



Математичка гимназија  
Краљице Наталије 37, Београд

---

## Еволуција звезда

---

Матурски рад

Аутор  
Лука С. Марковић

Ментор  
Слободан Спремо

9. мај 2021.



# Садржај

<b>1</b>	<b>Рађање звезда</b>	<b>3</b>
1.1	Увод	3
1.1.1	Велики прасак	3
1.1.2	О јединицама дужине у астрономији	5
1.2	Механизам настанка звезде	6
1.2.1	Молекуларни облак	6
1.2.2	Гравитациони колапс	8
1.2.3	Протозвезда	10
1.2.4	Минимална маса звезде	14
1.2.5	Формирање планета	14
1.2.6	Смеђи патуљци	17
1.2.7	Контракција смеђих патуљака и дегенеративни притисак електрона	18
1.3	Херцшпрунг-Раселов дијаграм	18
1.3.1	Класе звезда	19
1.3.2	Луминозност, привидни и апсолутни сјај звезде	21
1.3.3	Мерење растојања	23
1.3.4	H-R дијаграм	28
<b>2</b>	<b>Живот звезде у главном низу</b>	<b>35</b>
2.1	Ране претпоставке	35
2.2	Келвин-Хелмхолцов механизам	36
2.3	Ханс Бете и теорија нуклеарне фузије	37
2.3.1	$p$ - $p$ процес	38
2.3.2	CNO циклус	41
2.4	Интерни трансфер енергије	43
2.5	Проблем соларних неутрина	45
<b>3</b>	<b>Крај звезде</b>	<b>51</b>
3.1	Еволуција Сунца	52
3.1.1	Основни подаци	52
3.1.2	Еволуција Сунца до данас	54
3.1.3	Будућност Сунца	55

3.1.4	Утицај еволуције Сунца на живот на Земљи . . . . .	65
3.1.5	Еволуција звезда сличних Сунцу . . . . .	69
3.2	Еволуција црвених патуљака . . . . .	70
3.2.1	Нуклеарни процеси у црвеном патуљку . . . . .	72
3.2.2	Живот у околини црвеног патуљка . . . . .	73
3.3	Еволуција масивних звезда . . . . .	75
3.3.1	Заступљеност масивних звезда у космосу . . . . .	75
3.3.2	Рана фаза еволуције . . . . .	76
3.3.3	Промена унутрашње структуре . . . . .	78
3.3.4	Колапс језгра и настанак неутронске звезде . . . . .	79
3.3.5	Супернова . . . . .	80
3.3.6	Настанак црне рупе . . . . .	82
3.3.7	Нуклеосинтеза . . . . .	84
3.3.8	Типови супернова . . . . .	86
3.3.9	Хипернове . . . . .	87
3.3.10	Живот у околини масивних звезда . . . . .	88
3.3.11	Супернове кроз историју . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Звездани остаци</b>	<b>93</b>
4.1	Бели патуљци . . . . .	93
4.1.1	Откриће . . . . .	94
4.1.2	Структура и особине . . . . .	94
4.1.3	Еволуција усамљених белих патуљака . . . . .	96
4.1.4	Еволуција белих патуљака у бинарним системима . . . . .	97
4.2	Неутронске звезде (пулсари) . . . . .	99
4.2.1	Откриће . . . . .	100
4.2.2	Главне особине . . . . .	101
4.2.3	Типови неутронских звезда . . . . .	104
4.2.4	Унутрашња структура . . . . .	105
4.2.5	Еволуција неутронских звезда . . . . .	107
4.3	Црне рупе . . . . .	108
4.3.1	Откриће . . . . .	109
4.3.2	Типови црних рупа . . . . .	112
4.3.3	Структура црних рупа . . . . .	115
4.3.4	Куда воде црне рупе . . . . .	116
4.3.5	Хокингово зрачење . . . . .	118
4.3.6	Прва фотографија . . . . .	119
4.3.7	Отворени проблеми . . . . .	120
<b>5</b>	<b>Кратка повест космоса</b>	<b>123</b>
5.1	Од ”великог праска” до данас . . . . .	123
5.2	Могући сценарији даље еволуције космоса . . . . .	126

5.2.1	"Big Rip" . . . . .	126
5.2.2	"Big Crunch" . . . . .	127
5.2.3	"Big Freeze" . . . . .	127



*Звезде имају животни циклус веома сличан животињама. Звезде се рађају, расту, пролазе кроз различита унутрашња стања и на крају умиру, враћајући материју од које су сачињене како би нове звезде могле да се роде.*

**Ханс Бете** у својој беседи приликом доделе Нобелове награде за физику 1967. године.[\[1\]](#)

When I heard the learn'd astronomer,  
When the proofs, the figures, were ranged in columns before me,  
When I was shown the charts and diagrams, to add, divide, and measure them,  
When I sitting heard the astronomer where he lectured  
With much applause in the lecture-room,  
How soon unaccountable I became tired and sick,  
Till rising and gliding out I wander'd off by myself,  
In the mystical moist night-air, and from time to time,  
Look'd up in perfect silence at the stars.

**Walt Whitman**





**Слика 1:** "Pillars of Creation"[2] представља једну од најзначајнијих и најимпресивнијих фотографија космичког телескопа "Хабл". Реч је о небули "Орао" која се налази на око 7.000 светлосних година од нас. У центру небуле налазе се три "прста" (стуба) колабирајућег гаса и прашине у којима се интензивно стварају нове звезде (отуд потиче и назив фотографије). Плава боја на слици представља кисеоник, црвена сумпор а зелена азот и водоник. Стубови се лагано расипају под дејством интензивног ултраљубичастог зрачења младих звезда које се налазе непосредно изван оквира слике.



# Глава 1

## Рађање звезда

### 1.1 Увод

#### 1.1.1 Велики прасак

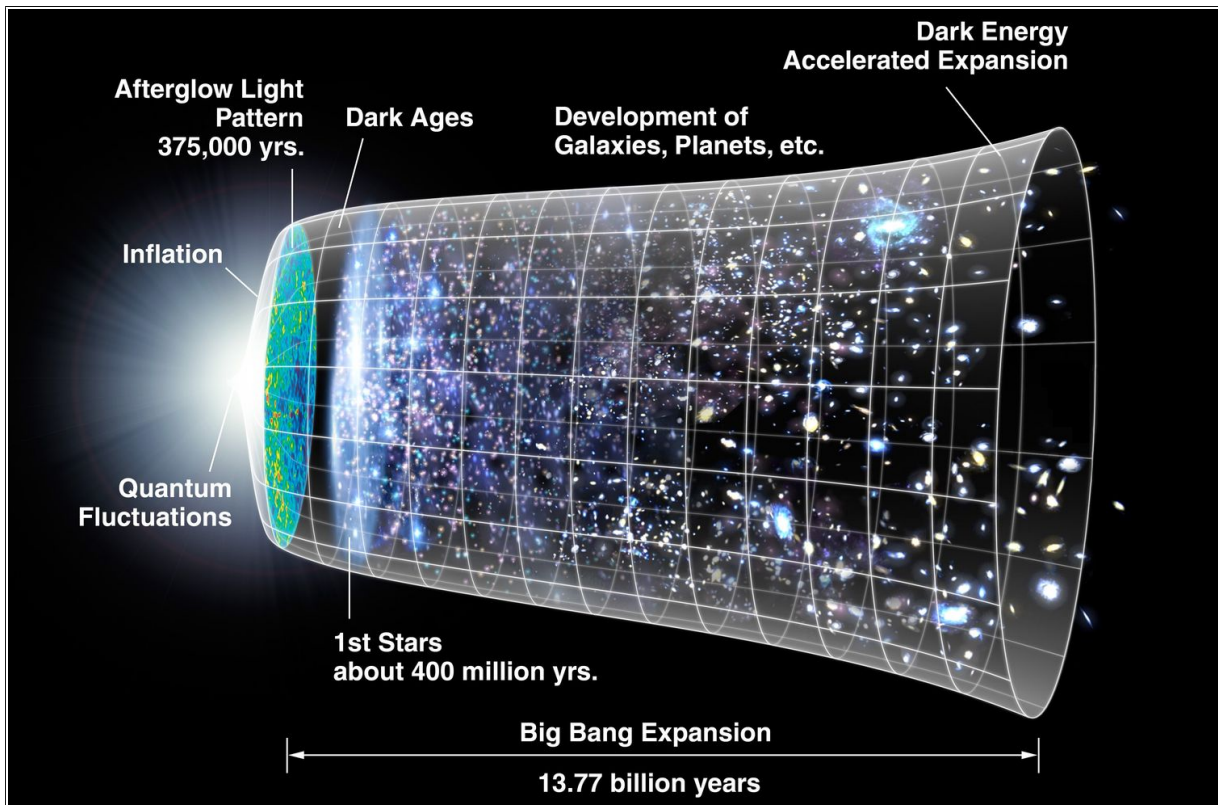
Данас је општеприхваћена теорија да је космос настао у ”великом праску” (енглески: ”Big Bang”) пре 13,7 милијарди година. Одјек те колосалне експлозије чујемо и данас из свих праваца неба, са врло малим варијацијама у интензитету, у облику позадинског микроталасног зрачења које одговара зрачењу црног тела на температури од свега 2,7 келвина. У ”великом праску” створени су простор, време и најједноставнији хемијски елементи: водоник (75%), хелијум (25%) и литијум у занемарљивим количинама. Ови добро познати елементи, међутим, чине само 15% укупне масе космоса. Остатак од 85% чини ”тамна материја” чија природа представља један од највећих нерешених проблема у физици. О тамној материји данас знамо врло мало: не можемо је видети и не знамо ништа о честицама од којих је састављена. Једини начин на који тамна материја реагује са ”обичном” материјом је гравитациона сила. Без те гравитационе силе не може се објаснити формирање и дистрибуција галаксија, галактичких кластера и осталих космичких мегаструктура које уочавамо у космосу.[3] Са друге стране, тамна материја има ограничен утицај на настанак мањих космичких објеката, попут звезда.<sup>1</sup>

Космос је, на самом свом почетку, био хомоген али су мале флукуације изазване квантним феноменима довеле до местимичног повећања густине материје. Те тачке веће концентрације постале су језгра формирања првих великих структура у космосу. Гравитационом контракцијом водоника и хелијума настала је прва генерација галаксија и звезда. Као што ћемо видети у даљем тексту, звезде имају свој почетак, краћи или дужи животни век и крај који подразумева враћање великог дела звездане материје у космос.

Током свог живота звезде генеришу огромну количину енергије али и теже хемијске елементе. Свака наредна генерација звезда садржи одређену количину материје претходне

---

<sup>1</sup>Зато ћемо у даљем тексту тамну материју помињати спорадично.



**Слика 1.1:** Развој космоса од тренутка ”великог праска” па до данас.[4] На самом почетку космоса постојала је веома кратка инфлаторна епоха када се простор ширио брзином већом од брзине светлости. На крају инфлације космос је био  $10^{78}$  пута већи. Период инфлације објашњава зашто је космос изотропан (тј. зашто изгледа мање-више исто у свим правцима) као и порекло космичких мега-структура. Приметимо да се ширење космоса у првих пет милијарди година успоравало да би, након тог периода, ширење постајало све брже.

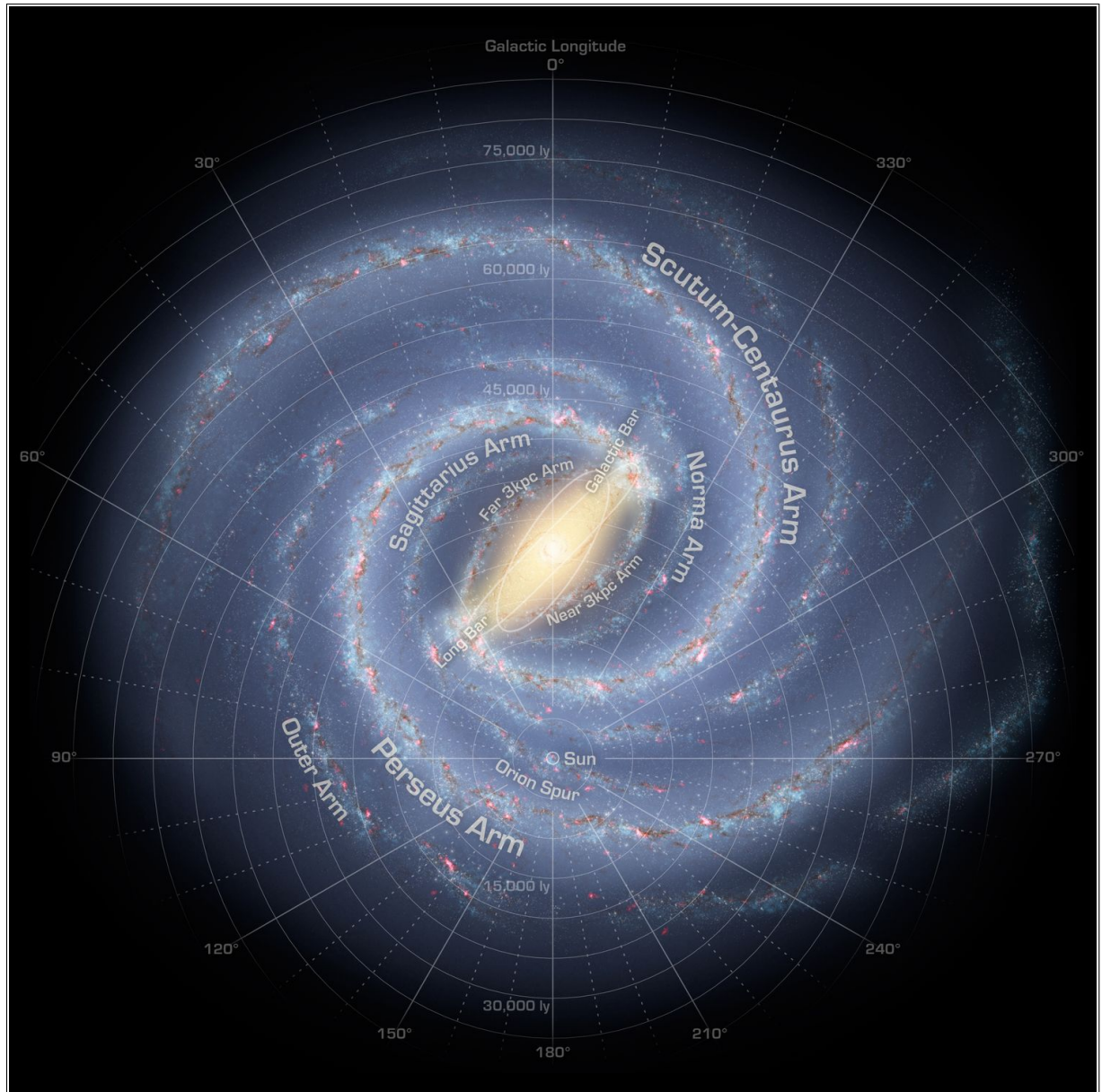
генерације звезда па се повећава и проценат хемијских елемената тежих од водоника и хелијума.<sup>2</sup>

Фузија водоника у хелијум представља основни извор енергије коју звезда емитује током највећег дела животног века. Све док има слободног водоника, постојаће и могућност стварања нових звезда.

Космос се тренутно налази у ”звезданој ери” у којој још увек постоје огромне резерве водоника које омогућавају интензивну продукцију нових звезда. Штавише, сви прорачуни показују да ми живимо у једном крајње специјалном периоду у историји космоса, на самом почетку звезданог доба и да ће оно трајати, по најскромнијим проценама, бар још билион година.<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Све елементе теже од водоника и хелијума у астрофизици називамо ”металима”. Свака звезда има пар процената ових елемената који дефинишу степен њене ”металичности”.

<sup>3</sup>Неко би рекао да ће доба стварања звезда трајати читаву вечност, али није тако. Шта ”вечност” уопште значи? Замислите челичну лопту величине Земљине кугле са обимом од 40.000 километара. Замислите сад да на ту куглу повремено слети врабац да наоштри свој кљун а затим одлети да би се поново вратио након милион година са истом намером. Када врабац, оштрећи свој кљун, ту челичну куглу ”излиже” до величине зрна грашка, тад вечност још увек није ни почела.[6]



**Слика 1.2:** На слици је Млечни пут са два доминантна крака и ”пречком” густо распоређених звезда која их спаја.[5] У нашој галаксији и даље постоји довољно материје за формирање милијарди нових звезда.

Када звезда истроши највећи део водоника, она улази у своју терминалну, много драматичнију фазу. Ова фаза може да траје стотинама милиона година па и дуже али је увек неупоредиво краћа од времена које звезда проведе фузионишући водоник у хелијум.

### 1.1.2 О јединицама дужине у астрономији

Космичка растојања су огромна тако да је њихово изражавање у метрима и километрима могуће али крајње непрактично (те јединице су, једноставно, сувише мале). Зато се у астрономији користе јединице дужине примереније колосалним димензијама космоса:

- Астрономска јединица (енглески: "astronomical unit", скраћено: "AU"): Износи 150 милиона километара и одговара растојању између Земље и Сунца.
- Светлосна година (енглески: "light year", скраћено: "ly"): Представља пут који светлосни зрак пређе кроз вакуум за годину дана. Приближно износи  $9,46 \times 10^{12}$  km, 63.241 AU или 0,3066 парсека.
- Парсек (паралактичка секунда, енглески: "parsec", скраћено: "pc"): Дефинише се као растојање са кога се једна астрономска јединица види под углом од једне лучне секунде. Приближно износи 3,26 светлосних година или 206.000 AU.

## 1.2 Механизам настанка звезде

### 1.2.1 Молекуларни облак

Звезде настају у галаксијама налик на Млечни пут у коме се налази наш Сунчев систем.<sup>4</sup> Илустрације ради, поменимо да је Млечни пут спирална галаксија са пречником између 100 и 120 хиљада светлосних година која предстаља дом за 100 до 400 милијарди активних звезда.[7] Колико је космос огroman најбоље илуструје чињеница да је Млечни пут, приказан на слици 1.2 само једна од пар стотина милијарди галаксија у видљивом делу космоса.<sup>5</sup>

Свака теорија о настанку звезда и пратећег планетарног система (укључујући и Сунчев систем) мора да објасни неке кључне чињенице:[8]

- Све планете крећу се око матичне звезде у истом смеру који се поклапа са смером ротације звезде.
- Планете се крећу по елиптичним путањама чија раван незнатно или нимало не одступа од екваторијалне равни матичне звезде.
- Мале планете углавном су стеновите и густе док су велике планете много веће и сачињене од лаких гасова без чврсте површине.

Свака галаксија састоји се од звезда, њихових остатака и међузвездане материје састављене од гаса и прашине. Та материја је врло ретка у поређењу са густином материје на Земљи и износи између  $10^{-4}$  до  $10^6$  честица по кубном центиметру.[10] Међутим, та вредност је значајно већа у односу на међузвездани а нарочито на интергалактички простор где густина материје може да падне на један атом водоника по кубном метру.[11] Основни елемент међузвездане материје је водоник (70%) а највећи део остатка је хелијум. У траговима постоје и други, тежи елементи које су произвеле и расуле претходне генерације звезда. Тамо где је густина већа формирају се "небуле", "звездана породилишта", места где настају нове звезде. Небуле су због своје густине и величине често непрозирне за видљиву

<sup>4</sup>Постоје звезде које немају своју галаксију (тзв. "rogue stars") које слободно путују кроз интергалактички простор. Такве звезде формирале су се на уобичајени начин али су у неком тренутку избачене из своје матичне галаксије дејством гравитације суседних звезда. Такве звезде такође могу да имају своје планете, укључујући и оне на којима је могуће посотјање живота.

<sup>5</sup>Еволуција галаксија излази из оквира овог рада.



**Слика 1.3:** У горњем десном углу налази се плавичаста небула Орион, део много већег молекуларног облака приказаног на слици. Читав регион покрива простор од 1.300 до 1.600 светлосних година по дубини и неколико стотина светлосних година по ширини. Три најсјајније звезде на левој страни су три лако препознатљиве звезде из појаса истоименог сазвежђа. Небула Орион представља нама најближи регион у коме се интензивно формирају звезде и зато је и даље предмет интензивног проучавања.[9]

светлост па се називају и "тамним небулама".[12] Небула апсорбује и расипа светлост тако да је температура небуле врло ниска (свега десетак степени изнад апсолутне нуле).[11] На тако ниској температури већина атома везана је у молекуле ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $NH_3$  и друге). Зато небуле називамо још и молекуларним облацима.[10]

Велики молекуларни облаци могу да произведу звезде свих величина. Њихова типична густина је око 100 честица по кубном центиметру, пречник око 100 светлосних година а маса око 6 милиона маса Сунца ( $M_{\odot}$ ). Најближи такав облак, небула Орион, приказана на слици 1.3, налази се на око 1.300 светлосних година од нас.[10] Гигантски молекуларни облаци толико су велики да је веома тешко пронаћи репрезентативну фотографију једне од њих. Чак и чувена небула "Орао" са слике 1 представља тек делић комплетног молекуларног облака. Из једног таквог облака могу да настану хиљаде па чак и милиони нових звезда.[11]

Молекуларни облак може да остане у стању хидростатичке равнотеже милијардама година - гравитациона сила која тежи да компримује облак уравнотежена је кинетичком енергијом честица облака, односно притиском које честице генеришу изнутра.[10] Математички се ово може исказати вириалном теоремом<sup>6</sup> која каже да ће молекуларни облак бити стабилан све док је потенцијала енергија гравитације два пута већа од укупне топлотне енергија облака.[14]

<sup>6</sup>Реч "virial" потиче од латинског "vis", што означава силу односно енергију.



**Слика 1.4:** Још један молекуларни облак који се налази у сазвежђу Касиопеје на око 6.000 светлосних година од нас. Ово је место где се рађају нарочито масивне звезде. Комплекс је састављен од три зоне, W3, W4 и W5, које су добиле име по Гарту Вестерхауту (Westerhout) који их је први идентификовао. Зона W3, са три блиставе звезде је у горњем десном углу. Две плавичасто-зелене ”шупљине” у централном делу слике, W4 и W5, представљају зоне у којима се формирају младе звезде под дејством ударних таласа насталих експлозијама супернова. [13]

## 1.2.2 Гравитациони колапс

Ако се маса молекуларног облака повећа изнад тзв. ”Џинсовог лимита”<sup>7</sup>, интерни притисак више није довољан да одржава хидростатичку равнотежу, облак постаје нестабилан и под дејством најмањег поремећаја долази до незаустављивог гравитационог колапса. Колабирајући молекуларни облак мора да буде довољно компактан како би гравитациона сила могла да савлада унутрашњи притисак у облаку (његову укупну топлотну енергију односно кинетичку енергију честица). Другим речима, мора да буде испуњен следећи услов: [15]

$$E_{kin} + E_{grav} < 0 \quad (1.1)$$

Сферни облак масе  $M$  и полупречника  $R$  има гравитациону енергију дату изразом:

$$E_{grav} = \int_0^M \frac{\gamma m}{r} dm = -A \frac{\gamma M^2}{R} \quad (1.2)$$

...где је  $\gamma$  Њутнова гравитациона константа, а  $A$  величина која расте са степеном компресије материје у централном делу колабирајуће зоне. У случају хомогене дистрибуције, која у космосу није опажена, узима се да је  $A = 3/5$ . У пракси се најчешће користи вредност  $A = 1$ .

Укупна топлотна (кинетичка) енергија облака дата је једначином:

$$E_{kin} = \frac{3M}{2\mu m_H} kT \quad (1.3)$$

...где је  $k$  Болцманова константа,  $T$  температура а  $\mu$  фактор који показује колико је пута маса просечне честице молекуларног облака већа од масе водониковог атома  $m_H$ .

Када се једначине (1.2) и (1.3) искомбинују са условом (1.1), добијамо израз за Џинсову масу и Џинсову густину. Изнад тих вредности молекуларни облак колабира под дејством

<sup>7</sup>Реч је о британском физичару Џејмсу Џинсу који је први израчунао поменути лимит.

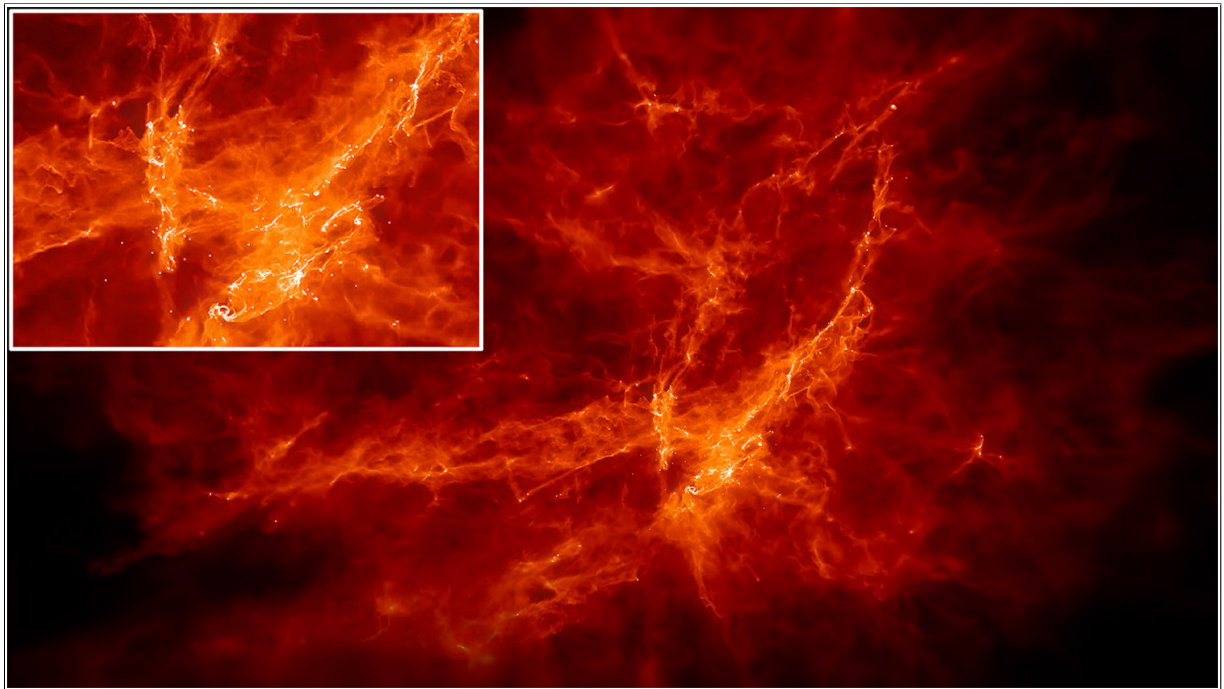
сопствене гравитације:

$$M_{cloud} > M_{Jeans} = \frac{3kTR}{2\gamma\mu m_H} \quad (1.4)$$

$$\rho_{cloud} > \rho_{Jeans} = \frac{3}{4\pi M^2} \left[ \frac{3kT}{2\gamma\mu m_H} \right]^3 \quad (1.5)$$

Џинсов масени лимит (1.4) типично износи неколико хиљада Сунчевих маса.[10, 11]

Густина и маса облака могу да се повећају спајањем мањих облака у већи. Друга могућност је да део молекуларног облака највеће густине брзо колабира у гигантску звезду чија је маса изнад границе масе коју стабилна звезда може да има.<sup>8</sup> У њој настаје интензивна нуклеарна реакција која скоро тренутно разара читаву звезду у процесу налик на експлозију супернове.[17] Ударни талас настао експлозијом масивне звезде доводи до компресије остатка молекуларног облака и стварања услова за настанак нових звезда. Ово објашњава чињеницу да у Млечном путу често видимо велике групе звезда практично идентичне старости[12]. До компресије молекуларних облака може да дође и током судара читавих галаксија.<sup>9</sup>



**Слика 1.5:** Компјутерска симулација колапса молекуларног облака. Иницијалне турбуленције у облаку доводе до стварања филамената, испреплетаних танких струна материје. Тамо где се ови филаменти спајају или укрштају настају језгра агрегације око којих ће се формирати будуће звезде (светле тачке на слици). У горњем левом углу је увеличан централни, најдинамичнији део облака.[18]

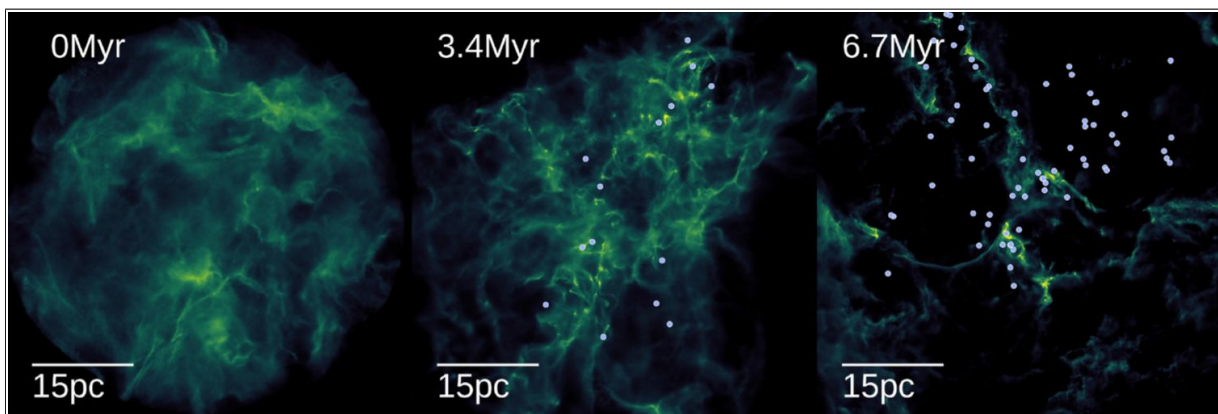
Током гравитационог колапса обично се формира јато нових звезда а њихов број може да варира од десетак па до неколико десетина хиљада.[10] У првим стадијумима колапса

<sup>8</sup>Тачна вредност није прецизно утврђена али вероватно износи око  $150M_{\odot}$ . Постоји неколико звезда масивнијих од  $200M_{\odot}$  али се сматра да су оне настале накнадном фузијом мањих звезда.[16]

<sup>9</sup>Игром случаја, наша галаксија ће се сударити с Андромедом, нама најближом галаксијом, кроз 4,5 милијарди година.

формира се филаментарна (паучинаста) структура приказана на сликама 1.5 и 1.6. Молекуларни облаци нису компактне, хомогене формације и у тренутку када почне гравитациони колапс могу имати најразличитије облике и композиције. Честице унутар колабирајућег молекуларног облака могу да имају произвољне правце и брзине кретања али и поред тога небула има укупан момент импулса који је увек значајно већи од нуле. У изолованом систему момент импулса је константан, тако да је оса ротације небуле јасно дефинисана и њен правац остаје фиксан.

Како се момент инерције небуле смањује услед редукције њене величине, тако се и угаона брзина небуле повећава.[8] Услед све већих центрифугалних сила у молекуларном облаку долази до његовог распада на фрагменте, такозване протозвездане облаке, сваки са својим моментом импулса и осом ротације.[11] Гравитациони колапс много је ефикаснији дуж осе ротације фрагмента него у равни управној на њу због мање центрифугалне силе. Фрагмент више није сферног облика већ почиње да личи на све спљоштенији елипсоид чија се најкраћи пречник покалапа са осом ротације.



**Слика 1.6:** Компјутерска симулација колапса гигантског молекуларног облака током времена.[19] На почетку је уочљива филаментарна структура која на крају резултира распадом на индивидулане фрагменте, заметке будућих звезда (беле тачке на слици). Временска скала дата је у милионима година (Myr) а просторна у парсецима (pc).

Сваки фрагмент наставља да привлачи околни гас и прашину и обично расте док не сакупи довољно материјала за формирање једног комплетног звезданог система. Сажимањем фрагмената потенцијална енергија гравитације конвертује се у топлоту кроз Кевин-Хелмхолцов механизам који је детаљно описан у секцији 2.2. Док је густина фрагмената мала, радијација је врло ефикасан механизам одржавања релативно ниске интерне температуре.[10] Међутим, и поред тога што језгро фрагмента емитује светлост, ми нисмо у стању да је детектујемо јер је језгро и даље окружено непрозирним молекуларним облаком који још увек није колабирао.

### 1.2.3 Протозвезда

Са повећањем густине протозвезданог облака он у свом језгру постаје практично ”непровидан” за радијацију тако да унутрашња температура почиње нагло да расте јер не постоји ефикасан механизам да се језгро охлади. Прашина у протозвезданом облаку преузима доминантну улогу емитујући инфрацрвено зрачење које одговара температури од 60-100



келвина. Захваљујући овом зрачењу које, због веће таласне дужине, лакше заобилази препреке и за које је молекуларни облак транспарентан, у стању смо да посматрамо процес стварања звезда које, иначе, не остављају траг у видљивом делу спектра.[10]

Када температура у језгру достигне 2.000 келвина долази до дисоцијације молекула а затим до јонизације атома водоника и хелијума. Овај процес апсорбује велику количину енергије и смањује унутрашњи притисак. Унутрашњи притисак пада и због тога што је јонизовани материјал прозирнији за радијацију која сада брже напушта језгро. Самим тим сажимање се наставља све док се не успостави нови хидростатички еквилибријум када је језгро довољно топло да својим притиском одржава равнотежу са сопственом гравитационом силом. У овом тренутку процес згушњавања материје је практично завршен а објекат који настаје на крају називамо протозвездом.[10]

Протозвездани систем, и поред интензивног процеса компресије, и даље има колосалне димензије. Типични молекуларни облак је величине  $10^{14}$  km, што значи да је око 10.000 пута већи од величине Сунчевог система. Фрагмент облака који ће формирати једну или неколико блиских протозвезда је величине  $10^{12}$  km и 100 пута је већи од Сунчевог система. Та величина ће пасти на  $10^{10}$  km у тренутку формирања протозвезде што отприлике одговара величини Сунчевог система, при температури језгра од око 10.000 келвина.[11]



**Слика 1.7:** IRAS 20324+4057, протозвезда у врло раној фази еволуције снимљена телескопом "Хабл".[20] Протозвезда се још увек налази у фази интензивног сакупљања материјала из облака који је окружује. Међутим, овај облак брзо еродира под дејством радијације са оближње звезде Лабуд OB2. Протозвезде у овом региону еволуирају у звезде са масом од једне до десет Сунчевих маса. Међутим, у случају брзе ерозије околног облака гаса, резултујућа маса може да буде много мања.

Протозвезда својом гравитацијом и даље привлачи околни материјал из протозвезданог диска, самим тим повећава своју масу и температуру у језгру. Конверзија потенцијалне енергије гравитације у топлоту је сада врло ефикасан процес тако да просечна протозвезда има сјај који је 1.000 пута јачи од сјаја данашњег Сунца. [11] Апсорпција материјала није равномерна. Услед очувања момента импулса и све мањег радијуса, протозвезда сада

ротира много брже стварајући јаку центрифугалну силу која отежава апсорпцију материје која се налази у екваторијалној равни протозвезде. Због тога се у овој равни формира "протопланетарни диск" који временом постаје све тањи и из чије ће се материје родити будуће планете и њихови сателити. На половима ове центрифугалне силе нема тако да протозвезда ефикасно апсорбује материју која пристиже дуж осе ротације. Визуелно интересантно објашњење зашто се све планете налазе приближно у истој равни може се пронаћи и на YouTube каналу "Minute Physics"[21].

Када температура достигне милион келвина, долази до драматичних промена. У језгру протозвезде отпочиње фузија деутеријума.[10] Тај процес описан је једначином (2.5) и представља део ланчане реакције која се одвија и у већ формираним звездама (о  $p$ - $p$  ланчаној реакцији биће речи касније, у секцији 2.3.1).

Овај процес ће успорити колапс али га неће сасвим зауставити. Сјај протозвезде драматично расте али је непостојан и има тенденцију великих промена током кратких временских периода. Такође, на површини звезде уочљиве су честе ерупције које избацују велику количину материје. Формира се јака струја наелектрисаних честица ("стеларни ветар") који се са површине звезде зракасто шири у свим правцима, нарочито у области полова.[12] Ова фаза у развоју протозвезде изражена је код звезда које имају масу сличну маси Сунца и зове се "Т-Tauri", према првом откривеном објекту такве врсте. Код масивнијих звезда ова фаза је много мање изражена или је уопште нема.[23]



**Слика 1.8:** Жућкаста звезда са десне стране представља променљиву звезду типа Т-Таури. Одмах до ње је небула богата прашином позната као "Хиндова променљива небула" (NGC 1555). Интересантно је да и звезда и небула мењају свој сјај али не увек у исто време.[22]

Звезда сада обично постаје видљива за класичне телескопе. Код неких звезда у овој фази стеларни ветар удружен с магнетним пољем у области полова формира густе млазеве материје који путују дуж осе ротације у супротним смеровима. Механизам настанка ових млазева није до краја познат али знамо да они односе са собом део момента импулса и тако делимично смањују брзину ротације звезде. У судару са околним молекуларним облаком млазеви материје производе зоне повишене температуре које емитују светлост. Ове побуђене области небуле називамо "Хербиго-Харо" објектима.[11] Т-Таури звезде могу у овим бурним процесима да изгубе и до 50% своје масе пре него што достигну наредну, стабилнију фазу развоја.[12]

На крају ће температура у језгру достићи 10 милиона келвина а густина око  $150 \text{ g/cm}^3$ .<sup>10</sup> На тој температури водоник у језгру протозвезде је потпуно јонизован на протоне и електроне и налази се у стању плазме. Протони се електростатички одбијају али под условима који владају у центру протозвезде (велика густна материје, висока температура и велика

<sup>10</sup>Илустрације ради, најгушћи хемијски елемент, осмијум, има густину од  $22,6 \text{ g/cm}^3$ .



**Слика 1.9:** Вероватно најпознатија фотографија Хербиго-Харо (HH) објеката. Светла област на левој страни је HH-24 а највећа светла област на супротној страни је HH-26. У средини је небула у чијем је центру Т-Таури звезда HVC-502. Звезда емитује две струје честица које се на слици не виде. На месту где те струје погађају околну тамну небулу настају светли Хербиго-Харо објекти.[24]

кинетичка енергија протона која одговара овако високим температурама) директни судари протона су неизбежни. Тиме почиње прва фаза ланчаног процеса фузије водоника у хелијум коју описује једначина (2.4). У том тренутку протозвезда коначно завршава своју трансформацију у праву звезду.

Настаје нови хидростатички еквилибријум где је гравитациони притисак балансиран енергијом термонуклеарне фузије. Процес је саморегулишући. Ако се интензитет нуклеарне фузије повећа, повећаће се и запремина звезде, притисак у језгру ће опасти, брзина нуклеарне реакције ће се смањити и звезда ће се вратити на своју првобитну величину. Ако интензитет нуклеарне реакције опадне, притисак у језгру ће се смањити што ће довести до компресије звезде, повећања притиска, температуре, интензитета нуклеарне реакције и експанзије звезде. Негативна повратна спрега у стању је да одржава стабилност звезде милијардама година.[8]

Повећана производња енергије у младој звезди довешће и до појачања стеларног ветра који ће околину звезде очистити од трагова још увек слободног гаса и прашине. У околини новонастале звезде остаће само планете и њихови сателити, у разним фазама формирања који круже око нове звезде као и "гомилице" материјала које нису стигле да значајније порасту: комете, астероиди и стеновити фрагменти свих величина, од оних који имају величину зрна песка до оних чији би судар са Земљом могао да збрише читав живот на њој. Ови артефакти остају практично неизмењени још од тренутка свог постања и имају посебан значај у изучавању еволуције звезданих система.[10]

Колико је времена потребно да прође од тренутка када започне колапс молекуларног облака до тренутка када звезда започне фузију водоника у хелијум? Сасвим парадоксално, веће звезде еволуирају много брже и процес не траје дуже од неколико хиљада година. Формирање Сунца, знатно мање звезде, трајало је неколико милиона година. Најспорије еволуи-

рају најмање звезде којима је често потребно и по неколико десетина милиона година да прођу кроз све побројане фазе.[23]

У космосу су веома чести бинарни звездани системи, парови звезда међусобно везаних гравитационом силом. Принцип настанка је исти, с тим да неки системи имају два независна протозвездана облака док неки могу да деле један заједнички.

#### 1.2.4 Минимална маса звезде

Горе описани процес формирања звезде односи се само на фрагменте молекуларних облака који имају довољно велику масу. Температура у језгру протозвезде на крају гравитационог колапса дата је формулом:[15]

$$T_{max} = 10^7 \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (1.6)$$

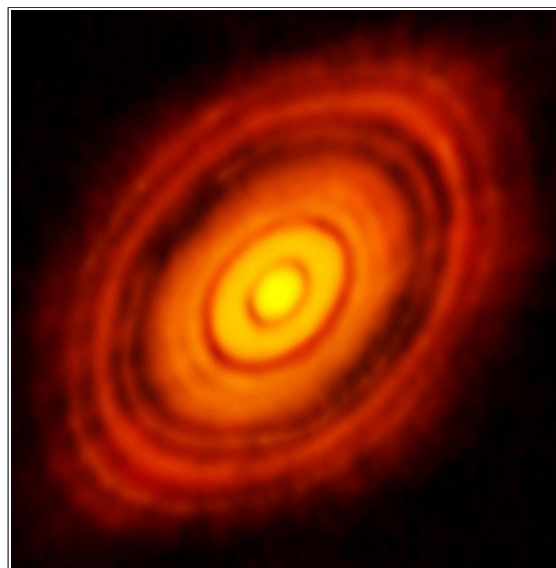
Једначина (1.6) показује да уколико је маса колабирајућег молекуларног облака  $M$  мања од  $0,08M_{\odot}$ , температура у језгру никад неће достићи ону која је потребна за отпочињање фузије водоника у хелијум. Овакви молекуларни облаци еволуирају у смеђе патуљке, планете и њихове сателите.

#### 1.2.5 Формирање планета

Протопланетарни диск садржи свега 0,2% масе небуле из које је настала протозвезда. Ротација протопланетарног диска спречава његов даљи колапс. Хемијски састав не разликује се много од материјала протозвезде: 75% водоника, око 23% хелијума и око 2% свих других елемената.[8] Диск се константно ослобађа топлоте генерисане гравитационим колапсом емитујући инфрацрвено зрачење. Температура почиње да пада до нивоа који омогућава формирање најтежих молекула. Они се удружују у течне или чврсте капљице кроз процес који називамо кондензацијом.

У близини нове звезде где су температуре више само најтежи атоми у стању су да оформе стабилна једињења у виду гранула различите величине. Прво ће се кондензовати метали: алуминијум, никл, гвожђе, титанијум и, на нешто нижим температурама, силикати.

Спољашњи део протопланетарног диска довољно је хладан да се у њему кондензују једињења богата водоником у виду различитих врста леда (вода, метан или амонијак).



**Слика 1.10:** Млада звезда "HL Tau" са протопланетарним диском. Тамни концентрични кругови представљају простор око звезде који су планете у настајању "почистиле" од гаса и прашине.[25]

Велике температурне разлике између спољашњих и унутрашњих делова протопланетарног диска одређују који кондензати су на располагању за формирање планета на различитим растојањима од центра. Унутрашњи део небуле богат је тешким металима и минералима али је сиромашан ледом и гасовима. Спољашњи делови диска имају много већу количину различитих врста леда, уз доминантни учинак гасовитог водоника и хелијума.

Прве чврсте честице су микроскопске величине и крећу се око протозвезде по концентричним круговима. Благи судари између ових честица доводе до њиховог повезивања у веће целине, "планетезимале", језгра будућих планета. Не опстају сви планетезимали: они који расту споро губе брзину услед фрикције са околним гасом и прашином. Полупречник њихове орбите се смањује све док планетезимал не заврши свој кратки живот падом у звезду. Да би избегли овакву судбину планетезимали морају да расту брзо, нарочито док не достигну пречник од једног километра.[23]



**Слика 1.11:** Протопланетарни диск састављен од планетезимала свих величина. Само они најкрупнији који достигну величину од пар километара у кратком року послужиће као језгра формирања будућих планета.[26]

Каснији раст знатно је спорији: планетезимали обично нарасту до величине од десетак километара у периоду од неколико милиона година. Судари између планетезимала сада почињу да бивају деструктивни тако да само они највећи могу да преживе период интензивне фрагментације. Апсорбујући додатни материјал мањих планетезимала они највећи настављају да расту све док не достигну стадијум протопланета. Протопланете настављају да сакупљају материјал дуж своје путање кретања све док их потпуно не очисте од гаса и прашине. На снимцима младих звезданих система често се виде концентрични тамни кругови који одају постојање планете у настајању унутар сјајног облака протопланетарног диска, као на слици 1.10.

Еволуција протопланета траје док постоји материјал који се може апсорбовати. Јак стеларни ветар може тај период да скрати на свега десетак милиона година. Чак и без њега,

протопланетарни диск ретко када траје дуже од 30 милиона година уколико нема прилива новог материјала. Тај нови материјал могу да обезбеде судари локалних комета и астероида али ће и тај процес престати кроз 400 до 500 милиона година. Након тог времена више је немогуће уочити трагове првобитног протопланетарног диска. Већина звезда ће из овог периода изаћи са планетарним системом око себе али постоје и звезде које су свој протопланетарни диск рашчистиле тако брзо да планете нису имале довољно времена да се формирају.[23]

Планете обично делимо на ”земљолике” (оне са чврстом површином) и гасовите џинове. Оне налик Земљи формирају се од стена и метала у близини нове звезде. Судари у том скученом региону су много чешћи а фрагментација планетезимала много већа. Самим тим, планете које се формирају у овој зони по правилу су мале и њихова гравитација није довољно велика да задржи лаке гасове.<sup>11</sup> Зато ове планете представљају густе, мале светове састављене од свега 2% тежих елемената почетне небуле.

У спољашњим деловима протопланетарног диска језгра протоплана формирају се од различитих врста леда, стеновитих и металних делова. С обзиром да у овој зони има много више леда а много мање фрагментације, планетезимали расту веома брзо и кад достигну око 15 маса Земље почињу да акумулирају водоник и хелијум из околине формирајући дебели атмосферски слој. Тако настају гасовити џинови, налик на Јупитер или Сатурн, планете мале густине<sup>12</sup> богате лаким гасовима и различитим врстама леда са дубоко скривеним чврстим, стеновитим језгром.

На самом рубу протопланетарног диска густина материје је толико мала да планетезимали остају минијатурни, са свега пар километара у пречнику. Ове ”прљаве грудве” леда и стеновитог материјала постаће комете у стабилним орбитама око матичне звезде.

Куриозитет Сунчевог система је постојање астероидног појаса између орбита Марса и Јупитера. Реч је о метеоритима, хиљадама планетезимала чија се величина креће од пар метара до неколико стотина километара. Ови ”сведоци” формирања Сунчевог система нису успели да саставе већу планету услед реметилачког утицаја јаке Јупитерове гравитације.



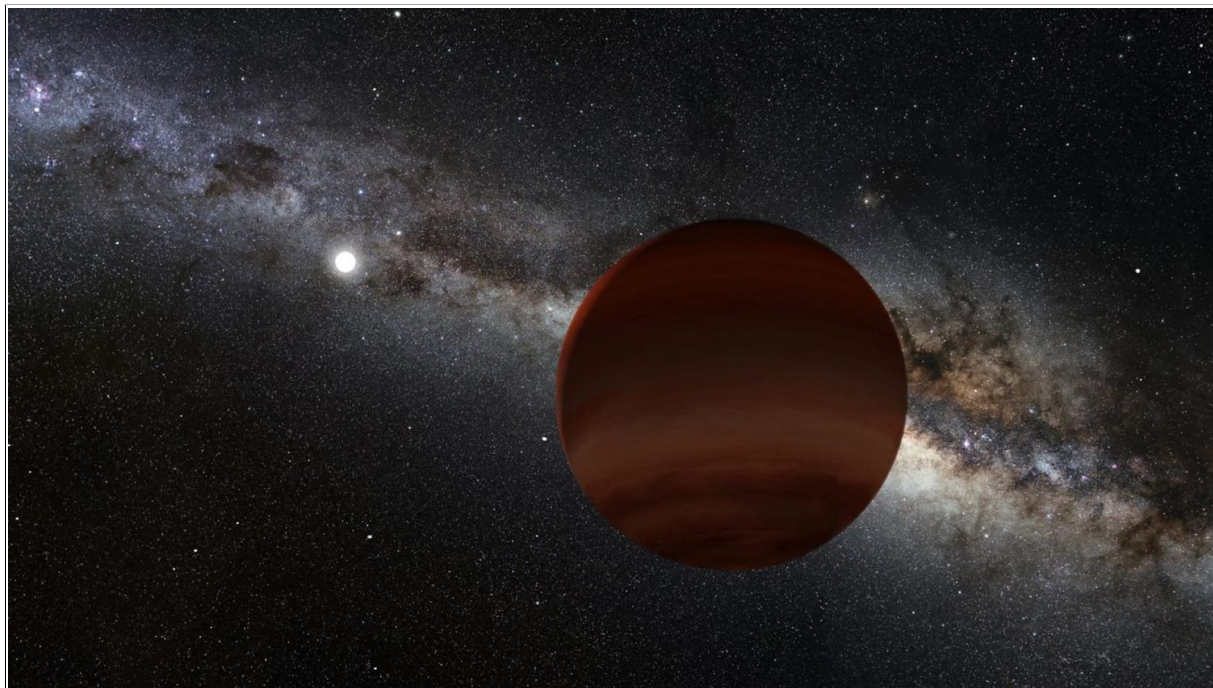
**Слика 1.12:** У раном Сунчевом систему судари космичких објеката били су чести и деструктивни. Данас се сматра да је Месец настао пре око 4,5 милијарди година у колосалном судару Земље са планетом Теом (зову је још и Орфеус), агрегацијом и очвршћавањем материјала који је током судара избачен у Земљину орбиту.[27]

<sup>11</sup>Зато у Земљиној атмосфери нема водоника и хелијума. Хелијум је откривен прво на Сунцу.

<sup>12</sup>Када бисте били у стању да Сатурн потопите у каду, он би испливао јер му је густина мања од густине воде.

## 1.2.6 Смеђи патуљци

Већ смо показали да, према једначини (1.6), протозвезде са масом мањом од  $0,08M_{\odot}$  (око 75 Јупитерових маса) никад не достижу температуру у језгру потребну за фузију водоника у хелијум<sup>13</sup>, самим тим никад не постају праве звезде.[12] Ове "неуспеле звезде" имају масу у распону од масе Јупитера до масе најмање звезде.



**Слика 1.13:** Велика светла тачка на левој страни је бели патуљак (остатак давно уташене звезде) око којег орбитира једва видљиви смеђи патуљак. Захваљујући софтверу који је креирала NASA и обиљу података обезбеђених из најразличитијих извора, овакве објекте данас могу да траже и астрономи аматери. У подухват се до сада укључило њих 100.000 што је резултовало открићем 1.600 до сада непознатих смеђих патуљака.[28]

Научници су деценијама веровали да смеђи патуљци морају да постоје из два разлога:

- Сасвим је могуће да процес формирања звезде остане на нивоу протозвезде која нема довољну масу да еволуира у праву звезду.
- Распон масе између гасовитих џинова као што је Јупитер и најмањих звезда је веома велики. Научници су претпоставили да се унутар тог дијапазона маса налази још једна фамилија космичких објеката - смеђи патуљци.

Тек 1995. године откривен је први смеђи патуљак а затим и многи други. Смеђи патуљци су заправо пурпурно-црвене боје и једва су видљиви тако да је њихова детекција веома тешка.[29] Ово је отворило бројна нова питања: ако су најмање звезде истовремено и најбројније, да ли су онда смеђи патуљци са још мањом масом, заправо, најбројнији објекти у читавом космосу? Астрономи су одавно закључили да у космосу нема довољно масе да одржи на окупу галаксије, галактичне кластере и остале мега-структуре. Данас преовлађује мишљење да је тамна материја та која држи те структуре у компактном стању. Међутим, смеђи патуљци би такође могли да обезбеде велики део недостајуће масе.[12]

<sup>13</sup>Бар три милиона келвина.

Смеђи патуљци нису потпуно хладни и емитују светлост у црвеном и инфрацрвеном делу спектра, пре свега захваљујући топлоти која је остала заробљена у њиховој унутрашњости током колапса молекуларног облака. Додатни извор топлоте је даља компресија смеђег патуљка која генерише топлоту кроз Келвин-Хелмхолцов механизам<sup>14</sup>. Из ових разлога површина смеђег патуљка има температуру упоредиву са температуром најмањих звезда, што опет отежава њихово разликовање.

Смеђи патуљци 13 пута већи од Јупитера имају довољно велику температуру и притисак у језгру да могу да фузионишу деутеријум у хелијум-3 уз ослобађање мале количине енергије. Ни овај процес не траје дуго, свега неколико милиона година у случају највећих смеђих патуљака.[29] Најмањи патуљци који немају могућност да фузионишу деутеријум хладе се врло брзо.

### 1.2.7 Контракција смеђих патуљака и дегенеративни притисак електрона

Процес хлађења праћен је и контракцијом материје која траје све док језгро смеђег патуљка не достигне своју крајњу димензију, типично након 10-15 милиона година. Овај процес ће температуру смеђег патуљка свести на пар келвина изнад апсолутне нуле када патуљак постаје потпуно невидљив.[12]

Интересантно је приметити да сви смеђи патуљци, без обзира на почетно стање, на крају завршавају са величином која је упоредива са Јупитеровом. Разлог лежи у томе што у смеђим патуљцима не постоји унутрашња чврста структура (стеновито језгро, на пример), дебела ледена кора или дуготрајан извор енергије способан да се одупре гравитационом колапсу.<sup>15</sup> Колапс материје наставља се све док га не заустави квантни феномен познат као "дегенеративни притисак електрона". Ова појава проистиче из Паулијевог принципа искључивости[30] који каже да се у једном атому не могу налазити два електрона у истом енергетском стању.<sup>16</sup> Пошто су енергетска стања дискретна и има их коначан број јасно је да за сваку количину материје постоји неки минималан простор у који се та материја може "спаковати". Финално стање смеђег патуљка је истовремено и стање његове максималне густине (далеко веће од максималне густине Јупитера) које се одржава искључиво дејством дегенеративног притиска електрона.[29]

## 1.3 Херцшпрунг-Раселов дијаграм

Какве све звезде постоје? Већ смо рекли да из гигантског молекуларног облака могу да настану звезде свих величина. Такође, разликује се и њихова боја, сјај, површинска температура и укупна енергија коју звезде емитују у јединици времена. Да ли је свака комбинација

---

<sup>14</sup>Овај механизам вероватно објашњава зашто Јупитер емитује више енергије него што је добија од Сунца. Вишак енергије генерише се контракцијом Јупитера брзином од два центиметра годишње.

<sup>15</sup>Гасовити џинови Сунчевог система имају стеновито језгро које "подупире" њихову структуру изнутра.

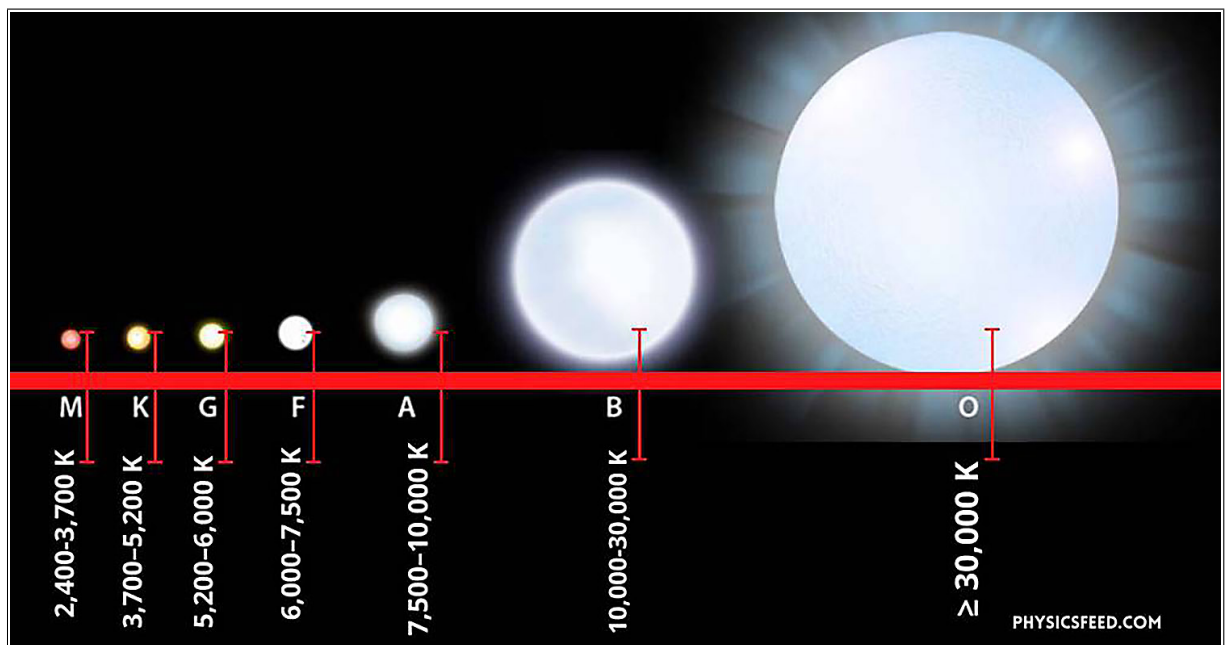
<sup>16</sup>Принцип је касније уопштен на све фермионе, тј. честице са полуцелобројним спином од којих је састављена материја као што су електрони, протони и неутрони. Тако, на пример, у атомском језгру не могу постојати два протона или неутрона идентичног енергетског стања.



ових параметара могућа? Астрономи су давно схватили да нека ограничења постоје. Тако, на пример, не постоје звезде које имају љубичасту или зелену боју што говори да, у свом том богатству звезданих форми, ипак постоје неке законитости.

Да бисте открили везу између одређених својстава звезда, та својства морају да буду ”апсолутна”, тј. независна од места и удаљености посматрача. Нека од тих својстава релативно је лако утврдити (попут боје коју звезда има), док је за нека својства то много теже. На пример, енергија коју звезда емитује у вези је са апсолутним сјајем звезде. Међутим, са Земље можемо да утврдимо само привидан сјај звезде који не представља апсолутну величину јер звезде које производе много више енергије могу да изгледају мање сјајне од слабих звезда које су нам много ближе.<sup>17</sup>

### 1.3.1 Класе звезда



Слика 1.14: Главне спектралне класе са одговарајућим температурама, апроксимативним бојама и релативним величинама звезде. Сунце се налази у спектралној класи G2.[31]

Свака звезда према типу свог спектра спада у одређену класу. У апсорпционом спектру звезде свака тамна линија (тзв. Фраунхоферова линија) означава присуство одређеног хемијског елемента. Интензитет (ширина) линије делимично зависи од учешћа тог хемијског елемента у укупној маси звезде а, у много већој мери, од површинске температуре звезде. Шема класификације звезда, данас позната под именом Морган-Кинанов систем, разрађена је на Универзитету Харвард почетком XX века. Да би се утврдила класа звезде типично се посматрају спектралне линије водоника, хелијума, калцијума и титанијум-оксида. Глав-

<sup>17</sup>У контексту овог поглавља, речи ”сјај”, ”магнитуда” и ”величина” могу се третирали као синоними. Тако, на пример, уместо синтагме ”привидан сјај” можемо рећи и ”привидна магнитуда” или ”привидна величина”.

не спектралне класе означене су словима **O, B, A, F, G, K** и **M**<sup>18</sup>. Ове класе истовремено одговарају и површинској температури звезде, од највише (O) до најниже (M).[31]

Ова подела је прилично груба тако да свака класа има десет поткласа означених бројевима, од 0 (најтоплији део класе) до 9 (најхладнији). Сунце тако спада у класу G2 којој одговара температура од 5.800K. Касније је класификација допуњена додатним спектралним класама: **D** (бели патуљци), **L** и **T** (смеђи патуљци), **S** и **C** (угљеничне звезде).<sup>19</sup>[33]

Уочимо да класа звезда није квантитативан показатељ: постоји бесконачно много могућих температура звезде и коначан број звезданих класа. Овај недостатак довео је до формирања еквивалентног система који свакој звезди додељује нумерички индекс боје, такозвани **B-V** индекс, који представља егзактну, мерљиву величину. Да би се овај индекс одредио звезда се посматра кроз два различита филтера и мери њен сјај (магнитуда). Први, UB-филтер, осетљив је на ултраљубичасту и плаву светлост и мери **B**-индекс. Други, BV-филтер, осетљив је на плави и највећи део видљивог дела спектра (зелена и жута боја) и мери **V**-индекс. Разлика вредности **B-V** представља индекс боје звезде. Систем је тако избаждарен да звезда Вега има **B-V** индекс једнак нули. Сунчев **B-V** индекс износи 0,656 док плавичаста Ригел има индекс -0,03. Мање вредности одговарају топлијим објектима а веће хладнијим.[34].

Предност овог система је што се из **B-V** индекса директно може срачунати температура звезде:

$$T = 4600\text{K} \cdot \left[ \frac{1}{0,92(B - V) + 1,7} + \frac{1}{0,92(B - V) + 0,62} \right] \quad (1.7)$$

Из свега горе наведеног протиче да су класа звезде, њена температура и индекс боје три еквивалентне величине. Ако је дата једна од њих, друге две се могу лако проценити.

Класа	Температура (K)	Боја	Маса ( $M_{\odot}$ )	Водоничне линије спектра	Друге линије спектра	Процент звезда
<b>O</b>	> 33.000	плава	> 16	слабе	вишеструко јонизовани атоми	0,0003%
<b>B</b>	10.000 - 33.000	плава/бела	2,1 - 16	средње	неутрални хелијум	0,1%
<b>A</b>	7.500 - 10.000	бела/плава	1,4 - 2,1	јаке	јонизовани калцијум, неутрални хелијум	0,6%
<b>F</b>	6.000 - 7.500	бела	1,0 - 1,4	средње	јонизовани калцијум, метали	3%
<b>G</b>	5.200 - 6.000	жута	0,8 - 1,0	слабе	јаке линије метала	7,5%
<b>K</b>	3.700 - 5.200	жута/оранж	0,45 - 0,8	врло слабе	неутрални калцијум, титан-оксид	12%
<b>M</b>	< 3.700	оранж/црвена	< 0,45	врло слабе	јаке линије калцијума и титан-оксида, неутрални метали	76%

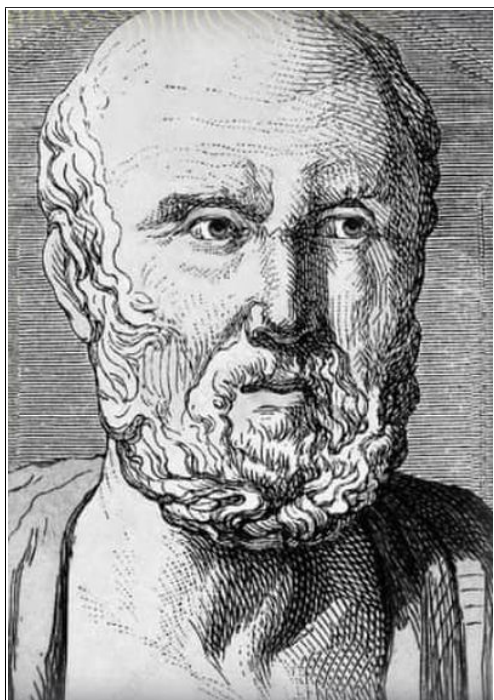
Табела 1.1: Детаљи спектралне класификације.[32]

<sup>18</sup>Како упамтити редослед ових класа? Најједноставније, преко следеће реченице: "Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me!"[32]

<sup>19</sup>Постоје и додатне класе за друге врло ретке типове звезде.

## 1.3.2 Луминозност, привидни и апсолутни сјај звезде

### Привидни сјај



Слика 1.15: Хипарх, један од највећих астронома антике.[35]

Иако су за наше око све звезде заправо тачкасти извори светлости, довољан је један поглед на звездано небо па да утврдимо да звезде сјаје различитим интензитетима. Први покушај систематизације звезда према њиховом сјају (магнитуди) извео је Хипарх са Родоса, један од највећих астронома античког доба. Он је 135. године п.н.е. направио каталог са око 850 звезда у коме је свакој од звезда доделио број на скали од 1 до 6 у зависности од сјаја.<sup>20</sup> Најсјајније звезде имале су број 1 а оне једва видљиве голим оком број 6.[36]

Захваљујући телескопу који је конструисан почетком XVII века, откривене су звезде које су до тада биле недоступне голом оку. Зато је скала магнитуда морала да буде проширена и на вредности веће од 6 како би се обухватиле тамније звезде. У XIX веку развила се и фотометрија која је омогућавала да се сјај звезда објективно измери (Хипарх је користио само своје очи). Некако истовремено откривено је да људско око детектује промене у интензитету светлости по логаритамској а не линеарној скали. Такође је утврђено да звезде којима је Хипарх доделио број 6 сјаје око 100 пута интензивније од оних које имају магнитуду 1. Другим речима, разлика у магнитуди величине 5 одговара 100 пута јачем или слабијем интензитету светлости звезде. Пошто је скала логаритамска, звезда која има магнитуду за један број мању од друге сјајнија је од ње  $\sqrt[5]{100} \approx 2,5$  пута.

Хипархов систем опстао је до данашњих дана али тек пошто је стандардизован. Звезде Вега додељена је нулта магнитуда. Сваких 5 редова магнитуде одговара тачно 100 пута интензивнијем (или слабијем) извору светлости. Након прецизнијих мерења испоставило се да најсјајнија звезда на небу, Сиријус, има магнитуду -1,44.<sup>21</sup>

Хипархов систем опстао је до данашњих дана али тек пошто је стандардизован. Звезде Вега додељена је нулта магнитуда. Сваких 5 редова магнитуде одговара тачно 100 пута интензивнијем (или слабијем) извору светлости. Након прецизнијих мерења испоставило се да најсјајнија звезда на небу, Сиријус, има магнитуду -1,44.<sup>21</sup>

Овако измерене магнитуде називају се привидним јер зависе од нашег положаја у односу на звезде које посматрамо. Неке значајне вредности наводимо у следећој листи:

- Сунце: -26,5
- Меркур: -2
- Пун Месец: -12,5
- Сиријус: -1,44
- Венера: -4,3
- Вега, Сатурн: 0
- Марс и Јупитер: -3
- Антарес: 1

<sup>20</sup>На жалост, сви Хипархови радови су изгубљени тако да о њима имамо само посредна сазнања.

<sup>21</sup>Пошто је скала логаритамска, могуће је да небеска тела имају негативну магнитуду.

- Северњача: 2
- Уран: 5
- Лимит голог ока: 6,5
- Церес: 7
- Нептун: 8
- Лимит двогледа: 10
- Проксима кентаури: 11,1
- Плутон: 14
- Лимит телескопа (8m): 28
- Лимит телескопа "Хабл": 32

## Апсолутни сјај

Привидна магнитуда звезде не говори много о стварној количини енергије коју звезда емитује. Неке звезде су сјајније јер заиста представљају јачи енергетски извор. Опет, неке звезде изгледају сјајније јер су нам ближе иако емитују много мању количину енергије. Зато је неопходно увести апсолутну магнитуду која зависи само од снаге звезданог извора а не и од растојања Земље од посматране звезде.[37]

Апсолутна магнитуда звезде дефинисана је као привидна магнитуда звезде измерена са стандардног растојања од 10 парсека. Означимо привидну магнитуду са  $m$  а апсолутну магнитуду звезде са  $M$ . Уочимо да магнитуда  $m$  одговара стварном растојању Земље од звезде у парсецима  $d_{pc}$  док магнитуда  $M$  одговара стандардном растојању од 10 парсека. Када се узме у обзир да енергетски флуks звезде опада са квадратом растојања, сјај измерен фотометром са Земље ( $I_m$ ) и са растојања од 10 парсека ( $I_M$ ) имају однос:

$$\frac{I_m}{I_M} = \left(\frac{d_{pc}}{10}\right)^2 \quad (1.8)$$

Са друге стране, овај однос одражава се у разлици магнитуда. Већ смо напоменули да 100 пута јачи извор има магнитуду мању за 5. Одатле следи:

$$\frac{I_m}{I_M} = 100^{\frac{M-m}{5}} \quad (1.9)$$

Упоредивањем једначина (1.8) и (1.9) добијамо:

$$\left(\frac{d_{pc}}{10}\right)^2 = 100^{\frac{M-m}{5}} \quad (1.10)$$

Одавде коначно следи:

$$\boxed{M = m - 5(\log_{10} d_{pc} - 1)} \quad (1.11)$$

Једначина (1.11) има фундаменталан значај јер повезује три кључне величине: привидну и апсолутну магнитуду звезде као и растојање до звезде у парсецима. Привидна величина се лако мери фотометријским методама. Ако знамо растојање до звезде, могуће је израчунати апсолутну магнитуду звезде. А она је у директној вези са укупном енергијом коју звезда емитује у јединици времена.

Многе звезде имају веома ниску апсолутну магнитуду: Бетелгез (-5,6), Наос (-6,0), Ригел (-7,0), Денеб (-7,2). Када би се звезде ове магнитуде заиста налазиле на растојању од десет

парсека од Земље, биле би сјајније од свих планета и стварале сенке предмета на Земљи. Сиријус има апсолутну магнитуду од 1,4 али је и даље сјајнији од Сунца чија је апсолутна магнитуда 4,75.[37]

### Луминозност

Луминозност је, по дефиницији, укупна количина енергије коју звезда емитује у јединици времена. Самим тим, луминозност се изражава у ватима (W).[38] Уместо апсолутне вредности  $L$ , луминозност се најчешће исказује у односу на луминозност Сунца  $L_{\odot}$  као количник  $L/L_{\odot}$ .

Зрачење звезде може се третирати као зрачење црног тела одређене температуре. Енергија коју зрачи јединица површине звезде на температури  $T$  у јединици времена износи:

$$I = \sigma T^4 \quad (1.12)$$

...где је  $\sigma$  Штефан-Болцманова константа. Када ову вредност помножимо са површином звезде ( $4R^2\pi$ ) добијамо укупну снагу зрачења звезде, тј. луминозност:

$$L = 4R^2\pi\sigma T^4 \quad (1.13)$$

Ако знамо температуру звезде (која се, као што смо видели, може одредити из њене спектралне класе) и полупречник звезде  $R$ , израчунавање луминозности је тривијално. Међутим једначина (1.13) је скоро неупотребљива јер је полупречник  $R$  тешко мерљив и познат само за врло мали број звезда. Уместо тога, луминозност се израчунава из модификоване једначине (1.9) која, примењена на апсолутне магнитуде уместо на привидне, гласи:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 100^{\frac{M_{\odot} - M}{5}} \quad (1.14)$$

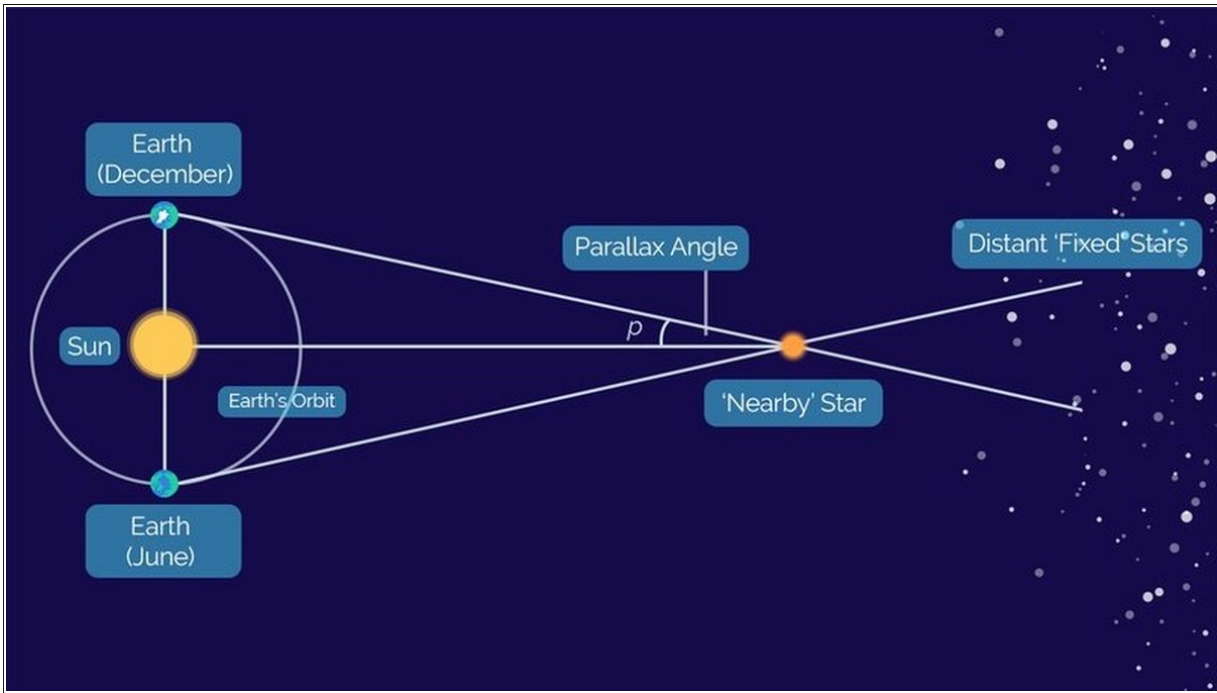
Константе које фигуришу у једначини (1.14) су луминозност Сунца и његова апсолутна магнитуда:

$$\begin{aligned} L_{\odot} &= 3,84 \times 10^{26} \text{ W} \\ M_{\odot} &= 4,75 \end{aligned} \quad (1.15)$$

Према томе, постоји директна веза између луминозности звезде  $L$  и њене апсолутне магнитуде  $M$  (из једне величине може се израчунати друга).

### 1.3.3 Мерење растојања

Из једначине (1.14) види се да је за израчунавање луминозности звезде  $L$  неопходно одредити њену апсолутну магнитуду  $M$ . Са друге стране, из једначине (1.11) проистиче да је за израчунавање апсолутне магнитуде  $M$  неопходно знати привидну магнитуду звезде  $m$  и њено растојање од Земље у парсецима  $d_{pc}$ . Привидна магнитуда мери се веома лако али је одређивање растојања између Земље и звезда много комплекснији задатак. Овде ћемо поменути неке од најчешће коришћених метода.



**Слика 1.16:** Угао паралаксе приказан на слици у стварности је знатно мањи. Постоји врло једноставна релација између растојања звезде и угла паралаксе.[39]

### Метода паралаксе

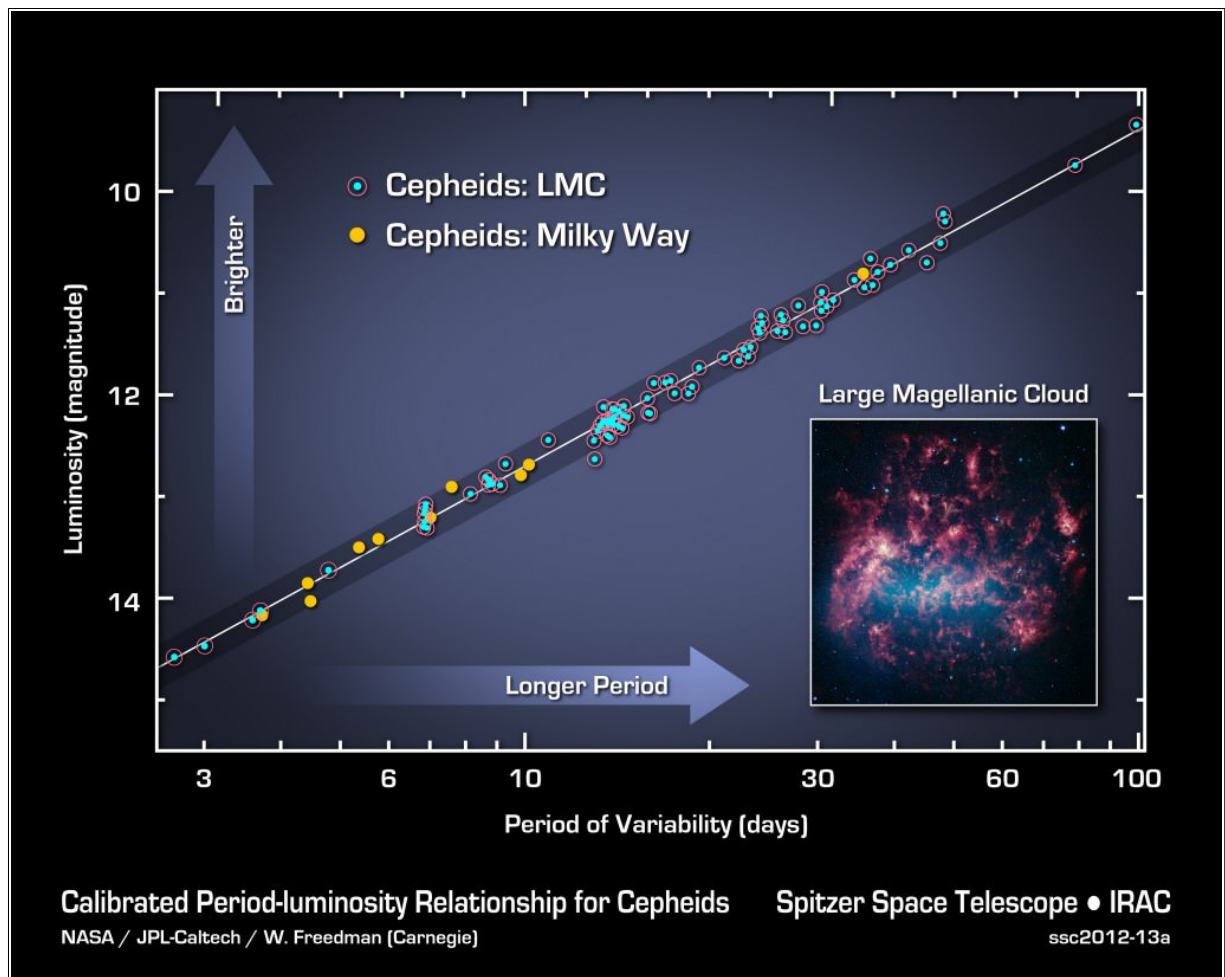
Земља се око Сунца креће по приближно кружној путањи чији пречник износи око 300 милиона километара. Претпоставимо да током тог кретања посматрамо звездано небо. Звезде које су врло далеко од нас изгледаће потпуно непомично, без обзира из које тачке их посматрамо. Међутим, за релативно блиску звезду, промена тачке посматрања доводи до привидног померања звезде у односу на непомичну звездану позадину. Јасно је да ће померање звезде бити максимално ако се посматрања врше у размаку од шест месеци из две дијаметрално супротне тачке Земљине путање. Измерено угаоно померање звезде на звезданом своду представља двоструки угао паралаксе  $p$  приказан на слици 1.16.

Може се лако показати да су растојање до звезде изражено у парсецима  $d_{pc}$  и угао паралаксе  $p$  изражен у секундама везани једноставном формулом:

$$d_{pc} = \frac{1}{p} \quad (1.16)$$

На жалост, употребна вредност ове методе је ограничена. Углови паралаксе су врло мали, редовно испод једне лучне секунде. Најбољим телескопима са земље могу се детектовати углови паралаксе до 0,01 секунде што значи да је максимално растојање звезде мерљиво са Земље свега 100 парсека. Осматрањем са свемирских телескопа као што је "Хабл" могуће је детектовати паралаксе реда хиљадитог дела секунде. То значи да овом методом можемо измерити растојања звезда које од Земље нису удаљене више од 1.000 парсека односно 3.260 светлосних година. Подсетимо се да Млечни пут има пречник од преко 100.000 светлосних година па ћемо схватити да је метода паралаксе ограничена на наш најближи космички комшилук.[39]

## Цефеиде



Слика 1.17: Линеарна веза између периода промене сјаја и луинозности за цефеиде унутар Млечног пута и Великог Магелановог облака.[40]

Звезде које мењају свој сјај током времена називамо променљивим звездама. Цефеиде спадају у посебну врсту променљивих звезда чији се сјај мења врло правилно, са периодом који износи од једног до 100 дана. Током једног циклуса цефеиде мењају луинозност (апсолутну магнитуду), полупречник и температуру. Графички приказана луинозност цефеиде током једног циклуса личи на ајкулино пераје: почиње наглим скоком до максимума да би затим уследио лагани пад на првобитну вредност.

Оно што цефеиде чини тако специјалним је чињеница да постоји линеарна веза између њихове луинозности (којој одговара апсолутна магнитуда) и периода. На слици 1.17 приказана је ова веза за бројне цефеиде Млечног пута и Великог Магелановог облака.<sup>22</sup> Период и привидни сјај цефеиде су лако мерљиве величине. Из периода се може одредити луинозност звезде и њена апсолутна магнитуда. На крају се коришћењем формуле (1.11) може срачунати даљина цефеиде.[41]

Систем компликује чињеница да постоје две велике фамилије цефеида са два различита нагиба линије период-луинозност. У првој групи налазе се жути цинови и црвени суперцинови, звезде које су 4-20 пута масивније од Сунца и до 100.000 пута сјајније. У другој

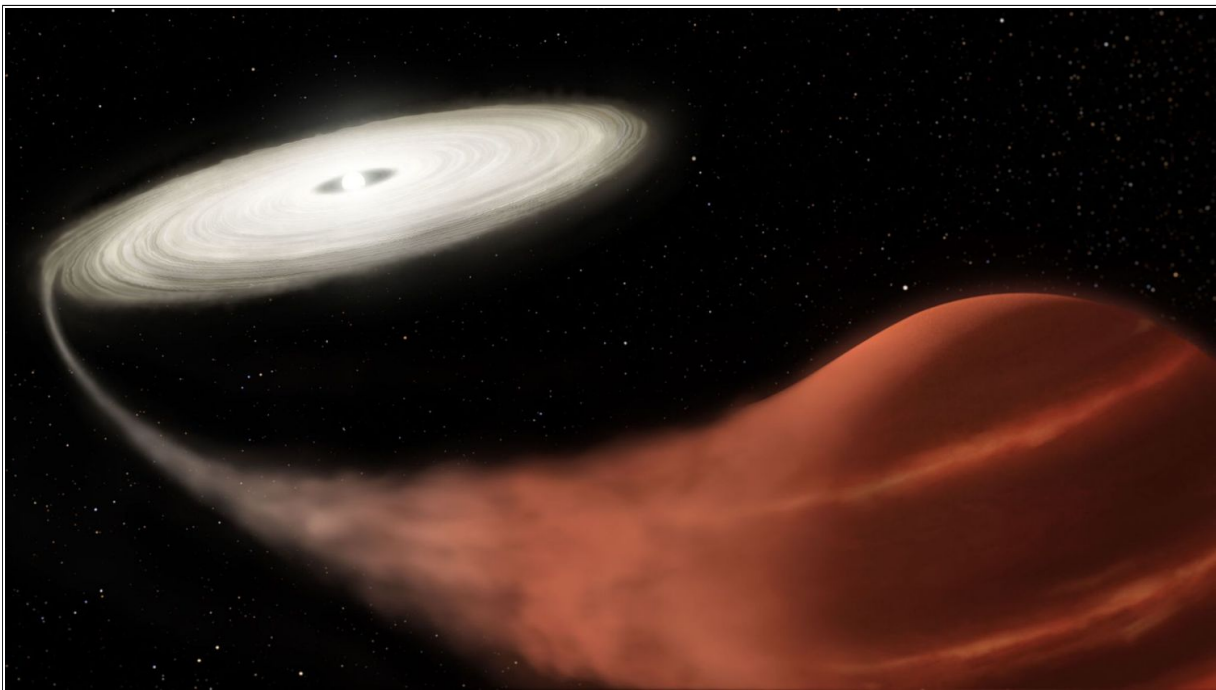
<sup>22</sup>Мала, сателитска галаксија, пратилац Млечног пута.

групи су старије звезде чија је маса око два пута мања од Сунчеве. Пажљивим посматрањем може се утврдити којој фамилији припада одређена цефеида.

Многе цефеиде су велике, веома светле звезде тако да их је могуће идентификовати не само у Млечном путу него и у суседним галаксијама. Самим тим, може се измерити и растојање до њих. Земаљски телескопи могу да региструју цефеиде све до удаљености од 13 милиона светлосних година. На већим растојањима цефеиде су сувише бледе да би биле детектоване.<sup>23</sup> Међутим, космички телескоп "Хабл" може да види још даље: осматрањем цефеида у галаксији М100 утврђено је да њена даљина износи 56 милиона светлосних година.[42]

### Супернова типа Ia

Супернове представљају колосалне експлозије звезда које се налазе на самом крају свог живота. Постоји више различитих типова и подтипова супернова али им је једно заједничко: у тренутку експлозије и неколико недеља након тога једна супернова може својим сјајем да засени читаву галаксију којој припада, емитујући енергију која превазилази енергетски учинак милијарди звезда. Зато се супернове виде са великих растојања и можемо их регистровати и у галаксијама које су од нас удаљене милијардама светлосних година.



**Слика 1.18:** Бинарни систем у коме бели патуљак преузима материју од суседног смеђег патуљка. Када маса белог патуљка пређе границу од  $1,44M_{\odot}$ , могућа је експлозија супернове типа Ia.[43]

Од посебног интереса за мерење космичких растојања су супернове типа Ia. Ова врста експлозије дешава се у бинарним системима у којима је једна од звезда бели патуљак састављен од угљеника и кисеоника. О овим објектима детаљно ћемо говорити у секцији

<sup>23</sup>Галаксија Андромеда налази се на растојању од око два милиона светлосних година.



4.1 а овде ћемо навести само основне детаље. Бели патуљак није звезда у класичном смислу речи. Ради се о компактном, топлом језгру релативно мале звезде која је потрошила нуклеарно гориво и окончала свој животни век. Бели патуљак је сачињен од тзв. дегенерисане материје која има екстремну густину и од даље компресије се брани дегенеративним притиском електрона. Тај притисак (репулзивна сила електрона) потиче од Паулијевог принципа искључивости који каже да се електрони не могу гомилати до бесконачне густине. Тако се у једном атому не могу налазити два електрона истог енергетског стања. У белом патуљку електрони и атомска језгра су измешани тако да је број могућих енергетских стања електрона лимитиран.

Основна особина дегенерисане материје је да се она понаша више као течност него као гас. За разлику од гаса који приликом загревања може да се ослободи вишка топлоте накнадном експанзијом која смањује температуру, бели патуљак увек задржава своју минималну запремину. Ако му додате још топлоте, бели патуљак једноставно постаје топлији. Једини извор енергије белог патуљка представља топлота заостала у његовој унутрашњости. Суседна звезда у бинарном систему може да буде мањи бели патуљак, смеђи патуљак или регуларна звезда.[44]

Бели патуљак је релативно мале величине али због своје велике густине има снажну гравитацију. Уколико је растојање бинарног пара релативно мало, бели патуљак може да почне да преузима материју са свог суседа постепено повећавајући своју масу. Када та маса достигне око 1,44 масе Сунца, температура у центру белог патуљка постаје довољно велика да у њему отпочне ланчана нуклеарна реакција која ће у пар секунди фузионисати највећи део угљеника и кисеоника у теже елементе. С обзиром на огромну густину белог патуљка, нуклеарна реакција је страховито брза, ослобађајући огромну количину енергије унутар релативно мале запремине белог патуљка. Нагли пораст притиска и температуре у језгру изазива експлозију и потпуну деструкцију бинарног система. Експлозија је толико интензивна да избачени материјал достиже 6% брзине светлости. Овакву експлозију називамо суперновом типа Ia.

С обзиром да се супернова типа Ia јавља искључиво код белих патуљака тачно одређене масе, апсолутна магнитуда у тренутку експлозије приближно је иста за све супернове ове класе. Уз врло мале осцилације, апсолутна магнитуда експлодирајућег белог патуљка износи -19,3 (овој магнитуди одговара луминозност која је милијардама пута већа од Сунчеве).[44] Мерењем привидне магнитуде звезде и применом формуле (1.11) могуће је израчунати растојање до белог патуљка и матиче галаксије. Зато се често каже да су супернове типа Ia "стандардне свеће" јер се једноставним мерењем њиховог сјаја истовремено мери и њихова удаљеност.<sup>24</sup>

Највећи проблем код коришћења ове методе је исправна идентификација типа супернове.<sup>25</sup> Супернове типа Ia имају специфичан спектар у коме нема карактеристичних линија

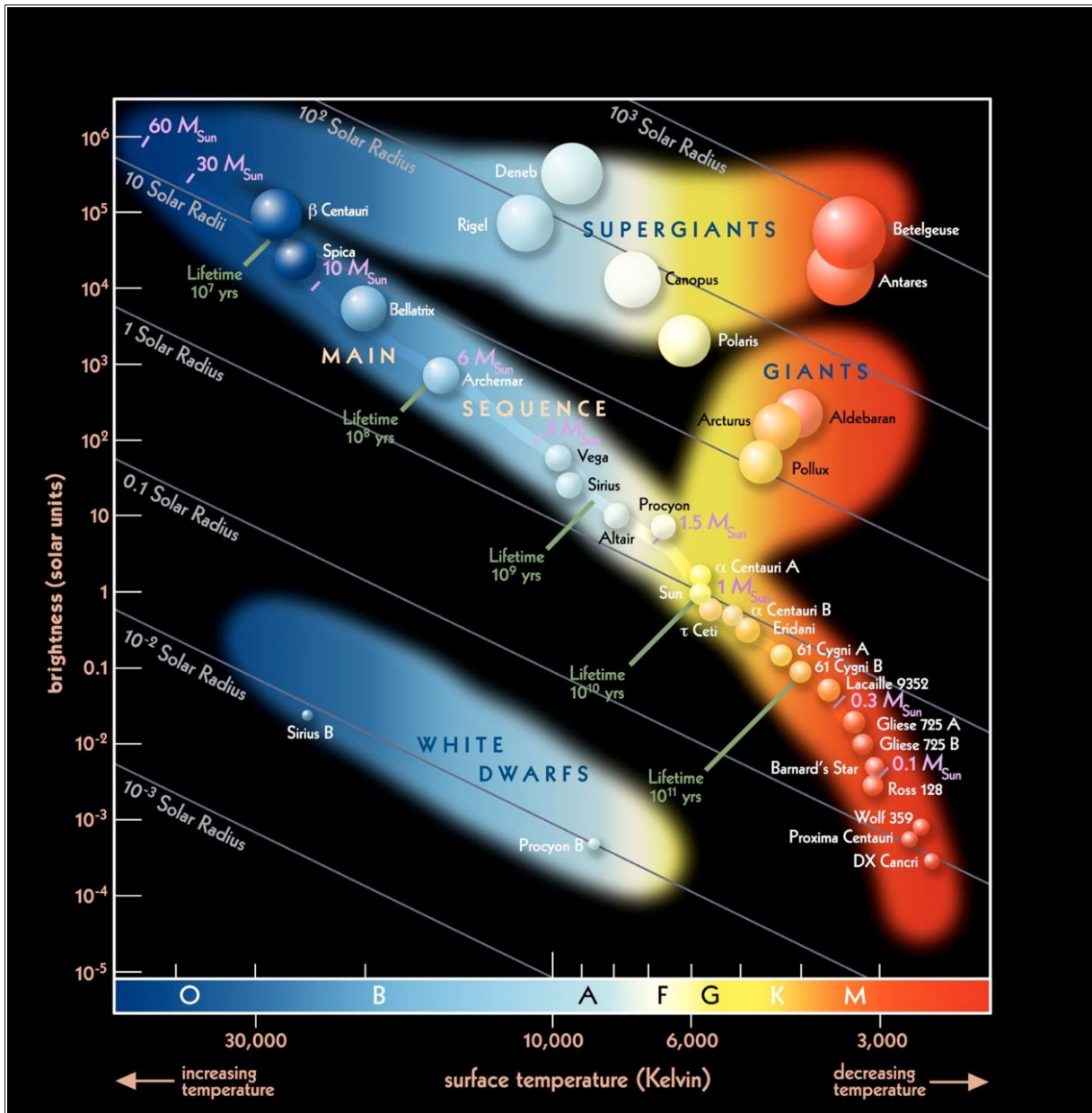
---

<sup>24</sup>Замислите да сте измерили сјај сијалице од 100W на јединичном растојању и да је у свакој градској згради упаљена по једна сијалица исте снаге. Ако измерите привидни сјај свих тих сијалица врло лако можете да израчунате растојање између вас и сваке зграде у граду.

<sup>25</sup>Супернове типа II имају променљиву магнитуду јер потичу од појединачних звезда различитих величина и карактеристика тако да се не могу користити као "стандардне свеће".

водоника. Такође, сјај овакве супернове опада на врло карактеристичан начин током времена.[45] Додатни проблем је што су супернове веома ретке: потребно је да гледате у праву галаксију у право време па да спазите тренутак експлозије у нади да се ради о типу Ia а не неком другом.

### 1.3.4 H-R дијаграм



Слика 1.19: Херцшпрунг-Раселов (H-R) дијаграм.[46]

Херцшпрунг-Раселов (у даљем тексту: H-R) дијаграм приказан на слици 1.19 представља, по много чему, најважнији дијаграм у астрономији због улоге коју има у проучавању еволуције звезда.[47] Дијаграм су, независно један од другог, креирали Ејнар Херцшпрунг и Хенри Норис Расел почетком XX века.

Постоји неколико форми овог дијаграма али су у суштини све оне међусобно еквивалентне. У својој изворној верзији, H-R дијаграм представља зависност луминозности звезде

од њене површинске температуре (тзв. "теоретски H-R дијаграм").[48] Међутим, постоје и друге форме овог дијаграма. У секцијама 1.3.1 и 1.3.2 показали смо следеће:

- Свакој температури звезде одговарају одређени B-V индекс и звездана класа. Било која од ове три величине може да буде представљена на апсциси H-R дијаграма.
- Апсолутна магнитуда звезде може да се израчуна из њене луминозности. Било која од ове две величине може да буде представљена на ординати H-R дијаграма.

То значи да H-R дијаграм може, на пример, да представља и зависност апсолутне магнитуде звезде од њене звездане класе (тзв. "опсервациони H-R дијаграм"). Прве верзије дијаграма имале су на апсциси звездане класе у редоследу од **O** до **M**. Ово има једну интересантну последицу: када се уместо звездане класе на апсцису нанесе температура звезде, она опада слева удесно што, на први поглед, не изгледа логично. Иако је другачијим ређањем звезданих класа ово лако могло да буде кориговано, првобитни облик H-R дијаграма опстао је до данашњих дана.

Приметимо да се опсег температура на апсциси креће између 3.000 и 50.000 келвина али да се и поред релативно малог опсега (два реда величине) користи логаритамска скала. Разлика у апсолутном сјају звезда много је већа (најмање десет редова величине): постоје звезде које су 10.000 пута сјајније или 10.000 пута тамније од Сунца. Самим тим, логаритамска скала је једини избор у представљању величина на ординати.[49]

У зависности од почетне масе, свака звезда пролази кроз одређене еволуционе фазе, мењајући своју интерну структуру и начин на који генерише енергију. Самим тим, мењају се температура и луминозност звезде а, сходно томе, и положај звезде на H-R дијаграму. У овоме лежи права моћ H-R дијаграма: из положаја звезде на дијаграму може се реконструисати велики део њене прошлости и предвидети њена коначна судбина.[48]

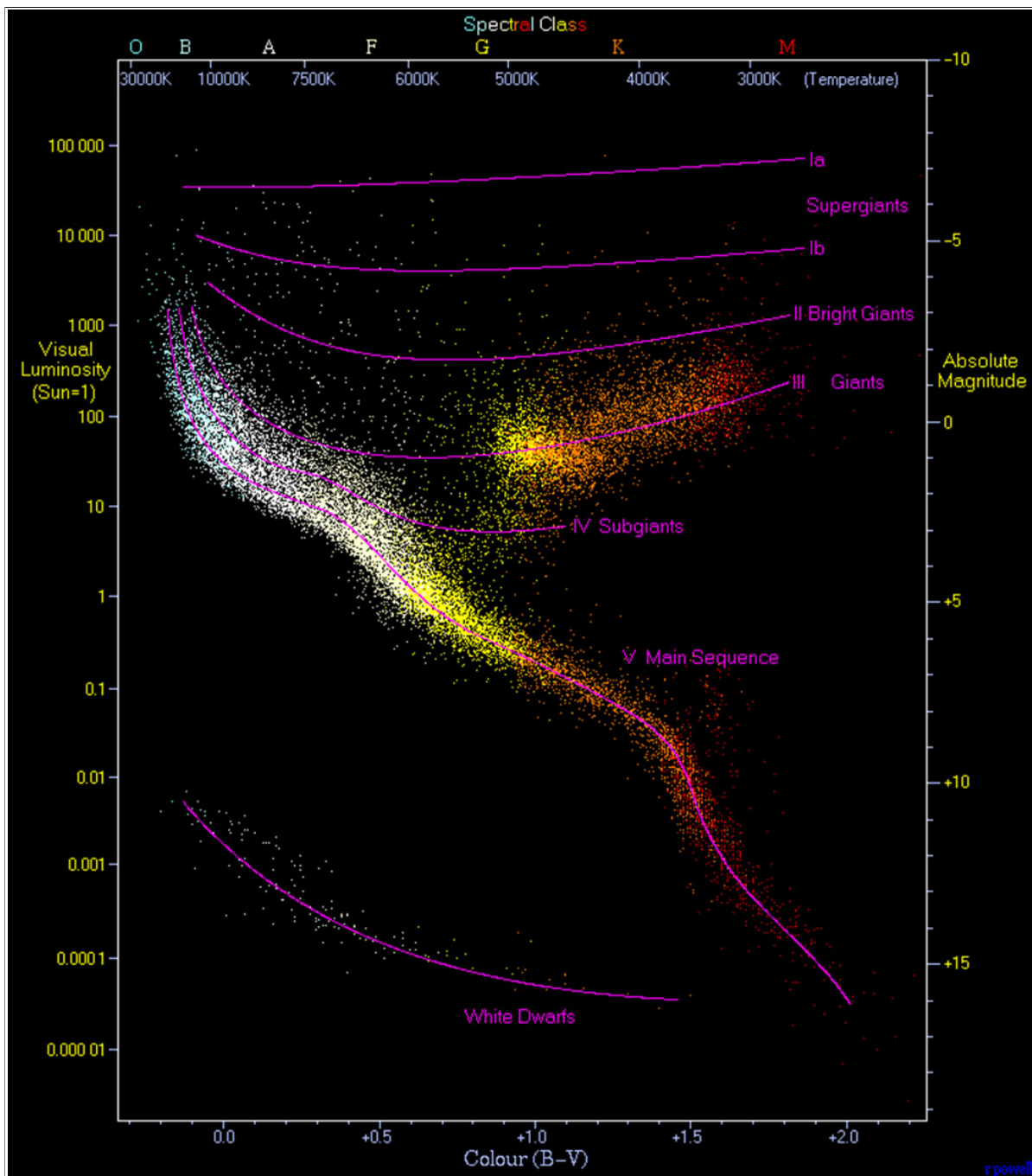
Како је настао H-R дијаграм? С обзиром да звезде еволуирају врло споро немогуће је пратити промену њиховог положаја на H-R дијаграму у реалном времену. Уместо тога, Херцшпрунг и Расел измерили су карактеристике великог броја звезда и уцртали их на дијаграм. Касније је дијаграм допуњен подацима из два савремена звездана каталога, "Hipparcos"<sup>26</sup> и "Gliese"<sup>27</sup>. Тако је настао дијаграм са слике 1.20 који садржи податке за око 22.000 звезда. Дијаграм приказује различите звезде у различитим фазама њихове еволуције.[47]

Најучљивији је део означен римским бројем **V** који се простира дијагонално, од доњег десног угла (најхладније и најтамније звезде) до горњег левог угла (најтоплије, најсјајније звезде). Овај део дијаграма зове се **главни низ** и у њему се налази највећи број звезда, с тим да њихова бројност драстично опада одоздо навише. У тренутку када протозвезда почне да фузионише водоник у хелијум, рађа се млада звезда која добија своје место у главном

---

<sup>26</sup>Космичка сонда "Hipparcos" је од 1989. до 1993. године прецизно мапирала положаје око 100.000 звезда. Још милион звезда мапирано је с мањом прецизношћу.[50]

<sup>27</sup>Каталог који је 1957. године објавио немачки астроном Вилхелм Глисе (Gliese) са подацима за 1.000 оближњих звезда. Каталог је касније више пута допуњаван.[51]



**Слика 1.20:** Детаљни Херцшпрунг-Раселов дијаграм конструисан на бази "Hipparcos" и "Gliese" каталога. Свака од 22.000 тачака на дијаграму означава једну звезду. Сунце се, отприлике, налази на средини жутог сегмента главног низа.[47]

низу где ће провести око 90% свог живота. Сунце се налази отприлике у средини главног низа.<sup>28</sup>

Највећи број новонасталих звезда су релативно тамне звезде, мале масе и ниске температуре. Масивније и топлије звезде далеко су ређе и налазе се у горњем левом углу. Многе од њих имају већу луминозност од циновских и суперциновских звезда. Место звезде на H-R дијаграму није фиксирано: током еволуције звезде и њена позиција на дијаграму ће се ме-

<sup>28</sup>У главном низу су и Сиријус, Вега, Алфа/Бета/Прокиσμα Кентаури и многе друге звезде.

њати формирајући карактеристичну линију чији облик у највећој мери зависи од почетне масе.

Ван главног низа имамо још четири групе звезда означених римским бројевима у зависности од луминозности:[47]

- **Суперџинови (I):** Масивне и сјајне звезде близу краја свог живота. Подељене су у две класе, Ia и Ib, при чему су у првој класи оне најсјајније. Ове звезде веома су ретке (једна у милион). Канопус, Бетелгез, Ригел и Антарес спадају у ову класу. Велики проценат суперџинова има ниску температуру што према једначини (1.13) значи да имају и огромне димензије (одатле им и назив).<sup>29</sup>
- **Светли џинови (II):** Група звезда која се по луминозности налази између џинова и суперџинова.
- **Џинови (III):** Ово су, најчешће, звезде које су напустиле главни низ након што су утрошиле највећи део водоника што за последицу има повећање њиховог полупречника (више о томе у наредним поглављима). У овом региону често се налазе и масивније звезде које су на путу да постану суперџинови (Арктурус, Хадар, Алдебаран).
- **Џинови у зачетку (IV):** Звезде које су тек започеле свој пут од главног низа до џинова и суперџинова.

Уочимо још да се испод главног низа налазе бели патуљци, остаци звезда мале и средње величине, у којима се више не одвијају нуклеарне реакције. Иако су бели патуљци веома топли, неки и преко 10.000 келвина, они имају малу луминозност због својих малих димензија. Енергија коју емитују бели патуљци последица је топлоте заостале у њиховој унутрашњости.

H-R дијаграм показује да природа ”не уме” да направи звезде произвољног сјаја и температуре. Велике празне области на дијаграму показују да су неке комбинације звезданих својстава једноставно немогуће. Помнијим проучавањем H-R дијаграма установљене су и неке нове правилности. Тако, на пример, за звезде главног низа постоји директна веза између луминозности и масе звезде:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha} \quad (1.17)$$

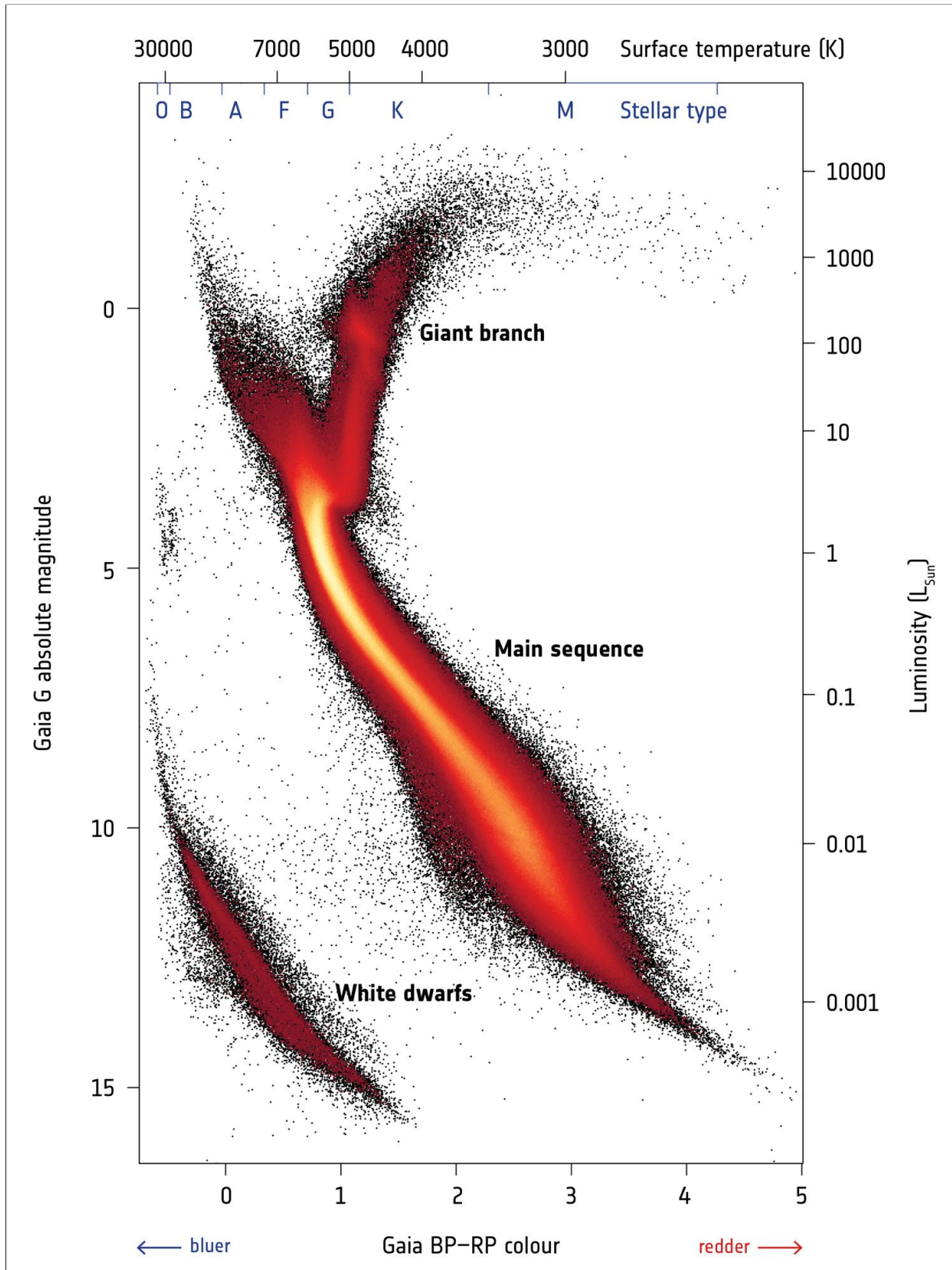
...где је  $\alpha \approx 3,5$ . [53]

Са друге стране, H-R дијаграм се може користити и као универзални ”даљинар” за мерење даљине звезда у случајевима када ниједна од метода из секције 1.3.3 није од користи. Претпоставимо да смо анализом спектра звезде установили њену спектралну класу (температуру) и утврдили да она припада главном низу. Из температуре и H-R дијаграма може се одредити луминозност, односно апсолутна магнитуда звезде. Из привидне и апсолутне магнитуде, применом једначине (1.11) лако је одредити растојање до звезде. Сличан поступак може се спровести и за звезде ван главног низа али је поступак компликованији

---

<sup>29</sup>Бетелгез, на пример, има пречник који је око 1.000 пута већи од Сунчевог. Постављен у центар Сунчевог система Бетелгез би прогутао све планете од Меркура до Јупитера.[52]

јер је неопходна детаљна анализа спектра како би се уверили о каквој циновској звезди је реч.[53]



Слика 1.21: H-R дијаграм нацртан на бази података са сонде "Gaia".

Поменимо на крају да се фини детаљи H-R дијаграма мењају како нам пристижу резултати све прецизнијих мерења са нове генерације космичких сонди. Тренутно најамбициознији пројекат, "Gaia"[54], има задатак да креира тродимензионалну мапу Мечног пута и реконструише његову историју мерећи позиције и радијалне брзине за преко милијарду звезда Мечног пута.<sup>30</sup> На бази података снимљених сондом "Gaia" настао је H-R дијаграм приказан на слици 1.21 са око четири милиона звезда из нашег космичког суседства (сфера полупречника 5.000 светлосних година).[54] Дијаграм садржи око 100 пута више звезда од дијаграма базираног на каталогу "Hipparcos" са слике 1.20. Дијаграм такође садржи податке за 35.000 белих патуљака, неупоредиво више од свих претходних верзија дијаграма.

---

<sup>30</sup>Отприлике 1% од укупног броја звезда у нашој галаксији.





## Глава 2

# Живот звезде у главном низу

Када у младој звезди коначно започне фузија водоника у хелијум, она добија своје место у главном низу H-R дијаграма и ту проводи највећи део свог живота који се мери милионима и милијардама година. Звезде не би могле да опстану толико дуго да немају постојан, дуготрајан извор енергије који спречава да звезда колабира под дејством сопствене гравитације. У овом поглављу детаљније ћемо објаснити енергетске процесе у звездама главног низа.

### 2.1 Ране претпоставке

Све до деветанестог века није било ниједне научне теорије која се бавила извором Сунчеве енергије. За Сунце, као небеско тело, највише су се интересовали квазинаучни дилетанти, попут астролога, и понеки теолог. Тек 1833. године Џон Хершел<sup>1</sup> говори о енергији Сунца као покретачкој сили живота: ”Сунчеви зраци основни су узрок практично сваког кретања које се дешава на земљиној површини. Захваљујући његовој оживљујућој снази из неорганске материје настају биљке без којих нема ни животиња, ни људи, ни огромне енергије стављене на располагање људима у виду наслага угља”.[55]

Од самог почетка било је јасно да су старост Сунца и извор његове енергије повезани: што је Сунце старије, и количина до сада емитоване енергије мора да буде већа. С обзиром да ниједан извор енергије није бесконачан, Сунце мора да има свој почетак и крај. Теолози су, на основу бројева поменутих у библијским текстовима, сматрали да је свет створен пре свега неколико хиљада година. Међутим, убрзо су почели да се гомилају докази да је наша планета, ипак, много старија. Посматрајући једну долину у јужној Енглеској и процењујући брзину процеса ерозије, Чарлс Дарвин је утврдио да је природи било потребно бар 300 милиона година да ”исклеше” једну такву долину. Дарвину је овај аргумент био потребан како би потврдио да је природа имала сасвим довољно времена за еволутивне промене које је касније описао у својој чувеној књизи ”О постанку врста”.

Лорд Келвин је био велики Дарвинов противник и на све начине је покушавао да оспори процењену старост Земље и Сунца. Иако је признао да никакве хемијске реакције не мо-

---

<sup>1</sup>Његов отац, Виљем, открио је планету Уран.

гу бити извор Сунчеве енергије јер би читава маса Сунца била искоришћена за мање од 3.000 година, Келвин 1863. године формулише теорију по којој је Сунчева топлота последица безбројних удара метеорита и комета. С обзиром да је Сунчев систем препун оваквих објеката и да се њихова маса може проценити, лорд Келвин је, отворено се супротстављајући Дарвину, устврдио да је Сунце настало пре 80 милиона година.

Теорија никад није постала превише популарна и научници су се окренули алтернативним хипотезама. Пјер Кири је 1903. године утврдио да радиоактивне радијумове соли имају температуру већу од температуре околине и да се та температурна разлика веома споро смањује током времена. Ако би Сунце имало у себи значајну количину радиоактивних елемената, процес радиоактивног распада могао би да генерише довољну количину енергије. Међутим и ова теорија је пала у воду када су астрономи утврдили на Сунцу има јако мало радиоактивних елемената и да преовлађују лаки, стабилни елементи: водоник и хелијум.

## 2.2 Келвин-Хелмхолцов механизам

Крајем деветнаестог века научници су почели интензивније да истражују порекло Сунчеве енергије. У то време већ се знало да у нашој галаксији има још много звезда сличних Сунцу и да је у том погледу Сунце тек једна "просечна" звезда. Самим тим, истраживање је добило на значају: ако бисмо одгонетнули механизам настанка Сунчеве енергије, били бисмо у стању да то сазнање применимо на практично све звезде у космосу.

У то време преовлађивала је теорија да Сунце емитује енергију услед контракције материје под дејством силе гравитације. Теорија није била без основа: првобитно Сунце настало је сажимањем облака космичког гаса и честица прашине. Потенцијална енергија гравитационог привлачења било које две честице дата је једначином:

$$E_p = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r} \quad (2.1)$$

Притом су  $m_1$  и  $m_2$  масе честица,  $r$  њихово међусобно растојање а  $\gamma$  Њутнова универзална гравитациона константа. Са смањивањем растојања и потенцијална енергија опада. Међутим, та енергија не може да буде изгубљена.

Користећи Њутнову теорију гравитације и закон о одржању енергије Келвин и Хелмхолц су формулисали процес којим се потенцијална енергија изгубљена контракцијом звезде или гасовите планете трансформише у топлоту, такозвани "Келвин-Хелмхолцов" механизам.[56] Механизам полази од тога да се површине звезда и планета постепено хладе. Ово доводи до смањења унутрашњег притиска који се одупире гравитацији. Услед мањег притиска, долази до даље компресије под дејством силе гравитације, што опет доводи до повећања унутрашњег притиска и температуре. Процес је континуалан и доводи до постепеног смањивања димензија и пада потенцијалне енергије уз емитовање топлоте. Уз одређена упрошћења<sup>2</sup>, Келвин и Хелмхолц успели су да израчунају укупну енергију коју

---

<sup>2</sup>Келвин и Хелмхолц су у својим прорачунима, рецимо, сматрали да је Сунце хомогено тело константне гуситне

има гасовито тело које се у компактном стању држи искључиво силом гравитације:[57]

$$E = -\frac{3\gamma M^2}{10R} \quad (2.2)$$

...где су  $M$  и  $R$  маса и полупречник гасовитог тела. Међутим, када је сер Артур Едингтон, један од најпознатијих астронома тог времена, поделио енергију (2.2) са снагом Сунчевог зрачења, утврдио је да, уколико је Келвин-Хелмхолцов механизам једини извор Сунчеве енергије, Сунце не може да буде старије од 8.900.000 година. Овај резултат био је у потпуном нескаду са геолошким и биолошким траговима пронађеним на нашој планети који су недвосмислено потврђивали да се старост Земље (самим тим и Сунца) мери милијардама година.

Ипак, у то време бољег објашњења за порекло Сунчеве енергије није било. Келвин је до те мере био убеђен да је његова теорија тачна да је упорно тврдио да Земља не може бити старија од неколико милиона година отворено доводећи у сумњу све аргументе који су тврдили супротно.

## 2.3 Ханс Бете и теорија нуклеарне фузије

Даљи напредак науке а, пре свега, нуклеарне физике и квантне механике, отворио је простор за настанак неких нових хипотеза. Испоставило се да су сви кључни елементи будуће теорије већ били ту, требало их је само повезати:[1]

- Радећи на специјалној теорији релативитета Ајнштајн је доказао да свако тело са масом мировања  $m$  има енергију  $E$  дату релацијом:

$$E = mc^2 \quad (2.3)$$

Његова чувена једначина показала је да се од мале количине материје може добити огромна количина енергије.

- Нуклеарна физика напредовала је огромним корацима. Нуклеарне реакције, непознате у време настанка Келвин-Хелмхолцове теорије сада су биле рутински изучаване.
- Астрофизичари су потврдили да је водоник далеко најзаступљенији хемијски елемент код највећег броја звезда.
- Квантна механика, чији су темељи у то време били већ увелико постављени, показала је да су неке наизглед немогуће нуклеарне реакције ипак могуће са одређеном вероватноћом (кроз "тунел ефекат").
- Артур Едингтон је 1920. године приметио да је маса четири протона нешто већа од масе језгра хелијума. Ако би постојао ланац нуклеарних реакција који би од четири протона произвео језгро хелијума, недостајућа маса била би трансформисана у енергију. Едингтон је чак срачунао да би, према једначини (2.3) конверзија само једног процента Сунчеве масе у енергију била довољна да Сунце сија бар сто милијарди година. Ипак, Едингтон није могао да објасни тачан механизам фузије водоника у

хелијум јер је веровао да је температура у центру Сунца сувише мала да савлада Кулонову силу одбијања позитивно наелектрисаних протона.

До кључног продора дошло је када се Ханс Бете, млад и талентован немачки научник, бежећи од нациста због свог јеврејског порекла, преселио у Америку 1935. године. Добио је посао на Универзитету "Корнел" који је у то време имао амбицију да створи тим еминентних нуклеарних физичара.<sup>3</sup> Бете у почетку није био много заинтересован за питање извора Сунчеве енергије али је, заинтригиран делимичним резултатима презентираним на Четвртој годишњој конференцији физичара у Вашингтону 1938. године, одмах приориноу на посао и до краја конференције већ имао нацрт потпуно нове теорије коју ће касније објавити у два револуционарна научна рада.[58]

Бетеова теорија тврди да Сунце генерише енергију на два потпуно различита начина:[59]

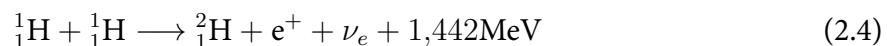
- Ланчана рекација типа протон-протон ( $p-p$  процес)
- Циклус угљеник-азот-кисеоник (CNO циклус)

Сваки од ова два начина представља сложен процес којим се четири протона фузионишу у језгро хелијума. Део масе протона претвара се у енергију коју Сунце емитује.

### 2.3.1 $p-p$ процес

Овај процес има три различите фазе.[60, 61] Постоје четири различите подваријанте процеса у зависности од последње фазе (прве две увек су идентичне). Најчешћа варијанта  $p-p$  процеса приказана је на слици 2.1.

**Прва фаза** представља фузију два језгра водоника (протона) у деутеријум уз ослобађање једног позитрона<sup>4</sup>, електронског неутрина<sup>5</sup> и енергије:



Ова реакција је врло спора с обзиром да настаје под дејством силе слабе интеракције која има врло кратак домет (мањи од просечне димензије атомског нуклеуса). Чак и условима велике густине и притиска у средишту Сунца проћи ће неколико милијарди година пре него што један одређени протон ступи у контакт са неким другим. Емитовани позитрон биће брзо анихилиран у контакту са неким од околних електрона емитујући притом два гама-зрака (фотона) чија је укупна енергија наведена у једначини (2.4).

У **другој фази** језгро деутеријума апсорбује још један протон и формира језгро хелијума-3 уз емитовање гама-зрака (фотона). С обзиром да се процес дешава услед дејства јаке нуклеарне силе, животни век деутеријума је врло кратак, свега неколико секунди:



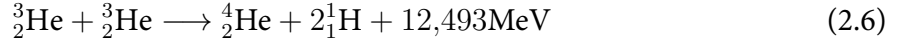
<sup>3</sup>Радећи на Корнелу Ханс Бете је касније добио и америчко држављанство.

<sup>4</sup>Честица идентична електрону али са супротним знаком наелектрисања.

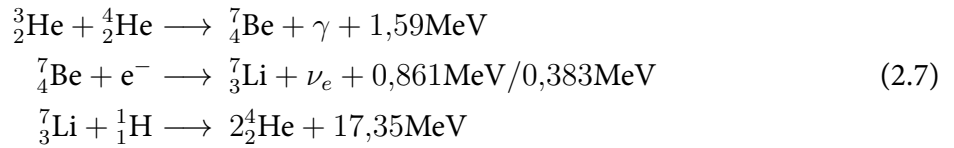
<sup>5</sup>Неутрино је супер-лака честица која је скоро "неухватљива" јер са материјом реагује искључиво силом слабе интеракције. О овим егзотичним честицама биће још речи.

Након завршетка друге фазе постоје четири различита начина да се формира језгро хелијума  ${}^4_2\text{He}$ . Означимо ове четири гране ланчане реакције са PP-1, PP-2, PP-3 и PP-4.

Грана **PP-1** производи око 83% укупне количине хелијума-4 и доминантна је на температурама од 10 до 14 милиона келвина.

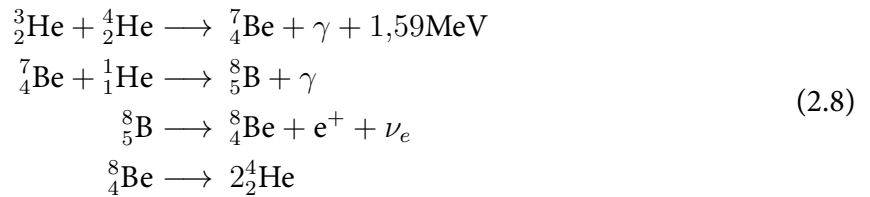


Грана **PP-2** производи око 16,7% укупне количине хелијума-4 и карактеристична је за температуре од 14 до 23 милиона келвина:



Приметимо да у другој реакцији из скупа (2.7) наведене енергије представљају енергије генерисаних неутрина. Прву енергију има око 90% неутрина док другу има преосталих 10%.

Грана **PP-3** производи свега 0,02% укупне количине хелијума-4 и приметна је тек на температурама изнад 23 милиона келвина:

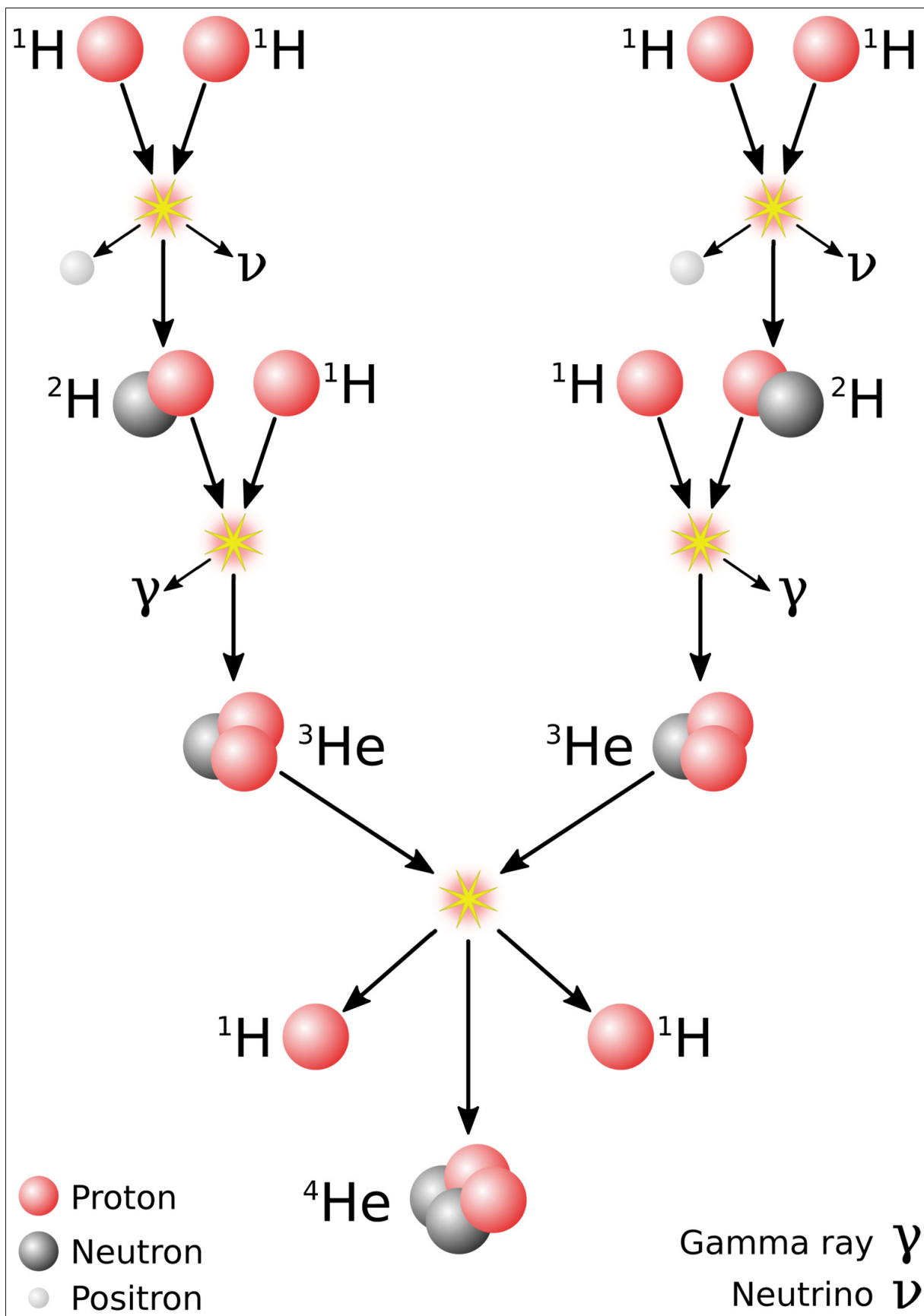


Укупна енергија ослобођена у последње три реакције из скупа (2.8) износи око 18,21 MeV при чему највећи део енергије односи генерисани неутрино. Енергетски допринос ове гране укупној енергији Сунца је занемарљив.

Грана **PP-4** је теоретски могућа али до сада није регистрована на Сунцу, вероватно због своје екстремно мале учестаности, тако да се у свим прорачунима и проценама може занемарити:



Сумарно гледано, конверзија четири протона у језгро хелијума трансформише 0,7% почетне масе протона у енергију (око 26,73 MeV по једном *p-p* ланцу). Ту енергију са собом односе фотони и неутрини генерисани током ланчане реакције. На неутрине отпада око 2,3% генерисане енергије и та енергија је заправо изгубљена јер неутрини пролазе кроз Сунце и Земљу практично без икакве интеракције. Лавовски део генерисане енергије носе гама-зраци који бивају брзо апсорбовани од стране околних атома а затим поново реемитовани у другом правцу. Део енергије фотона бива апсорбован тако да фотони у свом циклусу напредовању ка површини Сунца полако губе енергију, прелазећи пут од гама-зрака до видљиве светлости, загревајући притом Сунчеву унутрашњост. Константан прилив



Слика 2.1: Најзаступљенији облик ланчане реакције типа протон-протон.[62]

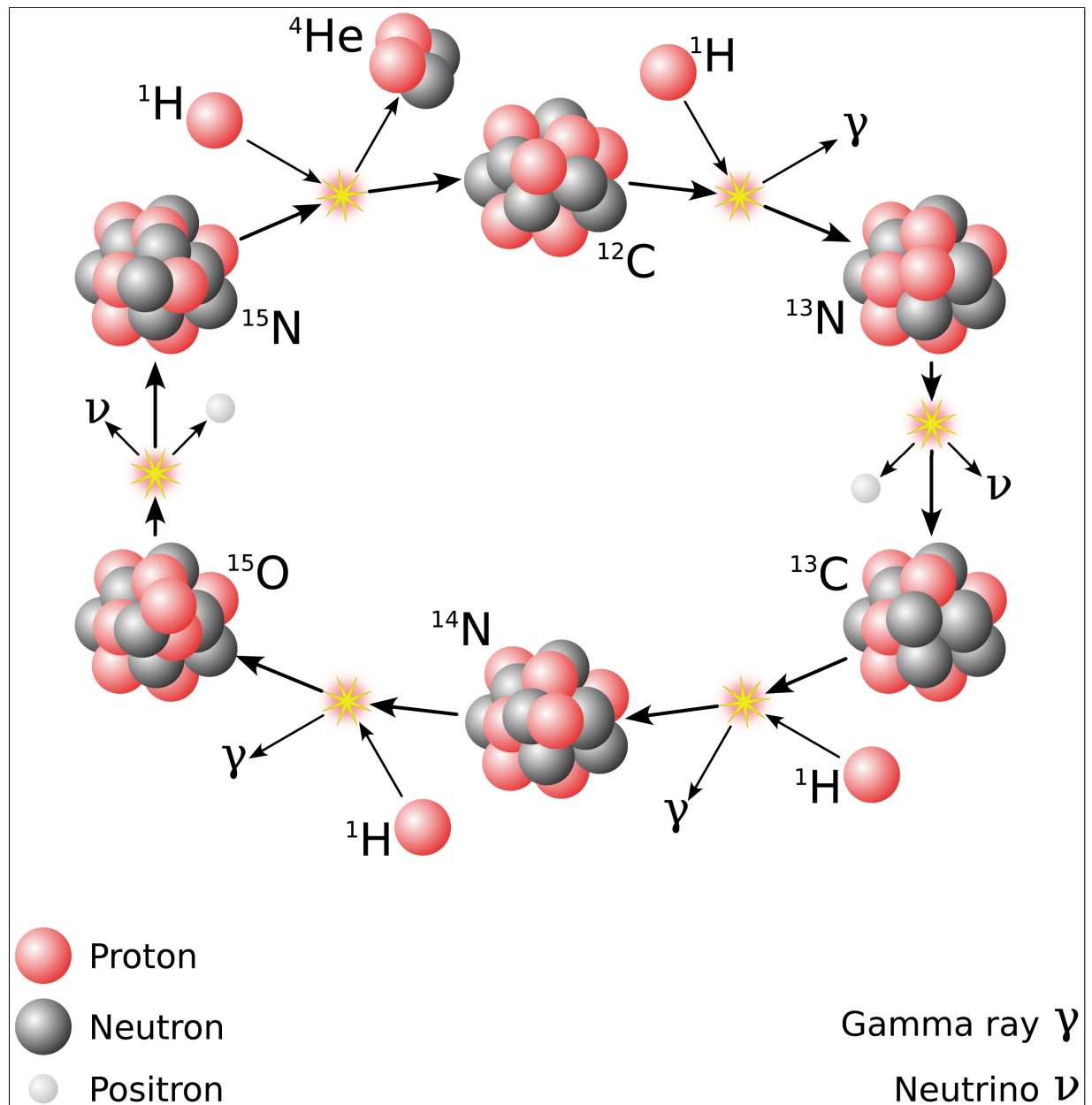
топлоте одржава притисак у унутрашњости Сунца који спречава колапс звезде под дејством сопствене гравитације.

На крају, поменимо да енергија генерисана  $p$ - $p$  ланчаном реакцијом у јединици времена (снага) првенствено зависи од температуре[63]:

$$P_{p-p} \sim T^4 \quad (2.10)$$

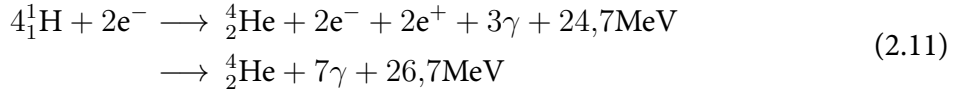
На Сунцу се у свакој секунди 600 милиона тона водоника фузионише у хелијум при чему се око 4 милиона тона конвертује у енергију.[23]

### 2.3.2 CNO циклус



Слика 2.2: Најзаступљенији облик CNO циклуса.[64]

Други механизам генерисања сунчеве енергије који је Бете описао а касније га усавршио заједно са Карлом Фридрихом фон Вајцекером захтева присуство угљеника, азота, кисеоника или флуора као катализатора. CNO циклус има више различитих форми баш као  $p$ - $p$  ланац али је сумарни резултат увек исти:[65]



Други израз подразумева да се два електрона и два позитрона практично тренутно анигилирају производећи четири фотона.

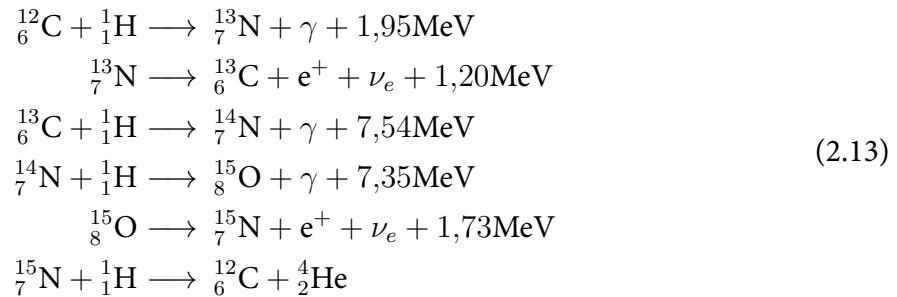
Енергија генерисана током CNO циклуса у јединици времена драстично зависи од температуре[66]:

$$P_{CNO} \sim T^{17} \quad (2.12)$$

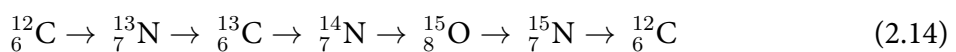
Детаљнијим проучавањем зависности (2.10) и (2.12), утврђено је да CNO циклус постаје уочљив тек на температури од 15 милиона келвина.[65] Испод те температуре  $p$ - $p$  процес представља практично једини звор енергије. Изнад те температуре, учинак CNO циклуса драматично расте тако да код великих звезда, са температуром језгра већом од 17 милиона келвина, CNO циклус постаје најзначајнији извор енергије. Сунце, међутим, нема довољно топло језгро (његова температура износи 15,7 милиона келвина) тако да је  $p$ - $p$  процес и даље доминантан генеришући 98% укупне Сунчеве енергије. Тај учинак је скоро стопроцентан у звездама мањим од Сунца.

Све облике CNO циклуса можемо поделити на ”хладне” (са ознакама CNO-I, CNO-II, CNO-III, CNO-IV) и ”топле” (HCNO-I, HCNO-II, HCNO-III) у зависности од температуре на којима се нуклеарне реакције одвијају. Хладан CNO циклус ефикасан је на нижим температурама и карактеристичан је за појединачне звезде, Топли CNO циклус ефикасан је на вишим температурама које се јављају у бинарним звезданим системима од којих је једна звезда или бели патуљак или неутронска звезда.

Овде ћемо детаљно објаснити само хладан CNO циклус, тип 1 који има далеко највећу учестаност.[65] Графички приказ дат је на слици 2.2



Уочимо да је атом угљеника, употребљен у првом кораку процеса (2.13), регенерисан у последњем што значи да се угљеник у овом процесу нити ствара нити троши већ делује као катализатор нуклеарне реакције чији је укупни енергетски биланс дат једначином (2.11). Редослед трансмутације хемијских елемената током CNO-I циклуса изгледа овако:





Преглед свих типова CNO циклуса дат је у табели 2.1.

Циклус	Нуклеарна реакција	Коментар
CNO-I	$^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{13}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{15}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{12}_6\text{C}$	Најзаступљенији облик CNO циклуса
CNO-II	$^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{17}_8\text{O} \rightarrow ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{15}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N}$	На Сунцу се дешава у свега 0,04% случајева
CNO-III	$^{17}_8\text{O} \rightarrow ^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{17}_8\text{O}$	Само на веома масивним звездама
CNO-IV	$^{18}_8\text{O} \rightarrow ^{19}_9\text{F} \rightarrow ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{17}_8\text{O} \rightarrow ^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_8\text{O}$	Само на веома масивним звездама
HCNO-I	$^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_8\text{O} \rightarrow ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{15}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{12}_6\text{C}$	У бинарним звезданим системима
HCNO-II	$^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_{10}\text{Ne} \rightarrow ^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{15}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N}$	У бинарним звезданим системима
HCNO-III	$^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{19}_{10}\text{Ne} \rightarrow ^{19}_9\text{F} \rightarrow ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_{10}\text{Ne} \rightarrow ^{18}_9\text{F}$	У бинарним звезданим системима

Табела 2.1: Преглед типова CNO циклуса.

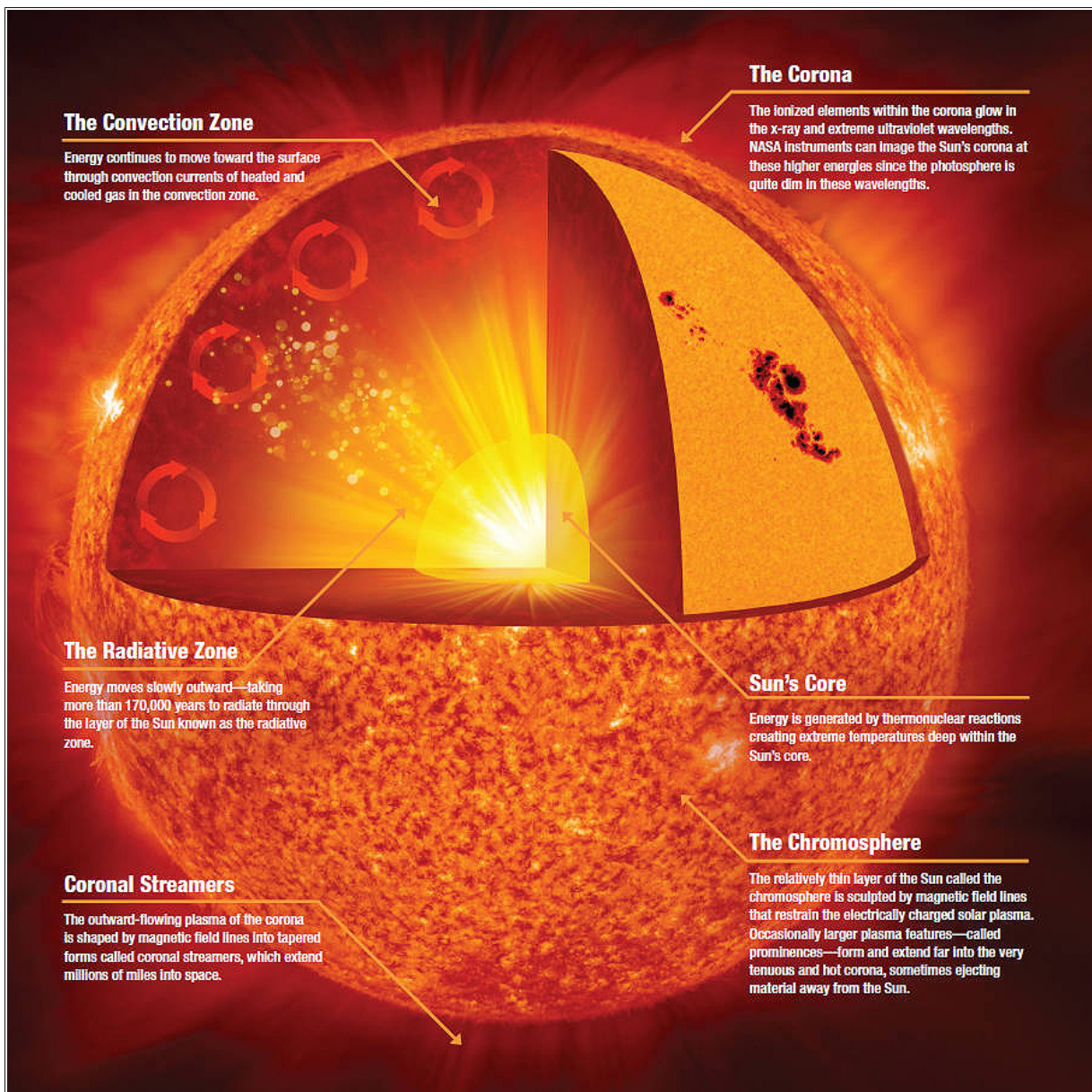
## 2.4 Интерни трансфер енергије

Топлотна енергија створена у централним деловима звезде може да се пренесе до површине комбинацијом кондукције, конвекције и зрачења.[67]

Кондукција је неефикасан механизам за пренос топлотне енергије кроз гас, односно плазму, и има своју улогу само код компактних тела која настају у последњој фази живота звезде (неутронске звезде и бели патуљци). Да ли се топлота од језгра ка површини преноси конвекцијом (струјањем) или зрачењем зависи првенствено од температурног градијента (брзине промене температуре од језгра ка површини) и (не)прозрачности медијума кроз који се топлота преноси.

Радијација подразумева пренос енергије помоћу фотона генерисаних током нуклеарне фузије. Ти фотони не крећу се кроз Сунце неометано већ бивају непрекидно апсорбовани и реемитовани. Ефикасност радијационог преноса енергије зависи пре свега од учестаности апсорпције. Ако је апсорпција сувише честа, ефикасност радијационог трансфера топлоте је мала. У том случају кажемо да је медиј кроз који се фотон креће ”непрозрачан”. Што је степен непрозрачности већи, што је звезда гушћа, радијација представља све мање ефикасан начин да се звезда ослободи енергије нагомилане у унутрашњости.

Конвекција је процес којим врели гас струји из унутрашњости звезде ка површини док охлађена маса струји назад ка центру. Да би се конвекција успоставила неопходно је да температурни градијент буде што већи.



Слика 2.3: Сунчева структура са назначеном радијационом и конвективном зоном.[68]

Који од ова два процеса побеђује? Два фактора су битна:

- **Непрозирност:** Фотони бивају апсорбовани у судару са неутралним атомима доводећи до њихове екситације или јонизације. Звезде мале масе (попут Сунца) имају довољно ниску температуру у спољашњим слојевима да је формирање електрично неутралних атома водоника и хелијума могуће. Таква средина је непрозирна за фотоне па је транспорт енергије путем радијације спор. У овом случају конвекција је много ефикаснија тако да звезде налик Сунцу имају спољашњи конвективни слој.<sup>6</sup> Код најмањих звезда (црвених патуљака) температуре су толико ниске да је практично целокупна унутрашњост звезде непрозирна за фотоне. Зато црвени патуљци трансфер енергије врше искључиво конвекцијом. Сасвим је другачије код великих

<sup>6</sup>Зрнаста структура Сунчеве фотосфере последица је конвекције у његовим спољашњим слојевима. Свако ”зрно” предствља, заправо, врх једног конвективног стуба.

звезда где су, због виших температура, спољашњи слојеви јонизовани па се фотони апсорбују много ређе. У овом случају побеђује радијација.

- **Енергетска продукција:** Замислимо један део гаса дубоко у унутрашњости Сунца који има нешто већу температуру од околине. Као лакши он ће почети да се креће навише, да се шири и хлади практично адијабатски. Ако је температурни градијент мали, овај део гаса ће врло брзо достићи нижи притисак и температуру од околине. Након тога почеће да пропада назад и врло брзо ће се вратити на почетно место. У случају ниског температурног градијента, конвекција је, дакле, неефикасна и зрачење представља много бржи начин трансфера енергије. Мале звезде, попут Сунца, енергију генеришу кроз  $p$ - $p$  процес који према једначини (2.10) умерено зависи од температуре. Зато је и градијент температуре мали па се зато у дубљим слојевима Сунца топлота преноси радијацијом. Међутим, код великих звезда, енергија се генерише кроз CNO циклус који према једначини (2.12) много драстичније зависи од температуре па су и температурни градијенти много већи. Зато је језгро великих звезда конвективно. Екстремно велике звезде, црвени џинови, могу да буду потпуно конвективни од центра до саме површине.

У најкраћем:

- Најмање звезде (црвени патуљци) врше трансфер енергије искључиво конвекцијом.
- Звезде приближно Сунчеве величине имају радијационо језгро и конвективни омотач.
- Звезде веће од Сунца имају конвективно језгро и радијациони омотач.
- Највеће звезде могу да буду потпуно конвективне.

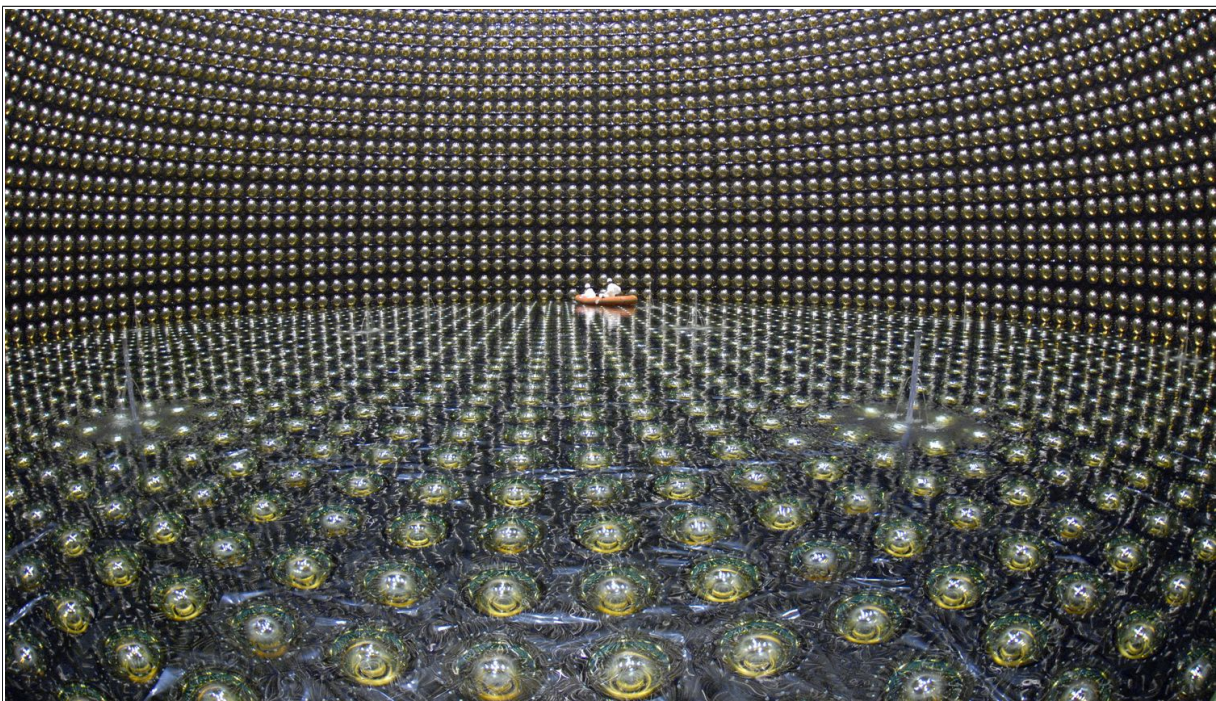
## 2.5 Проблем соларних неутрина

Бетеова теорија детаљно предвиђа тип и учестаност нуклеарних реакција на Сунцу. Те реакције дају одређена квантитативна предвиђања али одговарајућа мерења није лако спровести. Узмимо, на пример, једначину (2.5) која предвиђа тачну енергију емитованог гамазрака. Проблем је што ту енергију не можемо експериментално да проверимо: до нуклеарне реакције долази у унутрашњости Сунца и емитовани фотон бива брзо апсорбован а затим реемитован са нижом енергијом. Када се тај фотон појави на површини Сунца, практично је немогуће утврдити његову првобитну енергију. Бетеова теорија такође предвиђа постепено повећање количине хелијума на рачун смањења количине водоника. Међутим, овај процес је толико спор да су потребни милиона година како би се измериле минималне промене.

Остају нам само неутрини који се стандардно појављују у оба описана типа нуклеарних реакција на Сунцу. Постојање неутрина предвидео је Волфганг Паули 1930. године како би потврдио да се током радиоактивног бета-распада одржавају укупна енергија, момент импулса и спин честица. Без неутрина сви фундаментални закони физике престали би да важе на суб-атомском нивоу. Неутрино је коначно открио Фредерик Рајнс 1956. године

а Нобелова награда за то откриће стићи ће тек 1995. године.[69] Иако је често немогуће предвидети енергију сваког Сунчевог неутрина понаособ (ослобођена енергија дели се са осталим честицама које учествују у процесу), могуће је, са великом прецизношћу, предвидети њихов енергетски распон. Још прецизније се може предвидети број генерисаних неутрина.

Електрон је открио Џон Томсон 1897. године. Затим је 1936. године откривен муон ( $\mu$ ) а 1975. и тау ( $\tau$ ). Обе честице врло су сличне електрону али су знатно масивније и нестабилне. Испоставило се да електрон, муон и тау у нуклеарним реакцијама врло лако мутирају у одговарајуће облике неутрина и обратно. Самим тим, постоје три различите врсте неутрина: електронски ( $\nu_e$ ), муонски ( $\nu_\mu$ ) и тау неутрино ( $\nu_\tau$ ). Сви неутрини створени у нуклеарним реакцијама на Сунцу су електронски неутрини.



Слика 2.4: "Super-Kamiokande", гигантски јапански детектор неутрина који је дао кључни допринос решењу мистерије недостајућих соларних неутрина.[70]

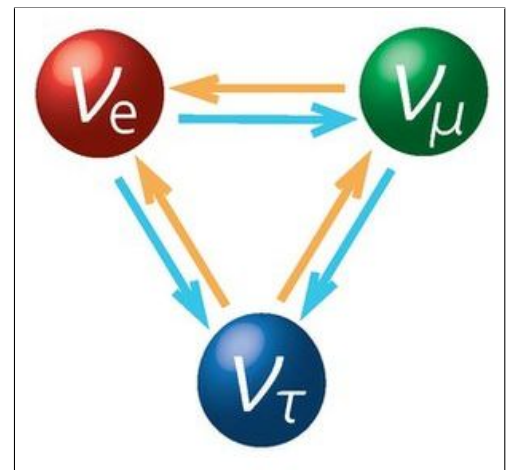
Неутрино је честица која не престаје да изненађује научнике још од тренутка открића.[71] Дуго времена се сматрало да је неутрино честица без масе и да се, налик фотону, креће брзином светлости. Међутим, постоји једна значајна разлика: фотони преносе електромагнетну силу и врло лако их је детектовати. Са друге стране, неутрини пролазе кроз материју с лакоћом, практично без икакве интеракције са њом. Разлог томе је што су неутрини електрично неутралне честице и што делују на друге честице искључиво слабом нуклеарном силом која има екстремно мали домет. То значи да је потребан директан судар неутрина са неком другом елементарном честицом да би се утврдило присуство неутрина. Такви догађаји екстремно су ретки: кроз сваки квадратни центиметар наше коже пролази око 100 милијарди неутрина у секунди али их ми не осећамо јер смо за неутрине практично "провидни". Штавише, неутрини створени у средишту Сунца стижу до нас практично "неокрзнати", са оном енергијом коју су имали у тренутку стварања. Сви ти неутрини су

електронски неутрини: ако бисмо имали детектор који би могао да измери њихов број и енергију, Бетеова теорија могла би да буде експериментално проверена.

Али како ухватити нешто што је по својој природи неухватљиво? Вероватноћа директног судара неутрина са неком другом честицом је мала али ипак постоји. Ако знамо вероватноћу судара и ако је детектор у стању да те сударе броји, можемо са приличном тачношћу да утврдимо колико је неутрина прошло кроз детектор и тај број упоредимо са предвиђањима Бетеове теорије.

Јасно је да такав детектор мора да буде огроман.[71, 72] Први детектор направио је Рејмонд Дејвис 1968. године користећи велики базен напуњен хлорином. Дејвис је био убеђен да ће током месец дана посматрања моћи да изолује неколико атома аргона  $^{37}\text{Ar}$  који настају када неутрино директно погоди језгро атома хлора. И успео је у томе али је пребројао само трећину неутрина које предвиђа Бетеова теорија. Резултати су сместа довели у питање тачност Дејвисовог детектора али је, и поред ситних накнадних корекција у прорачуну, драстична разлика у измереном и предвиђеном броју неутрина опстала. Настао је ”Проблем сунчевих неутрина” којим ће се научници бавити током неколико наредних деценија. Нови јапански детектор неутрина под називом ”KamioKande” направљен 1989. године користио је базен напуњен водом. Системом фото-мултипликатора детектор је регистровао слаб блесак светлости<sup>7</sup> који настаје приликом судара неутрина и електрона у води. И овај детектор је потврдио мањак Сунчевих неутрина, баш као што ће га потврдити и детектори наредне генерације који су могли да региструју неутрине у ширем енергетском опсегу (”Galex”, ”Sage”, ”Super-KamioKande”).

Бетеова теорија била је толико логична и заокружена да, и поред поражавајућих експеримената са неутринима, нико и даље није сумњао у њу. Решење мистерије нађено је тек половином 2001. године када су амерички, британски и канадски научници објавили резултате добијене коришћењем детектора смештеног у једном канадском руднику никла.<sup>8</sup> Детектор, напуњен са хиљаду тона тешке воде<sup>9</sup>, могао је да детектује само електронске неутрине и још једном је показао да њихов број представља тачно једну трећину од очекиваног. Научници су упоредили ове бројке са резултатима новог јапанског детектора ”Super-KamioKande” који је био делимично осетљив и на друге типове неутрина. Испоставило се да су јапанске бројке биле веће.



Слика 2.5: Осцилације неутрина

Закључак се наметнуо сам: један део електронских неутрина трансформисао се у друга два типа на свом путу од Сунца ка Земљи. Другим речима, неутрино има ”шизофрену” природу и може да мења свој идентитет током кретања бесконачно много пута (слика 2.5).

<sup>7</sup>Такозвани ”Черенков ефекат”.

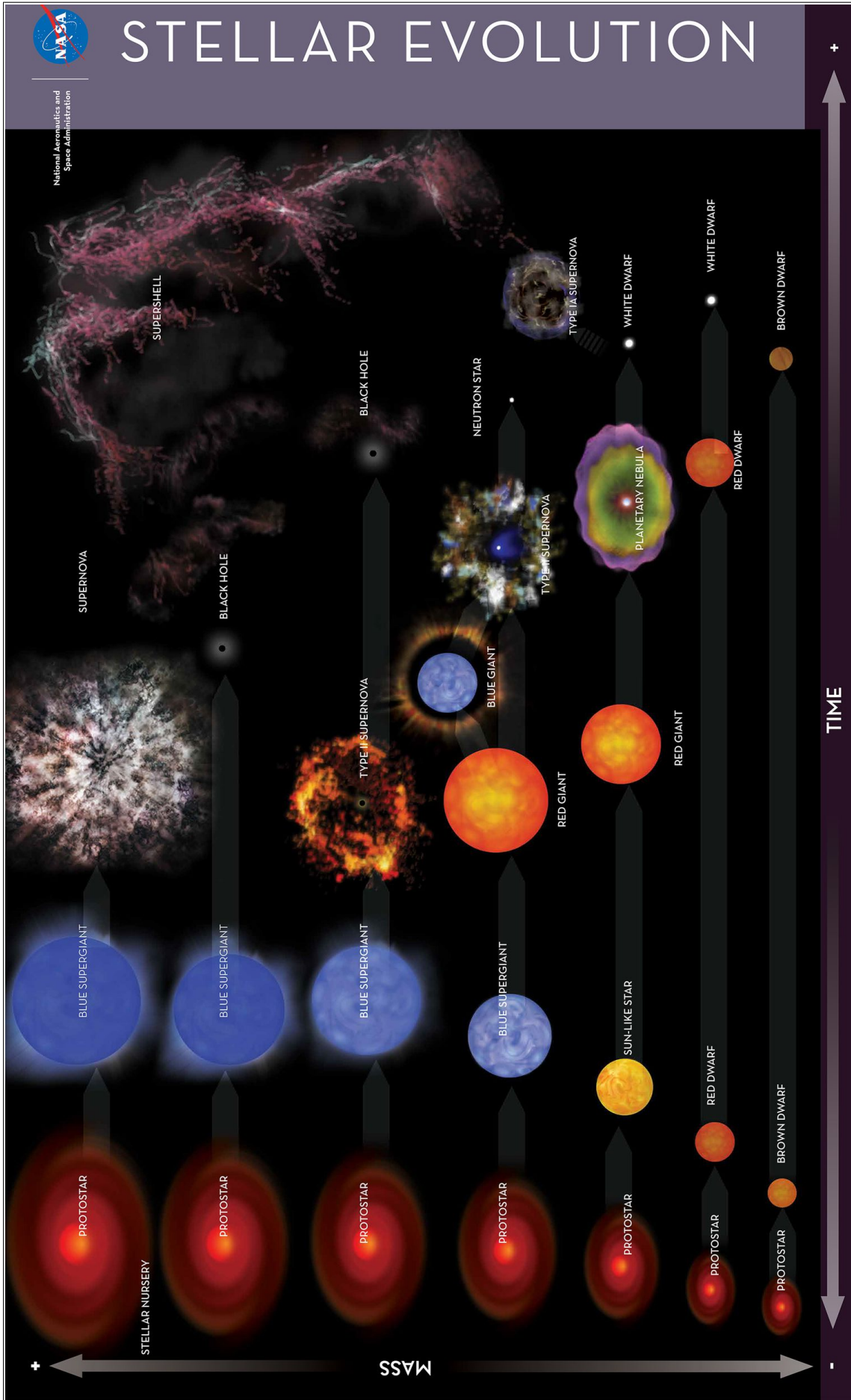
<sup>8</sup>SNO, Sudbury Neutrino Observatory.

<sup>9</sup>Тешка вода има формулу  $\text{D}_2\text{O}$  где је деутеријум (D) тежи изотоп водоника:  $\text{D} = {}^2_1\text{H}$

Сви неутрини генерисани на Сунцу су електронског типа али ће две трећине њих на путу до Земље прећи у муонски и тау тип. Проблем соларних неутрина био је решен а Бетеова теорија добила је своју финалну потврду.

За решавање проблема соларних неутрина, Масатоши Кошиба и Рејмон Дејвис добили су Нобелову награду за физику 2002. године.[55] Осцилације неутрина данас су есенцијални део стандардне теорије елементарних честица. Уз то, показало се да неутрино може да мења свој тип само ако има масу мировања што значи да се неутрино ипак не креће брзином светлости. Маса мировања неутрина толико је мала да ни до данас није утврђена али се зна да је бар сто милиона пута мања од масе једног електрона.

Поменимо, на крају, да су Сунчеви неутрини највећим делом производ ланчаног  $p-p$  процеса. Неутрини који су производ CNO циклуса детектовани су тек 2020. године.[73]



Слика 2.6: Преглед еволуције звезда различитих маса.[74]





## Глава 3

### Крај звезде

Свака звезда највећи део свог живота проводе у тачки H-R дијаграма чији се положај незнатно мења све док у језгру звезде има довољно водоника за континуирану нуклеарну фузију. Током водоничне фузије формира се хелијум који се као тежи елемент лагано гомила у центру звезде као инертни ”хелијумски пепео”. Када концентрација водоника у језгру звезде падне испод границе потребне за одржавање нуклеарне фузије, наступају драматичне промене и звезда лагано почиње да напушта своје место у главном низу H-R дијаграма. Начин даље еволуције звезде пре свега зависи од њене масе иако постоје значајне варијације у зависности од њене металичности (количине тежих елемената).

Приближна дужина укупног живота звезде  $\tau$  у годинама може се израчунати на основу њене масе  $M$ : [75]

$$\tau = 10^{10} \left( \frac{M_{\odot}}{M} \right)^{2.5} \quad (3.1)$$

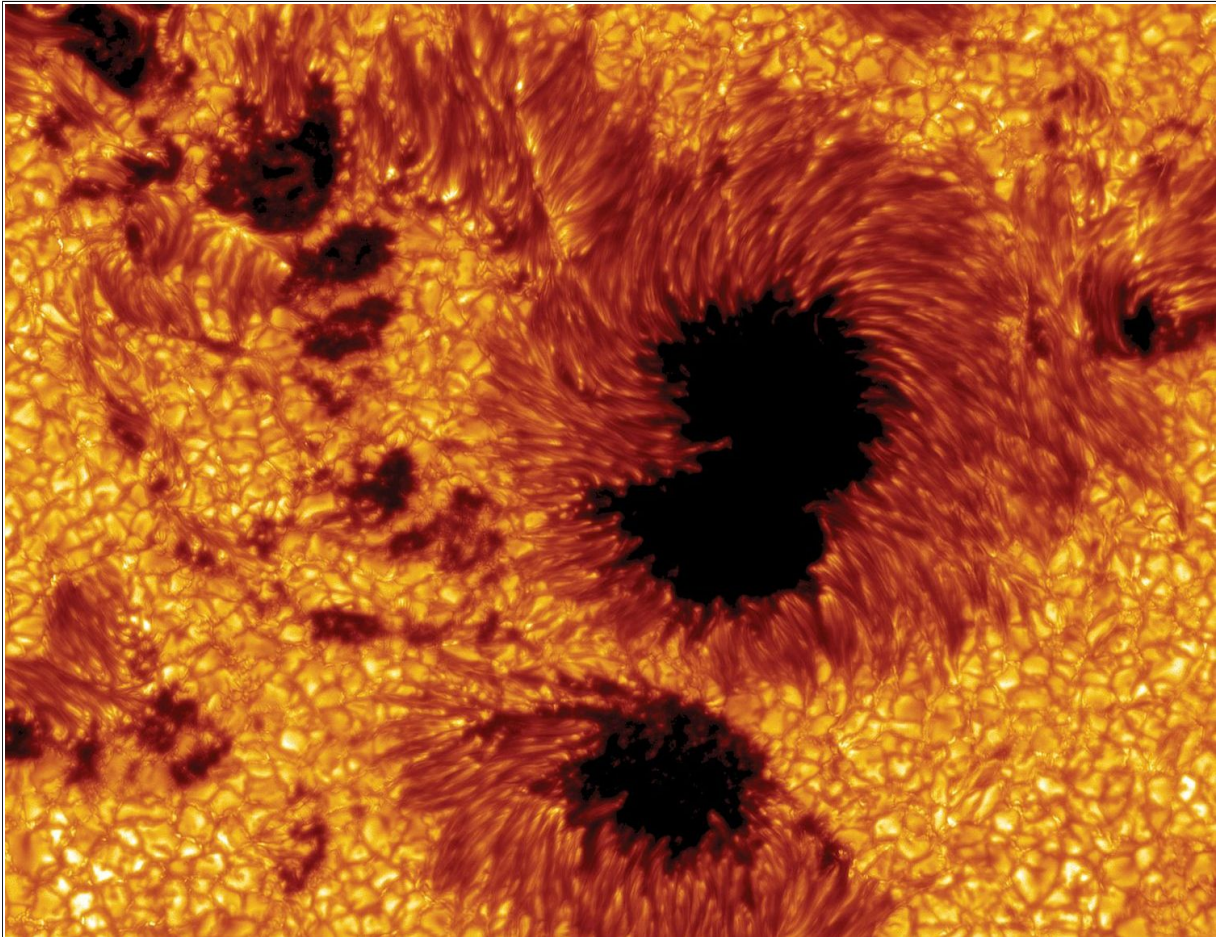
Из саме формуле очигледно је да масивније звезде живе много краће од оних са мањом масом. Узмимо два екстремна примера:

- У време свог открића звезда EBLM J0555-57Ab била је звезда са најмањом масом, тик изнад минимално потребне за отпочињање нуклеарне фузије. Њена маса износи  $85 \pm 4$  Јупитерових маса или  $0,081 M_{\odot}$ . Према формули (3.1), њен очекивани животни век износи  $5,35 \times 10^{12}$  (више од 5 билиона) година. [76]
- До данас је откривено преко 40 звезда чија је маса већа од  $100 M_{\odot}$ , од којих се половина налази у небули ”Тарангула” у Великом Магелановом облаку, сателитској галаксији Млечног пута. Најмасивнија до сада откривена звезда, BAT99-98, има масу од  $226 M_{\odot}$  и фантастичну луминозност од  $5 \times 10^6 L_{\odot}$ . [16]. Према формули (3.1), њен очекивани животни век износи свега 14.000 година.

С обзиром да је Сунце за нас далеко најважнија звезда, еволуција звезда чија је маса упоредива са  $M_{\odot}$  заузима централно место у даљем тексту. У другој групи налазе се звезде чија је маса знатно мања од  $M_{\odot}$ . Ове звезде налазе се у доњем десном углу H-R дијаграма (црвени патуљци). У трећој групи налазе се звезде чија је маса значајно већа од  $M_{\odot}$  које

се налазе у горњем левом углу H-R дијаграма (плави цинови). Видећемо да ова три типа звезда еволуирају на потпуно различите начине.

### 3.1 Еволуција Сунца



**Слика 3.1:** Група сунчевих пега снимљена шведским соларним телескопом. У околини пега уочава се грануларна структура фотосфере. Жута боја је вештачки појачана, стварна боја Сунца је скоро бела.[77]

#### 3.1.1 Основни подаци

Сунце је жута патуљаста звезда класе G2V.<sup>1</sup> И поред овакве класификације то не значи да је Сунце мала звезда, напротив: већа је од 95% звезда у нашем галактичком комшилуку. Сунце је у сваком погледу доминантно тело у Сунчевом систему: не само да је једино тело које генерише енергију већ садржи преко 99% укупне масе Сунчевог система. Полупречник Сунца  $R_{\odot}$  је 109 пута већи од полупречника Земље што значи да је запремина Сунца око милион пута већа од запремине Земље. Међутим, маса Сунца  $M_{\odot}$  износи 330.000 маса Земље што значи да је просечна густина Сунца нижа од просечне густине Земље, иако је густина у центру Сунца око  $150\text{g/cm}^3$ . [78, 79] Сунце има облик скоро савршене сфере

<sup>1</sup>Бројка 2 значи да је Сунце по температури друга најтоплија звезда унутар спектралне класе G. Суфикс V означава да је реч о звезди која се налази у главном низу H-R дијаграма

чији период ротације варира од 25 дана на екватору до 28 или 29 дана на половима. Ова разлика има велики утицај на формирање Сунчевог магнетног поља.[78]

Температура у центру Сунца износи око 15 милиона келвина а притисак 3.500 килобара. Оваки услови омогућавају одвијање нуклеарне фузије коју смо детаљно описали у секцијима 2.3.1 и 2.3.2. Температура површине (фотосфере) много је нижа и износи око 5.800 келвина. На овој температури материја је у гасовитом стању тако да Сунце нема чврсту површину већ слој атомског водоника и хелијума уз минималну количину молекуларне материје. Услед конвекције у вишим слојевима сунца, фотосфера има зрнасту структуру која се може уочити само телескопима. Изнад фотосфере налази се хромосфера, слој дебљине 7.000 километара који се може видети као ружичасти прстен током помрачења Сунца. Температура у хромосфери постепено расте до 8.000 келвина.[78]

Изнад хромосфере налази се корона, тамни омотач Сунца који сеже дубоко у Сунчев систем и у коме температура вртоглаво расте до милион келвина.<sup>2</sup> На растојању од око  $5R_{\odot}$  корона се трансформише у Сунчев ветар, струју наелектрисаних честица која се брзином од 400km/s шири од Сунца у радијалним правцима и формира прозрачни ”мехур”<sup>3</sup> окружен међузвезданом материјом.[79, 81]

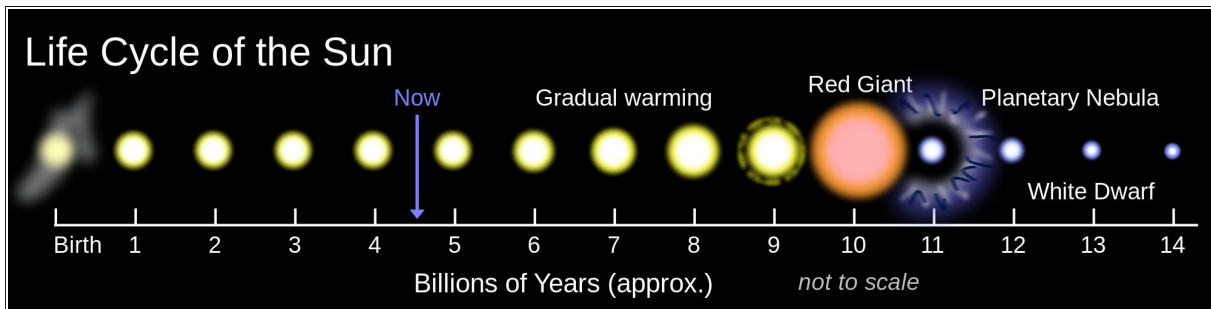
Сунце је врло стабилан извор енергије. Његова снага износи 385 јотавата ( $3,85 \times 10^{26}W$ ) са максималним варијацијама од 0,1%, што значи да се, захваљујући фузији, сваке секунде око 4,2 милиона тона Сунчеве масе конвертује у енергију. Овако велика енергетска продукција последица је, пре свега, огромне Сунчеве запремине а не велике ефикасности нуклеарне фузије: један кубни метар материје у центру Сунца где је фузија најинтензивнија има снагу од свега 275W.[79]



**Слика 3.2:** Снимак Сунца током потпуног помрачења 1999. године. Танки ружичасти слој око Сунца представља хромосферу. Изнад ње је корона и усијана Сунчева атомсфера чији је сјај раван сјају Месеца. Помрачење Сунца не сме се посматрати незаштићеним оком осим самог тренутка тоталног помрачења када заштита није потребна.[80]

<sup>2</sup>Механизам драстичног скока температуре у Сунчевој корони није до краја објашњен.

<sup>3</sup>Када Сунчев ветар дође у контакт са околном међузвезданом материјом, он почиње да успорава. Хелиопауза, која се конвенционално сматра границом Сунчевог система, представља област где је снага Сунчевог ветра уравнотежена снагом ветра међузвезданог медијума. Сонда ”Војадер Г” прошла је кроз хелиопаузу и напустила Сунчев систем у августу 2012. године на растојању од 121AU од Сунца.[81]



Слика 3.3: Животни циклус Сунца, од протозвезде до белог патуљка.[82]

Неке од најинтересантнијих појава на Сунцу, као што су Сунчеве пеге<sup>4</sup>, протуберанце<sup>5</sup> и масивне Сунчеве ерупције (“Coronal Mass Ejections”), немају велики значај за тему овог рада па их нећемо детаљније разматрати.

### 3.1.2 Еволуција Сунца до данас

Претпоставка је да су Сунце и Сунчев систем настали из молекуларног облака пре око 4,6 милијарди година. Сунце је, пре него што је заузело своје место у главном низу H-R дијаграма, прошло кроз T-Таури фазу описану у секцији 1.2.3. Пут од T-Таури звезде до позиције у главном низу био је релативно кратак, без драматичних промена. Од тада па да до данас, Сунце генерише енергију у језгру чији пречник износи око 25% пречника звезде (мање од 2% укупне запремине). Током тог периода у језгру се, као тежи елемент, гомила хелијум који апсорбује већу количину радијације од околног водоника па и температура у језгру расте. Повећана температура језгра резултује убрзавањем нуклеарне фузије што опет резултује повећањем сјаја и величине Сунца. Овај процес је врло спор али незаустављив: луминозност Сунца расте брзином од 1% на сваких сто милиона година.[79]



Слика 3.4: Сунчева протуберанца.[83]

Данашње Сунце је око 40% сјајније од Сунца у време формирања планета. Првобитно Сунце генерисало је много мање енергије тако да је Земља, под претпоставком да је у својој раној фази имала исту орбиту као и данас, била ледена, мртва планета без текуће воде. То би одложило настанак живота за неколико милијарди година. Докази међутим говоре супротно: фосили из најранијих геолошких периода потврђују да је живот на Земљи на-

<sup>4</sup>Тамнија места на Сунцу са нешто нижом температуром и неупоредиво јачим магнетним пољем (0,3Т). Њихов број и величина као и Сунчева активност осцилују са периодом од 11 година.

<sup>5</sup>Масивни делови Сунчеве плазме чији највећи део лебди изнад фотосфере под дејством Сунчевог магнетног поља. Једном формиране протуберанце најчешће имају лучни облик али могу да личе и на облак, зид или левак. Димензијама далеко превазилазе величину Земље и могу да трају од неколико дана до неколико месеци.



**Слика 3.5:** Уметничка визија Сунчевог заласка из ”археанске епохе” (пре 2,8-3,9 милијарди година). У овом периоду Земља се довољно охладила тако да су се усред огромних океана формирали први континенти, много мањи од данашњих. Сунце је блеђе, мање и хладније. Месец изгледа већи него данас јер је у то време био много ближи Земљи.[84]

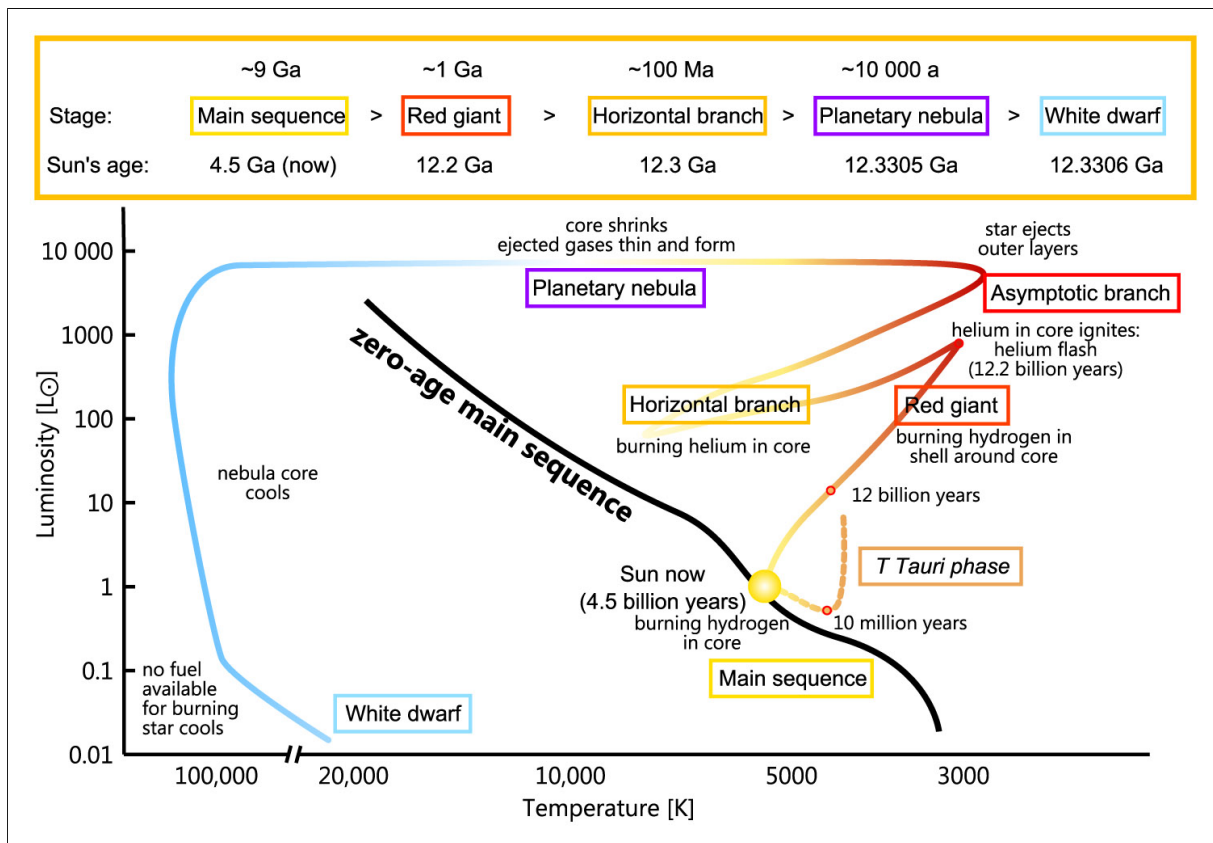
стао врло рано и да се просечна температура на Земљи није драстично мењала. Да би тако нешто било могуће, рана Земља морала је да има неки регулаторни механизам којим је, у условима слабог Сунца, одржавала довољно високу температуру погодну за брз развој живота. Могућности су бројне: атмосфера богата гасовима стаклене баште, висок степен облачности или јака вулканска активност. Такође, могуће је да је младо Сунце било масивније, самим тим и сјајније. Интензивна емисија Сунчевог ветра у раној фази његове еволуције, уз губитак масе и луминозности, имала је за последицу мање-више константу температуру на Земљи.[79]

Сунце се данас налази, отприлике, на половини главне фазе свог живота када се фузија још увек врши у самом језгру с тим да су резерве водоника у њему преполовљене. Све док те резерве трају Сунце ће се налазити у главном низу али ће се, због повећања луминозности и температуре, врло споро померати ка горњем левом углу Н-Р дијаграма.

### 3.1.3 Будућност Сунца

#### Напуштање главног низа

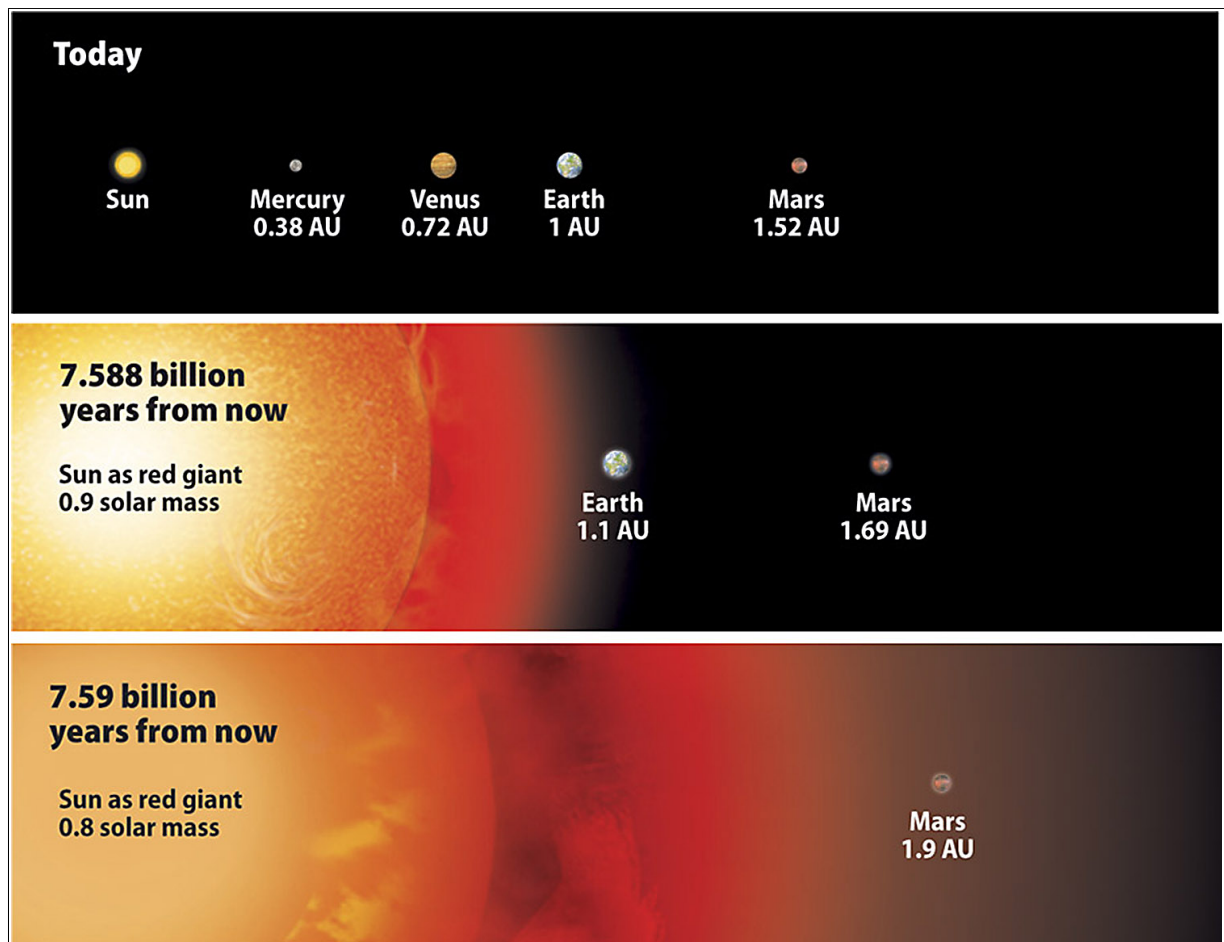
Процес повећања луминозности Сунца ће се наставити све док је језгро звезде богато водоником. Али након 5,4 милијарди година[79] продукција енергије ће почети да пада и поред повећања густине и температуре у језгру, јер су резерве водоника у њему практично исцрпљене. Када нуклеарне реакције у језгру потпуно замру, густина језгра ће се додатно повећати све док интерни притисак у њему не достигне вредност потребну да равнотежа с гравитацијом буде поново успостављена. Сажимање језгра и конверзија гравитационе потенцијалне енергије у топлоту достићи ће тачку када притисак и температура на спољашњој површини језгра постају довољни да започну нуклеарну реакцију у слоју водо-



**Слика 3.6:** Током своје еволуције Сунце мења своју температуру и луминозност тако да се и његова позиција на H-R дијаграму мења. На овој слици приказана је комплетна еволуција Сунца још од времена када је као млада T-Таури звезда била ван главног низа па све до крајњег стадијума белог патуљка.[85]

ника непосредно око језгра. Парадоксално, ова транзиција резултује новим повећањем луминозности: нуклеарна фузија сада се дешава у околини врелог звезданог језгра где је температура екстремно висока а концентрација водоника скоро стопроцентна.[86]

Сунце напушта главни низ на H-R дијаграму (види слику 3.6) и улази у фазу суб-гиганта коју карактерише нешто брже повећање луминозности и величине, уз незнатно смањење површинске температуре. Од звезде која врши фузију искључиво у свом језгру, Сунце се трансформисало у звезду са инертним хелијумским језгром и фузијом у околним слојевима водоника. На дело ступа позитивна повратна спрега: повећана брзина фузије у спољашњим слојевима Сунца резултује генерисањем све веће количине хелијумског пепела. Услед тога, хелијумско језгро постаје све веће и све топлије што опет доводи до повећања брзине нуклеарне реакције у слојевима изнад њега. У условима позитивне повратне спреге немогуће је достићи тачку стабилности. Зато ниједан овакав природни или вештачки систем не може да траје вечно. Ово се најбоље може поткрепити бројкама. Ако узмемо да је  $L_{\odot}$  данашња луминозност Сунца, кроз 4,5 милијарди година луминозност ће скочити на  $1,67L_{\odot}$ . Након још 1,6 милијарди година луминозност ће достићи  $2,2L_{\odot}$ , довољно да Земљу претвори у спржену стену.



Слика 3.7: Пораст величине Сунца током фазе црвеног џина. Последњи сегмент је спекулативног карактера: судбина Земље још увек није прецизно утврђена.[87]

### Фаза црвеног џина

Када укупна старост Сунца достигне критичних 12 милијарди година догађаји ће почети да се нижу све већом брзином. Сунчева позиција на H-R дијаграму почиње да се помера нагоре (јер луминозност расте) и удесно (јер температура површине опада). Хелијумско језгро достиже тачку када од гравитације више не може да се ”брани” гасним притиском, чак и када је тај гас загрејан на више десетина милиона степени. Зато се у центру Сунца формира растуће језгро дегенерисаног хелијума које се од даље компресије брани дегенеративним притиском електрона.<sup>6</sup>[86] Дегенеративни притисак објашњен је у секцији 1.2.7

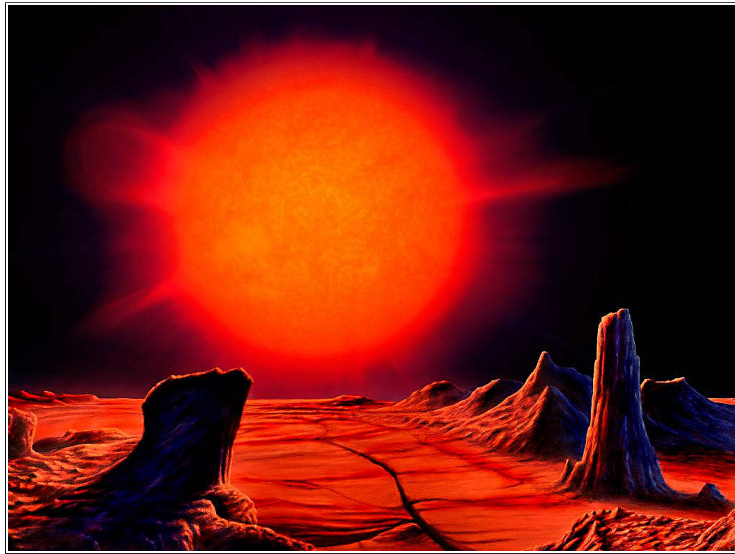
Позитивна повратна спрега сада доводи до експоненцијалног раста величине и луминозности Сунца које сада улази у фазу црвеног џина. Сунчев ветар постаје све интензивнији тако да ће Сунце током овог периода изгубити једну трећину своје масе.[79] Око 500 милиона година након критичног тренутка луминозност ће достићи  $34L_{\odot}$ , довољно да на Земљи створи бљештава језера истопљеног бакра и алуминијума. За само 45 милиона година луминозност ће скоčiti на  $105L_{\odot}$  а за још 40 и на фантастичних  $2.300L_{\odot}$ . [86] У условима све веће енергетске продукције и све ниже површинске температуре, површи-

<sup>6</sup>Неки прорачуни говоре да се ово дешава када хелијумски пепео достигне 13% Сунчеве масе.

на Сунца постаје колосално велика сфера разређеног гаса тамно-црвене боје. Експанзија ће се зауставити тек када спољашњи слојеви Сунца постану довољно хладни да постану непрозирни за радијацију услед чега конвекција постаје доминантан начин трансфера топлоте.[88] Сунце ће нарасти до те мере да ће прогутати Меркур док је судбина Венере и Земље теже предвидљива. Иако је скоро извесно да ће Сунце на врхунцу фазе црвеног џина обухватити садашње орбите обе планете, постоји могућност да ће се те орбите временом удаљити од Сунца јер ће Сунчева маса у међувремену значајно опасти услед интензивног соларног ветра. Чак и ако преживи ”блиски сусрет” са црвеним џином, од Земље ће, по својој прилици, остати само њено усијано гвоздено језгро.[86]

Код великих звезда као што су црвени џинови CNO-циклус постаје доминантан начин генерисања енергије (види секцију 2.3.2). Такође, зона конвекције може да постане толико широка да захвати и делове Сунца у којима се налазе продукти фузије и део тог материјала избаци на површину звезде. Тај процес зове се ”dredge-up”<sup>7</sup> и током последњих фаза еволуције звезде може се поновити неколико пута.[90]

”Dredge-up” процес први пут се јавља управо у овој фази звездане еволуције. На површини Сунца могу се спектроскопски уочити карактеристични знаци водоничне фузије: нижи однос  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  и измењена пропорција угљеника и азота.



**Слика 3.8:** Земља као беживотна спржена стена у поодмаклој фази евоуције Сунца у црвеног џина. Небом доминира огромно Сунце на позадини која је, услед непостојања атмосфере, потпуно црна.[89]

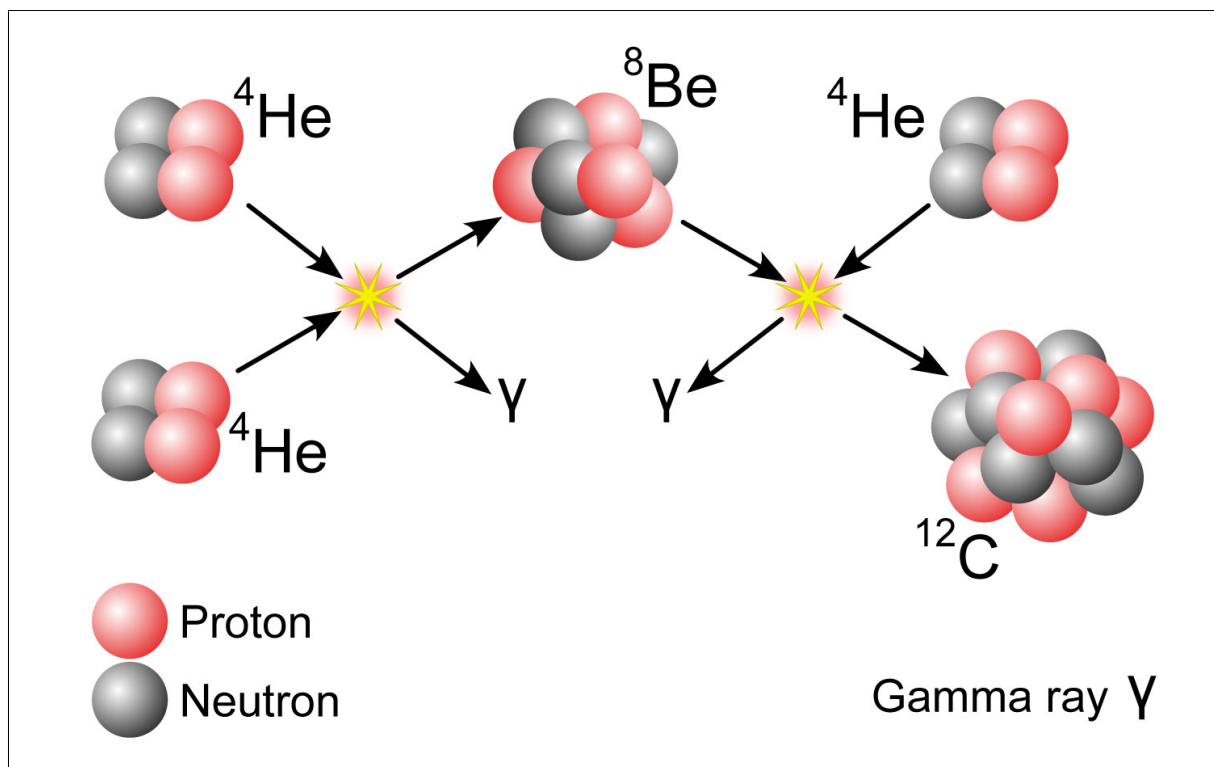
### Троструки алфа процес

Што се више хелијумског пепела гомила у центру Сунца, то се већа количина хелијума претвара у дегенерисану материју како би језгро издржало све већи гравитациони притисак. Настаје парадоксална ситуација: док се спољашњи делови Сунца све више шире, Сунчево језгро колабира у дегенерисану материју и све више личи на белог патуљка који сада садржи 40% укупне масе звезде.<sup>8</sup> Након 1,2 милијарде година од тренутка када је Сунце напустило главни низ, температура у језгру достићи ће 100 милиона келвина. На тако високој температури почеће фузија хелијума из дегенерисаног језгра у угљеник кроз такозвани ”троструки алфа процес”. Када језгро не би било дегенерисано већ гасовито,

<sup>7</sup>Уз најбољу вољу, аутор овог текста није нашао адекватан превод овог термина па ћемо га наводити у оригиналу.

<sup>8</sup>О белим патуљцима биће више речи у секцији 4.1.





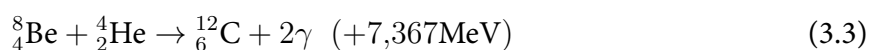
Слика 3.9: Троструки алфа процес креира језгро угљеника од три језгра хелијума.[91]

ослобођена енергија би изазвала ширење језгра, његово хлађење и успоравање нуклеарне реакције. Међутим, дегенерисана материја нема могућност саморегулације, у дегенерисаном хелијумском језгру сви сигурносни механизми су искључени. Као што смо већ објаснили, дегенерисана материја много више личи на течност него на гас: ако дегенерисаној материји додајете топлоту, једини резултат тог процеса је повећање њене температуре. Троструки алфа процес генерише све више енергије, дегенерисана материја се све више загрева што опет убрзава нуклеарну реакцију. Процес добија колосално убрзање захваљујући чињеници да брзина троструког алфа процеса драстично зависи од температуре: ако се она удвостручи, брзина нуклеарне реакције увећаће се  $10^{12}$  пута.[86]

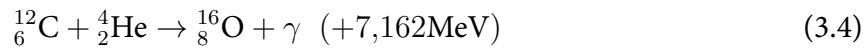
Троструки алфа процес почиње фузијом два језгра хелијума (алфа честице) у језгро берилијума[92, 93].



Формирано језгро берилијума је веома нестабилно и има време полураспада од  $8 \times 10^{-17}\text{s}$ . Рекло би се да је ово време сувише кратко да би берилијум могао да учествује у некој следећој нуклеарној реакцији. Међутим, Едвин Салпетер је 1952. године израчунао да је ово време заправо дуже од просечног времена слободног кретања алфа честице при температури од 100 милиона келвина. То значи да у већини случајева атом берилијума има сасвим довољно времена да се судари са неком алфа честицом и формира језгро угљеника:[93]



Креирано језгро угљеника налази се у побуђеном резонантном стању и крајње је нестабилно.<sup>9</sup> Такво језгро угљеника ће се, скоро увек, спонтано распасти на три алфа честице враћајући сву материју у почетно стање. Међутим, на сваких 2.420 језгара угљеника у побуђеном стању, једно ће прећи у стабилно стање емитујући вишак енергије у виду гама зрака. Део стабилизваних језгара угљеника затим бива конвертован у кисеоник:[92]



У звездама Сунчевог типа, угљеник и кисеоник су главни нуспроизводи фузије хелијума. У већим звездама кисеоник може даље да се конвертује у неон а неон у још теже елементе. Напоменимо да се на Сунцу одвија још једна нуклеарна рекација која фузионише водоник и хелијум у литијум  ${}^5_3\text{Li}$ . Ова реакција, међутим, не води никуд јер је време полураспада овог изотопа литијума сувише кратко, свега  $3,7 \times 10^{-22}\text{s}$ .

### Хелијумски бљесак

Процес нагомилавања хелијума у дегенерисаном језгру завршава се његовом експлозијом. У свега неколико минута биће фузионисано око 6% расположивог хелијума што ће произвести енергију равну оној коју је некад генерисало Сунце за 200.000 година. На самом врхунцу експлозије, Сунчево језгро ће на кратко достићи луминозност читаве галаксије. Ова појава има прикладно име: ”хелијумски бљесак”. Иако се приликом бљеска ослобађа колосална количина енергије, њен највећи део бива апсорбован од стране дегенерисаног језгра и одлази на повећање кинетичке енергије хелијумских нуклеуса у њему. Нуклеуси достижу довољну брзину да напусте дегенерисано језгро и поново формирају гас огромног притиска и температуре. На крају процеса, дегенерисано хелијумско језгро ће у потпуности ”испарити”. Занемарљива количина енергије хелијумског бљеска стићи ће до спољашњих слојева звезде. Посматрач са стране не би приметио ништа значајно али је унутрашња промена огромна: срце Сунца је ”прободено” и тиме је окончана фаза црвеног цина.[86]

Услед брзог ширења обновљеног хелијумског језгра, његова температура драстично пада. Хладније језгро успорава фузију у слојевима водоника који га окружују па се смањује и количина произведене енергије. У року од свега 10.000 година уследиће колапс који ће Сунчев пречник и луминозност свести на свега 2% од максимално достигнутих вредности. Резултат хелијумског бљеска на крају биће наранцасто-жута звезда десетак пута већа од Сунца и око 40 пута луминознија. На H-R дијаграму (слика 3.6) Сунце се помера надоле (јер луминозност опада) и улево (јер због веће компактности звезде температура расте).[86]

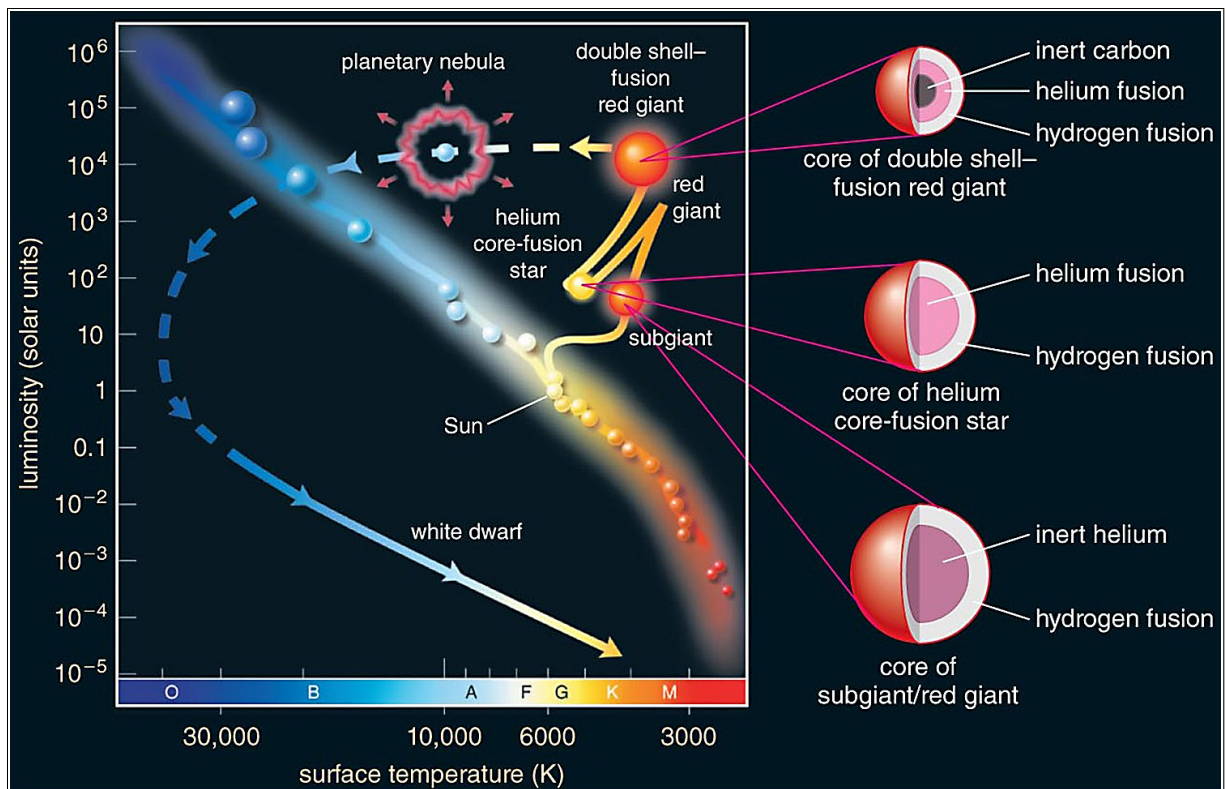
### Суб-гигантска фаза

Сунце је сада суб-гигантска звезда са двоструким извором енергије. У његовом језгру налази се мешавина угљеника, кисеоника и хелијума, изнад њега је масивни слој хелијума и на крају релативно танки слој водоника. Читава прича се понавља на сличан начин као и

<sup>9</sup>Такозвано ”Хојлово стање”.

током фазе црвеног џина с том разликом што улогу хелијума преузима угљеник а улогу водоника - хелијум. Хелијумска фузија је релативно неефикасна: хелијум производи само 9% енергије коју производи иста количина водоника. Највећи део енергије Сунца и даље долази од водоника.

Овакво Сунце је стабилно све док се фузија хелијума врши у његовом језгру и постоји хидростатичка равнотежа. Луминозност ће лагано расти од почетних  $45L_{\odot}$  до  $110L_{\odot}$ . Због високе температуре језгра хелијум сагорева врло брзо, око сто пута брже него у случају водоничног језгра. То значи да ће се резерве хелијума у језгру суб-гигантског Сунца потрошити много брже: фаза релативне стабилности неће трајати дужи од сто милиона година.



Слика 3.10: Промена унутрашње структуре Сунца током две фазе црвеног џина.[94]

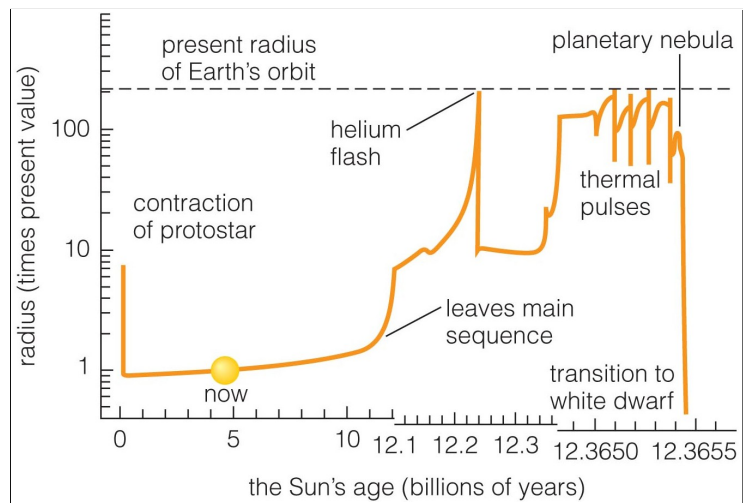
### Фаза асимптотског црвеног џина

Висока температура све већег угљеничног језгра доводи до почетка хелијумске фузије у слоју око њега. Сунце поново почиње да се шири и на H-R дијаграму почиње да се креће надесно (површинска температура опада и Сунце поново добија тамно-црвену боју) и нагоре (јер луминозност расте), дуж такозване ”асимптотске гране црвеног џина” која је скоро паралелна са линијом формираном током првобитне фазе ширења (слике 3.6 и 3.10).

Угљенично језгро расте нагомилавањем угљеника као главног фузионог продукта, његова температура се повећава што доводи до још брже фузије хелијума у околним слојевима. ”Dredge-up” процес понавља се по други пут тако што се хелијум и угљеник из језгра конвекцијом избацују на површину звезде. Резултат овог процеса може да буде вишак угље-

ника у односу на кисеоник у површинском слоју звезде. Ако је тај вишак значајан, процес може да води до формирања тзв. ”угљеничне звезде”.<sup>10</sup> Ипак овакав сценарио у случају Сунца није много вероватан.[90]

При крају ове фазе Сунце ће почети да губи велики део своје масе кроз интензиван Сунчев ветар. Ова појава карактеристична је за све звезде чија је маса мања од  $8M_{\odot}$ . Код карбонских звезда овај губитак масе може да достигне  $10^{-4}M_{\odot}$  годишње што значи да би читав звезда могла да испари за свега 10.000 година. Илустрације ради Сунчев губитак масе у садашњем добу живота мањи је за десет редова величине. Узрок овако интензивног губитка масе



**Слика 3.11:** Еволуција Сунчевог полупречника у односу на данашњу вредност.[94]

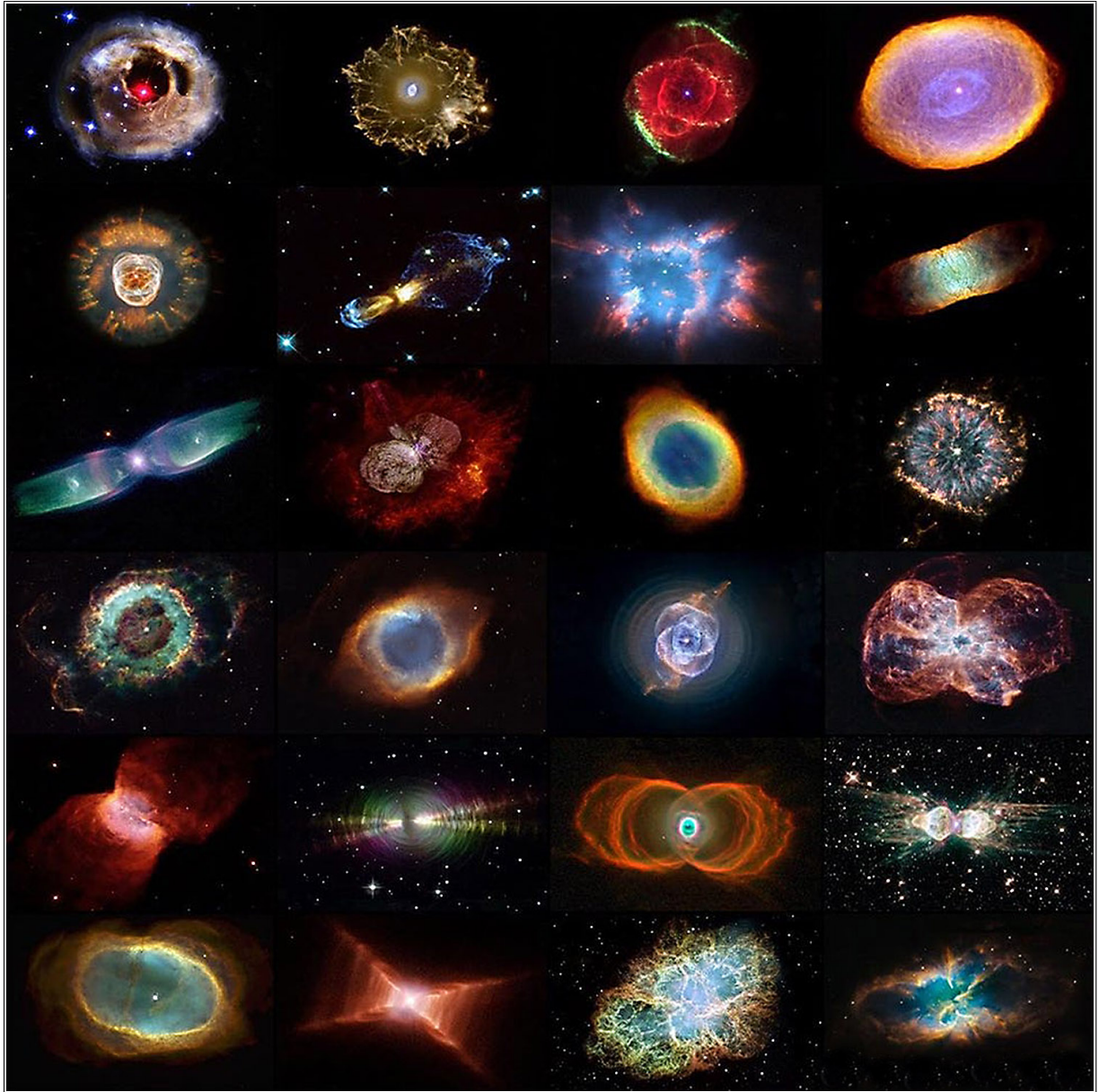
је присуство ситних честица прашине у атмосфери звезде. Ове честице апсорбују фотоне које звезда емитује преузимајући њихов импулс. Пре или касније, честице прашине достићи ће брзину која им омогућава да савладају гравитациону силу и напусте звезду у виду прашњавог облака који за собом повлачи и друге елементе из околине. Соларни ветар може да има толику густину да сама звезда постаје оптички невидљива тако да се може посматрати само у инфрацрвеном делу спектра.[32]

У почетку ће се угљеник нагомилан у језгру од гравитационог колапса бранити повећањем притиска и температуре али у једном тренутку то неће бити довољно. Угљенично језгро колабира до границе када се даље сажимање спречава дегенеративним притиском електрона, достижући притом густину будућег белог патуљка.[86]

### Планетарна небула и крај Сунца

Сунце нема довољну масу да настави ланац нуклеарних реакција помоћу неког ”угљеничног бљеска” који би личио на онај колосални ”хелијумски”. И без тога, сам крај еволуције Сунца је веома сложен и брз процес. Узрокован је чињеницом да хелијумски и водонични слојеви не сагоревају истом брзином. Врелији слој брзосагоревајућег хелијума шири се брже од водоничног и у једном тренутку доћи ће до инверзије: хелијумски слој наћи ће се на површини звезде. С обзиром да су ту притисци и температуре најнижи, фузија хелијума престаје. Али водонични слој је и даље активан и постојано генерише нове количине хелијума које гравитирају ка дегенерисаном језгру. Када се у његовој околини нагомила довољна количина хелијума доћи ће до спонтане нуклеарне реакције која траје

<sup>10</sup>Услед великог вишка угљеника, он ће за себе везати целокупан кисеоник у виду угљен-моноксида. Преостали угљеник остаје слободан да формира друга једињења. Читав процес даје оваквим звездама карактеристичну црвену боју рубина.



Слика 3.12: Планетарне небуле, вероватно најлепши објекти у космосу.[96]

кратко али производи велике количине енергије. Стручни назив за овај мини-хелијумски бљесак је ”термални пулс”[79]. Ослобођена енергија утицаће на ширеће спољашњег слоја водоника прекидајући нуклеарну фузију у њему на кратко време.[86] Интервал између узастопних термалних пулсева је све краћи што је звезда старија. Сваки термални пулс изазива драматично повећање Сунчеве луминозности које траје деценијама уз одбацивање дела Сунчеве масе у околни простор.[95]

Након 4 до 5 термалних пулсева у периоду од једва 100.000 година, спољашњи слојеви Сунца биће потпуно ”одувани” у међузвездани простор, одвојени од дегенерисаног угљеничног језгра у облику такозване ”планетарне небуле” која ће са собом однети око 45% масе Сунца.<sup>11</sup>[86] Одбацивање планетарне небуле је релативно миран процес, ни налик на експлозију супернове која је карактеристична за много масивније звезде. Планетар-

<sup>11</sup>Назив ”планетарна небула” данас је стандардни део астрономске терминологије иако је потпуно неадекватан јер нема никакве везе са планетама. Настао је у XVIII веку након што је Хершел својим скромним

не небуле имају значајну улогу у еволуцији космоса: оне обогаћују међузвездану материју тежим елементима као што су угљеник и кисеоник. Тај материјал биће једнога дана искоришћен за стварање наредне генерације звезда и планета.

Остатак материје звезде биће сконцентрисан у дегенерисаном угљеничном језгру чија је температура већа од 170.000 келвина. Непосредно након одбацивања планетарне небуле луминозност језгра достиже рекордних  $4.000L_{\odot}$ . За посматрача са стране изгледа као да је звезда променила своју боју из тамноцрвене у бљештаво белу с обзиром да су нестали спољашњи слојеви који су скривали њено усијано језгро. Фаза асимптотског црвеног цина окончана је трансформацијом звезде у белог патуљка чије су особине и даља еволуција описани у секцији 4.1.



Слика 3.13: Планетарна небула NGC5189 снимљена космичким телескопом "Хабл".[97]

Бели патуљци, непосредно након формирања, су најлуминознији објекти у космосу. Њихово зрачење најинтензивније је у X-делу спектра. Планетарна небула обасјана X-зрацима почиње да светли дугиним бојама при чему свака боја одговара другачијем хемијском саставу.<sup>12</sup> Ове небуле вероватно су и најлепши објекти у космосу, практично да не постоје две које личе једна на другу. У стварности, планетарна небула је облак гаса са укупном масом од 0,1 до  $0,2M_{\odot}$  и врло малом густини која се на Земљи сматра техничким вакуумом (мање од 10.000 атома по кубном центиметру). Планетарна небула шири се брзином од 17 до 35 km/s постајући све ређа и прозирнија. Зато планетарна небула има веома кратак век и ретко кад је видљива дуже од 50.000 година. Сходно томе, све планетарне небуле које данас видимо релативно су младе.[98] У нашој галаксији до сада је откривено око 1.500 планетарних небула а приличан број њих и у суседним галаксијама.[95]

Током одбацивања планетарне небуле луминозност огољеног језгра звезде остаје практично константна: језгро постаје све мање и све топлије. Када све нуклеарне реакције престану, луминозност белог патуљка почеће брзо да опада уз нешто спорији пад температуре. На H-R дијаграму, Сунчев бели патуљак, углавном састављен од угљеника и мање количи-

телескопом први пут описао једну овакву небулу и њен бледуњави прстен поистоветио са удаљеном планетом.[95]

<sup>12</sup>Зелена боја, на пример, означава присуство двоструко јонизованих атома кисеоника.

не кисеоника<sup>13</sup>, завршиће у српастој зони у доњем левом углу где се налазе остаци звезда високе температуре и ниске луминозности (слика 1.20). И ту се прича о еволуцији Сунца коначно завршава.[86]

### 3.1.4 Утицај еволуције Сунца на живот на Земљи

Наша планета је доказ да је настанак и развитак живота у околини звезде Сунчевог типа сасвим реална могућност. Ако се планета налази унутар релативно уске зоне<sup>14</sup> у којој је клима довољно умерена да вода може да опстане у течном стању, шансе за настанак живота драстично се повећавају. Ова оптимална зона обично је довољно удаљена од звезде да повремене еруптивне појаве на њој не морају да имају катастрофалне последице. Треба узети у обзир и да интензитет опасног Сунчевог зрачења (ултраљубичасти и X-део спектра) опада са квадратом растојања. И на крају, као што ћемо видети у секцији 3.2, звезде Сунчевог типа старе врло лагано током периода који се мери милијардама година, што је сасвим довољно да живот еволуира од простих до веома комплексних животних форми.

Међутим, звезда која је удахнула живот нашој планети на крају ће га неминовно и уништити. Обично се сматра да ће се то десити на крају Сунчеве еволуције и његове трансформације у црвеног џина кроз неколико милијарди година. На жалост, живот на Земљи има неупоредиво мање времена да пронађе неко гостољубивије место. Полако али неумитно Земља ће почети да трпи разноврсне негативне ефекте услед лаганог али неумитног старења Сунца.[99] У основи, сви ти негативни ефекти потичу од постепеног повећања Сунчеве луминозности.

#### Поремећај силикатно-карбонатног циклуса

Прве велике промене почеће да се дешавају кроз 500-600 милиона година услед поремећаја силикатно-карбонатског циклуса. Овај процес је кључан за регулисање нивоа угљендиоксида у атмосфери и његово кружење у природи. У нормалним условима CO<sub>2</sub> из атмосфере везује се у стенама у облику карбоната. Услед кретања тектонских плоча и подвлачења једне плоче испод друге, старе стене богате угљеником тону у унутрашњост Земље и постају врела магма у којој карбонати дисоцирају и ослобађају CO<sub>2</sub>. Тај CO<sub>2</sub> враћа се назад у атмосферу путем вулканских ерупција.

Треба знати да је кретање тектонских плоча могуће само у присуству воде. Без воде трење између сувих плоча било би толико велико да би њихово померање врло брзо стало.<sup>15</sup> Повећање температуре и сушење Земљине површине довешће до бржег везивања CO<sub>2</sub> и формирања карбоната који ће у топлијој клими бити све тврђи. Услед тога, кретање тектонских плоча и рециклажа CO<sub>2</sub> ће се успорити. Ниво CO<sub>2</sub> у атмосфери почеће да се смањује.

<sup>13</sup>Зато их још зову и белим патуљцима CO-типа.

<sup>14</sup>Такозвана "насељива" ("habitable") област или "зона златокосе" ("goldilock zone").

<sup>15</sup>Управо због одсуства текуће воде кретање тектонских плоча не постоји на Марсу или Венери.

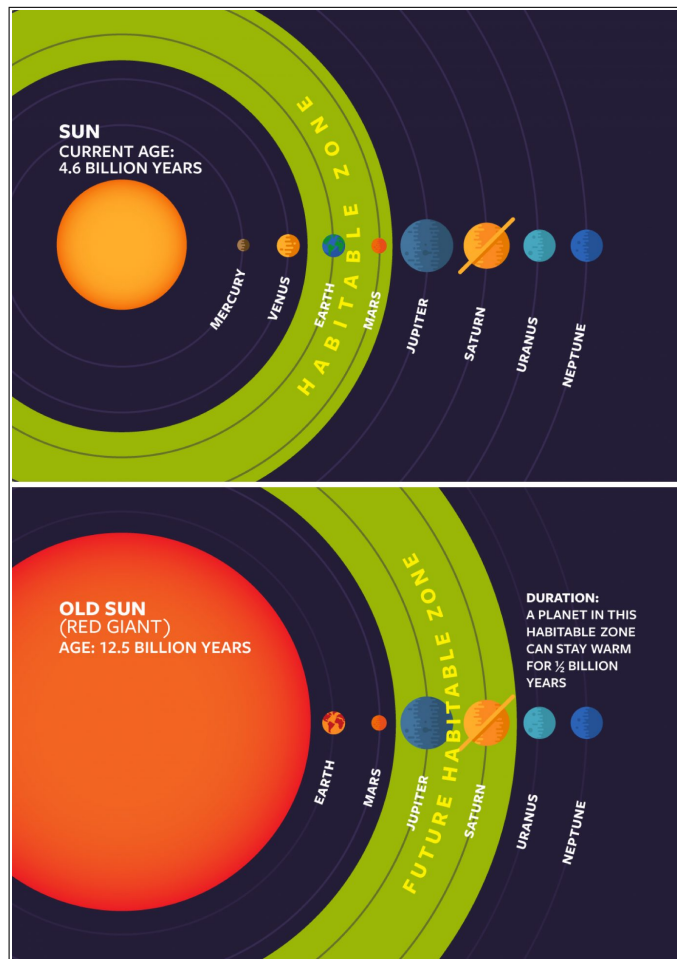
## Престанак фотосинтезе

Ово ће имати катастрофалне последице по биљке. Процес фотосинтезе могућ је само ако је парцијални притисак  $\text{CO}_2$  у атмосфери већи од неке минималне вредности. Око 99% биљака врши фотосинтезу типа  $C_3$  која тражи већи проценат  $\text{CO}_2$ . Како се тај проценат буде лагано смањивао, тако ће и биљне врсте почети да изумиру. Прво ће страдати оне најосетљивије: траве и друге биљке које немају чврсто стабло, укључујући и већину прехранбених култура. Затим ће нестати листопадне а на крају и зимзелене шуме. Неке биљне врсте ће се прилагодити нижем проценту  $\text{CO}_2$  али ће и оне на крају изумрети. Овај процес ће бити постепен и трајаће неколико стотина милиона година. С обзиром да се биљке налазе на почетку сваког ланца исхране, ово ће имати фаталне последице и по животињски свет.

Уследиће златно доба гљива које ће се размножити усред обиља биолошког материјала у стању распадања.

Неке животиње ће се можда прилагодити тако што ће прећи на исхрану гљивама или ће постати месождери. Драстична редукција биљног света довешће до смањене продукције кисеоника и пропадања озонског омотача услед чега ће Земља бити преплављена смртоносним ултраљубичастим зрачењем. Животиње ће мигрирати ка половима где је клима још подношљива и где ноћи трају дуго, или ће се преселити под земљу. Највећи део планете сада личи на Сахару а највећи број живих бића налази се у океанима.

Након 800 милијарди година ниво  $\text{CO}_2$  пада испод границе потребне за фотосинтезу типа  $C_4$ . Све биљке изумиру, продукција кисеоника престаје, нестаје комплетан озонски омотач. Ултраљубичасто зрачење постаје још јаче и смртоносније. Шансу да опстану још неких 100 милиона година имају само најпростије и најмање захтевне животињске врсте као што су термити и екосистеми у околини океанских ”термалних стубова”<sup>16</sup>



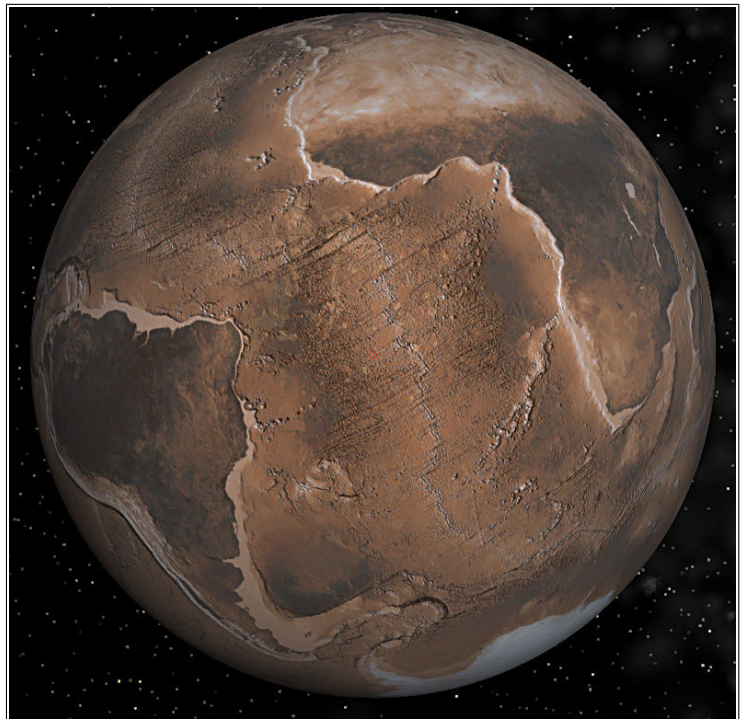
Слика 3.14: Померање настањиве зоне са еволуцијом Сунца.[100]

<sup>16</sup>Термални стубови (димњаци) су места где океанска вода долази у контакт са магмом која се налази тик испод океанског дна. Топла вода која настаје том приликом богата је минералима и базичним хемијским елементима који омогућавају настанак екосистема који се потпуно разликује од оног који зависи од атмосферског кисеоника.



## Нестанак океана

Кроз, отприлике, милијарду година Сунце ће бити 10% сјајније а просечна температура на површини Земље достићи ће 50°C. Океани почињу интензивно да испаравају тако да Земља сада личи на врелу сауну. Небом се ваљају густе облаци из којих све ређе пада киша. Водена пара је још ефикаснија од CO<sub>2</sub> у задржавању сунчевог зрачења тако да температура расте све брже па се убрзава и испаравање океана. Без воде која би "подмазивала" контакте и понирање континенталних плоча, њихово кретање стаје. Мале количине текуће воде могу се наћи још само на половима. У овом тренутку опстају само најотпорнији једноћелијски организми. Тешко је проценити колико дуго ће тако једноставне животне форме моћи да опстану. Процењује се да ће кроз 1,3 милијарде година нестати сва еукариотска жива бића док ће прокариоти опстати још стотинак милиона година.



**Слика 3.15:** Уметничка визија опустошене земље без океана и атмосфере. Иако Земљу сасвим сигурно чека оваква судбина, слика није потпуно верна јер ће се до тог времена облик и положај континената изменити до непрепознатљивости.[101]

## Последњи дани Земље и будућност човечанства

Земљина унутрашњост има више слојева. У самом центру је чврсто језгро састављено углавном од гвожђа. Изнад овог слоја налази се течно спољашње језгро које лагано кружи око централног језгра. Електричне струје које теку кроз гвожђе спољашњег језгра стварају Земљино магнетно поље.[102] Ово магнетно поље штити Земљину атмосферу од Сунчевог ветра, високо-енергетских јонизованих честица које се од Сунца шире радијално у свим правцима. Међутим, унутрашњост Земље се све време хлади јер не постоји унутрашњи извор енергије.<sup>17</sup> Спољашње језгро се смањује на рачун повећања унутрашњег, брзином од једног милиметра годишње.

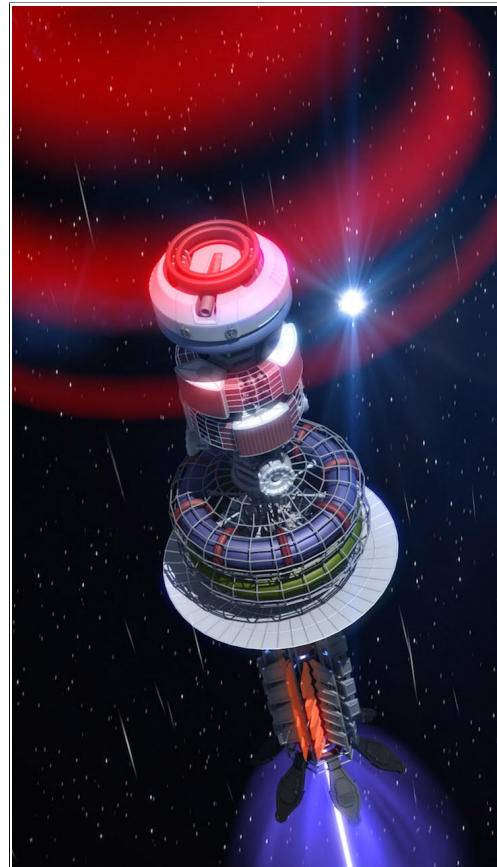
Након 2,3 милијарде година спољашње језгро ће потпуно очврснути и Земљино магнетно поље ће престати да постоји. Без свог магнетног штита планета више неће бити у стању да сачува своју атмосферу. Сунчев ветар ће у кратком року "одувати" читаву Земљину

<sup>17</sup>Земља је у време формирања садржала знатну количину радиоактивних елемената чији је распад генеришао велике количине топлоте. Данас су преостали само изотопи са дугачким периодом полураспада који генеришу много мање енергије.

атмосферу у космос.<sup>18</sup> Без атмосфере, земаљским небом ће доминирати бљештаво Сунце на сабласно црној позадини.

Кроз 2,8 милијарди година температура достиже 150°C, чак и на половима. Оволику температуру не могу да преживе ни једноћелијски организми који су игром случаја до сада опстајали у дубоким пећинама или подземним водама. Након овог времена, Земља је врела и беживотна планета. Температура ће и даље расти са порастом Сунчеве величине и сјаја да би након 3,5 милијарди година достигла 1.100°C, довољно да дође до топљења површинских стена. Планета се лагано претвара у узбуркани океан вреле магме чија ће температура и даље расти све док се не истопи и последње чврсто упориште на њој.

Земља је наш дом али то неће остати заувек. Пре или касније мораћемо да се отиснемо ка новим световима. Можда ћемо населити сада хладне светове Сунчевог система као што су Марс, Еуропа или Титан када их нарасло Сунце загреје до прихватљивих температура. На данашњем нивоу развоја технологије међузвездана путовања су чиста фантастика. Није искључено да су таква путовања заправо немогућа, због ограничења наметнутих брзином светлости, теоријом релативитета, огромним космичким растојањима и пратећим тешкоћама.<sup>19</sup> Можда ће човечанство опстати у огромним космичким колонијама које ће бити самодовољне и потпуно аутономне, лутајући од једног звезданог система до другог. На крају, еволуираће и људска врста, можда до тачке да ћемо, баш као у чувеном роману "Дина" Френка Херберта<sup>20</sup>, научити како да преваљујемо огромна космичка растојања тако што ћемо савијати простор користећи "меланж" или неки други зачин.



Слика 3.16: Уколико желимо да опстанемо, мораћемо да научимо да путујемо између звезда.[103]

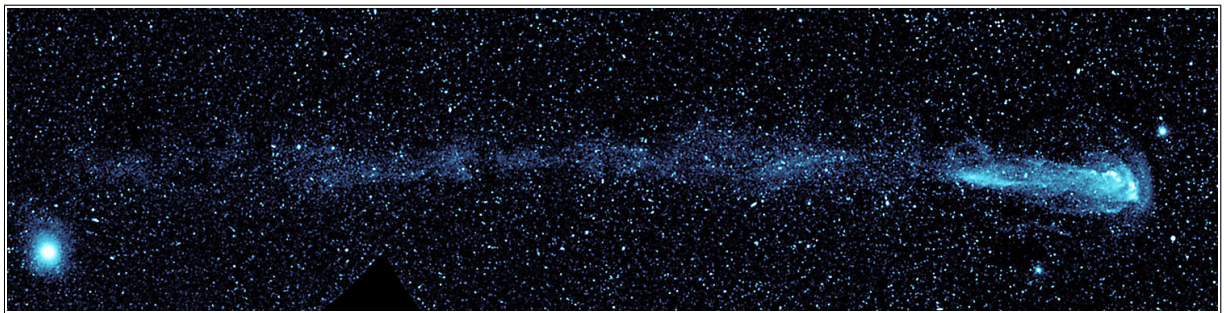
<sup>18</sup>Потпуно сличан процес већ се десио на Марсу. Данас знамо да је Марс некад имао изобиље воде и густу атмосферу. Међутим, Марс је много мањи од Земље и његово течно језгро се охладило много брже. Када је магнетно поље нестало, Сунчев ветар збрисао је Марсову атмосферу а касније и сву воду која је испарила у условима ниске температуре и притиска.

<sup>19</sup>Ако су међузвездана путовања могућа, зашто Млечни пут већ није преплављен бродовима и припадницима ванземаљских цивилизација? Ово питање поставио је Енрико Ферми који је срачунао да би интелигентна бића са довољно "империјалне воље", чак и са скоромном ракетном техником, преправила галаксију за свега десетак милиона година. "Фермијев парадокс" има хиљаду могућих објашњења али ниједно није општеприхваћено.[104]

<sup>20</sup>По том роману Дејвид Линч је снимии истоимени култни филм.

### 3.1.5 Еволуција звезда сличних Сунцу

Појам ”сличности” је релативан тако да сада морамо да га дефинишемо мало прецизније. Шта је то што једну звезду у еволутивном смислу чини сличном Сунцу? Пре свега - коначан исход. Све звезде Сунчеве класе на почетку заузимају средњи део Н-Р дијаграма а на крају завршавају као бели патуљци претежно састављени од угљеника и кисеоника. Такође, путање на Н-Р дијаграму које описују ове звезде током периода старења треба да личе на Сунчеву коју смо већ описали. Многе друге особине могу да се разликују, понекад чак и драстично: век звезде, трајање сваке појединачне фазе старења или максимална величина коју ће звезда достићи током две фазе црвеног џина. У пракси се показало да звезде чија је маса између  $0,6M_{\odot}$  и  $8M_{\odot}$  спадају у Сунчеву класу и да имају сличне али не и потпуно истоветне животне приче.



**Слика 3.17:** Мира (Омикрон Цети), снимљена у ултраљубичастом делу спектра. Снимак доказује да се ова променљива звезда креће врло брзо кроз галаксију остављајући за собом дугачак, јасно видљиви траг. Сама звезда налази у средини малог мехура крајње десно. Иако је Мира једна од највише проучаваних звезда у последњих 400 година, нико до скоро није приметио да звезда расипа материју за собом.[105]

Један пример суптилних разлика у еволуцији звезда Сунчеве класе је хелијумски бљесак: дешава се само код звезда чија је маса мања од  $2M_{\odot}$ . Хелијумски бљесак означава почетак периода сагоревања хелијума које се прво одвија у језгру а касније шири око језгра у концентричним круговима. Код масивнијих звезда, гасовити хелијум у језгру налази се у стању хидростатичке равнотеже са тежином звезде. Самим тим, не долази до колапса хелијума у дегенерисану материју па самим тим нема ни хелијумског бљеска. Уместо тога притисак и температура у језгру постепено расту све док не постану довољно велики да започне троструки алфа процес хелијумске фузије, без драматичних промена у унутрашњости звезде.[106]

Поменули смо, такође, и ”dredge-up”, процес који на површину Сунца конвекцијом избацује производе нуклеарне фузије која се одвија у унутрашњости звезде. Сунце ће имати једну такву епизоду током фазе црвеног џина. Нешто масивније звезде имаће и другу у фази асимптотског црвеног џина. Само ће звезде чија је маса између  $4M_{\odot}$  и  $8M_{\odot}$  имати и трећу, на крају фузије хелијума у звезданом језгру. Тај догађај доведиће до повећања површинске концентрације  ${}^4\text{He}$  и  ${}^{14}\text{N}$  уз смањење количине  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$ .[90]

На крају, поменимо да се у овој класи звезда налазе и неке од најинтересантнијих променљивих звезда, такозване ”Мира-променљиве”. Име су добиле по звезди ”Мира (Омикрон

Цети)”, типичном представнику овог типа звезда.<sup>21</sup> Све што је везано за Мира-променљиве је велико, укључујући и њихов значај за астрономију.[107]. Ове звезде увек се налазе у асимптотској грани црвеног џина што значи да имају огромну величину (стављене у центар Сунчевог система достигле би Марсову орбиту), велику луминозност и релативно малу масу која никад не прелази  $2M_{\odot}$ . У математичким моделима најчешће се узима да Мира-променљива има типичну масу од  $1M_{\odot}$  и да потиче од звезде главног низа са масом од  $1,6M_{\odot}$ . [108]

Попут цефеида које смо описали у секцији 1.3.3 и истакли њихов значај за мерење звезданих растојања, и Мира-променљиве имају правилну везу између периода промене сјаја и луминозности тако да се, под одређеним условима, такође могу употребити као средство за мерење космичких растојања. Типичан период Мира-променљиве износи неколико стотина дана. Доказано је да период промене сјаја директно зависи од масе и просечне величине звезде. Драстичне осцилације у сјају настају као производ контракције и експанзије читавог црвеног џина. Промена сјаја никад није мања од две и по магнитуде а често иде и до свих десет. То значи да неке Мира-променљиве на врхунцу циклуса могу да имају сјај који је 10.000 пута већи од почетног. [107]

Прва звезда овог типа, сама ”Мира”, откривена је још 1596. године. Због велике промене сјаја ове звезде су врло популарна мета за изучавање а досупне су чак и астрономима-аматерима. Захваљујући интензивном осматрању, за многе Мира-променљиве данас постоје детаљни записи о промени сјаја који сежу и читав век у прошлост.



**Слика 3.18:** Нама најближа звезда, Проксима Кентаури, спада у црвене патуљке. И поред тога, звезда се може видети само јаким телескопом и откривена је тек почетком XX века. Данас знамо да се око ње окрећу најмање две планете, ”Проксима а” и ”Проксима б”. [109]

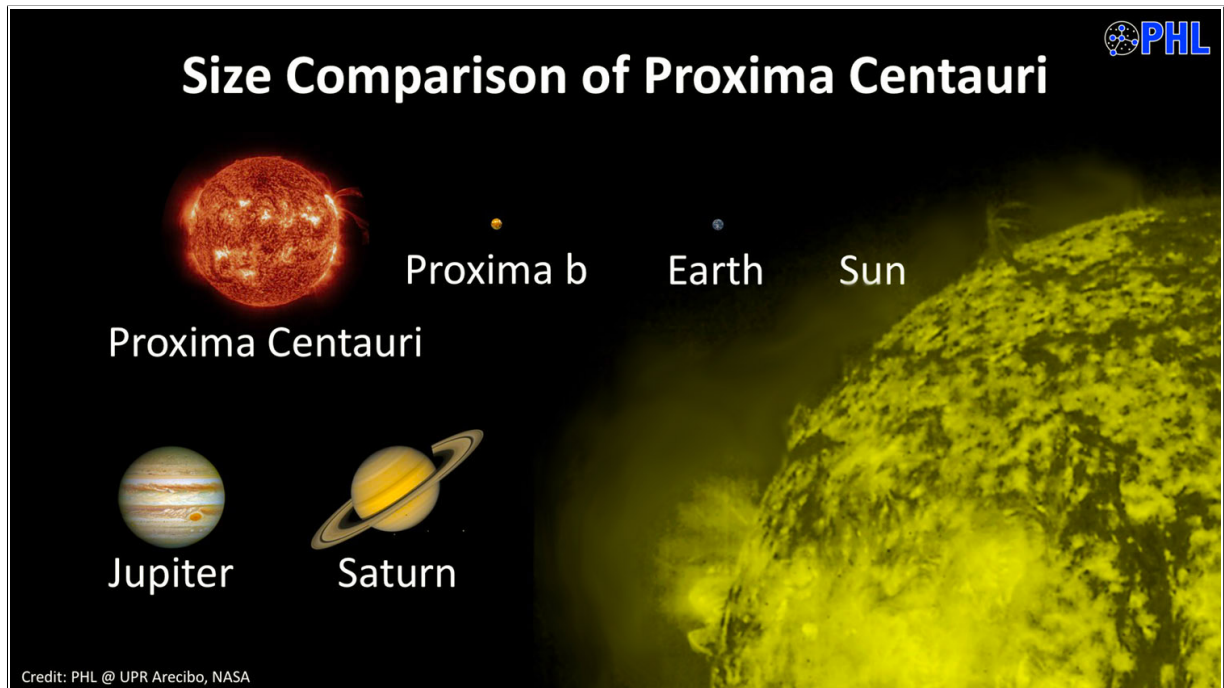
## 3.2 Еволуција црвених патуљака

Звезде спектралне класе К или М са масом мањом од  $0,6M_{\odot}$  које се налазе у главном низу Н-Р дијаграма називамо црвеним патуљцима. Радијус црвеног патуљка достиже пар десетина процената радијуса Сунца а карактеристична загасито-црвена боја потиче од ниске површинске температуре. Црвени патуљци су далеко најмногобројније звезде у нашој галаксији и читавом космосу али ниједну од њих није могуће видети голим оком јер су сувише тамне. У Сунчевој најближој околини налази се око 30 звезда од којих су 20

<sup>21</sup>”Мира” је реч која на латинском значи ”дивно”.

црвени патуљци. Према неким проценама, црвени патуљци чине три четвртине укупног броја звезда у Млечном путу а у елиптичним галаксијама тај проценат је још већи.[110, 111]

Минимална маса црвеног патуљка износи око 75 Јупитерових маса или  $0,08M_{\odot}$ . Испод те границе, температура у језгру никад не достиже минимално потребних 10 милиона келвина да би отпочела фузија водоника у хелијум. Такве објекте називамо ”смеђим патуљцима” или ”неоствареним звездама” о којима смо говорили у секцији 1.2.6.



**Слика 3.19:** Радијус Проксима Кентаури износи свега  $0,13R_{\odot}$ . Планета ”Проксима б” нешто је већа од Земље и налази се у настањивој зони црвеног патуљка.[112]

Црвени патуљци сагоревају водоник веома споро тако да површинска температура не прелази 3.500 келвина.<sup>22</sup> То значи да, према формули (1.13), црвени патуљци имају врло малу луминозност која се типично креће између  $0,0001L_{\odot}$  и  $0,1L_{\odot}$ . [113, 111] Иако црвени патуљци располажу скромним количинама нуклеарног горива, брзина нуклеарне реакције толико је мала да, заправо, црвени патуљци имају далеко најдужи животни век од свих звезда. Најмањи црвени патуљци старе најспорије и одржавају тињајућу нуклеарну фузију билионима година. С обзиром да је космос стар ”само” 14 милијарди година, не постоји црвени патуљак који је изашао из ”најраније младости”. Зато је скоро извесно да ће последња звезда у космосу бити црвени патуљак минималне масе.[110, 111]

Детекција црвених патуљака, нарочито оних најмањих, веома је компликована јер је граница између смеђих и црвених патуљака веома танка. Тако је, на пример, нама најближи црвени патуљак, Проксима Кентаури, откривен тек 1915. године иако је растојање до њега свега 4,2 светлосне године.[114] Неки од смеђих патуљака имају темпеатуру од 2.000 келвина док екстремно хладни црвени патуљак TRAPPIST-I једва достиже 2.500 келвина. Између ове две температуре налази се сива зона у којој су смеђи и црвени патуљци

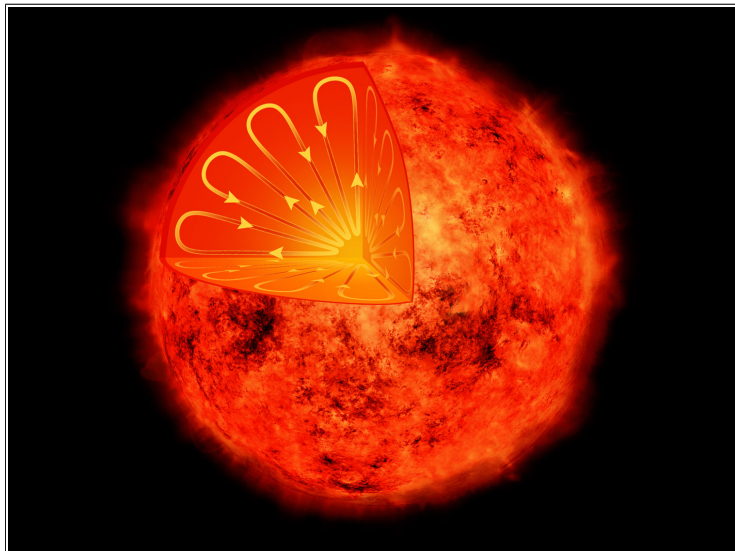
<sup>22</sup>На тако ниским температурама уочљиве су спектралне линије молекула којих на топлијим звездама нема а типичан пример је титанијум-оксид.[111]

измешани. Понекад је идентификацију могуће извршити хемијском анализом. Присуство литијума у атмосфери а затим и сложених молекула који опстају само на нижим температурама као што су метан и амонијак, снажан су индикатор да се ради о смеђем патуљку. Управо због отежане идентификације, неки од научника користе термин ”црвени патуљак” за све веће објекте који су тамни и хладни без обзира да ли се ради о звезди или не.[110]

### 3.2.1 Нуклеарни процеси у црвеном патуљку

Сви црвени патуљци генеришу енергију фузијом водоника у хелијум кроз  $p-p$  процес описан у секцији 2.3.1. Црвени патуљци мањи од  $0,35M_{\odot}$  непрозирни су за радијацију тако да су они у потпуности конвективни. Код ових звезда конвекција представља једини механизам којим се енергија генерисана у унутрашњости звезде преноси до површине. Изнад наведене масе, у црвеном патуљку се ствара зона око језгра у којој је пренос топлоте зрачењем ефикаснији.

За разлику од Сунца које током највећег дела свог живота врши фузију у језгру звезде, да би затим ушло у фазу црвеног дна сагоревајући водоник у спољашњим слојевима, код најмањих црвених патуљака фузија водоника обухвата читаву запремину звезде. Интензивна конвекција ствара такорећи једнообразну мешавину водоника и хелијума у којој се током времена проценат хелијума повећава све док не достигне скоро стопроцентну вредност. С обзиром да се код најмањих црвених патуљака хелијум не нагомилава у центру звезде и да фузија обухвата много већи простор, ове звезде сагоревају много већи проценат водоника пре него што напусте главни низ  $H-R$  дијаграма. Зато је њихов боравак у главном низу дуготрајнији у поређењу са звездама Сунчевог типа. Чак и најмасивнији црвени патуљци нису имали довољно времена да напусте главни низ с обзиром на тренутну старост васионе.[116] То значи да су све наше претпоставке о даљој еволуцији црвених патуљака базиране на математичким моделима и компјутерским симулацијама.



Слика 3.20: Најмањи црвени патуљци практично су непрозирни за зрачење тако да је конвекција једини начин транспорта енергије унутар звезде.[115]

Најмања маса коју црвени патуљак мора да има да би ушао у фазу црвеног дна је  $0,2M_{\odot}$ . Испод те границе црвени патуљак сагорева водоник све док не потроши сву расположиву количину. Пошто црвени патуљци немају довољну масу да иницирају фузију хелијума у угљеник, нуклеарна фузија у том тренутку престаје. Без унутрашњег извора енергије нарушава се и хидростатичка равнотежа: црвени патуљак почиње да колабира под дејством

сопствене тежине при чему температура у унутрашњости звезде расте. Црвени патуљак пролази кроз фазу плавог патуљка да би на крају постао бели патуљак који ће се хладити билионима година.[111, 116]

Цео процес је страховито спор и што је звезда мања, еволуција траје дуже. Израчунато је да ће црвени патуљак са масом од  $0,16M_{\odot}$ <sup>23</sup> остати у главном низу бар 2,5 билиона година након чега ће наредних пет милијарди година провести као плави патуљак са температуром између 6.500 и 8.500 келвина и трећином луминозности Сунца. Након тога следи период белог патуљка који ће се постепено хладити током наредних неколико билиона година.[116]

Црвени патуљци који имају довољну масу да уђу у фазу црвеног цина врше фузију на сличан начин као Сунце, гомилајући хелијум у језгру и сагоревајући водоник у слојевима који су све ближи површини звезде. Међутим, њихова путања ван главног низа је релативно кратка. Овакве звезде немају довољну масу да произведу хелијумски бљесак или да остваре притисак и температуру потребну за отпочињање троструког алфа процеса у језгру. Када сагори и последњи слој водоника, звезда силази са гране црвеног цина да би се трансформисала у белог патуљка.[117]

### 3.2.2 Живот у околини црвеног патуљка

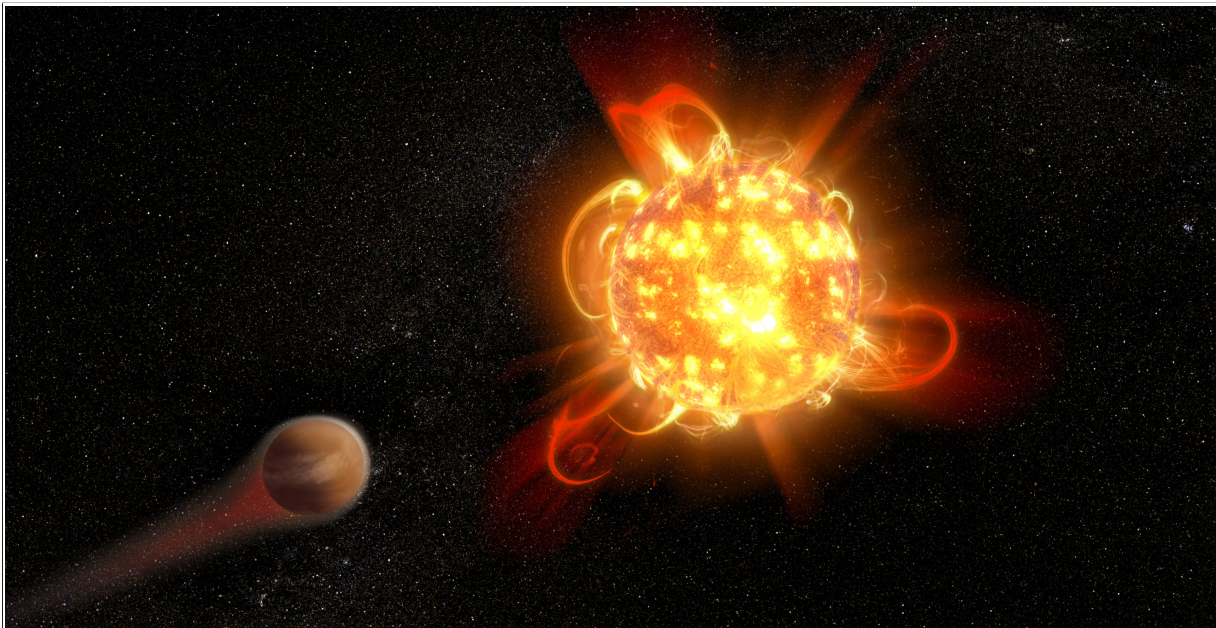
Црвени патуљци су веома захвална мета за откривање екстра-соларних планета. Једна од метода откривања планета које круже око других звезда је метода транзиције. Ако се планета нађе тачно на линији посматрања, између Земље и црвеног патуљка, патуљак ће додатно потамнети јер ће део његовог диска заклонити планета. Ова промена је, због мале величине диска црвеног патуљка, лако уочљива и представља додатни мотив да се посматрање настави.[118] Космички телескоп ”Кеплер” који је био оперативан од 2012. до 2019. године открио је на десетине планета које орбитирају око црвених патуљака. Врло мали проценат тих планета су гасовити цинови налик на Јупитер или Сатурн. Штавише, компјутерске симулације показују да су у околини црвених патуљака планете налик Земљи најзаступљеније, при чему је учешће воде у укупној маси планета око 10% што је знак да је велики део планете прекривен дубоким океанима.[116]

Ове планете, по својој прилици, нису идеално место за настанак и развој живота. Зона у којој планета треба да се налази да би имала умерену климу и течну воду на својој површини релативно је уска и налази се веома близу звезде. Самим тим, планета је изложена интензивној радијацији звезде која може у потпуности да распрши атмосферу планете у космички простор. Додатни проблем је што су практично сви црвени патуљци врло нестабилни. Неки од њих могу да удвоструче свој сјај у свега неколико дана да би се затим вратили у првобитно стање, понављајући сличан процес током читавог животног века. Тако велике промене луминозности никако не би погодовале развоју живота. Уз то, црвени патуљци су подложни честим експлозивним ерупцијама које у околни простор избацују огромну количину плазме и X-зрака. Све то би имало тешке последице по евентуални

---

<sup>23</sup>Налик на оближњу Барнардову звезду.

живот на околним планетама.<sup>24</sup>[116] Живот у околини црвених патуљака имао би знатно веће шансе да се одржи уколико би се развио у дубоким језерима и океанима где би утицај зрачења из космоса био неупоредиво мањи.[119]



**Слика 3.21:** Црвени патуљци по правилу су веома нестабилни, са честим и експлозивним ерупцијама. Таква звездана активност може да створи негостољубиво окружење за планете и развој живота на њима, чак и ако се оне налазе на оптималном растојању.[120]

Чак и ако то занемаримо, услед малог растојања планете и звезде и деловања плимских гравитационих сила, ротација планете ће се успоравати све док један дан на њој не буде трајао као цела година. Планета ће бити ”плимски закључана”, са једном страном која је стално окренута звезди и другом која се налази у вечитој тами.<sup>25</sup> Самим тим, могуће је да једна страна планете буде сува и врела пустиња а друга толико хладна да се чак и гасови из атмосфере кондензују. Између те две негостољубиве зоне светлости и таме налазио би се уски, сумрачни појас у коме би клима вероватно била довољно блага за развој живота. Проблем би могао да буде ублажен уколико би топлота могла слободно да циркулише око целе планете захваљујући постојању густе атмосфере или великих водених површина.[116]

Ипак, постоје планете које круже око црвених патуљака које се још увек сматрају потенцијално настањивим. NASA је, на пример, на изненада заказаној и прилично спектакуларној конференцији за штампу 2019. године<sup>26</sup> потврдила да је у околини већ поменуте звезде TRAPPIST-1<sup>27</sup> откривено чак седам планета налик Земљи од којих се бар три налазе у настањивој зони.[118] Једна таква планета, ”Проксима б”, откривена је и у орбити нама најближе звезде. Најновија истраживања, међутим, показују да је ова планета вероватно мртва јер је у међувремену утврђено да је Проксима Кентаури веома нестабилна звезда.[110, 119]

<sup>24</sup>појава коју смо већ поменули под именом ”Coronal Mass Ejection”

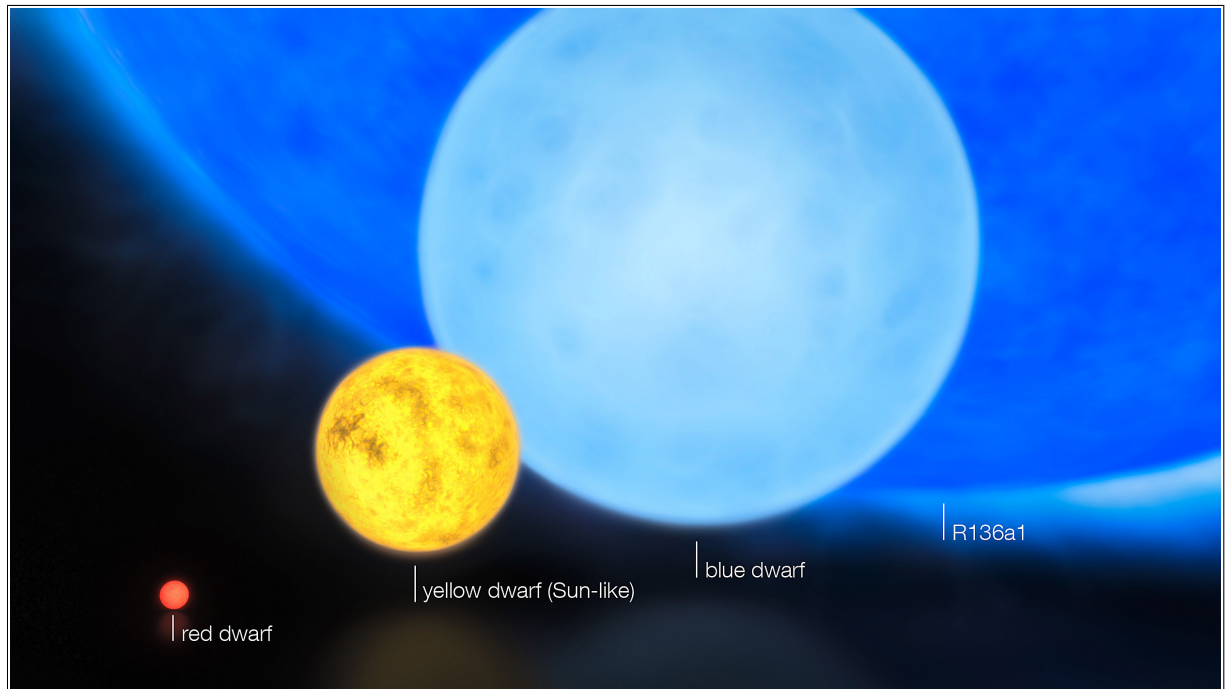
<sup>25</sup>Исти процес довео је до тога да са Земље видимо само једну страну Месеца.

<sup>26</sup>NASA овакве конференције за штампу сазива само у случају нарочито важних догађаја.

<sup>27</sup>Ова звезда налази се на свега 40 светлосних година од нас у сазвежђу Водолије.



### 3.3 Еволуција масивних звезда



Слика 3.22: Релативне величине различитих типова звезда. Највећа на слици, плави суперџинс R136a1, има масу од преко  $200M_{\odot}$  (по неким изворима и преко  $300M_{\odot}$ ) и луминозност од невероватних  $6.200.000L_{\odot}$ . Иако једна од најмасивнијих звезда у космосу, она није највећа и по димензијама: то је "UY Scuti" са радијусом од  $1.700R_{\odot}$ . [121]

#### 3.3.1 Заступљеност масивних звезда у космосу

Ако још једном баците поглед на H-R дијаграм на слици 1.19, рекло би се да је Сунце савсим просечна звезда, тачно на средини главног низа и да су звезде у њему равномерно распоређене. Међутим, ово је оптичка варка. Не само да су црвени патуљци (звезде у доњем десном углу дијаграма) далеко најбројније, већ се и број већих звезда рапидно смањује како се крећемо ка горњем левом углу резервисаном за најтоплије и најсветлије звезде. Сунце јесте негде на средини главног низа али је светлије од 90% звезда у Млечном путу. Разлог томе је начин на који се звезде формирају из молекуларних облака. Величина (прото)звезде директно је пропорционална величини молекуларног облака.

Број великих молекуларних облака из којих настају најмасивније звезде релативно је мали. Притом, расподела гасова и прашине у великом молекуларном облаку најчешће није равномерна: водоник и хелијум лако се ослобађају вишка топлоте и самим тим колабирају брзо.

Међутим, делови молекуларног облака богати прашином хладе се још ефикасније тако да је њихов колапс још бржи. Различите брзине колапса доводе до фрагментације великог молекуларног облака у више мањих што резултује формирањем већег броја мањих звезда уместо једне велике. Зато су, велике и сјајне звезде релативно малобројне али, за разлику од црвених патуљака, многе од њих можемо да видимо голим оком. Скоро све звезде које

видимо на ноћном небу су или младе, вреле и велике звезде или звезде које су изашле из главног низа еволуирајући у луминозне црвене џинове.[114]

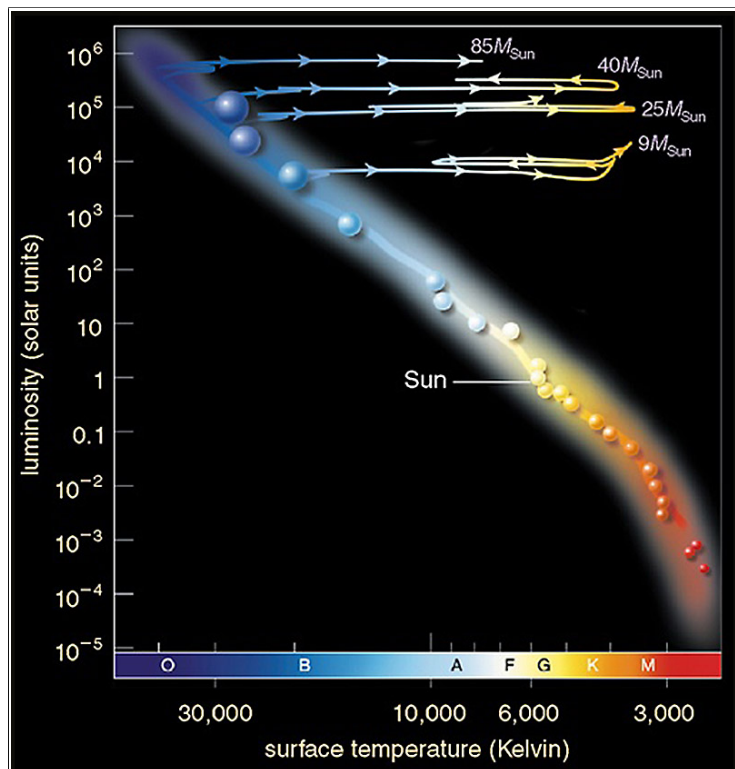
Све звезде сличне Сунцу, укључујући и оне које су неколико пута масивније, еволуирају на сличан начин и завршавају као бели патуљци. Међутим, звезде са масом већом од  $8-10M_{\odot}$ , имају потпуно другачију судбину. Иако ове звезде чине свега 0,3% звездане популације, видећемо да њихов значај далеко превазилази њихов скроман број.[114]

### 3.3.2 Рана фаза еволуције

Звезде се разликују, пре свега, по брзини нуклеарне фузије која је еквивалентна брзини којом се водоник конвертује у хелијум. Нуклеарна фузија је веома осетљива на температуру а она је у директној вези с масом звезде. Тако, на пример, Сиријус, најсјајнија звезда на небу има луминозност  $23L_{\odot}$ , иако је маса Сиријуса свега два пута већа од масе Сунца. Звезде чија је маса 20 пута већа од Сунчеве имају луминозност већу од  $160.000L_{\odot}$ . С обзиром да мало повећање масе вишеструко повећава брзину фузије водоника, проста рачуница каже да масивне звезде живе бурно али кратко. Плави звездани гиганти на самом врху главног низа обично не живе дуже од 5 милиона година док највећи супер-гиганти имају век краћи од 5 милиона година.[114]

Масивне звезде су такође карактеристичне по стеларним ветровима који су за много редова величине бржи и гушћи од Сунчевог. Самим тим, масивне звезде губе велики део своје масе током свог краткотрајног живота. Када интензивни стеларни ветар налети на облак међузвездане материје долази до стварања ударног таласа и наглог пораста температуре. Зона судара изгледа као гигантски сјајни, прозирни мехур са масивном звездом у центру (слика 3.24).[32]

Ако занемаримо ове разлике, масивне звезде еволуирају на истоветан начин као и Сунце све до тренутка када на Сунцу долази до хелијумског бљеска. Као што смо то већ објаснили у секцији 3.1.3, узрок хелијумског бљеска на Сунцу је гомилање дегенерисаног хелијума у језгру звезде. Након тога, Сунце улази у фазу фузије хелијума у угљеник. Унутрашњост



Слика 3.23: Масивне плаве звезде еволуирају на потпуно други начин у поређењу са звездама средње масе. На H-R дијаграму ове звезде током читавог животног века имају луминозност која врло мало варира са временом иако су варијације температуре значајне.[94]



**Слика 3.24:** Једна од најлепших фотографија космичког телескопа "Хабл". Реч је о огромном мехуру који изнутра "надувава" масивна, супер-топла звезда дејством снажног стеларног ветра. Фотографије ове небуле (NGC 7635) изабрана је да обележи 26. рођендан "Хабла". Телескоп је у орбиту поставио шатл током своје 31. мисије, 24. априла 1990. године.[122]

масивних звезда је, међутим, много топлија тако да се температура потребна за покретање хелијумске фузије достиже много пре него што почне да се формира дегенерисано хелијумско језгро. Ова транзиција је веома мирна и звезда такође неопажено добија трослојну структуру: језгро од угљеника, слој фузионишућег хелијума и слој фузионишућег водоника.[114]

Сунце није довољно масивно да иницира фузију угљеника али масивне звезде јесу. Свега неколико милиона година након што почну да сагоревају хелиум ове звезде ће почети да фузионишу угљеник у мешавину кисеоника, неона и магнезијума. Кад би се фузија наставила на овај начин до самог краја звезде, она би завршила као живописна планетарна небула и бели патуљак ONM-типа.<sup>28</sup> И заиста, такви бели патуљци постоје али су веома ретки.

<sup>28</sup>Скраћеница за Oxygen-Neon-Magnesium

Љуска	Главни елемент	Производ фузије
Површина звезде	Водоник	Ништа
Прва љуска	Водоник	Хелијум
Друга љуска	Хелијум	Угљеник
Трећа љуска	Угљеник	Кисеоник, неон, магнезијум
Четврта љуска	Неон	Кисеоник, магнезијум
Пета љуска	Кисеоник	Сумпор, силицијум
Шеста љуска	Магнезијум	Сумпор, силицијум
Седма љуска	Силицијум	Гвожђе
Језгро звезде	Гвожђе	Ништа

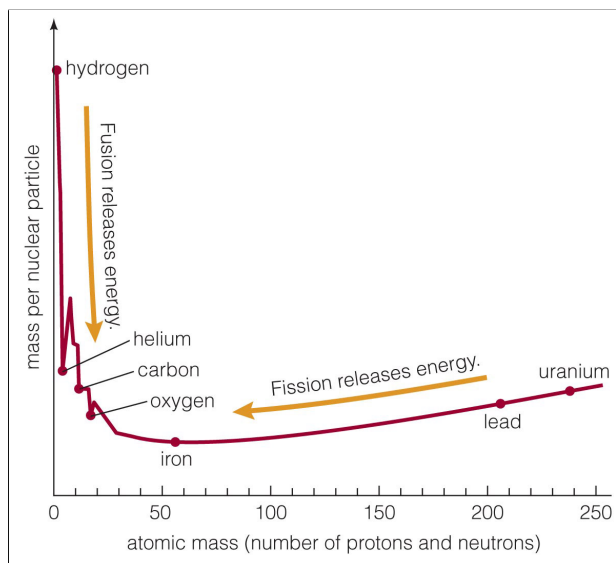
Табела 3.1: Слојевита структура масивне звезде[114]

Узрок лежи у томе што звезде које могу да фузионишу угљеник најчешће могу да фузионишу и елементе теже од угљеника. Једино малобројне звезде чија се маса налази у релативно уском дијапазону од  $5-9M_{\odot}$  имају могућност да еволуирају у ONM-патуљка.[114]

### 3.3.3 Промена унутрашње структуре

Звезде чија је маса већа од  $9M_{\odot}$  наставаљају да стварају нове слојеве фузионих продуката да би након кратког времена отпочела и њихова фузија у следећи тежи елемент. Цео процес раслојавања не траје дуже од 10.000 година. Звезда почиње да личи на главицу лука при чему свака љуска врши фузију једног елемента (слика 3.26). Производ фузије у једној љусци представља "погонско гориво" за љуску испод ње. У свом пуном сјају, при крају фазе црвеног цина, масивна звезда формира сложену структуру описану у табели 3.1.

Због пораста температуре са дубином, свака љуска сагорева брже од оне изнад ње али и поред тога производи мање енергије.<sup>29</sup> У самом језгру сачињеном од гвожђа производња енергије је равна нули, али не зато што звезда нема довољно велики притисак и температуру да за-



Слика 3.25: Гвожђе има најстабилнији нуклеус, са најмањом енергијом по једном нуклеону. Зато је трансформација гвожђа у било који лакши или тежи елемент процес који тражи улагање енергије. Нуклеарним процесима унутар звезде немогуће је синтетисати елемент тежи од гвожђа.[94]

<sup>29</sup>Што је елемент тежи то је мања енергија која се генерише фузијом.

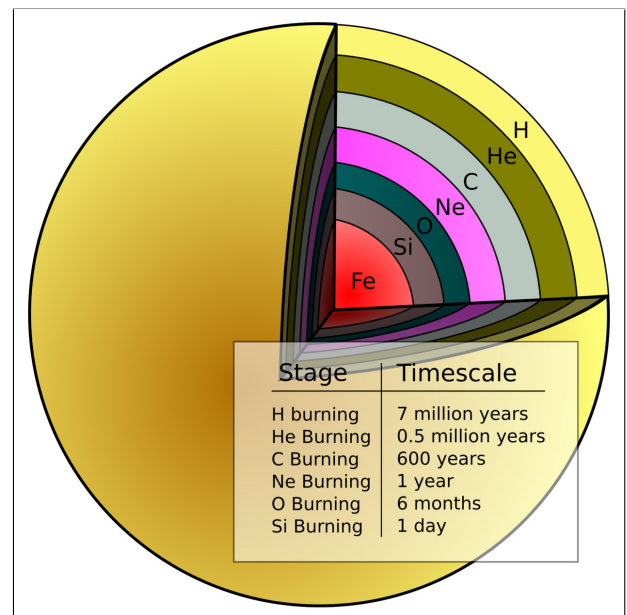
почне фузију гвожђа у теже елементе<sup>30</sup> већ зато што је фузија гвожђа немогућ процес.

Гвожђе је крај пута за нуклеарну фузију али и фисију (види слику 3.25). Сви елементи лакши од гвожђа генеришу енергију приликом фузије, баш као што сви елементи тежи од гвожђа генеришу енергију приликом фисије. Гвожђе је елемент у коме се процеси фисије и фузије сустичу. Од свих нуклеуса, језгро гвожђа има најнижу енергију по јединици масе. Зато је конверзија гвожђа у било који други елемент, тежи или лакши, процес који увек троши енергију.[114]

### Фаза променљивог сјаја

Транзиција у супер-цина је често врло буран процес. Многе велике звезде које су напустиле главни низ пулсирају јер немају стабилну тачку хидростатичке равнотеже. Ако се звезда шири услед већег притиска гаса у унутрашњости, она ће достићи тачку равнотеже с гравитацијом али ће је прећи по инерцији. Притисак и густина опадају тако да материја постаје прозачна за фотоне и звезда постаје светлија. Након тога, гравитација преузима главну улогу: почиње процес контракције која ће по инерцији опет прећи тачку равнотеже с унутрашњим притиском звезде. Материја постаје гушћа и топлија, непрозирна за фотоне па се сјај звезде смањује. Након тога, цео процес се понавља испочетка.

Звезда постаје гигантски хармонијски осцилатор, променљива звезда чији је период промене сјаја ("пулс") практично константан. Цефеиде су типичан пример масивних звезда чији се сјај мења на правилан начин. Многе масивне звезде док еволуирају у црвеног цина један део времена проводе управо као цефеиде.[98] О значају цефеида за мерење космичких растојања говорили смо у секцији 1.3.3.



**Слика 3.26:** Слојевита структура супер-цина непосредно пред експлозију супернове. Свака љуска обезбеђује фузионо гориво за ону испод ње. Што је љуска ближа гвозденом језгру, то је нуклеарна реакција бржа и краткотрајнија.[123]

### 3.3.4 Колапс језгра и настанак неутронске звезде

Без унутрашњег извора енергије, све масивније гвоздено језгро почиње да се скупља. Звезда достиже стадијум супер-гиганта и луминозност између  $150.000L_{\odot}$  и  $500.000L_{\odot}$  и троши огромне количине горива у свим љускама. Фузиони производи путују ка нижим сло-

<sup>30</sup>У овој фази температура у језгру може да достигне 3,5 милијарди келвина.[88]

јевима у све већим количинама убрзавајући нуклеарне реакције дубље у звезди. У једном тренутку започиње фузија силицијума у најнижој љусци. Тај процес је енергетски неефикасан тако да је једини начин да се звезда одупре гравитационом колапсу сагоревање огромних количина силицијума. То опет доводи до експоненцијалног повећања масе гвозденог језгра. Само дан и по (!) након отпочињања силицијумске фузије, језгро постаје толико велико да не може да издржи сопствену тежину. Долази до његовог колапса у дегенерисану материју која се одржава у стабилном стању дегенеративним притиском електрона. У центру црвеног супер-џина формиран је бели патуљак чија се маса непрекидно повећава.[114]

Нуклеарна фузија у горњим слојевима може да се настави још неко кратко време али ће језгро врло брзо достићи тзв. Чандрасекаров лимит, горњу границу масе коју бели патуљак може да има и која износи  $1,4M_{\odot}$ .<sup>31</sup> Када температура у језгру достигне  $10^{10}\text{K}$ , дегенеративни притисак електрона више није довољан да се одупре гравитацији. У делићу секунде језгро звезде велико као планета Марс<sup>32</sup> бива сабијено у лопту не већу од 10-20 километара. Језгра гвожђа, током муњевитог колапса, бивају потпуно разбијена тако да објекат формиран у центру личи на ”супу” састављену од слободних протона, неутрона и електрона чија се густина приближава густини атомског језгра. С обзиром да је гвожђе најстабилнији елемент, дезинтеграција нуклеуса гвожђа троши енергију уместо да је ствара, тако да притисак који подупире звезду изнутра опада. При тако високим густинама материје долази до процеса који је познат као ”захват електрона”: протони и електрони спајају се у неутроне уз емисију неутрина:[124, 114]



С обзиром да су у ”обичној”, недегенерисаној материји, електрони честице које својим електростатичким одбијањем држе атомска језгра на растојању, њихов нестанак и стварање електрично неутралних честица омогућавају да се повећање густине материје настави још брже. Када температура достигне фантастичних  $10^{12}\text{K}$ , неутрони ће бити принуђени да се трансформишу у дегенерисану материју. Објекат у центру постаје ”неутронска звезда” састављена скоро искључиво од неутрона и мале количине протона.<sup>33</sup> Даљи колапс сада зауставља дегенеративни притисак неутрона, заправо јака нуклеарна сила која на екстремно малим растојањима има репулзивни карактер.<sup>34</sup>

### 3.3.5 Супернова

Колапсом гвозденог језгра у центру звезде настала је огромна празнина. Под дејством сопствене тежине и снажне гравитације неутронског језгра, материја из горњих слојева похрлиће ка центру звезде брзином која достиже 15% брзине светлости. У свега неколико секунди кинетичка енергија колабирајућег силицијума, сумпора, магнезијума и других елемената достиже  $10^{46}\text{J}$ , што је 50 пута више од енергије коју ће Сунце генерисати током

<sup>31</sup>О овоме ће бити више речи у секцији 4.1.2.

<sup>32</sup>6.800 километара у пречнику.

<sup>33</sup>Неутронске звезде обрађене су у секцији 4.2.

<sup>34</sup>Неутрони су такође фермиони и подлежу Паулијевом принципу искључивости.

10 милијарди година свог боравка у главном низу.[124] Колосални судар околне материја и неутронског језгра је скоро еластичан јер је неутронско језгро екстремно тврдо и компактно. Настаје разарајући ударни талас који се незадрживо шири унатраг. Уз то, колапс белог патуљка у неутронску звезду ослободио је незамисливо велику количину гравитационе потенцијалне енергије. У једној секунди језгро звезде генерисало је више енергије него читава звезда од тренутка свог настанка.<sup>35</sup> Сва та енергија претворена је, највећим делом, у топлоту неутронске звезде. Али та енергија остаје заробљена у њој само за кратко: однеће је високо-енергетски неутрини које неутронско језгро емитује у огромним количинама. Процес је толико ефикасан да ће се неутронско језгро охладити до температуре околне материје за свега 10 секунди. Укупан број емитованих неутрина је реда  $10^{58}$  при чему сваки неутрино има енергију од 10MeV и креће се брзином која је једва мало мања од брзине светлости.[114]

Неутрини су практично неухватљиви јер са "обичном" материјом могу да реагују само путем слабе нуклеарне силе која има екстремно мали домет. Простим језиком, неутрини пролазе кроз материју као пушчано зрно кроз веома ретку паучину, не мењајући ни своју енергију ни правац кретања. Око 99,7% неутрина (самим тим и енергије) утећи ће у космос не остављајући никакв траг у материји кроз коју пролазе. У дану када је експлодирала супернова SN1987a јапанска неутрино опсерваторија "Камиоканде II" детектовала је 12 неутрина што је много више од уобичајеног просека.<sup>36</sup>[124] Међутим, око 0,3% неутрина биће апсорбовано густом материјом ударног таласа који се удаљава од центра звезде. Мали проценат апсорпције не треба да завања - реч је и даље о колосалној количини енергије. Толика енергија сконцентрисана у релативно танкој зони ударног таласа доводи до експлозије која ће буквално разорити комплетну звезду, све њене слојеве осим неутронског језгра.

Овакву експлозију називамо суперновом типа II.<sup>37</sup> У космички простор бива избачено око 5-20 Сунчевих маса брзином од најмање 5.000km/s.



Слика 3.27: Остаци супернове SN1006 која се појавила 1. маја 1006. године. Била је то најсветлија супернова коју смо до сада видели, много светлија од Венере и јасно видљива и по дану током неколико недеља. Астрономи из Кине, Јапана, Европе и арапског света детаљно су забележили ову спектакуларну појаву.[125]

<sup>35</sup>Када би се сва ова енергија конвертовала у светлост, експлозија супернове на растојању од 500 светлосних година спржила би сав живот на Земљи.[114]

<sup>36</sup>Чињеница да је од укупно  $10^{58}$  емитованих неутрина на Земљи ухваћено само 12 сведочи о томе колико су неутрини, заправо, неухватљиве честице.

<sup>37</sup>Старо име за ову појаву је "stella novae", термин који је исковао чувени средњовековни астроном Тихо Брахе 1572. године да опише све нове "звезде" које се изненада појављују на небу. У то време није се знало да таква појава најчешће не представља рађање нове звезде већ смрт једне већ постојеће.[88]



**Слика 3.28:** Снимак небуле "Вео" ("Veil"), остатак супернове која је експлодирала пре 8.000 светлосних година. Име је добила по својој деликатној структури која подсећа на прозирну мараму. Део небуле на слици дуг је око две светлосне године што је свега пар процената од укупне величине.[126]

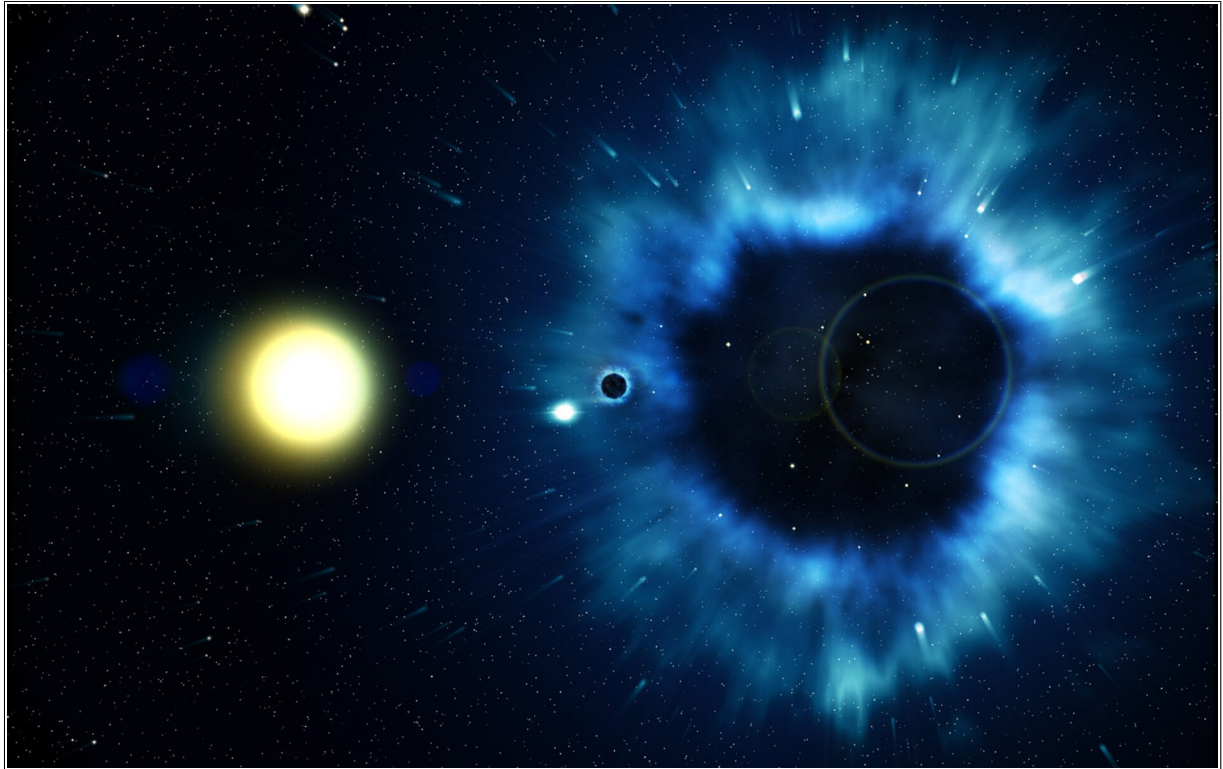
Треба узети у обзир да, у појединим случајевима, масивне звезде одбацују велики део своје масе у космички простор пре финалне експлозије. Када се финална експлозија коначно деси, материјал разорене звезде и експанциони ударни талас налетеће на претходно избачену материју што ће довести до њене компресије и загревања услед конверзије кинетичке енергије у топлоту. Температура достиже милион келвина а остаци супернове почињу да зраче у широком спектру таласних дужина.[124] Неколико месеци након експлозије остаци разнетог супер-дина имају луминозност реда  $10^{11} L_{\odot}$  што отприлике одговара сјају читаве галаксије. Ови остаци шире се великом брзином у виду небуле дугиних боја која ће достићи величину од педесетак светлосних година пре него што, након 100.000 година, потпуно не избледи и утопи се у међузвездани простор. Неутронска звезда, до скоро заробљена у центру звезде, почиње самостални живот. Маса неутронске звезде сада је нешто мања од Чандрасекаровог лимита јер је експлозија супернове однела део површинског слоја.[114]

### 3.3.6 Настанак црне рупе

Сценарио који смо описали у секцији 3.3.5 јесте најчешћи али не и једини. У случају када дегенерисано језгро има масу већу од 2-3 масе Сунца<sup>38</sup> ни дегенеративни притисак не-

<sup>38</sup>Ова гранична вредност зове се "Толман-Опенхајмер-Волкофов лимит" али тачна вредност још увек није утврђена.





**Слика 3.29:** Уметничка визија недавно откривене црне рупе која путује кроз Млечни пут брзином од  $400.000\text{km/h}$ , четири пут брже од звезда у том делу галаксије. Сматра се да је овако велика брзина настала током експлозије супернове која је као "метак" испалила тек створену црну рупу у космос.[127]

трона није у стању да заустави потпуни гравитациони колапс. Према општој теорији релативитета колапс материје наставља се до сингуларитета, материјалне тачке без димензија. О црним рупама и њиховим особинама говорићемо опширно у секцији 4.3. Овде је довољно напоменути да се, у зависности од масе црне рупе, око ње формира нематеријална сфера унутар које све трајекторије воде у централни сингуларитет. Полупречник те сфере зове се Шварцшилдов радијус и директно је зависан од масе колабирајуће матерје.

Посматрач са стране, међутим, никад не би видео тренутак формирања сингуларитета. Како се полупречник језгра буде приближавао Шварцшилдовом радијусу, услед све јаче гравитације, изгледаће као да време за колабирајућу звезду почиње да тече све спорије. Такође, светлост коју језгро емитује губи велики део енергије на савладавање гравитационог поља па ће светлост која стиже до посматрача постајати све црвенија. Језгро би наставило да се смањује све спорије да би у тренутку достизања Шварцшилдовога радијуса колапс наизглед стао. Светлост коју језгро емитује имала би све већу таласну дужину, све док не би потпуно ишчезла.[117]

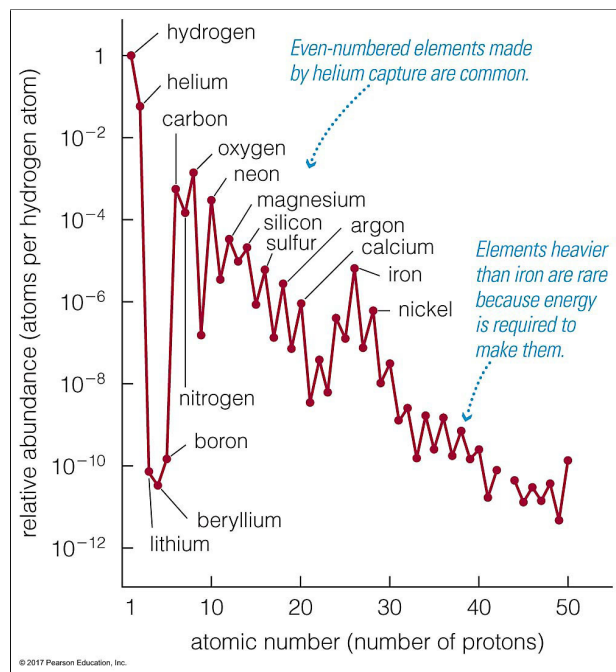
На жалост, механизам настанка црних рупа до данас није потпуно објашњен. Једна од могућности је да, након експлозије супернове, један део одбаченог материјала падне назад на неутронску звезду и повећа њену масу. Када она достигне максимално могућу вредност, настаје колапс неутронске звезде у црну рупу. Међутим, ми још увек не знамо да ли је, код одређених типова звезда, после експлозије супернове могућ настајак нестабилне неутронске звезде која еволуира у црну рупу. Такође не постоји јасна веза између почет-

не масе звезде и масе црне рупе на крају еволуције. И на крају, постоји питање да ли је могуће да масивна звезда тихо колабира у црну рупу не пролазећи кроз стадијум супернове.[117]

Постоји забележен случај да је једна суперциновска звезда у галаксији NGC 6946, која је иначе позната по великом броју масивних звезда и честим суперновама, буквално нестала. Та звезда јасно је видљива на снимцима из 2008. године али је на снимку из 2014. године нема. Све указује на то да је звезда директно колабирала у црну рупу не остављајући никакав други траг за собом. Математичке симулације, штавише, показују да звезде чија је маса мања од  $17M_{\odot}$  завршавају као неутронске звезде после експлозије супернове, док оне масивније тихо колабирају директно у црну рупу. Међутим, ово је још увек непотврђена теорија с обзиром да имамо само један доказ који тој теорији иде у прилог.[128]

### 3.3.7 Нуклеосинтеза

Када смо у секцији 1.1.1 говорили о ”великом праску” истакли смо да су на самом почетку космоса створена само три хемијска елемента: водоник, хелијум и минимална количина литијума. Сви тежи елементи настали су на неки други начин. Видели смо да звезде током процеса нуклеарне фузије могу да од хелијума створе читав низ тежих елемената. Након формирања планетарне небуле или експлозије супернове ти елементи наћи ће се у космичком простору и послужити као грађа за следећу генерацију звезда и планета. Али овај модел није комплетан. Као што смо видели из табеле 3.1, нуклеарна фузија не може да произведе ниједан елемент који се у периодном систему елемената налази иза гвожђа. Штавише, нуклеарна фузија у звездама може да креира врло скроман скуп хемијских елемената: угљеник, азот, кисеоник, неон, магнезијум, силицијум, сумпор, аргон, калцијум, титанијум, хром и гвожђе. С обзиром да гвожђе има атомски број 26, да последњи природно створени елемент, уранијум, има атомски број 92 и да последњи елемент креиран у лабораторији, оганесон, има атомски број 118[129], мора да постоји неки други процес који ће креирати елементе са атомским бројем 27 и већим, као и све елементе који имају атомски број мањи од 26 а који се не могу створити фузијом у звездама.[130]



**Слика 3.30:** Заступљеност хемијских елемената у Млечном путу у односу на водоник. Скала је логаритамска што значи да се практично сви елементи осим водоника и хелијума појављују у врло малој количини. Треба уочити да су лакши елементи много заступљенији јер се у космосу елементи тежи од гвожђа креирају само током експлозије супернове.[94]

Процес који то омогућава зове се ”неутронски захват”. Највећа препрека нукларној фузији је електростатичко одбијање истозначно наелектрисаних честица. Чак и најједноставнија фузија два протона описана једначином 2.4 захтева екстремне услове иако се ради о минималној количини наелектрисања. Међутим, неутрон је електрично неутрална честица и може се примаћи позитивно наелектрисаном нуклеусу без икаквих препрека.

Када језгро неког хемијског елемента захвати неутрон могуће је да га једноставно избаци натраг и врати се у своје првобитно стање. Тај процес је веома редак, са изузетком хелијума где је то редовна појава. Уместо да неутрон буде избачен, језгро сада има исти атомски број и један неутрон више. Формира се нови изотоп хемијског елемента који је у великом броју случајева нестабилан, односно радиоактиван. У случају емисије алфа-честице (језгра хелијума) атомски број елемента се смањује за два (добивамо ”лакши” елемент). У случају бета-распада, неутрон у језгру се распада на протон, електрон и антинеутрино:



Овај протон повећава атомски број за један, трансформишући почетни елемент у следећи (”тежи”) елемент у периодном систему. Нови елемент такође не мора да буде стабилан. У том случају настаје читава каскада радиоактивних распада која се завршава тек када се у ланцу појави неки стабилни изотоп. Укратко, процесом неутронског захвата могуће је креирати елементе који су и лакши и тежи од гвожђа.[130]

Проблем са овим моделом је што слободних неутрона у природи нема јер се сви налазе везани у атомским језгрима. Слободни неутрон је, штавише, нестабилан а време његовог полураспада мери се минутима. Распад неутрона дат је једначином (3.6). Једини природни процеси који генеришу огромну количину слободних неутрона су процеси који се одвијају на звездама. Процес захвата неутрона може да буде спор или брз.[130]

Спори захват (такозвани *s*-процес<sup>39</sup>) подразумева да атомско језгро погоди само један неутрон. Новоформирано језгро треба да има сасвим довољно времена да трансмутира у неки други елемент кроз алфа- или бета-распад пре него што га погоди следећи неутрон. Процес се одиграва у довољно разређеној атмосфери црвених џинова. Елементи креирани на овај начин отплутаће у космички простор након формирања планетарне небуле.

Детаљи брзог процеса су нам много мање познати с обзиром да га је немогуће репродуковати у лабораторији (такозвани *r*-процес<sup>40</sup>). Током овог процеса једно атомско језгро бива ”избомбардовано” великим бројем неутрона у врло кратком року, много пре него што успе да се трансформише у неки други елемент. Настају егзотична, високо нестабилна атомска језгра пребогата неутронима која се распадају на најразличитије начине. Овај процес могућ је у првим сатима након експлозије супернове када количина слободних неутрона и обиље енергије омогућавају креирање чак и најтежих елемената. Целокупно наше знање о брзом неутронском захвату настало је на основу изучавања спектра супернових и математичких симулација.[130, 124]

---

<sup>39</sup>*s* = *slow*

<sup>40</sup>*r* = *rapid*

Спори и брзи процес не креирају исти скуп хемијских елемената. Ево како настају неки од њих:[130]

- Елементи креирани спорим процесом: флуор, натријум, алуминијум, фосфор, хлор, бром, стронцијум, цирконијум, молибден, ниобијум, калај, баријум, олово...
- Елементи креирани брзим процесом: калијум, манган, кобалт, бакар, цинк, галијум, германијум, арсен, селен, сребро, јод, цезијум, иридијум, платина, злато, торијум, уранијум...
- Елементи који се креирају кроз оба процеса: никл, паладијум, кадмијум, волфрам, жива, бизмут...

Било да су креирани спорим или брзим процесом, сви ови елементи неупоредиво су мање заступљени у природи од лакших елемената попут угљеника, азота, кисеоника или силицијума који се у огромним количинама креирају класичним фузионим процесом у масивнијим звездама.

Да би се, међутим, креирао један атом злата потребно је да језгро гвожђа, тако рећи симултано, погоди тачно 141 неутрон. Минимална пауза у приливу ових неутрона довешће до тренутног распада нестабилног језгра гвожђа чиме се прекида ланац који води до атома злата. Зато ће чак и у екстремним условима који владају током експлозије супернове врло мали број атома гвожђа бити конвертован у злато. То објашњава чињеницу да на Земљи на сваки грам злата долазе две тоне песка.[130]



**Слика 3.31:** Фриц Цвики снимљен почетком тридесетих година прошлог века у опсерваторији Паломар. Цвики не само да је дао велики допринос изучавању супернових већ је био и први астроном који је претпоставио да се повезаност галаксија и галактичких кластера може објаснити једино присуством ”огромне количине невидљиве, тамне материје”. Цвикијеву хипотезу експериментално ће потврдити Вера Рубин 1968. године.[131]

### 3.3.8 Типови супернова

Модел супернове којим смо се до сада бавили односи се на усамљене звезде. У секцији 1.3.3 говорили смо о другом типу супернове (Ia) због њеног значаја за мерење највећих космичких растојања. Међутим, постоје и бројни други типови супернова а по значају се истичу оне које настају у бинарним звезданим системима.<sup>41</sup> Механизам настанка супернове унутар бинарног система веома је компликован и дуготрајан процес[132] чији би опис могао да напуни читаву књигу па ћемо га овде прескочити. Систематизацију супернових

<sup>41</sup>Највећи број звезда у космосу припада двојним или тројним системима. Типичан пример су нама најближе звезде, Алфа, Бета и Проксима Кентаури, које формирају тројни систем.

направили су астрономи Рудолф Минковски и Фриц Цвики и она се данас зове ”систем Минковски-Цвики”.

Грубо гледано, све супернове су подељене у два типа, у зависности од тога да ли се у спектру супернове уочавају карактеристичне линије водоника (тип II) или не (тип I који има три подтипа: Ia, Ib i Ic). У суштини, типови Ib, Ic и II су веома слични<sup>42</sup> док већ поменути тип Ia настаје на сасвим други начин.[88]

### 3.3.9 Хипернове

Најмасивније звезде називамо хипер-гигантима. То су једине звезде које имају масу већу од  $150\text{-}200M_{\odot}$ . Имају огромну луминозност и свака од њих је по запремини милиони пута већа од Сунца. Током свог формирања ове звезде ”потроше” читав молекуларни облак што се дешава веома ретко. С обзиром на своју масу, хипер-гиганти живе врло кратко, никад дуже од пар милиона година а врло често и краће. Препознају се пре свега по томе што им је луминозност већа од супер-гиганата и што губе велики део масе кроз стеларни ветар. Ове звезде, док су у главном низу, заузимају крајњи горњи леви угао на H-R дијаграму. Када напусте главни низ хипер-цинови могу да промене неколико ”идентитета” у складу са фузионим процесима који се смењују у унутрашњости звезде: почињу као црвени супер-гиганти са радијусом од  $100R_{\odot}$ , затим једно кратко време проводе као жути супер-цинови да би на крају завршили као плави супер-цинови са радијусом од  $25R_{\odot}$ . Што су старији, хипер-цинове губе масу све брже. Луминозност им врло често расте изнад очекиваних вредности а овај феномен још није објашњен.[133]

Хипернове завршавају свој живот експлозијом чија је снага бар 30 пута већа од класичне супернове. Механизам настанка хипернове није до краја познат јер се хипернове појављују веома ретко. Сматра се да хипернове, баш као и супернове, настају услед гравитационог колапса језгра. Приликом експлозије ослобађа се огромна количина енергије коју на Земљи детектујемо као краткотрајни импулс високо-енергетског гама-зрачења. Стручни назив за ову појаву је ”Gamma Ray Burst” (GRB). Хипернова је само један од могућих узрока настанка GRB-а док се о другим нагађа још од 1970. године када је појава први пут регистрована.<sup>43</sup> У случају хипернове SN1998bw симултана осматрања са Земље и са италијанског сателита ВерроSAX први пут су потврдила да је GRB заиста дошао из правца хипернове.

Један од модела експлозије хипернове сугерише да је она контролисана јаким магнетним пољем и да се продукти експлозије шире у два дијаметрално супротна смера уместо сферно-симетрично, као у случају стандардне супернове (слика 3.32). Финални резултат

---

<sup>42</sup>Супернова типа Ib означава експлозију звезде која је већ изгубила спољашњи слој водоника. Супернова типа Ic представља експлозију звезде која је изгубила и водонични и хелијумски слој.[88]

<sup>43</sup>Само откриће десило се случајно: амерички војни сателити који су рутински пратили руски нуклеарни арсенал регистровани су догађај који је у првом тренутку личио на нуклеарну експлозију. Испоставило се, међутим, да се извор зрачења налазио у дубоком космосу.



**Слика 3.32:** Уметничка визија експлозије хипернове. Два дијаметрално супротна млаза обликована су снажним магнетним пољем и са собом носе огромне количине материје и енергије у виду гама-зрака ("Gamma Ray Bursts"). Хипернове су врло ретка појава тако да о њима знамо врло мало (аутор илустрације непознат).

хипернове вероватно је црна рупа чија је маса већа од  $3M_{\odot}$  али није искључена могућност настанка неутронске звезде или магнетара.<sup>44</sup>

До сада је осмотрено свега неколико хипернових и спектар сваке од њих показује потпуно одсуство водоника и хелијума. То указује да су хипер-џинови масивне звезде које су у потпуности конвертовале водоник и хелијум у угљеник и кисеоник.[124]

### 3.3.10 Живот у околини масивних звезда

До сада је откривено на стотине екстра-соларних планета али ниједна од њих се не налази у околини масивне звезде. То не мора да значи да такве планете не постоје јер су сва досадашња посматрања била ограничена на звезде средње и мале масе. Са друге стране, масивне звезде имају врло кратак животни век који се мери милионима а не милијардама година. То је прилично кратак период да би се формирале планете налик Земљи.

Чак и да је формирање таквих планета могуће, оне би се налазиле у крајње негостољубивом окружењу: масивне звезде емитују огромне количине ултраљубичастог зрачења и наелектрисаних честица. У односу на Сунце, stelарни ветар масивне звезде носи милијардама пута више материјала брзинама које достижу хиљаде километара у секунди. Тако јак

---

<sup>44</sup>Магнетар је неутронска звезда али са много јачим магнетним пољем од уобичајеног. О магнетарима ћемо говорити у секцији 4.2.2.

стеларни ветар једноставно би уништио атмосферу сваке планете која би се евентуално формирала.[134]

Живот у околини масивне звезда једноставно није могућ, чак и ако се којим случајем планета формира на оптималном растојању. Разлог је прост: развој живота тражи време. Од тренутка настанка Земље па до појаве првих вишећелијских форми прошло је око милијарду година. А то је време које на располагању нема ниједна масивна звезда. Развој једноћелијског живота је много бржи али, чак и ако би којим чудом успео да се појави, експлозија супернове би га збрисала у врло кратком року. Интелигентни ванземаљци сигурно не станују у околини велике плаве звезде.

### 3.3.11 Супернове кроз историју

Прва документована супернова потиче из 185. године, забележили су је кинески астрономи. Из њихових записа произилази да је ”гостујућа звезда” била видљива током осам месеци. Следеће забележене експлозије десиле су се 393, 1006, 1054, 1181, 1572. и 1604. године. Најимпресивнија је, свакако, била она из 1054. године која је створила небулу ”Краба” (види слику 4.16). Детаљно су је описали кинески и корејски астрономи а траг о њој оставили су и тадашњи становници Северне Америке у виду цртежа на стенама Аризоне и Новог Мексика. Значајна је и супернова из 1572. године коју је проучавао Тихо Брахе и о њој написао читаву књигу, ”De nova stella”. Термин ”супернова” исковали су Валтер Баде и Фриц Цвики почетком тридесетих година прошлог века док су проучавали остатке експлозије супернове SN1885а у галаксији Андромеда.

На жалост данашњих астронома, до сада нисмо имали прилику да савременим телескопима посматрамо експлозију супернове у близини Земље. У фебруару 1987. године експлодирала је звезда ”Sanduleak” у Великом Магелановом облаку на растојању од 180.000 светлосних година. Ово је, истовремено, и последња експлозија супернове која се могла



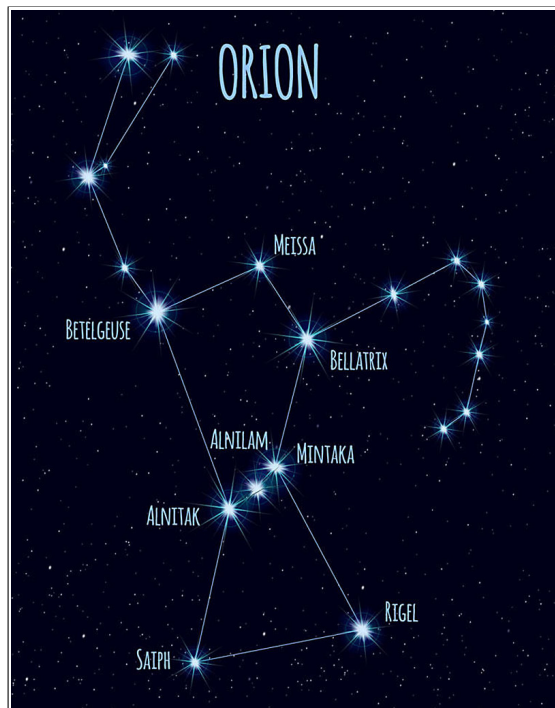
Слика 3.33: Тихо Брахе, дански астроном, приказан у својој опсерваторији ”Ураниборг” на острву Хвен. Брахе је био један од најзначајнијих средњовековних астронома а његова мерења и белешке вековима су служиле као поуздан извор података. Ова илустрација први пут се појавила као бакрорез у његовој књизи ”Astronomiæ instauratæ mechanica” из 1598. године. Обојена је много година касније.[135]

видети голим оком.<sup>45</sup> Претпоставља се да је пре експлозије звезда имала масу од око  $20M_{\odot}$  а супернова је добила ознаку SN1987a.[124, 136]

У галаксији као што је наша, супернова се појављује на сваких педесет година. Многе од њих не можемо да пратимо јер су заклоњене густим облацима гаса и прашине. На космичком нивоу, експлозија супернове дешава се на сваких пар секунди. Данашњи телескопи толико су моћни да их можемо детектовати чак и у галаксијама које су милијардама светлосних година далеко од нас. То не значи да је детекција супернових лака, напротив. Телескопи су најчешће фокусирани на мали део неба тако да су шансе да уочимо супернову у углу космоса који управо посматрамо врло мале. Сам тренутак експлозије супернове први пут је снимљен тек 2008. године.[136]

Када ће се десити следећа спектакуларна експлозија супернове, налик на ону из 1054. године? Бетелгез, црвени супер-џин 700 пута већи од Сунца, једна од звезда која чини сазвежђе Орион, налази се на самом крају свог живота. Звезда је током 2019. године изгубила 40% свог сјаја. Постепен пад сјаја био је регистрован много раније, чак су га нека аборигинска племена унела у своја усмена предања. Иако научници имају проблем да објасне одакле тако нагло смањење сјаја потиче, јасно је да се са Бетелгезом збива нешто драматично. Већина сматра да је експлозија супернове сада неминовна. С обзиром на релативно малу дањину од 725 светлосних година, супернова ће, гледано са Земље, имати спектакуларан изглед. И даље ће то бити само тачка на небу, али толико светла да ће ноћу стварати сенке. По сјају биће налик полумесецу и моћи ће с лакоћом да се види и по дану најмање годину дана. Ноћу ће моћи да се види голим оком још неколико година, све док остаци експлодирале звезде на постану сувише тамни и ретки. Након тога, сазвежђе Ориона имаће једну звезду мање.[138]

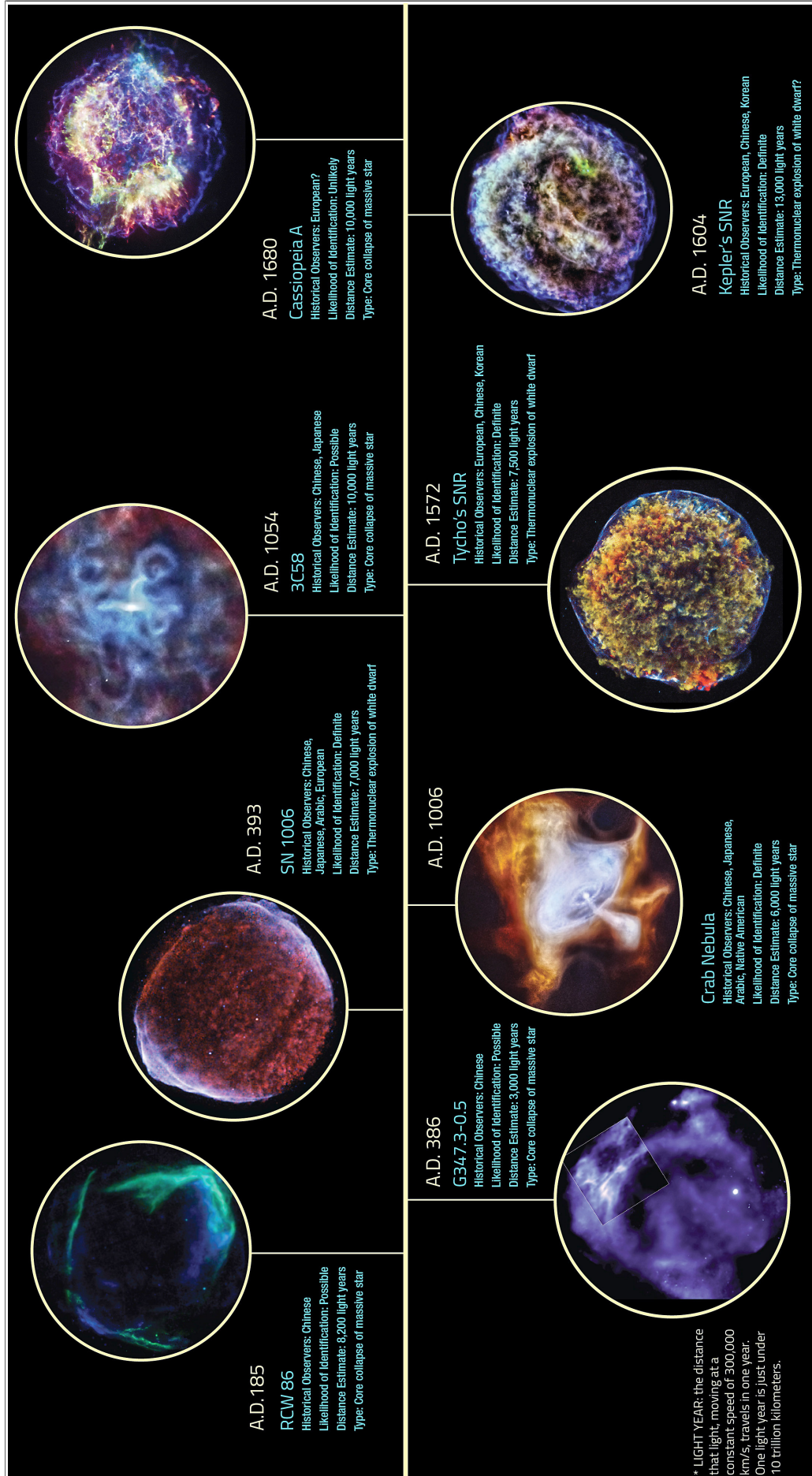
Експлозија супернове која би се десила на растојању мањем од 100 светлосних година могла би да има катастрофалне последице по Земљу. Постоје, рецимо, јаке индикације да су експлозија оближње супернове и пратеће зрачење били узрок масовног нестанка бројних животињских врста пре око 2,6 милиона година. Бетелгез је на сигурном растојању тако да можемо мирно да очекујемо супернову која може да се деси колико сутра. Научници, међутим, кажу да ћемо морати да се стрпимо јер последњи дани Бетелгеца могу да се прогледу на наредних 100.000 година.



Слика 3.34: Орион је једно од најлепших и најочљивијих сазвежђа на ноћном небу. Његово "лево раме", Бетелгез, експлодираће као супернова у наредних 100.000 година.[137]

<sup>45</sup>...под условом да сте знали у ком правцу да гледате.





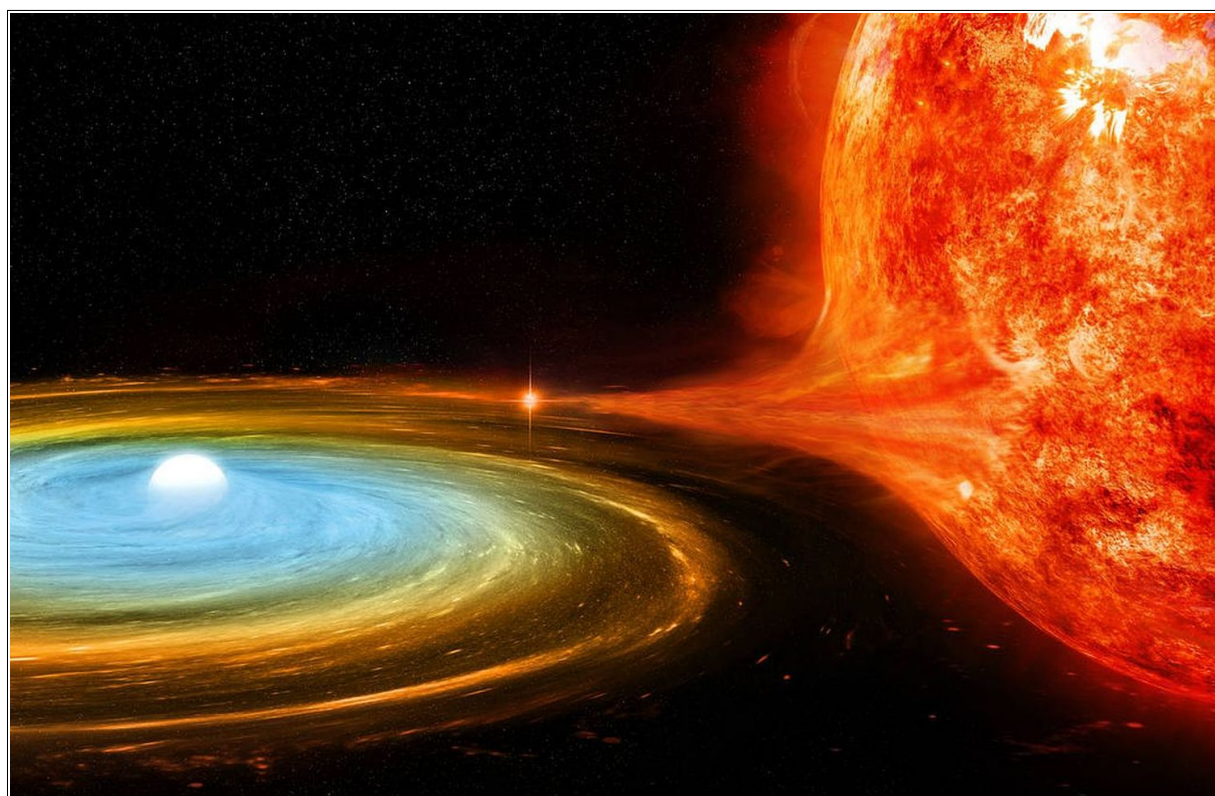
Слика 3.35: Супренове које смо до сада могли да видимо голим оком. [139]



## Глава 4

### Звездани остаци

#### 4.1 Бели патуљци



Слика 4.1: Бели патуљак у бинарном систему[140]

Као што смо видели, Сунце и највећи број звезда у космосу (око 97% звезда Млечног пута[141]), завршиће свој живот као бели патуљци. С обзиром да се бели патуљци јављају као крајњи стадијум у еволуцији звезда које немају довољну масу да би фузионисале угљеник у теже елементе, бели патуљци доминантно су састављени управо од угљеника уз мање количине кисеоника, водоника и хелијума.[142] Ова материја је скоро потпуно јонизирана и флуидна: нуклеуси поменутих елемената окружени су облаком високо-енергетских електрона.[143]

### 4.1.1 Откриће

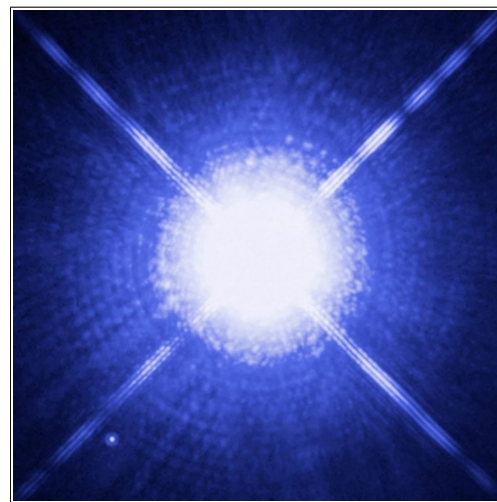
Први бели патуљак откривен је 1844. године када је Фридрих Бесел приметио да се Сиријус, најсјајнија звезда на небу, незнатно помера осцилујући око свог централног положаја. Бесел је исправно претпоставио да је то померање проузроковано гравитационим дејством неког невидљивог објекта. Тек 1863. године је Алван Кларк, оптичар и конструктор телескопа, спазио мистериозан објекат за који је касније доказано да је бели патуљак (слика 4.2). Звезда и пратећи бели патуљак орбитирају око заједничког центра гравитације са периодом од 50 година. Техника којом су Бесел и Кларк открили првог белог патуљка користи се и данас.[144]

### 4.1.2 Структура и особине

У белим патуљцима не одвијају се нуклеарне реакције. Самим тим више не постоји хидростатичка равнотежа између силе гравитације и интерног притиска генерисаног нуклеарном фузијом. Долази до гравитационог колапса материје и повећања њене густине. Према Паулијевом принципу искључивости, који смо кратко поменули у секцији 1.2.7, два фермиона (честице полуцелобројног спина као што су електрони, неутрини, протони и неутрони) не могу се налазити у идентичном енергетском стању. С обзиром да спин електрона може имати две супротне вредности, то значи да у истом енергетском нивоу атома могу бити само два електрона. Ово није проблем у ”обичном” гасу јер су атоми размакнута а у околном простору нема слободних електрона да попуне све енергетске нивое у атомима. Међутим, у белом патуљку електрони су толико близу да формирају тзв. ”електронски гас” који потпуно обухвата атомске нуклеусе тако да су сви енергетски нивои атома максимално попуњени. Материја у оваквом стању назива се ”дегенерисаном”: даљи колапс белог патуљка спречен је дегенеративним притиском електронског гаса и настаје нова равнотежа.[146, 142]

Овакво понашање предвиђа и Хајзенбергов принцип неодређености. У једном свом облику, принцип каже да су неодређености импулса и положаја честице обрнуто пропорционалне величине. У веома згуснутој материји, положаји честица су релативно прецизно одређени. Самим тим импулс честица мора да има велике варијације што значи да добар део честица мора да има велику брзину односно кинетичку енергију. Потребна је огромна сила да би се превладала сумарна кинетичка енергија честица и изазвала даља компресија материје.[146]

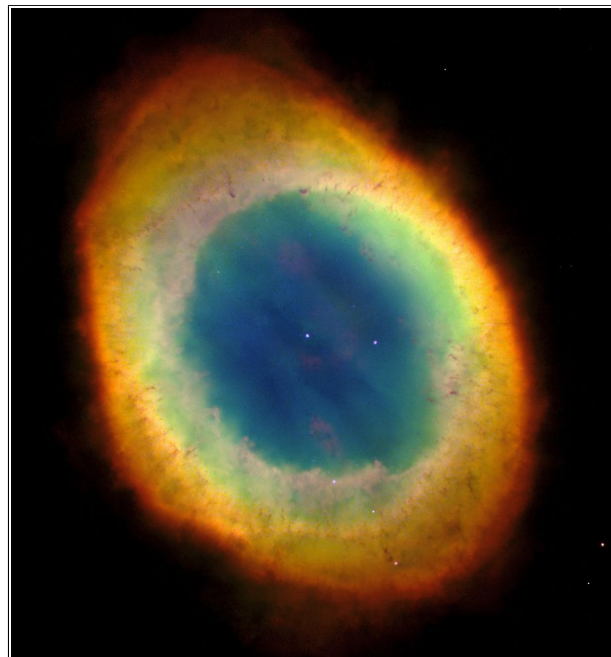
Бели патуљци опажени у нашој галаксији имају масу од  $0,17M_{\odot}$  до  $1,33M_{\odot}$ , с тим да се огромна већина налази у дијапазону од  $0,5M_{\odot}$  до  $0,7M_{\odot}$ , са јасно израженим просеком од



Слика 4.2: Сиријус, најсјајнија звезда на небу. Сјајна тачка у доњем левом углу слике представља белог патуљка чије је постојање предвидео Фридрих Бесел.[145]

$0,6M_{\odot}$ . По величини, бели патуљак одговара планети налик на Земљу. Самим тим, густина белог патуљка је огромна и креће се око једне тоне по кубном сантиметру.[141] Убрзање силе теже на површини патуљка је од 100 до 350.000 пута веће од оног на Земљи. Због тога је атмосфера белог патуљка, најчешће састављена од водоника и хелијума, веома танка. Да Земља има гравитацију белог патуљка, атмосфера не би могла да досегне више спратове солитера.[146]

На Херцшпрунг-Раселовом дијаграму (слика 1.20) бели патуљци заузимају српасту област испод главног низа јер имају високу температуру (од 100.000 келвина у тренутку стварања до пар хиљада келвина у старијем добу). Међутим, бели патуљци имају врло малу луминозност због мале емисионе површине.[142] Зато се ни један бели патуљак не може видети голим оком. Штавише, њихово откривање је тешко чак и помоћу великих телескопа јер су бели патуљци веома бледи (гледано са Земље већина патуљака има привидни сјај раван сијалици од 100W на површини Месеца).[143] Због високе температуре, тек створени бели патуљци емитују ултраљубичасту светлост и X-зраке високе енергије. Када ово зрачење погоди планетарну небулу (одбачене остатке ишчезле звезде), небула апсорбује део енергије и почиње да светли читавим спектром боја при чему свака боја одговара одређеној температури.[143]



**Слика 4.3:** Прстенаста маглина M57 у сазвезђу Лире. Тачка у самом центру је млади бели патуљак, стар свега 4.000 година. Интензивно ултраљубичасто светло и X-зраци које патуљак емитује осветљавају планетарну небулу чија се боја мења од плаве (најтоплија зона) до црвене (најхладнија).[147]

Бели патуљци имају неке необичне особине: што су масивније, то су мање: гравитациона сила је у том случају јача тако да је потребан већи дегенеративни притисак електрона да би се успоставила равнотежа. А дегенеративни притисак расте са смањењем запремине.[146] Може се показати да веза између полупречника и масе белог патуљка има следећи облик:[141]

$$R \sim \frac{1}{\sqrt[3]{M}} \quad (4.1)$$

Индијски астрофизичар Субраманјан Чандрасекар је срачунао да уколико маса белог патуљка пређе границу од  $1,4M_{\odot}$ <sup>1</sup> дегенеративни притисак електрона достиже максимално могућу вредност и више није у стању да се одупре сили гравитације. Пошто Паулијев принцип ни тада не сме да буде нарушен, материја прелази у своје наредно, још компакт-

<sup>1</sup>”Чандрасекаров лимит”

није дегенерисано стање: електрони улазе у атомски нуклеус и са протонима формирају неутроне. Настаје неутронска звезда која се гравитационом колапсу опире дегенеративним притиском неутрона.

### 4.1.3 Еволуција усамљених белих патуљака

Усамљени бели патуљци емитују енергију на рачун топлоте сачуване у њиховој унутрашњости али не постоји механизам који би ту енергију надокнадио. Ово за последицу има хлађење белог патуљка које је врло споро, пре свега због мале површине. Унутрашњост белог патуљка је практично непрозирна за зрачење. Сваки пренос енергије зрачењем подразумева да електрони морају да мењају своја енергетска стања што је практично немогуће јер су скоро сва енергетска стања већ попуњена. Зато је зрачење врло неефикасан механизам за хлађење белог патуљка. Међутим, сабијени материјал патуљка има високу кондуктивност што води изједначавању температура тако да унутрашњост белог патуљка има скоро идентичну температуру од око 10 милиона келвина. Та температура пада на десетак хиљада келвина тек у непосредној близини површинског слоја.[141]

Почетно хлађење белог патуљка је релативно брзо. Патуљак ће се охладити до температуре од око 7.000 келвина за око 1,5 милијарди година. Даље хлађење је све спорије. Ако хлађење посматрамо по фазама где свака фаза представља пад температуре од 500 келвина, наредне три фазе ће трајати 300, 400 и 1.500 милијарди година. У каснијим фазама хлађења долази до кристализације материје која почиње у језгру. Ова промена стања ослобађа додатне количине топлоте и додатно продужава процес хлађења. Промена температуре током времена је добро изучен процес који омогућава да се на бази температуре белог патуљка утврди старост звезданог кластера или читаве галаксије којој патуљак припада. Управо том методом установљено је да је Млечни пут стар најмање осам милијарди година.[141]

Ипак, пре или касније све унутрашње резерве топлоте биће исцрпљене и бели патуљак постаје практично невидљив са температуром блиској апсолутној нули. Настаје црни патуљак, гигантски дијамант, састављен од слојевитих кристала угљеника<sup>2</sup> и других елемената.



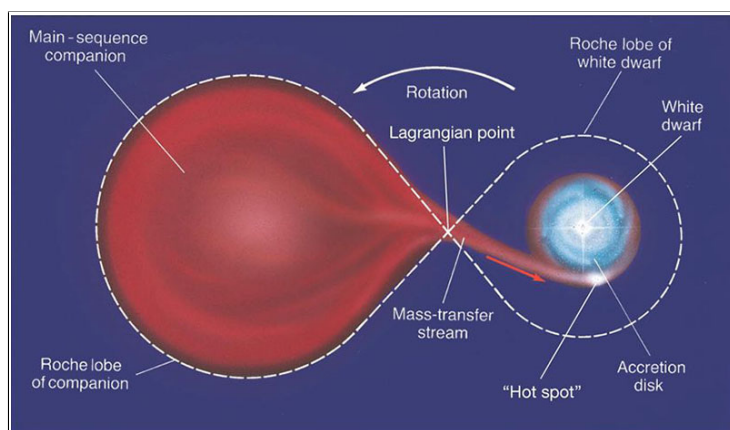
**Слика 4.4:** Експлозија ”нове” виђена са опсерваторије ”Лас Кампањас”. Астрономи су посматрали белог патуљка у бинарном систему ”V1213 Cen” у континуитету од 2003. до 2016. године пре него што је регистрована експлозија.[148]

<sup>2</sup>Кристали угљеника су, заправо, дијаманти.

Да би се бели патуљак у потпуности охладио потребно је да прође више милиона година што далеко превазилази тренутну старост космоса. Зато су црни патуљци и даље хипотетични објекти – верује се да их у космосу још увек нема. Чак и бели патуљци стари преко 10 милијарди година (што их чини једним од најстаријих објеката у космосу) имају температуру од неколико хиљада келвина.[142] Интересантно је да због Паулијевог принципа искључивости који не зависи од температуре, велики проценат електрона никад не може да буде у најнижем енергетском стању. Ово објашњава чињеницу да црни патуљак може да има температуру равну апсолутној нули а да и даље располаже великом унутрашњом енергијом.

#### 4.1.4 Еволуција белих патуљака у бинарним системима

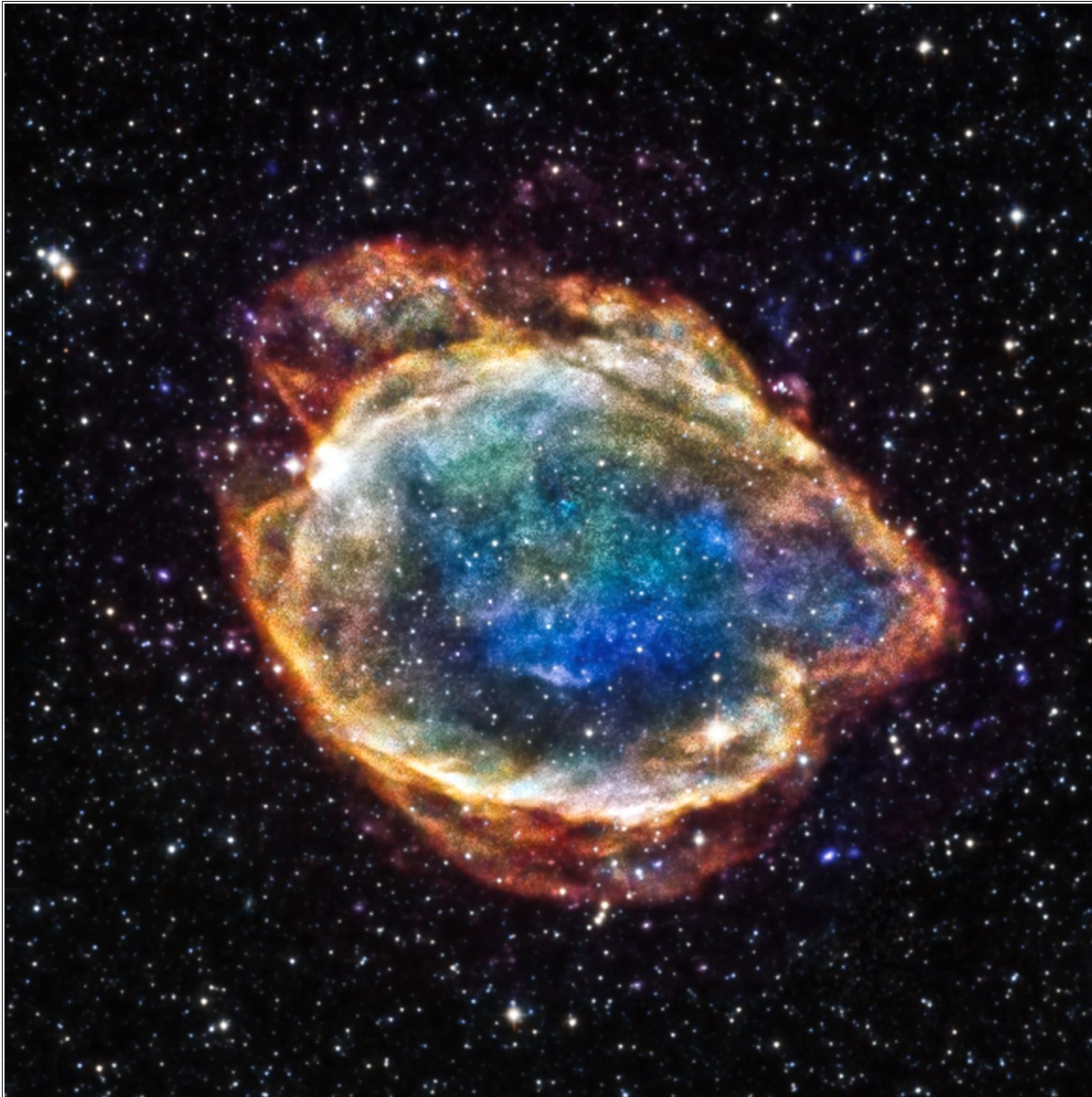
Бели патуљци могу да еволуирају и на много бурнији начин. У ретким случајевима могу да акумулирају гас и прашину из међузвезданог простора или смеђег патуљка у пролазу, прескоче Чандрасекаров лимит и тихо еволуирају у неутронску звезду. Још су драматичније промене код белих патуљака који се налазе у бинарном систему у коме је други члан обична звезда (слика 4.1). У таквом систему постоји невидљива ”Рошова осмица” са две овалне области у



**Слика 4.5:** Рошова осмица. Трансфер материје са звезде на белог патуљка могућ је само ако звезда својом величином достигне или премаши своју ”половину” осмице.[148]

чијим центрима се налазе бели патуљак и звезда (слика 4.5). Рошова осмица представља скуп тачака у којима је гравитациони потенцијал оба тела једнак. Сваки делић материје на овој површини има једнаке шансе да падне на било које од ова два тела. Ако је једно тело веће од свог Рошовог овала и задира у овал другог, могућ је трансфер материје са првог на друго тело. С обзиром да су бели патуљци компактни објекти, много је већа шанса да границе Рошове осмице прекорачи звезда већих димензија.[149]

У том случају формира се карактеристични ”мост” којим бели патуљак у континуитету преузима материју (углавном водоник) са друге звезде.[143] Материјал са звезде не пада директно на белог патуљка већ то ради по спиралној путањи формирајући ”зону агрегације”, густ диск чија температура брзо расте и достиже максимум непосредно изнад површине патуљка. Место где материја преко моста улази у зону агрегације зовемо ”врућом тачком”. Ако се стекну повољни услови (температура и густина материје), на самој површини белог патуљка долази до ланчане нуклеарне реакције и експлозије која се у астрономији назива ”нова” (слика 4.4). Експлозија ће разнети материјал нагомилан око белог патуљка али ће читав бинарни систем остати нетакнут. Од свих типова експлозија које се дешавају у космосу, ”нове” су далеко најчешће, понекад се могу видети голим оком и сјајније су 50.000 пута од Сунца. Видљивост ”нове” износи од неколико дана до пар недеља.



Слика 4.6: G299, остатак супернове типа Ia. [150]

После неког времена бели патуљак ће поново почети да ”краде” материју са суседне звезде све док се не стекну услови за још једну ”нову”. Време које протекне између две узастопне експлозије мери се милионима година. [151, 143]

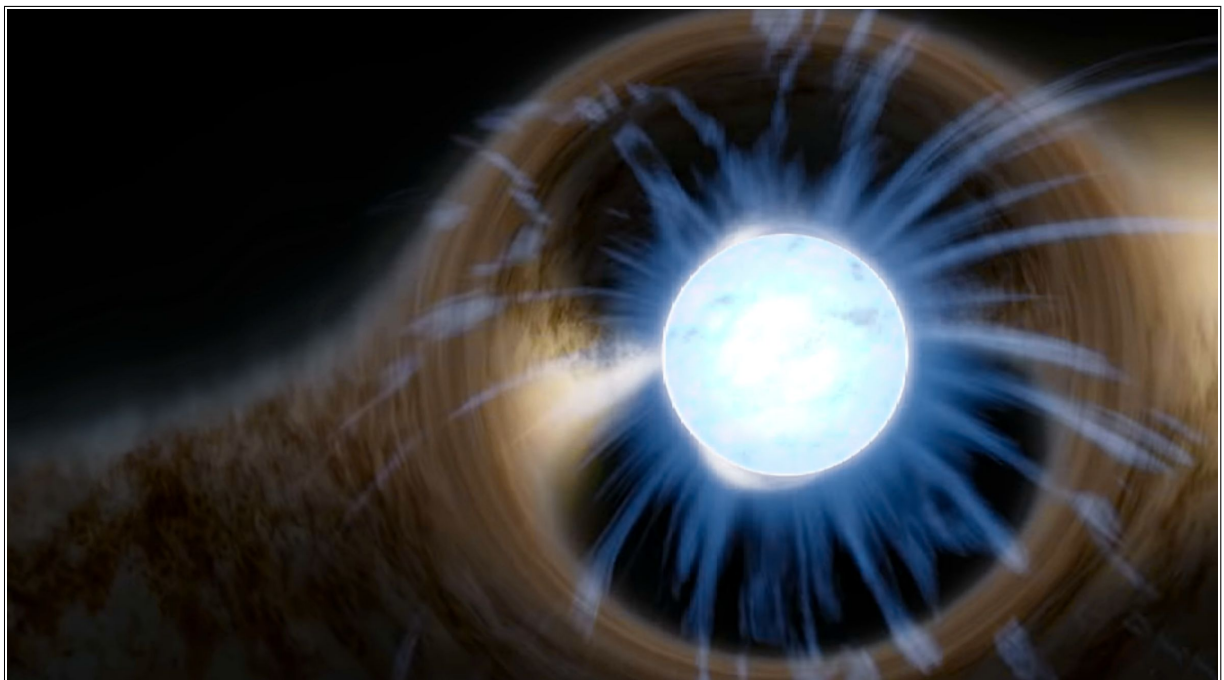
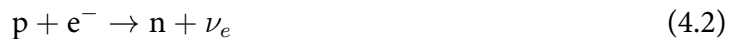
Када је прилив материје са суседа јако интензиван, могуће је да нагомилавање материје на белом патуљку доведе до наглог скока температуре у његовој унутрашњости и неконтролисане нуклеарне реакције која ће почети да фузионише угљеник у теже елементе. Количина генерисане енергије у року од свега пар секунди толико је велика да долази до експлозије која ће потпуно разорити читав бинарни систем (слика 4.6). Ове експлозије називамо суперновама типа Ia о којима смо већ говорили у секцији 1.3.3. Значај ових експлозија је што се могу искористити као ”стандардне свеће” за мерење интергалактичких растојања. Захваљујући овим ”свећама” дошли смо до неких фундаменталних сазнања: када су анализирани подаци за 50 удаљених супернова, испоставило се да су оне тамније



него што се очекивало. Феномен се могао објаснити једино чињеницом да се космос од неког тренутка у прошлости шири све већом брзином.<sup>3</sup>[152]

## 4.2 Неутронске звезде (пулсари)

Неутронска звезда је остатак масивне звезде која је најчешће нестала у експлозији супернове типа II. После колосалне емисије енергије, све што преостаје од звезде је њено ултра-густо језгро чија је типчна маса упоредива са масом Сунца док пречник износи од 10 до 20 километара.[153] У случају мање звезде, колабирајуће језгро се стабилизује дегенеративним притиском електрона описаним у секцији 4.1. У случају масивних звезда овај притисак није довољан и материја прелази у своје наредно дегенеративно стање: електрон је принуђен да уђе у атомски нуклеус, фузионише се са протоном формирајући неутрон и емитујући електронски неутрино:



**Слика 4.7:** Уметничка визија неутронске звезде. Јако гравитационо поље неутронске звезде ствара ефекат такозваног ”гравитационог сочива” које деформише путању светлосних зрака и мења изглед објеката у позадини.[154]

Неутрини врло лако напуштају колабирајуће звездано језгро али неутрони остају заробљени силом гравитације. С обзиром да су неутрони електрично неутралне честице које се међусобно не одбијају, сила гравитација ће сабијати неутроне у све мањи простор све док неутронска материја<sup>4</sup> не достигне густину атомског нуклеуса или већу.[153] Та-

<sup>3</sup>За ово откриће додељена је Нобелова награда за физику 2011. године.

<sup>4</sup>Тзв. ”неутронијум”.[155]

ко настаје екстремно мали, компактан објекат састављен од дегенерисане материје који називамо неутронском звездом.<sup>5</sup>

С обзиром да неутрони, као и електрони, спадају у фермионе и да за њих важи Паулијев принцип искључивости, даљој компресији супротставља се дегенеративни притисак неутрона.[156] Он сам, међутим, није довољан да успостави равнотежу с гравитационом силом ако је маса неутронске звезде већа од  $0,7 M_{\odot}$ . У овом случају репулзивне нуклеарне силе пружају додатну потпору унутрашњој структури. Најмање до сада пронађене неутронске звезде имају масу од  $1,1 M_{\odot}$ .

#### 4.2.1 Откриће



**Слика 4.8:** Џослин Бел са антеном сопствене конструкције помоћу које је открила прву неутронску звезду. Поред ње је њен ментор Ентони Хјуиш.[157]

Неутрон је открио Џејмс Чедвик 1932. године и за то откриће добио Нобелову награду за физику свега три године касније.[158] Одмах су почеле дискусије о томе да ли постоје звезде састављене искључиво од неутрона али је позитиван одговор стигао тек 1967. године. Џослин Бел, у то време последипломац на Универзитету у Кембриџу, учила је чудне, врло правилне импулсе помоћу радио-антене сопствене конструкције. Импулси су сти-зали у тако редовним интервалима (на сваке 1,3 секунде) да је у првом тренутку Белова помислила да се ради о сигналу неке ванземаљске цивилизације. Зато је извор зрачења провизорно и помало шаљиво означила као LGM-1.<sup>6</sup> У кратком року Белова је открила још три оваква извора и дефинитивно одбацила хипотезу о њиховом интелигентном пореклу. У потрагу за новим пулсирајућим изворима укључио се велики број астронома тако да је до краја 1968. године откривено на десетине нових. Након тога је Томас Голд показао да су извори пулсирајућих сигнала заправо ротирајуће неутронске звезде.[159]

<sup>5</sup>Неутронске звезде нису звезде у правом смислу речи јер се у њима, баш као и у белим патуљцима, не одвијају никакве нуклеарне реакције.

<sup>6</sup>Скраћеница за "Little Green Men". Та ознака је касније промењена.

До данас је идентификовано преко 2.000 неутронских звезда док се њихов укупан број у Млечном путу процењује на неколико стотина милиона.[160, 161] Најчувенија је она која се налази у центру небуле ”Краба” (слика 4.16), остатак супернове коју су детаљно описали кинески астрономи 1054. године.<sup>7</sup>[155]

Нобелову награду за откриће неутронске звезде добио је Ентони Хјуиш 1974. године. Хјуиш је био ментор Џослин Бел, надзирао је њен рад али није имао водећу улогу у њему. Нобелов комитет потпуно је игнорисао допринос Белове која је конструисала сасвим нов радио телескоп и помоћу њега открила прву неутронску звезду. Конструкција телескопа није било нимало лака: уз помоћ неколико студената, Џослин Бел је побола преко 1.000 стубова, између њих разапела преко 2.000 диполних антена и све то повезала са око 200 километара каблова. Завршени телескоп имао је површину од скоро два хектара.

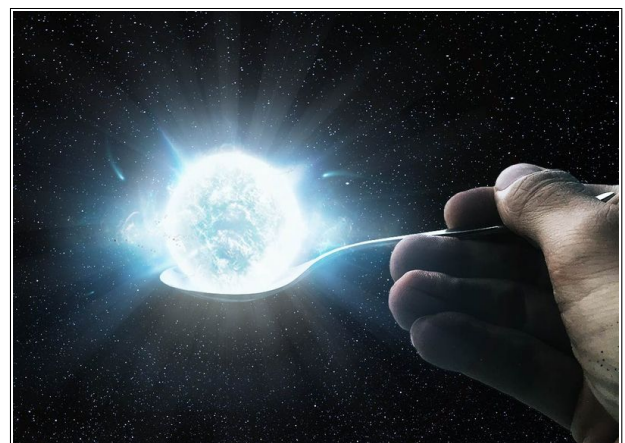
Једна од највећих неправди у историји Нобелове награде никад није исправљена. Џослин Бел је завршила своју докторску тезу о неутронским звездама и након тога престала да се бави радио-астрономијом.[159]

#### 4.2.2 Главне особине

Неутронске звезде имају неке особине атомског језгра, укључујући густину и чињеницу да су доминантно састављене од неутрона и мале количине протона. Међутим, постоји једна битна разлика: док се протони и неутрони у атомском језгру држе на окупу јаком нуклеарном силом, неутронска звезда остаје компактна пре свега захваљујући гравитацији. Такође, атомско језгро је хомогено и има константну густину док густина неутронске звезде драстично зависи од тачке мерења - највећа је у самом центру звезде и ту превазилази густину атомског језгра.[160]

##### Густина

Густина неутронске звезде неупоредиво је већа од густине белог патуљка и износи  $10^{14} \text{g/cm}^3$ . Илустрације ради просечна густина Земље је  $5 \text{g/cm}^3$ . [153] Једна кашичица напуњена материјалом неутронске звезде била би тешка око милијарду тона. Због тога је гравитациона сила на површини неутронске звезде  $2 \times 10^{11}$  пута јача него на површини Земље. Да би објекат напустио површину неутронске звезде потребно је да има брзину равну половини брзине светлости.[153]. Предмет пуштен да пада са висине од једног метра изнад неутронске звезде имао би у тренутку удара брзину од 1400 километара у секунди и потпуно би се стопио са неутрон-



Слика 4.9: Кашичица неутронске звезде има масу од милијарду тона.[162]

<sup>7</sup>Интересантно је да се у европској литератури из тог доба ова супернова не помиње.

ском звездом губећи свој идентитет.[160] Због снажне гравитације, површина неутронске звезде веома је глатка. Највеће неравнине на њеној површини достижу свега пар центиметара.[155]

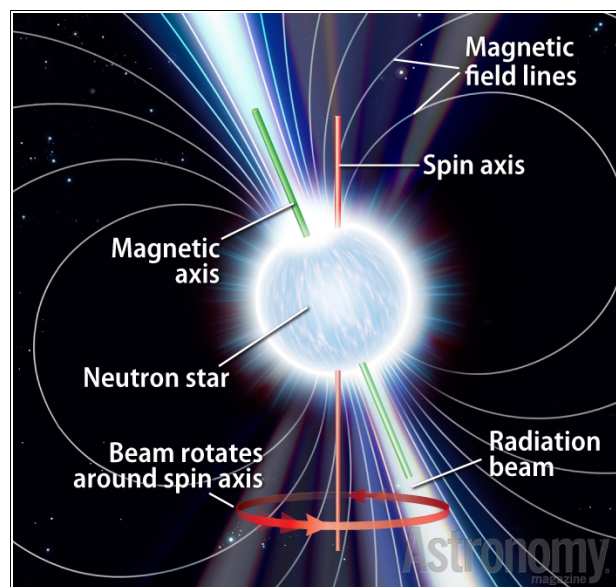
Гравитационо поље око неутронске звезде толико је јако да закривљује путању светлости у складу са Ајнштајновом општом теоријом релативитета. Ово доводи до ефекта тзв. ”гравитационог сочива” помоћу кога можемо да видимо и оно што се налази иза неутронске звезде (види слику 4.7).[161] Због јаке гравитације и закривљености простор-времена у околини неутронске звезде, време на неутронској звезди тече око 20% спорије него на Земљи, а још спорије на екватору због огромних обимних брзина.

### Брзина ротације

Неутронска звезда по правилу има значајан момент импулса, упоредив са оним који је имала првобитна звезда. С обзиром да су полупречник и момент инерције неутронске звезде релативно мали, све неутронске звезде ротирају великим угаоним брзинама које се типично крећу од 0,1 обртаја у секунди па све до 60. Уколико је неутронска звезда део бинарног система, та брзина може да достигне и 700 обртаја у секунди. При овој брзини ротације, тачке на екватору звезде достижу брзину равну четвртини брзине светлости[155]. Код изолованих неутронских звезда брзина ротације се смањује услед губитка енергије путем радијације. Старе неутронске звезде направе један обртај за 8-20 секунди.[156, 153]

### Магнетно поље

Све неутронске звезде имају изузетно јако магнетно поље али механизам његовог настанка није до краја разјашњен. Претпоставља се да се у неутронским звездама магнетни флуks одржава на сличан начин као што се одржава и момент импулса првобитне звезде. Током формирања неутронске звезде линије магнетног поља се скраћују и згушњавају а јачина магнетног поља расте. Илустрације ради, јачина магнетног поља Земље је реда  $10^{-4}\text{T}$ , Сунчево магнетно поље има максималну јачину од 0,3Т у зони Сунчевих пега док у случају неутронских звезда јачина магнетног поља износи од  $10^4\text{T}$  до  $10^8\text{T}$ . Најјаче магнетно поље створено у лабораторијским условима има јачину од 16Т и довољно је јако да на њему лебди жаба захваљујући дијамагнетизму воде.[160]



Слика 4.10: Анатомија неутронске звезде. Када сноп зрачења, ротирајући заједно са неутронском звездом, ”погоди” Земљу, детектујемо ”пулс” који се понавља у правилним интервалима.[163]

Постоје и неутронске звезде које имају и до хиљаду пута јаче магнетно поље од просека других неутронских звезда, све до  $10^{11}$ Т. Ове неутронске звезде називамо магнетарима. Њихово магнетно поље толико је јако да би вам извукло кључеве из џепа са растојања од пола милиона километара.[161] У свим неутронским звездама површински слој спрегнут је с магнетним пољем тако да промена једног изазива промену другог. Та веза је код магнетара још израженија јер је и магнетно поље јаче. Због тога су напони у кори магнетара огромни тако да чак и мале промене у магнетном пољу могу да изазову пукотине у кори које имају експлозивни карактер. Ослобођена енергија пропада кроз спрегнуто магнетно поље доводећи до бурне емисије гама зрачења<sup>8</sup>. Ови ”стеларни земљотреси” забележени су више пута. Најбоље је изучена експлозија која се десила на магнетару SGR1806-20: трајала је само једну десетинку секунде и у том периоду ослободила више енергије него Сунце за 100.000 година.[156, 164]

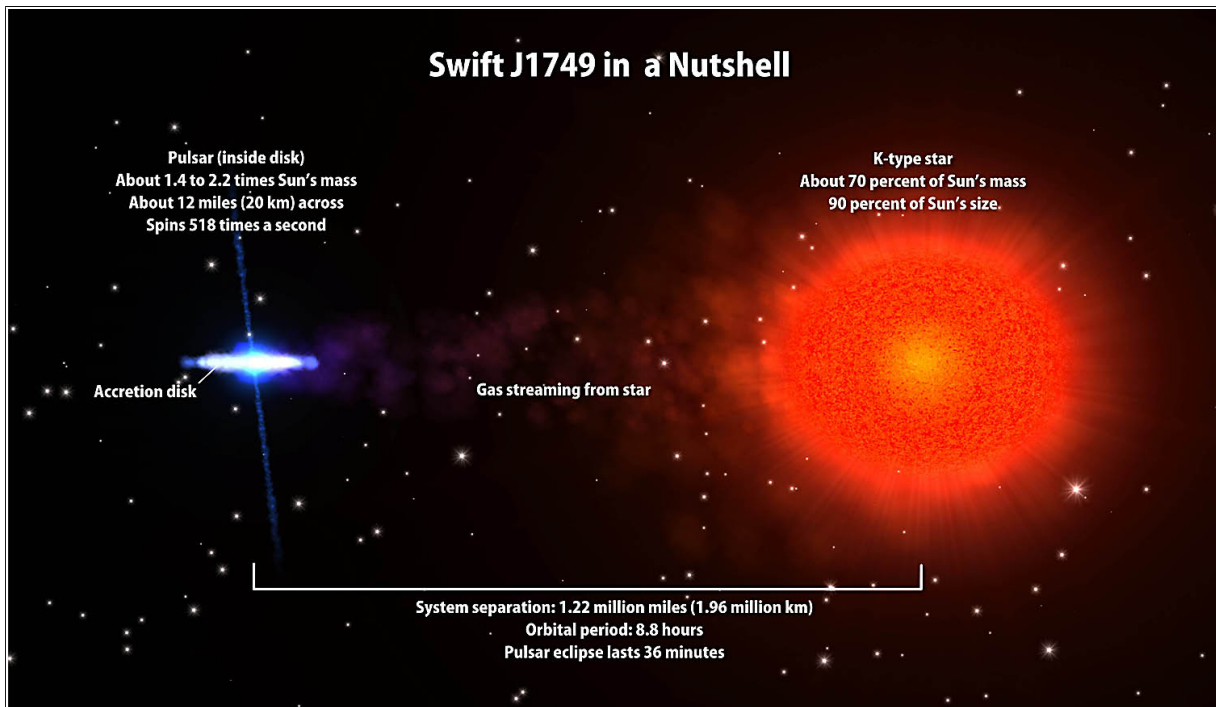


**Слика 4.11:** Уметничка визија ерупције изазване пукотином у напрегнутној кори магнетара. Овакве ерупције ослобађају огромне количине енергије и могу се опазити и са земље.[165]

Овако јако магнетно поље има екстремне последице на све што се нађе у близини неутронске звезде. Магнетари својим магнетним пољем могу да поларизују вакуум тако да он постаје оптички анизотропан. Енергетски нивои атома драстично су измењени, атомска језгра губе сферни облик и попримају облик танког цилиндра. Ако би се човек нашао на пар хиљада километара од неутронске звезде, неутронски електрични импулси постали би хаотични с фаталним последицама по живот. У близини магнетара промене су још драстичније: материја се једноставно дезинтегрише.[161]

---

<sup>8</sup>”Gamma Ray Burst”, појава о којој смо већ говорили. Произведени гама-зраци имају тако високу енергију да би једна таква појава у близини Земље могла да има тешке, ако не и фаталне, последице по живот на њој. Претпоставка је да нас бар једна таква емисија чека у наредних 500 милиона година.[99]



**Слика 4.12:** Брзо-ротирајућа неутронска звезда J1749 која преузима материју са суседне звезде у виду звезданог ветра. Стеларни ветар се приликом пада на неутронску звезду интензивно загрева све док не почне да емитује X-зраке. Суседна звезда изгледа 20% већа него што би требало да буде јер је њен површински слој претворен у разређен облак гаса под дејством снажног зрачења са неутронске звезде.[166]

### 4.2.3 Типови неутронских звезда

При великим брзинама обртања магнетно поље формира узан високо-енергетски сноп зрачења који се поклапа са магнетном осом. То зрачење може да има широк дијапазон таласних дужина, од радио таласа, преко видљиве светлости до X- и гама-зрака. Зато потрага за новим неутронским звездама захтева проучавање широког спектра таласних дужина. У зависности од механизма којим се обезбеђује потребна енергија постоји неколико врста неутронских звезда:[164]

#### Неутронске звезде са ”ротационим погоном”

Потребна енергија долази од кинетичке енергије ротације неутронске звезде. Карактеристични енергетски сноп неутронске звезде настаје приликом интеракције високо-енергетских електрона у околини магнетних полова где је магнетно поље и најјаче. У крајњем билансу, ротација неутронске звезде се успорава и период пулсација се продужава. Оваква неутронска звезда може да генерише електромагнетно зрачење свих врста. Таква неутронска звезда приказана је на слици 4.10.[161]

#### Неутронске звезде са ”топлотним погоном”

Новонастале неутронске звезде имају температуру од око 600.000 келвина.[155] На тако високим температурама уочљива је емисија X-зрака чија енергија варира са температуром површине. У зависност од дела неутронске звезде који је окренут Земљи, у стању смо да

детектујемо суптилне варијације у интензитету зрачења које потичу од малих разлика у температури површине. X-зраци односе део топлоте звезде која се због тога постепено хлади.

### **Неутронске звезде са ”гравитационим погоном”**

Неутронска звезда може да буде део бинарног система. Уколико друга звезда својом величином превазилази границе ”Рошове осмице” (слика 4.5) доћи ће до трансфера материје са пратеће звезде на неутронску звезду. Ако је партнерска звезда релативно мала, око неутронске звезде се формира ротирајући диск материје који са собом доноси и велики момент импулса. Услед тога се неутронска звезда обрће све брже. Процес је стабилан ако је суседна звезда релативно мала. У случају масивнијих звезда трансфер материје врши се у облику ”звезданог ветра” (брзе струје наелектрисаних честица) дуж линија магнетног поља ка магнетним половима неутронске звезде (види слику 4.12). Овакав трансфер мање утиче на брзину ротације неутронске звезде. Конверзијом гравитационе потенцијалне енергије у топлоту, материја која пада на неутронску звезду има све већу температуру, довољну да емитује X- и гама-зраке.[161]

### **Базични метод детекције неутронских звезда**

Пошто се оса магнетног поља и оса ротације не поклапају, приликом обртања неутронске звезде сноп зрачења описује конусну површину. Уколико се Земља налази у близини те површи, радио-телескопи детектују периодични енергетски пулс идентичан оном који је регистровала Џослин Бел својим телескопом. Због тога се неутронске звезде опажене на овај начин називају пулсарима. Гледано са Земље неутронска звезда изгледа као светионик чије светло видимо у правилним интервалима. То истовремено значи да многи пулсари остају неопажени јер се Земља никад не налази на линији снопа зрачења.[156].

Период пулсара је толико правилан да се може измерити са прецизношћу коју на Земљи користимо само код атомских часовника. Тако, на пример, период пулсара J603-72020 износи тачно 0,0148419520154668 секунди, са порастом од 0,0000005 секунди на сваких милион година.[167]

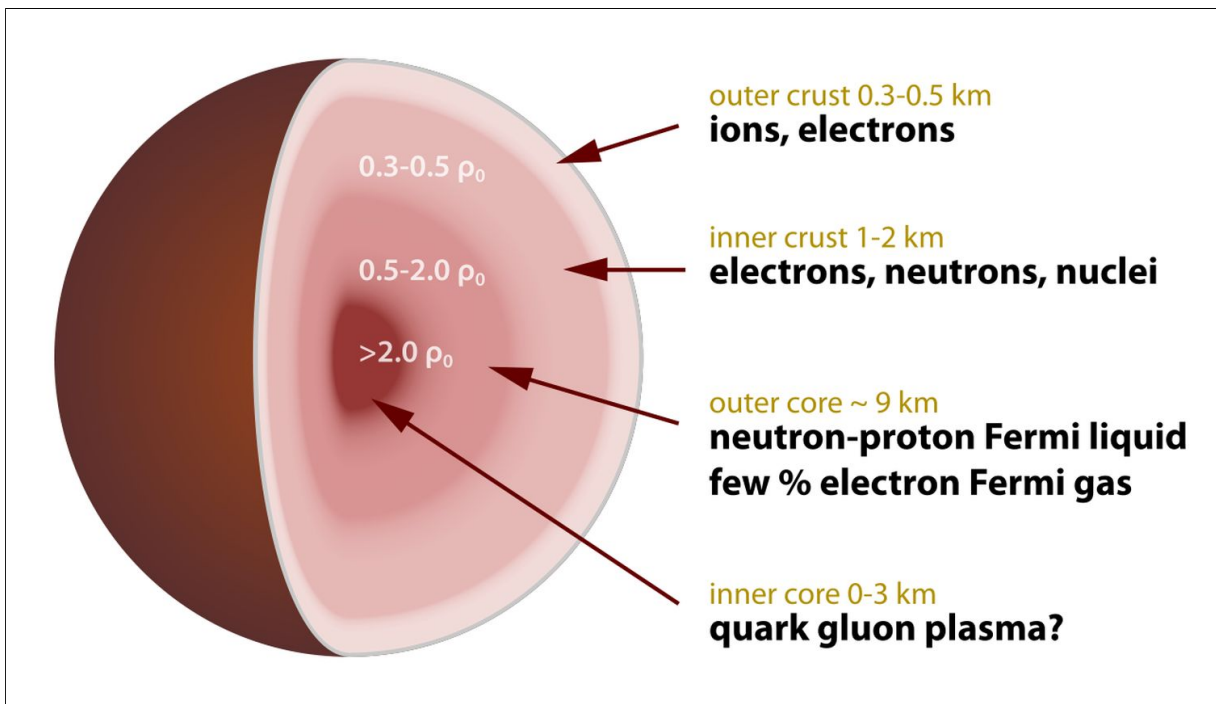
### **4.2.4 Унутрашња структура**

Још увек не постоји општеприхваћени модел унутрашње структуре неутронске звезде. Тренутно се претпоставља да је неутронска звезда састављена од неколико концентричних сферних прстенова:[167, 160]

- Атмосфера: Дебела је свега неколико микрометара и у потпуности је контролисана магнетним пољем.
- Површинска кора: Изузетно тврда, састављена од обичних атомских нуклеуса сабијених у кристалну структуру са морем електрона између њих. Дебљина не прелази 500 метара. Доминантан елемент вероватно је гвожђе. Такође је могуће да гвожђе као тежи елемент пропада кроз кору остављајући у њој само лакше елементе као што су водоник и хелијум. Ако је површинска температура већа од милион келвина,

могуће је да се кора налази у течном стању. Испод коре ређају се слојеви све бога- тији неутронима. Неутрон у слободном стању би се у року од пар минута распао на протон, електрон и антинеутрино али су неутрони у неутронској звезди стабилни захваљујући огромном притиску.

- Унутрашња кора: Састављена је од нуклеуса богатих неутронима, слободних суперфлуидних неутрона и електрона. Под суперфлуидом подразумевамо флуид чи- ја је вискозност једнака нули. У нормалним условима, суперфлуидност се пости- же на јако ниским температурама (у случају хелијума на температури од два келви- на). У унутрашњости неутронске звезде под екстремним условима суперфлуидност се одржава и на температурама од неколико милиона келвина. Дебљина овог слоја износи километар или два.
- Спољашње језгро: Има дебљину од око 9 километара и заузима највећи део унутра- шњости неутронске звезде Састављено је од три концентрична слоја са суперфлу- идним неутронима, протонима и електронима.
- Језгро: Сфера непознате композиције чији радијус износи 0-3km. Претпоставља се да је језгро састављено од неке егзотичне форме материје попут кварк-глуонске пла- зме. Кваркови су елементарне честице од којих су састављени протони и неутрони. Кваркови се држе на окупу јаком нуклеарном силом коју преносе глуони без масе. Верује се да је кварк-глуонска плазма постојала током врло кратког времена у једној од најранијих фаза ”великог праска”.



Слика 4.13: Интерна структура неутронске звезде. Густина појединих слојева дата је у односу на густину атомског нуклеуса  $\rho_0$ . [168]



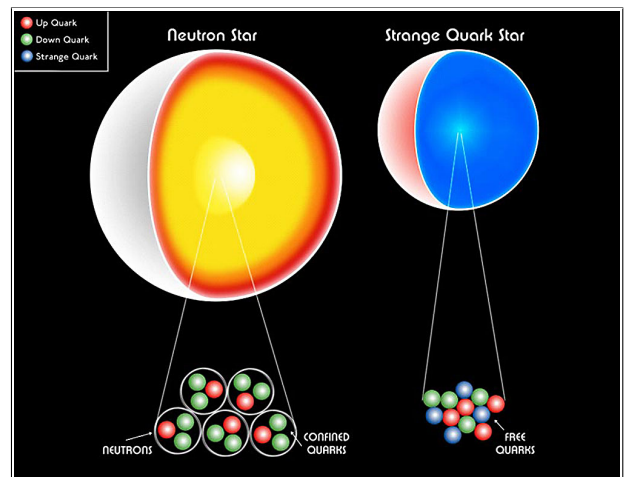
## 4.2.5 Еволуција неутронских звезда

Дегенеративни притисак неутрона удружен са одбојним нуклеарним силама довољан је да одржава равнотежу с гравитацијом све док је маса неутронске звезде мања од максималне вредности.<sup>9</sup> Ова гранична маса није прецизно утврђена али је сигурно да се налази у распону од  $1,5M_{\odot}$  до  $3M_{\odot}$ . Данас се сматра да тачна вредност износи  $2,16M_{\odot}$ . [160] Изнад те границе неутронска звезда доживљава даљи колапс који може да наступи услед преузимања материје са суседне звезде у бинарном систему.

Овде треба узети у обзир да неутрони нису елементарне честице јер имају унутрашњу структуру: сваки неутрон састављен је од три наелектрисана кварка, два ”доња” и једног ”горњег”, чија се наелектрисања међусобно потиру. Теоретски је могуће да при даљем колапсу дође до распада неутрона на слободне кваркове и формирања кварковске звезде још екстремније густине (слика 4.14). Равнотежа са гравитационом силом била би успостављена захваљујући дегенеративном притиску кваркова и репулзивним електростатичким силама истоимено наелектрисаних честица.

До сада, међутим, није идентификована ниједна кварковска звезда иако је утврђено постојање неколико компактних објеката чија густина превазилази стандардну густину неутронске звезде. Зато су кварковске звезде и даље само хипотеза. По својој прилици, природа не дозвољава формирање дегенерисане материје састављене само од кваркова тако да неутронске звезде изнад 2-3 Сунчеве масе, по својој прилици, колабирају директно у црну рупу. [170]

Већ смо поменули да су многе неутронске звезде део бинарних система у којима је могућ трансфер материје са партнерске, најчешће ”класичне” звезде. Посебно су интересантни случајеви када бинарни систем формирају две неутронске звезде на малом растојању. С обзиром на јачину гравитације оба објекта, њихово кретање може се описати једино Ајнштајновом општом теоријом релативитета. Према тој теорији, овакав систем губи енергију услед емитовања гравитационих таласа које смо у стању да детектујемо и на Земљи.<sup>10</sup> Пре или касније доћи ће до спектакуларног судара две неутронске звезде<sup>11</sup> који је праћен краткотрајним импулсом гама зрака велике енергије<sup>12</sup> (слика 4.15). Утврђено је да се у сударима овакве врсте креирају тежи елементи као што су злато и платина али се не зна шта је крајњи резултат овог судара: нова неутронска звезда, црна рупа или нешто треће. [155, 161]



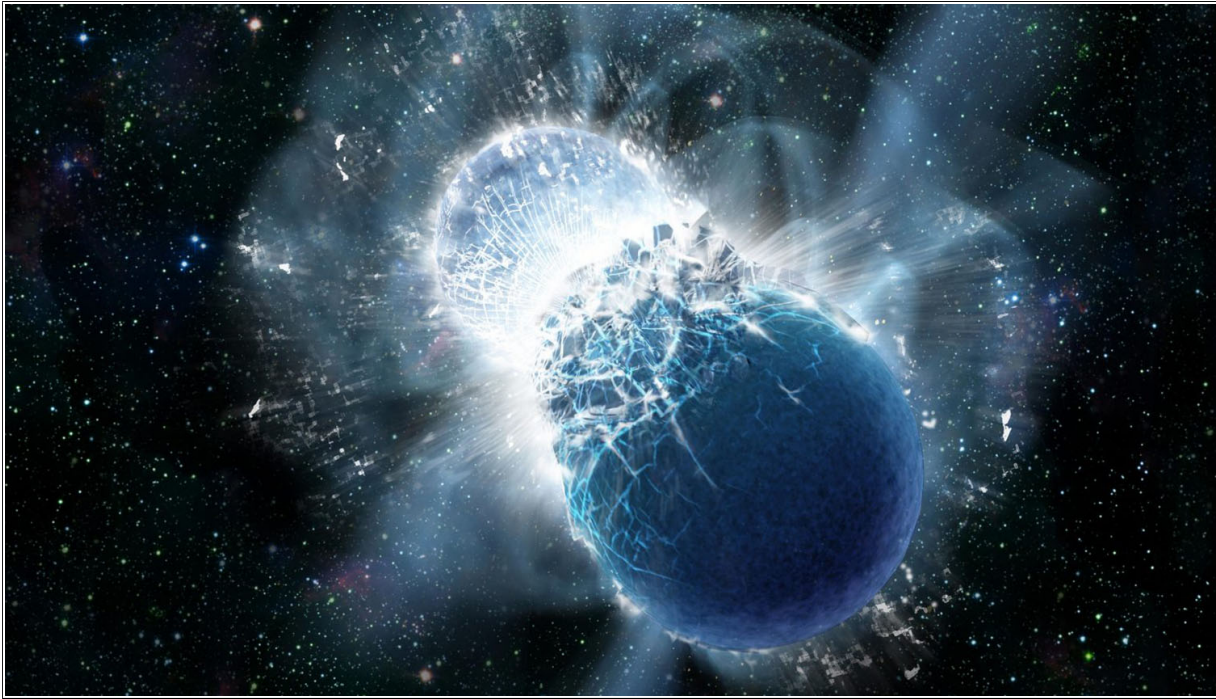
Слика 4.14: Базична композиција неутронске и хипотетичне кварковске звезде. [169]

<sup>9</sup>Тзв. Толман-Опенхајмер-Волкофов лимит.

<sup>10</sup>Постојање гравитационих таласа потврдила је опсерваторија LIGO 2016. године. [171]

<sup>11</sup>Такозвана ”килонова”.

<sup>12</sup>Већ поменути ”Gamma Ray Burst”



Слика 4.15: Судар две неутронске звезде који највероватније резултује црном рупом.[172]

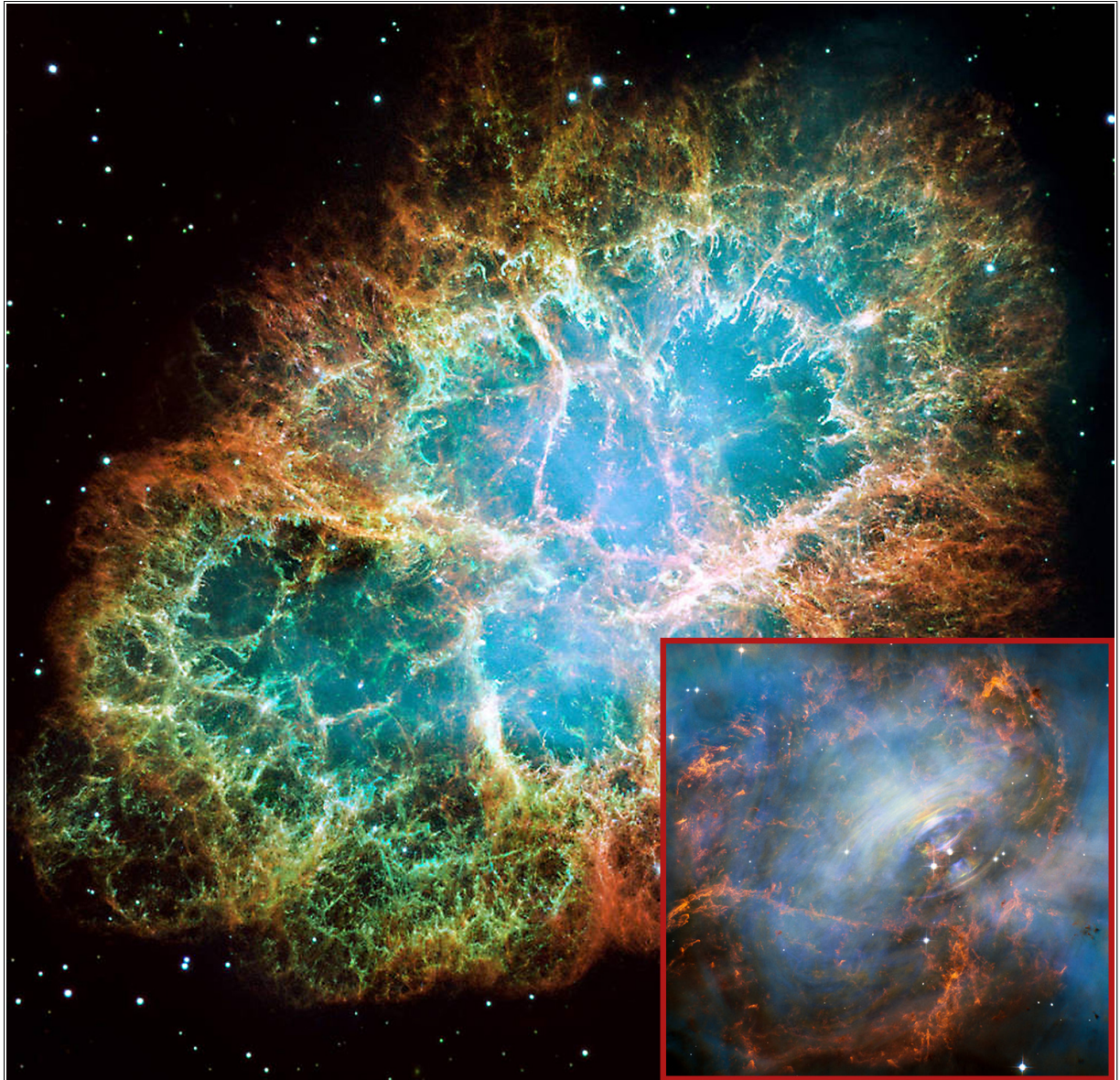
### 4.3 Црне рупе

Када најмасивније звезде експлодирају у виду супернове, њихово језгро доживљава колапс који се не може зауставити дегенеративним притиском електрона или неутрона. Ово предвиђа Ајнштајнова теорија опште релативности која представља кључно (ако не и једино) средство у математичком моделирању црних рупа. Колапс се наставља све док гравитација читаво језгро звезде не претвори у материјалну тачку бесконачне густине и бесконачно јаке гравитације (тзв. ”сингуларитет”<sup>13</sup>) где престају да важе сви нама познати закони физике.[176] Гравитација у области око сингуларитета толико је јака да ни светлост не може да побегне из ње.

Штавише, може се показати да постоји нематеријална сфера унутар које је простор толико закривљен да све путање воде у тачку максималне густине у центру сфере, без обзира на почетне услове и брзину коју честица има.[177] Та сфера назива се ”хоризонтом догађаја” и означава област где је прва космичка брзина једнака брзини светлости. Полупречник хоризонта догађаја назива се Шварцшилдов радијус. Под термином ”црна рупа” подразумевамо централни сингуларитет, простор обухваћен хоризонтом догађаја и сам хоризонт. У случају црне рупе проток материје је једносмеран: црна рупа може и даље да расте сакупљајући материјал из своје околине, али пошто ништа, па ни светлост не може да напусти

---

<sup>13</sup>Ми, заправо, не знамо да ли се колапс материје заиста завршава сингуларитетом бесконачне густине. Бесконачне величине и сингуларитети су у природи веома ретки и сасвим је могуће да се колапс завршава пре стадијума материјалне тачке захваљујући квантним феноменима који ће у одређеном тренутку спречити настанак сингуларитета. Да бисмо то могли да проверимо макар математичким моделима, потребна нам је квантна теорија гравитације која обједињује квантну механику и Ајнштајнову општу теорију релативитета. А таква теорија тренутно не постоји.



**Слика 4.16:** Небула ”Краба” налази се на 6.500 светлосних година од нас у сазвежђу Бика. Настала је у експлозији супернове 1054. године коју су забележили кинески астрономи. Наранџасти филаменти представљају водоник, плави - кисеоник, зелени - јонизовани сумпор, црвени - двоструко јонизовани кисеоник. Сам центар небуле приказан је увеличано у црвеном квадрату. Близу центра квадрата налазе се две светле тачке: десна представља неутронску звезду, остатак звезде које више нема. Светло-плави праменови ”магле” представљају, заправо, снопове наелектрисаних честица који се формирају дуж магнетних линија сила неутронске звезде. Снажно магнетно поље шаље ове честице у космички простор брзином која достиже половину брзине светлости.[173]

област унутар хоризонта догађаја, оне су потпуно црне и могу се детектовати искључиво на бази гравитационог утицаја на околне објекте.

### 4.3.1 Откриће

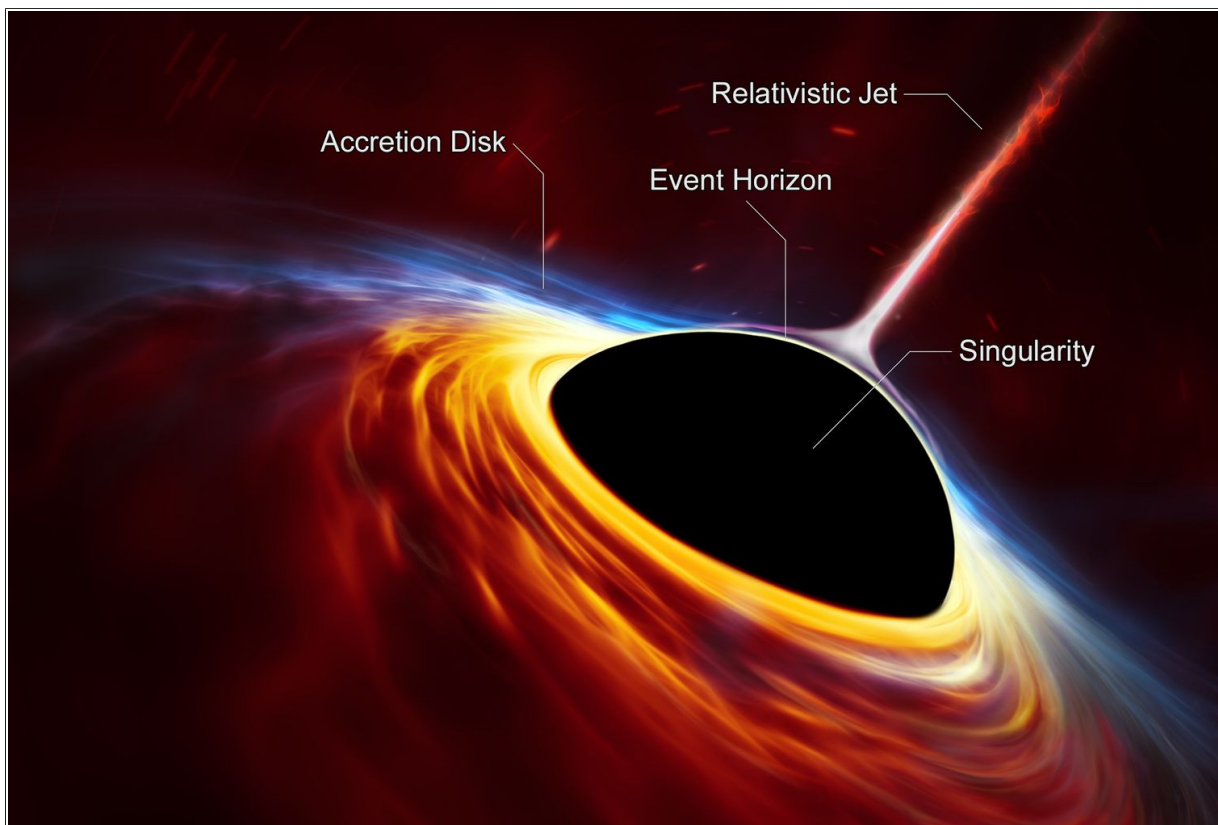
О постојању црних рупа размишљало се још у XVIII веку. Следбеник Исака Њутна, Џон Мичел, запитао се да ли је обичним гомилањем материје могуће направити објекат са кога

ни светлост не може да ”побегне”.[179] Оставимо, на тренутак, релативистичке феномене и запитајмо се колики би требало да буде сферни објекат чија је прва космичка брзина равна брзини светлости. Светлост емитована са оваквог објекта правила би кругове око њега али не би могла сасвим да га напусти. Из формуле за прву космичку брзину добијамо:

$$v_1 = c = \sqrt{\frac{\gamma M}{R}} = \sqrt{\frac{\gamma \frac{4}{3} R^3 \pi \rho}{R}} = 2R \sqrt{\frac{\gamma \pi \rho}{3}} \implies R = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{3}{\gamma \pi \rho}} \quad (4.4)$$

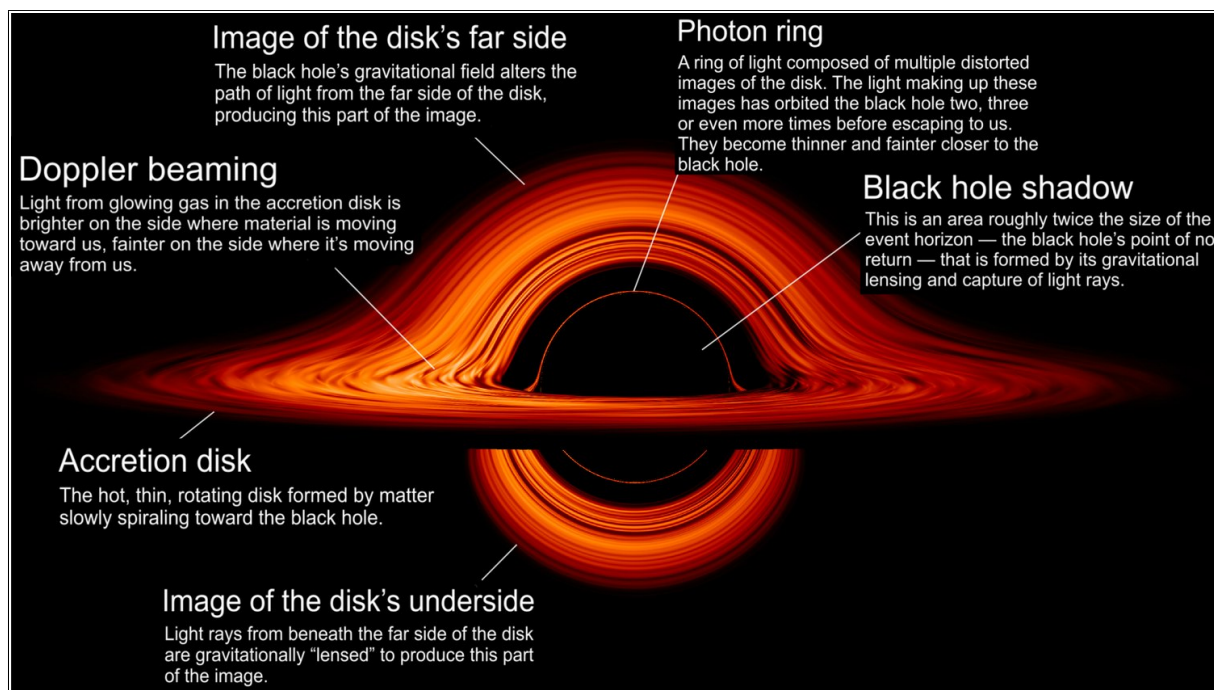
...где су  $c$ -брзина светлости,  $M$ -маса тела,  $R$ -полупречник,  $\gamma$ -универзална гравитациона константа и  $\rho$ -густина материјала. Ако бисмо хтели овакво тело да направимо од гвожђа ( $\rho \approx 7.870 \text{kg/m}^3$ ), потребан полупречник  $R$ , на основу једначине (4.4), износио би око 200 милиона километара, што је значајно веће од 1AU.<sup>14</sup> Мичел је исправно претпоставио да би се овакав објекат могао детектовати на основу гравитационог утицаја на околна тела.[180]

Постојање црних рупа предвидела је и Ајнштајнова општа теорија релативитета још 1916. године. Прво математичко решење за неротирајућу црну рупу пронашао је Карл Шварцшилд те исте године. Он је показао да је на великим растојањима од сингуларне тачке Њутнова механика једнако добра као и Ајнштајнова. На мањим растојањима долази до



**Слика 4.18:** Базична структура црне рупе коју бисмо видели ако занемаримо закривљење светлости под дејством гравитације црне рупе. Оно што бисмо заиста видели много више личи на слику 4.19.[175]

<sup>14</sup>Ова калкулација може да послужи само као илустрација редова величине: њутновска механика неупотребљива је у контексту црних рупа.



**Слика 4.19:** Реалистичан изглед црне рупе за посматрача са стране. Закривљење светлости у околини црне рупе толико је интензивно да се виде и делови околине црне рупе који би иначе били недоступни нашем оку.[178]

изражаја сила додатног привлачења услед закривљености простора која код Њутна не постоји. Шварцшилд је доказао и постојање хоризонта догађаја и израчунао његов радијус:[181]

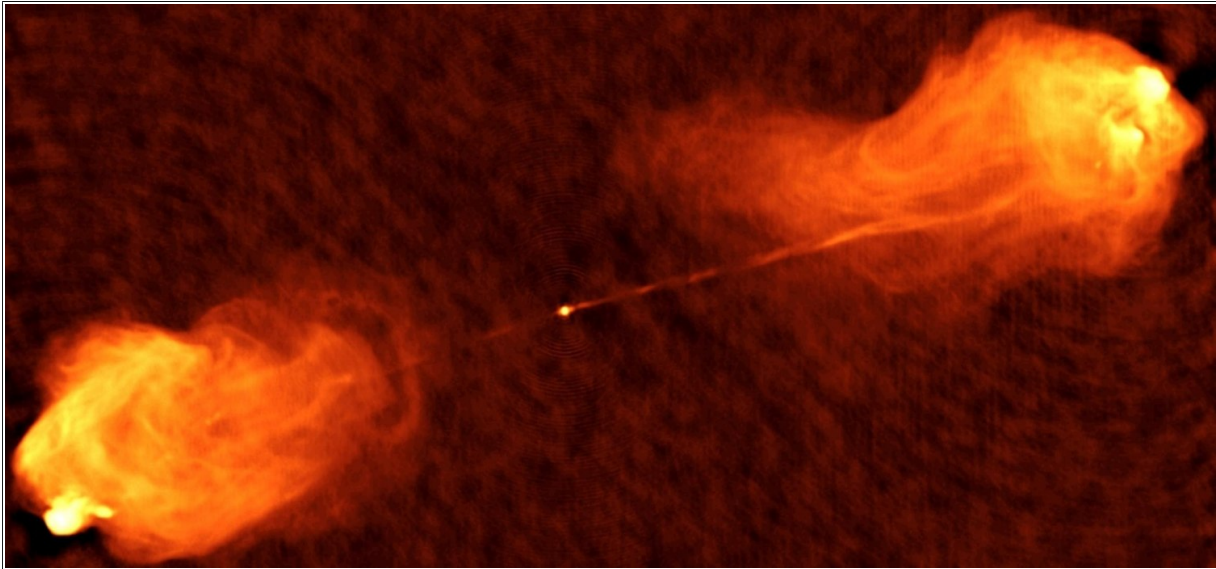
$$R_s = \frac{2\gamma M}{c^2} \quad (4.5)$$

...где су  $R_s$ -Шварцшилдов радијус,  $\gamma$ -гравитациона константа,  $M$ -маса а  $c$ -брзина светлости.<sup>15</sup> Ово не значи да је свака орбита тела око црне рупе са радијусом већим од Шварцшилдовога стабилна, као што би следило из њутновске механике. Услед релативистичких гравитационих феномена, минимална стабилна орбита има радијус три пута већи од оног датог једначином (4.5).

Додавањем нових својстава, разрађена су математичка решења и за друге типове црних рупа. Рајснер и Нордстром су описали црну рупу која, осим масе, има и наелектрисање, Кер је решио проблем црне рупе која ротира а заједно са Њуменом нашао опште решење и за ротирајућу, наелектрисану црну рупу. Од свих модела најзначајнији је Керов јер црне рупе, по правилу имају масу и момент импулса али не и наелектрисање.[179] Кер је такође показао да су маса, момент импулса и наелектрисање три својства која у потпуности дефинишу сваку црну рупу.<sup>16</sup> То опет значи да је хемијски састав материје од које је настала црна рупа ирелевантан.[177]

<sup>15</sup>Интересантно је приметити да бисте исти резултат добили када бисте у Њутнов израз за другу космичку брзину  $v_2$  ставили да је  $v_2 = c$ . Ово је један од ретких примера где се предвиђања Њутнове и Ајнштајнове механике поклапају.

<sup>16</sup>Ово тврђење зове се још и "No hair theorem".



**Слика 4.20:** Радио-снимак црне рупе у центру галаксије ”Лабуд А” (мала тачка у средини слике). Јасно су видљиве две дијаметрално супротне струје наелектрисаних честица које генерише црна рупа. Светле ”лопте” на левој и десној страни представљају места где те струје долазе у контакт са околном материјом.[182]

Први прави кандидат за црну рупу, ”Лабуд Х-1”, откривен је 1972. године као веома снажан извор Х-зрачења. О правој природи овог објекта дискутовало се скоро двадесет година а био је и предмет пријатељске опкладе између два чувена физичара: Стивена Хокинга и Кипа Торна. Хокинг је сматрао да овај објекат никако не може да буде црна рупа али је, суочен са непобитним доказима, предао опкладу 1990. године. Дуго времена у оптицају су били различити називи за црне рупе (”тамна звезда”, ”гравитационо колабирани објекат” и други). Термин ”црна рупа” први пут се помиње у једном научном раду из 1963. године али је генерално прихваћен тек након што га је 1967. године усвојио амерички астроном Џејмс Вилер на наговор једног његовог студента. Вилер је био толико упоран у коришћењу овог термина да су сви остали брзо пали у заборав.[183, 180]

### 4.3.2 Типови црних рупа

Постоје четири различита типа црних рупа. Детекција црних рупа могућа је само индиректним путем, преко карактеристичног зрачења које емитује материја при свом спиралном паду у црну рупу. Понекад је и таква детекција веома тешка јер густа околна материја може у потпуности да апсорбује емитовано зрачење.[183]

#### Минијатурне црне рупе

Верује се да су минијатурне црне рупе чија је маса упоредива са масом Земље биле честа појава у рано доба космоса када је материја била неупоредиво гушћа. Оне најмање вероватно су одавно испариле кроз Хокингово зрачење (види секцију 4.3.5), али би оне веће могле да опстану до данашњих дана. До сада није детектована ниједна, као да је време минијатурних црних рупа одавно прошло.[176]

## Стеларне црне рупе

Ово су црне рупе које настају колапсом језгра масивне звезде након експлозије супернове. Овакве црне рупе релативно су мале али изузетно густе и својом огромном гравитацијом настављају да прикупљају материју из околног простора (космички гас, прашину или материју са суседне звезде). По неким проценама у Млечном путу има неколико стотина милиона стеларних црних рупа. Њихова маса типично варира између  $4M_{\odot}$  и  $100M_{\odot}$  са пречником од 15 до 50 километара.[185, 176]

Према општој теорији релативитета, сва масивна тела која се убрзано крећу деформишу просторно-временски континуум и ту деформацију пропагирају емитовањем гравитационих таласа. Опсерваторија LIGO, са својим станицама у Вашингтону и Лујзијани, специјализована је за детекцију малих деформација простора изазваних гравитационим таласима коришћењем ласерске интерферометрије. Иако LIGO може да региструје дистрозије простора мање од пречника једног протона, гравитациони таласи изазвани кретањем небеских тела толико су слаби да их је могуће открити само приликом колосалних космичких догађаја.<sup>17</sup> Управо је судар две црне рупе масе  $29M_{\odot}$  и  $36M_{\odot}$  на растојању од 1,3 милијарде светлосних година генерисао довољно јаке гравитационе таласе које је LIGO регистровао и тако коначно доказао њихово постојање.[171]

Напоменимо да су у рано доба космоса, када је материја била гушћа, и звезде биле много веће што је резултовало стеларним црним рупама масе  $100M_{\odot}$ [180]. Ове црне рупе веро-



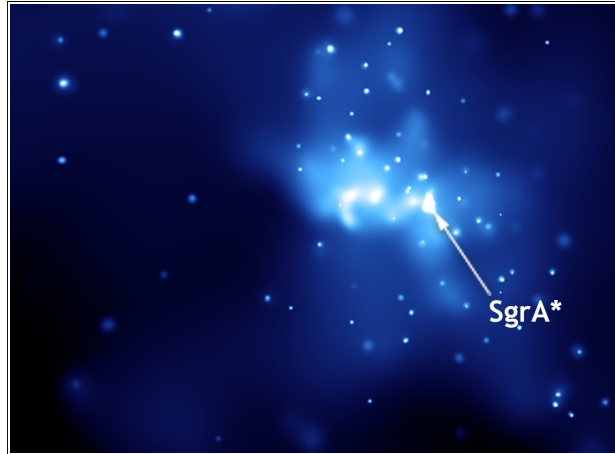
**Слика 4.21:** Гаргантуа, фиктивна гигантска црна рупа из филма "Interstellar" Кристофера Нолана, приказана је са завидном научном прецизношћу. Упоредите ову слику са сликом 4.19.[184]

<sup>17</sup>Укупна снага гравитационих таласа које емитује Земља при свом кретању око Сунца не прелази 200W што одговара мало јачој сијалици.

ватно су биле зачетак гигантских црних рупа које данас налазимо у центрима галаксија.

### Гигантске црне рупе

Ове црне рупе карактеристичне су по својој огромној маси. Унутар хоризонта догађаја сконцентрисана је маса од  $10^5 M_{\odot}$  до  $10^{10} M_{\odot}$ . По својој прилици овакве црне рупе налазе се у центру сваке галаксије, укључујући и Млечни пут. Једном формиране, настављају брзо да расту апсорбујући околну материју која је најгушћа управо у центру галаксије. Научници нису сасвим сигурни како се ове гигантске црне рупе формирају. Сасвим је могуће да настају спајањем више мањих црних рупа у једну већу. Друга могућност је да велико јато звезда колабира концентришући се у једну тачку. Трећа могућност је да се гигантска црна рупа формира од тамне материје, тамо где је њена густина највећа.<sup>18</sup>



Слика 4.22: Sagittarius A\*, црна рупа у центру Млечног пута.[186]

Једна таква црна рупа (Sagittarius A\*) налази се и у центру наше галаксије (слика 4.22). Посматрајући елиптичне путање звезда у близини центра Млечног пута са опсерваторије Кек на Хавајима, Андреа Гез је израчунала да се у самом центру галаксије налази црна рупа са масом од  $4 \times 10^6 M_{\odot}$  и пречником од 50 милиона километара. За ово откриће Андреа Гез добила је Нобелову награду за физику 2020. године.[177]

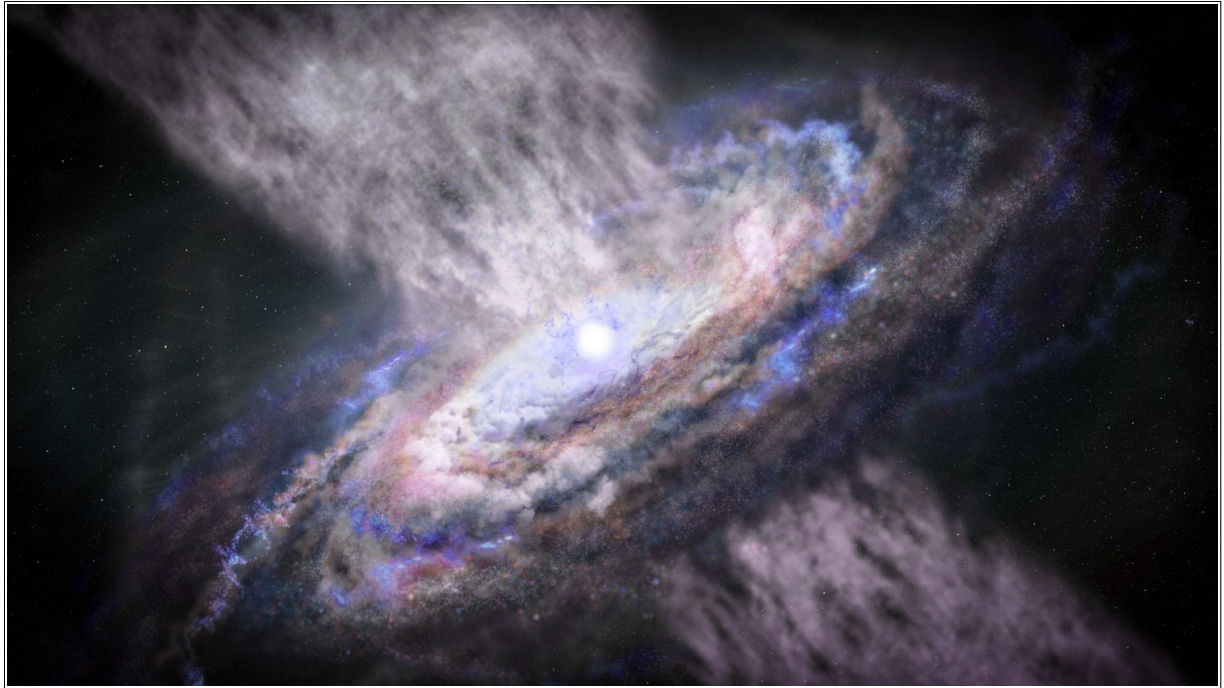
Гигантске црне рупе налазе и у центрима квазара (слика 4.23) који представљају далеко најснажније изворе енергије у космосу.<sup>19</sup> Највеће црне рупе у космосу налазе се управо у средишту квазара и типично имају масу од  $10^6 M_{\odot}$  до  $10^9 M_{\odot}$ . У квазару је једна оваква супер-масивна црна рупа окружена огромним, густим диском нагомилане материје која се при паду у црну рупу загрева до екстремних температура и емитује зрачење дуж читавог спектра таласних дужина. Снага квазара је енормна: један квазар има луминозност хиљадама пута већу од луминозности читавог Млечног пута.

Квазари су, по својој прилици, реликт прошлости. Највећи број њих формиран је пре око 10 милијарди година када је материја у космосу била много гушћа па је и формирање гигантских структура велике густине било много чешће. Иако је откривено неколико младих квазара на релативно малим растојањима од нас, број оваквих квазара је, генерално, врло мали.[188]

<sup>18</sup>О тамној материји кратко смо говорили у секцији 1.1.1. Штавише, црна рупа не мора да буде формирана само од материје. Теоретски је могућа и црна рупа начињена од енергије заробљених фотона.

<sup>19</sup>Реч "квазар" (енглески "quasar") представља краће име за "quasi-stellar radio source".





**Слика 4.23:** Уметничка визија квазара. Квазари су најснажнији извори енергије у космосу. У центру квазара је гигантска црна рупа са огромним агрегационим диском око себе.[187]

### Црне рупе средње величине

Ове црне рупе су релативно ретке, откривене су тек 2014. године. Могу да настану колапсом релативно малог звезданог облака, али ова хипотеза није дефинитивно потврђена. Ако гравитирају ка центру галаксије могу да формирају једну гигантску црну рупу. Истраживања након 2018. године показала су да овакве црне рупе могу да настану у центру патуљастих галаксија са масом која се типично креће од  $10^2 M_{\odot}$  до  $10^5 M_{\odot}$ . У рано доба космоса црне рупе средње величине могле су да настану и директним колапсом густог облака гаса и прашине. По својој прилици ове црне рупе биле су заматак будућих квазара.[180]

### 4.3.3 Структура црних рупа

Црне рупе су препуне контрадикција. Не садрже материју у класичном смислу речи, али поседују масу и момент импулса. Немају површину, али имају величину. Понашају се као масивни објекти али, у суштини, црне рупе су само врло необичан део простора.

Као што смо већ поменули у уводу, два основна елемента црне рупе су сингуларитет у центру у коме је сконцентрисана сва маса црне рупе и хоризонт догађаја, нематеријална сфера која ограничава простор унутар кога све путање воде у центар црне рупе. Хоризонт догађаја представља сферу која дефинише величину црне рупе. Истовремено, свака тачка на њој је и "тачка без повратка" јер, када је једном пређете, пре или касније завршићете у сингуларитету. Из истог разлога, немогуће је добити било какве информације из унутрашњости црне рупе.[183]

Сингуларитет у случају неротирајуће црне рупе је материјална тачка. У случају црне рупе која ротира, сингуларитет има облик прстена чија се централна оса симетрије поклапа

са осом ротације. У оба случаја, сингуларитет има бесконачну густину и нулту запремину.[180]

Око хоризонта догађаја, између  $1,0R_s$  и  $1,5R_s$  налази се такозвана ”фотонска сфера”. Фотони у овој зони праве концентричне кругове око црне рупе али никад не упадају у њу.[180]

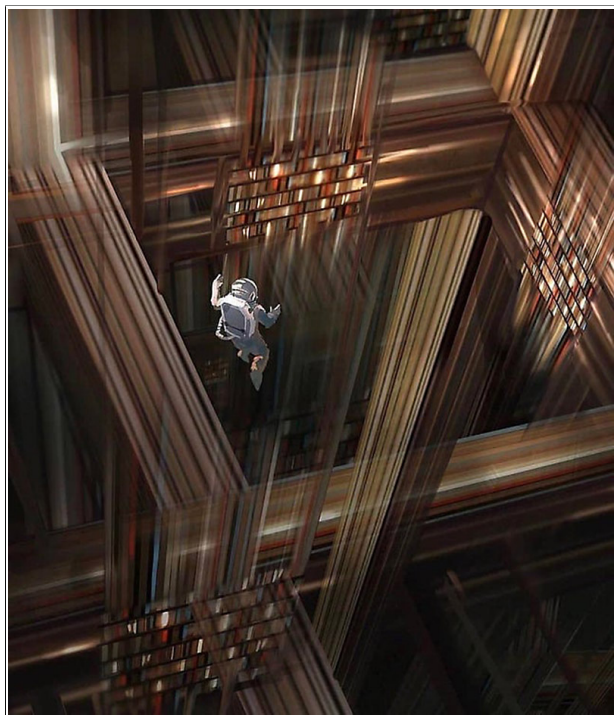
Црне рупе које су део бинарног система могу да преузимају материју са суседне звезде на исти начин као што то чине бели патуљци или неутронске звезде. Због очувања момента импулса, приликом пада материје у црну рупу настаје спирални диск (зона агрегације) комплексне структуре. Унутрашње трење материје унутар диска доводи до конверзије дела енергије у топлоту што повећава температуру диска све до тачке када почиње интензивна емисија X-зрака. Притом се смањује кинетичка енергија диска услед чега се материја постепено приближава хоризонту догађаја.

Део материје из овог диска може да рикошетира од хоризонта догађаја и формира два супротна млаза честица који се релативистичким брзинама удаљавају од црне рупе. Ови млазеви материје и X-зрачења могу да се виде са великих растојања и представљају једно од карактеристичних обележја црних рупа (слика 4.20). Ипак, највећи број црних рупа води самотњачки живот што њихову детекцију чини практично немогућом.[189]

#### 4.3.4 Куда воде црне рупе

Замислите астронаута који се, несрећном игром судбине, креће ка центру црне рупе. Како изгледа пад у црну рупу за посматрача са стране? У случају мале црне рупе, градијент гравитационе силе у близини хоризонта догађаја толико је велики да би се силе које делују на ноге и главу астронаута драстично разликовале. Ово би довело до ”шпагетификације” материје: тело астронаута би се толико издужило да би врло брзо личило на штапић шпагета. Са друге стране, у близини хоризонта догађаја, јака гравитација доводи до успоравања времена. Часовник на руци космонаута радиће све спорије како се астронаут приближава хоризонту догађаја. За посматрача са стране изгледа као да се астронаут креће све спорије ка хоризонту догађаја, притом га никад не достижући.[180]

Други феномен је ”црвени помак”. Фотони које емитује астронаут морају да са владају гравитацију црне рупе што доводи до губитка њихове енергије и повећања тала-

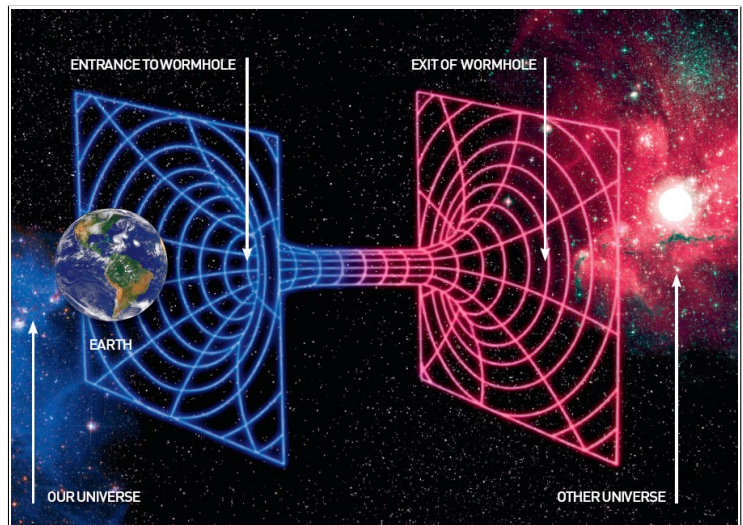


Слика 4.24: Астронаут у унутрашњости црне рупе, уметничка визија Кристофера Нола-на инспирисана тесерактом (четвородимензионалном коцком).[184]

сне дужине. Како се астронаут приближава хоризонту догађаја, његово бело астронаутско одело постаје све црвеније. Непосредно изнад хоризонта догађаја астронаут постаје практично невидљив јер светлост више не може да надвлада гравитациону силу. Прорачуни показују да је време потребно да астронаут потпуно нестане из видљивог дела спектра краће од једне секунде.[180] Пад астронаута кроз хоризонт догађаја био би потпуно невидљив за посматрача са стране.

Шта би доживео сам астронаут? Шпагетификација би га усрмила много пре него што достигне хоризонт догађаја. Међутим, уколико астронаут пада у масивну црну рупу, хоризонт догађаја је много већи и градијент силе гравитације је знатно мањи па се шпагетификација може избећи, бар у почетку. У тренутку проласка кроз хоризонт догађаја астронаут не би осетио ништа посебно, имао би утисак да се налази у бестежинском стању иако би се брзина његовог пада повећавала огромном брзином. Штавише, могао би да види и светлост објеката ван црне рупе јер она путује у центар црне рупе баш као и он. Међутим, своја опажања астронаут не би могао ником да пренесе тако да никад нећемо знати како изгледа унутрашњост црне рупе. Пре или касније, шпагетификација би нашег астронаута дезинтегрисала да би се, на крају, његова материја потпуно стопила са сингуларитетом у центру. Маса црне рупе би се за нијансу повећала, баш као и полупречник хоризонта догађаја.

Чињеница да нам је унутрашњост црних рупа недоступна довела је до бројних спекулација које одступају од сценарија описаног у претходним параграфима. Ајнштајн је заједно са Нејтаном Розеном разматрао могућност да је црна рупа заправо само један крај моста који представља пречицу кроз простор-време (тзв. ”црвоточину”) и да би наш астронаут могао неповређен да се појави у другом делу космоса милијардама светлосних година далеко од полазне тачке (или у неком савсим другачијем, паралелном универзуму). Већина научника сматра да је овако нешто немогуће: не постоји космички објекат који би својом трансформацијом могао да створи црвоточину. Чак и да црвоточине постоје, остаје питање да ли је путовање кроз њих могуће.



Слика 4.25: Хипотетична црвоточина као пречица у простор-времену.[190]

Популарност је стекла и хипотеза руског научника Игора Новикова да у космосу постоје објекти који се понашају потпуно супротно од црне рупе: материја би извирала из таквог објекта без могућности да у њега било шта уђе. Овакве објекте називамо белим рупама. Материја која упадне у црну рупу појавила би се на неком другом месту, избачена из спрег-

нуте беле рупе. Баш као и црвоточине, и беле рупе остају само теорија, резултат математичких једначина које природа може али и не мора да следи.[191]

### 4.3.5 Хокингово зрачење

Вакуум најчешће замишљамо као празан простор, лишен материје. Међутим, квантна поља која која прожимају читав космос и даље су присутна, једино што се налазе у стању минималне енергије. Та енергија не мора нужно да буде једнака нули. Према Хајзенберговом принципу неодређености могуће је ”позајмити” део енергије тог поља  $\Delta E$  под условом да се она ”врати” у временском интервалу  $\Delta t$ . Ове две величине су обрнуто пропорционалне. У периоду  $\Delta t$  могуће је из позајмљене енергије створити пар састављен од честице и античестице које ће се на крају анихилирати и тако вратити енергију назад у поље. Овакве честице називамо виртуелним јер им је век јако кратак и појављују се, наизглед, ни из чега. И поред тога оне имају велику улогу у објашњавању многих квантних феномена. Укратко, вакуум је далеко од мртве празнине и више личи на пенушаво пиће у којем сваки мехурић представља неку од виртуелних честица. [179]

Стивен Хокинг је у свом чувеном раду из 1974. године показао да је у околини хоризонта догађаја због веће закривљености простора, нулти ниво енергије квантних поља виши него у простору који је удаљен од црне рупе. Ова разлика доводи до ”преливања” енергије из области око црне рупе у околини простор у облику тзв. Хокинговог зрачења. Емитована енергија као крајњи ефекат има смањење масе црне рупе. Гледано из даљине, изгледа као да црна рупа испарава. Спектар којим црна рупа зрачи одговара зрачењу црног тела одређене температуре. Хокинг је дао следећу формулу за температуру црне рупе:[180]

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi\gamma k_B M} \quad (4.6)$$

...где је  $\hbar$ -редукована Планкова константа,  $c$ -брзина светлости,  $\gamma$ -гравитациона константа,  $k_B$ -Болцманова константа и  $M$ -маса црне рупе. Из једначине (4.6) види се да масивније црне рупе имају нижу температуру зрачења. Највећа је код црних рупа мале масе. Али чак и у случају врло мале црне рупе чија је маса реда  $1M_\odot$  та температура износи 62 нанокелвина! Овако слабо зрачење немогуће је детектовати због свепрожимајућег шума који генерише микроталасно позадинско зрачење, одјек ”великог праска”, коме одговара температура од 2,725 келвина. Због овога чак и усамљене црне рупе врло лагано расту: количина апсорбованог позадинског зрачења превазилази енергију емитовану Хокинговим зрачењем за много редова величине<sup>20</sup>.

Једини начин да заиста детектујемо Хокингово зрачење је да откријемо минијатурне црне рупе чија је температура већа од температуре позадинског зрачења. Таква црна рупа не би могла да буде већа од Месеца. Што су димензије мање, време евапорације је краће: црна рупа величине аутомобила испарила би за пар наносекунди. Постоји теоријска могућност да се у сударима елементарних честица у најмоћнијим акцелераторима као што је LHC<sup>21</sup> формирају минијатурне црне рупе али би њихов животни век био мањи од  $10^{-80}$ s.[180]

<sup>20</sup>Снага зрачења црне рупе не прелази  $10^{-29}$ W што значи да бисте морали да сакупљате енергију Хокинговог зрачења током четири месеца да бисте добили енергију једног фотона из доба ”великог праска”.

<sup>21</sup>Скраћеница за CERN-ов ”Large Hadron Collider”, Велики хадронски сударач.



**Слика 4.26:** Стивен Хокинг (1942-2018), научник који је дао немерљив допринос разумевању космоса.[192]

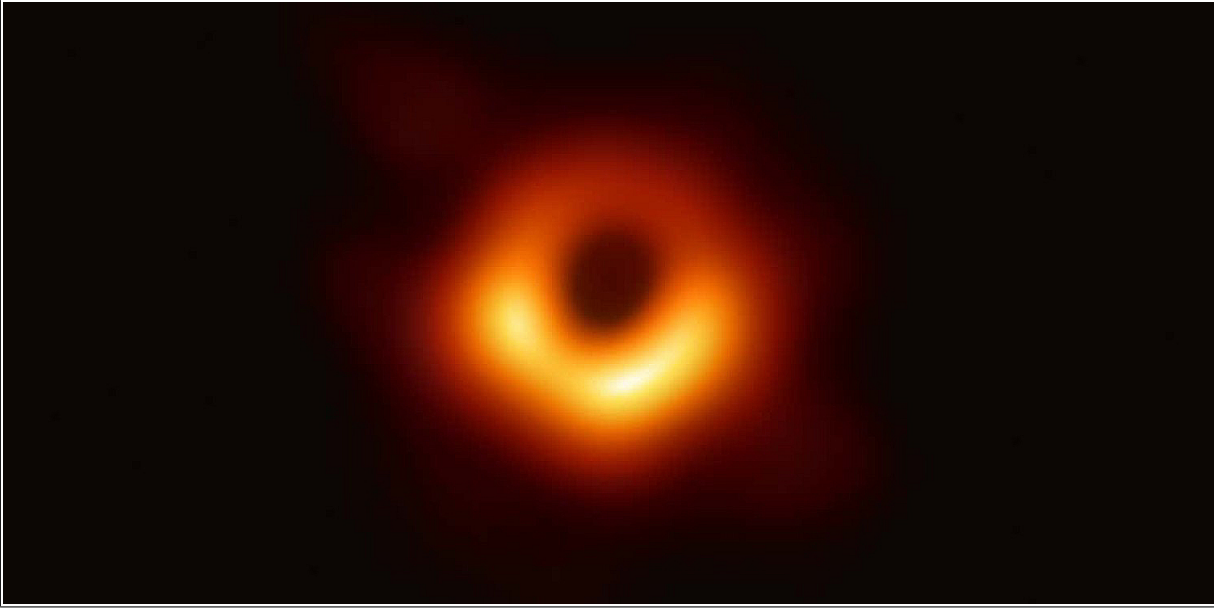
Када се заврши звездана ера у којој тренутно живимо (доба интензивног формирања нових звезда), наступиће ера црних рупа које ће, лагано, прогутати сву преосталу материју у космосу. Али ни црне рупе нису вечне тако да ће и оне највеће испарити у виду нискоенергетског зрачења после незамисливо дугог времена. Тако ће, на пример, тренутно највећа позната црна рупа TON 618 чија маса износи  $6,6 \times 10^{10} M_{\odot}$  испарити након  $6 \times 10^{99}$  година.[99]

#### 4.3.6 Прва фотографија

Постоји само једна фотографија црне рупе у видљивом делу спектра и она је плод двогодишњег труда интернационалног тима научника окупљених око пројекта "Event Horizon Telescope" (ЕНТ). Иако се гигантска црна рупа Sagittarius A\* налази у центру наше галаксије, она је заклоњена огромном количином међузвезданог гаса и прашине. Уз то, њена активност (апсорпција материје из околине) релативно је мала што посматрање чини још тежим. Зато се ЕНТ тим фокусирао на црну рупу у центру галаксије М87 која је много већа и активнија.

Координисаним радом великог броја опсерваторија широм света прикупљена је огромна количина података (око 5 петабајта). Да би ти подаци били процесирани, било је неопходно све те податке пребацити на једно место. Трансфер путем интернета показао се неефикасним тако да су подаци снимани на дискове великог капацитета и транспортовани авионом<sup>22</sup>. Тек захваљујући суперкомпјутерима и новом, комплексном софтверу за обраду фотографија који је могао да нејасне снимке са више различитих опсерваторија

<sup>22</sup>И овај посао био је изазован јер су подаци са опсерваторије на Антарктику из разних разлога били недоступни више од годину дана.



**Слика 4.27:** Чувени снимак гигантске црне рупе у центру галаксије M87, 55 милиона светлосних година далеко од нас. Маса ове црне рупе износи  $6,5 \times 10^9 M_{\odot}$ . [193]

пречисти, искомбинује и изошри, тим је успео да из мора података креира прву фотографију црне рупе 2019. године (слика 4.27). Хоризонт догађаја је нешто мањи од централне шупљине на слици а зона агрегације је јасно видљива, тачно оно што су научници и очекивали. [183, 194]

### 4.3.7 Отворени проблеми

#### Ентропија црне рупе

Други закон термодинамике каже да у затвореном систему ентропија може само да расте. Дуго се сматрало да сингуларитет у центру црне рупе има температуру апсолутне нуле, самим тим и нулту ентропију. Ако материја која са собом носи и одређену ентропију упадне у црну рупу, изгледаће као да је њена ентропија изгубљена и да се укупна ентропија смањила. Џејкоб Бекенштајн је поставио хипотезу да је та ентропија очувана у квантним стањима различитих тачака на хоризонту догађаја и да је пропорционална површини хоризонта:

$$S = \frac{1}{4} \frac{c^3 k_B}{\gamma \hbar} A \quad (4.7)$$

...где је  $S$ -ентропија и  $A$ -површина хоризонта догађаја, док су остале константе објашњене у једначни (4.6). Теорија је добила замаха када је у проблем ентропије укључено Хокингово зрачење: то зрачење са собом односи део ентропије из црне рупе чиме се успоставља баланс. Штавише, када се узме у обзир ентропија материје која окружује црну рупу, ентропија Хокинговог зрачења и ентропија хоризонта догађаја, показано је да укупна ентропија расте.

Међутим, објашњење није до краја задовољавајуће: ентропија је по правилу величина која расте са запремином а не са површином неког објекта. Осим тога, ентропија је величина из статистичке механике и своди се на број микроскопских конфигурација система

која имају иста макроскопска својства (притисак или температуру). Бројање ових микроконфигурација није могуће без теорије квантне гравитације која још увек није формулисана.[180]

### **Информациони парадокс**

С обзиром да црна рупа има само три параметра који је у потпуности описују (маса, момент импулса и наелектрисање), изгледа као да је сва информација о материји која упада у црну рупу заувек изгубљена. Када би црне рупе биле вечне, то не би био проблем јер би информација и даље била сачувана у унутрашњости црне рупе иако би нам била недоступна. Међутим, црне рупе испаравају и не постоје никакве индикације да Хокингово зрачење носи са собом било какву информацију о унутрашњости црне рупе. Када црна рупа потпуно испари, првобитна информација је трајно изгубљена.

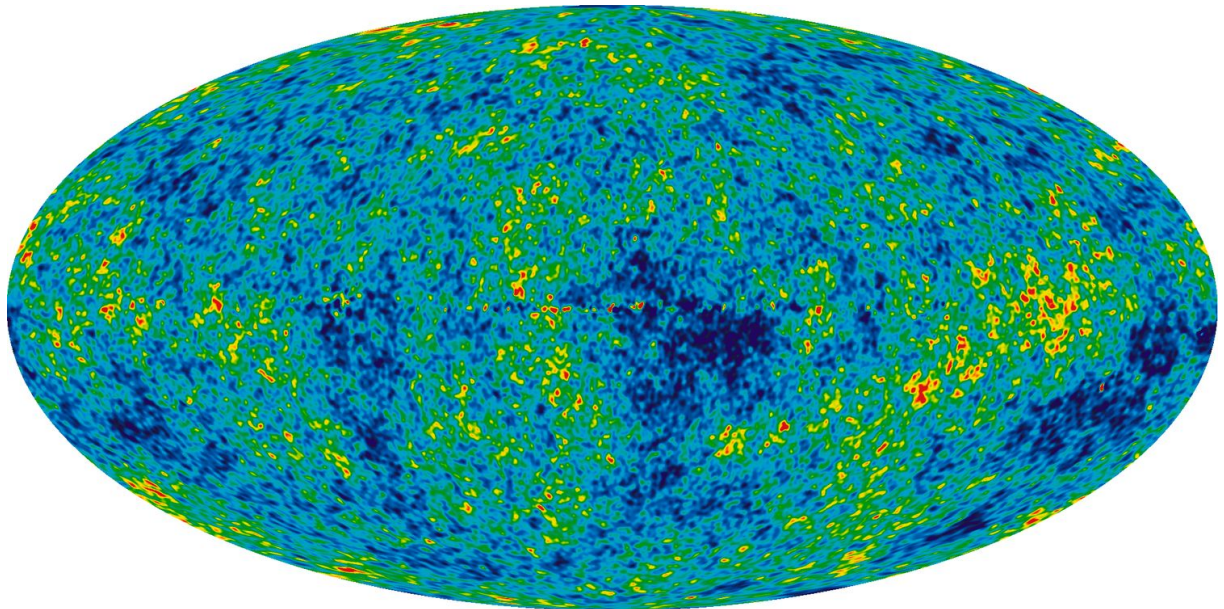
У квантној механици губитак информација је генерално неприхватљив јер се коси са неким од кључних принципа квантне механике, чак и са фундаменталним законима природе као што је закон о одржању енергије. Потпуно задовољавајуће решење информационог парадокса до данас није пронађено.[180]





## Глава 5

### Кратка повест космоса



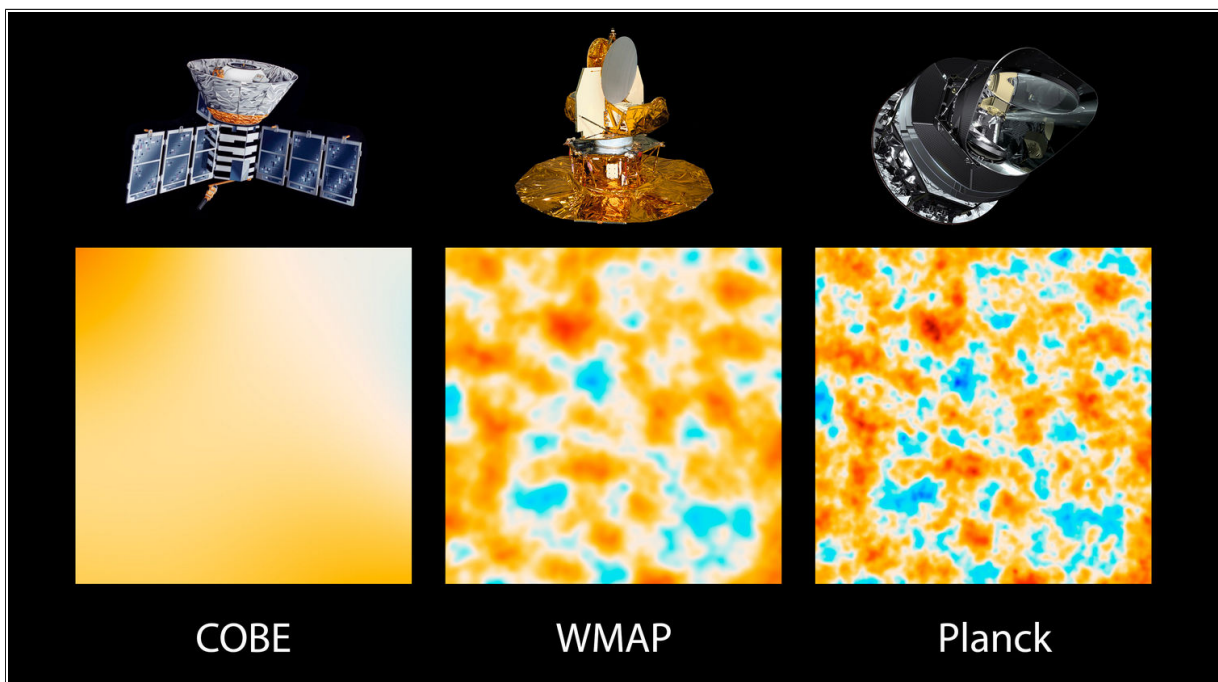
**Слика 5.1:** Космичко позадинско зрачење према најсавременијим подацима. Иако различите боје сугеришу различите енергије фотона, самим тим и различите температуре материје у младом космосу, разлике су изузетно мале тако да је позадинско зрачење скоро изотропно.[195]

#### 5.1 Од ”великог праска” до данас

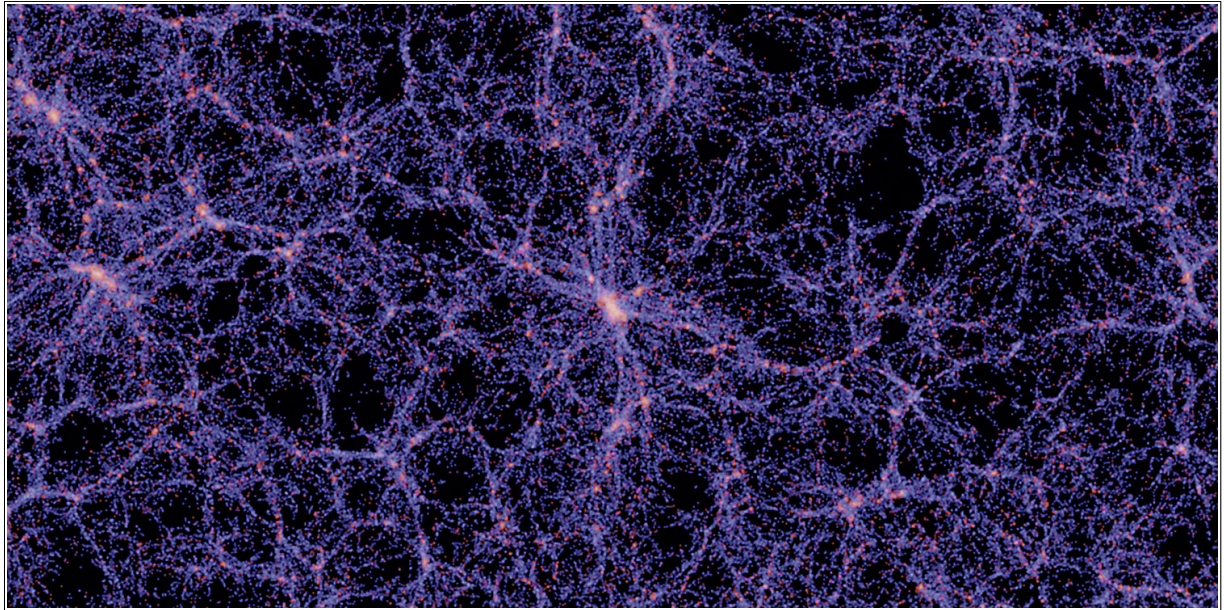
Космос је, као што смо то рекли на самом почетку, настао у ”великом праску” пре неких 13,7 милијарди година. У почетку, космос је био мешавина зрачења и јонизоване, екстремно топле и густе материје. Таква материја била је практично непрозирна за фотоне тако да рана младост космоса представља и његово ”мрачно доба”. Иако ће овај део историје космоса остати скривен за све наше инструменте, теоријски модел рађања космоса до те мере је разрађен а предвиђања усклађена са данашњим посматрањима да смо у стању да реконструиремо еволуцију космоса од тренутка  $t=10^{-43}$ s. Да бисмо објаснили шта се збијало од самог почетка, тј. од тренутка  $t=0$ , потребна нам је квантна теорија која обједињује све природне силе, укључујући и гравитацију.[196]

”Велики прасак” био је комплексан, јединствен догађај, који се не може свести на обичну експлозију након које се материја само ширила и хладила. Прве две секунде постојања космоса биле су најдинамичнији период у његовој историји који је описан у небројеним књигама и научним радовима. Чак и површни опис онога што се збивало у том бурном времену незамисливо великих температура и густина захтевало би бар неколико страница. Уместо тога, написаћемо само пар редова о еволуцији космоса од тренутка када се у њему појавила прва светлост.

Након 380.000 година експанзије, космос се охладио до температуре од 3.000 келвина што је омогућило формирање електрично неутралних атома и раздвајање материје од радијације. Космичка ”магла” се разишла и материја је коначно постала прозачна за фотоне који од тада слободно путују космосом. Ови фотони су у почетку имали огромне енергије али се њихова таласна дужина током времена драстично повећала а енергија смањила услед ширења космичког простора. Ови фотони допиру до нас из свих делова неба у виду ”космичког позадинског зрачења” које има спектар црног тела чија је температура свега  $2,72548 \pm 0,00057$  келвина. Са даљим ширењем космоса и температура позадинског зрачења ће наставити да пада.[197]



**Слика 5.2:** Слика илуструје еволуцију сателита који су до сада мерили интензитет космичког позадинског зрачења, траг првог светла које је обасјало васиону након ”великог праска”. Три квадрата приказана испод сателита приказују резултате снимања дела неба величине 10 квадратних степени. Јасно се види како се повећавала прецизност мерења током времена. Први сателит, ”COBE”, лансиран је 1989. године. Иако је био једва дорастао задатку због ниске осетљивости инструмената, сонда је недвосмислено потврдила да космичко позадинско зрачење постоји и да није потпуно изотропно. Научници који су радили на дизајну ове сонде добили су Нобелову награду 2006. године јер су обезбедили кључни доказ да је теорија ”великог праска” валидна. Уз то, показали су како мале варијације у позадинском зрачењу могу да објасне данашњи изглед и будућност космоса.[198]



**Слика 5.3:** Данашњи изглед космоса креиран компјутерском симулацијом у оквиру пројекта "The Millennium Simulation". Материја космоса распоређена је дуж паучинастих "нити" иницијално формираних агрегацијом тамне материје. Између тих нити налази се огроман празан простор. Да би се направила серија оваквих слика потребан је врхунски супер-компјутер, способан да обради модел који се састоји од 10 милијарди елемената унутар простора од 2 милијарде светлосних година (око 25 терабајта података). Резултати симулације врло добро се поклапају са телескопским осматрањима дубоког космоса.[199]

Снимак овог првобитног зрачења (слика 5.1) представља, заправо, слику космоса када је он био стар само 380.000 година. Мапирање овог зрачења рађено је неколико пута, сваки пут са све већом прецизношћу, а највећи допринос дале су сонде "COBE", "WMAP" и "Planck". Различите боје на слици одговарају различитим енергијама односно температурама материје раног космоса. Слика доказује да позадинско зрачење није сасвим изотропно, али су температурне разлике минималне и не прелазе  $20\mu K$  што сугерише да је у то доба васиона била скоро хомогена. Нешто хладнија места веће густине, настала услед квантних феномена, постала су језгра будуће агрегације материје од којих су настали сви космички објекти: од галактичких мега-кластера до појединачних галаксија, звезда и планета.

Осматрања и математичке симулације говоре нам да је данашњи космос потпуно другачији и да је велику улогу у тој трансформацији одиграла већ поменута тамна материја. Током милијарди година материја се гомилала око места веће густине остављајући велики део космичког простора скоро празним. Настала је структура која подсећа на паучину или јако деликатну мрежу (слика 5.3). Целокупна материја концентрисана је дуж нити ове гигантске структуре. Између тих нити налази се огроман празан простор који представља скоро апсолутни вакуум.

Тешко је поверовати да ће нешто овако грандиозно и масивно једнога дана нестати. Заправо, космос не може тек тако да "испари" јер закон о одржању енергије то не дозвоља-

ва. Али, као што ћемо видети, непобитна је чињеница да космос лагано и једва приметно стари и да се незадрживо креће ка свом крају.

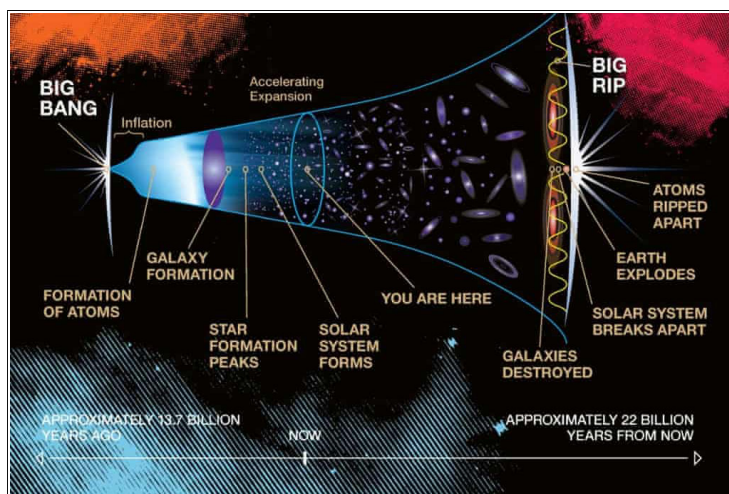
Идеја о космосу који еволуира дуго је била неприхватљива за многе научнике, укључујући и Ајнштајна. Све до ”великог праска” доминирала је теорија о статичном, непроменљивом космосу који нема ни почетак ни крај. Ајнштајн је чак модификовао своје једначине опште теорије гравитације како би подржао један такав модел. Када се, међутим, показало да је стационарни модел нестабилан и да се космос шири, Ајнштајн је признао грешку назвавши је ”највећом заблудом свога живота”.

Постоји више различитих сценарија еволуције космоса али његова ултимативна судбина зависи од многих параметара који су нам тренутно непознати, као што су тачна вредност космолошке константе у Ајнштајновој општој теорији релативитета или стабилност протона<sup>1</sup>. У зависности од тога постоји више различитих сценарија од којих ћемо поменути само три најзначајнија.

## 5.2 Могући сценарији даље еволуције космоса

### 5.2.1 ”Big Rip”

Ајнштајнова теорија релативитета тврди да је брзина светлости апсолутни лимит за брзину кретања материје и енергије кроз простор у било ком референцијалном систему. Међутим, Ајнштајнова теорија не поставља никаква ограничења за брзину којом се тај простор шири. Ако брзина ширења космоса настави да расте, као што то сугеришу резултати досадашњих посматрања, доћи ће до све бржег повећања свих растојања у космосу, прво макроскопских па онда микроскопских. За релативно кратко време дошло би до опште дезинтеграције космоса: од космичких мегаструктура до последњег атома. У почетку овај процес може да буде релативно спор али касније може да се настави експоненцијално растућом брзином. Ширење простора раставиће галактичке кластере, затим звезде у галаксијама, планетарне системе, саме планете а на крају и атоме, атомска језгра и честице од којих је језгро састављено. Сва растојања у космосу постаће бесконачно велика. У таквом космосу, у коме је било каква интеракција материје и енергије немогућа, и време би стало.[201]



Слика 5.4: ”Big Rip”, једна од могућих теорија о крају свемира.[200]

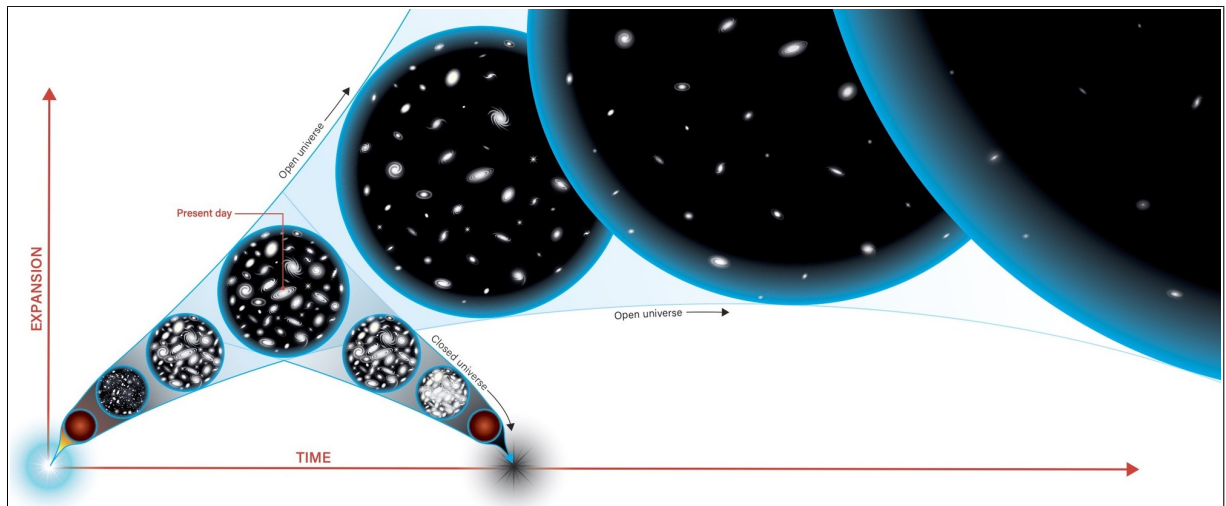
<sup>1</sup>Постоји могућност да је протон нестабилан са временом полураспада које није краће од  $10^{32}$  година. До сада нико није опазио спонтани распад протона.

### 5.2.2 "Big Crunch"

Да би се овај сценарио остварио, потребно је да количина материје у космосу буде довољно велика да својом гравитацијом заустави тренутно ширење космоса и започне његову контракцију. Након тога, читав космос би се у вратио у стање пре "великог праска": тачку бесконачне густине у којој нестају и простор и време.[202] Након тога, или би космос доживео свој крај или би дошло до новог "великог праска" који би започео још један циклус експанзије материје.<sup>2</sup> Овај сценарио је и најмање вероватан јер тренутно нема ниједног доказа који би му ишао у прилог. Не само да се космос шири него је посматрањима потврђено да се брзина тог ширења континуирано повећава током времена. Разлог за то вероватно лежи у такозваној "тамној енергији" која чини скоро 70% укупне материје и енергије у космосу. О тамној енергији знамо врло мало. Крајње поједностављено, тамна енергија је енергија празног простора која има тзв. "негативни притисак" и изазива ширење простора. Што је већи простор, већа је и количина тамне енергије па се ширење одвија све брже.

### 5.2.3 "Big Freeze"

Од свих наведених сценарија, данас се "Big Freeze" сматра далеко највероватнијим. Као и "Big Rip", и овај сценарио подразумева да ће се ширење космоса наставити у недоглед али значајно мањом брзином. Ево неких кључних догађаја који нас очекују одавде до вечности.<sup>3</sup>



**Слика 5.5:** Ако гравитациона сила којим случајем надвлада тренутну експанзију космоса, доћи ће до његовог сажимања у првобитни сингуларитет ("Big Crunch", као кад бисте период од "великог праска" до данас гледали унатрашке). Чињеница да се космос и даље шири и да се експанзија убрзава говори да је "Big Freeze" много вероватнији сценарио. Када растојање између било које две честице буде веће од дела космоса који тренутно видимо, наступиће топлотна смрт васионе.[203]

<sup>2</sup>Ова теорија има своје име: "Big Bounce".

<sup>3</sup>"Вечност је прилично дуг период, нарочито при крају." (Вуди Ален)

- Кроз  $4 \times 10^9 - 8 \times 10^9$  година: Андромеда и Млечни пут спајају се у једну галаксију, такозвану "Милкомеду".
- $10^{11}$  до  $10^{12}$  година: Галаксије из локалног галактичког кластера у којем се налази и Млечни пут спојиће се у једну галаксију. Ако се ширење простора настави, растојања између галаксија и галактичких кластера постаће толико велика да је свака међусобна интеракција немогућа. Са ширењем простора повећава се и таласна дужина светлости која путује кроз њега тако да ће удаљени објекти бити све тамнији и црвенији<sup>4</sup>.
- $8 \times 10^{11}$  година: Луминозност галаксија почиње да опада јер црвени патуљци, најдуговечније и најбројније звезде у галаксији, окончавају свој живот трансформацијом у беле патуљке.
- $2 \times 10^{12}$  година: Све галаксије изван локалног суперкластера постају невидљиве јер њихова светлост, услед експанзије простора, има таласну дужину упоредиву са димензијама видљивог дела космоса. Из истог разлога више се не може детектовати ни космичко позадинско зрачење.
- $10^{12} - 10^{14}$  година: Крај звезданог доба и почетак дегенеративне ере. Прве звезде формиране су око 150 милиона година након "великог праска" али се количина материје доступне за њихово формирање константно смањује. Када она падне на нулу, једини објекти већи од планете биће смеђи патуљци, бели патуљци, неутронске звезде и црне рупе. Нуклеарна фузија престаје јер су се угасиле чак и најдуговечније звезде. Космос постаје веома мрачан. Бели патуљци чине 90% масе космоса.
- $10^{15}$  година: Планете бивају избачене из свог матичног система након блиског сусрета са неким звезданим остатком. Преостале ће се урушити у угашени остатак звезде губећи енергију услед емисије гравитационих таласа.
- $10^{19} - 10^{20}$  година: Близак сусрет малог и великог објекта у галаксији има за последицу успоравање већег и убрзавање мањег објекта. После великог броја таквих сусрета, брзи мали објекти напуштају галаксију док већи објекти, лишени брзине, падају у централну црну рупу.

Уколико је протон нестабилан:

- $10^{40}$  година: Сви протони престају да постоје. Неутрони не могу да опстану у изолованом стању тако да са њима нестаје целокупна барионска материја (протони и неутрони). Космос је простор испуњен фотонима и лептонима, лаким честицама као што су електрон и неутрино.
- $10^{40} - 10^{108}$  година: Ово је ера црних рупа које доминирају на почетку овог периода и потпуно нестају на његовом крају кроз Хокингово зрачење (види секцију 4.3.5).
- После  $10^{100}$  година: Мрачно доба и ера нискоенергетских фотона: Космос је практично празан. Фотони, електрони и неутрини се и даље крећу али због огромних

---

<sup>4</sup>Енглески: "red shifted".

растојања шанса да дође до њихове међусобне интеракције равна је нули. Космос се налази у стању минималне енергије у коме су сви процеси стали.

Уколико је протон стабилан, век космоса биће знатно дужи:

- $10^{1100}$  -  $10^{32000}$  година: У објектима звездане величине, услед квантног тунел-ефекта<sup>5</sup>, долази до хладне фузије. То за последицу има конверзију свих хемијских елемената у гвожђе и настанак ”гвоздених звезда”.
- $10^{10^{26}}$  -  $10^{10^{76}}$  година: Идентичан квантни феномен доводи до конверзије великих објеката у црне рупе које, у поређењу са енормном дужином овог периода, испаравају практично тренутно остављајући за собом море субатомских честица.
- Након  $10^{10^{76}}$  година: Све црне рупе су испариле а материја је толико разређена да космос сада представља скоро идеалан вакуум.

Без обзира на (не)стабилност протона, коначан исход сценарија увек је исти: сва материја биће конвертована у бесконачно удаљене фотоне и лаке честице а експанзија космоса ће се наставити све док његова температура не падне на апсолутну нулу. Наступа толпотна смрт васионе, ”Big Freeze”, и то је крај приче о космосу који нас је створио и у коме живимо.

Да ли ће се све десити баш као што је овде наведено? Астрономија, математика и логика кажу да хоће али, као што каже Нил Деграс Тајсон, амерички астрофизичар и популаризатор науке: ”Космос нема никакву обавезу да нам изгледа смислено”.



---

<sup>5</sup>Тунел-ефекат омогућава честици као што је електрон или протон да, са одређеном вероватноћом, прескочи енергетску баријеру чак и ако честица нема енергију потребну за то.[204]





# Библиографија

- [1] Jason Socrates Bardi. *What Makes the Stars Shine?* 2008. URL: <https://physics.aps.org/story/v21/st3> (цит. на стр. 1, 37).
- [2] *Pillars of Creation*. NASA, ESA, Hubble Heritage Team, 2018. URL: <https://www.nasa.gov/image-feature/the-pillars-of-creation> (цит. на стр. 2).
- [3] Matt Williams. *What is the Big Bang Theory?* Universe Today, 2015. URL: <https://phys.org/news/2015-12-big-theory.html> (цит. на стр. 3).
- [4] *Timeline of the metric expansion of space*. NASA/WMAP Science Team, 2006. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang#/media/File:CMB\\_Timeline300\\_no\\_WMAP.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang#/media/File:CMB_Timeline300_no_WMAP.jpg) (цит. на стр. 4).
- [5] *The Milky Way Galaxy*. NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech), 2017. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/resources/285/the-milky-way-galaxy/> (цит. на стр. 5).
- [6] Charles R. Swindoll. *Swindoll's Ultimate Book of Illustrations and Quotes*. Thomas Nelson, 2003. (цит. на стр. 4).
- [7] Maggie Masetti. *How Many Stars in the Milky Way?* NASA. URL: <https://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/index.php/2015/07/22/how-many-stars-in-the-milky-way/> (цит. на стр. 6).
- [8] Ann Zabludoff. *The Nebular Theory of the Origin of the Solar System*. The University of Arizona, Department of Astronomy и Steward Observatory, 2010. URL: [http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/mario/solar\\_system.html](http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/mario/solar_system.html) (цит. на стр. 6, 10, 13, 14).
- [9] Robert Gendler. *Orion Molecular Cloud Complex*. Sun.org. URL: <http://www.sun.org/images/orion-molecular-cloud-complex> (цит. на стр. 7).
- [10] *Star Formation*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Star\\_formation](https://en.wikipedia.org/wiki/Star_formation) (цит. на стр. 6, 7, 9–13).
- [11] Christopher Palma. *The Process of Star Formation*. University of Oregon. URL: [https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/15\\_p3.html](https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/15_p3.html) (цит. на стр. 6, 7, 9–12).
- [12] James Schombert. *Star Formation*. University of Oregon. URL: <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec13.html> (цит. на стр. 7, 9, 12, 17, 18).
- [13] Herschel Space Observatory. *Herschel's view of new stars and molecular clouds*. ESA/NASA/JPL-Caltech. URL: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2017/09/Herschel\\_s\\_view\\_of\\_new\\_stars\\_and\\_molecular\\_clouds](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/09/Herschel_s_view_of_new_stars_and_molecular_clouds) (цит. на стр. 8).
- [14] Thayer Watkins. *The Virial Theorem: Its Explanation, Proof, Application and Limitations*. San José State University. URL: <https://www.sjsu.edu/faculty/watkins/virialth.htm> (цит. на стр. 7).
- [15] Kenneth Wood. *Star formation*. School of Physics и Astronomy, University of St Andrews, Scotland. URL: <http://www-star.st-and.ac.uk/~kw25/teaching/stars/STRUC5.pdf> (цит. на стр. 8, 14).

- [16] *List of most massive stars*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_most\\_massive\\_stars](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_massive_stars) (цит. на стр. 9, 51).
- [17] George Rieke Marcia Rieke. *The Star Formation Process*. The University of Arizona, Department of Astronomy и Steward Observatory. URL: <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/starform.htm> (цит. на стр. 9).
- [18] Michael Jones. *Molecular Cloud Collapse*. 2019. URL: <https://www.aesthetic-computation.com/11/> (цит. на стр. 9).
- [19] Michael Y. Grudic et al. *On the nature of variations in the measured star formation efficiency of molecular clouds*. California Institute of Technology, 2019. URL: <https://astrobites.org/2019/11/08/when-do-stars-form-simulating-dynamic-star-formation-efficiencies-in-giant-molecular-clouds/> (цит. на стр. 10).
- [20] *Hubble Views a Protostar in a Very Early Evolutionary Stage*. NASA, ESA, и the Hubble Heritage Team, 2013. URL: <https://scitechdaily.com/hubble-views-protostar-early-evolutionary-stage/> (цит. на стр. 11).
- [21] Henry Reich. *Why is the Solar System Flat (Video)*. Minute Physics (YouTube Channel). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tmNXXqeUtJM> (цит. на стр. 12).
- [22] Adam Block. *T-Tauri and Hind's Variable Nebula*. Mt. Lemmon SkyCenter, University of Arizona, 2011. URL: <http://www.brera.mi.astro.it/apod/ap110326.html> (цит. на стр. 12).
- [23] *Star Formation*. OpenStax CNX. URL: <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/star-formation/> (цит. на стр. 12, 14–16, 41).
- [24] ESO's VISTA InfraRed CAMera. *HH 24-26*. Wikimedia Project, 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/HH\\_24-26](https://en.wikipedia.org/wiki/HH_24-26) (цит. на стр. 13).
- [25] *Birth of Planets Revealed in Astonishing Detail in ALMA's 'Best Image Ever'*. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array's (ALMA), 2014. URL: <https://web.archive.org/web/20141106220622/https://public.nrao.edu/static/pr/planet-formation-alma.html> (цит. на стр. 14).
- [26] Maciej Rebisz Rebecca Boyle. *Wandering Space Rocks Help Solve Mysteries of Planet Formation*. Quanta Magazine, 2019. URL: <https://www.quantamagazine.org/wandering-space-rocks-help-solve-mysteries-of-planet-formation-20190716/> (цит. на стр. 15).
- [27] Sebastian Anthony. *The Moon's real age, and creation from the collision of Earth and Theia, finally confirmed*. Extreme Tech, National Geography, 2014. URL: <https://www.extremetech.com/extreme/179768-the-moons-real-age-is-finally-revealed-but-the-mystery-of-earths-tardy-development-lives-on> (цит. на стр. 16).
- [28] William Pendrill P. Marenfeld. *Citizen Scientists Discover Dozens of Failed Stars Lurking in Our Cosmic Neighborhood*. Jet Propulsion Laboratory/NOIRLab/NSF/AURA, 2020. URL: <https://scitechdaily.com/citizen-scientists-discover-dozens-of-failed-stars-lurking-in-our-cosmic-neighborhood/> (цит. на стр. 17).
- [29] Paul Sutter. *Brown Dwarfs: The Coolest Stars or the Hottest Planets?* Space.com, 2019. URL: <https://www.space.com/42790-brown-dwarfs-coolest-stars-hottest-planets.html> (цит. на стр. 17, 18).
- [30] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Pauli exclusion principle*. Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/Pauli-exclusion-principle> (цит. на стр. 18).
- [31] Ram Chandra Gotame. *Harvard Spectral Classification*. Physics Feed, 2020. URL: <https://physicsfeed.com/post/harvard-spectral-classification/> (цит. на стр. 19, 20).
- [32] Dr Peter Voitke. *Stellar Physics*. St Andrews University. URL: <http://www-star.st-and.ac.uk/~pw31/education.html> (цит. на стр. 20, 62, 76).

- [33] *Stellar classification*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_classification](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification) (цит. на стр. 20).
- [34] *Color index*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_index](https://en.wikipedia.org/wiki/Color_index) (цит. на стр. 20).
- [35] Prince Jha. *Hipparchus*. Vedic Math School. URL: <https://vedicmathschool.org/hipparchus/> (цит. на стр. 21).
- [36] *The Magnitude Scale*. Australia Telescope National Facility. URL: [https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/photometry\\_magnitude.html#magnabsolute](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/photometry_magnitude.html#magnabsolute) (цит. на стр. 21).
- [37] *Absolute magnitude*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Absolute\\_magnitude](https://en.wikipedia.org/wiki/Absolute_magnitude) (цит. на стр. 22, 23).
- [38] *Luminosity of Stars*. Australia Telescope National Facility. URL: [https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/photometry\\_luminosity.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/photometry_luminosity.html) (цит. на стр. 23).
- [39] *Parallax and Distance Measurement*. Las Cumbres Observatory. URL: <https://lco.global/spacebook/distance/parallax-and-distance-measurement/> (цит. на стр. 24).
- [40] Spitzer Space Telescope. *Calibrated Period-Luminosity Relationship for Cepheids*. NASA, JPL-Caltech, W. Freedman, 2016. URL: <https://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2012/10/pia15819-full-1024x819.jpg> (цит. на стр. 25).
- [41] Matt Williams. *What are Cepheid Variables?* UniverseToday, 2016. URL: <https://www.universetoday.com/40468/what-are-cepheid-variables/> (цит. на стр. 25).
- [42] The StarChild Team. *Cepheids*. NASA. URL: <https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/questions/cepheids.html> (цит. на стр. 26).
- [43] 'Vampire' star discovered gorging on brown dwarf companion. Sky News, 2020. URL: <https://news.sky.com/story/vampire-star-discovered-gorging-on-brown-dwarf-companion-11916406> (цит. на стр. 26).
- [44] *Type Ia supernova*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Type\\_Ia\\_supernova](https://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_supernova) (цит. на стр. 27).
- [45] *Cepheid Variable Stars, Supernovae and Distance Measurement*. Las Cumbres Observatory. URL: <https://lco.global/spacebook/distance/cepheid-variable-stars-supernovae-and-distance-measurement/> (цит. на стр. 28).
- [46] *The Hertzsprung-Russell Diagram*. ESA - European Space Agency. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/cesar/the-hertzsprung-russell-diagram> (цит. на стр. 28).
- [47] Richard Powell. *The Hertzsprung-Russell Diagram*. 2006. URL: <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html> (цит. на стр. 28–31).
- [48] *Hertzsprung-Russell Diagram*. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/h/hertzsprung-russell+diagram> (цит. на стр. 29).
- [49] John A. Dutton. *The Hertzsprung-Russell Diagram*. PennState College of Earth и Mineral Sciences. URL: [https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/14\\_p6.html](https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/14_p6.html) (цит. на стр. 29).
- [50] *The Hipparcos Space Astrometry Mission*. ESA. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos> (цит. на стр. 29).
- [51] *Gliese Catalogue of Nearby Stars*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gliese\\_Catalogue\\_of\\_Nearby\\_Stars](https://en.wikipedia.org/wiki/Gliese_Catalogue_of_Nearby_Stars) (цит. на стр. 29).
- [52] *Бетелгез*. Wikimedia Project. URL: <https://sr.wikipedia.org/sr-ec/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B3%D0%B5%D0%B7> (цит. на стр. 31).

- [53] Nick Strobel. *Hertzprung-Russell Diagram*. Astronomy Notes. URL: <http://www.astronomynotes.com/starprop/s13.htm> (цит. на стр. 31, 32).
- [54] *Gaiа's Hertzsprung-Russell Diagram*. ESA, 2019. URL: <https://sci.esa.int/web/gaia/-/60198-gaia-hertzsprung-russell-diagram> (цит. на стр. 33).
- [55] Saša Marković. „Zašto Sunce sija”. У: *Vreme* 615 (2002.). URL: <http://blog.luka.in.rs/2008/08/zato-sunce-sija.html> (цит. на стр. 35, 48).
- [56] *Kelvin–Helmholtz mechanism*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Helmholtz\\_mechanism](https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Helmholtz_mechanism) (цит. на стр. 36).
- [57] *Kelvin–Helmholtz mechanism*. FxSolver.com. URL: <https://www.fxsolver.com/browse/formulas/Kelvin-Helmholtz+mechanism> (цит. на стр. 37).
- [58] *Washington Conferences on Theoretical Physics*. The George Washington University и The Carnegie Institute of Washington. URL: <https://home.gwu.edu/~kargaltsev/HEA/washington-conferences.html> (цит. на стр. 38).
- [59] H. A. Bethe. „Energy Production in Stars”. У: *Physical Review* 55 (1939.). URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.55.434> (цит. на стр. 38).
- [60] Chris Mihos. *The Proton-Proton Chain*. Case Western Reserve University. URL: <http://burro.cwru.edu/academics/Astr221/StarPhys/ppchain.html> (цит. на стр. 38).
- [61] *Proton–proton chain reaction*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton\\_chain\\_reaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction) (цит. на стр. 38).
- [62] *Illustration of the proton–proton chain reaction sequence*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Bethe#/media/File:Fusion\\_in\\_the\\_Sun.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe#/media/File:Fusion_in_the_Sun.svg) (цит. на стр. 40).
- [63] Chris Mihos. *Nuclear Reactions in Stars*. Case Western Reserve University. URL: <http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr221/StarPhys/nuclear2.html> (цит. на стр. 41).
- [64] *Overview of the CNO-I Cycle*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/CNO\\_cycle#/media/File:CNO\\_Cycle.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle#/media/File:CNO_Cycle.svg) (цит. на стр. 41).
- [65] *CNO cycle*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/CNO\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle) (цит. на стр. 42).
- [66] M. Wiescher. „The Cold and Hot CNO Cycles”. У: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 60 (2010.). URL: <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.nucl.012809.104505> (цит. на стр. 42).
- [67] Chris Mihos. *Energy Transport in Stars*. Case Western Reserve University. URL: <http://burro.case.edu/Academics/Astr221/StarPhys/transport.html> (цит. на стр. 43).
- [68] *Anatomy of the Sun*. NASA, 2013. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/solar-anatomy.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/solar-anatomy.html) (цит. на стр. 44).
- [69] *Neutrino - Pauli's Proposal*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Pauli's\\_proposal](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Pauli's_proposal) (цит. на стр. 46).
- [70] Hamish Johnston. *SuperKamiokande finds that neutrinos change flavour at night*. Physics World, 2014. URL: <https://physicsworld.com/a/superkamiokande-finds-that-neutrinos-change-flavour-at-night/> (цит. на стр. 46).
- [71] Frank Close. *Neutrino*. OUP Oxford, 2010. (цит. на стр. 46, 47).
- [72] John N. Bahcall. *Solving the mystery of the missing neutrinos*. NobelPrize.org, Nobel Media, 2004. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/solving-the-mystery-of-the-missing-neutrinos/> (цит. на стр. 47).
- [73] The BOREXINO collaboration. „First Direct Experimental Evidence of CNO neutrinos”. У: *ArXiv.org* (2020.). URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.15115.pdf> (цит. на стр. 48).

- [74] James B. Kaler. *Stellar evolution*. Access Science, NASA, 2020. URL: <https://www.accessscience.com/content/stellar-evolution/654000> (цит. на стр. 49).
- [75] R. Nave. *Stellar Lifetimes*. Georgia State University. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/startime.html> (цит. на стр. 51).
- [76] *EBLM J0555-57*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/EBLM\\_J0555-57](https://en.wikipedia.org/wiki/EBLM_J0555-57) (цит. на стр. 51).
- [77] The Royal Swedish Academy of Sciences/The Institute for Solar Physics. *Photosphere*. Encyclopaedia Britannica, 2020. URL: <https://www.britannica.com/science/photosphere> (цит. на стр. 52).
- [78] Harold Zirin. *Sun*. Encyclopaedia Britannica, 2021. URL: <https://www.britannica.com/place/Sun> (цит. на стр. 52, 53).
- [79] *Sun*. Wikimedia Project. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sun> (цит. на стр. 52–55, 57, 63).
- [80] Luc Viatour. *Solar eclipse 1999*. Wikimedia Project, 1999. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_eclipse\\_1999\\_4\\_NR.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_eclipse_1999_4_NR.jpg) (цит. на стр. 53).
- [81] *The Heliosphere*. NASA, 2013. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/Heliosphere.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Heliosphere.html) (цит. на стр. 53).
- [82] Isabel Gonzalez Johnson. *The Life Cycle of The Sun*. 2014. URL: <https://prezi.com/gyghl3iwrqmx/the-life-cycle-of-the-sun/> (цит. на стр. 54).
- [83] *Fiery Looping Rain on the Sun*. NASA, 2013. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=HFT7ATLQQx8> (цит. на стр. 54).
- [84] *The faint young Sun paradox and the climate on early Earth*. Potsdam Institute for Climate Research, 2012. URL: <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/earth-system-analysis/projects/flagships/ace/faint-young-sun-paradox> (цит. на стр. 55).
- [85] *Evolution of the Sun*. Wikimedia Project. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution\\_of\\_the\\_Sun\\_2\\_EN.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_of_the_Sun_2_EN.svg) (цит. на стр. 56).
- [86] *The Sun's Evolution*. Northwestern University (цит. на стр. 56–60, 62, 63, 65).
- [87] Matt Pearson; Roen Kelly; Klaus-Peter Schroeder; Robert Cannon Smith. *At the end of the Sun's life, when it expands into a red giant, what will become of the planets in the solar system?* Astronomy.com, 2010. URL: <https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2010/10/at-the-end-of-the-suns-life-when-it-expands-into-a-red-giant-what-will-become-of-the-planets> (цит. на стр. 57).
- [88] Andy Briggs. *What is a supernova?* EarthSky.org, 2020. URL: <https://earthsky.org/astronomy-essentials/definition-what-is-a-supernova> (цит. на стр. 58, 79, 81, 87).
- [89] Ralf Schoofs. *Ralf Schoofs - Space Art - Portfolio*. URL: <https://ralf-schoofs.blogspot.com/> (цит. на стр. 58).
- [90] *Dredge-up*. Wikimedia Project. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Dredge-up> (цит. на стр. 58, 62, 69).
- [91] *Triple-Alpha Process*. Wikimedia Project. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triple-Alpha\\_Process.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triple-Alpha_Process.svg) (цит. на стр. 59).
- [92] *Triple-alpha process*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process) (цит. на стр. 59, 60).
- [93] *Triple Alpha Process*. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/t/Triple+Alpha+Process> (цит. на стр. 59).

- [94] *General Astronomy: Stars and Galaxies*. University of Colorado Boulder, 2018. URL: [https://jila.colorado.edu/~ajsh/astr1200\\_18/starevol.html](https://jila.colorado.edu/~ajsh/astr1200_18/starevol.html) (цит. на стр. 61, 62, 76, 78, 84).
- [95] *The Death of Stars I: Solar-Mass Stars*. Australia Telescope National Facility. URL: [https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/stellarevolution\\_deathlow.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/stellarevolution_deathlow.html) (цит. на стр. 63, 64).
- [96] Hubble Space Telescope. *Planetary Nebulae*. NASA и Hubble Heritage Team. URL: <https://preview.redd.it/ni7z95dh1gp21.jpg?width=960&crop=smart&auto=webp&s=4bc77201389e89eb25e66efd8174ffe8534bd73f> (цит. на стр. 63).
- [97] Hubble Space Telescope. *Hubble Views Planetary Nebula NGC 5189*. NASA и Hubble Heritage Team, 2012. URL: <https://scitechdaily.com/hubble-views-planetary-nebula-ngc-5189/> (цит. на стр. 64).
- [98] *Stellar Evolution – Cosmic Cycles of Formation and Destruction*. Chandra X-Ray Observatory, Harvard University. URL: [https://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar\\_ev/story/story.pdf](https://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/story/story.pdf) (цит. на стр. 64, 79).
- [99] *Timeline of the Far Future*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_the\\_far\\_future](https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future) (цит. на стр. 65, 103, 119).
- [100] *Shifting habitable zones identifies around ancient stars*. Factor-Tech, Cornell University, 2016. URL: <https://www.factor-tech.com/space/22818-shifting-habitable-zones-identified-around-ancient-stars/> (цит. на стр. 66).
- [101] Elsewhere Green. *Elsewhere Green*. URL: <https://elsewheregreen.tumblr.com/image/185529653002> (цит. на стр. 67).
- [102] *The Earth's Magnetic Field: An Overview*. British Geological Survey. URL: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html> (цит. на стр. 67).
- [103] *Cosmic Journeys - Interstellar Flight*. SpaceRip, 2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dQdRrhDMXnY> (цит. на стр. 68).
- [104] Elizabeth Howell. *Fermi Paradox: Where Are the Aliens?* Space.com, 2018. URL: <https://www.space.com/25325-fermi-paradox.html> (цит. на стр. 68).
- [105] *Mira*. NASA/JPL-Caltech/C. Martin (Caltech)/M. Seibert(OCIW), 2007. URL: <https://www.star-facts.com/mira/> (цит. на стр. 69).
- [106] *Red Giant Formation*. University of Oregon. URL: <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec16.html> (цит. на стр. 69).
- [107] *Stellar Evolution*. The American Association of Variable Star Observers. URL: <https://www.aavso.org/stellar-evolution> (цит. на стр. 70).
- [108] M. J. Ireland. *Pulsation of M-type Mira variables with moderately different mass: search for observable mass effects*. 355. 2004. URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/355/2/444/969309> (цит. на стр. 70).
- [109] *New shot of Proxima Centauri, our nearest neighbour*. ESA/Hubble и NASA. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New\\_shot\\_of\\_Proxima\\_Centauri,\\_our\\_nearest\\_neighbour.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New_shot_of_Proxima_Centauri,_our_nearest_neighbour.jpg) (цит. на стр. 70).
- [110] Nola Taylor Redd. *Red Dwarfs: The Most Common and Longest-Lived Stars*. Space.com, 2019. URL: <https://www.space.com/23772-red-dwarf-stars.html> (цит. на стр. 71, 72, 74).
- [111] Erik Gregersen. *Red dwarf star*. Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/red-dwarf-star> (цит. на стр. 71, 73).
- [112] *A Potentially Habitable World in Our Nearest Star*. Planetary Habitability Laboratory, University of Puerto Rico at Arecibo, 2016. URL: <http://phl.upr.edu/press-releases/proxb> (цит. на стр. 71).

- [113] *Red Dwarf*. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/r/red+dwarf> (цит. на стр. 71).
- [114] David Taylor. *Stellar Evolution For Large Stars*. Northwestern University (цит. на стр. 71, 76–82).
- [115] *Proxima Centauri might be more Sun-like than we thought*. NASA/CXC/M. Weiss. URL: <https://astronomynow.com/2016/10/11/proxima-centauri-might-be-more-sun-like-than-we-thought/> (цит. на стр. 72).
- [116] *Red dwarf*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Red\\_dwarf](https://en.wikipedia.org/wiki/Red_dwarf) (цит. на стр. 72–74).
- [117] *Stellar Evolution*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_evolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution) (цит. на стр. 73, 83, 84).
- [118] Saša Marković. „Jesmo li sami u kosmosu”. У: *Vreme* 1324 (2016.). URL: <http://blog.luka.in.rs/2016/05/jesmo-li-sami-u-kosmosu.html> (цит. на стр. 73, 74).
- [119] Elizabeth Howell. *X-Rays Could Spell Doom for Life on Planets Around Red Dwarfs*. Space.com, 2018. URL: <https://www.space.com/40186-red-dwarf-stars-radiation-could-doom-life.html> (цит. на стр. 74).
- [120] *Superflares From Young Red Dwarf Stars Imperil Planets*. ASA, ESA и D. Player (STScI). URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/superflares-from-young-red-dwarf-stars-imperil-planets> (цит. на стр. 74).
- [121] *What Is the Most Massive Star?* Space.com, European Southern Observatory. URL: <https://www.space.com/41313-most-massive-star.html> (цит. на стр. 75).
- [122] USA NASA Goddard Space Flight Center from Greenbelt MD. *Hubble Sees a Star ‘Inflating’ a Giant Bubble*. Wikimedia Project. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hubble\\_Sees\\_a\\_Star\\_%E2%80%98Inflating%E2%80%99\\_a\\_Giant\\_Bubble\\_\(26534662246\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hubble_Sees_a_Star_%E2%80%98Inflating%E2%80%99_a_Giant_Bubble_(26534662246).jpg) (цит. на стр. 77).
- [123] A. C. Phillips. *The Physics of Stars, 2nd Edition*. Wiley, 1999. (цит. на стр. 79).
- [124] Maryam Hobbs. *Neutron Stars*. The Death of Stars II: High Mass Stars. URL: [https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution\\_deathhigh.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_deathhigh.html) (цит. на стр. 80–82, 85, 88, 90).
- [125] *Supernova remnant SN 1006*. NASA, Chandra X-Ray Observatory, 2021. URL: [https://www.instagram.com/p/CMSFwdeg1DM/?utm\\_source=ig\\_embed](https://www.instagram.com/p/CMSFwdeg1DM/?utm_source=ig_embed) (цит. на стр. 81).
- [126] Hubble Space Telescope. *Veil Nebula Supernova Remnant*. NASA, 1999. URL: <https://hubblesite.org/image/3620/gallery> (цит. на стр. 82).
- [127] *Speeding black hole*. ESA, 2002. URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Extreme\\_space/Speeding\\_black\\_hole](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Extreme_space/Speeding_black_hole) (цит. на стр. 83).
- [128] Ken Croswell. *Inner Workings: A massive star dies without a bang, revealing the sensitive nature of supernovae*. National Academy of Sciences of the United States of America, 2020. URL: <https://www.pnas.org/content/117/3/1240> (цит. на стр. 84).
- [129] Christal Zhou. *The Newest Elements on the Periodic Table*. Let’s Talk Science, 2019. (цит. на стр. 84).
- [130] David Taylor. *After The Supernova Is Over*. Northwestern University (цит. на стр. 84–86).
- [131] *Deciphering dark matter: the remarkable life of Fritz Zwicky*. Nature, Photo by Mount Palomar/Caltech. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02603-7> (цит. на стр. 86).
- [132] David Taylor. *The Other Supernova*. Northwestern University (цит. на стр. 86).
- [133] John P. Millis. *What are Hypergiant Stars Like?* ThoughtCo., 2018. URL: <https://www.thoughtco.com/hypergiant-stars-behemoths-of-the-galaxy-3073593> (цит. на стр. 87).

- [134] Yaël Nazé. *10 things we don't know about massive stars*. Astronomy.com, 2019. URL: <https://astronomy.com/magazine/2019/10/10-things-we-dont-know-about-massive-stars> (цит. на стр. 89).
- [135] *Mauerquadrant*. Wikimedia Project, 1598. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mauerquadrant.jpg> (цит. на стр. 89).
- [136] Andrea Thompson. *What is a supernova?* Space.com, 2018. URL: <https://www.space.com/6638-supernova.html> (цит. на стр. 90).
- [137] Mary Stewart Adams. *Betelgeuse and the Shoulders of Giants: this week on the Storyteller's Night Sky*. Interlochen Public Radio, 2020. URL: <https://www.interlochenpublicradio.org/post/betelgeuse-and-shoulders-giants-week-storytellers-night-sky> (цит. на стр. 90).
- [138] Eric Betz. *When Betelgeuse goes supernova, what will it look like from Earth?* Astronomy.com, 2020. URL: <https://astronomy.com/news/2020/02/when-betelgeuse-goes-supernova-what-will-it-look-like-from-earth> (цит. на стр. 90).
- [139] NASA/CXC/SAO. *Supernova ejected from the pages of history*. NASA, Chandra X-Ray Telescope, 2016. URL: <https://astronomynow.com/2016/08/18/supernova-ejected-from-the-pages-of-history/> (цит. на стр. 91).
- [140] *Astronomers discover the fastest-spinning white dwarf yet — and it's a vampire*. Space.com. URL: <https://www.space.com/fastest-spinning-white-dwarf-vampire.html> (цит. на стр. 93).
- [141] *White dwarf*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/White\\_dwarf](https://en.wikipedia.org/wiki/White_dwarf) (цит. на стр. 93, 95, 96).
- [142] *White Dwarf*. Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/W/White+Dwarf> (цит. на стр. 93–95, 97).
- [143] Christopher Crockett. *What are white dwarf stars?* EarthSky.org, 2020. URL: <https://earthsky.org/astronomy-essentials/white-dwarfs-are-the-cores-of-dead-stars> (цит. на стр. 93, 95, 97, 98).
- [144] *White Dwarf*. NASA, Goddard Space Flight Center, 2006. URL: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/dwarfs1.html> (цит. на стр. 94).
- [145] *Sirius A and B (Hubble photo)*. NASA. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sirius\\_A\\_and\\_B\\_Hubble\\_photo.editted.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sirius_A_and_B_Hubble_photo.editted.PNG) (цит. на стр. 94).
- [146] *White Dwarf Stars*. NASA, Goddard Space Flight Center, 2010. URL: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/dwarfs2.html> (цит. на стр. 94, 95).
- [147] *The Ring Nebula (M57)*. The Hubble Heritage Team (AURA/ STScI/ NASA). URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/751073main\\_m57ring\\_hst\\_big.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/751073main_m57ring_hst_big.jpg) (цит. на стр. 95).
- [148] *Astronomers see the before and after of an exploding white dwarf star*. The Verge. URL: <https://www.theverge.com/2016/8/17/12515230/white-dwarf-star-nova-explosion-astronomers-space> (цит. на стр. 96, 97).
- [149] *Accretion Disk*. JRank.org. URL: <https://science.jrank.org/pages/18/Accretion-Disk.html> (цит. на стр. 97).
- [150] *Exploded Star Blooms Like a Cosmic Flower*. NASA, CXC, Univeristy of Texas, 2017. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/chandra/exploded-star-blooms-like-flower-photo.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/exploded-star-blooms-like-flower-photo.html) (цит. на стр. 98).
- [151] Nola Taylor Redd. *White Dwarfs: Compact Corpses of Stars*. Space.com, 2018. URL: [WhiteDwarfs: CompactCorpsesofStars](https://www.space.com/white-dwarfs-compact-corpse-of-stars) (цит. на стр. 98).
- [152] *The Nobel Prize in Physics 2011 Press Release*. The Nobel Prize. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/press-release/> (цит. на стр. 99).



- [153] *Neutron Star*. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/N/Neutron+Star> (цит. на стр. 99, 101, 102).
- [154] Daniel Molybdenum Raphael Concorde. *Neutron Star gravitational lensing*. NASA's Goddard Space Flight Center, 2019. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neutron\\_Star\\_gravitational\\_lensing.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neutron_Star_gravitational_lensing.png) (цит. на стр. 99).
- [155] Andy Briggs. *What is a neutron star?* EarthSky.org, 2020. URL: <https://earthsky.org/astronomy-essentials/definition-what-is-a-neutron-star> (цит. на стр. 99, 101, 102, 104, 107).
- [156] Adam Mann. *What Is a Neutron Star?* Live Science, 2019. URL: <https://www.livescience.com/neutron-star.html> (цит. на стр. 100, 102, 103, 105).
- [157] *Jocelyn Bell Burnell*. Hencoup Enterprises Ltd/Science Photo Library. URL: <https://earthsky.org/astronomy-essentials/definition-what-is-a-neutron-star> (цит. на стр. 100).
- [158] *James Chadwick*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Chadwick](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Chadwick) (цит. на стр. 100).
- [159] Ernie Tretkoff. „This Month in Physics History: February 1968: The Discovery of Pulsars Announced”. У: *APS News* 15/2 (2006.). URL: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200602/history.cfm> (цит. на стр. 100, 101).
- [160] *Neutron star*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star) (цит. на стр. 101, 102, 105, 107).
- [161] Nola Taylor Redd. *Neutron Stars: Definition and Facts*. Space.com, 2018. URL: <https://www.space.com/22180-neutron-stars.html> (цит. на стр. 101–105, 107).
- [162] *What If a Spoonful of Neutron Star Appeared on Earth?* Whatifshow.com. URL: <https://whatifshow.com/what-if-a-spoonful-of-neutron-star-appeared-on-earth/> (цит. на стр. 101).
- [163] Roen Kelly. *Weird Object: Neutron Star PSR J1748-2446*. Astronomy.com, 2015. URL: <https://astronomy.com/magazine/weirdest-objects/2015/05/31-neutron-star-psr-j17482246> (цит. на стр. 102).
- [164] *Neutron Stars*. NASA, 2017. URL: [https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron\\_stars1.html](https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html) (цит. на стр. 103, 104).
- [165] S. Wiessinger. *NASA's Fermi Satellite Finds Hints of Starquakes in Magnetar 'Storm'*. NASA's Goddard Space Flight Center, 2014. URL: <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasas-fermi-satellite-finds-hints-of-starquakes-in-magnetar-storm> (цит. на стр. 103).
- [166] *Eclipsing Pulsar Promises Clues to Crushed Matter*. NASA/GSFC. URL: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/news/15sep10.html> (цит. на стр. 104).
- [167] Maryam Hobbs. *Neutron Stars*. CSIRO, Australia Telescope National Facility. URL: <https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/everyone/pulsars/index.html> (цит. на стр. 105).
- [168] *Neutron star cross section*. Wikimedia Project. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neutron\\_star\\_cross\\_section.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neutron_star_cross_section.svg) (цит. на стр. 106).
- [169] *Schematic diagrams of quark and neutron stars*. NASA/Chandra Space Telescope. URL: <https://physicsworld.com/a/calculations-point-to-massive-quark-stars/> (цит. на стр. 107).
- [170] *Quark star*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quark\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star) (цит. на стр. 107).
- [171] Саша Марковић. *Ajnštajn je opet bio u pravu*. 1311. 2016. URL: <http://blog.luka.in.rs/2016/02/ajnštajn-je-opet-bio-u-pravu.html> (цит. на стр. 107, 113).

- [172] Dana Berry. *Black Hole or No Black Hole: Astrophysics of Neutron Star Collisions*. SkyWorks Digital, Inc., 2020. URL: <https://scitechdaily.com/black-hole-or-no-black-hole-astrophysics-of-neutron-star-collisions/> (цит. на стр. 108).
- [173] *Messier 1 (The Crab Nebula)*. NASA, ESA, Arizona State University. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-1-the-crab-nebula> (цит. на стр. 109).
- [174] Steven N. Shore. „Neutron Stars”. *Y: Encyclopedia of Physical Science and Technology* (2003.). URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/neutron-stars>.
- [175] *What Are Black Holes?* ESO, ESA/Hubble, M.Kornmesser/N.Bartmann. URL: <https://chandra.harvard.edu/blog/node/737> (цит. на стр. 110).
- [176] *Black Hole*. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, Swinburne University of Technology. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/b/black+hole> (цит. на стр. 108, 112, 113).
- [177] Adrian Cho. *After decades of effort, scientists are finally seeing black holes—or are they?* Science Magazine, 2021. URL: <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes/> (цит. на стр. 108, 111, 114).
- [178] *Let's Talk About Black Holes*. NASA's Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman for ABC News. URL: <https://www.abc.net.au/news/science/2019-10-02/nasa-black-hole-visualisation/11563802?nw=0> (цит. на стр. 111).
- [179] Ethan Siegel. *This Is Why We'll Never Detect Hawking Radiation From An Actual Black Hole*. Forbes, 2020. URL: <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2020/07/01/this-is-why-well-never-detect-hawking-radiation-from-an-actual-black-hole> (цит. на стр. 110, 111, 118).
- [180] *Kelvin–Helmholtz mechanism*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_hole](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole) (цит. на стр. 110, 112, 113, 115–118, 121).
- [181] *Schwarzschild metric*. Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild\\_metric](https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_metric) (цит. на стр. 111).
- [182] *Hotspots in Cygnus A: an active galactic nucleus*. NRAO/AU. URL: <https://astronomynow.com/2016/10/25/hotspots-in-cygnus-a-an-active-galactic-nucleus/> (цит. на стр. 112).
- [183] Nola Taylor Redd. *What Are Black Holes?* Space.com, 2019. URL: <https://www.space.com/15421-black-holes-facts-formation-discovery-sdcmp.html> (цит. на стр. 112, 115, 120).
- [184] Christopher Nolan. *Interstellar (film)*. IMDb, 2014. URL: <https://imdb.com/title/tt0816692> (цит. на стр. 113, 116).
- [185] Andy Briggs. *What are black holes?* EarthSky.org, 2020. URL: <https://earthsky.org/space/definition-what-are-black-holes> (цит. на стр. 113).
- [186] *Sagittarius A*. Wikimedia Project. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagittarius\\_A\\*.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagittarius_A*.jpg) (цит. на стр. 114).
- [187] *NASA's Webb to Study Quasars and Their Host Galaxies in Three Dimensions*. NASA/STScI. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/nasas-webb-to-study-quasars-and-their-host-galaxies-in-three-dimensions> (цит. на стр. 115).
- [188] *Quasar*. Wikimedia Project. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Quasar> (цит. на стр. 114).
- [189] *Black Holes*. NASA Science. URL: <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes/> (цит. на стр. 116).

- [190] *New theory suggests quantum entanglement and wormholes are linked together.* ZME Science. URL: <https://www.zmescience.com/research/quantum-entanglement-wormholes-0424/> (цит. на стр. 117).
- [191] David Crookes. *Where Do Black Holes Lead?* Space.com, 2019. URL: <https://www.space.com/where-do-black-holes-lead.html> (цит. на стр. 118).
- [192] *Hawking Radiation Replicated in a Laboratory.* UniverseToday. URL: <https://www.universetoday.com/115307/hawking-radiation-replicated-in-a-laboratory/> (цит. на стр. 119).
- [193] *First ever real image of a black hole revealed.* EHT Collaboration, 2019. URL: <https://www.newscientist.com/article/2199330-first-ever-real-image-of-a-black-hole-revealed/> (цит. на стр. 120).
- [194] Saša Marković. „Crna rupa u centru galaksije Messier 87”. У: *Vreme* 1477/1478 (2019.). URL: <http://blog.luka.in.rs/2019/04/m87-u-centru-galaksije-messier-87.html> (цит. на стр. 120).
- [195] *CMB Images.* NASA. URL: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/101080/index.html> (цит. на стр. 123).
- [196] *Big Bang.* Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang#Timeline](https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang#Timeline) (цит. на стр. 123).
- [197] *Cosmic microwave background.* Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_microwave\\_background#Relationship\\_to\\_the\\_Big\\_Bang](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background#Relationship_to_the_Big_Bang) (цит. на стр. 124).
- [198] *The Universe Comes into Sharper Focus.* NASA, 2013. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/multimedia/pia16874.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/planck/multimedia/pia16874.html) (цит. на стр. 124).
- [199] *The Millennium Simulation Project.* Max Planck Institute for Astrophysics, Garching. URL: <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/> (цит. на стр. 125).
- [200] Vanderbilt University Jeremy Teaford. *This is the way the world ends: not with a bang, but with a Big Rip.* URL: <https://www.theguardian.com/science/2015/jul/02/not-with-a-bang-but-with-a-big-rip-how-the-world-will-end> (цит. на стр. 126).
- [201] *Big rip.* Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Big\\_Rip](https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Rip) (цит. на стр. 126).
- [202] *Big crunch.* Wikimedia Project. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Big\\_Crunch](https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Crunch) (цит. на стр. 127).
- [203] Roen Kelly Eric Betz. *The Beginning to the End of the Universe: The Big Crunch vs. The Big Freeze.* 2021. URL: <https://astronomy.com/news/magazine/2021/01/the-beginning-to-the-end-of-the-universe-the-big-crunch-vs-the-big-freeze> (цит. на стр. 127).
- [204] Katarina Krämer. *Explainer: What is quantum tunnelling?* Chemistry World, 2020. URL: <https://www.chemistryworld.com/news/explainer-what-is-quantum-tunnelling/4012210.article> (цит. на стр. 129).