры руху вакол Сонца каметы распадаюцца. Уздоўж іх арбіт выцягваюцца шлейфы пылу, якія могуць перасякаць зямную арбіту. Часцінка пры ўваходжанні ў атмасферу Зямлі з касмічнай скорасцю згарэе і ўтварае след, які свеціцца. Гэта з'ява называецца **метэорам** (рыс. 92). Сама часцінка ў гэтым выпадку называецца **метэорным целам**.

Памеры метэорных цел, якія выклікаюць з'яву метэора, знаходзяцца ў межах ад некалькіх мікраметраў да некалькіх сантыметраў (даюць вельмі яркае свячэнне).



Рыс. 92. Яркі метэор

Паводле некаторых ацэнак, прыток метэорнага рэчыва на Зямлю складае каля 50 тыс. тон за год.

Каля 1 % метэорных цел, якія сустракаюцца з Зямлёй, прылятаюць з міжзоркавай прасторы. Метэорныя целы ўрываюцца ў зямную атмасферу са скорасцю ад 11 да 72 км/с і сустракаюць на сваім шляху моцнае супраціўленне паветра, якое хутка нарастае. Паверхня метэорнага цела разаграваецца да некалькіх тысяч градусаў і ператвараецца ў распалены газ, які

іанізуе навакольныя малекулы паветра. У выніку гэтага назіральнік на Зямлі бачыць след, які свеціцца агнём.

Свячэнне метэора пачынаецца на вышыні 120 км і знікае на ўзроўні 60—80 км ад паверхні Зямлі, калі цела поўнасю выпараецца ў зямной атмасферы. Увесь палёт метэорнага цела доўжыцца ад дзясятых долей секунды да некалькіх секунд. Працягласць назірання з’явы метэора залежыць ад скорасці метэорнага цела.

Уласцівасці і прыроду метэорнага рэчыва дапамагаюць вывучаць візуальныя, фатаграфічныя, спектральныя і радыёлакацыйныя назіранні. Даследаванні паказалі, што ўвесь комплекс метэорнага рэчыва падзяляецца на выпадковыя (спарадычныя) метэорныя целы і метэорныя часцінкі, якія належаць да метэорных раёў.

Метэоры, якія з’яўляюцца ў пэўную пару года і падаюць дзясяткамі за гадзіну, належаць да **метэорных патокаў**, або «зорных дажджоў». Метэорныя патокі назіраюцца, калі Зямля перасякае арбіту метэорнага рою. Бачныя шляхі метэораў аднаго патоку, спраецываныя на нябесную сферу і прадоўжаныя ў адваротным напрамку, перасякаюцца ў адным абсягу на небе, які называецца **радыянтам** (рыс. 93).

Назва метэорнаго патоку паходзіць ад назвы сузор’я, у якім знаходзіцца яго радыянт, напрыклад Драканіды, Арыяніды і інш. Сярод метэорных патокаў ёсць



Рыс. 93. Радыянт метэорнаго патоку





Рыс. 94. «Зорны дождж» Леаніды. Гравюра. 1833 г.

такія, інтэнсіўнасць якіх з года ў год не змяняецца. Гэта азначае, што метэорныя часцінкі размеркаваны ўздоўж арбіты рою амаль раўнамерна. Найбольш вядомым такім патокам з'яўляецца «паток Персеідаў», які назіраецца штогод у жніўні. Арбіта гэтага рою супадае з арбітай каметы 1862 III.

Адзін раз за 33 гады назіраюцца метэорныя дажджы з радыянтам у сузор'і Льва, калі Зямля сустракаецца з самай шчыльнай часткай рою. Гэты рой выклікае метэорны паток Леаніды (рыс. 94), які назіраецца ў сярэдзіне лістапада. Арбіта гэтага метэорнага рою практычна супадае з арбітай каметы 1866 I. Такім чынам, дакладна ўстаноўлена сувязь метэорных раёў з каметами. Пры разбурэнні каметы ўзнікае метэорны рой.



Галоўныя вывады

1. Карлікавая планета — аб'ект шарападобнай формы, які рухаецца па геліяцэнтрыйнай арбіце, але не расчысціў прылеглаю прастору.
2. Целы Сонечнай сістэмы, якія абарачаюцца вакол Сонца і не з'яўляюцца планетами, карлікавымі планетами або іх спадарожнікамі, называюцца малымі цэламі.
3. Да малых цел Сонечнай сістэмы адносяць: астэроіды (малыя планеты), метэорныя і метэарытныя целы, каметы.
4. Астэроідна-каметная небяспека — імавернасць сутыкнення Зямлі з каметным ядром або астэроідам, якое можа прывесці да катастрофічных наступстваў.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што разумеюць пад карлікавай планетай? Якія карлікавыя планеты вы ведаеце?
2. Раскажыце, якія нябесныя аб'екты называюць малымі цэламі.
3. Чаму ў астэроідаў няма атмасфер?
4. Якая існуе сувязь паміж каметами і метэорамі?
5. Ці існуе небяспека сутыкнення Зямлі з астэроідам?
6. Ахарактарызуйце сэнс паняццяў «метэор», «метэарыт», «балід».
7. Якая прырода паходжання «зорных дажджоў»?
8. Што такое радыянт метэорнага патоку?

Раздзел V

Метады даследавання нябесных цел

§ 17. Даследаванне электрамагнітнага выпраменьвання нябесных цел

1. Электрамагнітнае выпраменьванне. У даследаванні прыроды нябесных цел вялікая ўвага надаецца вывучэнню іх электрамагнітнага выпраменьвання. Нябесныя целы ў залежнасці ад свайго фізічнага стану выпраменьваюць электрамагнітныя хвалі рознай даўжыні.

У вакууме электрамагнітныя хвалі заўсёды распаўсюджваюцца з аднолькавай для ўсіх відаў выпраменьвання скорасцю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Важнай уласцівасцю электрамагнітнага выпраменьвання з'яўляецца тое, што скорасць яго распаўсюджвання не залежыць ні ад даўжыні хвалі, ні ад скорасці руху крыніцы. Хвалі характарызуюцца частатой (ν) і даўжынёй (λ), паміж якімі існуе залежнасць:

$$c = \nu \lambda.$$

Электрамагнітныя хвалі, якія маюць розную даўжыню хвалі, узаемадзеінуюць з рэчывам па-рознаму. Адапаведна метады даследавання электрамагнітнага выпраменьвання адрозніваюцца. У сувязі з гэтым электрамагнітнае выпраменьванне ўмоўна падзяляецца на некалькі дыяпазонаў (табл. 12).

Табліца 12. Дыяпазоны электрамагнітнага выпраменьвання

Дыяпазон	Даўжыня хвалі, λ
Радыйхвалі	Большая за 1 мм
Інфрачырвоныя прамені	Ад 760 нм да 1 мм
Бачныя прамені	Ад 390 да 760 нм
Ультрафіялетавыя прамені	Ад 10 да 390 нм
Рэнтгенаўскія прамені	Ад 0,01 да 10 нм
Гама-прамені	Меншая за 0,01 нм



Рис. 95. Розподіл проникнення випромінювання небесних тел у атмосферу Землі

Випромінювання з довжини хвилі від 390 до 760 нм вока чалавека усприймає як світло, причому різним довжинам хвиль відповідають різні кольори (від фіолетового до червоного). Для виявлення випромінювання у інших діапазонах потрібні спеціальні прилади.

У залежності від свого фізичного стану одні небесні тіла випромінюють енергію у вузьких інтервалах частот спектра електромагнітних хвиль (наприклад, світлий газовий туманнасті), інші — в усім його діапазоні: від гамма-променів до радіохвиль включно (наприклад, зірки). Вивчення фізичної природи небесних тел у широкому діапазоні електромагнітного випромінювання привело до з'ясування у науці таких розділів, як гамма-астрономія, рентгенівська астрономія, інфрачервона астрономія, радіоастрономія і інші.

Вивчення електромагнітних хвиль, які випромінюються небесними тілами, ускладнюється тим, що атмосфера Землі пропускає випромінювання тільки у певних діапазонах довжин хвиль: від 300 до 1000 нм, від 1 см до 20 м і у невеликих «вокнах» інфрачервоного діапазону (рис. 95). Випромінювання, яке доходило до поверхні Землі, дослідують при допомозі оптичних телескопів (бачне світло) і радіотелескопів.



Рис. 96. Міжнародна космічна станція (МКС)

Більш за все зямная атмосфера поглинає короткохвильову зону діапазону електромагнітного випромінювання: ультрафіолетові, рентгенівські і гамма-промені.



Назіранні ў гэтых дыяпазонах магчымы толькі пры дапамозе прылад, паднятых на вялікую вышыню (на самалётах ці зондах) або ўстаноўленых на міжпланетных касмічных станцыях (рыс. 96), штучных спадарожніках Зямлі і ракетах.

2. Тэлескопы і іх характарыстыкі. Вывучаць далёкія недасяжныя нябесныя аб'екты можна адным спосабам — зборам і аналізам іх выпраменьвання. Для гэтай мэты і служаць тэлескопы. Пры ўсёй сваёй разнастайнасці тэлескопы, якія прымаюць электрамагнітнае выпраменьванне, рашаюць дзве асноўныя задачы:

1) сабраць ад аб'екта, які даследуецца, як мага больш энергіі выпраменьвання пэўнага дыяпазону электрамагнітных хваль;

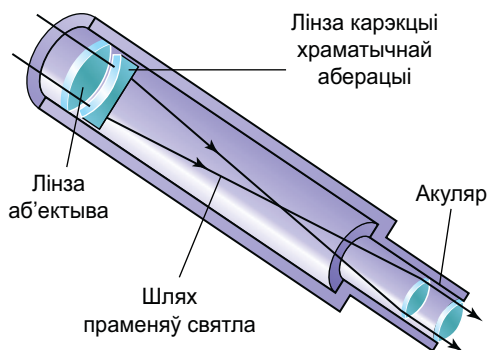
2) атрымаць па магчымасці найбольш выразны відарыс аб'екта, каб можна было вылучыць выпраменьванне ад асобных яго пунктаў, а таксама вымераць вуглавая адлегласці паміж імі.

У залежнасці ад канструктыўных асаблівасцей аптычных схем тэлескопы падзяляюць на лінзавыя сістэмы — рэфрактары; люстраныя сістэмы — рэфлектары; змешаныя люстрана-лінзавыя сістэмы, да якіх адносяцца тэлескопы канструкцыі Б. Шміта, Д. Д. Максутова і інш.

Тэлескоп-рэфрактар (рыс. 97) у асноўным выкарыстоўваецца для візуальных назіранняў. Ён мае аб'ектыў і акуляр. Дыяметр аб'ектываў рэфрактараў абмежаваны з-за цяжкасцей адліўкі буйных аднародных блокаў аптычнага шкла, іх прагінаў і святлопаглынання. Найбольшы дыяметр аб'ектыва тэлескопа-рэфрактара, які выкарыстоўваецца ў цяперашні час, — 102 см (Ерская абсерваторыя, ЗША). Недахопамі тэлескопаў такога тыпу лічацца іх значная даўжыня і скажэнне відарыса. Для ліквідавання гэтых аптычных скажэнняў выкарыстоўваюць шматлінзавыя аб'ектывы з прасветленай оптыкай. Тэлескоп, сумешчаны з фотакамерай, называецца **астрографам**. Астрограф па сутнасці ўяўляе сабой вялікі фотаапарат: у яго факальнай плоскасці ўстанаўліваецца касета з фотопласцінкай або ПЗС-матрыца.

Тэлескоп-рэфлектар мае люстраны аб'ектыў. У самым простым рэфлектары аб'ектыў — гэта адзіночнае, звычайна парабалічнае люстра; відарыс атрымліваецца ў яго галоўным фокусе.

У параўнанні з рэфрактарамі сучасныя тэлескопы-рэфлектары маюць значна большыя аб'ектывы. У рэфлектарах з дыяметрам люстра звыш 2,5 м у га-

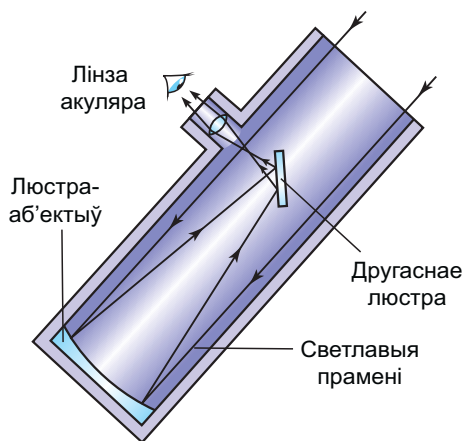


Рыс. 97. Ход прамяняў у тэлескопе-рэфрактары

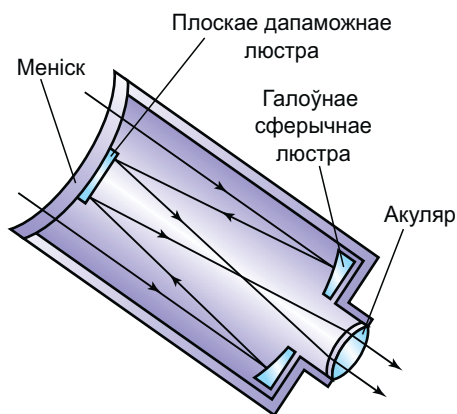
лоўным фокусе часам устанаўліваюць кабiну для назiральнiка. З павелiчэннем памераў люстра ў такіх тэлескопах даводзiцца выкарыстоўваць спецыяльныя сiстэмы разгрузкi люстраў, якія выключаюць iх дэфармацыi з-за ўласнай масы, а таксама прымаць меры для прадухiлення iх тэмпературных дэфармацый. Выраб буйных рэфлектарав (з дыяметрам суцэльнага люстра 4—6 м) звязаны з вялікімі тэхнічнымі цяжкасцямі. Таму распрацоўваюцца канструкцыi з састаўнымі мазаічнымі люстрамі, асобныя элементы якіх патрабуюць дакладнай настройкi з дапамогай спецыяльнай апаратуры сачэння.

У невялікіх і сярэдніх па памерах рэфлектарав для зручнасці назiрання святла адбiваецца дадатковым плоскім (другасным) люстрам да сценкi трубы, дзе знаходзiцца акуляр (рыс. 98). Рэфлектары выкарыстоўваюць пераважна для фатаграфавання неба, фотаэлектрычных і спектральных даследаванняў.

У **люстрана-лінзавых тэлескопах** вiдарыс атрымліваецца з дапамогай складанага аб'ектыва, які ўтрымлівае як люстры, так і лінзы. Гэта дазваляе значна паменшыць аптычныя скажэннi тэлескопа ў параўнаннi з люстранымі ці лінзавымі сiстэмамі. У тэлескопах сiстэмы Б. Шмiта аптычныя скажэннi галоўнага сферычнага люстра лiквідуюцца пры дапамозе спецыяльнай карэкцыйнай пласцiнкі складанага профiлю, якая ўстанаўліваецца перад iм. У тэлескопах сiстэмы Д. Д. Максутава скажэннi галоўнага сферычнага ці эліптычнага люстра выпраўляюцца меніскам, які ўстанаўліваецца перад люстрам (рыс. 99). Меніск — гэта лінза, у якой радыусы крывiзны паверхняў мала адрозніваюцца; такая лінза амаль не ўплывае на агульны ход праменяў, але значна выпраўляе скажэннi аптычнага вiдарыса.



Рыс. 98. Ход праменяў у тэлескопе-рэфлектары



Рыс. 99. Ход праменяў у люстрана-лінзавым меніскавым тэлескопе

Асноўнымі аптычнымі параметрамі тэлескопа з'яўляюцца: бачнае павелічэнне, распазнавальная здольнасць і пранікальная сіла.

Бачнае павелічэнне (G) аптычнай сістэмы — гэта адносіна вугла, пад якім назіраецца відарыс, атрыманы аптычнай сістэмай прылады, да вуглавога памеру аб'екта пры назіранні яго непасрэдна вокам. Бачнае павелічэнне тэлескопа можна разлічыць па формуле

$$G = \frac{F_{\text{аб}}}{F_{\text{ак}}},$$

дзе $F_{\text{аб}}$ і $F_{\text{ак}}$ — фокусныя адлегласці аб'ектыва і акуляра.

Для атрымання значнага павелічэння аб'ектывы ў тэлескопах павінны быць даўгафокуснымі (фокусная адлегласць у некалькі метраў), а акуляры — караткафокуснымі (ад некалькіх сантыметраў да 6 мм). Неспакойная атмасфера Зямлі выклікае дрыжанне і скажэнне відарыса, размывае яго дэталі. Таму нават на буйных тэлескопах рэдка выкарыстоўваюць павелічэнне больш чым у 500 разоў.

Пад **распазнавальнай здольнасцю (ψ)** аптычнага тэлескопа разумеюць найменшую вуглавую адлегласць паміж двума зоркамі, якія могуць быць бачны ў тэлескоп асобна. Тэарэтычна распазнавальная здольнасць (у секундах дугі) тэлескопа для жоўта-зялёных праменяў, да якіх найбольш адчувальнае вока чалавека, можа быць ацэнена пры дапамозе формулы

$$\psi = \frac{140''}{D},$$

дзе D — дыяметр аб'ектыва тэлескопа ў міліметрах.

На практыцы з-за пастаянных перамяшчэнняў паветраных мас распазнавальная здольнасць тэлескопаў зніжаецца. У выніку наземныя тэлескопы, як правіла, забяспечваюць распазнавальную здольнасць каля $1''$, і толькі ў рэдкіх выпадках, пры вельмі спрыяльных атмасферных умовах, можна дасягнуць распазнавальнай здольнасці ў некалькі дзясятых долей секунды.

Таксама важнай характарыстыкай телескопа з'яўляецца **пранікальная сіла (m)**, якая выражаецца гранічнай зорнай велічынёй свяціла, даступнага назіранню пры дапамозе гэтага тэлескопа пры ідэальных атмасферных умовах.

Для тэлескопаў з дыяметрам аб'ектыва D (мм) пранікальная сіла m , выражаемая ў зорных велічынях пры візуальных назіраннях, ацэньваецца формулай

$$m = 2,0 + 5 \lg D.$$



Рыс. 100. Касмічны тэлескоп
Хабла (ЗША)

стра гэтага тэлескопа дыяметрам 2,4 м дае магчымасць дасягнуць распазнавання 0,06".

Значныя магчымасці ёсць у тэлескопа VLT (ад англ. *Very Large Telescope* — вельмі вялікі тэлескоп), які належыць еўрапейскім краінам і ўсталяваны на гары Параналь (вышыня 2635 м) на поўначы Чылі. Тэлескоп VLT складаецца з чатырох тэлескопаў дыяметрам па 8,2 м кожны. Крайнія тэлескопы разнесены адзін ад аднаго на адлегласць 200 м, што дае магчымасць усяму комплексу прылад працаваць у рэжыме **аптычнага інтэрферометра**. Гэта азначае, што калі тэлескопы накіраваны на адну і тую ж зорку, то сабранае імі выпраменьванне падсумоўваецца, а распазнавальная здольнасць тэлескопаў, якія працуюць сумесна, эквівалентна выкарыстанню люстра дыяметрам 200 м.

Колькасць пабудаваных ва ўсім свеце тэлескопаў з дыяметрам люстра больш за 6 м набліжаецца да дваццаці.

Сабранае аб'ектывам тэлескопа выпраменьванне рэгіструецца і аналізуецца прыёмнікамі выпраменьвання. На працягу першых двух з паловай стагоддзяў з пачатку тэлескапічнай эры адзіным прыёмнікам выпраменьвання служыла вока чалавека. Але гэта не толькі не вельмі адчувальны, але і дастаткова суб'ектыўны прыёмнік выпраменьвання. З сярэдзіны XIX ст. у астраноміі пачалі шырока выкарыстоўвацца фатаграфічныя метады. Фатаграфічныя матэрыялы (фотопласцінкі, фотоплёнкі) маюць шэраг каштоўных пераваг у параўнанні з чалавечым вокам. Фотаэмульсія здольна падсумоўваць энергію, што падае на яе, г. зн. пры павелічэнні вытрымкі на негатыве можна сабраць больш святла. Фатаграфія дае магчымасць дакументаваць падзеі, паколькі негатывы могуць захоўвацца на працягу доўгага часу. Фотопласцінкі забяспечваюць панарамнасць, г. зн. могуць адначасова і дакладна фіксаваць мноства аб'ектаў.

З 1995 г. у абсерваторыі Маўна-Кеа (ЗША) працуюць два аднолькавыя 10-метровыя тэлескопы «Кек-1» і «Кек-2». Кожная люстра тэлескопа складаецца з 36 сегментаў. Якасць відарыса рэгулюе камп'ютар, які кіруе кожным сегментам люстра. Па распазнавальнай здольнасці такі тэлескоп набліжаецца да касмічнага. Абсерваторыя знаходзіцца на вышыні 4145 м над Ціхім акіянам на Гавайскіх астравах.

Оптыка касмічнага тэлескопа Хабла (рыс. 100) набліжаецца да ідэальнай аптычнай сістэмы. Па-за атмасферай лю-

Самыя буйныя сучасныя тэлескопы кіруюцца пры дапамозе камп'ютараў, а атрыманыя відарысы касмічных аб'ектаў фіксуюцца ў форме, якая апрацоўваецца камп'ютарнымі праграмамі.

Фатаграфія амаль выйшла з ужытку. У апошнія дзесяцігоддзі атрымалі шырокае распаўсюджанне **фотаэлектрычныя прыёмнікі выпраменьвання**, звесткі ад якіх перадаюцца непасрэдна на камп'ютары. Да такіх прылад адносяцца ПЗС-матрыцы (прылады з зарадавай сувяззю).

ПЗС-матрыца — гэта інтэгральная схема, размешчаная на паўправадніковым матэрыяле, якая пераўтварае светлавую энергію выпраменьвання ў энергію электрычнага току. Сіла току прапарцыянальна інтэнсіўнасці светлага патоку. Такія прылады маюць высокую эфектыўнасць у рэгістрацыі светлавых квантаў (квантавы выхад): выкарыстоўваецца да 80 % ад іх агульнай колькасці.

Камп'ютарная апрацоўка відарыса дае магчымасць пазбавіцца ад фону і перашкод, што ствараюцца за кошт рассейвання святла ў атмасферы Зямлі і турбулентнасці атмасферы.

3. Радыётэлескопы. Вывучэннем касмічных радыёкрыніц займаецца *радыёастраномія*. Яна ўзнікла ў 1931 г., калі выпадкова было выяўлена радыёвыпраменьванне цэнтра Млечнага Шляху. Праз 15 гадоў у сузор'і Лебедзя знайшлі першую кропкавую крыніцу радыёхваль — слабую галактыку, якую потым удалося разгледзець у аптычным дыяпазоне.

Радыёвыпраменьванне, якое даходзіць да Зямлі ад большасці нябесных аб'ектаў, вельмі слабае. Для выяўлення і прыёму касмічнага радыёвыпраменьвання выкарыстоўваюцца прылады, якія атрымалі назву **радыётэлескопаў**. Радыётэлескопы складаюцца з антэннага ўстройства і адчувальнай прыёмнай сістэмы. Прыёмная сістэма, або радыёметр, узмацняе прынятае антэнай радыёвыпраменьванне і пераўтварае яго ў зручную для далейшай апрацоўкі форму.

Асноўнае прызначэнне антэннага ўстройства — сабраць максімальную колькасць энергіі, што прыносіцца радыёхвалямі ад аб'екта. У якасці антэны выкарыстоўваецца суцэльнае металічнае ці сеткаватае люстра ў форме парабалоіда. Антэна радыётэлескопа адрозніваецца ад звычайных антэн радыёсвязі высокай накіраванасцю, г. зн. здольнасцю вылучаць радыёвыпраменьванне невялікага ўчастка неба. У фокусе парабалоіда змяшчаецца апрамяняльнік — прылада, якая збірае радыёвыпраменьванне, накіраванае на яе люстрам. Апрамяняльнік перадае прынятую энергію на прыёмнае ўстройства, дзе сігнал узмацняецца, дэтэктуецца і рэгіструецца.

Радыётэлескопы вельмі вялікага памеру могуць складацца з асобных люстраў, кожнае з якіх факсіруе прынятае выпраменьванне на адзін апрамяняльнік. Прыкладам з'яўляецца расійскі радыётэлескоп РАТАН-600



Рыс. 101. Радыётэлескоп
РАТАН-600

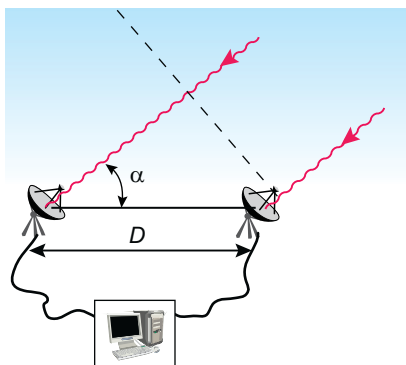


Рыс. 102. Гіганцкі радыётэлескоп
FAST (Кітай)

(рыс. 101). Антэна гэтага тэлескопа ўяўляе сабой замкнутае кальцо дыяметрам 576 м, якое складаецца з 895 плоскіх люстраў памераў $2,1 \times 7,4$ м, што ўтвараюць сегменты парабалоіда.

Магутнасць радыёсігналу, які трапляе на ўваход прыёмніка, прама прапарцыянальна плошчы антэны. Таму антэна большага памеру з адным і тым жа прыёмнікам забяспечвае лепшую адчувальнасць, г. зн. дае магчымасць выявіць слабыя крыніцы з малой магутнасцю выпраменьвання. Антэны самых буйных радыётэлескопаў дасягаюць соцень метраў. У 2016 г. у гарах кітайскай правінцыі Гуйчжоў быў пабудаваны самы вялікі ў свеце радыётэлескоп FAST (рыс. 102). Яго гіганцкая чаша мае дыяметр 500 м, а гэта на 200 м больш за памеры радыётэлескопа ў Пуэрта-Рыка, які да з'яўлення свайго кітайскага канкурэнта быў самым вялікім у свеце.

Калі радыёвыпраменьванне крыніцы адначасова ўспрымаецца дзвюма і больш антэнамі, якія размешчаны на некаторай адлегласці адна ад адной, а по-



Рэгіструючая апаратура

Рыс. 103. Схема работы
радыёінтэрферометра

тым гэтыя сігналы падсумоўваюцца, то ў выніку інтэрферэнцыі радыёсігналаў распазнавальная здольнасць тэлескопаў значна ўзрастае. Такі інструмент называецца **радыёінтэрферометрам**. На рысунку 103 паказана схема работы радыёінтэрферометра, які складаецца з двух радыётэлескопаў. Адлегласць D , што іх раздзяляе, можа складаць сотні і нават тысячы кіламетраў. Напрыклад, шматэлементны радыёінтэрферометр VLA (штат Нью-Мексіка, ЗША) складаецца з 27 індыўідуальных 25-метровых парабалоідаў, якія разнесены на 25 км адзін ад аднаго. Радыёінтэрферометры са звышдоўгай базай аб'ядноўваюць разнесеныя на тысячы

кіламетраў радыётэлескопы. З іх дапамогай змаглі атрымаць вуглавое распазнаванне каля $0,0001''$.

Радыёхвалі свабодна праходзяць скрозь вyalізныя міжзоркавыя газапылавыя воблакі і атмасферу Зямлі. Таму метады радыёастраноміі вельмі важныя для вывучэння, напрыклад, цэнтральных раёнаў Млечнага Шляху і іншых галактык, паколькі аптычныя хвалі, што ідуць з гэтых зон, поўнасю паглынаюцца.

У большай ці меншай ступені радыёвыпраменьвальную здольнасць маюць усе галактыкі. Але некаторыя з іх адрозніваюцца павышанай актыўнасцю. На rysунку 104 паказана сумяшчэнне аптычнай фатаграфіі і ліній інтэнсіўнасці радыёвыпраменьвання галактыкі Цэнтаўр А.



Рыс. 104. Аптычнае і радыёвыпраменьванне галактыкі Цэнтаўр А

Усе вядомыя касмічныя радыёкрыніцы ў 80-х гг. XX ст. былі зведзены ў каталог, які налічвае звыш 100 тыс. аб'ектаў.

У 1958 г. астраномы ЗША атрымалі першае радарнае рэха ад іншай планеты — Венеры. Адбіткі радарных сігналаў ад іншых планет даюць самыя дакладныя вымярэнні адлегласцей. Гэтыя ж радыёлакацыйныя метады далі магчымасць пранікнуць праз шчыльную атмасферу Венеры і даследаваць рэльеф яе паверхні. З дапамогай радара былі дакладна вызначаны перыяды абарачэння Венеры і Меркурыя.

4. Пазаатмасферная астраномія. Асобы раздзел астраноміі — **пазаатмасферная астраномія** — вывучае нябесныя аб'екты пры дапамозе апаратуры, вынесенай за межы зямной атмасферы. Розныя прылады, размешчаныя на штучных спадарожніках Зямлі (ШСЗ) і аўтаматычных міжпланетных станцыях (АМС), даюць магчымасць вывучаць касмічныя аб'екты ва ўсім дыяпазоне даўжынь хваль, пачынаючы ад жорсткага гама-выпраменьвання да кіламетровых радыёхваль. Таму сучасная астраномія стала ўсяхвалявай.

Выкарыстанне **інфрачырвонага выпраменьвання** ў астраноміі пачалося з таго, што з яго дапамогай правялі дакладныя вымярэнні тэмпературы паверхні і атмасферы планет Сонечнай сістэмы. Такім жа спосабам у атмасферах Марса, Венеры і Юпітэра быў выяўлены вуглякіслы газ. Інфрачырвоныя назіранні планет-гігантаў далі магчымасць вызначыць структуру іх атмасфер і выявіць лёд на спадарожніках.



Рис. 105. Крабападобная туманнасць у рэнтгенаўскіх праменях

Сенсацыйным адкрыццём інфрачырвонай астраноміі стала вада, выяўленая ў космасе ў вялікай колькасці. Яна прысутнічае ў газапылавых туманнасцях, каметах і на малых планетах.

Паколькі зямная атмасфера моцна экраніруе **ультрафіялетавае выпраменьванне**, яго прыёмнікі прыходзіцца размяшчаць на ШСЗ. Праведзеныя ў 1999 г. назіранні далі вельмі цікавыя навуковыя вынікі. Высветлілася, што ў нашай Галактыцы шырока распаўсюджаны масы моцна нагрэтага (да паўмільёна градусаў) міжзоркавага газу, які размешчаны на адлегласці ад 5 да 10 тыс. светлавых гадоў ад цэнтральнай плоскасці Млечнага Шляху. Гэты газ награвецца, хутчэй

за ўсё, у выніку ўспышак звышновых зорак.

Крыніцамі **гама-выпраменьвання** з'яўляюцца ўспышкі на Сонцы, ядры актыўных галактык, квазары. З дапамогай рэнтгенаўскіх касмічных абсерваторый даследуюцца звышновыя зоркі, туманнасці (рис. 105), нейтронныя зоркі, сонечная карона і ўспышкі на Сонцы.

Сучасныя арбітальныя абсерваторыі аснашчаны прыёмнікамі рознага тыпу выпраменьвання. Напрыклад, арбітальная абсерваторыя Свіфт, запушчаная ў 2004 г., вывучае касмічныя гама-ўсплескі і вядзе назіранні адначасова ў гама-, рэнтгенаўскім, ультрафіялетавым і аптычным дыяпазонах.

Для вывучэння гравітацыйных хваль, выяўленых у 2015 г., выкарыстоўваюцца гравітацыйна-хвалевыя інтэрферометры.



Галоўныя вывады

1. Атмасфера Зямлі прапускае электрамагнітнае выпраменьванне толькі ў пэўных дыяпазонах хваль, таму выпраменьванне ад касмічных аб'ектаў на паверхні Зямлі даследуюць пры дапамозе аптычных тэлескопаў і радыётэлескопаў.
2. Пазаатмасферная астраномія дае магчымасць даследаваць нябесныя аб'екты ва ўсім дыяпазоне электрамагнітнага выпраменьвання.
3. У залежнасці ад канструкцыі адрозніваюць аптычныя телескопы наступных тыпаў: лінзавыя (рэфрактары), люстраныя (рэфлектары) і люстрана-лінзавыя.
4. Асноўныя аптычныя параметры тэлескопаў — бачнае павелічэнне, распазнавальная здольнасць, пранікальная сіла.
5. Павелічэнне распазнавальнай здольнасці аптычных і радыётэлескопаў дасягаецца за кошт аб'яднання іх комплексаў у інтэрферометры.



Кантрольныя пытанні і заданні

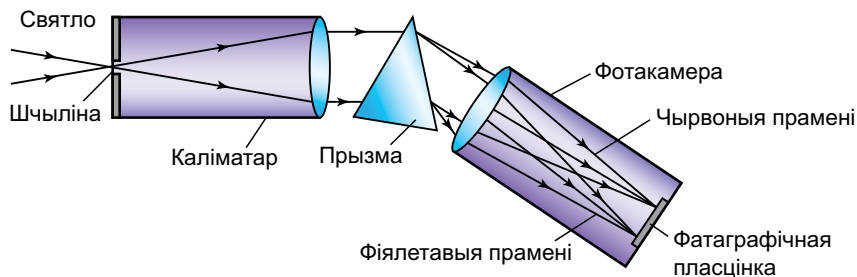
1. На якія дыяпазоны падзяляецца ўвесь спектр электрамагнітнага выпраменьвання?
2. Чаму з паверхні Зямлі нельга вывучаць нябесныя аб'екты ва ўсіх дыяпазонах электрамагнітнага выпраменьвання?
3. Якія асноўныя задачы рашаюць у астраноміі з дапамогай тэлескопаў?
4. Як можна вызначыць бачнае павелічэнне аптычнай сістэмы тэлескопа?
5. Што разумеюць пад распазнавальнай здольнасцю тэлескопа? Пранікальнай сілай?
6. Што разумеюць пад пазаатмасфернай астраноміяй?
7. Вызначце распазнавальную здольнасць глядзельнай трубы з дыяметрам аб'ектыва 5 см.
8. Павелічэнне тэлескопа роўна 75. Фокусная адлегласць аб'ектыва 5 м. Вызначце фокусную адлегласць акуляр.
9. З тэлескопа з фокуснай адлегласцю аб'ектыва 3 м вынялі акуляр і вокам разглядаюць вельмі далёкі прадмет, атрыманы ў галоўным фокусе аб'ектыва. Якое павелічэнне дае тэлескоп?

§ 18. Спектральны аналіз у астраноміі

1. Віды спектраў. У 1666 г. Ісаак Ньютан пры прапусканні пучка сонечнага святла праз трохгранную шкляную прызму заўважыў, што той не толькі праламляецца да асновы прызмы, але і распадаецца на колеравыя складальныя. Атрыманую на экране каляровую палоску з сямі асноўных колераў, якія паступова пераходзяць адзін у другі, назвалі **спектрам**.

Для назірання і даследавання спектраў выкарыстоўваюць прыладу — **спектраскоп**. Для атрымання і рэгістрацыі спектраў нябесных цел выкарыстоўваюць спецыяльную аптычную прыладу — **спектрограф**.

Спектры адносна яркіх святлаў фатаграфуюць шчыліннымі спектрографамі, якія складаюцца з каліметара, прызмы і фотакамеры (рыс. 106). Фатаграфічны



Рыс. 106. Схема шчыліннага спектрографа

здымак спектра нябеснага цела называецца **спектраграмай**. Спектраграмай называюць таксама графік залежнасці інтэнсіўнасці (магутнасці) выпраменьвання нябеснага цела ад даўжыні хвалі або частаты.

Любое цела, якое свеціцца, стварае **спектр выпраменьвання**. Спектры бываюць суцэльнымі (неперарыўнымі), лінейчастымі і паласатымі.

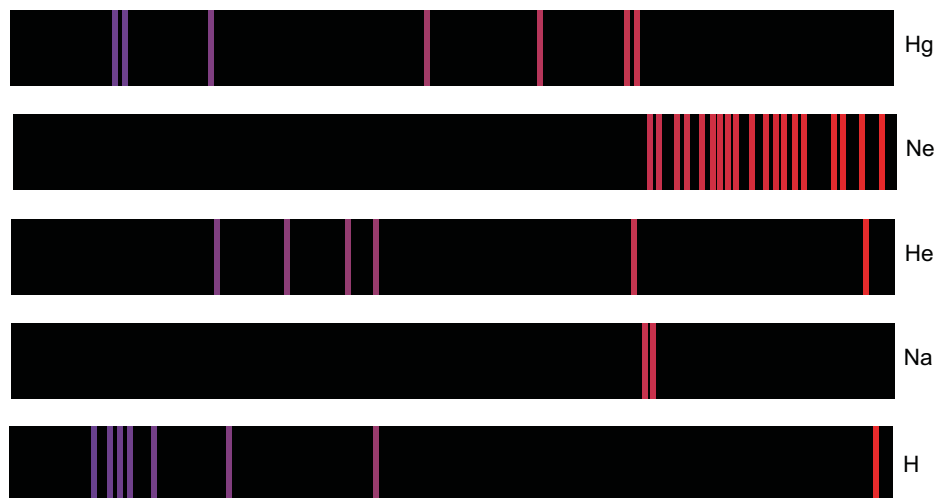
Суцэльны спектр мае выгляд неперарыўнай паласы, колеры якой паступова пераходзяць адзін у другі. Усе цвёрдыя целы, расплаўленыя металы, газы, што свеціцца, і пара, якая знаходзіцца пад вельмі высокім ціскам, даюць суцэльны спектр. Такі спектр можна, напрыклад, атрымаць ад дугавога ліхтара і свечкі, якая гарыць.

Іншы выгляд мае спектр, калі ў якасці крыніцы святла выкарыстоўваецца распалены газ ці пара пры ўмове, што іх ціск мала адрозніваецца ад нармальнага і газ знаходзіцца ў атамарным стане. У гэтым выпадку гавораць аб **лінейчастым спектры** (атамным). Ён складаецца з асобных рэзкіх каляровых ліній, раздзеленых цёмнымі прамежкамі (рыс. 107). Устаноўлена, што кожны хімічны элемент у стане распаленага газу, які складаецца з атамаў, выпраменьвае ўласцівы толькі яму аднаму лінейчасты спектр з характэрнымі каляровымі лініямі, заўсёды размешчанымі на вызначаным месцы.

Паласаты спектр (малекулярны) складаецца з асобных ліній, якія зліваюцца ў палосы (выразныя з аднаго боку і размытыя з другога), раздзеленыя цёмнымі прамежкамі. Такі спектр выпраменьваюць малекулы газаў і пары.

Разам са спектрамі выпраменьвання існуюць спектры паглынання.

Суцэльны спектр, перасечаны цёмнымі лініямі або палосамі ў выніку праходжання белага святла праз распалены газы ці пару, называецца **спектрам па-**



Рыс. 107. Лінейчастыя спектры некаторых рэчываў (Hg, Ne, He, Na, H)

глынання. Даследаванне з’явы ўзнікнення спектраў паглынання паказала, што *рэчыва паглынае прамені тых даўжынь хваль, якія яно можа выпраменьваць у дадзеных умовах.*

Такім чынам, для кожнага хімічнага элемента яго лінейчасты спектр выпраменьвання і спектр паглынання з’яўляюцца абарачальнымі. Гэта азначае, што месцазнаходжанне цёмных ліній паглынання дакладна адпавядае месцазнаходжанню каляровых ліній выпраменьвання.

Спектр утрымлівае найважнейшую інфармацыю аб выпраменьванні. Агульны выгляд спектра і дэталёвае размеркаванне энергіі ў ім залежаць ад тэмпературы, хімічнага складу і фізічных уласцівасцей крыніцы, а таксама ад скорасці яе руху. Метад даследавання хімічнага складу цел і іх фізічнага стану пры дапамозе спектраў выпраменьвання і паглынання называецца **спектральным аналізам**.

2. Хімічны склад нябесных цел. У 1814 г. нямецкі фізік Ёзаф Фраўнгофер пры назіранні спектра Сонца з дапамогай зробленага ім спектраскопа з дыфракцыйнай рашоткай звярнуў увагу на тое, што суцэльны спектр Сонца мае значную колькасць цёмных ліній. Вучоны ўстанавіў, што гэтыя лініі (пазней названыя яго імем) невыпадковыя і заўсёды прысутнічаюць у спектры Сонца на строга вызначаных месцах. **Фраўнгоферавы лініі** — гэта лініі паглынання пары розных рэчываў, размешчаных паблізу ад крыніцы суцэльнага спектра — яркай паверхні Сонца (паміж фотасферай і спектральнай прыладай). Сонца акружана газавай абалонкай, якая мае больш нізкую тэмпературу і меншую шчыльнасць, чым фотасфера. Такім чынам, спектр Сонца з’яўляецца, па сутнасці, спектрам паглынання гэтай пары.

Пры дэталёвай класіфікацыі фраўнгоферавых ліній адзін за адным на Сонцы выявілі ўсе зямныя элементы. Пасля правядзення велізарнай па аб’ёме працы па ўстанаўленні адпаведнасці фраўнгоферавых ліній пэўным элементам высветлілася, што некалькі спектральных ліній не належаць ніводнаму зямному элементу. Так быў адкрыты новы элемент — гелій (сонечны). І толькі праз 26 гадоў гелій выявілі на Зямлі.

Пры параўнанні даўжынь хваль ліній паглынання, якія назіраюцца ў спектрах нябесных цел, з атрыманымі ў лабараторыі або тэарэтычна разлічанымі спектрамі розных рэчываў можна вызначыць хімічны склад касмічнага аб’екта, які выпраменьвае і знаходзіцца на вельмі вялікай адлегласці. Спектральны аналіз дае магчымасць вызначыць склад не толькі Сонца, але і іншых аб’ектаў — зорак, туманнасцей. Аналіз спектраў — асноўны метад вывучэння фізічнай прыроды касмічных аб’ектаў, які выкарыстоўваецца ў астрафізіцы.

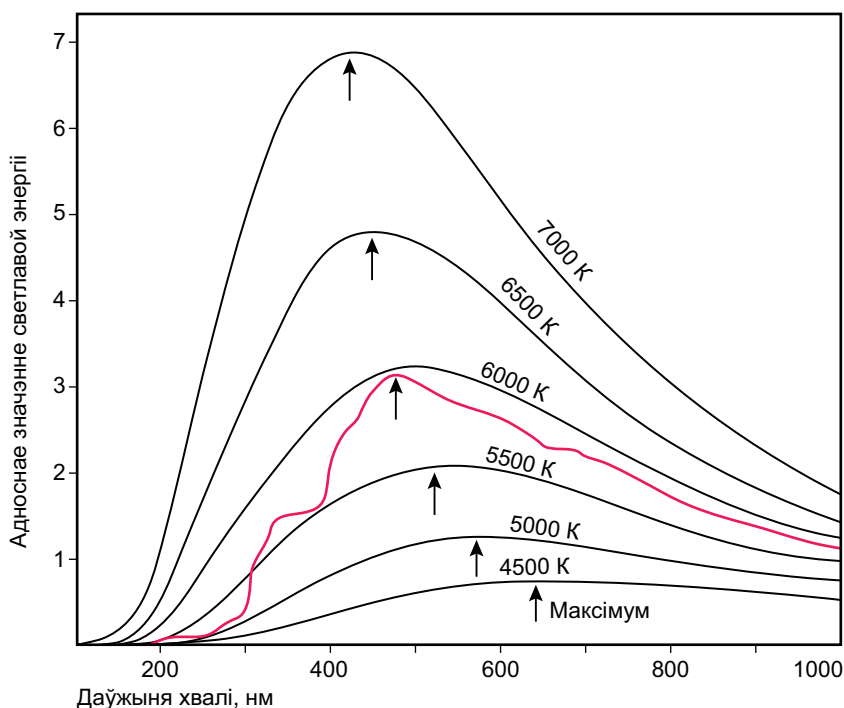
3. Тэмпература. Законы Віна і Стэфана—Больцмана. Кожнае, нават слаба нагрэтае цела выпраменьвае электрамагнітныя хвалі (цеплавое выпраменьванне). Пры тэмпературах, не большых за 10^3 К, выпраменьваюцца галоўным чынам інфрачырвоныя прамені і радыёхвалі. Пры далейшым награванні спектр

цёплага выпраменьвання мяняецца: па-першае, павялічваецца агульная колькасць энергіі, якая выпраменьваецца, па-другое, з'яўляюцца прамені ўсё больш і больш кароткіх даўжынь хваль — бачныя (ад чырвоных да фіялетавых), ультрафіялетавыя, рэнтгенаўскія і г. д.

Пры цёплым выпраменьванні ўнутраная энергія цёплага руху атамаў і малекул цела пераходзіць у энергію электрамагнітных хваль, што выпраменьваюцца. Пры паглыннанні святла адбываецца адваротны працэс пераходу электрамагнітнай энергіі ва ўнутраную энергію цела.

Размеркаванне энергіі ў непарыўным спектры цел рознай тэмпературы можна паказаць у выглядзе графіка (рыс. 108). З павелічэннем тэмпературы максімум выпраменьвання абсалютна чорнага цела зрушваецца ў караткахвалеваю частку спектра. Даўжыня хвалі λ_{max} , якой адпавядае максімум у размеркаванні энергіі, звязана з абсалютнай тэмпературай T суадносінай, якая называецца **законам зрушэння Віна**:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b,$$



Рыс. 108. Размеркаванне энергіі ў непарыўных спектрах цел, нагрэтых да розных тэмператур. Чырвоная крывая лінія — спектр Сонца

дзе b — пастаянная Віна ($b \approx 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$). Гэты закон выконваецца не толькі для аптычнага, але і для любога іншага дыяпазону электрамагнітнага выпраменьвання.

У спектраграме Сонца найбольшая інтэнсіўнасць выпраменьвання прыпадае на даўжыню хвалі $\lambda = 480 \text{ нм}$, таму тэмпература сонечнай фотасферы блізкая да 6000 К .

З павелічэннем тэмпературы мяняецца не толькі колер выпраменьвання, але і яго магутнасць. У выніку эксперыментаў і тэарэтычных разлікаў было даказана, што *магутнасць выпраменьвання абсалютна чорнага цела прапарцыянальна чацвёртай ступені тэмпературы (закон Стэфана—Больцмана)*. Кожны квадратны метр паверхні абсалютна чорнага цела выпраменьвае за 1 с па ўсім напрамках ва ўсім дыяпазоне даўжын хвалей энергію:

$$\varepsilon = \sigma T^4,$$

дзе ε — магутнасць выпраменьвання адзінкі паверхні нагрэтага цела, T — абсалютная тэмпература, σ — пастаянная Стэфана—Больцмана, роўная $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Калі вядома колькасць энергіі, што прыходзіць ад зоркі да зямной паверхні, то па законе Стэфана—Больцмана можна вызначыць яе тэмпературу. Законы Віна і Стэфана—Больцмана справядлівыя для выпраменьвання абсалютна чорнага цела. У першым набліжэнні можна лічыць, што зоркі, у прыватнасці Сонца, выпраменьваюць як абсалютна чорнае цела.

4. Эфект Доплера. У астрафізіцы шырока выкарыстоўваецца **эфект Доплера**, які ўзнікае пры руху крыніцы выпраменьвання адносна назіральніка. Сутнасць эфекту Доплера заключаецца ў наступным: калі крыніца выпраменьвання рухаецца па прамені зроку назіральніка са скорасцю v_r , якая называецца прамянёвай скорасцю, то замест даўжыні хвалі λ_0 , якую выпраменьвае крыніца, назіральнік фіксуе хвалю даўжынёй λ , так што

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_r}{c} \right),$$

дзе c — скорасць святла.

Скорасць v_r дадатная пры аддаленні крыніцы святла ад назіральніка ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 > 0$) і адмоўная пры набліжэнні да яго ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 < 0$).

З эфектам Доплера мы часта сутыкаемся ў акустыцы. Напрыклад, калі вы стаіце на платформе, міма якой праходзіць цягнік, то можаце заўважыць, што пакуль ён набліжаўся, гукавы сігнал быў больш высокі, а калі стаў аддаляцца,

вышыня гуку адразу знізілася. Аналагічная з’ява назіраецца і ў опыцы: святло ад крыніцы, якая набліжаецца, робіцца больш сінім (частата павялічваецца), а ад крыніцы, якая аддаляецца, — больш чырвоным (частата памяншаецца). Гэта змяненне адбываецца на месцазнаходжанні спектральных ліній у спектры: яны зрушваюцца ў сінюю або чырвоную частку спектра.

Для вымярэння зрушэння спектральных ліній побач са спектрам зоркі, якую даследуюць, на тую ж фотапласцінку фатаграфуюць спектр лабараторнай крыніцы, у якім ёсць вядомыя спектральныя лініі. Потым пры дапамозе мікраскопаў з дакладнымі мікрометрамі вымяраюць зрушэнне ліній аб’екта ў адносінах да лабараторнай сістэмы даўжынь хваль і такім чынам знаходзяць велічыню $\Delta\lambda$. Затым па формуле

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c},$$

якая вынікае з прыведзенай вышэй, вылічваюць прамяжнёвую скорасць v_r .

Прыведзеная вышэй формула Доплера прыдатная толькі для скарасцей v_r у межах да 0,1 скорасці святла. Пры руху крыніц выпраменьвання са скарасцямі, блізкімі да скорасці святла, неабходна ўлічваць законы тэорыі адноснасці.

Зрух спектральных ліній тэарэтычна прадказаў у 1842 г. аўстрыйскі фізік Х. Доплер. Правільнасць яго высноў пацвердзіў у 1899 г. лабараторнымі даследамі і назіраннямі спектраў зорак рускі астрафізік А. А. Белапольскі.



Галоўныя вывады

1. Усе целы, што свецяцца, маюць спектры выпраменьвання, якія могуць быць суцэльнымі (неперарыўнымі), лінейчастымі і паласатымі.
2. Кожны хімічны элемент мае свой, толькі яму ўласцівы лінейчасты спектр. Лінейчасты спектр строга пастаянны і не залежыць ад таго, уваходзіць гэты элемент у склад складанага рэчыва ці ўзяты ў чыстым выглядзе.
3. Пры адносным перамяшчэнні крыніцы выпраменьвання і назіральніка адбываецца зрушэнне спектральных ліній у яе спектры.
4. У адпаведнасці з законам зрушэння Віна любое цела, нагрэтае вышэй тэмпературы абсалютнага нуля, выпраменьвае энергію. Дадзены закон тлумачыць зрух у бок кароткіх хваль максімуму (бачнага або нябачнага) выпраменьвання цел па меры іх нагрэву.
5. Закон Стэфана—Больцмана апісвае залежнасць энергіі цеплавога выпраменьвання ад тэмпературы.

**Кантрольныя пытанні і заданні**

1. Што такое спектр? Якія з'явы даказваюць складаны склад святла?
2. Назавіце і дайце азначэнні тром асноўным відам спектраў.
3. Што такое спектральны аналіз?
4. Сфармулюйце і запішыце закон зрушэння Віна і закон Стэфана—Больцмана. Якое значэнне гэтых законы маюць у астраноміі?
5. У якім выпадку зрушэнне ліній спектраграмы можа не адбывацца, нягледзячы на рух аб'екта?
6. Вызначце тэмпературу зоркі, калі ў яе спектры максімум інтэнсіўнасці выпраменьвання прыпадае на даўжыню хвалі 340 нм.
7. Вымярэнне спектраграмы зоркі паказала, што лінія жалеза ($\lambda = 530,2$ нм) у яе спектры зрушана ў параўнанні з лініямі лабараторнай крыніцы ў бок найбольш кароткіх хваль на 0,02 нм. Якая скорасць зоркі па прамені зроку?
8. Эфект Доплера выкарыстоўваецца для ацэнкі скорасці вывяржэння вадароду ў сонечных пратуберанцах. Вызначце гэту скорасць, калі вымярэнні паказалі для α -лініі вадароду ($\lambda_\alpha = 656,3$ нм) доплераўскі зрух $\Delta\lambda = 0,3$ нм.



Раздзел VI

Сонца — дзённая зорка

§ 19. Сонца як зорка

1. Агульныя звесткі. Сонца мае выключнае значэнне ў жыцці чалавека. Яно забяспечвае нас святлом, цяплом, з’яўляецца крыніцай усіх відаў энергіі, якія выкарыстоўваюцца людзьмі. Сонца ўплывае на магнітнае поле і верхнія слаі атмасферы Зямлі: выклікае магнітныя буры, іанізацыю і цыркуляцыю атмасферы. Сонечнае «надвор’е» ўплывае на клімат, біясферу і зямное жыццё ўвогуле.

Сонца — цэнтральнае цела Сонечнай сістэмы, тыповая зорка, якая ўяўляе сабой распалены плазменны шар. Сонца — адна з 400 млрд зорак нашай Галактыкі. Пры дэталёвым вывучэнні фізічнай прыроды Сонца мы атрымліваем найважнейшыя звесткі аб прыродзе іншых зорак. Бачны з Зямлі сонечны дыск — асяп-ляльна жоўты круг з сярэднім вуглавым дыяметрам $32'$. Святло ад яго даходзіць да Зямлі за 8 мін 20 с.

Дыяметр Сонца роўны 1 млн 392 тыс. км (109 дыяметраў Зямлі). Гэта азначае, што аб’ём Сонца больш чым у мільён разоў перавышае аб’ём Зямлі, а яго маса складае $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг, што прыкладна роўна 330 000 зямных мас.

Вымярэнні па-за межамі зямной атмасферы паказалі, што на пляцоўку 1 м^2 , размешчаную перпендыкулярна да сонечных праменяў, кожную секунду паступае энергія, якая практычна не змяняецца працяглы перыяд часу. Яна атрымала назву **сонечнай пастаяннай**. Сонечная пастаянная роўна $1,37 \text{ кВт/м}^2$.

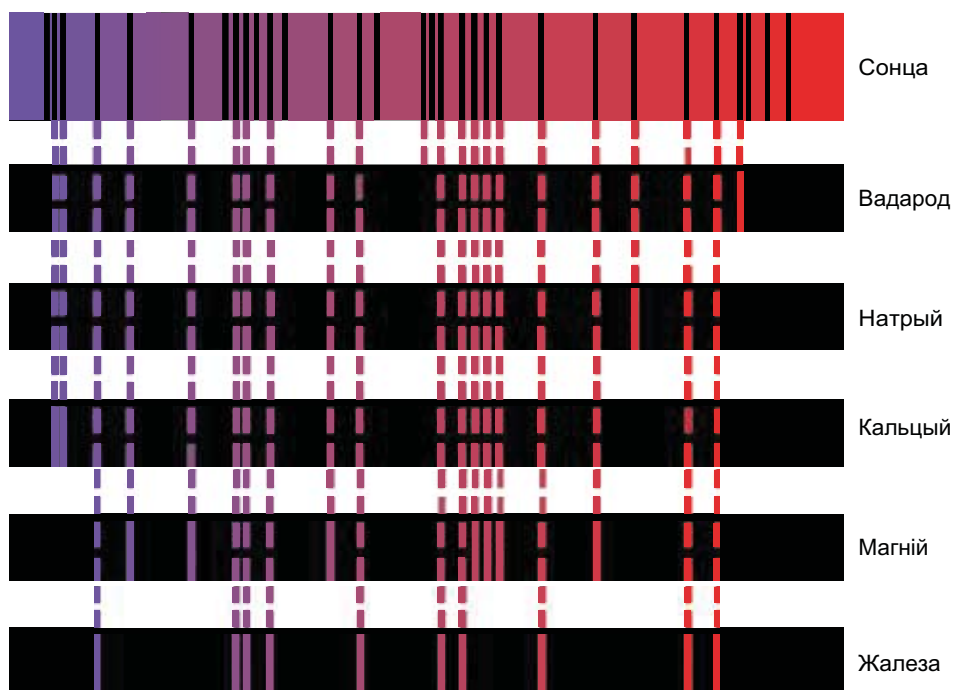
Свяцільнасць Сонца, ці поўную колькасць энергіі, якую выпраменьвае Сонца па ўсіх напрамках за адзінку часу, вызначым наступным чынам: велічыню сонечнай пастаяннай памножым на плошчу сферы з радыусам r у адну астранамічную адзінку (1 а. адз. = $149,6 \cdot 10^9$ м). Яна атрымаецца роўнай:

$$L_{\odot} = 4\pi r^2 \cdot 1370 \text{ Вт/м}^2 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

На Зямлю трапляе мізэрная частка сонечнай энергіі, якая складае каля паловы мільярднай долі азначанага вышэй значэння.

2. Спектр і хімічны склад. Амаль усе нашы веды аб Сонцы заснаваны на вивучэнні яго спектра. Хімічныя элементы, якія прысутнічаюць у атмасферы Сонца, паглынаюць з непарарывнага спектра, што выпраменьваецца фотасферай, святло пэўнай частаты. У выніку гэтага ў непарарывным спектры з'яўляюцца цёмныя лініі. Як мы ўжо адзначалі, Ё. Фраўнгофер упершыню выявіў і зарысаваў 576 цёмных ліній сонечнага спектра. Вучоны правільна вызначыў, што крыніца цёмных спектральных ліній — сонечная атмасфера. Па месцазнаходжанню у спектры (г. зн. даўжынях хваль) і інтэнсіўнасцях гэтых фраўнгоферавых ліній можна вызначыць, якія хімічныя элементы прысутнічаюць у сонечнай атмасферы (рыс. 109).

У бачнай вобласці спектра ўжо атаясамлена звыш 30 тыс. ліній для 70 хімічных элементаў, якія прысутнічаюць у атмасферы Сонца. Фраўнгоферавы лініі па інтэнсіўнасці і шырыні надзвычай разнастайныя. Аналіз спектральных ліній паказаў, што пераважным элементам на Сонцы з'яўляецца вадарод — на яго долю прыпадае прыкладна 74 % масы Сонца, каля 24 % прыпадае на гелій і каля 2 % на іншыя элементы.



Рыс. 109. Адпаведнасць паміж месцазнаходжаннем
фраўнгоферавых ліній сонечнага спектра і ліній хімічных элементаў

3. Унутраная будова. На аснове звестак аб радыусе, масе, свяцільнасці Сонца, фізічных законаў (якія з прычыны сваёй універсальнасці прыдатныя і для іншых нябесных цел) можна атрымаць інфармацыю аб ціску, шчыльнасці, тэмпературы і хімічным складзе на розных адлегласцях ад цэнтра Сонца. Пры набліжэнні да цэнтра Сонца нарастаюць, дасягаючы максімальных значэнняў, тэмпература, ціск і шчыльнасць. Хімічны склад Сонца таксама адрозніваецца: працэнтнае ўтрыманне вадароду самае малое ў цэнтры.

Высокі ціск унутры Сонца абумоўлены дзеяннем слаёў, якія ляжаць вышэй. Сілы прыцягнення імкнуцца сціснуць Сонца. Ім процідейнічаюць пругкасць гарачага газу і ціск выпраменьвання, якія ідуць з непраў. Гэтыя сілы імкнуцца расшырыць Сонца. Прыцягненне, з аднаго боку, а пругкасць газаў і ціск выпраменьвання, з другога боку, ураўнаважваюць адно аднаго. Раўнавага мае месца ва ўсіх сляях ад паверхні да цэнтра Сонца. Такі стан Сонца і зорак называецца **гідрастатычнай раўнавагай**. Гэта простая ідэя была прапанавана ў 1924 г. англійскім астрафізікам Артурам Эдынгтанам. Яна дала магчымасць скласці ўраўненні, па якіх разлічваюць мадэлі ўнутранай будовы Сонца, а таксама іншых зорак. Такія мадэлі ўяўляюць сабой сукупнасць параметраў зоркавага рэчыва (тэмпература, ціск, шчыльнасць і г. д.) на розных глыбінях. У табліцы 13 прыведзена так званая мадэль унутранай будовы Сонца, г. зн. залежнасць яго фізічных уласцівасцей ад глыбіні.

Табліца 13. Мадэль унутранай будовы Сонца

Адлегласць ад цэнтра $R/R_{\odot}$	Тэмпература $T, \text{ К}$	Ціск $p, \text{ Па}$	Шчыльнасць $\rho, \times 10^3 \text{ кг/м}^3$
0	$1,5 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{16}$	150
0,2	$1,0 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^{15}$	36
0,5	$3,4 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^{13}$	1,3
0,8	$1,3 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^{11}$	0,035
0,98	$1,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^9$	0,001

Як бачна з табліцы, тэмпература ў цэнтры Сонца ($R/R_{\odot} = 0$) дасягае 15 млн градусаў. Менавіта ў гэтай вобласці — **зоне ядзерных рэакцый** — генеруецца энергія Сонца.

Мы ўжо ведаем, што сонечнае рэчыва ў асноўным складаецца з вадароду. Пры вялізных цісках і тэмпературах пратоны (ядры вадароду) рухаюцца са скарасцямі ў сотні кіламетраў за секунду. Унутры Сонца (на адлегласцях да 0,3 радыуса ад цэнтра) ствараюцца ўмовы, спрыяльныя для працякання тэрма-ядзерных рэакцый ператварэння атамаў лёгкіх хімічных элементаў у больш цяжкія

атамы (рис. 110). З ядер вадароду ўтвараецца гелій. Для ўтварэння аднаго ядра гелію патрабуецца 4 ядры вадароду. На прамежкавых стадыях утвараюцца ядры цяжкага вадароду ^2H (дэйтэрыю) і ядры ізатопа ^3He . Гэта рэакцыя называецца **протон-протоннай** (рис. 111). Пры рэакцыі невялікая частка масы ядер вадароду губляецца, пераўтвараючыся ў вялізную колькасць энергіі. Энергія, якая выдзяляецца, падтрымлівае выпраменьванне Сонца. Праз слаі, якія акружаюць цэнтральную частку зоркі, гэта энергія перадаецца вонкі.

У прамежку ад 0,3 да 0,7 радыуса ад цэнтра Сонца знаходзіцца **зона праменнага пераносу энергіі**, дзе энергія распаўсюджваецца праз паглыннанне і выпраменьванне гама-квантаў.

Гама-кванты, што нараджаюцца ў цэнтры Сонца, маюць энергію, у мільёны разоў большую, чым энергія квантаў бачнага святла. Даўжыня хвалі гама-квантаў вельмі малая. У працэсе паглынання квантаў атамамі і далейшага іх перавыпраменьвання адбываецца паступовае памяншэнне іх энергіі і павелічэнне даўжыні хвалі. Колькасць квантаў пры гэтым нарастае. Магутныя гама-кванты паступова драбняцца на кванты з меншай энергіяй: узнікаюць рэнтгенаўскія, ультрафіялетавыя і, нарэшце, бачныя і інфрачырвоныя прамені.

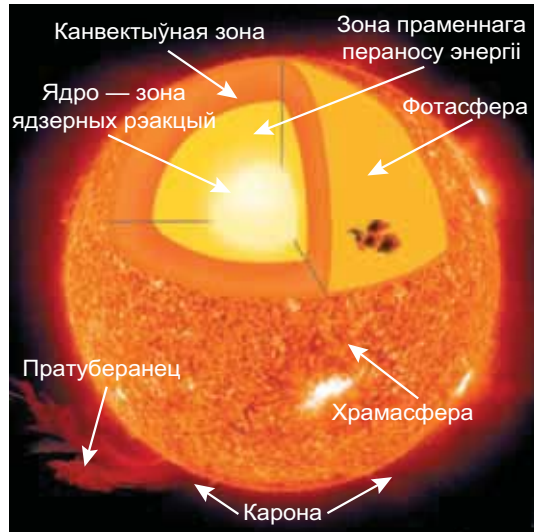


Рис. 110. Будова Сонца

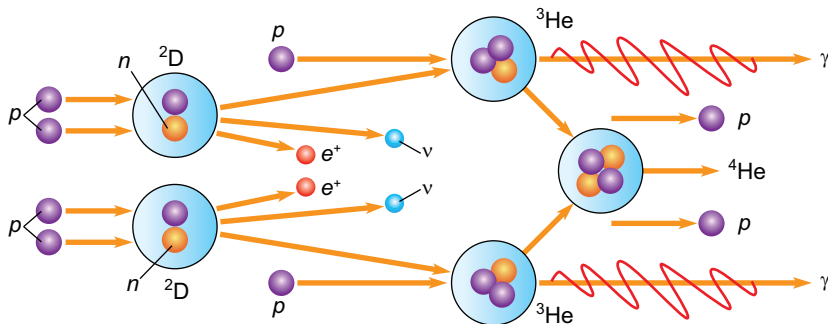
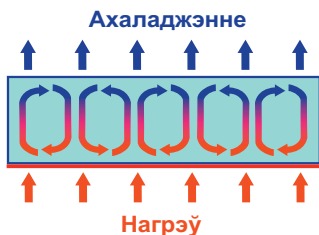


Рис. 111. Схема пратон-протоннай рэакцыі: p — пратон; n — нейтрон; ^2D — ядро дэйтэрыю; ^3He , ^4He — ядры ізатопаў гелію; e^+ — позитрон; ν — нейтрына; γ — гама-квант



Рыс. 112. Энергія перадаецца выпраменьваннем ад ядра Сонца. Галоўным пераносчыкам энергіі становіцца канвекцыя каля паверхні

У вобласці апошняй трэці радыуса Сонца знаходзіцца **канвектыўная зона**. У ёй энергія перадаецца не выпраменьваннем, а за кошт канвекцыі (перамешвання) (рыс. 112). Прычына ўзнікнення канвекцыі ў вонкавых сляях Сонца тая ж, што ў пасудзіне з кіпенем: колькасць энергіі, якая перадаецца ад награвальніка, значна большая за тую, што адводзіцца цеплаправоднасцю. Таму рэчыва прыходзіць у рух і само пачынае пераносіць цяпло. Канвектыўная зона распасціраецца практычна да самай бачнай паверхні Сонца (фотасферы).

4. Крыніцы энергіі. Аналіз хімічнага складу зямных, месяцавых парод і метэарытаў паказвае на тое, што Сонечная сістэма ўтварылася каля 4,7 млрд гадоў назад. Сонца, па сучасных даных, існуе каля 5 млрд гадоў. За апошнія 3 млрд гадоў яго свяцільнасць амаль не змянілася. Поўная энергія Сонца, выдзеленая за гэты час, роўна $E_{\odot} \approx L_{\odot} t = 3,5 \cdot 10^{43}$ Дж. Падзяліўшы гэту велічыню на поўную масу Сонца, атрымаем, што кожны кілаграм сонечнага рэчыва вылучыў каля $1,8 \cdot 10^{13}$ Дж энергіі. Рэальна гэта велічыня яшчэ большая, паколькі мы не ўлічылі першыя 2 млрд гадоў. Ніводнае хімічнае паліва не можа забяспечыць такое ж выдзяленне ўнутранай энергіі, як 1 кг сонечнага рэчыва.

У сярэднім Сонца губляе прыкладна 4 млн тон вадароду за секунду. На першы погляд гэта велічыня здаецца велізарнай. Але яна мізэрная ў параўнанні з поўнай масай Сонца. Разлікі паказваюць, што вадароду ў нетрах дастаткова для падтрымання свячэння Сонца на сучасным узроўні яшчэ на працягу 5 млрд гадоў.



Галоўныя вывады

1. Сонца — адзіная зорка ў Сонечнай сістэме, якая ўяўляе сабой гарачы плазменны шар, дыяметр якога ў 109 разоў большы за дыяметр Зямлі, а маса ў 330 тыс. разоў большая, за масу Зямлі.
2. Колькасць праменнай энергіі, якая кожную секунду паступае ад Сонца на адзінку плошчы зямной паверхні, — сонечная пастаянная — практычна не змяняецца на працягу мільярдаў гадоў.
3. Пераважнымі хімічнымі элементамі на Сонцы з'яўляюцца вадарод і гелій.
4. Крыніцай энергіі Сонца з'яўляюцца рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу, што адбываюцца ў яго нетрах.



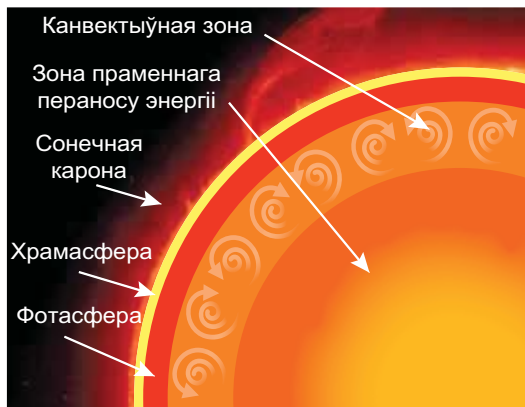
Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што такое сонечная пастаянная? Як яе вызначылі?
2. Што разумеюць пад свяцільнасцю Сонца? Чаму яна роўна?
3. Якія хімічныя элементы з'яўляюцца пераважнымі для Сонца?
4. Апішыце ўнутраную будову Сонца.
5. На якія зоны ўмоўна падзяляюцца нетры Сонца? Якія працэсы адбываюцца ў кожнай з гэтых зон?
6. Што з'яўляецца крыніцай сонечнай энергіі?
7. Ведаючы сонечную пастаянную для Зямлі, вылічыце велічыню сонечнай пастаяннай для Марса, калі адлегласць ад Сонца да Марса 1,524 а. адз.
8. У спектры Сонца большая інтэнсіўнасць выпраменьвання прыпадае на даўжыню хвалі $\lambda = 550$ нм. Вызначце адпаведную тэмпературу паверхні Сонца.

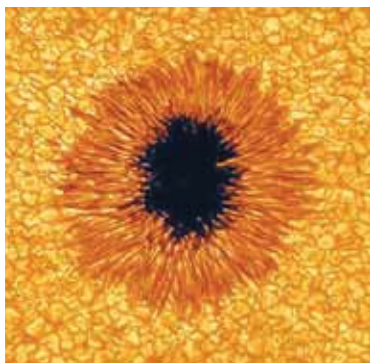
§ 20. Будо́ва сонечнай атмасферы

1. Фотасфера. Дыск Сонца мае выразны абрыс. Гэта адбываецца таму, што практычна ўсё бачнае выпраменьванне Сонца вылучаецца з вельмі тонкага слоя — **фотасферы**. Слабае выпраменьванне больш высокіх слаёў Сонца можна назіраць у час поўнага сонечнага зацьмення, калі дыск Месяца цалкам закрывае фотасферу і робяцца бачнымі храмасфера і карона. Такім чынам, атмасферай Сонца называюцца тры знешнія слоі Сонца, размешчаныя вышэй канвектыўнай зоны: фотасфера, храмасфера і карона (рыс. 113).

Таўшчыня фотасферы не перавышае 300 км. У тэлескоп бачна, што ўся паверхня Сонца пакрыта грануламі, кожная дыяметрам каля 700 км. Гэта велізарныя пазуры плазмы. Рysунак, які ўтвараюць гранулы, пастаянна змяняецца (літаральна за 5—10 мін яны паспяваюць з'явіцца і знікнуць). Плазма ў гранулах падыхаецца ўгару, астыае ў міжгранульных прамежках і апускаецца ўніз. Таму розніца тэмператур гранул і цёмных прамежкаў дасягае 600 К. Працэс пастаяннага ўзнікнення і знікнення гранул у фотасферы называецца **грануляцыяй**. Самыя прыкметныя аб'екты на Сонцы — гэта цёмныя плямы



Рыс. 113. Будо́ва сонечнай атмасферы



Рыс. 114. Сонечная пляма і фотасферная грануляцыя

(рыс. 114, 115). Дыяметры плям часам дасягаюць 200 тыс. км. Зусім маленькія плямы называюць сітавінамі.

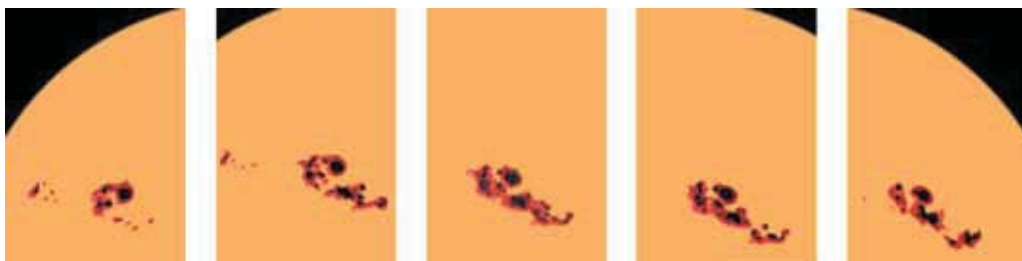
Карціна сонечных плям, хоць і крыху павольней, таксама пастаянна змяняецца: плямы з'яўляюцца, растуць і распадаюцца (гл. рыс. 115). Працягласць жыцця груп плям складае два-тры абароты Сонца вакол сваёй восі. Плямы халаднейшыя за навакольную фотасферу на 2—2,5 тыс. градусаў, і таму на агульным фоне сонечнага дыска выглядаюць больш цёмнымі. Сонечныя плямы звычайна з'яўляюцца групамі ў межах невялікага ўчастка, выцягнутага паралельна экватару. У групе па па-

мерах вылучаюцца дзве плямы: галоўная (заходняя) пляма, якая ідзе наперадзе па вярчэнні Сонца, і хваставая.

Сістэматычныя назіранні сонечных плям паказваюць, што Сонца верціцца ў напрамку руху планет і плоскасць сонечнага экватара нахілена да плоскасці экліптыкі пад вуглом $7^{\circ}15'$. Таксама выяўлена, што вуглавая скорасць вярчэння Сонца памяншаецца ад экватара да полюсаў. Перыяд вярчэння Сонца змяняецца ад 25 сутак на экватары да 30 сутак каля полюсаў.

Шматгадовыя назіранні ўтварэння плям на Сонцы паказалі, што маюць месца цыклічныя ваганні колькасці плям. Часам іх не бывае зусім, аднак іншы раз адначасова ўзнікаюць дзясяткі буйных плям. Сярэдняя працягласць такога цыкла складае прыблізна 11 гадоў.

Акрамя плям, у фотасферы назіраюцца **факелы** — яркія вобласці, у зоне якіх часта і развіваюцца цёмныя плямы. Факелы маюць складаную валакністую структуру, іх тэмпература на некалькі соцень градусаў перавышае тэмпературу фотасферы.



Рыс. 115. Дынаміка змянення памераў і формы групы сонечных плям. З-за вярчэння Сонца здаецца, што групы плям перамяшчаюцца па дыску

Утварэнне плям і факелаў звязана з магнітным полем Сонца. Індукцыя магнітнага поля Сонца ў сярэднім у два разы большая, чым на паверхні Зямлі, але ў месцах з'яўлення сонечных факелаў яна павялічваецца ў сотні разоў, а ў месцах з'яўлення плям — у тысячы разоў, дасягаючы 0,5 Тл. Гэта прыводзіць першапачаткова да палёгкі канвекцыі і з'яўлення факела, а потым — да аслаблення і з'яўлення цёмнай плямы.

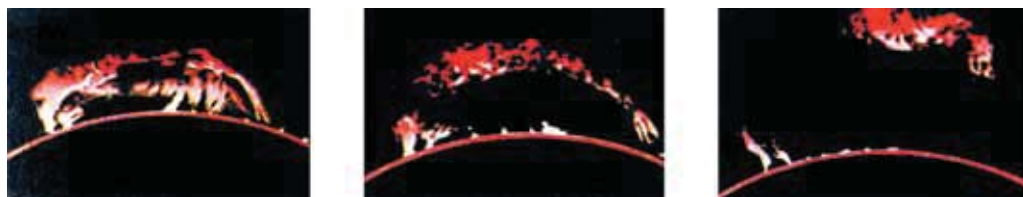
2. Тэмпература фотасферы. У непарарывным спектры Сонца максімальная энергія выпраменьвання прыпадае на даўжыню хвалі $\lambda_{\text{max}} = 480$ нм. Тады па законе Віна атрымліваем:

$$T = \frac{0,0029}{\lambda_{\text{max}}}, \quad \text{адкуль } T = 6000 \text{ К.}$$

3. Знешнія слаі атмасферы: храмасфера і карона. Над фотасферай знаходзіцца **храмасфера** Сонца. Агульная яе працягласць дасягае 10—15 тыс. км. Тэмпература ў храмасферы з вышынёй не памяншаецца, а расце ад 4500 К да некалькіх дзясяткаў тысяч. Выпраменьванне храмасферы ў сотні разоў меншае за фотасфернае, таму для яе назірання карыстаюцца спецыяльнымі метадамі, якія даюць магчымасць выяўляць слабае выпраменьванне. Храмасфера вельмі неаднародная і ўяўляецца назіральніку ў выглядзе пакручастых прадаўгаватых язычкоў — **спікул** — даўжынёй каля 10 тыс. км. Спікулы выкідваюцца з ніжняй храмасферы са скорасцю да 30 км/с; час іх жыцця складае некалькі мінут.

На краі сонечнага дыска добра бачныя **пратуберанцы** (гл. рыс. 110) — шчыльныя кандэнсацыі рэчыва, узнятыя над паверхняй лініямі магнітнага поля ў выглядзе арак або выступаў (рыс. 116). Пратуберанцы бываюць спакойныя, актыўныя і эруптыўныя. Яны вылучаюцца на фоне кароны, паколькі маюць больш высокую шчыльнасць. Скорасць руху рэчыва актыўных пратуберанцаў дасягае 200 км/с, а вышыня пад'ёму — 40 радыусаў Зямлі.

На Сонцы назіраюцца выбуховыя выбрасы энергіі і рэчыва (са скорасцю да 100 тыс. км/с), якія ахопліваюць значныя вобласці паверхневага слоя, — **успышкі**



Рыс. 116. Змяненні пратуберанца, за якім назіралі на працягу некалькіх гадзін



Рыс. 117. Успышка на Сонцы



Рыс. 118. Сонечная карона падчас зацьмення Сонца



(рыс. 117). Гэтыя яркія ўтварэнні існуюць ад некалькіх мінут да 3 г. Звычайна сонечныя ўспышкі (з выкідам энергіі да 10^{25} Дж) адбываюцца паблізу ад груп сонечных плям, якія хутка развіваюцца.

Сонечная карона (рыс. 118) — самая разрэджаная і гарачая абалонка Сонца, якая распасціраецца ад яго на некалькі сонечных радыусаў і мае тэмпературу плазмы ад 1 да 2 млн градусаў. Яркасць сонечнай кароны ў мільён разоў меншая, чым фотасферы. Таму назіраць сонечную карону можна ў час поўных сонечных зацьменняў або пры дапамозе спецыяльных тэлескопаў-каранографав. Высокая тэмпература і разрэджанасць кароны пацверджаны спектральным аналізам, а таксама вынікамі вымярэння яе радыё- і рэнтгенаўскага выпраменьвання.

Награванне кароны да высокіх тэмператур ажыццяўляецца за кошт перадачы энергіі вагальных (канвекцыйных) рухаў рэчыва з фотасферы. Хвалі (з частотой гукавых ваганняў) у кароне, дзе шчыльнасць рэчыва хутка памяншаецца, робяцца ўдарнымі. Яны хутка затухаюць, адбываецца пераўтварэнне механічнай энергіі хваль у цяпло. З-за высокай тэмпературы шчыльнасць кароны спадае павольна, таму самыя знешнія слаі атмасферы Сонца цягнуцца аж да арбіты Зямлі.

4. Магнітныя палі і актыўныя ўтварэнні. Маса, радыус, колькасць энергіі, што выпраменьваецца Сонцам, застаюцца практычна пастаяннымі, але на ўсіх узроўнях сонечнай атмасферы назіраюцца структурныя ўтварэнні, якія змяняюць свае фізічныя параметры ў часе. Сукупнасць нестацыянарных працэсаў, якія перыядычна ўзнікаюць у сонечнай атмасферы, называецца **сонечнай актыўнасцю**. Праяўленнем сонечнай актыўнасці з'яўляюцца плямы, факелы ў фотасферы, пратуберанцы, успышкі і выкіды рэчыва ў храмасферы і кароне. Месцы, дзе

яны ўзнікаюць, называюцца **актыўнымі абласцямі** (рыс. 119). Усе актыўныя ўтварэнні звязаны паміж сабой пры дапамозе змяняльных магнітных палёў, якія заўсёды прысутнічаюць у актыўных зонах Сонца. Цэнтры актыўнасці ўзнікаюць на некаторай глыбіні пад фотасферай і распасціраюцца ў выглядзе ярусаў далёка ў сонечную карону.

Не толькі з'яўленне плям, але і сонечная актыўнасць цалкам маюць 11-гадовую цыклічнасць (ваганне цыклаў фактычна адбываецца ў межах ад 7,5 да 16 гадоў).



Рыс. 119. Сонца ў рэнтгенаўскіх праменях. Найбольш яркія месцы — зоны праяўлення сонечнай актыўнасці



Галоўныя вывады

1. Вонкавая газавая абалонка Сонца — атмасфера — складаецца з фотасферы, храмасферы і кароны.
2. Лакальныя змяненні магнітных палёў, што ўзнікаюць перыядычна, параджаюць актыўныя працэсы ў атмасферы Сонца.
3. Актыўныя працэсы на Сонцы з'яўляюцца прычынай узнікнення ў сляях атмасферы плям, факелаў, пратуберанцаў, успышак і інш.
4. Сонечныя ўспышкі — найбольш магутныя выбуховыя працэсы ў атмасферы Сонца.
5. Сонечная актыўнасць мае 11-гадовую цыклічнасць.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. З якіх абалонак складаецца атмасфера Сонца?
2. Што такое фотасфера Сонца?
3. Якія аб'екты характэрны для фотасферы Сонца?
4. Чаму сонечныя плямы цямнейшыя за фотасферу?
5. Што разумеюць пад грануляцыяй?
6. Што разумеюць пад храмасферай і каронай Сонца?
7. Якія з'явы назіраюцца ў храмасферы і кароне Сонца?
8. Што такое сонечная актыўнасць і якая яе цыклічнасць?

§ 21. Уплыў Сонца на жыццё Зямлі

**1. Інтэнсіўнасць сонечнага выпраменьвання па-за аптычным дыяпа-
зонам.** Электрамагнітнае выпраменьванне Сонца, максімум якога прыпадае на бачную частку спектра, праходзіць строгі адбор у зямной атмасферы (гл. § 17).

Ва ультрафіялетавым і рэнтгенаўскім дыяпазонах магутнасць сонечнага выпраменьвання рэзка памяншаецца — у сотні тысяч разоў у параўнанні з магутнасцю выпраменьвання ў аптычным дыяпазоне. Але калі ў аптычным дыяпазоне Сонца з'яўляецца пастаяннай зоркай, то выпраменьванне ў караткахвалевай частцы спектра залежыць ад сонечнай актыўнасці — павялічваецца або памяншаецца ў некалькі разоў на працягу 11-гадовага сонечнага цыкла. Вельмі нарастае паток караткахвалевага выпраменьвання ў час храмасферных успышак. З ніжніх слаёў храмасферы выходзіць ультрафіялетавае выпраменьванне, максімальная інтэнсіўнасць якога можа ў 2 разы перавышаць мінімальнае значэнне ў 11-гадовым цыкле. Асноўнае рэнтгенаўскае выпраменьванне зыходзіць ад кароны Сонца.

Рэнтгенаўскае і ультрафіялетавае выпраменьванне Сонца паглынаецца ў верхніх слаях атмасферы Зямлі. Яно іанізуе газы зямной атмасферы. Іанізаваны слой верхняй атмасферы Зямлі называецца **іанасферай**. Адбіццё кароткіх радыёхваль ад іанасферы Зямлі выкарыстоўваецца ў радыёсувязі. Пры магутных усплесках сонечнага рэнтгенаўскага выпраменьвання з-за сонечных успышак парушаецца сувязь на кароткіх радыёхвалях.

Даўгахвалевае (мяккае) ультрафіялетавае выпраменьванне Сонца можа пранікаць у атмасферу Зямлі да вышыні 30—35 км. Там яно раздзяляе малекулы кіслароду O_2 на два складаючыя атамы. Свабодныя атамы злучаюцца з малекуламі кіслароду і ўтвараюць новае рэчыва — **азон**, кожная малекула якога складаецца з трох атамаў кіслароду.

Азоны слой паглынае практычна ўсё ультрафіялетавае выпраменьванне Сонца, пакідае толькі малую долю, якая дасягае паверхні Зямлі і выклікае ў людзей апёкі скуры (у малых дозах — загар). Калі таўшчыня азоновага слоя памяншаецца, сонечнае ультрафіялетавае выпраменьванне можа ўзрасці ў 1,5—2 разы. Тады гэта выпраменьванне робіцца вельмі актыўным і можа выклікаць захворванні на рак скуры.

2. Сонечны вецер. Бесперапынны паток разрэджанай плазмы са звязаным з ім магнітным полем, які расшыраецца, распаўсюджваецца прыблізна радыяльна ад Сонца і запаўняе сабой Сонечную сістэму, называецца **сонечным ветрам**. У яго склад уваходзяць пратоны, электроны, а таксама α -часціцы і ў нязначнай колькасці шэраг высокаіанізаваных атамаў (кісларод, крэмній, сера, жале-

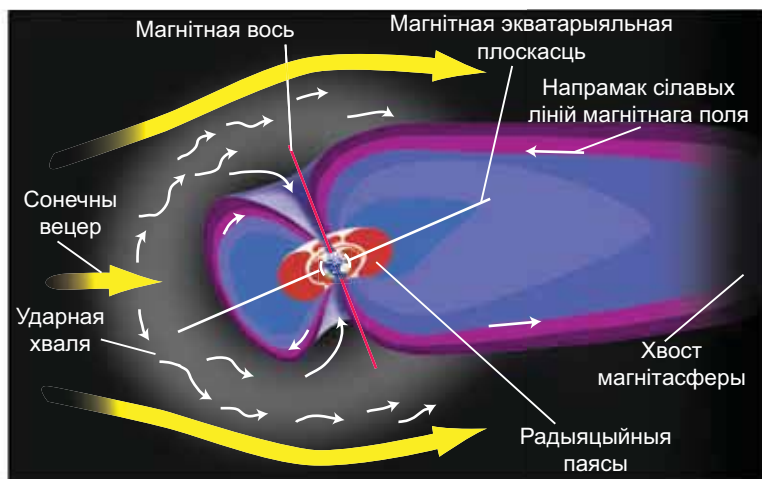


Рис. 120. Схема ўтварэння магнітасферы Зямлі

за). Скорасць часціц сонечнага ветру павялічваецца з аддаленнем іх ад Сонца. Паблізу ад Зямлі сярэдняя скорасць сонечнага ветру дасягае 450 км/с, а шчыльнасць складае некалькі часціц у кубічным сантыметры.

Паток сонечнай плазмы не можа пераадолець процідзеянне магнітнага поля Зямлі і абцякае яго. Пры гэтым утвараецца поласць кроплепадобнай формы — **магнітасфера** (рыс. 120). З боку Сонца яна сціснута ціскам сонечнага ветру. Мяжа магнітасферы, павернутая да Сонца, знаходзіцца на адлегласці, роўнай у сярэднім 10—12 радыусам Зямлі. З процілеглага (начнога) боку магнітасфера выцягнута, як хвост каметы, і расцягваецца на 6000 радыусаў Зямлі. Са змяненнем скорасці і шчыльнасці часціц сонечнага ветру змяняецца і форма магнітасферы.

3. Сонечна-зямныя сувязі. Сонечная актыўнасць моцна ўплывае ў першую чаргу на вонкавыя абалонкі Зямлі — магнітасферу і іанасферу. У час магутных сонечных успышак часціцы могуць разганяцца да 100 000 км/с, г. зн. узнікаюць касмічныя прамені сонечнага паходжання. Пад уздзеяннем сонечных касмічных праменяў утвараецца аксід азоту NO , які ўзаемадзейнічае з азомам і актыўна яго разбурае ў выніку рэакцыі $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Пасля магутных успышак на Сонцы назіраецца паніжэнне колькасці азону ў стратасферы над палярнымі шапкамі Зямлі.

Пры дапамозе каранографаў, устаноўленых на касмічных апаратах, рэгіструюць магутныя выкіды рэчыва з узбуранай кароны Сонца. Згустак каранальнай плазмы, які адарваўся ад Сонца і нясе ўнутры сябе замкнутую пятлю магнітнага поля, называецца **каранальным выкідам масы**. У кожным каранальным





Рыс. 121. Палярнае ззяненне

нення з малекулам і паветра на вышыні 100—200 км іанізуюць іх і выклікаюць іх свячэнне. У выніку гэтага на Зямлі, пераважна ў каляпалярных шыротах, назіраюцца **палярныя ззянні** (рыс. 121). Пры высокай геамагнітнай актыўнасці палярныя ззянні з’яўляюцца на вышыні 300—400 км, і іх можна назіраць нават на шыротах Рэспублікі Беларусь.

У час магнітнай буры змяняюцца электрычныя палі над паверхняй Зямлі. Гэта прыводзіць, па-першае, да ўзнікнення перагрузак у лініях электраперадачы (да некалькіх соцень ампер) і іх адключэння; па-другое, да навадзення моцных токаў у трубах газа- і нафтаправодаў і да выхаду са строю іх сістэм кіравання. Вынікі магнітнай буры адбываюцца на бартавых электронных сістэмах касмічных апаратаў.

Магнітныя буры прыводзяць да змянення ціску ў трапасферы (ніжнім слоі атмасферы Зямлі), у выніку чаго развіваюцца цыклёны.

На той факт, што Сонца ўплывае на біялагічныя аб’екты, у тым ліку на здароўе чалавека, упершыню яшчэ ў 1915 г. звярнуў увагу Аляксандр Леанідавіч Чыжэўскі. Прааналізаваўшы гістарычныя дакументы, вучоны прыйшоў да высновы, што ў мінулым масавыя стыхійныя бедствы, сацыяльныя «выбухі» і ўспышкі эпідэміі прыпадалі пераважна на гады максімумаў сонечнай актыўнасці. На падставе выведзенай сувязі А. Л. Чыжэўскі паспрабаваў прадказаць некаторыя эпідэміі на 35 гадоў наперад. Яго прагнозы збыліся ў сямі выпадках з васьмі.

А. Л. Чыжэўскі з’яўляецца адным з заснавальнікаў геліябіялогіі. Гэта навука, якая ўзнікла на стыку фізікі Сонца і біялогіі, вывучае ўплыў цыклічнай актыўнасці Сонца на біялагічныя аб’екты і здароўе чалавека.

Да ваганняў сонечнай актыўнасці асабліва адчувальная нервовая сістэма чалавека. Дакладна вызначана, што колькасць хворых, якія паступаюць у клінікі, рэзка павялічваецца ў дні пад’ёму сонечнай актыўнасці. Мяркуюцца, што сонечная актыўнасць уплывае на чалавека праз узбуджэнні магнітнага поля Зямлі.

Каб усебакова даследаваць з’явы, што адбываюцца на Сонцы, вучоныя праводзяць бесперапынныя назіранні Сонца, якія называюць **Службай Сонца**.



! Галоўныя вывады

1. Магутнасць радыё-, караткахвалевага і карпускулярнага выпраменьвання Сонца значна ўзрастае пры актыўных працэсах у сонечнай атмасферы.
2. Азоны слой атмасферы Зямлі з'яўляецца ахоўнай абалонкай ад шкоднага для чалавека і жывых арганізмаў ультрафіялетавага выпраменьвання Сонца.
3. Сонечны вецер — бесперапынны паток разрэджанай плазмы, які распаўсюджваецца радыяльна ад Сонца.
4. Неаднароднасць сонечнага ветру выклікае на Зямлі магнітныя буры, палярныя зьяні, радыёўсплёскі.
5. Геліябіялогія — навука, якая вывучае ўплыў актыўнасці Сонца на біялагічныя аб'екты і чалавецтва.

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Як зямная атмасфера ўплывае на праходжанне розных відаў сонечнага выпраменьвання да паверхні Зямлі?
2. Чаму на Зямлі часта назіраецца парушэнне сувязі на кароткіх радыёхвалях?
3. Якая роля азоновага слоя ў атмасферы Зямлі? Якім чынам актыўнасць Сонца можа ўплываць на таўшчыню азоновага слоя Зямлі?
4. Што такое сонечны вецер? Як ён узнікае?
5. Што называюць магнітасферай Зямлі? Як на яе ўплывае сонечны вецер?
6. Назавіце прычыны і наступствы магнітных бур на Зямлі.
7. Якія прычыны ўзнікнення палярных зьяў?



Раздзел VII

Зоркі

§ 22. Асноўныя характарыстыкі зорак. Свяцільнасць

1. Бачная зорная велічыня. Пры першапачатковым знаёстве з зорным небам (гл. § 2) мы разгледзелі паняцце «зорная велічыня» (m). Вы ўжо ведаеце, што зоркі 1-й зорнай велічыні ствараюць у 2,512 раза большую асветленасць, чым зоркі 2-й зорнай велічыні, якія ў сваю чаргу даюць светлавая патока ў 2,512 раза большыя, чым зоркі 3-й зорнай велічыні, і г. д. Такім чынам, за інтэрвал у адну **бачную зорную велічыню** (абазначаецца 1^m) прынята адносіна асветленасцей (E) у 2,512 раза. У выглядзе формулы гэту суадносіну выразіў Н. Погсан:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}. \quad (1)$$

Вымераўшы пры дапамозе фатометра адносіну бляску зорак, можна вызначыць рознасць зорных велічынь па формуле Погсана. Нуль-пункт выбіраюць умоўна. Пры гэтым дамоўлена, каб стандартная зорка 1-й зорнай велічыні (сярэдняя з 20 самых яркіх зорак) давала ў 100 разоў больш святла, чым зорка 6-й зорнай велічыні, якая знаходзіцца на мяжы зроку.

Бачная зорная велічыня Месяца ў поўню роўна $-12^m,7$, а ў фазе першай чвэрці складае $-9^m,0$. Па формуле (1) можна вызначыць, што асветленасць Месяца ў поўню (E_n) большая за асветленасць Месяца ў фазе першай чвэрці (E_i) у 30 разоў:

$$\frac{E_n}{E_i} = 2,512^{m_i - m_n} = 2,512^{-9 + 12,7} = 2,512^{3,7} \cong 30.$$

Бачную зорную велічыню Сонца вызначыў Вітольд Карлавіч Цэраскі. Яна аказалася роўнай $-26^m,8$. Шкала зорных велічынь дае магчымасць выражаць

у зорных велічынях бляск слабых свяцілаў, нябачных простым вокам. У цяперашні час найбуйнейшыя тэлескопы з дыяметрам люстраў 8—10 м і сучаснай прыёмнай апаратурай дазваляюць рэгістраваць аб'екты да 28-й зорнай велічыні.

2. Вызначэнне адлегласцей да зорак. Вучоныя даўно выказвалі меркаванне, што зоркі маюць такую ж фізічную прыроду, як Сонца. З прычыны велізарных адлегласцей дыскі зорак не бачныя нават у магутныя тэлескопы. Каб параўноўваць зоркі паміж сабой і з Сонцам, неабходна знайсці метады вызначэння адлегласцей да іх. Асноўным такім метадам з'яўляецца метада паралактычнага зрушэння зорак, разгледжаныя намі раней. Паколькі радыус Зямлі вельмі малы ў параўнанні з адлегласцю да зорак, неабходна выбраць большы базіс для вымярэння паралактычнага зрушэння зорак. Яшчэ М. Капернік разумеў, што паводле яго геліяцэнтрычнай сістэмы блізкія зоркі на фоне далёкіх зорак павінны апісваць эліпсы ў выніку гадавога руху Зямлі вакол Сонца.

Уяўнае перамяшчэнне больш блізкай зоркі M на фоне вельмі далёкіх зорак адбываецца па эліпсе з перыядам у 1 год і адлюстроўвае рух назіральніка разам з Зямлёй вакол Сонца (рыс. 122). Месцазнаходжанне Зямлі на арбіце і бачныя з Зямлі месцазнаходжанні зоркі на небе паказаны на гэтым рысунку. Маленькі эліпс, які апісвае зорка, называецца паралактычным эліпсам. У вуглавым вымярэнні вялікая паўвось гэтага эліпса роўна велічыні вугла, пад якім з зоркі бачна вялікая паўвось зямной арбіты, перпендыкулярная да напругу на зорку. Гэты вугал называецца **гадавым паралаксам** (π). Паралактычныя зрушэнні зорак з'яўляюцца бясспрэчным доказам абарачэння Зямлі вакол Сонца.

Адлегласці да зорак вызначаюцца па іх гадавым паралактычным зрушэнні.

З рысунка 122 бачна, што калі $CT = a$ ёсць сярэдні радыус зямной арбіты, $CM = r$ — адлегласць да зоркі M ад Сонца C , а вугал π — гадавы паралакс зоркі, то

$$r = \frac{a}{\sin \pi}.$$

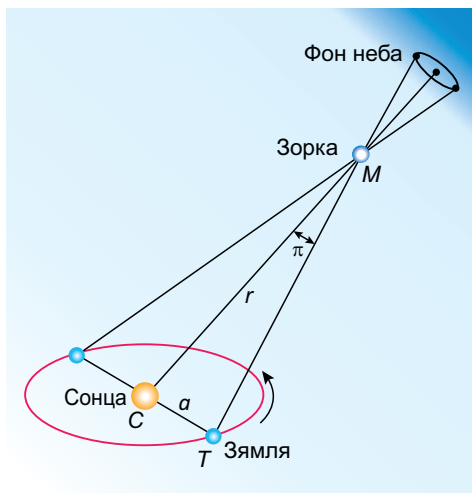


Рис. 122. Паралактычнае зрушэнне зоркі на працягу года: C — Сонца; M — зорка; a — паўвось зямной арбіты; π — гадавы паралакс

Паколькі гадавыя паралаксы зорак ацэньваюцца дзясятымі долямі секунды, а 1 радыян роўны $206\,265''$, то адлегласць да зоркі можна вызначыць з суадносіны

$$r = \frac{206\,265''}{\pi''} \text{ а. адз.} \quad (2)$$

Для вымярэння адлегласцей да зорак астранамічная адзінка надта малая. Таму для зручнасці вызначэння адлегласцей да зорак у астраноміі выкарыстоўваюць спецыяльную адзінку даўжыні — парсек (пк), назва якой паходзіць ад слоў «пара-лаксы» і «секунда». **Парсек** — гэта адлегласць, з якой радыус зямной арбіты быў бы бачны пад вуглом у $1''$ (рыс. 123).

Паводле формулы (2) $1 \text{ ПК} = 206\,265 \text{ а. адз.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$. Такім чынам, адлегласць да зорак у парсеках вызначаецца выразам

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{ ПК.} \quad (3)$$

У астранамічных адзінках звычайна выражаюцца адлегласці да цел Сонечнай сістэмы. Адлегласці да нябесных цел, якія знаходзяцца па-за межамі Сонечнай сістэмы, звычайна выражаюцца ў парсеках, кілапарсеках ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ ПК}$) і мегапарсеках ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ ПК}$), а таксама ў светлавых гадах ($1 \text{ св. г.} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. адз.} = 0,3067 \text{ ПК}$ або $1 \text{ ПК} = 3,26 \text{ св. г.}$). **Светлавы год** — адлегласць, якую электрамагнітнае выпраменьванне праходзіць (у вакууме) за 1 год.

Ніжняя мяжа вымярэнняў паралаксаў не перавышае $0,005''$, што дае магчымасць вызначаць адлегласці, не большыя за 200 ПК. Адлегласці да больш далёкіх аб'ектаў вызначаюцца менш дакладна і іншымі метадамі.

3. Абсалютная зорная велічыня. Бачны бляск зорак не характарызуе іх рэальнае выпраменьванне. Ён вызначаецца двума фактарамі: сапраўдным выпраменьваннем зоркі і адлегласцю да яе. Сонца, напрыклад, значна бліжэйшае да Зямлі, чым любая іншая зорка, таму яно — самае яркае свяціла на небе. Такім чынам, для параўнання сапраўднага бляску зорак неабходна вылічваць іх зорную велічыню на пэўнай аднолькавай адлегласці. За такую аднолькавую (ці стандартную) адлегласць прынята 10 ПК. Бачная зорная велічыня, якую б мела зорка, калі б знаходзілася ад нас на адлегласці ў 10 ПК, называецца **абсалютнай зорнай велічынёй**.



Рыс. 123. Што такое парсек?

Няхай бачная зорная велічыня зоркі на адлегласці r роўна m , а асветленасць (светлавы паток, што падае на адзінку

плошчы асвятляемай паверхні), якую стварае гэта зорка, — E . Паводле азначэння, бачная зорная велічыня з адлегласці $r_0 = 10$ пк будзе роўна абсалютнай зорнай велічыні M , а E_0 — асветленасць (або выпраменьванне) зоркі з адлегласці 10 пк. Тады на падставе формулы (1) можна запісаць:

$$\frac{E}{E_0} = 2,512^{M-m}. \quad (4)$$

З фізікі вядома, што асветленасці, ствараемыя адной і той жа крыніцай выпраменьвання, адваротна прапарцыянальны квадратам адлегласцей да яе, г. зн.

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}. \quad (5)$$

Падставім (5) у (4) і атрымаем, што $2,512^{M-m} = \frac{100}{r^2}$. Пралагарыфмаваўшы дадзеную роўнасць і спрасціўшы яе, атрымаем:

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (6)$$

Улічўшы, што $r = \frac{1}{\pi''}$, формулу (6) можна запісаць у выглядзе:

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi''. \quad (7)$$

Па формуле (6) вылічым абсалютную зорную велічыню Сонца. Адлегласць да Сонца $r = 1$ а. адз. $= \frac{1}{206\,265}$ пк; бачная зорная велічыня Сонца роўна $-26^m,8$. Пасля падстаноўкі гэтых значэнняў у формулу атрымаем, што $M_{\odot} = -26^m,8 + 5^m + 26^m,6 = 4^m,8$. Гэта азначае, што са стандартнай адлегласці ў 10 пк Сонца выглядае слабай зорчайкай амаль 5-й зорнай велічыні.

Абсалютныя зорныя велічыні зорак вагаюцца ад -9^m да 19^m , г. зн. адрозніваюцца на 28^m , або па асветленасці ў 160 мільярдаў разоў, адна ад адной.

4. Свяцільнасць зорак. Ведаючы абсалютную зорную велічыню зоркі, можна вылічыць сапраўднае агульнае выпраменьванне зоркі, або яе свяцільнасць. **Свяцільнасцю** называецца поўная энергія, якая выпраменьваецца зоркай за 1 с. Свяцільнасць зоркі можна выразіць у ватах, але часцей яе выражаюць у свяцільнасцях Сонца. Нагадаем, што свяцільнасць Сонца роўна $3,85 \cdot 10^{26}$ Вт (гл. § 19).

Выкарыстаўшы формулу (1), можна запісаць суадносіну паміж свяцільнасцямі і абсалютнымі зорнымі велічынямі якой-небудзь зоркі і Сонца:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{M_{\odot}-M}, \quad (8)$$

дзе L і $L_{\odot}$ — свяцільнасці зоркі і Сонца; M і $M_{\odot}$ — адпаведна іх абсалютныя зорныя велічыні. Калі прыняць $L_{\odot} = 1$ і ўлічыць, што $M_{\odot} = 4^m,8$, то формула (8) набывае выгляд:

$$L = 2,512^{M_{\odot} - M} \quad \text{або} \quad L = 2,512^{4,8 - M}.$$

Зоркі-звышгігanty, якія маюць $M = -9^m$, характарызуюцца магутнасцю выпраменьвання ў 330 тыс. разоў большай, чым Сонца, а самыя няяркія зоркі з абсалютнай зорнай велічынёй $M = 19^m$ выпраменьваюць святло ў 480 тыс. разоў слабейшае, чым Сонца.



Галоўныя вывады

1. Зоркі рухаюцца ў прасторы і знаходзяцца ад нас на розных адлегласцях.
2. Бачная зорная велічыня — мера назіраемага бляску (асветленасці, якая ствараецца свяцілам на прыёмніку праменнай энергіі) нябеснага аб'екта, бачнага з Зямлі. Інтэрвал у адну зорную велічыню адпавядае рознасці асветленасцей у 2,512 раза.
3. Адлегласць да недалёкіх зорак вызначаецца метадам гадавога паралакса, заснаваным на вымярэнні вугла, пад якім бачны радыус зямной арбіты з даследуемай зоркі.
4. Адзінкамі вымярэння адлегласцей да зорак з'яўляюцца парсек і светлавы год.
5. Абсалютная зорная велічыня — бачная зорная велічыня, якую б зорка мела, калі б знаходзілася на стандартнай адлегласці 10 пк.
6. Поўная энергія, якую выпраменьвае зорка па ўсіх напрамках за адзінку часу, называецца яе свяцільнасцю. Звычайна свяцільнасць зоркі выражаецца ў адзінках свяцільнасці Сонца.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што разумеюць пад гадавым паралаксам зоркі?
2. Што такое парсек і светлавы год?
3. Чым адрозніваецца абсалютная зорная велічыня ад бачнай зорнай велічыні?
4. Што такое свяцільнасць зоркі? Якая свяцільнасць Сонца?
5. Якая залежнасць існуе паміж свяцільнасцю зоркі і яе абсалютнай зорнай велічынёй?
6. Адлегласць да зоркі Бэтэльгейзе 652 св. г. Чаму роўны яе паралакс?
7. Вылічыце адлегласць да зоркі Вега ў парсеках і светлавых гадах, калі вядома, што яе бачная і абсалютная зорныя велічыні адпаведна роўны $0^m,0$ і $0^m,5$.

8. Абсалютная зорная велічыня Сонца роўна $M = 5^m$. Вызначце адлегласць, на якой яно будзе назірацца як зорка 15-й зорнай велічыні.

9. Зоркавае скопішча змяшчае 100 зорак аднолькавага бляску $m = 8^m$. Знайдзіце сумарную зорную велічыню скопішча.

§ 23. Тэмпература і памеры зорак

1. Тэмпература зорак. У першым прыбліжэнні можна лічыць, што зоркі выпраменьваюць як абсалютна чорныя целы. Тэмпературу T паверхні (фотасферы) зорак можна вызначыць пры дапамозе закону зрушэння Віна, а таксама закону Стэфана—Больцмана, як мы гэта ўжо рабілі пры вызначэнні тэмпературы Сонца (гл. § 18):

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}. \quad (1)$$

Падлічаную такім метадам тэмпературу называюць **эфектыўнай тэмпературай**. Але гэты метад выкарыстоўваецца абмежавана, паколькі дастаткова дакладнае значэнне радыусаў вымерана прыкладна ў некалькіх дзясяткаў яркіх гіганцкіх зорак.

Тэмпературы зорак вельмі адрозніваюцца. Халодныя чырвоныя зоркі маюць тэмпературу каля 3000 К. Сонца з тэмпературай фотасферы 6000 К адносіцца да жоўтых карлікаў. Тэмпература самых гарачых зорак дасягае 100 000 К. Асноўная частка выпраменьвання гарачых зорак прыпадае на ультрафіялетавую частку спектра, і мы іх успрымаем як зоркі блакітнага колеру.

2. Спектральная класіфікацыя зорак. Зоркі адрозніваюцца вялікай разнастайнасцю, але сярод іх можна вылучыць асобныя групы, якія маюць агульныя ўласцівасці. Пры першым знаёстве з зорным небам звяртае на сябе ўвагу той факт, што зоркі адрозніваюцца па колеры. Гэта больш прыкметна пры разглядзе спектраў. Найважнейшыя адрозненні спектраў зорак заключаюцца ў колькасці і інтэнсіўнасці назіраемых спектральных ліній, а таксама ў размеркаванні энергіі ў непарарывным спектры. З улікам выгляду спектральных ліній і іх інтэнсіўнасці будзецца **спектральная класіфікацыя зорак**.

У Гарвардскай абсерваторыі (ЗША) у 20-я гг. XX ст. была распрацавана класіфікацыя спектраў зорак, у якой паслядоўнасць спектральных класаў абазначаецца вялікімі літарамі лацінскага алфавіта. Асноўныя характарыстыкі спектральных класаў змешчаны на форзацы 4. Тонкія адрозненні ўнутры кожнага класа дадаткова падзяляюць на 10 падкласаў — ад 0 да 9. Напрыклад, Сонца належыць да спектральнага класа $G2$.

Дадзеная паслядоўнасць спектральных класаў адлюстроўвае памяншэнне тэмпературы атмасфер (фотасфер) зорак ад класа O да класа L . Спектральная паслядоўнасць адначасова з'яўляецца і колеравай: зоркі класа O маюць блакітнаваты колер, класа B — блакітнавата-белы, A — белы і г. д. Для запамінання гэтай паслядоўнасці карыстаюцца фразай (мнеманічным правілам), якая ў рускамоўным варыянце гучыць наступным чынам:

O	B	A	F	G	K	M	L
Один	Бритый	Англичанин	Финики	Жевал	Как	Мелкий	Лук

Хімічны склад атмасфер большасці зорак амаль аднолькавы. Вонкавыя слаі зорак складаюцца з вадародна-геліевай сумесі з вельмі малой колькасцю больш цяжкіх элементаў. Напрыклад, аналагічна Сонцу іншыя зоркі ўтрымліваюць у сваіх атмасферах 73 % вадароду, 25 % гелію і 2 % усіх астатніх элементаў.

Адрозненні ў спектрах зорак вызначаюцца галоўным чынам адрозненнямі тэмператур. У фотасферах халодных зорак могуць існаваць самыя простыя малекулы. Таму характэрнымі дэталямі спектраў зорак класаў M і L з'яўляюцца шырокія палосы паглынання малекул, напрыклад C_2H . Пры больш высокіх тэмпературах малекулярныя злучэнні распадаюцца. У такіх спектрах знікаюць спектральныя палосы малекулярных злучэнняў, затое з'яўляюцца лініі, што адпавядаюць нейтральным металам. Такім чынам, спектральная класіфікацыя зорак — гэта тэмпературная класіфікацыя зорных спектраў, заснаваная на ацэнках адноснай інтэнсіўнасці і выгляду спектральных ліній. На дадзены момант спектральнай класіфікацыяй ахоплена больш за 500 тыс. зорак.

3. Памеры зорак. Лінейны радыус R зоркі можна вызначыць, калі вядомы яе вуглавы радыус ρ'' і адлегласць да зоркі r або гадавы паралакс π'' , па формуле $R = r \cdot \sin \rho''$.

Паколькі $r = \frac{206\,265''}{\pi''}$ а. адз., для вуглавога радыуса $\sin \rho'' = \frac{\rho''}{206\,265''}$, то маем $R = \frac{\rho''}{\pi''}$ а. адз.

Лінейныя радыусы зорак прынята выражаць у радыусах Сонца. У радыусах Сонца 1 а. адз. роўна $149,6 \cdot 10^6$ км : $0,696 \cdot 10^6$ км = 215. Выкарыстаўшы гэту суадносіну, атрымаем наступную формулу для вызначэння лінейных радыусаў зорак у радыусах Сонца:

$$R = 215 \frac{\rho''}{\pi''}.$$

Зоркі знаходзяцца ад нас так далёка, што іх вуглавая памеры меншыя за мяжу распазнавання самых буйных тэлескопаў. Для яркіх блізкіх зорак вуглавая радыус знаходзяць пры дапамозе двух шырока расстаўленых тэлескопаў па

інтэрферэнцыйнай карціне, якая атрымліваецца ў выніку перакрыцця відарысаў зоркі. Напрыклад, з дапамогай аптычнага інтэрферометра, які складаецца з двух сферычных люстраў дыяметрам 6,6 м кожнае, разнесеных на максімальную адлегласць 180 м, удалося вымераць вуглавы дыяметр ϵ Арыёна. Ён аказаўся роўны 0,00072", а паколькі гадавы паралакс зоркі складае $\pi'' = 0,0024''$, то $R = 215 \cdot \frac{0,00036''}{0,0024''} = 32R_{\odot}$.

Радыусы зорак могуць быць вылічаны па іх магутнасці выпраменьвання (святільнасці) і тэмпературы. Запішам значэнне поўнай магутнасці выпраменьвання для выбранай зоркі і для Сонца:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4,$$

дзе L і $L_{\odot}$, R і $R_{\odot}$, T і $T_{\odot}$ — адпаведна святільнасці, лінейныя радыусы і абсалютныя тэмпературы зоркі і Сонца.

Калі прыняць $L_{\odot} = 1$ і $R_{\odot} = 1$, то атрымаецца:

$$L = R^2 \frac{T_{\odot}^4}{T^4},$$

або канчаткова ў лінейных радыусах Сонца:

$$R = \sqrt{L} \left(\frac{T_{\odot}}{T} \right)^2. \quad (2)$$

Дыяметры зорак вельмі адрозніваюцца: ад дыяметраў, параўнальных з вялікай паўвоссю арбіты Юпітэра (чырвоныя звышгігanty), да памераў Зямлі (белыя карлікі) ці нават да некалькіх кіламетраў у нейтронных зорак (рыс. 124).



Рыс. 124. Памеры некаторых зорак у параўнанні з памерамі Зямлі (злева) і Сонца (справа)

! Галоўныя вывады

1. Спектральная класіфікацыя зорак заснавана на ацэнках адноснай інтэнсіўнасці і выгляду спектральных ліній.
2. Памеры зорак прапарцыянальны адлегласцям да іх і бачным вуглавым памерам.
3. Ведаючы магутнасць выпраменьвання зоркі (свяцільнасць), тэмпературу зоркі і тэмпературу Сонца, можна вызначыць яе памер (у радыусах Сонца).
4. Тэмпература зорак вызначаецца на падставе законаў Стэфана—Больцмана і Віна.

? Кантрольныя пытанні і заданні

1. Якім чынам, выкарыстаўшы законы Стэфана—Больцмана і Віна, можна вызначыць тэмпературу зоркі?
2. Па якіх прынцыпах праводзіцца спектральная класіфікацыя зорак?
3. З якіх хімічных элементаў у асноўным складаюцца зоркі?
4. У колькі разоў адрозніваюцца свяцільнасці дзвюх зорак аднолькавага колеру, калі радыус адной з іх у 25 разоў большы?
5. Вызначце памеры зоркі Спікі (α Дзевы), калі тэмпература яе фотасферы роўна 22 400 К, а свяцільнасць у 13 400 разоў большая за свяцільнасць Сонца.
6. Вызначце свяцільнасць зоркі α Ліры, калі яе гадавы паралакс роўны 0,129", а бачная зорная велічыня складае 0^m,03.
7. Вызначце адлегласць, свяцільнасць і памеры зоркі Рэгул (α Льва), калі з назіранняў вядома, што ў яе гадавы паралакс роўны 0,040", бачная зорная велічыня 1^m,35 і тэмпература фотасферы 13 600 К.

§ 24. Падвойныя зоркі. Маса зорак

1. Тыпы падвойных зорак. Назіранні паказваюць, што многія зоркі ў Сусвеце ўтвараюць пары або з'яўляюцца членамі складаных сістэм. **Падвойнымі зоркамі** называюць пары блізка размешчаных зорак. Адрозніваюць аптычныя і фізічныя падвойныя зоркі. **Аптычныя падвойныя зоркі** (пары) складаюцца з вельмі аддаленых адна ад адной у прасторы зорак, якія выпадковым чынам працэдуруюцца на нябесную сферу па прамені зроку. **Фізічныя падвойныя зоркі**

ўяўляюць сабой сістэмы блізка размешчаных у прасторы зорак, якія звязаны сіламі прыцягнення і абарачаюцца вакол агульнага цэнтра мас.

Зоркі фізічных падвойных пар часта маюць розныя колеры. Так, у Антарэса — вельмі яркай чырвонай зоркі ў сузор'і Скарпіёна — ёсць слабы блакітнаваты спадарожнік.

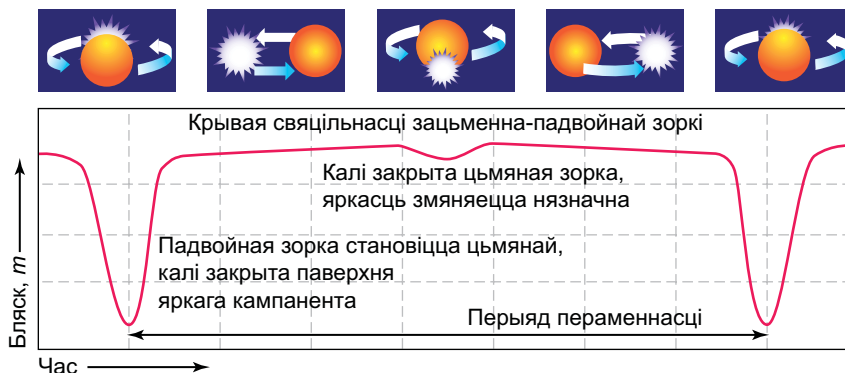
Першая вядомая яшчэ са старажытнасці зоркавая пара — гэта Міцар (Конь) і Алькор (Коннік). Міцар — сярэдняя зорка ручкі «каўша» сузор'я Вялікай Мядзведзіцы, бачная зорная велічыня якой $2^m,2$. На вуглавой адлегласці $12'$ ад яе знаходзіцца слабая зорка Алькор, зорная велічыня якой $4^m,0$. Зоркавая пара Міцар і Алькор — прыклад аптычнай падвойнай зоркі. У сваю чаргу, нават у школьны тэлескоп добра бачна: Міцар складаецца з дзвюх вельмі блізкіх зорак, нераспазнавальных простым вокам. Кампаненты зоркавай пары Міцар А і Міцар В знаходзяцца адзін ад аднаго на адлегласці $14''$ і маюць зорныя велічыні адпаведна $2^m,4$ і $4^m,0$. Зоркавая пара Міцар — прыклад фізічнай падвойнай зоркі.

Фізічныя падвойныя зоркі ў залежнасці ад спосабу іх назірання падзяляюцца на **візуальна-падвойныя зоркі** (іх кампаненты можна ўбачыць пры дапамозе тэлескопа ці сфатаграфаваць), **зацьменна-падвойныя зоркі** (іх кампаненты перыядычна загароджваюць адзін аднаго ад назіральніка, таму зорка змяняе бляск), **спектральна-падвойныя зоркі** (дваістасць выяўляецца ў перыядычных зрушэннях або раздваеннях ліній іх спектраў), **астрометрычна-падвойныя зоркі** (адна зорка не бачная і ўзбурае правільны рух суседняй).

Падвойныя зоркі з'яўляюцца прыватным выпадкам **кратных зорак**, якія складаюцца часам з некалькіх кампанентаў. Існуюць зоркі патройныя, чацвярныя і нават большай кратнасці. Да кратных зорак звычайна адносяць зоркі, якія маюць менш за 10 кампанентаў. Сістэмы з большай колькасцю зорак называюцца **зоркавымі скопішчамі**.

Першы спіс падвойных зорак склаў у 1803 г. англійскі астраном Уільям Гершэль. У ім было некалькі соцень аб'ектаў. На сучасны момант вядома, што прыкладна палова зорак нашай Галактыкі — падвойныя. Дваістасць і кратнасць у зорным свеце — шырока распаўсюджаная з'ява.

2. Зацьменна-падвойныя зоркі. Зацьменна-падвойныя, або зацьменна-пераменныя, зоркі ўяўляюць сабой цесныя пары, што абарачаюцца з перыядам ад некалькіх гадзін да некалькіх сутак па арбітах, вялікая паўвось якіх параўнальная з самімі зоркамі. З гэтай прычыны мы не можам бачыць паасобку іх кампаненты, паколькі вуглавая адлегласць паміж зоркамі вельмі малая. Меркаваць аб дваістасці сістэмы можна толькі па перыядычных ваганнях бляску, калі па прамені зроку плоскасці арбіт зорак практычна супадаюць. У такім выпадку назіраюцца зацьменні, калі адзін з кампанентаў праходзіць наперадзе



Рыс. 125. Змяненне бляску зацьменна-падвойнай зоркі

ці ззаду другога. Разгледжаную сітуацыю растлумачвае рысунак 125, на якім прыведзена крывая змянення бляску m зацьменна-падвойнай зоркі, звязанага з перыядычнымі зацьменнямі аднаго кампанента другім. На графіку паказаны розныя месцазнаходжанні кампанентаў зоркі на арбіце. Рознасць зорных велічынь у мінімуме і максімуме бляску называюць

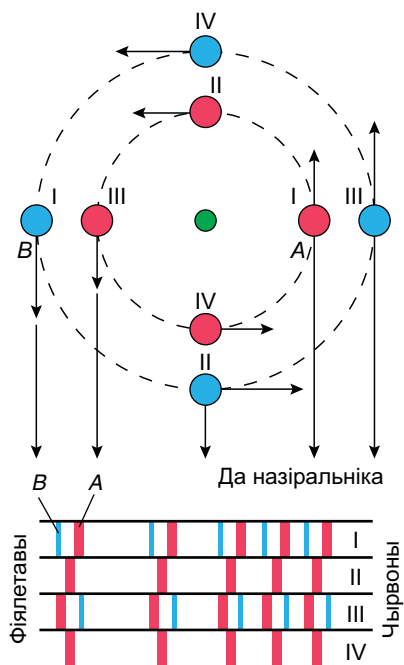
амплітудай, а прамежак часу паміж двума паслядоўнымі найменшымі мінімумамі — **перыядам пераменнасці**.

Тыповы прыклад зацьменна-падвойнай зоркі — зорка β Персея (Алголь), якая рэгулярна зацяняецца на 9,6 г з перыядам 2,867 сутак. Падзенне бляску ў мінімуме ў гэтай зоркі складае $2^m,3$.

Усяго вядома каля 5000 зацьменна-падвойных зорак.

3. Спектральна-падвойныя зоркі. Зоркі, дваістасць якіх устанаўліваецца толькі на падставе спектральных назіранняў, называюцца **спектральна-падвойнымі**.

Дапусцім, што назіральнік знаходзіцца ў плоскасці арбіты падвойнай сістэмы, якая складаецца з больш масіўнай і яркай зоркі A і менш яркай і масіўнай зоркі B (рыс. 126). Кожны з кампанентаў A і B пры абарачэнні вакол цэнтра мас сістэмы то набліжаецца да назіральніка, то аддаляецца ад яго. З-за



Рыс. 126. Зрушэнне ліній у спектры падвойнай зоркі

эфекту Доплера ў першым выпадку лініі ў спектры зоркі зрушваюцца да фіялетавай часткі спектра, у другім — да чырвонай, прычым перыяд гэтых зрушэнняў роўны перыяду абарачэння. На рысунку рымскія лічбы абазначаюць адпаведнасць спектраў месцазнаходжанню зорак на арбітах.

Пастаяннае ўдасканаленне методыкі вызначэння зруху спектральных ліній дало магчымасць у 1995 г. выявіць у зоркі 51 Пегаса спадарожнік масай у палову масы Юпітэра.

У наш час рознымі метадамі ў іншых зорных сістэмах дакладна выяўлена больш за 4500 планет. Яны атрымалі агульную назву — **экзапланеты**. Іх колькасць пастаянна расце, але асобую цікавасць уяўляюць землепадобныя аб'екты.

4. Астраметрычна-падвойныя зоркі. Сустрэкаюцца такія цесныя зоркавыя пары, у якіх адна з зорак ці вельмі малая па памерах, ці мае нізкую святільнасць. Такую зорку разгледзець немагчыма, але выявіць дваістасць усё ж можна. Яркі кампанент перыядычна адхіляецца ад прамалінейнай траекторыі то ў адзін, то ў другі бок (рыс. 127), быццам бы па прамой рухаецца цэнтр мас сістэмы. Такія ўзбурэнні прапарцыянальны масе спадарожніка.

Даследаванні адной з найбліжэйшых да нас зорак, вядомай пад назвай Рос 614 (яе бляск $11^m,4$ і паралакс $0,25''$), паказалі, што амплітуда адхіленняў зоркі ад напрамку, які меркаваўся, дасягае $0,36''$. Перыяд абарачэння зоркі адносна цэнтра мас роўны 16,5 года.

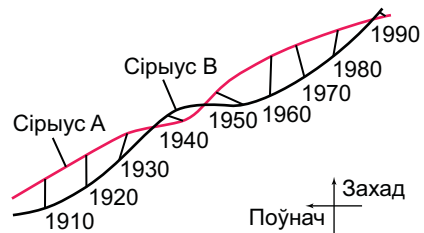
Сярод блізкіх да Сонца зорак выяўлена каля 20 астраметрычна-падвойных зорак.

5. Маса зорак. Працяглыя назіранні візуальна-падвойных зорак пераканалі астраномаў у тым, што адносны бачны рух кампанентаў адбываецца па эліпсе і задавальняе закон плошчаў. З гэтага вынікае, што ў падвойных сістэмах абарачэнні зорак адбываюцца ў адпаведнасці з законамі Кеплера і падпарадкоўваюцца закону сусветнага прыцягнення Ньютана.

У выніку назіранняў падвойных зорак атрыманы ацэнкі мас для зорак розных тыпаў. Аналіз гэтых даных прывёў да наступных вынікаў.

1. Масы зорак знаходзяцца ў межах ад 0,03 да 60 мас Сонца. Найбольшая колькасць зорак мае ад 0,4 да 3 мас Сонца.

2. Залежнасць, якая існуе паміж масамі зорак і іх святільнасцю, дае магчымасць ацэньваць масы адзіночных зорак па іх



Рыс. 127. Адхіленне ў руху Сірыуса, выкліканае гравітацыйным узбурэннем спадарожніка

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 дзвюх 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 законамі 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?

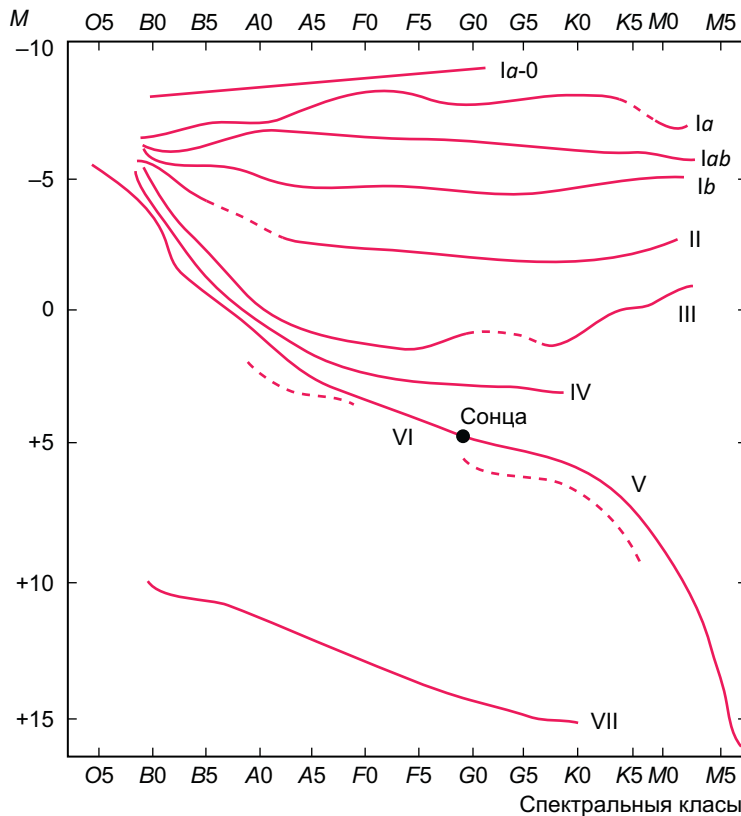
§ 25. Эвалюцыя зорак

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 Эйнар Герцшпрунг, 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 Ерскай 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 звышгіганы;

Ia — яркія звышгіганы;

Iab — сярэднія звышгіганы;

Ib — слабыя звышгіганы;

II — яркія гіганы;

III — слабыя гіганы;

IV — субгіганы;

V — галоўная паслядоўнасць;

VI — субкарлікі;

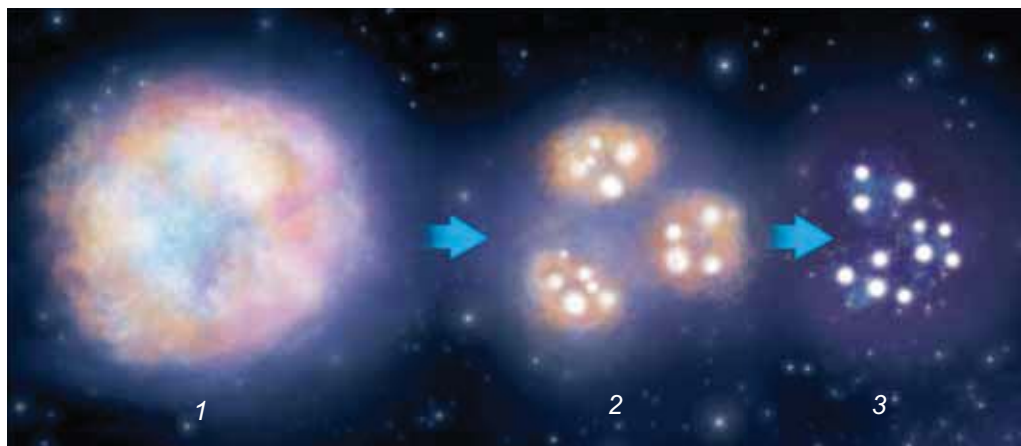
VII — белыя карлікі.

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 газапылавага 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 газапылавая 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—свацільнасць». 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 газапылавага 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 (святільнасць) 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 малога часу іх існавання. Таму найбольш запоўнена ніжняя правая частка галоўнай паслядоўнасці дыяграмы «спектр—святільнасць».

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 разагравецца (тэмпература падымаецца да 100 млн градусаў). Вонкавыя слаі зоркі пры гэтым расшыраюцца і ахалоджваюцца. Зорка быццам бы разбухае. Яе святільнасць 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 газапылавых 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 прынцыпе будзецца 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?

§ 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 гіганты 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.

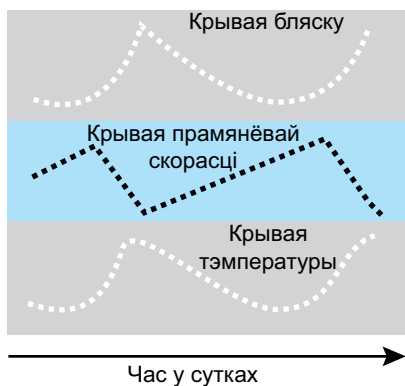
Адначасова з бачнай зорнай велічынёй у цэфеід змяняецца іх спектр і тэмпература (у сярэднім на 1500 градусаў) (рыс. 131).

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

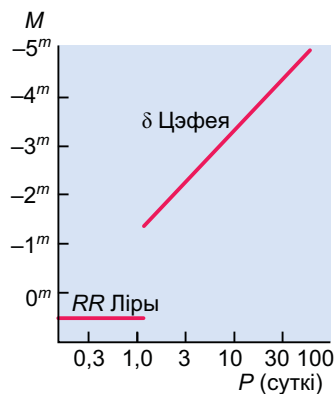
$$P = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho}} = \frac{0,12}{\sqrt{\rho}},$$

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.

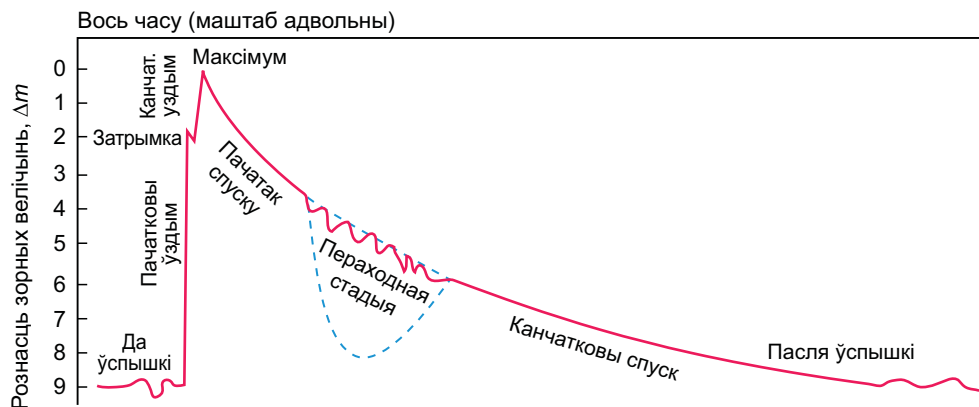
Цэфеіды вобразна называюць маякамі Сусвету. На сённяшні дзень у нашай Галактыцы вядома звыш 800 цэфеід.

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).

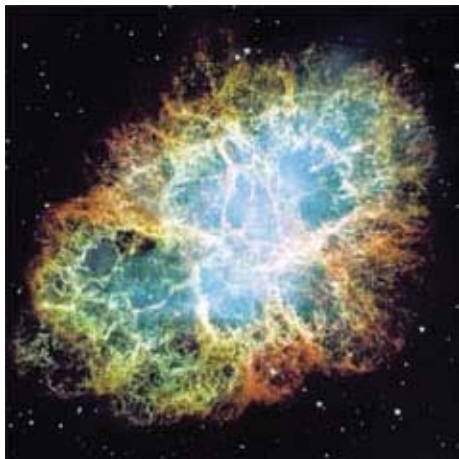
3. Новыя зоркі. Зоркі, бляск якіх раптоўна павялічваецца ў тысячы і мільёны разоў за некалькі сутак, пасля чаго памяншаецца да першапачатковага ўзроўню на працягу года і больш, называюцца **новымі зоркамі**.

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



Рыс. 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,



Рыс. 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.

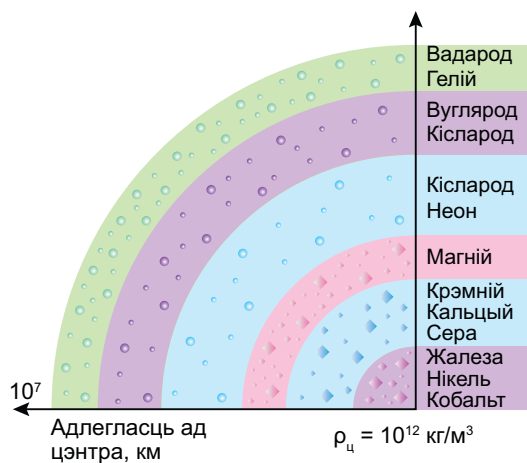
У нашай Галактыцы за апошніяе тысячгагоддзе зарэгістравана некалькі выпадкаў успышак звышновых зорак. Найбольш яркая звышновая зорка, якая назіралася пры дапамозе сучаснай тэхнікі, з'явілася ў 1987 г. у адной з найбліжэйшых галактык — Вялікім Магеланавым Воблаку (рыс. 135).

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? $M_{\odot} = 4^{m,8}$; $m_{\odot} = -26^{m,8}$.
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?

Раздзел VIII

Будова і эвалюцыя Сусвету

§ 27. Наша Галактыка

1. Будова Галактыкі. На асеннім начным небе ў ясную бязмесяцавую ноч з захаду на ўсход праз зеніт (шыроты Беларусі) цягнецца добра прыкметная святлівая паласа — **Млечны Шлях**. Старажытныя грэкі Млечны Шлях назвалі **Галактыкай** (ад грэч. γαλα — малако). Яшчэ Галілео Галілей у 1609 г. у тэлескоп выявіў, што Млечны Шлях складаецца з велізарнай колькасці слабых зорак.

Млечны Шлях праходзіць праз абодва паўшар'і па вялікім крузе нябеснай сферы (рыс. 140). Лінія, якая ідзе ўздоўж сярэдзіны Млечнага Шляху, называецца **галактычным экватарам**, а плоскасць, якая яго ўтварае, — **галактычнай плоскасцю**. Галактычная плоскасць нахілена да плоскасці нябеснага экватара пад вуглом 63° .

Такім чынам, Галактыка — гэта гравітацыйна звязаная сістэма, якая складаецца з соцень мільярдаў зорак і міжзоркавага асяроддзя, а Млечны Шлях — яе святлівая праекцыя на нябесную сферу.

Колькасныя падлікі зорак у розных напрамках ад галактычнага экватара распачаў яшчэ Уільям Гершэль у 70-х гг. XVIII ст. Выбарачныя падлікі паказа-



Рыс. 140. Млечны Шлях

лі, што колькасць зорак рэзка памяншаецца па абодва бакі ад галактычнай плоскасці. Далейшымі даследаваннямі было ўстаноўлена, што ўсе зоркі неба ўтвараюць адзіную зорную сістэму. У Млечным Шляху засяроджана пераважная колькасць зорак Галактыкі — велізарнай зорнай сістэмы, якая мае форму плоскага лінзападобнага дыска (рыс. 141) папярочнікам каля 30 і таўшчынёй каля 1 кпк (або адпаведна

каля 100 і 3 тыс. светлавых гадоў). Зорны дыск Галактыкі мае структуру ў выглядзе спіральных галін (рукавоў). Шарападобнае патаўшчэнне ў сярэдзіне дыска атрымала назву **балдж** (ад англ. *bulge* — уздуцце). Найбольш шчыльная і кампактная цэнтральная частка Галактыкі размяшчаецца ў сузор’і Стральца і называецца **ядром**.

Ядро Галактыкі скрыта ад нас газапылавымі воблакамі і зоркамі. Яно характарызуецца вельмі вялікай актыўнасцю і выпраменьвае ў радыё-, інфрачырвоным і рэнтгенаўскім дыяпазонах даўжынь хваль. Даследаванне працэсаў, што адбываюцца ў цэнтральнай частцы Галактыкі, дае магчымасць выказаць меркаванне, што ў ядры знаходзіцца звышмасіўная чорная дзіра масай 2—5 млн сонечных мас.

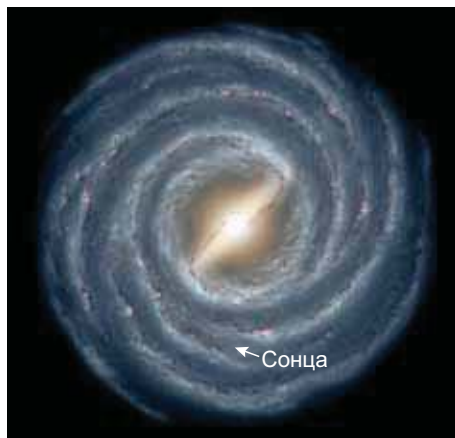
Частка зорак нашай Галактыкі не ўваходзіць у склад дыска, а ўтварае сферычную складальную — **зорнае гало**, радыус якога не меншы за 20 кпк. Гало акружана вельмі разрэджанай і вялікай па памерах (50—60 кпк) вонкавай часткай Галактыкі — **каронай**.

Сонечная сістэма ў Галактыцы знаходзіцца далёка ад цэнтра — на адлегласці каля 8 кпк — і ляжыць амаль у галактычнай плоскасці.

2. Зоркавыя скопішчы. Структурнымі складальнымі Галактыкі з’яўляюцца зоркавыя скопішчы. **Зоркавыя скопішчы** — гэта гравітацыйна звязаныя групы зорак, якія маюць агульнае паходжанне. Зоркавыя скопішчы рухаюцца ў полі прыцягнення Галактыкі як адзінае цэлае.

Па знешнім выглядзе яны падзяляюцца на рассеяныя і шаравыя.

Рассеянае зоркавае скопішча — гэта адносна няшчыльная група зорак, якая мае няправільную форму і ўтрымлівае ад некалькіх дзясяткаў да некалькіх тысяч зорак. Памеры такіх скопішчаў — 6—14 пк. Найбліжэйшыя да нас рассеяныя зоркавыя скопішчы — Плеяды (рыс. 142) і Гіяды — знаходзяцца ў сузор’і Цяльца. Простым



Рыс. 141. Будова нашай Галактыкі. Стрэлка паказвае месцазнаходжанне Сонечнай сістэмы



Рыс. 142. Рассеянае зоркавае скопішча Плеяды ў сузор’і Цяльца



Рыс. 143. Шаравое зоркавае скопішча M5 (NGC 5904) у сузор'і Змяі

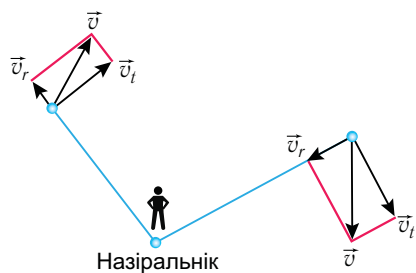
вокам можна распазнаць у Плеядах 5—7 слабых зорчак, размешчаных у выглядзе маленькага коўшыка (гл. рыс. 142). Цяпер вядома каля 1200 рассеяных зоркавых скопішчаў. Агульная іх колькасць у Галактыцы ацэньваецца ў 20 тыс. аб'ектаў. Усе яны канцэнтруюцца ў галактычнай плоскасці і складаюцца з малых бела-блакітных зорак галоўнай паслядоўнасці.

Шаравыя зоркавыя скопішчы маюць сферичную або эліпсoidalную форму (рыс. 143), яны налічваюць ад дзясяткаў тысяч да мільёнаў зорак. Дыяметры такіх зоркавых скопішчаў знаходзяцца ў межах ад 20 да 100 пк. Простарава канцэнтрацыя зорак рэзка ўзрастае да цэнтра скопішча і дасягае дзясяткаў тысяч у

кубічным парсеку (у наваколлі Сонца — $0,13 \text{ пк}^{-3}$). Шаравыя скопішчы ўтвараюць працяглае гало вакол цэнтра Галактыкі і моцна канцэнтруюцца да яго. Усяго ў Галактыцы адкрыта каля 150 шаравых скопішчаў, а іх агульная колькасць дасягае прыблізна 500. Зоркавае насельніцтва шаравых скопішчаў складаецца з зорак, эвалюцыя якіх даўно скончылася, — чырвоных гігантаў і звышгігантаў.

Шаравыя скопішчы нашай Галактыкі — адны з найстарэйшых. Іх узрост складае 10—15 млрд гадоў.

3. Рух зорак. У 1718 г. англійскі астраном Эдмунд Галей параўнаў месцазнаходжанні зорак, якія назіраліся ў яго час, з тымі, што былі прыведзены ў каталогах Гіпарха (II ст. да н. э.). Вучоны заўважыў зрушэнне яркіх зорак Сірыуса і Працыёна на $0,7^\circ$, Арктура — больш чым на 1° . На аснове гэтага факта быў зроблены вывад аб прастораваму руху зорак адносна Сонца. Так упершыню было выяўлена, што зоркі рухаюцца.



Рыс. 144. Прастарава (v), прамянёвая (v_r) і тангенцыйная (v_t) скорасці

Скорасць руху зоркі ў прастору адносна Сонца называецца **прастаравай скорасцю**. У агульным выпадку прастарава скорасць v (рыс. 144) накіравана пад некаторым вуглом да праменя зроку назіральніка. Вектар прастаравай скорасці раскладаецца на дзве складальныя: па напрамку праменя зроку

(**прамянёвая скорасць** v_r) і перпендыкулярную да праменя зроку (**тангенцыяльная скорасць** v_t). Модулі прасторавай, тангенцыяльнай і прамянёвай скарасцей звязаны паміж сабой суадносінай:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}.$$

Прамянёвая скорасць зоркі вызначаецца па доплераўскім зрушэнні ($\Delta\lambda$) ліній у яе спектры:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c.$$

Тангенцыяльную скорасць вызначаюць па зрушэнні зоркі на нябеснай сферы. Такое зрушэнне ў параўнальна блізкіх (да назіральніка) зорак складае некалькі секунд за дзясяткі гадоў:

$$v_t = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/с},$$

дзе μ — **уласны рух** (бачнае вуглавое зрушэнне зоркі на нябеснай сферы за адзін год). Ён выражаецца секундамі дугі за год (рис. 145).

Аналіз уласных рухаў зорак прывёў таксама да выяўлення руху Сонца сярод зорак. Той пункт на нябеснай сферы ($\alpha = 270^\circ$, $\delta = +30^\circ$, сузор'е Геркулеса), у напрамку да якога рухаецца Сонца (са скорасцю 19,4 км/с адносна суседніх зорак), называецца **апексам** Сонца (ад лац. *apex* — вяршыня), а дыяметральна процілеглы пункт неба называецца сонечным **антыапексам**. З прычыны

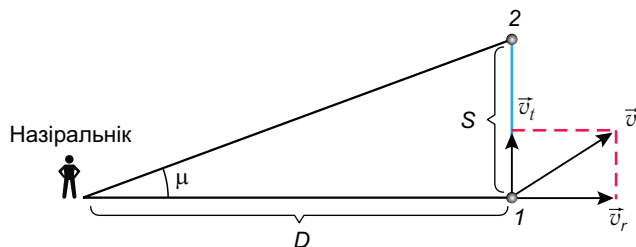


Рис. 145. Вызначэнне тангенцыяльнай скорасці зоркі

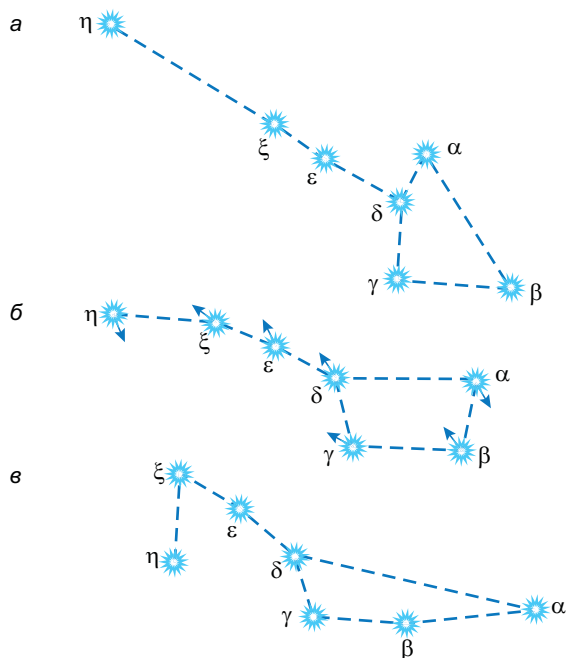


Рис. 146. Змяненне адноснага размяшчэння зорак у «каўшы» Вялікай Мядзведзіцы за 100 тыс. гадоў: *а* — 50 тыс. гадоў назад; *б* — наш час (стрэлкамі паказаны напрамкі тангенцыяльных скарасцей зорак); *в* — праз 50 тыс. гадоў

ўласных рухаў зорак праз дзясяткі тысяч гадоў выгляд сузор'яў змяняецца (рыс. 146).

4. Вярчэнне Галактыкі. Спосаб для доказу вярчэння Галактыкі быў распрацаваны ў 1859 г. прафесарам Казанскага ўніверсітэта М. А. Кавальскім. Вывучэнне прамянёвых скарасцей зорак у розных напрамках ад Сонца дало магчымасць сфармуляваць законы вярчэння Галактыкі.

1. *Усе зоркі дыска Галактыкі абарачаюцца вакол яе ядра па арбітах, блізкіх да кругавых.* Гэта вярчэнне адбываецца па гадзіннікавай стрэлцы, калі глядзець на Галактыку з боку яе Паўночнага полюса, які знаходзіцца ў сузор'і Валасы Веранікі.

2. *Вуглавая скорасць вярчэння спадае па меры аддалення ад цэнтра.* Але гэта памяншэнне адбываецца крыху павольней, чым патрабуюць законы Кеплера.

3. *Лінейная скорасць вярчэння спачатку нарастае з аддаленнем ад цэнтра Галактыкі, дасягае максімуму (каля 220 км/с) на адлегласці Сонца, пасля чаго вельмі павольна спадае.*

4. Поўны перыяд абарачэння Сонца вакол ядра Галактыкі складае прыблізна 225—250 млн гадоў (галактычны год).

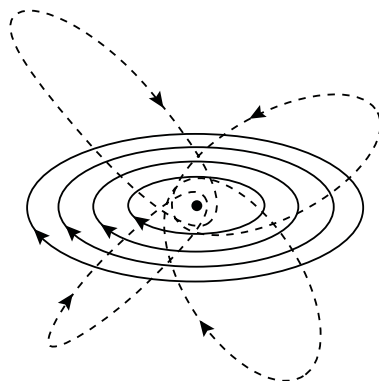
5. Зоркі і скопішчы зорак сфэрычнай складальнай Галактыкі рухаюцца па вельмі выцягнутых і нахіленых да плоскасці дыска пад рознымі вугламі арбітах (рыс. 147). Такія зоркі маюць адносна Сонца вельмі вялікія скорасці (да 200—300 км/с).

Як бачым, рух зорак у Галактыцы нагадвае рух цел Сонечнай сістэмы.

Ведаючы скорасць абарачэння і радыус кругавой арбіты, можна вылічыць масу ўнутранай часткі Галактыкі. З формулы для кругавой скорасці (гл. § 9) вынікае:

$$M = \frac{v^2 r}{G}.$$

Падставім значэнні $v = 2,2 \cdot 10^5$ м/с, $r = 2,5 \cdot 10^{20}$ м і $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг², атрымаем, што $M = 1,8 \cdot 10^{41}$ кг, або каля 100 млрд мас Сонца. Маса Галактыкі ў межах аб'ёму радыусам 15 кпк ацэньваецца прыблізна ў 200 млрд мас Сонца. З улікам астатняй часткі Галактыкі яе маса ацэньваецца прыкладна ў 10^{12} мас Сонца.



Рыс. 147. Траекторыі зорак у Галактыцы (дыск Галактыкі — сцэльныя лініі, сфэрычная складальная — пункцірныя лініі)



Галоўныя вывады

1. Наша Галактыка — гравітацыйна звязаная сістэма, якая складаецца з соцень мільярдаў зорак і міжзоркавага асяроддзя.
2. Млечны Шлях — гэта слаба святлівая паласа, што працягнулася праз усё зорнае неба, з'яўляецца праекцыяй велізарнай колькасці зорак Галактыкі.
3. Структурнымі складальнымі Галактыкі з'яўляюцца гравітацыйна звязаныя групы зорак (шаравыя скопішчы, рассеяныя скопішчы), якія маюць агульнае паходжанне і рухаюцца ў полі прыцягнення Галактыкі як адзінае цэлае.
4. Сонечная сістэма адносна найбліжэйшых зорак Галактыкі рухаецца са скорасцю каля 20 км/с у напрамку сузор'я Геркулеса.
5. Наша зорная сістэма мае дыферэнцыяльнае вярчэнне, г. зн. вуглавая скорасць вярчэння памяншаецца па меры аддалення ад цэнтра.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Знайдзіце на зорнай карце сузор'і, праз якія праходзіць Млечны Шлях.
2. Чаму назіральніку, які знаходзіцца на Зямлі, Млечны Шлях уяўляецца перарывістым і касмыкаватым?
3. Якую будову мае наша Галактыка?
4. Якое месцазнаходжанне Сонечнай сістэмы ў Галактыцы?
5. Чым адрозніваюцца зоркі дыска Галактыкі ад зорак гало?
6. Як размеркаваны шаравыя скопішчы ў Галактыцы? Чым яны адрозніваюцца ад расеяных скопішчаў?
7. Якія асаблівасці вярчэння нашай Галактыкі?
8. Колькі разоў за сваё жыццё Сонца паспела абараціцца вакол цэнтра Галактыкі?
9. Зорка 83 Геркулеса знаходзіцца на адлегласці $D = 100$ пк ад Сонца, яе ўласны рух складае $\mu = 0,12''$. Якая тангенцыяльная скорасць гэтай зоркі?
10. Прамянёвая скорасць зоркі Бэтэльгейзе $v_r = 21$ км/с, уласны рух $\mu = 0,032''$ за год, а паралакс $p = 0,012''$. Вызначце поўную прасторавую скорасць гэтай зоркі адносна Сонца.

§ 28. Міжзоркавае асяроддзе

1. Міжзоркавы газ. Зорнае неба ўтрымлівае шмат туманных аб'ектаў. Яны бываюць святлівымі і цёмнымі, што паглынаюць святло.

Шырокае выкарыстанне фатаграфіі ў астраноміі дало магчымасць пільна да-следаваць, апісаць і скласці каталогі цёмных туманнасцей.

На фоне светлых зон Млечнага Шляху выразна вылучаюцца цёмныя плямы няправільнай формы і розных вуглавых памераў. Гэтыя цёмныя плямы і зоны даказваюць існаванне паблізу ад галактычнай плоскасці халоднай разрэджанай матэрыі.

Міжзоркавае асяроддзе — гэта рэчыва і палі, якія запаўняюць міжзоркавую прастору ўнутры Галактыкі. Большая частка масы міжзоркавага рэчыва прыпадае на разрэджаны газ і пыл. Усё міжзоркавае асяроддзе пранізванаеца магнітнымі па-лямі, касмічнымі прамянямі, электрамагнітным выпраменьваннем. Асноўны кам-панент міжзоркавага асяроддзя — **міжзоркавы газ**, які складаецца з вадароду (70 % масы) і гелію (28 %). Астатняя частка масы міжзоркавага рэчыва прыпадае на больш цяжкія хімічныя элементы (O, C, N, Ne, S, Ar, Fe і інш.).

Агульная маса міжзоркавага рэчыва нашай Галактыкі (акрамя кароны) ацэ-ньваецца ў 2 % ад агульнай масы ўсёй Галактыкі. У залежнасці ад тэмпературных

умоў і шчыльнасці міжзоркавы газ можа знаходзіцца ў трох розных станах: *іанізаваным, атамарным і малекулярным*.

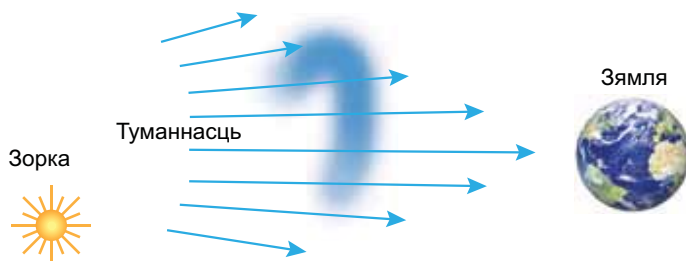
Асноўныя звесткі аб міжзоркавым газе атрыманы радыёастранамічнымі метадамі, пасля таго як у 1951 г. было выяўлена радыёвыпраменьванне нейтральнага атамарнага вадароду на хвалі 21 см. Аказалася, што атамарны вадарод, які мае тэмпературу 100 К, утварае ў дыску Галактыкі тонкі слой таўшчынёй 200—300 пк, які павялічваецца да некалькіх кілапарсекаў на адлегласці 15—20 кпк ад яе цэнтра.

Асноўная частка міжзоркавага газу сканцэнтравана ў спіральных галінах Галактыкі, дзе ён размеркаваны таксама нераўнамерна: сабраны ў касмыкаватыя ўтварэнні памерамі ў дзясяткі і сотні парсекаў з сярэдняй канцэнтрацыяй часціц у некалькі атамаў у 1 см^3 . Каля паловы масы міжзоркавага газу ўтрымліваецца ў гіганцкіх **малекулярных воблаках** з сярэдняй масай 10^5 мас Сонца і дыяметрам каля 40 пк. З-за нізкай тэмпературы (каля 10 К) і павышанай шчыльнасці (да 10^3 часціц у 1 см^3) вадарод і іншыя элементы ў гэтых воблаках аб'яднаны ў малекулы. Такіх малекулярных воблакаў у Галактыцы налічваецца каля 4000.

Вобласці іанізаванага вадароду з тэмпературай 8000—10 000 К праяўляюць сябе ў аптычным дыяпазоне як **светлыя дыфузныя туманнасці**. Іх свячэнне ўзбуджаецца ультрафіялетавым выпраменьваннем блізка размешчаных гарачых зорак (спектральных класаў *B* і *O*).

Светлая туманнасць выпраменьвае святло, калі яе асвятляе блізкая зорка (рыс. 148). Зоркі класаў *O* і *B* могуць выклікаць іанізацыю атамаў вадароду на адлегласці прыблізна 500 светлавых гадоў.

Светлыя дыфузныя туманнасці няправільнай, касмыкаватай формы дасягаюць памераў 10 пк, а іх шчыльнасць вагаецца ад 10^{-17} да 10^{-20} кг/м^3 . Размяркоўваюцца вобласці такога іанізаванага вадароду ў плоскай падсістэме Галактыкі, яны з'яўляюцца паказальнікамі месцаў, дзе ў цяперашні час ідуць працэсы зоркаўтварэння.



Рыс. 148. Туманнасць выпраменьвае святло, калі яе асвятляе блізкая размешчаная зорка

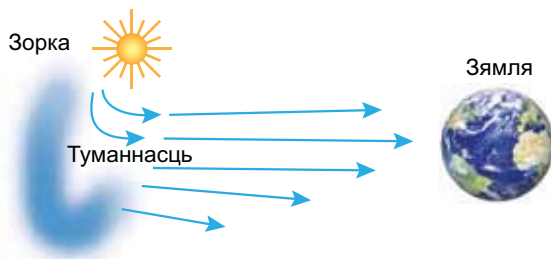


Рыс. 149. Вялікая туманнасць Арыёна

маннасць у сузор'і Цяльца (гл. рыс. 134), яна з'яўляецца рэшткамі выбуху звышновай зоркі.

Калі блізка размешчаныя зоркі не такія гарачыя і не могуць іанізаваць вадарод, то туманнасць свеціцца за кошт адбіцця зоркавага святла (рыс. 150). Такія туманнасці ўтрымліваюць шмат пылу. Прыкладам такой светлай туманнасці з'яўляецца туманнасць у скопішчы Плеяды ў сузор'і Цяльца (гл. рыс. 142).

Асаблівым тыпам туманнасцей з'яўляюцца **планетарныя туманнасці**, якія выглядаюць як слаба святлівыя дыскі ці кольцы, што нагадваюць дыскі планет. Іх налічваецца больш за 1200. Планетарныя туманнасці ўяўляюць сабой святлівую расшыральную абалонку скінутага чырвоным гігантам на апошняй стадыі сваёй эвалюцыі іанізаванага газу. У цэнтры планетарнай туманнасці знаходзяцца рэшткі загінуўшага чырвонага гіганта — гарачыя белы карлік або нейтронная зорка. Пад дзеяннем унутранага ціску газу планетарная туманнасць расшыраецца прыкладна са скорасцю 20—40 км/с, пры гэтым шчыльнасць газу падае. Гэтыя аб'екты абагачаюць міжзоркавае асяроддзе рэчывам. Планетарная туманнасць Пясочны Гадзіннік (рыс. 151) паказвае, якія складаныя працэсы



Рыс. 150. Туманнасць свеціць адбітым святлом блізка размешчанай зоркі

могуць адбывацца на апошняй стадыі эвалюцыі зорак.

2. Міжзоркавы пыл. У міжзоркавай прасторы рассеяны дробныя цвёрдыя часцінкі (металічныя, сілікатныя або графітавыя) памерамі ад 0,01 да 1 мкм. Тугаплаўкія часцінкі ўтвараюцца і пастаўляюцца ў міжзоркавае асяроддзе за кошт расшырэння абалонак новых і звышновых зорак, планетарных туманнасцей, халодных чырвоных гігантаў і звышгігантаў. У міжзоркавай прасторы разам з газам усюды ёсць пыл. На яго долю прыпадае каля 1 % ад масы газу.

Міжзоркавы пыл, як і міжзоркавы газ, канцэнтруецца ў галактычнай плоскасці, утвараючы газапылавыя воблакі касмыкаватай структуры. У міжзоркавых воблаках дробныя пылінкі хутка абрастаюць абалонкамі з найбольш распаўсюджаных элементаў (H, C, N, O). За мільёны гадоў нават пры нізкай тэмпературы ў абалонках адбываюцца складаныя хімічныя працэсы з утварэннем малекул вады, этылену, сінільнай кіслаты, этылавага спірту і інш. Зарэгістравана каля 90 тыпаў малекул, некаторыя з іх утрымліваюць да 13 атамаў.

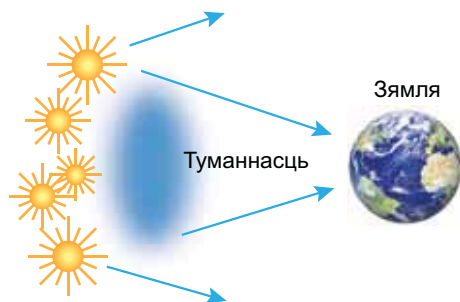
З-за пылу самыя шчыльныя газавыя ўтварэнні — малекулярныя воблакі — практычна непразрыстыя і выглядаюць на небе як цёмныя вобласці, амаль без зорак (рыс. 152). Такія газапылавыя ўтварэнні называюцца **цёмнымі дыфузнымі туманнасцямі** (рыс. 153).



Рыс. 152. Воблакі міжзоркавага пылу ў напрамку на цэнтр Галактыкі



Рыс. 151. Планетарная туманнасць Пясочны Гадзіннік



Рыс. 153. Цёмная туманнасць засланне святло зорак, якія знаходзяцца на вялікай адлегласці ад Зямлі



Рыс. 154. Туманнасць Конская Галава ў сузор'і Арыёна. Злева — відарыс у інфрачырвоных праменях, справа — у аптычных. Фатаграфіі касмічнага тэлескопа Хабла

Дзякуючы развіццю пазаатмасфернай астраноміі з'явілася магчымасць назіраць міжзоркавы пыл у інфрачырвоным дыяпазоне, што дазваляе разгледзець новыя дэталі (рыс. 154).

3. Касмічныя прамені і міжзоркавае магнітнае поле. Акрамя разрэджанага газу і пылу ў міжзоркавай прасторы з вялізнымі скарасцямі, блізкімі да скорасці свету, рухаецца вялікая колькасць элементарных часціц і ядзер розных атамаў. Патокі гэтых часціц называюць **касмічнымі праменьямі**. Яны пранізваюць усю міжпланетную і міжзоркавую прастору. На пляцоўку ў 1 м^2 штосекунда трапляе ў сярэднім каля 10 тыс. розных часціц. У складзе касмічных праменяў прысутнічаюць электроны, ядры гелію і больш цяжкіх элементаў, але ў асноўным пераважаюць пратоны (больш за 90 %), якія маюць сярэднюю энергію $1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Асноўнымі крыніцамі касмічных праменяў у Галактыцы з'яўляюцца рэшткі звышновых зорак і пульсары (гл. § 26).

Першае сведчанне існавання міжзоркавага магнітнага поля было атрымана італьянскім фізікам Энрыка Фермі і амерыканскім вучоным Эдвардам Тэлерам пры вывучэнні касмічных праменяў.

Электроны, якія ўваходзяць у склад касмічных праменяў, паступова тармозяцца ў магнітным полі, губляючы энергію на выпраменьванне радыёхваль. Такое выпраменьванне называецца **сінхратронным**. Яно рэгіструецца радыётэлескопамі. Магутнымі крыніцамі сінхратроннага выпраменьвання з'яўляюцца рэшткі звышновых зорак.



Галоўныя вывады

1. Міжзоркавае асяроддзе — гэта рэчыва і палі, што запаўняюць міжзоркавую прастору ўнутры Галактыкі.
2. Большая частка масы міжзоркавага асяроддзя прыпадае на разрэджаны газ і пыл, агульная маса якіх ацэньваецца ў 2 % ад агульнай масы Галактыкі.



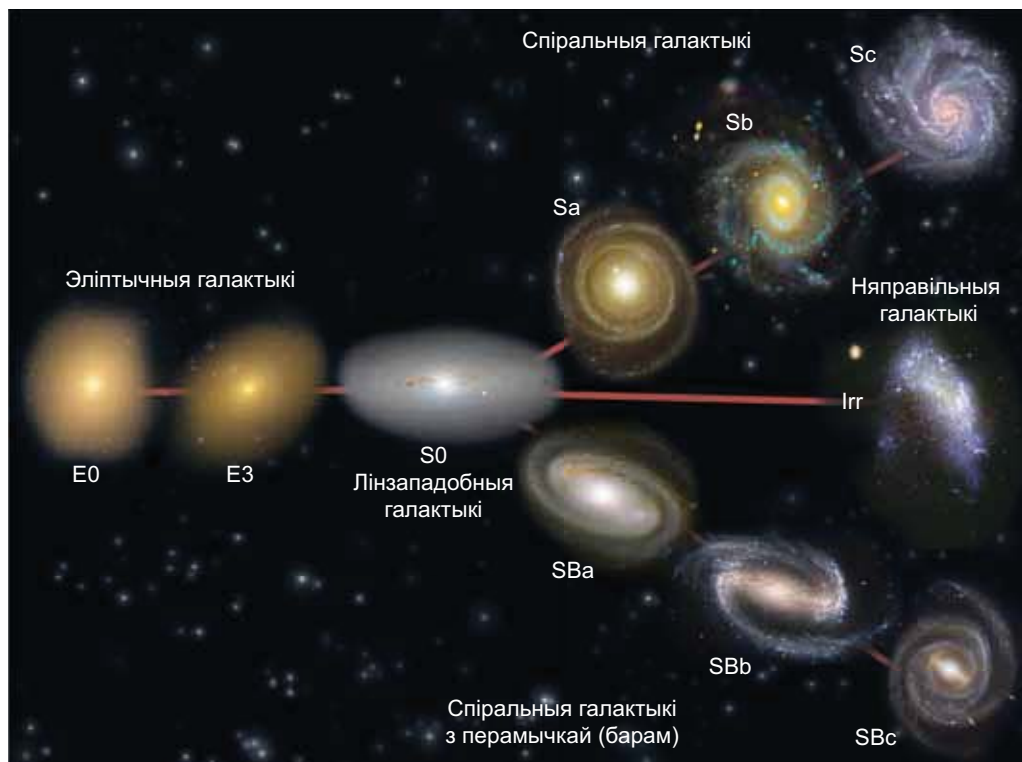
Кантрольныя пытанні і заданні

1. Што разумеюць пад міжзоркавым асяроддзем? Чым яно запоўнена?
2. Якая маса міжзоркавага рэчыва нашай Галактыкі?
3. Што разумеюць пад туманнасцямі? Назавіце асноўныя віды туманнасцей. Чаму адны туманнасці — светлыя, іншыя — цёмныя?
4. Што ўяўляе сабой міжзоркавы пыл?
5. З якіх астранамічных назіранняў можна зрабіць вывад аб існаванні міжзоркавага пылу?
6. Якое паходжанне газапылавых туманнасцей і малекулярных воблакаў?
7. Што ўяўляюць сабой касмічныя прамені? Якія яны маюць уласцівасці?

§ 29. Зоркавыя сістэмы — галактыкі

1. Тыпы галактык. У 1924 г. пры дапамозе найбуйнейшага на той час тэлескопа (абсерваторыя Маўнт-Вілсан, ЗША) Эдвін Хабл устанавіў, што туманнасць Андромеды ўтворана вялізнай колькасцю зорак, якія зліваюцца ў суцэльную туманную пляму пры назіранні ў менш магутны тэлескоп. Большасць іншых вядомых туманнасцей аказаліся такімі ж аддаленымі гіганцкімі сістэмамі, якія складаюцца з мільёнаў і мільярдаў зорак. Гіганцкія гравітацыйна звязаныя сістэмы зорак і міжзоркавага рэчыва, размешчаныя па-за нашай Галактыкай, сталі называць **галактыкамі**. Сучасныя магутныя тэлескопы зрабілі даступнай рэгістрацыю соцень мільярдаў галактык.

Фотаздымкі паказалі, што галактыкі адрозніваюцца па знешнім выглядзе і структуры. Хабл прапанаваў класіфікацыю галактык па іх форме. Згодна з сучаснай класіфікацыяй, адрозніваюць галактыкі наступных асноўных тыпаў: эліптычныя (E), спіральныя (S), няправільныя (Ir) і лінзападобныя (SO) (рыс. 155 на с. 176).



Рыс. 155. Класіфікацыя галактык Э. Хабла

Эліптычныя галактыкі ў праекцыі на нябесную сферу выглядаюць як кругі або эліпсы (рыс. 156). Колькасць зорак у іх плаўна памяншаецца ад цэнтра да краю. Зоркі верцяцца ў такой сістэме ў розных плоскасцях. Самі эліптычныя галактыкі верцяцца вельмі павольна. Яны ўтрымліваюць толькі жоўтыя і чырвоныя зоркі, практычна не маюць газу, пылу і маладых зорак высокай святэльнасці. Фізічным характарыстыкам гэтых галактык уласцівы дастаткова шырокі дыяпазон: дыяметры — ад 5 да 50 кпк, масы — ад 10^6 да 10^{13} мас Сонца, святэльнасці — ад 10^6 да 10^{12} святэльнасцей Сонца. Каля 25 % вывучаных галактык належаць да эліптычнага тыпу.



Рыс. 156. Эліптычная галактыка М 87 у сузор'і Дзевы

Каля паловы вывучаных галактык адносяцца да спіральнага тыпу. **Спіральныя галактыкі** — гэта моцна сплясканыя сістэмы з цэнтральным ушчыльненнем (у якім знаходзіцца ядро галактыкі)



Рыс. 157. Спіральныя галактыкі: а — М 81; б — М 51; в — М 101

і прыметнай спіральнай структурай. Памеры гэтых галактык дасягаюць 40 кпк, а святільнасці — 10^{11} святільнасцей Сонца. У дыску, які акружае ўшчыльненне, ёсць дзве (ці больш) касмыкаватыя спіральныя галіны (рыс. 157). Так, да хаблаўскіх тыпаў спіральных галактык адносіцца галактыка М 81 тыпу Sa, якая ўяўляе сабой сістэму з туга закручанымі спіральнымі галінамі, яркай і працяглай шарападобнай часткай (рыс. 157, а). Галактыка М 51 адносіцца да тыпу Sb, мае больш магутныя і выразныя спіралі, яе цэнтральная частка менш яркая (рыс. 157, б). Галактыка М 101 належыць тыпу Sc і ўяўляе сабой сістэму з развітай касмыкаватай спіральнай структурай, шарападобная частка якой слаба праглядаецца на агульным фоне (рыс. 157, в). Прыкладна ў паловы спіральных галактык у цэнтральнай частцы ёсць амаль прамая зорная перамычка — **бар**, ад якой пачынаюць закручвацца спіральныя рукавы (рыс. 158). Такія галактыкі называюцца **спіральнымі з перамычкай**.

У спіральных галінах галактык засяроджаны самыя яркія і маладыя зоркі, яркія газылыявыя туманнасці, маладыя зоркавыя скопішчы і зоркавыя комплексы. Таму спіральны ўзор выразна бачны нават у далёкіх галактык, хоць на долю спіральных рукавоў прыпадае ўсяго некалькі працэнтаў масы ўсёй галактыкі. Наша Галактыка з'яўляецца спіральнай. Найбліжэйшая зорная сістэма, падобная па структуры і тыпу да нашай Галактыкі, — гэта туманнасць Андромеды (рыс. 159). Святло ад гэтай галактыкі даходзіць да нас прыкладна за 2,54 млн гадоў.



Рыс. 158. Спіральная галактыка з перамычкай (барам) NGC 1365



Рыс. 159. Туманнасць Андромеды



Рыс. 160. Вялікае
Магеланава Воблака

Да **няправільных галактык** адносяць маламасіўныя галактыкі няправільнай структуры. У іх не назіраюцца выразнае ядро і вярчальная сіметрыя. Бачная яркасць такіх галактык ствараецца маладымі зоркамі высокай свяцільнасці і зонамі іанізаванага вадароду. Масы няправільных галактык складаюць ад 10^8 да 10^{10} мас Сонца. Памеры гэтых галактык дасягаюць 10 кпк, а свяцільнасці іх не перавышаюць 10^{10} свяцільнасцей Сонца. У такіх галактыках утрымліваецца шмат газу — да 50 % іх агульнай масы.

Найбліжэйшымі да нас яркімі няправільнымі галактыкамі з'яўляюцца Магеланавы Воблакі (Вялікае і Малое). Яны маюць выгляд двух туманнага воблачкаў, якія серабрыста свецяцца на начным небе ў добрае надвор'е. Гэтыя галактыкі размешчаны ў Паўднёвым паўшар'і і таму нябачныя з тэрыторыі Беларусі. Вялікае Магеланава Воблака (рыс. 160), якое мае дыяметр 8,6 кпк, знаходзіцца на адлегласці 50 кпк ад Сонца. Некаторыя астраномы выказваюць меркаванне, што ў Магеланавых Воблаках можна распазнаць зародкі спіральнай структуры.

Лінзападобныя галактыкі знешне (калі бачныя плазам) вельмі падобныя да эліптычных, але маюць сплясканы зорны дыск. Па структуры падобныя да спіральных галактык, але не маюць плоскай складальнай і спіральных галін. Ад спіральных галактык, якія назіраюцца з рабра, лінзападобныя галактыкі адрозніваюцца адсутнасцю паласы цёмнай матэрыі. Нямецкі астраном Карл Шварцшыльд прапанаваў тэорыю, згодна з якой лінзападобныя галактыкі могуць утварацца са спіральных у працэсе «вымятання» газапылавой матэрыі.

2. Адлегласці да галактык. Закон Хабла. Адлегласці да найбліжэйшых галактык вызначаюцца па ацэнках бачных зорных велічынь цэфеід (гл. § 26). Для доўгаперыядычных цэфеід устаноўлена залежнасць «перыяд ваганняў—свяцільнасць». Пры дапамозе гэтай залежнасці вызначаюць абсалютную зорную велічыню па працягласці ваганняў бляску: чым карацейшы перыяд ваганняў бляску, тым цэфеіда слабейшая па абсалютнай зорнай велічыні. Адлегласць r вылічваецца па формуле:

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1, \quad (1)$$

дзе m і M — бачная і абсалютная зорныя велічыні.

Для галактык, дзе не выяўлены цэфеіды або іх немагчыма ўбачыць, у якасці індикатараў адлегласцей выкарыстоўваюць самыя яркія зоркі-звышгігanty, новыя і звышновыя зоркі, шаравыя зоркавыя скопішчы.

Адлегласці таксама вызначаюць па формуле (1). Бачную зорную велічыню ацэньваюць з назіранняў, а абсалютную — лічаць вядомай (сярэдняй) для дадзенага класа аб'ектаў. Напрыклад, шаравыя скопішчы, як гэта вынікае з назіранняў, маюць прыкладна аднолькавую абсалютную велічыню.

Адлегласці да далёкіх галактык вызначаюць па іх вуглавых памерах або па бачнай зорнай велічыні, а да вельмі далёкіх галактык — выключна па велічыні чырвонага зрушэння ў іх спектры. **Чырвонае зрушэнне** (z) звычайна вымяраецца адносным змяненнем даўжыні хвалі спектральных ліній:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Яшчэ ў 1912—1914 гг. амерыканскі астраном Веста Слайфер выявіў, што лініі ў спектрах далёкіх галактык зрушаны адносна іх нармальнага месцазнаходжання ў бок чырвонага канца спектра. Гэта азначала, што галактыкі аддаляюцца ад нас са скорасцямі ў сотні кіламетраў за секунду. Пазней Э. Хабл вызначыў адлегласці да некаторых галактык і іх скорасці. З назіранняў вынікала, што чым далей ад нас знаходзіцца галактыка, тым з большай скорасцю яна аддаляецца (графічна дадзеная залежнасць паказана на рысунку 161). Закон, па якім скорасць аддалення галактыкі прапарцыянальна адлегласці да яе, атрымаў

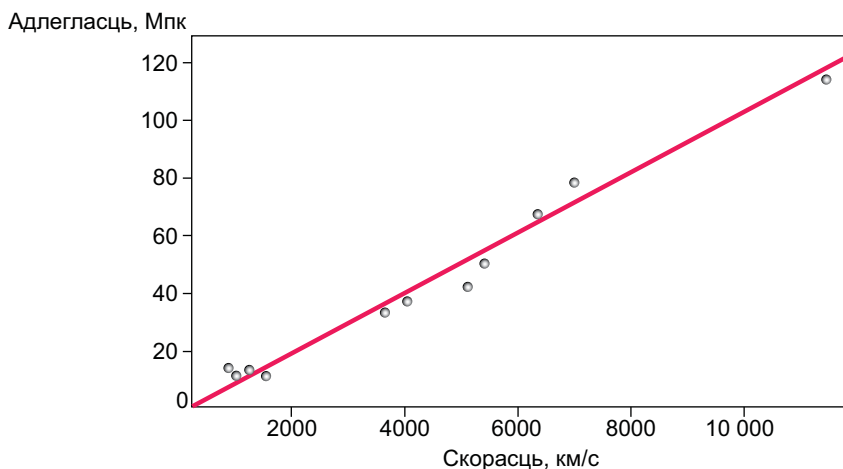


Рис. 161. Залежнасць скорасці аддалення галактык ад адлегласцей да іх

назву **закону Хабла**. Закон Хабла можна сфармуляваць такім чынам: *адноснае павелічэнне даўжынь хваль ліній у спектрах галактык прапарцыянальна адлегласці r да іх, г. зн.*

$$r \sim \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Калі дапусціць, што з'ява чырвонага зрушэння абумоўлена рухам галактык са скорасцю v_r па прамені зроку ў напрамку ад назіральніка, то можна знайсці прамянёвую скорасць галактыкі па вымераным адносным зрушэнні даўжыні хвалі спектральных ліній:

$$v_r = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0}. \quad (2)$$

З улікам закону Хабла залежнасць (2) можна запісаць у выглядзе:

$$v_r = Hr, \quad (3)$$

дзе H — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які называецца **пастаяннай Хабла**. Каэфіцыент Хабла паказвае, на колькі кіламетраў за секунду ўзрастае скорасць галактык з павелічэннем адлегласці да іх на 1 Мпк. Значэнне H пастаянна ўдакладняецца, па розных ацэнках яно знаходзіцца ў межах ад 67,4 да 74 км/(с · Мпк). Пры разліках часцей за ўсё прымаюць $H = 70$ км/(с · Мпк).

Неабходна адзначыць, што закон Хабла выконваецца толькі для далёкіх галактык, адлегласць да якіх перавышае 5—10 Мпк.

3. Масы галактык. Масы галактык можна ацаніць на аснове лінейных скарасцей вярчэння іх знешніх частак. Скорасці вярчэння v вызначаюць шляхам параўнання зрушэнняў спектральных ліній у розных частках галактыкі.

Дапусцім, што ўся маса M галактыкі сканцэнтравана ў яе цэнтры і вярчэнне адбываецца па законах Кеплера. Тады з другога закону Ньютана $F = ma$

($a = \frac{v^2}{R}$ — цэнтраімклівае паскарэнне) з улікам руху цел у полі сіл прыцягнення $F = G \frac{mM}{R^2}$ атрымаем:

$$\frac{GM}{R^2} = \frac{v^2}{R},$$

дзе R — радыус галактыкі. Пасля пераўтварэнняў выраз для знаходжання масы галактыкі атрымае наступны выгляд:

$$M = \frac{Rv^2}{G}. \quad (4)$$

Для галактык, як і для зорак, ёсць пэўная залежнасць паміж масай і свяцільнасцю. Гэта залежнасць выкарыстоўваецца для вылічэння мас галактык. Але ацэнкі мас галактык па іх свяцільнасцях атрымліваліся значна меншымі, чым па вярчэнні галактык. Гэта з'ява была названа «парадоксам скрытай масы». Каб растлумачыць яе, трэба дапусціць, што дэсцьці ў галактыцы знаходзіцца цёмная матэрыя, якая не свеціцца.

У 70-х гг. XX ст. пры дапамозе метадаў рэнтгенаўскай астраноміі быў адкрыты гарачы міжгалактычны газ. Па тэмпературы газу можна ацаніць масу яго скопішчаў. Першыя вынікі рэнтгенаўскіх назіранняў гарачага газу ў групах галактык пацвердзілі прысутнасць у іх скрытай масы, якая не ўваходзіць у склад асобных галактык. Сёння астраномы дастаткова ўпэўненыя робяць вывад: Сусвет у асноўным запоўнены нябачным рэчывам. Яно ўтварае працяглыя гало галактык, запаўняе міжгалактычную прастору, пры гэтым канцэнтруецца ў скопішчах галактык.

Спектральныя назіранні, праведзеныя з выкарыстаннем касмічнага тэлескопа Хабла і буйных сучасных наземных тэлескопаў, пацвердзілі наяўнасць вялікіх мас (каля 50 млн мас Сонца) несвятлівага рэчыва ў ядрах шэрага галактык.

4. Галактыкі з актыўнымі ядрамі. У большасці галактык можна вылучыць яркую цэнтральную частку — ядро (рыс. 162). Гэта вобласць адрозніваецца



Рыс. 162. Ядры галактык змяшчаюць масіўныя чорныя дзіры.
Фатаграфія атрымана касмічным тэлескопам Хабла



Рыс. 163. Ядро галактыкі выкідвае газавыя струмені — джэты

500 тыс. гадоў). Маса ядзерка складае прыблізна 13 млн сонечных мас, шчыльнасць — каля 1500 сонечных мас на 1 пк^3 , г. зн. у 20 тыс. разоў большая, чым каля Сонца. Ядзерка паводзіць сябе такім чынам, быццам гэта самастойнае ўтварэнне, «укладзенае» ў галактыку.

Радыёдаследаванні нашай Галактыкі паказалі, што ў яе цэнтры таксама ёсць ядзерка памерам прыкладна ў 6 пк.

У ядрах некаторых галактык мае месца каласальнае выдзяленне энергіі, якое нельга растлумачыць выпраменьваннем ці выбухамі звычайных зорак. Такія галактыкі атрымалі назву **галактык з актыўнымі ядрамі**.

Формы праўлення актыўнасці ядзер галактык розныя. Гэта можа быць вялікая магутнасць выпраменьвання ў інфрачырвонай, аптычнай ці рэнтгенаўскай частцы спектра, прычым яна мяняецца за параўнальна невялікі час (некалькі гадоў, месяцаў і нават дзён). У некаторых выпадках назіраецца хуткі рух газу ў ядрах (са скарасцямі парадку 1000 км/с). Часам газ утварае доўгія прамалінейныя газавыя струмені — **джэты** (рыс. 163).

Найбольш праўдападобная гіпотэза для тлумачэння актыўнасці ядзер дапускае наяўнасць звышмасіўнай чорнай дзіры (10^6 — 10^9 мас Сонца) у цэнтры галактыкі.

5. Узаемадзеючыя галактыкі. Размешчаныя блізка адна да адной галактыкі часам бываюць звязаны паміж сабой паласой матэрыі, што свеціцца. Часта гэтыя блакітнаватыя палосы з’яўляюцца працягам спіральных галін. Палосы складаюцца з гарачых маладых зорак. Нярэдка галактыкі агорнуты агульным «зорным туманам», тады іх называюць **узаемадзеючымі**.

У большасці выпадкаў асаблівае формы узаемадзеючых галактык тлумачацца ўзбуральнымі прыліўнымі сіламі, якія дзейнічаюць на зоркі адной галактыкі з боку другой. Многія даследчыкі лічаць, што ўзаемадзеючыя галактыкі збліжаюцца, а назіранні ў сучасныя буйныя тэлескопы паказваюць, што сярод такіх галактык

вялікай зоркавай шчыльнасцю, якая дасягае 10^6 — 10^8 пк^{-3} . Але, нягледзячы на гэта, сутыкненні ядзер і зорак у гэтай зоне не адбываюцца.

Даследаванні апошніх гадоў паказалі, што ядро — не проста больш шчыльнае месца галактыкі: у самым цэнтры яго можна выявіць яшчэ адно ўшчыльненне — ядзерка. Так, пры назіранні ядра туманнасці Андромеды (яго памеры каля 100 пк) удалося вылучыць яркае ядзерка папярочнікам 1—14 пк. Яно верціцца як цвёрдае цела (з перыядам абарачэння

вельмі шмат такіх, якія сутыкаюцца. Нават наша Галактыка з'яўляецца ўзаемадзеючай. У цяперашні час яна паглынае адну карлікавую галактыку, якая знаходзіцца на процілеглым ад нас баку галактычнага дыска. Праз некалькі мільярдаў гадоў наша Галактыка «праглыне» Магеланавы Воблакі, а праз 4,5 млрд гадоў сутыкнецца з туманнасцю Андромеды (М 31) (рыс. 164). Але пры гэтым імавернасць таго, што будуць сутыкацца асобныя зоркі, вельмі малая, паколькі яны аддалены адна ад адной на адлегласці, у сотні мільёнаў разоў большыя за іх дыяметр.

Найбліжэй да нас знаходзіцца пара буйных галактык NGC 4038 і NGC 4039 у сузор'і Крукча, якія сутыкаюцца (рыс. 165). Гэта ўзаемадзеючая сістэма аддалена на 63 млн светлавых гадоў. Пад уплывам сіл прыцягнення ў галактык з'явіліся доўгія «антэны», якія складаюцца з газу і зорак, таму іх часта называюць «антэннымі» галактыкамі. Гэтыя ўтварэнні ўзніклі ў выніку сутыкнення зорных сістэм. Астраномы адкрылі ў «антэнных» галактыках больш за тысячу зоркавых скопішчаў, якія ўтварыліся нядаўна. У кожным з іх утрымліваецца да мільёна зорак. Узрост скопішчаў не перавышае 100 млн гадоў. Яны ўтварыліся пад уздзеяннем прыліўных сіл, узбуджаных збліжэннем двох сістэм.

6. Квазары. У пачатку 60-х гг. XX ст. па радыёвыпраменьваннях былі выяўлены аб'екты, падобныя да актыўных ядзер галактык, — **квазары**. Слова «квazar» утворана ад словазлучэння «квазізорныя радыёкрыніцы», г. зн. падобныя да радыёвыпраменьваючых зорак. Спектры квазараў маюць яркія эмісійныя лініі, моцна зрушаныя ў чырвоны бок, як у далёкіх галактык. Адлегласці, вызначаныя па чырвоным зрушэнні, аказаліся большымі за 5 млрд светлавых гадоў. На фатаграфіях квазары выглядаюць вельмі яркімі ў параўнанні з аддаленымі галактыкамі і ў радыёдыяпазоне выпраменьваюць гэтак жа магутна, як блізкія радыёкрыніцы.



Рыс. 164. Так, магчыма, будзе выглядаць на небе туманнасць Андромеды праз некалькі мільярдаў гадоў



Рыс. 165. Галактыкі NGC 4038 і NGC 4039. Чырвоным колерам свецацца газапылавая воблакі, якія падаюць на чорныя дзіры ў ядрах галактык, блакітным — маладыя гарачыя зоркі, якія нараджаюцца з-за ўзбурэнняў газапылавых мас

Прырода актыўнасці радыёвыпраменьвання квазараў пакуль дакладна не вызначана, але з пэўнай перакананасцю можна сказаць наступнае:

- 1) квазары — самыя далёкія аб'екты, якія назіраюцца ў Сусвеце;
- 2) значная частка квазараў — гэта ядры далёкіх галактык, якія знаходзяцца ў стане вельмі высокай актыўнасці;

3) квазары — самыя магутныя з вядомых у прыродзе крыніц бачнага і інфрачырвонага выпраменьванняў, г. зн. гэта касмічныя аб'екты з каласальнай паверхневай яркасцю выпраменьвання.

Вывучэнне вялікай колькасці квазараў пры дапамозе касмічнага тэлескопа Хабла ў 1995 г. прывяло вучоных да высновы, што недалёкія квазары (з чырвоным зрушэннем $z = 0,5$) звязаны з узаемадзеючымі эліптычнымі галактыкамі. Шмат якія квазары знаходзяцца ў цэнтрах падобных зорных сістэм. Гэта пацвярджае меркаванне, што квазары з'яўляюцца масіўнымі чорнымі дзірамі ў цэнтрах галактык, на якія адбываецца падзенне рэчыва.



Галоўныя вывады

1. Галактыкі — гіганцкія гравітацыйна звязаныя сістэмы зорак і міжзоркавага рэчыва, якія знаходзяцца па-за нашай Галактыкай.
2. Свет галактык надзвычай разнастайны. Паводле знешняга выгляду і структуры галактыкі класіфікуюцца на асноўныя тыпы: эліптычныя, спіральныя, няправільныя і лінзападобныя.
3. Спектральныя лініі ў спектрах далёкіх галактык прыметна зрушаны ў бок чырвонага канца спектра.
4. Адноснае павелічэнне даўжынь хваль ліній у спектрах галактык прапарцыянальна адлегласці да іх (закон Хабла).
5. Пастаянная Хабла — каэфіцыент прапарцыянальнасці паміж скорасцю аддалення пазагалактычных аб'ектаў і адлегласцю да іх, які ў разліках прымаецца роўным $70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$.
6. Квазары — квазізорныя аб'екты — самыя магутныя па электрамагнітным выпраменьванні аб'екты ў Сусвеце, якія лічацца актыўнымі ядрамі далёкіх галактык.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Ахарактарызуйце тыпы галактык па класіфікацыі Э. Хабла. Чым адрозніваюцца эліптычныя і няправільныя галактыкі ад спіральных? Да якога тыпу адносіцца наша Галактыка?
2. Сфармулюйце і растлумачце закон Хабла.

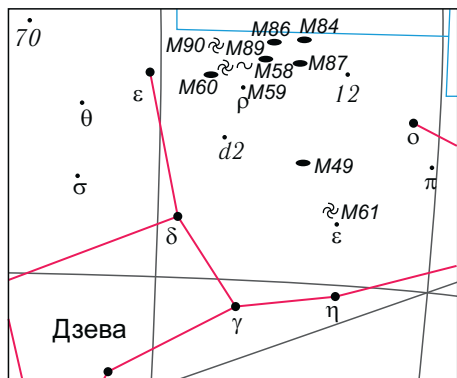
3. Як ацэньваюць масы галактык?
4. На якой адлегласці знаходзіцца галактыка, калі скорасць яе аддалення роўна 20 000 км/с?
5. Колькі часу трэба будзе чакаць адказу на радыётэлеграму, адпраўленую да галактыкі Андромеды, адлегласць да якой 0,69 Мпк?
6. Якая адлегласць да галактыкі, калі ў ёй вынайджена новая зорка, бачная зорная велічыня якой 18^m , а абсалютная зорная велічыня -7^m ?
7. Вызначце лінейны дыяметр галактыкі тыпу E0, калі яе вуглавы дыяметр роўны $\rho = 1'40''$, а лінія H α ($\lambda_0 = 656,3$ нм) у яе спектры мае даўжыню хвалі $\lambda = 667,8$ нм.

§ 30. Расшыральны Сусвет

1. Прасторавае размеркаванне галактык. Галактыкі, як і зоркі, утвараюць групы і скопішчы. Вядома каля 7000 скопішчаў галактык. Каля 50 бліжэйшых галактык, з якіх найбольш масіўныя — наша Галактыка і туманнасць Андромеды, утвараюць сістэму галактык памерамі ў некалькі соцень кілапарсекаў, якая атрымала назву **Мясцовай групы галактык**.

Больш буйныя сістэмы галактык групуюцца ў **скопішчы галактык**. Яны ўтрымліваюць да тысячы галактык, і іх памер складае некалькі мегапарсекаў. Бліжэйшае скопішча галактык памерам прыблізна 5 Мпк знаходзіцца ў напрамку сузор'я Дзевы на адлегласці каля 20 Мпк (рыс. 166). У яго склад уваходзяць гіганцкія эліптычныя і спіральныя галактыкі, напрыклад радыёгалактыка Дзева А, спіральная галактыка «Самбрэра» (рыс. 167) і інш.

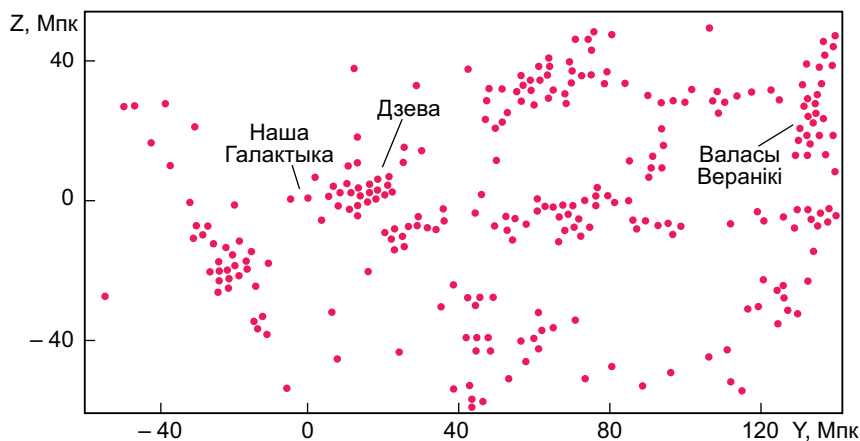
Найбольш аддаленае скопішча галактык, да якога вызначана адлегласць (5200 Мпк), знаходзіцца ў сузор'і Валасы Веранікі. Толькі пры дапамозе самых буйных тэлескопаў можна адрозніць яго найярчэйшыя галактыкі.



Рыс. 166. Скопішча галактык
у сузор'і Дзевы



Рыс. 167. Галактыка «Самбрэра»



Рыс. 168. Ячэйкавае размеркаванне галактык у прасторы
(у сячэнні, якое праходзіць праз скопішча ў сузор’і Валасы Веранікі)

Комплексы скопішчаў галактык памерамі 30—60 Мпк, якія ўтрымліваюць дзясяткі скопішчаў, называюцца **звышскопішчамі галактык**. Скопішча галактык у сузор’і Дзевы з’яўляецца цэнтральным згусткам у звышскопішчы галактык, у якое ўваходзіць і наша Мясцовая група галактык. Агульная колькасць галактык нашага звышскопішча, за выключэннем карлікавых, — каля 2000, а памер — каля 60 Мпк. Пакуль выяўлена каля 50 звышскопішчаў. Скопішчаў больш высокага рангу не выяўлена.

Звышскопішчы і скопішчы галактык утвараюць у прасторы валакнопадобныя структуры, якія нагадваюць сабой ячэйкі ці пчаліныя соты (рыс. 168). У «валокнах» знаходзяцца скопішчы, а на перасячэнні «сот» — звышскопішчы галактык. Памеры пустот «ячэек» складаюць каля 100—150 Мпк, таўшчыня «валокнаў» — каля 10 Мпк. Сярэдняя шчыльнасць рэчыва ў «валокнах» — парадку 10^{-24} кг/м³. Буйнамаштабная структура Сусвету мае ячэйста-сотовы выгляд. Сярэдняя шчыльнасць святлівага рэчыва ў маштабах больш за 300 Мпк роўна $3 \cdot 10^{-27}$ кг/м³. Гэта і ёсць сярэдняе значэнне шчыльнасці святлівага рэчыва ў даступнай назіранню частцы Сусвету, г. зн. у вялікіх маштабах Сусвет у сярэднім аднародны.

2. Расшырэнне Сусвету. Сукупнасць назіраемых галактык усіх тыпаў і іх скопішчаў, міжгалактычнага асяроддзя ўтварае Сусвет.

Адна з найважнейшых уласцівасцей Сусвету — яго пастаяннае расшырэнне, «разлёт» скопішчаў галактык, аб чым сведчыць чырвонае зрушэнне ў спектрах галактык. Сусвет знаходзіцца ў стане прыблізна аднароднага і ізатропна-

га расшырэння. Аднароднасць азначае аднолькавасць усіх уласцівасцей матэрыі ўсюды ў прасторы, а ізатрапія — аднолькавасць гэтых уласцівасцей у любым напрамку. Аднароднасць сведчыць аб адсутнасці вылучаных абласцей прасторы, а ізатрапія — аб адсутнасці вылучанага напрамку. Дапушчэнні аб аднароднасці і ізатрапіі Сусвету называюць **касмалагічнымі прынцыпамі**.

Гіпотэзу аб расшырэнні Сусвету на падставе агульнай тэорыі прыцягнення А. Эйнштэйна і строгіх разлікаў прапанаваў у 1922 г. расійскі вучоны А. А. Фрыдман. Разлікі паказалі, што Сусвет не можа быць стацыянарным; у залежнасці ад сярэдняй шчыльнасці рэчыва ў Сусвеце ён павінен або расшырацца, або сціскацца. Нестацыянарная мадэль Сусвету ўсталявалася ў навуцы толькі пасля таго, як Э. Хабл выявіў разбеганне галактык (гл. закон Хабла ў § 29).

З разлікаў Фрыдмана вынікалі 3 магчымых вынікі: Сусвет і яго прастора расшыраюцца з цягам часу; Сусвет праз пэўны час пачне сціскацца; у Сусвеце чаргуюцца праз вялікія прамежкі часу цыклы сціскання і расшырэння. Узнікае пытанне: які з трох варыянтаў рэалізуецца ў нашым Сусвеце? Адказаць на яго трэба будзе назіральнай астраноміі, якая павінна ацаніць сучасную сярэднюю шчыльнасць рэчыва ў Сусвеце і ўдакладніць значэнне пастаяннай Хабла. Чаму важна ўдакладненне гэтых дзвюх пастаянных велічынь?

Пры стварэнні мадэлі расшыральнага Сусвету было паказана, што існуе некаторае значэнне крытычнай шчыльнасці $\rho_{\text{кр}}$ Сусвету, якое вызначаецца па формуле

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

дзе G — гравітацыйная пастаянная, H — пастаянная Хабла. Разлікі паводле гэтай формулы паказваюць, што $\rho_{\text{кр}} = 10^{-26}$ кг/м³. Па сучасных ацэнках, шчыльнасць рэчыва Сусвету блізкая да крытычнага значэння: яна альбо крыху большая, альбо крыху меншая (не вырашана канчаткова пытанне аб уліку «скрытай масы»). Калі фактычная сярэдняя шчыльнасць рэчыва ў Сусвеце большая за крытычную, то ў будучым расшырэнне Сусвету павінна змяніцца яго сцісканнем. Калі сярэдняя шчыльнасць рэчыва ў Сусвеце меншая за крытычную, то расшырэнне будзе працягвацца. У канцы XX ст. пры вывучэнні звышновых зорак тыпу Ia (аб гэтых зорках гл. Атлас) было выяўлена паскоранае расшырэнне Сусвету.

Пастаянная Хабла дае магчымасць ацаніць прамежак часу, на працягу якога доўжыцца працэс расшырэння Сусвету. Вызначана, што ён не меншы за 10 млрд і не большы за 19 млрд гадоў. Найбольш імавернае значэнне сярэдняга ўзросту Сусвету — каля 15 млрд гадоў. Гэта велічыня не супярэчыць ацэнкам узросту найбольш старых зорак.

3. Мадэль гарачага Сусвету. У аснове сучасных астранамічных уяўленняў аб эвалюцыі Сусвету ляжыць **мадэль гарачага Сусвету**. У адпаведнасці з ёй на ранніх стадыях расшырэння Сусвет характарызаваўся не толькі высокай шчыльнасцю рэчыва, але і яго высокай тэмпературай. Гіпотэзу «гарачага Сусвету» прапанаваў Жорж Леметр і Г. А. Гамаў. Яна атрымала назву тэорыі Вялікага выбуху.

Паводле гэтай тэорыі дапускаецца, што Сусвет узнік у выніку выбуху са стану з вельмі высокай шчыльнасцю матэрыі, якая мела велізарную энергію. Гэты пачатковы стан матэрыі называецца **сінгулярнасцю** — кропкавы аб'ём з бясконца вялікай шчыльнасцю. Расшырэнне Сусвету нельга разглядаць як разлёт матэрыі ў навакольную пустату, паколькі навакольнай пустаты не было. Сусвет — гэта ўсё, што існуе. Рэчыва Сусвету з самага пачатку аднародна запаўняла ўсю бязмежную прастору. І хоць ціск быў вялізны, ён не ствараў расшыральнай сілы, паколькі быў усюды аднолькавы. Прычыны пачатку расшырэння Сусвету да канца не вядомы. Па меры яго расшырэння тэмпература падала ад вельмі высокай да вельмі нізкай, што і забяспечыла спрыяльныя ўмовы для ўтварэння зорак і галактык.

На падставе мадэлей Фрыдмана была распрацавана паэтапная фізічная карціна эвалюцыі рэчыва пачынаючы з моманту выбуху (рыс. 169). Крыху большым праз тры мінуцы пасля выбуху фарміраванне ранняга Сусвету скончылася і пачаўся працэс злучэння пратонаў і нейтронаў у састаўныя ядры. Потым амаль 500 тыс. гадоў доўжылася павольнае астыванне. Калі тэмпература Сусвету пачла паменшылася прыблізна да 3 тыс. градусаў, ядры вадароду і гелію ўжо маглі захопліваць свабодныя электроны і ператварацца ў нейтральныя атамы. Праз мільён гадоў пасля пачатку расшырэння надышла эра рэчыва, калі з гарачай вадародна-геліевай плазмы з малой прымессю іншых ядзер пачала развівацца разнастайнасць сучаснага свету.

Неаднароднасці ў Сусвеце, з якіх у далейшым узніклі ўсе структурныя ўтварэнні, зарадзіліся ў выглядзе мізэрных выпадковых адхіленняў (флуктуацый), а потым узмацніліся ў эпоху, калі іанізаваны газ у Сусвеце пачаў ператварацца ў нейтральны, г. зн. калі выпраменьванне «адарвалася» ад рэчыва.

Пасля таго як рэчыва зрабілася празрыстым для электрамагнітнага выпраменьвання, у дзеянне ўступілі гравітацыйныя сілы. Яны пачалі пераважаць над усімі іншымі ўзаемадзеяннямі паміж масамі практычна нейтральнага рэчыва, якое складала асноўную частку матэрыі Сусвету. Гравітацыйныя сілы стварылі галактыкі, зоркі і планеты.

Які лёс Сусвету? Існуе дзве тэарэтычныя мадэлі будучыні Сусвету — закрытая і адкрытая.

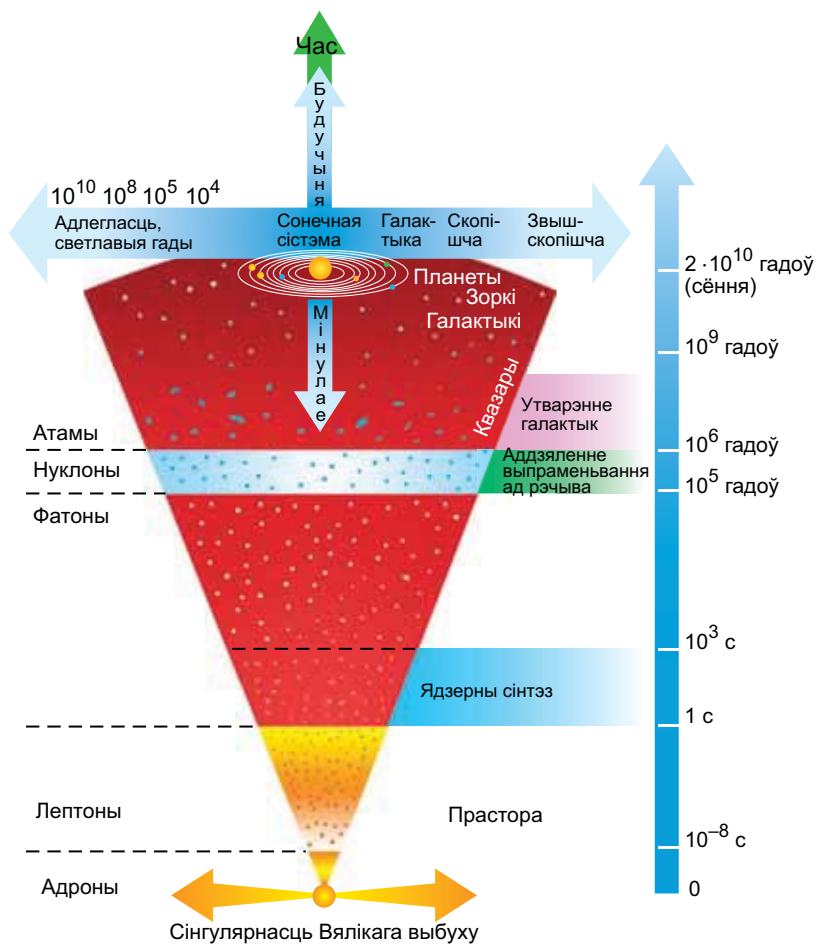


Рис. 169. Схема развіцця Сусвету ад Вялікага выбуху да нашага часу

Закрытая мадэль дапускае, што Сусвет можа быць прадстаўлены як грандыёзная закрытая сістэма, якая зведвае мноства эвалюцыйных цыклаў. Цыкл расшырэння змяняецца цыклам сціскання да вяртання ў сінгулярны стан, потым новы выбух і г. д. Поўны цыкл расшырэння і сціскання Сусвету складае прыблізна 100 млрд гадоў. Кожны раз, вяртаючыся да сінгулярнасці, Сусвет губляе «памяць» пра мінулы стан і можа зноў «нарадзіцца» з зусім новым наборам фізічных канстант.

У **адкрытых** мадэлях Сусвету разглядаюцца розныя варыянты яго «цеплавой смерці». Дапускаецца, што ўжо праз 10^{14} гадоў шмат якія зоркі астынуць



і гэта ў далейшым прывядзе да адрыву планет ад сваіх зорак, а тыя, у сваю чаргу, пачнуць пакідаць галактыкі. Потым адбудзецца калапс цэнтральных частак галактык з утварэннем чорных дзір, і тым самым галактыкі спыняць сваё існаванне.



Галоўныя вывады

1. У ахопленай астранамічнымі назіраннямі частцы Сусвету існуюць мільярды галактык. У прасторы галактыкі размеркаваны неаднародна, яны ўтвараюць групы, скопішчы і звышскопішчы галактык.
2. Асноўная ўласцівасць Сусвету — яго расшырэнне.
3. На сучасным этапе развіцця навукі разглядаецца мадэль эвалюцыйнага Сусвету, які з цягам часу змяняе сваю структуру і ўласцівасці.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. Апішыце прасторавае размеркаванне галактык у Сусвеце.
2. Як тлумачыцца чырвонае зрушэнне і аб чым яно сведчыць?
3. У чым сутнасць тэорыі расшыральнага Сусвету?
4. Да якіх высноў аб стацыянарнасці Сусвету прыйшоў А. А. Фрыдман?
5. Што такое крытычная шчыльнасць Сусвету? Як крытычная шчыльнасць узаемазвязана з расшырэннем і сцісканнем Сусвету?
6. Апішыце мадэль гарачага Сусвету.
7. Што разумеюць пад закрытай і адкрытай мадэлямі Сусвету?

§ 31. Жыццё і розум у Сусвеце

1. Антропны прынцып і праблемы існавання разумных цывілізацый.

Сутнасць **антропнага прынцыпу** заключаецца ў тым, што з'яўленне жыцця, розуму ёсць неад'емная частка Сусвету, натуральны вынік яго эвалюцыі. Наш Сусвет надзвычай прыстасаваны да ўзнікнення і развіцця ў ім жыцця. Так, з бясконцай разнастайнасці пачатковых умоў і значэнняў фізічных пастаянных, якія, магчыма, узніклі ў раннім Сусвеце, рэалізаваліся толькі прыдатныя для існавання разумнага жыцця.

Прывядзём некалькі прыкладаў.

1. Мы жывём у прасторы трох вымярэнняў. Але толькі ў такой прасторы магчымы ўстойлівыя планетныя рухі (гравітацыйнае ўзаемадзеянне).

2. Калі б гравітацыйная пастаянная была ў некалькі разоў большая, то працягласць жыцця Сонца як устойлівага гарачага плазменнага шара вымяралася б некалькімі дзясяткамі мільёнаў гадоў.

3. Калі б маса электрона была ў 3 разы большая за сучасную, то час жыцця пратона быў бы малым. Пры ўзаемадзеянні пратона з электронам протон распадаўся б на нейтрон і нейтрына. Тады зоркі і галактыкі складаліся б з нейтронаў, а больш складаных форм не існавала б.

4. Калі б сярэдняя шчыльнасць рэчыва ў Сусвеце была значна меншая, то сілы інерцыі (разлёту) пераважалі б над сіламі прыцягнення. Таму не паспелі б утварыцца зоркі і галактыкі.

І гэты ілюстрацыйны рад можна прадоўжыць. Такім чынам, выснова адна: наш Сусвет уяўляе сабой звязанае адзінае цэлае, узгодненую сістэму, надзвычай прыстасаваную да ўзнікнення жыцця. Іншыя сусветы з іншымі фізічнымі параметрамі развіваліся б, як адзначыў савецкі касмолаг А. Л. Зяльманаў, без сведак.

2. Пошукі жыцця ў Сонечнай сістэме. Цікава, да іншых форм жыцця ў Сонечнай сістэме не давала спакою чалавецтву з даўніх часоў. Калісьці людзі думалі, што населены ўсе планеты і нават Месяц. Але чым больш даследчыкі даведваліся аб планетах, тым менш аптымістычнымі рабіліся іх прагнозы. У выніку галоўнымі «прэтэндэнтамі» засталіся толькі Венера і Марс. Аднак вывучэнне паверхні Венеры паказала, што нішто жывое не можа выжыць на гэтай планеце. Тады ўсе надзеі пачалі звязваць з самай загадкавай планетай — Марсам.

Галоўная мэта палётаў аўтаматычных арбітальна-пасадачных станцый «Вікінг» да Марса заключалася ў пошуку жыцця на гэтай планеце. Было выканана некалькі складаных біялагічных эксперыментаў. У працэсе аналізу марсіянскага грунту не было выяўлена ніякіх слядоў арганічных злучэнняў — прадуктаў жыццядзейнасці мікраарганізмаў. Для параўнання: пры такіх жа пробах антарктычнага грунту ўдалося знайсці значную колькасць выпянёвых арганічных злучэнняў.

У 1976 г. станцыя «Вікінг» перадала на Зямлю фатаграфію загадкавага аб'екта (з вобласці Сідонія) памерам каля паўтара кіламетра, які назвалі «галавой сфінкса» (рыс. 170). Была прапанавана гіпотэза, што гэта архітэктурнае збудаванне старажытнай цывілізацыі. Але



Рыс. 170. Фатаграфія «галавы сфінкса» на Марсе, атрыманая ў 1976 г.



Рыс. 171. Фатаграфія «галавы сфінкса», атрыманая з лепшым распазнаваннем у 2001 г.

даследчыкі Марса заявілі: гэта прыродны аб'ект. Спрэчкі не сціхалі да 2001 г., пакуль касмічны апарат «Марс Глобал Сурвеер» не перадаў на Зямлю больш падрабязны здымак гэтага аб'екта (рыс. 171). На новым відарысе добра бачна, што «галава сфінкса» — прыродная структура.

У той час як пошукі жыцця на Марсе зайшлі ў тупік, касмічны апарат «Галілео», які вывучаў сістэму Юпітэра, перадаў паведамленне аб тым, што на адным з вялікіх спадарожнікаў — Еўропе — выяўлены акіяны цёплай вады, які знаходзіцца пад ледзяным панцырам.

Паверхня Еўропы пакрыта маладым вадзяным лёдам, ушпіляным расколінамі і «хаосамі» (гл. рыс. 79). Аналіз атрыманых

у розны час відарысаў паказаў, што лёд крыху зрушваецца (падобную карціну можна назіраць на зямных палярных морах у час вясенняга раставання лёду). Зыходзячы з памераў і геаметрыі ледзяных расколін, вучоныя выказалі меркаванне, што на спадарожніку Еўропа тонкі ледзяны слой закрывае ваду ці расталы лёд. Праўдападобнай прычынай з'яўлення такіх структур можа быць дзеянне гідратэрмальных крыніц (гейзераў). Такім чынам, калі на Еўропе ёсць цёплая вада, то ёсць умовы для існавання і якіх-небудзь форм жыцця.

Міжпланетная станцыя «Касіні» правяла аналіз актыўных вывяржэнняў з падпаверхневага вадкага акіяна спадарожніка Сатурна Энцэлад і выявіла складаныя арганічныя малекулы.

3. Пошукі жыцця ў Галактыцы. Сучасная навука дае азначэнне **пазазямным цывілізацыям** як гіпатэтычным грамадствам разумных істот, якія могуць узнікаць і існаваць па-за Зямлёй.

Для ацэнкі колькасці пазазямных цывілізацый у Галактыцы амерыканскі радыёастраном Фрэнсіс Дрэйк прапанаваў наступную формулу:

$$N = R \cdot f \cdot n \cdot k \cdot d \cdot q \cdot L,$$

дзе N — колькасць пазазямных цывілізацый у Галактыцы; R — скорасць утварэння зорак у Галактыцы, усярэдненая па ўсім часе яе існавання (каля 10 зорак за год); f — доля зорак, якія маюць планетныя сістэмы; n — сярэдняя колькасць планет, якія ўваходзяць у планетныя сістэмы і экалагічна прыдатныя для жыцця;

k — доля планет, на якіх сапраўды ўзнікла жыццё; d — доля планет, на якіх пасля ўзнікнення жыцця развіліся яго разумныя формы; q — доля планет, на якіх разумнае жыццё дасягнула фазы, якая забяспечвае магчымасць сувязі з іншымі светамі, цывілізацыямі; L — сярэдняя працягласць існавання такіх пазазямных (касмічных, тэхнічных) цывілізацый.

У формуле Дрэйка ўсе велічыні, акрамя першай, маюць вельмі неканкрэтны характар і вызначаюцца на аснове экспертных ацэнак вучоных. Таму ствараецца значная нявызначанасць у ацэнцы агульнай велічыні N . Адны падлікі паказваюць, што цяпер усяго толькі некалькі геападобных цывілізацый Галактыкі (у якой 10^{11} зорак) гатовы да кантакту з намі. Паводле іншых, больш аптымістычных, — такіх цывілізацый можа быць значна больш. Як адзін з аргументаў на карысць таго, што пазазямныя цывілізацыі — з'ява вельмі рэдкая, прыводзіцца адсутнасць бачных праяў іх дзейнасці.

Першыя работы па пошуку сігналаў пазазямных цывілізацый правёў у 1960 г. Фрэнсіс Дрэйк. Ён даследаваў радыёвыпраменьванне найбліжэйшых зорак (τ Кіта і ϵ Эрыдана) на хвалі 21 см. Штучныя сігналы выявіць не ўдалося, але эра пошукаў сігналаў пазазямных цывілізацый была адкрыта. У наш час касмічная прастора праслухоўваецца адначасова на шматлікіх частотах. Прынятыя радыётэлескопамі сігналы апрацоўваюцца камп'ютарамі.

Паралельна вядзецца работа па паведамленні пазазямным цывілізацыям інфармацыі аб зямной цывілізацыі. У 1974 г. з радыёастранамічнай абсерваторыі ў Арэсіба ў бок шаравога скопішча М 31 (сузор'е Геркулеса), размешчанага на адлегласці 24 тыс. светлавых гадоў ад Зямлі, было накіравана пасланне, якое змяшчала закадзіраваны тэкст аб жыцці і цывілізацыі на Зямлі. Інфармацыйныя паведамленні (пластінкі з нанесенымі рысункамі, відэадыскі з запісамі відарысаў, гукаў і чалавечага маўлення на розных мовах) не раз змяшчаліся на касмічныя апараты, траекторыі якіх выходзілі за межы Сонечнай сістэмы (рис. 172).



Рис. 172. Таблічка з пасланнем, адрасаваным прадстаўнікам пазазямных цывілізацый; справа ўнізе відарыс АМС «Піянер-10»

У апошні час сярод вучоных і філосафаў усё больш умацоўваецца думка, што чалавецтва адзінокае калі не ва ўсім Сусвеце, то ва ўсякім выпадку ў нашай Галактыцы. З гэтага вынікае найважнейшая выснова аб значэнні, каштоўнасці і ўнікальнасці нашай цывілізацыі. Чалавецтва, такім чынам, у велізарнай ступені адказнае не толькі за нашу планету, але і за Сусвет у цэлым.



Галоўныя вывады

1. Разумнае жыццё ў Сусвеце з'яўляецца вынікам яго фундаментальных уласцівасцей — у гэтым заключаецца сутнасць антропнага прынцыпу. Гэты прынцып паставіў на навуковую аснову пытанне: чаму наш свет мае такую будову, якую мы назіраем?
2. У Сонечнай сістэме на нябесных целах, акрамя Зямлі, пакуль не выяўлена жыццё.
3. Пошук паазямных цывілізацый пакуль не прывёў да станоўчых вынікаў.
4. На чалавецтве ляжыць велізарная адказнасць за захаванне жыцця і розуму на Зямлі і ў Сусвеце ў цэлым.



Кантрольныя пытанні і заданні

1. У чым сутнасць антропнага прынцыпу?
2. На якіх планетах Сонечнай сістэмы вучоныя дапускаюць існаванне жыцця?
3. Як можна ацаніць колькасць паазямных цывілізацый у нашай Галактыцы?
4. Чаму формула Ф. Дрэйка дае значную нявызначанасць у ацэнцы колькасці цывілізацый у Галактыцы, гатовых да кантакту з намі?
5. Якім чынам чалавецтва спрабуе наладзіць кантакты з паазямнымі цывілізацыямі?

Дадатак

Асноўныя астранамічныя сімвалы

Знакі задыяка	Планеты
♈ Авен, а таксама пункт вясенняга раўнадзенства	☉ Сонца
♉ Цялец	☾ Месяц
♊ Блізняты	☿ Меркурый
♋ Рак	♀ Венера
♌ Леў	♁ Зямля
♍ Дзева	♂ Марс
♎ Шалі, а таксама пункт асенняга раўнадзенства	♃ Юпітэр
♏ Скарпіён	♄ Сатурн
♐ Стралец	♅ Уран
♑ Казярог	♆ Нептун
♒ Вадалей	Карлікавая планета ♇ Плутон
♓ Рыбы	

Іншыя абазначэнні

Ω Узыходзячы вузел месяцавай арбіты	♁ Сыходны вузел месяцавай арбіты
-------------------------------------	----------------------------------

Грэчаскі алфавіт

Абрыс літары	Назва літары	Абрыс літары	Назва літары	Абрыс літары	Назва літары	Абрыс літары	Назва літары
α	альфа	η	эта	ν	ню	τ	таў
β	бэта	θ	тэта	ξ	ксі	υ	іпсілён
γ	гама	ι	ёта	ο	амікрён	φ	фі
δ	дэльта	κ	капа	π	пі	χ	хі
ε	эпсілён	λ	ламбада	ρ	ро	ψ	псі
ζ	дзэта	μ	мю	σ	сіigma	ω	амэга

Дынамічныя характарыстыкі планет

Параметры	Планеты							
	Меркурый	Венера	Зямля	Марс	Юпітэр	Сатурн	Уран	Нептун
Сярэдняя адлегласць да Сонца, а. адз.	0,387	0,723	1,000	1,524	5,204	9,59	19,23	30,1
Сідэрычны перыяд абарачэння	88,0 сут	224,7 сут	365,26 сут	687,0 сут	11,86 года	29,46 года	84,0 года	164,8 года
Сінадчны перыяд абарачэння, сут	115,9	583,9	—	779,9	398,9	378,1	369,1	367,5
Эксцэнтрысітэт арбіты	0,206	0,0067	0,0167	0,0934	0,0488	0,0557	0,0441	0,0112
Нахіл арбіты да экліптыкі	7°00′	3°24′	—	1°51′	1°18′	2°29′	0°46′	1°46′

Фізічныя характарыстыкі планет

Параметры	Планеты							
	Меркурый	Венера	Зямля	Марс	Юпітэр	Сатурн	Уран	Нептун
Маса (у параўнанні з масай Зямлі)	0,055	0,815	1,000	0,107	318	95,2	14,5	17,1
Радыус, км	2440	6052	6378	3396	71 490	60 268	25 560	24 764
Сярэдняя шчыльнасць, ×10 ³ кг/м ³	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,27	1,6
Перыяд вярчэння	58,6 сут	243 сут	23 г 56 мін	24 г 37 мін	9 г 56 мін	10 г 33 мін	17 г 14 мін	15 г 58 мін
Нахіл экватара да плоскасці	7°	3°24′	23°4′	25°12′	3°07′	26°45′	82°	28°
Колькасць вядомых спадарожнікаў	—	—	1	2	79	82	27	14

Даведачныя даныя аб Зямлі

Параметр	Велічыня
Экватарыяльны радыус, км	6378,140
Палярны радыус, км	6356,755
Сярэдні радыус, км	6371,004
Паверхня Зямлі, км ²	$5,10072 \cdot 10^8$
Паверхня сушы, %	29,2
Водная паверхня, %	70,8
Маса Зямлі, кг	$5,973 \cdot 10^{24}$
Маса вады ва ўсіх яе формах, кг	$1,43 \cdot 10^{21}$
Маса атмасферы Зямлі, кг	$5,158 \cdot 10^{18}$
Лінейная скорасць пункта экватара, м/с	465,12
Сярэдняя скорасць руху Зямлі па арбіце, км/с	29,783
Паскарэнне сілы цяжару на Зямлі (на шыраце 45°), м/с ²	9,806

Даведачныя даныя аб Месяцы

Параметр	Велічыня
Дыяметр, км	3476
Мінімальная адлегласць ад Зямлі, км	356 410
Максімальная адлегласць ад Зямлі, км	406 740
Сярэдняя адлегласць ад Зямлі, км	384 400
Сярэдні эксцэнтрысітэт арбіты	0,0549
Сярэдні нахіл плоскасці арбіты да экліптыкі	5°08'43"
Перыяд абарачэння па арбіце, сут	27,32
Сярэдняя перыядычнасць змены фаз Месяца, сут	29,53
Сярэдні вуглавы радыус Месяца	15'33"
Маса, кг	$7,35 \cdot 10^{22}$
Сярэдняя шчыльнасць, $\times 10^3$ кг/м ³	3,346

Канец табліцы

Параметр	Велічыня
Паскарэнне сілы цяжару, м/с^2	1,62
Другая касмічная скорасць, км/с	2,38
Максімальная тэмпература днём, $^{\circ}\text{C}$	+127
Мінімальная тэмпература ноччу, $^{\circ}\text{C}$	–173
Асветленасць ад поўнага Месяца на зямной паверхні, лк	0,25
Асветленасць ад поўнай Зямлі на месяцавай паверхні, лк	16
Сярэдняя адбівальная здольнасць ад усёй месяцавай паверхні, %	12,44
Адбівальная здольнасць мацерыковых абласцей, %	13,44
Адбівальная здольнасць марскіх абласцей, %	7,30
Агульная плошча паверхні Месяца, км^2	$3,8 \cdot 10^7$
Плошча мораў на ўсёй паверхні, %	16,9
Плошча мораў на бачным баку, %	31,2
Плошча паверхні, якую можна назіраць у выніку лібрацыі, %	59

Даведачныя даныя аб Сонцы

Параметр	Велічыня
Паралакс Сонца пры сярэдняй адлегласці Зямлі ад Сонца, "	8,794
Сярэдняя адлегласць да Сонца, км	149 600 000
Дыяметр Сонца, км	1 392 000
Бачны вуглавый дыяметр (сярэдні)	31'59"
Маса, кг	$1,989 \cdot 10^{30}$
Сярэдняя шчыльнасць, кг/м^3	1409
Паскарэнне сілы цяжару на паверхні, м/с^2	274,0
Другая касмічная скорасць, км/с	617,7
Сідэрычны перыяд вярчэння пункта экватара, сут	25,380

Канец табліцы

Параметр	Велічыня
Сінадычны перыяд вярчэння пункта экватара, сут	27,275
Нахіл экватара да экліптыкі	$7^{\circ}15'$
Свяцільнасць Сонца, Дж/с	$3,83 \cdot 10^{26}$
Эфектыўная тэмпература фотасферы Сонца, К	5772
Абсалютная фотавізуальная зорная велічыня	$+4,96^m$
Скорасць руху Сонца адносна навакольных зорак, км/с	19,4
Апекс руху Сонца	$\alpha = 270^{\circ} = 18 \text{ г } 00 \text{ мін}$ $\delta = +30^{\circ}$
Адлегласць Сонца ад цэнтра Галактыкі, кпк	8
Скорасць руху Сонца вакол цэнтра Галактыкі, км/с	220
Перыяд абарачэння Сонца вакол цэнтра Галактыкі, млн гадоў	Каля 225—250
Сярэдняя працягласць поўнага цыкла сонечнай актыўнасці, гадоў	22,11

Фізічныя характарыстыкі некаторых яркіх зорак

Абазначэнне ў сузор'і	Назва зоркі	Экватарыяльныя каардынаты		Бляск, <i>m</i>	Спектр	Тэмпе- ратура, К	Пара- лакс	Уласны рух	Прамяная скорасць, км/с
		α	δ						
α Андромеды	Альферац**	00 г 08 мін	+29°05'	2,06	B8	12 940	0,034"	0,213"	-10,1
α Эрыдана	Ахернар	01 г 38 мін	-57°14'	0,44	B3	15 000	0,023"	0,095"	+16,0
α Авена	Гамаль	02 г 07 мін	+23°28'	2,01	K2	4590	0,049"	0,239"	-14,2
α Малой Мядзведзіцы	Палярная*	02 г 32 мін	+89°16'	1,97	F7	5820	0,007"	0,045"	-16,4
α Персея	Мірфак	03 г 24 мін	+49°52'	1,79	F5	6600	0,006"	0,035"	-2,0
α Цяльца	Альдэбаран*	04 г 36 мін	+16°31'	0,85	K5	3875	0,050"	0,199"	+53,8
β Арыёна	Рыгель**	05 г 15 мін	-8°12'	0,12	B8	12 130	0,004"	0,001"	+20,7
α Возніка	Капэла	05 г 17 мін	+46°00'	0,08	G1	5700	0,077"	0,434"	+30,2
γ Арыёна	Белатрыкс	05 г 25 мін	+6°21'	1,64	B2	22 000	0,013"	0,017"	+18,0
α Арыёна	Бэтэльгейзе*	05 г 55 мін	+7°24'	0,2—1,2	M1	3600	0,006"	0,029"	+22,0
α Кіля	Канопус	06 г 24 мін	-52°42'	-0,72	F0	7350	0,010"	0,031"	+21,0
α Вялікага Пса	Сірыус**	06 г 45 мін	-16°43'	-1,46	A1	9940	0,379"	1,339"	-5,5
α Блізнят	Кастор**	07 г 35 мін	+31°53'	1,96	A1	10 300	0,066"	0,254"	-1,0
α Малого Пса	Працён	07 г 39 мін	+5°13'	0,37	F5	6600	0,286"	1,258"	-4,1
β Блізнят	Палукс**	07 г 45 мін	+28°02'	1,14	K0	4865	0,097"	0,627"	+3,3
α Гідры	Альфард	09 г 28 мін	-8°40'	1,97	K3	4400	0,018"	0,036"	-4,0

Канец таблиці

Абазначэнне у сузор'і	Назва зоркі	Экватарыяльныя каардынаты		Бляск, <i>m</i>	Спектр	Тэмпе- ратура, К	Пара- лакс	Уласны рух	Прамянівая скорасць, км/с
		α	δ						
α Ільва	Рэгул**	10 г 08 мін	+11°58'	1,35	B7	10 300	0,042"	0,249"	+5,9
α Вялікай Мядзведзіцы	Дубхе**	11 г 04 мін	+61°45'	1,79	K0	4685	0,026"	0,140"	—8,7
β Ільва	Дэнебола	11 г 49 мін	+14°34'	2,14	A3	8500	0,090"	0,512"	—0,2
ξ Вялікай Мядзведзіцы	Міцар**	13 г 24 мін	+54°56'	2,23	A2	9330	0,042"	0,123"	—9,0
α Дзевы	Спіка	13 г 25 мін	—11°10'	1,04	B1	22 400	0,012"	0,052"	+1,0
α Валопаса	Арктур	14 г 16 мін	+19°11'	—0,05	K1	4300	0,089"	2,278"	—5,3
α Цэнтаўра	Таліман	14 г 39 мін	—60°50'	—0,01	G2	5750	0,747"	3,710"	—21,6
α Паўночнай Кароны	Гема*	15 г 34 мін	+26°43'	2,21	A0	9750	0,044"	0,150"	+1,7
α Скарпіёна	Антарэс**	16 г 29 мін	—26°26'	0,96	M1	3400	0,005"	0,025"	—3,4
α Змеяноса	Рас Альхаг	17 г 35 мін	+12°34'	2,07	A5	7906	0,067"	0,246"	+12,6
α Ліры	Вега	18 г 37 мін	+38°47'	0,03	A0	9550	0,128"	0,350"	—20,6
α Арла	Альтаір**	19 г 51 мін	+8°52'	0,77	A7	8000	0,195"	0,660"	—26,1
α Лебедзя	Дэнеб	20 г 41 мін	+45°17'	1,25	A2	8500	0,002"	0,003"	—4,5
α Паўднёвай Рыбы	Фамальгаўт	22 г 58 мін	—29°37'	1,16	A3	8500	0,131"	0,368"	+6,5

* — пераменная зорка; ** — падвойная зорка.

Геаграфічныя каардынаты гарадоў Рэспублікі Беларусь

Горад	Шырата (пн. ш.)	Даўгата (у. д.)		Гадзінны пояс
Мінск	53°54′	27°33′	1 г 50 мін 18 с	2
Баранавічы	53°09′	26°02′	1 г 44 мін 6 с	2
Бабруйск	53°08′	29°15′	1 г 57 мін	2
Барысаў	54°14′	28°31′	1 г 54 мін 6 с	2
Брэст	52°06′	23°42′	1 г 34 мін 48 с	2
Віцебск	55°12′	30°11′	2 г 0 мін 48 с	2
Гомель	52°25′	31°00′	2 г 4 мін 6 с	2
Гродна	53°41′	23°50′	1 г 35 мін 18 с	2
Ліда	53°53′	25°17′	1 г 41 мін 6 с	2
Магілёў	53°54′	30°19′	2 г 1 мін 18 с	2
Мазыр	52°08′	29°16′	1 г 57 мін 6 с	2
Маладзечна	54°18′	26°50′	1 г 47 мін 18 с	2
Наваполацк	55°32′	28°37′	1 г 54 мін 30 с	2
Орша	54°30′	30°26′	2 г 1 мін 42 с	2
Пінск	52°07′	26°07′	1 г 44 мін 30 с	2
Полацк	55°29′	28°47′	1 г 55 мін 6 с	2
Рэчыца	52°21′	30°24′	2 г 0 мін 10 с	2
Светлагорск	52°39′	29°43′	1 г 58 мін 54 с	2
Слуцк	53°01′	27°33′	1 г 50 мін 12 с	2
Салігорск	52°47′	27°33′	1 г 50 мін 12 с	2

Адказы і рашэнні

§ 4. **Задача 6.** Адказ: $\varphi = \delta_z$; $\varphi = 38^\circ 47'$.

Задача 7. Рашэнне: $h_b = (90^\circ - \varphi) + \delta$; $h_n = \delta - (90^\circ - \varphi)$. Адкуль атрымаем, што $\delta = \frac{h_b + h_n}{2}$; $\varphi = 90^\circ - \frac{h_b - h_n}{2}$.

Адказ: для Паўночнага паўшар'я — $\delta = +23,5^\circ$, $\varphi = 76,5^\circ$ пн. ш., 22 чэрвеня; для Паўднёвага паўшар'я — $\delta = -23,5^\circ$, $\varphi = 76,5^\circ$ пд. ш., 22 снежня.

§ 5. **Задача 9.** Адказ: $\Delta\lambda = 0$ г 25 мін 56 с, прыкладна 26 мін.

Задача 10. Рашэнне: $\lambda = T_m - T_0$; $\lambda = 12$ г 00 мін 00 с – 14 г 13 мін 46 с = –2 г 13 мін 46 с = 2 г 13 мін 46 с з. д.

Адказ: $\lambda = 2$ г 13 м 46 с.

Задача 11. Рашэнне: $\varphi = 90^\circ - h + \delta$; 22 чэрвеня δ Сонца роўна $\varepsilon = 23^\circ 26'$; $\lambda = T_m - T_0$.

Адказ: $\varphi = 51^\circ 16'$ пн. ш., $\lambda = 3$ г 20 мін у. д.

§ 6. **Задача 5.** Адказ: $S = 1,09$ года, або 399 сутак.

Задача 6. Адказ: працягласць павінна быць роўна двум сідэрычным перыядам абарачэння Зямлі.

§ 8. **Задача 3.** Адказ: у 3 разы.

Задача 5. Адказ: год на Марсе роўны 1,8 зямнога года.

Задача 6. Рашэнне: $q = a(1 - e)$; $Q = a(1 + e)$; $d_{\min} = q - Q_3$. Для Зямлі: $Q_3 = a_3(1 + e_3)$; $a_3 = 1$ а. адз.; $e_3 = 0,0167$.

Адказ: $q = 1,97$ а. адз.; $Q = 2,84$ а. адз.; $d_{\min} = 0,953$ а. адз.

§ 9. **Задача 5.** Адказ: 14,6 масы Зямлі.

Задача 6. Адказ: 1410 кг/м^3 .

Задача 7. Рашэнне: $g_M = \frac{GM}{R^2}$.

Адказ: $g_M = 3,70 \text{ м/с}^2$.

Задача 8. Рашэнне: $g_M = \frac{GM}{R^2}$; $g_M = 3,70 \text{ м/с}^2$; $\frac{g_3}{g_M} = 2,65$ раза.

Вага: $P_3 = mg_3$; $P_M = mg_M$. Тады $\frac{P_3}{P_M} = \frac{g_3}{g_M}$.

Адказ: $\frac{P_3}{P_M} = 2,64$ раза.

§ 10. **Задача 7.** Адказ: 22 млн км.

Задача 8. Адказ: 1740 км.

Задача 9. Рашэнне: $\sin \varphi = \frac{a_M}{a_3}$.

Адказ: $a_M = 0,47$ а. адз.

Задача 10. Рашэнне: $\rho = \frac{d}{2}$; $D = \frac{d}{\rho} \cdot R_3$.

Адказ: $D = 4900$ км.

§ 11. **Задача 4.** Адказ: 10 г 34 мін.

Задача 5. Адказ: 1,68 км/с і 2,37 км/с.

Задача 6. Рашэнне: параўнаем рух спадарожніка з рухам Месяца

$$\frac{T^2}{T_M^2} = \frac{(R_3 + h)^3}{a_M^3}; \quad h = \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_M}\right)^2 a_M^3} - R_3. \quad T = 1 \text{ сут (перыяд абарачэння ШСЗ)}.$$

Адказ: $h = 36\,000$ км.

Задача 7. Рашэнне: $t_M = \frac{T}{2}$; $\frac{T^2}{T_3^2} = \frac{a^3}{a_3^3}$; $a = \frac{a_3 + a_M}{2}$; $t_M = \frac{a\sqrt{a}}{2}$;
 $t_M = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a_3 + a_M}{2}\right)^{\frac{3}{2}}.$

Адказ: $t_M = 0,71$ года, або 258 сутак.

§ 17. **Задача 7.** Адказ: 2,8".

Задача 8. Адказ: 6,7 см.

Задача 9. Рашэнне: бачнае павелічэнне тэлескопа вызначаюць па формуле $G = \frac{F_{аб}}{F_{ак}}$. Відарыс, які дае аб'ектыў, будзе разглядацца непасрэдна вокам. Акулярам будзе вока назіральніка з адлегласцю найлепшага зроку $a = 25$ см.

Адказ: $G = 12$ разоў.

§ 18. **Задача 6.** Адказ: 8530 К.

Задача 7. Адказ: +11,3 км/с.

Задача 8. Рашэнне: $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$.

Адказ: $v \approx 137$ км/с.

§ 19. **Задача 7.** Рашэнне: сонечнае выпраменьванне спадае адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці. Сонечная пастаянная для Марса будзе ў $1,524^2$ раза меншай.

Адказ: сонечная пастаянная для Марса = 590 Вт/м².

Задача 8. Рашэнне: $T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$.

Адказ: $T \approx 5273$ К.

§ 22. **Задача 6.** Адказ: 0,005".

Задача 7. Адказ: 7,9 пк, або 25,9 св. г.

Задача 8. Рашэнне: $M = m + 5 - 5 \lg r$.

Адказ: $r = 1000$ пк.

Задача 9. Рашэнне: сумарная асветленасць, ствараемая ўсімі зоркамі скопішча $E_{100} = 100E_1$. Сумарная зорная велічыня скопішча:

$$m_{100} = m_1 - 2,5 \lg \frac{E_{100}}{E_1} = m_1 - 2,5 \lg \frac{100E_1}{E_1}.$$

Адказ: $m_{100} = 3^m$.

§ 23. **Задача 4.** Адказ: у 625 разоў.

Задача 5. Адказ: 7,7 радыуса Сонца.

Задача 6. Рашэнне: $M = m + 5 + 5 \lg \pi$; $\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{M_{\odot} - M}$; $L_{\odot} = 1$;
 $M_{\odot} = 4,8^m$.

Адказ: $L \approx 50L_{\odot}$.

Задача 7. Рашэнне: $r = \frac{1}{\pi}$; $M = m + 5 + 5 \lg \pi$; $L = 2,512^{4,8 - M}$.

$$R = \sqrt{L} \cdot \left(\frac{T_{\odot}}{T} \right)^2.$$

Адказ: $r = 25$ пк; $L = 150L_{\odot}$; $R = 2,2R_{\odot}$.

§ 25. **Задача 7.** Рашэнне: $v = \sqrt{2gR}$, $g = G \frac{M}{R^2}$, $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$.

Адказ: $v = 1,8 \cdot 10^6$ м/с.

§ 26. **Задача 8.** Адказ: сярэдняя шчыльнасць $5 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

Задача 9. Адказ: радыус Шварцшыльда роўны 8,9 км.

Задача 10. Рашэнне: $\lg \frac{L}{L_{\odot}} = 0,4(M_{\odot} - M)$, $M = m_{\odot} + 5 - 5 \lg r$.

Адказ: $r = 1,5$ пк.

Задача 11. Рашэнне: $M = -1,43 - 2,81 \lg P$; $M = m + 5 - 5 \lg r$;

$\lg r = 1 + 0,2(m - M)$.

Адказ: $r = 434$ пк.

§ 27. **Задача 8.** Адказ: 23 разы.

Задача 9. Адказ: 57 км/с.

Задача 10. Рашэнне: $v_l = 4,74 \frac{\mu}{\pi}$; $v = \sqrt{v_l^2 + v_r^2}$.

Адказ: $v = 24,6$ км/с.

§ 29. **Задача 4.** Адказ: 286 Мпк.

Задача 5. Адказ: 4,5 млн гадоў.

Задача 6. Адказ: 1 Мпк.

Задача 7. Рашэнне: $v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} c$, $v = H \cdot r$, $D = r \cdot \sin p$.

Адказ: $D = 36,4$ кпк.

Змест

Прадмова	3
Раздзел I. Уводзіны	
§ 1. Прадмет астраноміі	4
Раздзел II. Асновы практычнай астраноміі	
§ 2. Зорнае неба	12
§ 3. Нябесныя каардынаты	19
§ 4. Вызначэнне геаграфічнай шыраты	23
§ 5. Вымярэнне часу. Вызначэнне геаграфічнай даўгаты	26
Раздзел III. Рух нябесных цел	
§ 6. Геліяцэнтрычная сістэма свету Каперніка	36
§ 7. Бачны рух Сонца і Месяца. Зацьменні	42
§ 8. Законы Кеплера	50
§ 9. Закон сусветнага прыцягнення Ньютана	53
§ 10. Вызначэнне памераў нябесных цел і адлегласцей да іх у Сонечнай сістэме	58
§ 11. Рух касмічных апаратаў	63
Раздзел IV. Параўнальная планеталогія	
§ 12. Агульныя характарыстыкі планет. Паходжанне Сонечнай сістэмы	69
§ 13. Планеты зямной групы	73
§ 14. Планеты-гіганты	82
§ 15. Месяц. Спадарожнікі планет	89
§ 16. Карлікавыя планеты і малыя целы Сонечнай сістэмы	98
Раздзел V. Метады даследавання нябесных цел	
§ 17. Даследаванне электрамагнітнага выпраменьвання нябесных цел	107
§ 18. Спектральны аналіз у астраноміі	117
Раздзел VI. Сонца — дзённая зорка	
§ 19. Сонца як зорка	124
§ 20. Будова сонечнай атмасферы	129
§ 21. Уплыў Сонца на жыццё Зямлі	134

Раздзел VII. Зоркі

§ 22. Асноўныя характарыстыкі зорак. Свяцільнасць	138
§ 23. Тэмпература і памеры зорак	143
§ 24. Падвойныя зоркі. Маса зорак	146
§ 25. Эвалюцыя зорак	150
§ 26. Нестацыянарныя зоркі	157

Раздзел VIII. Будова і эвалюцыя Сусвету

§ 27. Наша Галактыка	164
§ 28. Міжзоркавае асяроддзе	170
§ 29. Зоркавыя сістэмы — галактыкі	175
§ 30. Расшыральны Сусвет	185
§ 31. Жыццё і розум у Сусвеце	190

Дадатак	195
---------------	-----

Адказы і рашэнні	203
------------------------	-----

(Назва ўстановы адукацыі)

Навучальны год	Імя і прозвішча навучэнца	Стан падручніка пры атрыманні	Адзнака навучэнцу за карыстанне падручнікам
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Вучэбнае выданне

Галуза Іларыён Віктаравіч
Голубеў Уладзімір Аляксандравіч
Шымбалёў Аляксандр Альбертавіч

Астраномія

Падручнік для 11 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання (базавы і павышаны ўзроўні)

Заг. рэдакцыі *Г. А. Бабаева*. Рэдактар *Н. М. Алганава*. Мастацкі рэдактар *В. М. Карповіч*.
Тэхнічнае рэдагаванне і камп'ютарная вёрстка *В. І. Улазніук*. Карэктары *В. С. Казіцкая*,
А. П. Тхір, *Г. В. Алешка*.

Падпісана да друку 08.07.2021. Фармат 70×90¹/₁₆. Папера афсетная.

Друк афсетны. Ум. друк. арк. 15,21 + 0,29 форз.

Ул.-выд. арк. 12,1 + 0,4 форз. Тыраж 10 400 экз. Заказ .

Выдавецкае рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства «Народная асвета»
Міністэрства інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка
друкаваных выданняў № 1/2 ад 08.07.2013.

Пр. Пераможцаў, 11, 220004, Мінск, Рэспубліка Беларусь.

Адкрытае акцыянернае таварыства «Паліграфкамбінат імя Я. Коласа».

Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка
друкаваных выданняў № 2/3 ад 10.09.2018.

Вул. Каржанеўскага, 20, 220024, Мінск, Рэспубліка Беларусь.

Правообладатель Народная асвета