



Математичка гимназија  
Београд

## Историјат сазнања о црним рупама

Матурски рад из физике

ученик  
**Никола Грујић IVц**

ментор  
**Слободан Спремо**

мај, 2024.

*Мом звезданом професору Дунавском*

## Садржај

### Увод

1. Црне рупе- чудесни космички објекти
2. Историја откривања и проучавања црних рупа

#### 2.1 Почетна теоријска разматрања

Џон Мичел и „тамне звезде“  
Пјер Симон Лаплас

#### 2.2 Алберт Ајнштајн и општа теорија релативности

#### 2.3 Карл Шварцшилд и Шварцшилдов радијус

#### 2.4 Артур Едингтон

#### 2.5 Чандрасекарова граница

#### 2.6 Роберт Опенхајмер

### 3. У потрази за супермасивним црним рупама у свемиру

#### 3.1 Рендгенски извори и Cygnus X-1

#### 3.2 Роџер Пенроуз- геније и атеиста

#### 3.3 Џон Вилер и назив „ црна рупа “

#### 3.4 Црвоточине

### 4. Савремена истраживања црних рупа

#### 4.1 Телескоп хоризонта догађаја и црна рупа у галаксији М87

#### 4.2 Гравитациони таласи

### 5. Да ли и Млечни пут има своју супермасивну црну рупу?

### 6. Квантна механика и црне рупе

#### 6.1 Стивен Хокинг и Хокингово зрачење

#### 6.2 Информациони парадокс

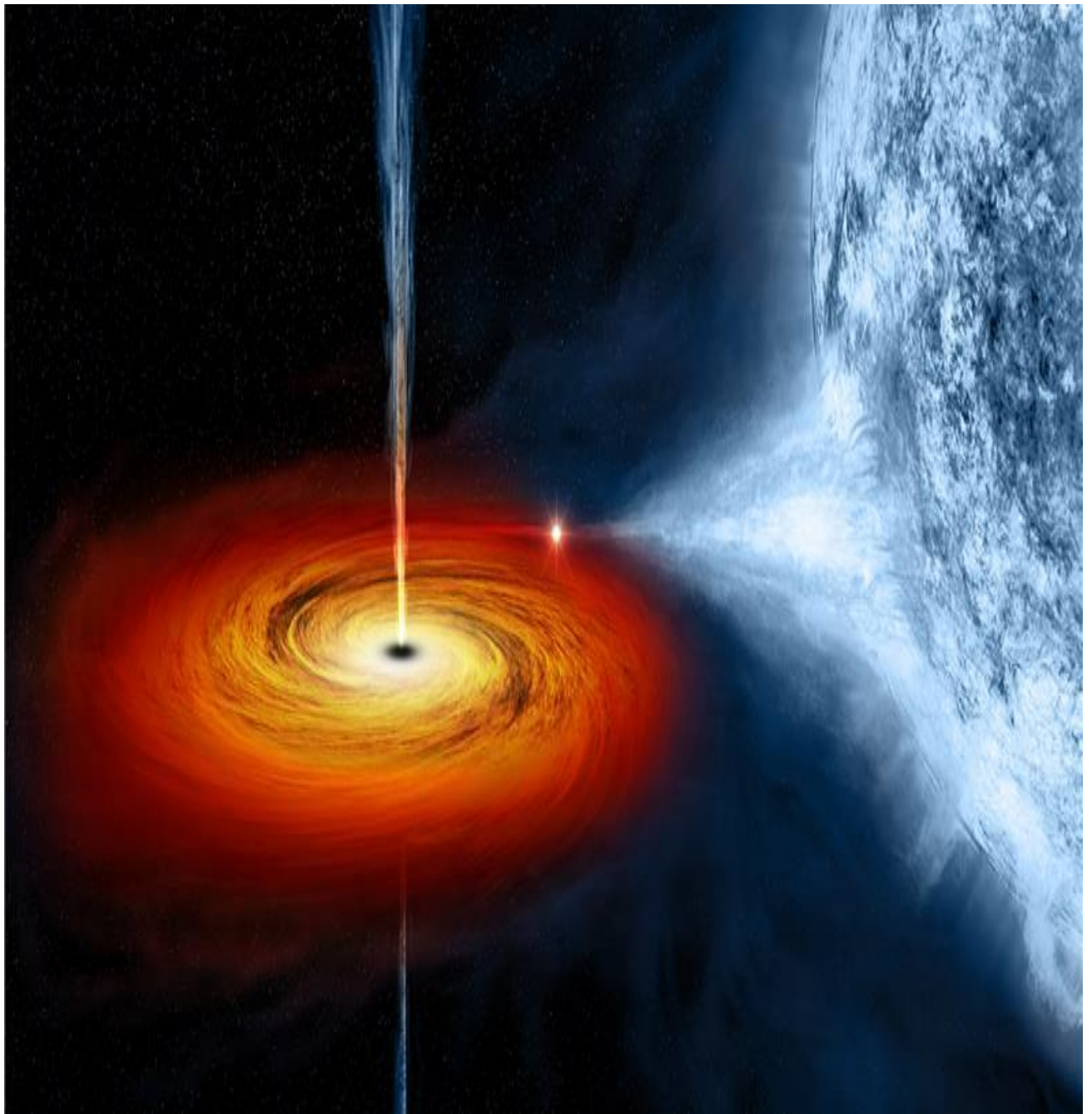
### 7. Велики хадронски сударач

#### 7.1 Могућност стварања црних рупа у LHC-у

### 8. Црне рупе у популарној култури

### 9. Закључак

Литертура



*„Ако вам се деси да уиаднеиће у црну руйу, не одусијајиће. Посиоји излаз.“*

Стивен Хокинг

## УВОД

Ми живимо усред **доба звезда**, а свемир је стар око 13,8 милијарди година. Звезде се активно формирају, еволуирају и потом умиру у спектакуларном ватромету или полако нестају. Највећи део енергије која настане у свемиру потиче из нуклеарне фузије у обичним звездама.

Ово доба ће се завршити када галаксије остану без водоника, а најдуговечнији међу звездама, црвени патуљци, полако нестану. Свемир ће тада имати око 100 милијарди година. Постаће тамнији, хладнији, разређенији. Бели патуљци, као најчешћи звездани остаци, сакупљаће честице тамне материје. Те честице анихилирају и постају извор енергије у свемиру. Међутим, до 30. космолошке декаде, залихе тамне материје ће се потрошити. Инвентар свемира биће ограничен на беле патуљке, смеђе патуљке, неутронске звезде и мртве, разбацане планете. Распадом протона и неутрона ослобађа се енергија зрачења, али колика? Бели патуљак ствара само 400 вати, што је довољно за неколико сијалица, па читава галаксија звезданих остатака производи мање светлости од једне обичне звезде која сагорева водоник.

Једини објекти налик на звезде, а на које не утиче распад протона, јесу **црне рупе**. То су изоловане области екстремне закривљености простора и времена, које гутају масу и енергију. Када протони нестану, испаравање црних рупа постаје главни извор енергије свемира. Наступиће њихово доба, **доба црних рупа**, од 40. до 100. космолошке декаде. Али, ни оне нису вечне; и саме ће коначно ишчезнути, у веома спором процесу познатом као *Хокингово зрачење*.

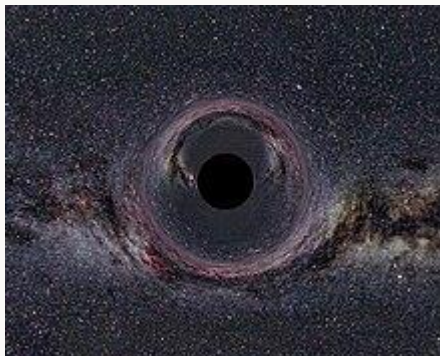
Оваква будућност свемира само је научна екстраполација и претпоставка, заснована на тренутном схватању закона физике и астрофизике.

## 1. Црне рупе - чудесни космички објекти

За свемир астрономи говоре да је најдрагоценија лабораторија која нам омогућава да разумемо и оне објекте и појаве које не видимо сопственим очима. Један од таквих објеката је и црна рупа, егзотичан пример величанствене смрти најмасивнијих звезда у космосу.

Црна рупа је чудесни космички објекат који има тако јако гравитационо поље да ниједан облик материје или радијације не може да се отисне од ње, укључујући и кванте светлости за које се сматра да имају највећу брзину у природи. Због тога објекат при посматрању делује црно – одатле и назив. Телескопи усмерени ка црној рупи бележе изобличен сјај звезда и галаксија у позадини.

У модерним уџбеницима из астрономије записано је да када звездани извор циновске масе скончава свој живот, када престану термонуклеарне реакције, дешава се гравитациони колапс. Та нагомилана материја под утицајем гравитације урушава се толико снажно да ниједна сила у супротном смеру не може да заустави ту имплозију. Материја се урушава у неку замишљену тачку бесконачне густине коју називамо *сингуларитет*, а од некадашње звезде остаје само запис о неколико физичких параметара као што су маса, угаони моменат и укупно наелектрисање. Остаје црна рупа у чијој дубини мистериозно плешу простор и време.



Симулација црне рупе Млечног пута

Интересантно је и да се често погрешно тумачи да у црној рупи нема светлости. Има је, и то веома много, али су сви ти фотони који преносе зрачење ухваћени, заробљени, и једном кад приђу довољно близу црној рупи, она их хвата својом великом гравитацијом и неповратно увлачи ка свом центру. Црну рупу астрономи често дефинишу и као област која се помало поетски назива *хоризонт догађаја* – удаљеност на којој нестаје било каква могућност да директно видимо фрагменте те заробљене светлости. Строго формално посматрано, чинило се да се ту завршава и могућност да сазнамо било шта о постојању ових објеката. Срећом, астрономи су показали да је могуће уронити у геометрију невидљивог. Потврдили су оно што је италијански писац *Италио Калвино* једном написао:

*„Ниједан таман кутак у космосу не може да прође неосветљен људском имагинацијом!“*

## 2. Историја откривања и проучавања црних рупа

Оно што карактерише већину егзотичних феномена у свемиру јесте да је потребно много времена и пажљиво испланираних истраживања да би се прешао пут од њиховог теоријског предвиђања до коначне посматрачке потврде. Супермасивне црне рупе у галаксијама нису изузетак, напротив. Вишеструко апстрактан појам црних рупа, као и могућност њиховог постојања, привлачили су деценијама не само научнике, већ и уметнике и многе друге заљубљенике у астрономију. Прича о постојању црних рупа заподенута је пре више од 100 година.

### 2.1 Почетна теоријска разматрања

#### Џон Мичел и "тамне звезде"



*Џон Мичел*, енглески физичар и професор са Кембриџа, познат је по својој пионерској теорији о "*тамним звездама*", концепту који је претеча модерне теорије црних рупа. 1783. године објавио је рад у коме је истакао да би звезда довољно масивна и збијена имала тако снажно гравитационо поље да му ни светлост не би могла побећи.

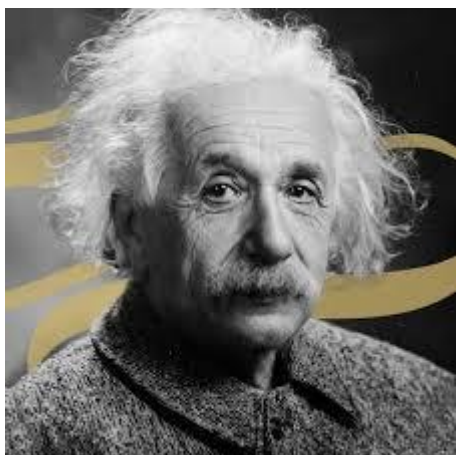
Он је користио Њутнову теорију гравитације како би израчунао да би тело с истом густином као Сунце, али пречником 500 пута већим, имало брзину већу од брзине светлости. Таква звезда би била невидљива, јер њена светлост не би могла да побегне. Сматрао је да постоји много оваквих звезда; да ми нисмо у стању да их видимо, али бисмо могли да осетимо њихову гравитацију.

## Пјер-Симон Лаплас



Француски математичар Пјер-Симон Лаплас је 1796. године додатно развио Мичелове идеје. Он је у својим радовима истакао да се мало зна о природи светлости да би могли да претпоставимо како на њу делује гравитација и да није сасвим на месту изједначити светлост са топовском ђулади у Њутновој теорији гравитације, јер је брзина светлости константна.

## 2.2 Алберт Ајнштајн и Општа теорија релативности



*Алберт Ајнштајн*, један од највећих умова и нобеловац 1915. године објавио је своју *Општу теорију релативности*, која ће редефинисати гравитацију као закривљеност простора и времена, изазвану масом и енергијом; нешто раније, Ајнштајн је показао да гравитација утиче на кретање светлости. Он је математичким формулама представио начин на који би гравитација и маса у свемиру требало да буду повезане. До закључака је дошао мисаоним експериментом; ово је било тешко проверити зато што живимо у слабом гравитационом пољу.

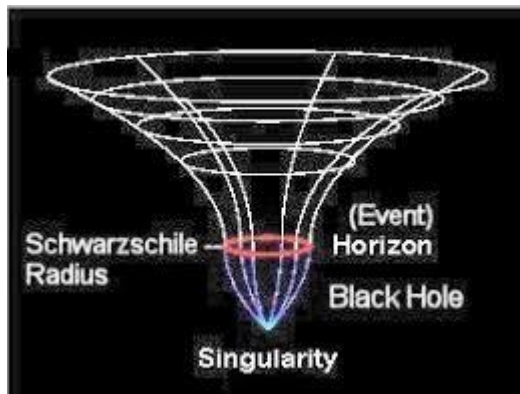


Ајнштајн је схватио да је брзина светлости врховна брзина у свемиру и да ништа не може да се мери с њом. Схватио је да маса искривљује простор и време и то тако да је искривљење веће што је маса већа. Уочио је да часовници који мере проток времена у близини велике масе и даље од ње неће показивати исто време; да ће време спорије тећи што је часовник ближе маси. Предвидео је да ће светлост скретати са своје праволинијске путање када пролази поред велике масе, предвидео је гравитационо сочиво, црвени помак, али је предвидео и гравитационе таласе. Ајнштајн је гравитацију свео на геометрију простор-времена.

### 2.3 Карл Шварцшилд и Шварцшилдов радијус

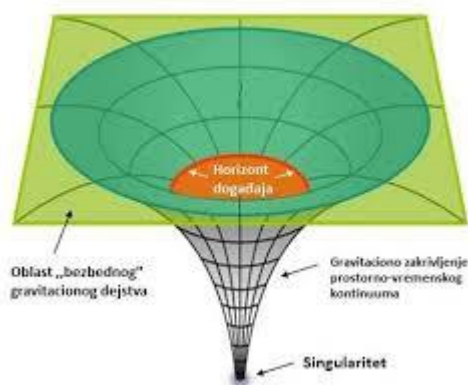


Немачки физичар [Карл Шварцшилд](#) је 1916. године решио Ајнштајнове једначине за специфичан случај статичне сферносиметричне масе. Занимљиво је да је до решења дошао док је био на фронту, а решења је поштом послао Ајнштајну. Решавајући Ајнштајнове једначине, закључио је да оне дозвољавају постојање објеката бесконачне густине. А такав је, управо, сингуларитет црних рупа. Интересантно је да физичари описују сингуларитет као део простора са бесконачном густином и нултом вредношћу запремине. За разлику од опште релативности, квантна механика, која је у потпуности подржана у математичком и експерименталном погледу, не дозвољава објектима да имају нулту вредност било које димензије, па тако ни запремине. У том смислу, сингуларитет се описује као велика количина масе сабијене у најмању могућу запремину.



Шварцшилдов радијус је најопштије решење Ајнштајнових једначина поља. То је полупречник сфере такве да, ако би сва маса неког објекта била компримована унутар те сфере, брзина бекства са површине те сфере била би једнака брзини светлости. Ово је прва прецизна математичка формулација идеје црне рупе. Шварцшилдова црна рупа је црна рупа која није наелектрисана и не ротира се. Једини критеријум по коме се две црне рупе овог типа могу разликовати је маса.

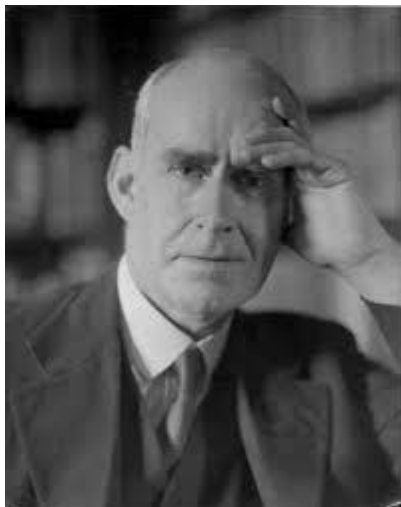
Треба поменути да се у астрофизици хоризонт догађаја црне рупе дефинише помоћу Шварцшилдовога полупречника. Хоризонт догађаја је граница иза које ништа, чак ни светлост, не може побећи гравитационом привлачењу црне рупе.



Хоризонт није физичка површина, већ представља имагинарну сферу око црне рупе, унутар које посматрач не може ништа видети. Након колапса звезде образује се хоризонт догађаја у виду сфере на месту где честице светлости, које се крећу од црне рупе, успоре и стану. Хоризонт догађаја је пропустљив у једном смеру: информације могу ући, али не могу изаћи из простора обухваћеног хоризонтом догађаја.

Иначе, данас знамо да је Шварцшилдов полупречник за црну рупу Сагитариус А која се налази у нашем галактичком центру 7,8 милиона км.

## 2.4 Артур Едингтон



Дуго се мислило да је немогуће постојање тако тамних места у космосу са густо запакованом материјом, те да су она производ одређених мањкавости у Ајнштајновим једначинама. Велики енглески астроном *Артур Едингтон*, у својој књизи из 1926. године био је близу да и експлицитно помене постојање црних рупа написавши да би било „немогуће да велика видљива звезда попут Бетелгејза има огромну густину, јер би то значило да светлост (услед огромне гравитационе силе), не би могла да дође до нас“. Постојање црних рупа је дуго теоријски сматрано проблематичним, јер су теоретичари углавном давали решења једначина која важе у неком идеалном случају, али не и у стварном свемиру у којем се објекти и те како разликују по облику, величини, старости, маси...

## 2.5 Чандрасекарова граница



*Падма Субраманијан Чандрасекар*

Године 1928, млади дипломац из Индије израчунао је колико би звездина језгро морало бити масивно да би се супротставила сопственој гравитацији кад истроши своје гориво тј. да не постане црна рупа. Замисао се заснивала на томе да када звезда постане мала, честице материје се толико приближе, тако да према Паулијевом начелу искључења морају имати веома различите брзине и удаљавају се једне од других, при чему успостављају равнотежу између гравитационг привлачења и одбијања. Чандрасекар је схватио да постоји граница одбијања, што следи из начела искључења, јер теорија релативитета налаже да је највећа разлика у брзинама честица неке звезде брзина светлости. Чандрасекар је израчунао да та граница износи 1,4 Сунчеве масе и она је данас позната као *Чандрасекарова граница*.

Артур Едингтон се супротставио Чандрасекару сматрајући да ће се језгро „некако“ сигурно одупрети колапсу, и донекле је био у праву јер се испоставило да звезде са језгром масе између 1,5 и 2 Сунчеве се могу одупрети гравитационом колапсу због начела искључења између протона и неутрона у језгру и такве звезде се називају неутронске звезде. Али звезде са језгром масе изнад 2 Сунчеве не могу избећи колапс и оне постају црне рупе.

## 2.6 Роберт Опенхајмер



*Роберт Опенхајмер*, најпознатији као „отац атомске бомбе“, дао је свој допринос разумевању колапса масивних звезда и формирања црних рупа.

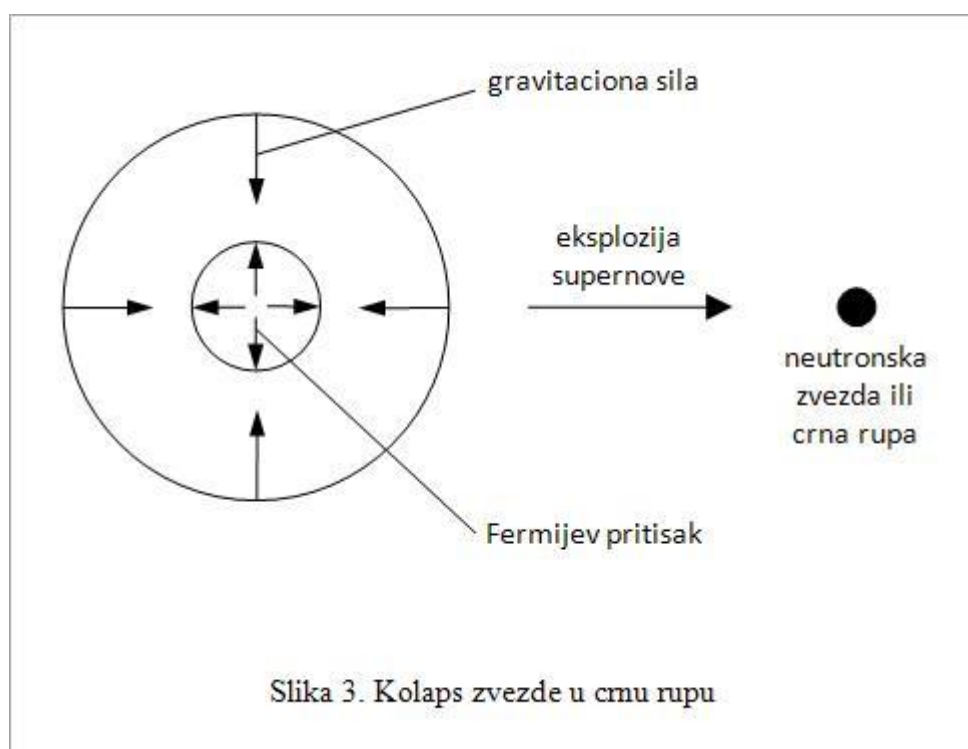
У Опенхајмеровом раду из 1939. године први пут је теоријски описано како масивне звезде могу колапсирати под властитом гравитацијом до тачке сингуларитета. Довољно масивна колапсирајућа звезда може да се сажима таквом силином да чак ни неутрони не могу да јој се одупру. Другим речима, нуклеарна сила би била надјачана гравитационом силом, а када нуклеарна сила попусти, нема ничега што би пружио равнотежу гравитацији.

Звезда тада наставља бескрајан колапс, при чему се њена запремина приближава нули, а површинска гравитација бесконачно расте. Од облака прашине формира се црна рупа.

Овај рад је дао први математички модел који показује како звезда може завршити као црна рупа. *Толман-Волкоф-Опенхајммерова граница* (ТОВ) се односи на неротирајуће неутронске звезде, аналогно Чандрасекаровој граници која се односи на беле патуљке. Лимит показује да постоји максимална маса изнад које неутронска звезда не може остати стабилна и мора колапсирати у црну рупу.

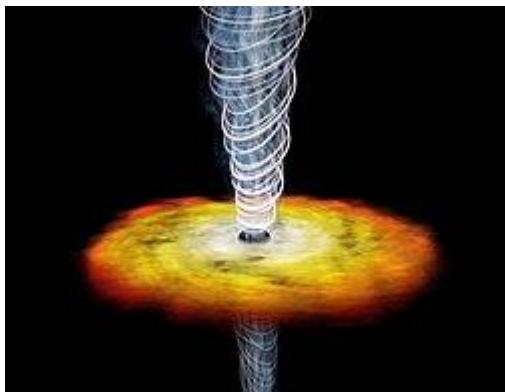
Вредност ове границе у оригиналној калкулацији је апроксимативно 0.7 соларне масе. Ова вредност је проистекла из тадашњег знања о материји тако велике густине – за прорачуне су коришћене једначине стања хладног дегенерисаног Фермијевог гаса неутрона. Данас је познато да притисак који обезбеђује стабилност неутронске звезде са масом упоредивом са масом Сунца не потиче од Фермијевог гаса неутрона, већ је резултат јаким интеракција између нуклеона (протона и неутрона). Теоријски, из научних истраживања 1996. године, овај лимит је маса од 2,2 до 2,9 соларних маса.

Ово значи да неутронска звезда са масом већом од ТОВ границе не може постојати као неутронска звезда; колабираће у црну рупу.



### 3. У потрази за супермасивним црним рупама у свемиру

Била је 1963. година када су астрономи првим великим радио-антенама детектовали један од изузетно бљештавих радио-објеката на небу. Пошто је на првим оптичким снимцима деловао налик замућеном, тачкастом објекту, назван је *квазар* (енг. quasy-stellar object), погрешно сматрајући да је реч о звезди. Интересантно је да је аутор тог првог рада о квазарима *Мартен Шмит* правилно претпоставио да у питању није блиска звезда у нашем Млечном путу, већ неки много даљи објекат у другој галаксији, удаљеној две милијарде светлосних година! Ипак, научна заједница је тада била веома скептична, одбацивши оригинални Шмитов закључак, питајући се (логично): „Ако је тај објекат тако далек, зашто је онда толико сјајан, зар светлост не би требало да бива уочена све слабија што је објекат даљи? Шта је то што подстиче његову бљештавост?“ Касније ће се испоставити да су квазари заправо изузетно масивни центри активних језгара далеких галаксија и да одају импринт постојања супермасивне црне рупе која генерише њихову грандиозну сјајност. Ипак, те 1963. године наука није знала за ову еволуциону повезаност, па је требало чекати још неколико година да астрономи закључе како такви сјајни и дугачки млазеви зрачења заправо исијавају честице које се крећу скоро светлосним брзинама. Средином седамдесетих година 20. века начињени су нови продори у разумевању квазара, па је њихова енормна енергија правилно повезана са постојањем централног, компактнoг и масивног извора – објекта који има све карактеристике супермасивне црне рупе!



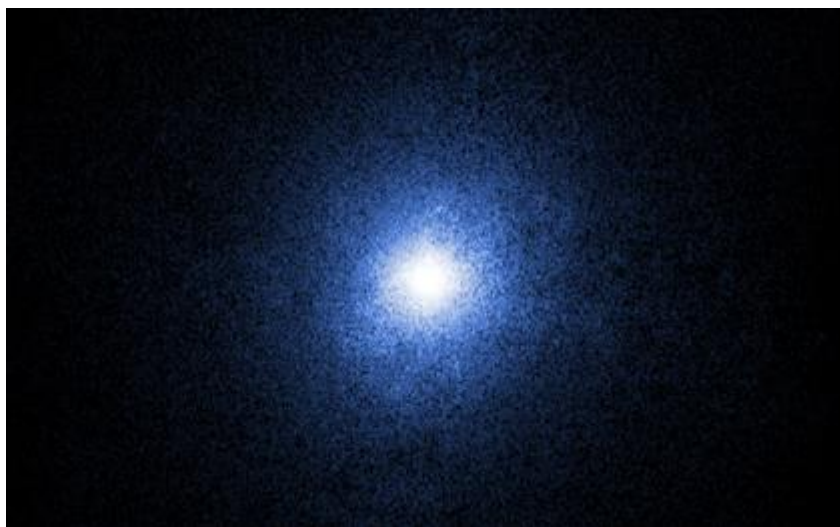
Уметнички приказ квазара GB1508



Уметнички приказ телескопа Чандра

### 3.1 Рендгенски извори и Cygnus X-1

Прва посматрања црних рупа су углавном долазила из проучавања *рендгенских извора*. Материја која пада у црну рупу емитује снажно рендгенско зрачење услед екстремних гравитационих и термалних услова. Ови рендгенски извори су постали кључни у идентификацији кандидата за црне рупе и проучавању њихових својстава.



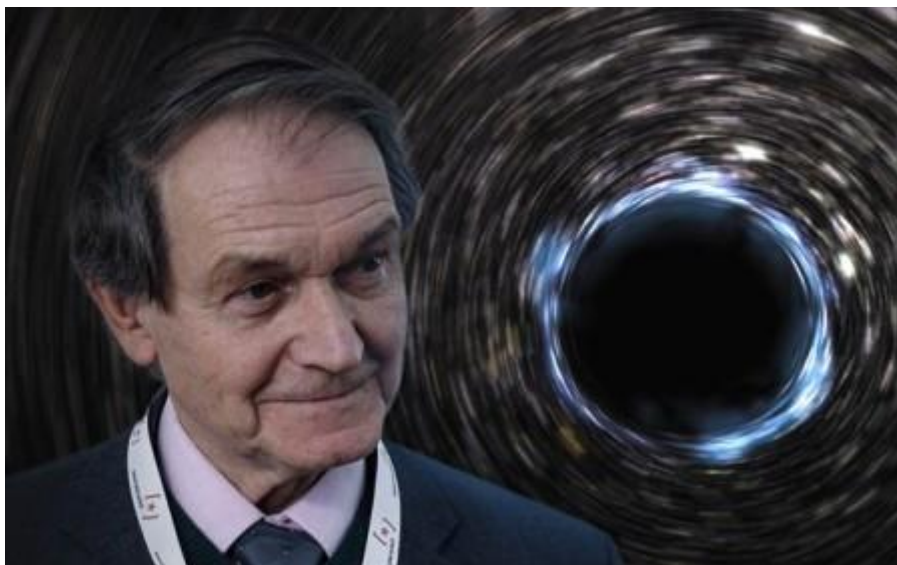
*Cygnus X-1*, снимано свемирским телескопом Chandra X-ray

Лабуд X-1 (скраћено Cyg X-1) је галактички извор рендгенских зрака у сазвежђу Лабуд и први такав извор који је касније прихваћен као црна рупа. Откривен је 1964. године током лета ракете и један је од најјачих извора рендгенског зрачења који се види са Земље, са масом неколико пута већом од Сунца. Производи вршну густину рендгенског флуksа од  $2,3 \times 10^{-23} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ .

Лабуд C-1 био је предмет пријатељске научне опкладе између физичара Стивена Хокинга и Кипа Торна 1974. године, при чему се Хокинг кладио да то није црна рупа. Он је признао губитак опкладе 1990. године, након што су опсервациони подаци пружили потпору тврдњи да уистину постоји црна рупа у том систему.



### 3.2 Роџер Пенроуз – геније и атеиста



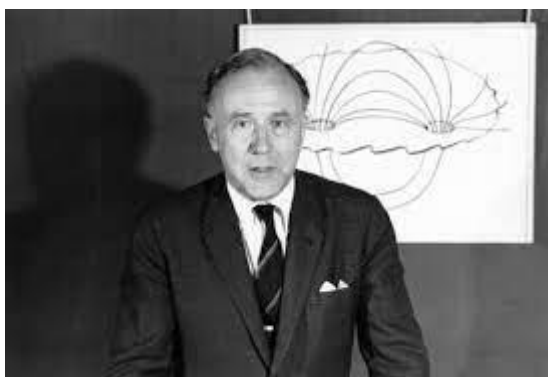
Како природа и свемир нису идеални, већ „само“ идеално несавршени, требало је чекати на решења Ајнштајнових једначина која важе у општем случају. То је пошло за руком *Роџеру Пенроузу*. Овај енглески математички физичар, математичар, филозоф и добитник Нобелове награде за физику, осмислио је бројне математичке алате који су омогућили дубоко разумевање Ајнштајнове теорије релативности, а које су касније користили Хокинг и бројни други научници, од којих су неки добили Нобелове награде. Такође је представио нешто што се назива Пенроузов процес, претпоставку на који начин се из ротирајућих „црних рупа“ може извући енергија. Из тога произлази да, ако желимо преживети као цивилизација, нису нам потребне звезде као извор енергије, него можемо материју избацити према ротирајућој „црној рупи“ на специфичан начин да бисмо извукли енергију из ње.

Пенроуз је 1965. године схватио да је настанак црних рупа тригерован гравитационим колапсом велике материје *на мали, коначни простор* и да је та могућност директна последица Ајнштајнових једначина гравитације. Он је додатно показао да би у самом срцу црне рупе требало да се налази *сингуларитет*, то хипотетичко место бесконачне густине у ком закони познате физике престају да важе. Хоризонт догађаја пропушта информације само у једном смеру, према унутрашњости рупе и тачки сингуларитета, због чега ми не можемо видети шта је иза њега.

Теорија је предвидела и да црне рупе нису све једнако масивне, те да и међу њима има значајних разлика. Најмасивније од свих су назване супермасивне црне рупе, јер садрже масу која може да износи неколико милиона маса нашег Сунца! Тако је Пенроузов резултат моментално отворио могућност да је до блиског сусрета са црним рупама само један корак – требало је наћи начин да се лоцира њихово присуство и измери маса.



### 3.3 Џон Вилер и назив "црна рупа"



*Џон Вилер, амерички физичар, радио је на пољу опште теорије релативности. Резултат тога су „црвоточине”, хипотетички тунели у простор-времену, као пречице за путовање кроз свемир, или можда кроз време. Рекао је да простор-време говори материји како да се креће, а материја говори простор-времену како да се савија. Његов рад на теорији опште релативности резултовао је 1957. године теоријом гравитационог колапса. Један је од пионира теорије квантне гравитације, као и теорије нуклеарне физике.*

Вилер је 1967. године популаризовао термин "црна рупа". Осим што је смислио овај назив, дао је значајан допринос разумевању колапса масивних звезда и формирању црних рупа.

Иначе, радио је и на развоју атомске и хидрогенске бомбе. Он је израчунао, да ако би се из свих океана на Земљи, узела тешка вода могла би се направити водонична бомба која би у тој мери сабила материју у средишту да би ту настала црна рупа.

### 3.4 Црвоточине

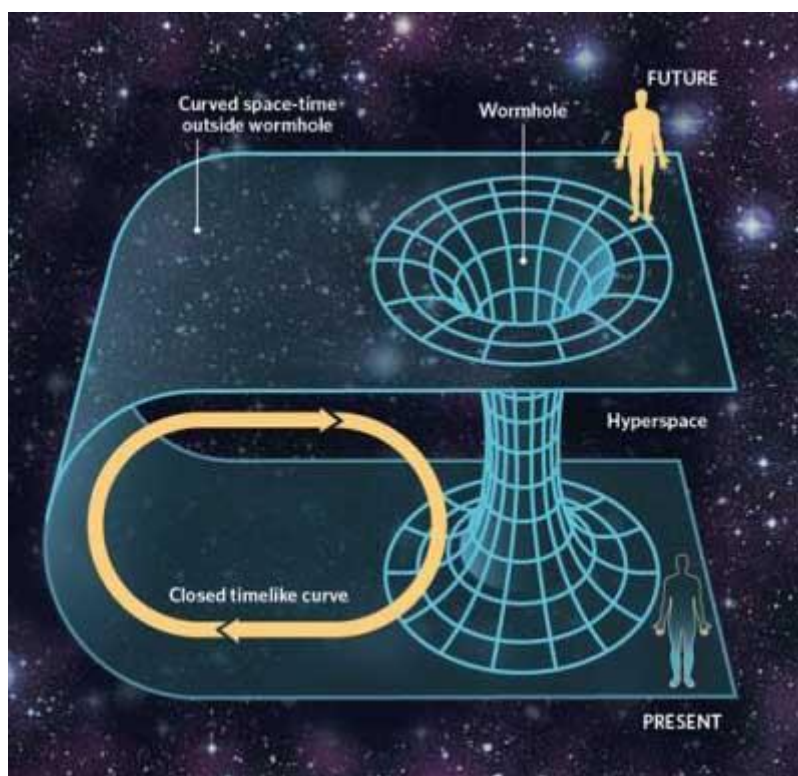
Црвоточине или Ајнштајн-Розен мостови су теоретска, хипотетичка пречица у простору и времену која омогућава повезивање два различита места у свемиру или два различита тренутка у времену. Оне се могу замислити као "тунели" који повезују два различита региона простора-времена, омогућавајући брже путовање између њих или чак путовање кроз време, било у прошлост или у будућност.

Стабилност црвоточина је кључно питање. У многим теоријским моделима, црвоточине су нестабилне и захтевају егзотичну материју или енергију да би биле одрживе. Егзотична материја, коју не смемо поистоветити с црном материјом или антиматеријом, садржи негативан енергетски набој и велики негативни притисак. Таква материја део је теорије квантних поља. Црвоточине су могуће у микроскопским наборима квантне пене, али, нажалост њихов пречник износи свега  $10^{-12}$  милиметара, а време трајања  $10^{-20}$  секунде.

Међутим, неки модели предвиђају постојање стабилних црвоточина које би могле бити искоришћене за практичне сврхе.

Одређена решења опште релативности омогућавају постојање црвоточина где је сваки улаз/излаз заправо црна рупа. У том смислу, црвоточине можда не спајају само два различита подручја унутар свемира, могуће је да оне повезују два потпуно различита свемира, а уколико се један улаз/излаз помери на специфичан начин, тај помак би могао омогућити путовање кроз време.

Данашња технологија још увек не може да стабилизује црвоточине, чак и кад би их пронашли. Ипак, треба имати на уму да црвоточине доносе са собом опасност од изненаднога колапса, високе радијације и контакта с егзотичном материјом.



*Црвоточина, шематски приказ претпоставке*

## 4. Савремена истраживања црних рупа

Црне рупе је тешко лоцирати јер су изузетно малих величина. Средином седамдесетих астрономи *Волф* и *Барбици* су анализирали колико брзине звезда одступају од просечне брзине у центру циновске елиптичне галаксије *M87* удаљене 50 милиона светлосних година од нас. Закључили су да хаотично и брзо кретање звезда може бити објашњено једино уколико се у центру галаксије налази супермасивна црна рупа масе од око милијарду сунаца.

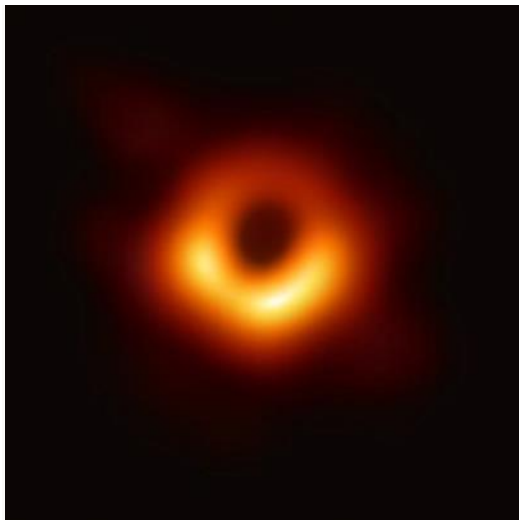
### 4.1 Телескоп хоризонта догађаја- ЕНТ и црна рупа у галаксији *M87*



**Телескоп хоризонта догађаја** (енгл. Event Horizon Telescope – ЕНТ) је глобални пројекат мреже радио- телескопа и комбинује податке из више станица са различитих места на Земљи. Осмишљен је да сними директну слику хоризонта догађаја црне рупе. Иначе, радио -телескопи су уско усмерени пријемници који раде на највишим фреквенцама и могу да региструју слаба електромагнетна зрачења са огромних удаљености.

Године 2019, ЕНТ тим је објавио **прву директну слику** хоризонта догађаја црне рупе у галаксији **M87**. Јавност је одушевљено гледала у први снимак сенке супермасивне црне рупе и њене околине. Колико год била масивна, ову црну рупу није могао да сними чак ни највећи телескоп који постоји на Земљи.

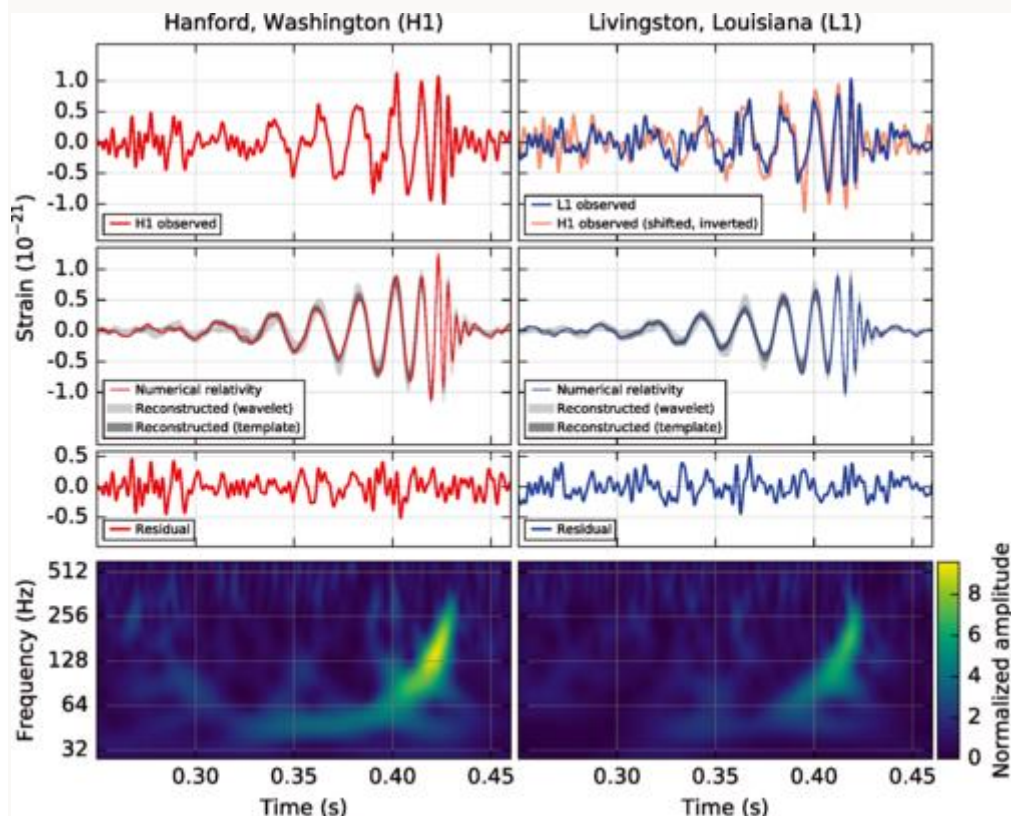
То је урађено ЕНТ-ом, комбинацијом радио и милиметарских телескопа. Револуционарно откриће пружио је визуелни доказ постојања црних рупа и потврдило теоријска предвиђања.



Месје 87 (M87), директан радио снимак супермасивне црне рупе

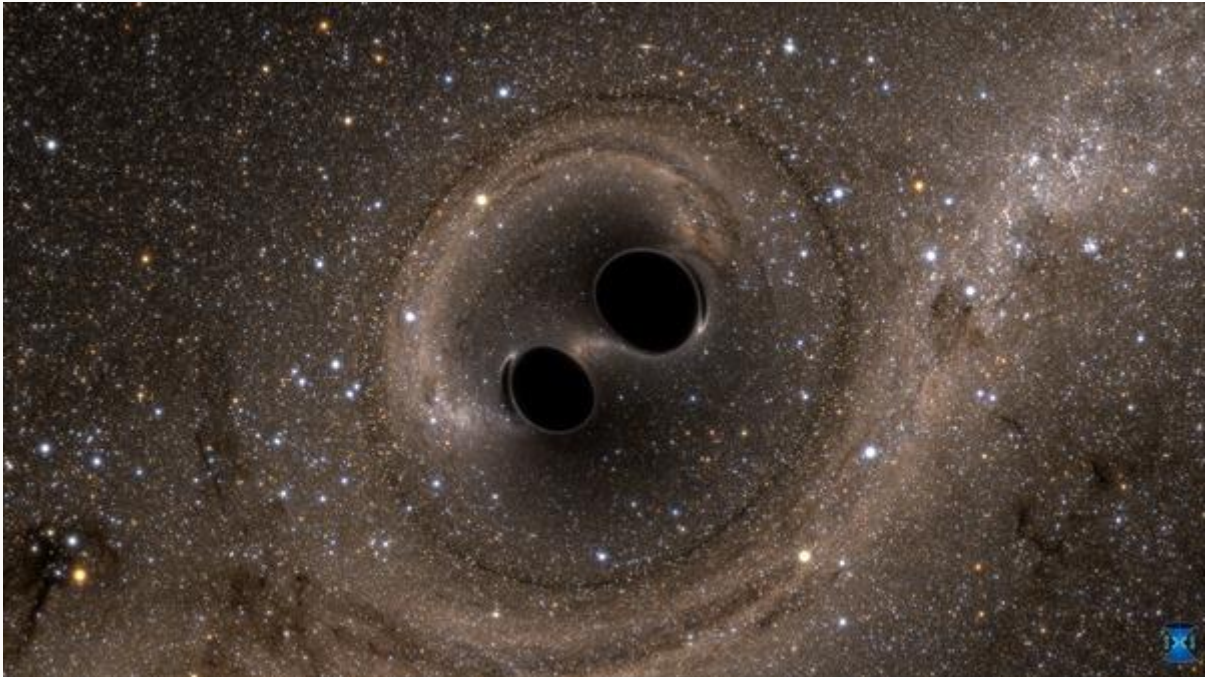
## 4.2 Гравитациони таласи

Други значајан напредак у савременој астрофизици је откривање гравитационих таласа које су **први пут директно** детектовали **ЛИГО** и **Вирго** гравитациони детектори. Прва таква детекција била је *GW150914* у септембру 2015. године, што је први кандидат за постојање бинарних црних рупа.





ЛИГО је открио гравитационе таласе или таласе у простору и времену који су настали док су црне рупе спирално улетале једна према другој, сударале се и спајале. Ова симулација показује како би се спајање чинило нашим очима ако бисмо некако могли да путујемо свемирским бродом ради ближег погледа. Настао је решавањем једначина из опште теорије релативности Алберта Ајнштајна користећи ЛИГО податке.



*Компјутерска симулација спајања две црне рупе*

## 5. Да ли и Млечни пут има своју супермасивну црну рупу?

Научници нису инсистирали на могућности да и у нашој галаксији лежи овакав волшебни објекат. Доминирало је мишљење да, уколико центре галаксија уопште и „насељавају“ супермасивне црне рупе, оне би требало да буду ексклузивно право само најмасивнијих и најактивнијих галаксија, као што су елиптична галаксија М87 или далеки квазари. Супротно њима, наш Млечни пут спада у врло мирну галаксију која улази у завршну фазу свог еволутивног пута. Због тога се идеја о постојању циновске црне рупе у центру Млечног пута дуго сматрала научно неутемељеном.

Развој астрономије на радио-таласима учинио је да ова могућност поново буде ревидирана. Помоћу радио-антена Грин Бенк, у Западној Вирџинији, астрономи су уочили изузетно снажно радио-зрачење из центра Млечног пута. Тај извор је назван *Sagittarius A\** због тога што је лоциран у сазвежђу Стрелац (Сагиттариус).

Почетком деведесетих година прошлог века на сцену ступају астрономи [Рајнхард Генцел](#) и [Андреа Гез](#). И Генцел и Гез су имали исту идеју: пронаћи младе звезде довољно близу претпостављене позиције црне рупе и пратити њихово кретање током више година. Другим речима, идеја је била да се добију подаци о маси централног објекта (црне рупе), на основу праћења других објеката који ротирају око ње (младих звезда). Оба тима морала су да превазиђу инструменталне недостатке тог времена и развију рафиниране технике посматрања, које би биле довољно прецизне да детектују кретање појединачних звезда у близини центра региона Sagittarius A\*. Тим Андреа Гез је успео да добије право коришћења циновских телескопа *Keck* на Хавајима, док је Генцелов тим користио *VLT* телескоп у Чилеу. Оба тима посебну пажњу су посветила једној звезди, названој S2. Због свог специфичног орбиталног периода, ова звезда је била идеална мета да се, кроз израчунавање њеног периода ротације израчуна маса објекта око којег S2 обилази.



*Пенроуз, Гез и Генцел*

2002. године тимови објављују анализу дугогодишњег кретања звезде S2, показавши да је у центру наше галаксије *највероватније* црна рупа. Показано је да објекат у центру наше галаксије има масу од 4,1 милион Сунчевих маса, а да се непосредно око ње налази густо јато активних звезда.

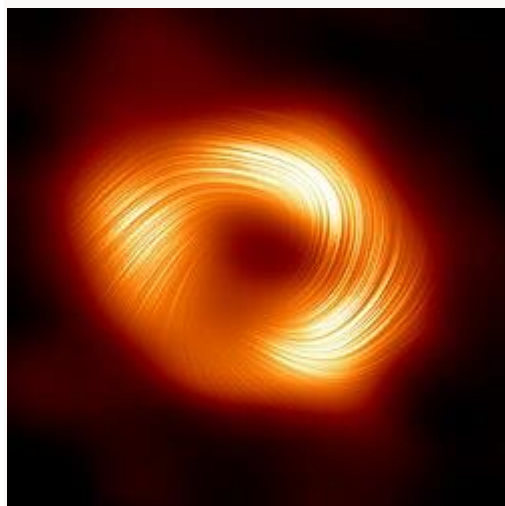
Занимљиво је напоменути да је међу коауторима рада „Ghez et al“ из 2008, који је одредио карактеристике црне рупе у центру наше галаксије праћењем орбита звезда, троје српских научника.

Међу њима је и наш астрофизичар, бивши ученик Математичке гимназије, Самир Салим, који више од 20 година живи и ради у САД.

Генцелов истраживачки тим је био у предности, пошто су добили финансијску и техничку подршку за пројекат GRAVITY, систем од четири оптичка телескопа који заједно формирају једно виртуелно огледало од 130 м у пречнику. Циљ пројекта GRAVITY је да се присуство црне рупе потврди и детекцијом кружења огромног облака прашине и гаса којима се супермасивне црне рупе „хране“.

У раду објављеном 2018. године показали су да око центра Sagittarius A\* ротира више гасних „облачића“, огромним брзинама, што иде у прилог постојања црне рупе. Њихов труд биће награђен.

2020. године Нобелов комитет одлучио је да једну половину награде добије Роџер Пенроуз (1934), енглески теоријски физичар, за немерљив теоријски допринос у предвиђању постојања црних рупа. Другу половину награде поделили су астрономи-посматрачи: Американка Андреа Гез (1965) и Немац Рајхнхард Генцел (1952), јер су открили да у центру наше галаксије, Млечног пута, дефинитивно постоји *супермасивни компактни објекат* чију су масу успели прецизно да измере.



Sgr A\*, Телескоп хоризонта догађаја 2017.

## 6. Квантна механика и црне рупе

### 6.1 Стивен Хокинг и Хокингово зрачење

*Стивен Хокинг* био је енглески теоретски физичар, космолог и директор истраживања у Центру за теоријску космологију на Универзитету у Кембриџу. Његови научни радови укључивали су сарадњу са Роџером Пенрузом о теоремама гравитационог сингуларитета и теоретском предвиђању да црне рупе емитују зрачење. Показао је да црне рупе не настају само услед колапса звезда већ и услед колапса других висококомпресованих региона простора.



*Хокингов лет у посебно модификованом авиону компаније Zero Gravitati Corporation*

Хокинг је први поставио теорију о *космологији* која обједињује општу теорију релативности и квантну механику. Почео је да формулише *квантномеханичку теорију гравитације*, која би гравитацију повезала с друга три основна типа силе (слабом нуклеарном, јаком нуклеарном и електромагнетном интеракцијом).

Још давне 1971. године, Хокинг је показао да хоризонт догађаја класичне црне рупе не може никада да се смањи, временом може само да се повећава или да остане константан. Црна рупа, наизглед нарушава други закон термодинамике, с обзиром да када материја доспе у црну рупу она јој повећа масу, а самим тим и њено гравитационо привлачење и хоризонт догађаја.



Ако црна рупа има ентропију мора имати температуру, а ако има температуру мора емитовати зрачење. Али, како црна рупа може да одашиље честице ако по њеној самој дефиницији ништа не може да побегне из подручја хоризонта догађаја? Одговор лежи у квантној теорији.

Честице које емитује црна рупа не потичу из хоризонта догађаја већ из његове непосредне близине. На пример, ако је пар честица-античестица настао у близини хоризонта догађаја, а само једна је унутар њега, тада црна рупа ефективно емитује топлотно зрачење. Године 1974. Хокинг долази до изванредног резултата да црне рупе могу емитовати топлотно зрачење, названо *Хокингово зрачење*. Испаравањем (Хокинговом радијацијом) црна рупа се смањује. Тиме она постаје све топлија, температура расте и црна рупа свој крај бележи праском тј. експлозијом.

У периоду од 1970. до 1974. Хокинг и његови сарадници доказали су Вилерову хипотезу познату као „без-длака” теорију. Једном када материја доспе у црну рупу, очувани су само маса, угаони момент и електрично наелектрисање.

## 6.2. Информациони парадокс

Један од најзанимљивијих аспеката проучавања црних рупа је тзв. *информациони парадокс*. Информације у црној рупи „нестају“, а то се противи квантној механици и научној чињеници да се информације не могу уништити.

Квантно стање материје која уђе у црну рупу се разликује од квантног стања енергије која бива емитована као последица Хокинговог зрачења. Ако црна рупа испарава кроз Хокингово зрачење, поставља се питање шта се дешава са информацијом садржаном у материји која је пала у црну рупу. Ово питање је предмет интензивних истраживања и дискусија међу физичарима.

Црне рупе имају невидљиве љуске хоризонта. Како је *Џејкоб Бекенштајн* показао, количина информације коју црна рупа чува, потпуно неочекивано не расте са њеном запремином, већ са површином љуске коначног хоризонта. Током несхватљиво дугог временског периода, црна рупа би испаравајући нестала, заједно са свим информацијама које носи у себи, а универзум би потпуно заборавио све о објектима који су у црну рупу упали.

Холанђанин *Герард Хофт* је показао да материја која упада у црну рупу може интераговати са коначним хоризонтом и тако оставити информацију о себи на површини љуске што ће утицати и на начин на који црна рупа испарава.

Физичар *Хуан Мартин Малдацена* је својим холограмским поимањем свемира показао да би квантна теорија поља на 2D сфери, која је граница нашег универзума, у случају пројекције на унутрашњи 3D простор, за последицу имала спонтано појављивање гравитације.

Уколико се ова замршена теорија допуни са *теоријом струна*, могуће да смо на трагу решења једног од највећих проблема, мирења квантне теорије поља и опште теорије релативности.



“Ах, Боже мој. Ја бих се могао затворити у орахову љуску, па се и даље сматрати краљем бескрајног простора..”, Хамлет, В.Шекспир

## 7. Велики хадронски сударач LHC

*Велики хадронски сударач (LHC)* је највећи и најснажнији акцелератор честица на свету, изграђен под окриљем Европске организације за нуклеарна истраживања (CERN). Систем акцелератора честица у CERN-у повезан је тако да снопови честица прелазе из једног акцелератора у други, а сваки следећи акцелератор убрзава честице до већих енергија. Последњи и највећи акцелератор у низу је LHC.

LHC је прстенаст акцелератор честица који је направљен, првенствено, ради стварања Хигсових бозона, недостајуће карике, у то време, у стандардном моделу физике честица. Изграђен у тунелу испод швајцарско-француске границе, има укупну дужину од 27 километара, и убрзава протоне и антипротоне који се крећу у два ротирајућа снопа супротних смерова, у циркуларним вакуумским цевима брзином до 99,9999991% брзине светлости.



Део LHC тунела

На три локације дуж прстена, снопови убрзаних честица се двополним и четворополним магнетима фокусирају у високоенергетске сударе, креирајући услове упоредиве с онима који су владали у унивезуму делић секунде након Великог праска, кад је температура била већа од милион милијарди степени. Трагове прскања честица у овим силовитим, директним сударима бележе милиони сензора наслаганих попут мини-лего блокова у огромним детекторима, попут ATLAS детектора и компактног мионског соленоида CMS.

ATLAS i CMS су два универзална детектора дизајнирана да истражују широк спектар физичких феномена, укључујући Хигсов бозон, тамну материју и суперсиметрију. Оба детектора су кључна за откривање нових честица.

LHCb је специјализован за проучавање асиметрије између материје и антиматерије кроз анализу честица које садрже *b-kvarkove*. Овај експеримент има за циљ да објасни зашто је свемир претежно сачињен од материје, а не од антиматерије.

ALICE је дизајниран за проучавање кварк-глуонске плазме, стања материје које је постојало непосредно након Великог праска. Овај експеримент користи сударе тешких јона, као што је олово, како би реконструисао услове раног свемира.



CMS детектор

## 7.1 Могућност стварања црних рупа у LHC-у

Једно од најважнијих достигнућа LHC-а је откриће Хигсовог бозона 2012. године, што је потврдило стандардни модел физике честица. Ово откриће је значајно, јер Хиггсов бозон даје масу другим честицама.

Питање могућности стварања црних рупа у LHC-у често изазива интересовање и забринутост јавности.

*Микро црне рупе* су фасцинантни ентитети, чије постојање још није потврђено експериментално. Црне рупе су класично решење Ајнштајнове опште теорије релативности, где екстремна закривљеност простора и времена доводи до формирања хоризонта догађаја из којег ништа, па ни светлост, не може побећи. Када се ове идеје примене на квантну механику, предвиђа се могућност постојања микро црних рупа са масама знатно мањим од звезданих црних рупа.

Чак и један једини протон-антипротон пар убрзан скоро до брзине светлости и смрскан у моћном акцелератору честица формирао би црну рупу, ако би тај судар концентрисао довољно енергије у довољно мали волумен.

Била би то сићушна црна рупа, нема сумње, са краткотрајним постојањем, јер би одмах испарила кроз емисију Хокингове радијације.

Сударачи честица су као микроскопи чију резолуцију ограничава гравитација, пошто би изазивала формирање црне рупе кад год превише повећамо енергију покушавајући да завиримо у све мање растојање. У том тренутку, додавање још енергије би произвело већу црну рупу уместо даљег повећавања увеличавајуће моћи судараца. И одатле страх.

Једна од најзанимљивијих теорија која предвиђа постојање микро црних рупа долази из хипотеза о додатним димензијама. Према овим теоријама, наш свемир може имати више од три просторне димензије, што би могло смањити Планкову скалу енергије на нивое достижне у савременим акцелераторима честица као што је Велики хадронски сударац у CERN-у. Ове додатне димензије омогућиле би стварање микро црних рупа при сударима честица са енергијама знатно мањим од класичних предвиђања.



*Нумеричка симулација микро црне рупе у Макс Планковом Институту*

Све студије су закључиле да, чак и ако би се микро црне рупе створиле, оне не би представљале никакву опасност, јер би брзо испариле кроз Хокингово зрачење, за мање од секунд, готово тренутно по настанку. Иначе, детектори у LHC-у бележе трагове честица насталих у сударима.

Ако би се микро црна рупа формирала, њен брзи процес испаравања ипак би оставио траг тј. специфични сигнал који научници могу детектовати. Тај сигнал је вишак енергетских честица које се емитују из једне тачке, карактеристичне за квантно испаравање. До сада, ниједан експеримент није пронашао доказе о стварању таквих црних рупа, што поставља додатна ограничења на теорије о новим димензијама.

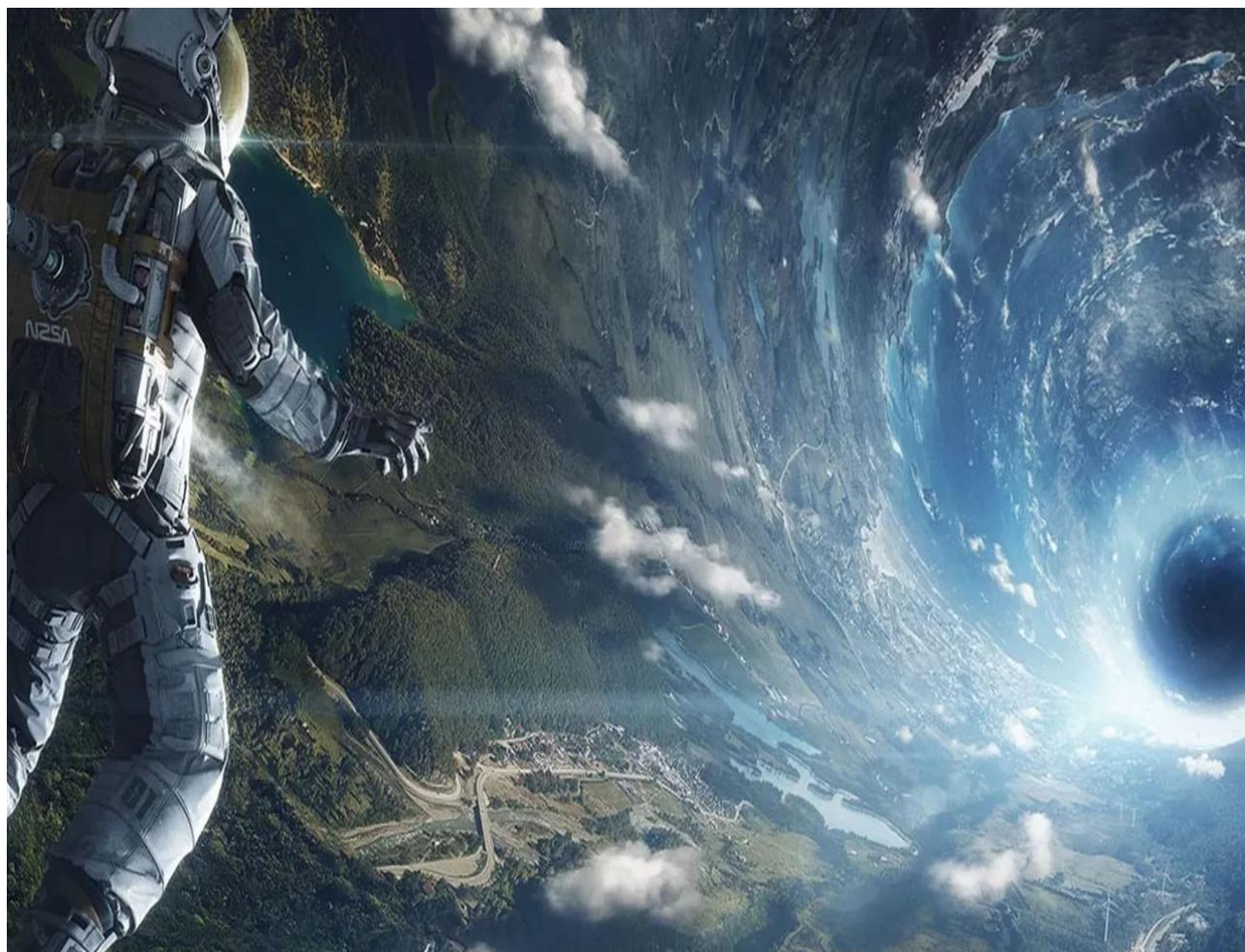
Поред тога, природни космички зраци који константно бомбардују Земљу постижу енергије далеко веће од оних у LHC-у, а не производе опасне црне рупе и не представљају претњу. Јавне забринутости о могућности стварања црних рупа које би могле "прогутати" Земљу су неутемељене према тренутним научним сазнањима.

Гравитација се, изгледа, шали са дубоко укорјењеном идејом да је архитектура физичког света сређен систем сложених љуски које можемо огулити једну по једну док не стигнемо до фундаменталне најмање компоненте. Гравитација и простор-време вероватно поседују антиредукционистички елемент. Дакле, на којој микроскопској мери се физика честица без гравитације претвара у физику честица са гравитацијом? Или, другачије речено, која би била цена да се испуни Хокингов сан о стварању црних рупа?



## 8. Црне рупе у популарној култури

Црне рупе су нашле своје место и у популарној култури, од научно-фантастичних романа до холивудских филмова. Примери укључују филмове попут "*Event Horizon*" и "*Interstellar*", који истражују путовање кроз црвоточине и црне рупе; као и серије попут "*Star Trek*"-а. Ова остварења, иако често базирана на фантазији, помажу у популаризацији научних концепата и шире интерес за астрофизику.



У снимању филма *Interstellar* учествовали су астрофизичари и софтверски инжењери. Филм се темељи на Ајнштајновим једначинама опште теорије релативности

## 9. Закључак

Црне рупе представљају кључни аспект модерног разумевања свемира и физике гравитације. Њихова историја, од теоријских предвиђања 18. века до савремених посматрања, показује како се наука развија и даје одговоре на најдубља питања о природи свемира.

Број откривених црних рупа стално расте с напретком технологије. Узимајући у обзир све методе детекције, можемо рећи да је откривено *неколико стотина* црних рупа до сада. Ово укључује директне детекције путем електромагнетних посматрања и индиректне детекције путем гравитационих таласа. Међутим, то је само мали део укупног броја црних рупа у универзуму, јер многе од њих остају невидљиве.

Микро црне рупе, црвоточине, беле рупе или неки други теоријски облици егзотичне материје, нова су перспектива у нашем разумевању простора и времена, као и закона природе. Брже путовање кроз простор, путовање кроз време, сусрет са паралелним универзумима или можда највећи човеков сан о бесконачном животу, измаштани ће чекати науку, док наш свемир наставља своје путовање кроз таму.



## Литература

- Милан С. Димитријевић, Александар С. Томић, Астрономија за IV разред гимназије, Београд, 2005. године
- Наташа Каделбург, Весна Рапаић, Физика 3 - уџбеник за трећи разред Математичке гимназије, Београд, 2011. године
- Fred Adams, Gregory P. Laughlin „The Five Ages of the Universe“, 1999
- Brian Cox, Jeff Forshaw „Black Holes: The Key to Understanding the Universe“, 2023
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_hole](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole)
- <https://science.nasa.gov/universe/black-holes>
- <https://www.britannica.com/science/black-holes>
- <https://www.astronomy.com/science/black-holes>
- <https://elementarium.cpn.rs>
- <https://commons.wikimedia.org>
- <https://www.opsteobrazovanje.in.rs/astrofizika/crna-rupa>
- <https://www.livescience.com/physics-mathematics/stephen-hawking>
- <https://www.ligo.org/detections/GW150914.php>