

Математичка гимназија
Београд

Матурски рад
из астрономије
Тамна материја и тамна енергија

Ментор:
Проф. Слободан Спремо

Ученик:
Павле Ђорђевић IVЦ

Београд, мај 2020.

Садржај

Увод	2
Тамна материја	3
1 Има горе нечег тамног	3
2 Што више видимо то више не знамо	4
3 „Знам да ништа не знам“-Сократ	6
3.1 Исто а опет другачије-ротациона крива	6
4 Невидљива тама	9
4.1 Савитљива светлост	10
4.2 Отворена ватра	12
5 Топло-хладно	14
6 У ком жбуну лежи зец?	14
6.1 МАЧО	14
6.2 ВИМП	15
6.3 АКСИОН	16
6.4 Калуз-Клајнова теорија	16
6.5 Гравитон	17
7 Можда јесте, а можда ипак није...	18
Тамна енергија	19
8 Као векна хлеба	19
9 Једном давно	20
10 Како је осећамо?	22
10.1 Требаће нам мало свећа!	22
10.2 Путовање кроз време	24
11 Црно да црње не може бити...	27
12 Адреса и контакт телефон- где их можете пронаћи	28
Закључак	30
Литература	31

Увод

Свемир, космос, васиона или универзум, све су то називи које су људи смислили за бесконачно прстранство у коме се ми налазимо. То је простор који је испуњен са свиме што видимо када погледамо у небо. Сачињен од празног простора и разних небеских тела као што су звезде, планете, сателити, планетоиде, комете, метори, црне рупе и неутронске звезде, свемир је толико велики да је просто немогуће да замислимо чега тамо негде све има. Због тога постоји објашњење за свемир које се може узети и као његова дефиниција: „Свемир је све што је икад постојолао и све што ће икада постојати“. Астрономија је наука која се развија од првих људи који су погледали у небо и која ће се увек развијати. У њој константно долазимо до нових невероватних открића која мењају наша схватања о Универзуму и показују нам колико тога још не знамо и не разумемо. Са порастом наших сазнања расту и наша питања. На тај начин у астрономији полако долазимо до нових открића али тиме и постављамо још више нових.

Када погледамо у ноћно небо ми видимо неке светлеће објекте. То може представљати било шта од звезда до галаксија и скупова галаксија удаљених од нас и више од неколико хиљада светлосних година. Али између тих светлећих објекта се налази нека тама. Поставља се питање да ли је та тама само празан простор или се у њој ипак нешто крије што ми још увек не можемо да видимо и осетимо.

Овај рад се састоји из два дела: тамне материје и тамне енергије. Иако су ово две велике теме о којима и даље не знамо много, покушаћемо да представимо начин на који смо дошли до њиховог открића, како сигурно знамо да постоје, али и претпоставке које би могле бити објашњење шта су оне уствари.

Желимо да ове две нове велике теме прилбжимо на занимљив начин и представимо их свакоме ко жели да сазна нешто више о овим открићима астрономије, али и подстаћи свакога да погледа барем једном у небо и запита се чега све то горе има?

Тамна материја

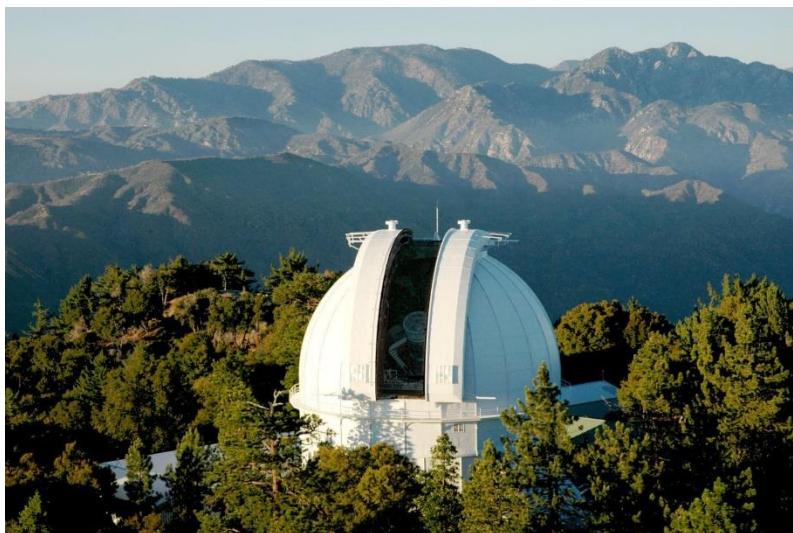
1 Има горе нечег тамног

Иако је нама појам тамне материје у том облику у коме га користимо данас познат од релативно скоро, ако га поредимо са старошћу астрономије, научници су појам тамне материје користили и раније за неке ствари у свемиру које су предалеко, које су претамне или једноставно које су нама невидљиве из било ког другог разлога. Можда први који је покушао да уведе и дефинише појам тамне материје био је Лорд Келвин. Податак до ког је дошао својим проценама јесте да је маса, наше галаксије Млечни пут, заправо много већа од масе које се добија сабирањем маса свих звезда које ми видимо. Ту се изводи можда и први забележен закључак који нас је увео у ову тему, и он гласи како је рекао Лорд Келвин 1884. године: “многе наше звезде, можда велика већина њих, могу бити тамна тела”. Након њега и француски научник Анри Поенкаре у свом делу “Млечни пут и теорија гасова” објављеном 1906. године, користи појам “тамна материја” или на неким местим забележено и као “нејасна материја”. Он у свом раду оставља отворено питање које је проистекло из тога да ако знамо да је животни век Сунца релативно кратак, зар не бисмо ли очекивали да видимо већу количину тамне материје у облику мртвих звезда. Тек данас можемо приметити да је тада тамна материја значила тамна материја у буквалном смислу: област на небу којој недостаје светлости и за коју су научници претпостављали да је сачињена од тамних тела. Такође, могу се приметити и разни други погрешни закључци до којих су тада научници долазили, а као један од таквих можемо споменути да се до пре отприлике 100 година мислили да је наша галаксија једина галаксија у целом Универзуму. Међутим, иако су њихове процене и прорачуни били са данашње тачке гледишта другачији од онога што данас знамо о тамној материји, Лорд Келвин и Анри Поенкаре представљају веома значајну преокретницу у даљем

истраживању бесконачног простора у коме се налазимо, јер представљају прве научнике који су приметили да горе постоји и нешто што не видимо, нешто што не знамо шта је, и да је то нешто заправо нешто а не ништа [1-3].

2 Што више видимо то више не знамо

Почетком XX века свет добија велику лупу која је уперена ка бесконачном небу око нас, са којом још увек у том тренутку нисмо могли ни да претпоставимо до каквих ћемо открића доћи. Наиме, у опсерваторији планине Вислон која се налази у Калифорнији, 1919. године је постављен највећи телескоп до тада у историји човечанства, чији је пречник износи 100 инча. Неколико година пре тога, 1908. године је постављен у том тренутку највећи телескоп на свету пречника 60 инча, али ипак, револуционарна открића су направљена са већим.



Слика 1: Хукер телескоп и опсерваторија на планини Вилсон у САД-у

Тих година забележене су маглине на небу, које су научници назвали небуле и један од главних циљева почетком истраживања било је да се сазна шта заправо оне представљају. Један од ангажованих научника у том истраживању био је амерички астроном Едвин Хабл.

Посматрајући забележене фотографије, Хабл је приметио да постоје пулсирајуће звезде које се зову Цефеиде. Њихов значај је у томе што имају променљиву луминозност. Светлост коју добијамо од њих је променљива због пулсирања, а нама та појава омогућава прецизно мерење удаљености тих звезда [1-3]. Оно што је Хабл приметио рачунајући њихову удаљеност је да су те звезде много далеко да би биле унутар Млечног пута. Постављено је питање: како је то могуће ако смо ми једина галаксија која постоји? Овај податак је у том тренутку представљао огроман шок и у исто време откриће. С обзиром да су нааучници тада знали колика величина наше галаксије, Хабл је закључио посматрајући удаљене маглине да су оне 900 000 светлосних година далеко изван Млечног пута, те стога не припадају нашој галаксији, већ је то део неке друге галаксије. На крају се испоставило да небески објекти за које смо тада знали да су маглине унутар наше галаксије, заправо представљају на милионе и милионе нових галаксија. Та прво откривена галаксија названа је Андромеда и она представља нама најближу галаксију [4,5]. Едвин Хабл иако није имао велику улогу у директном испитивању тамне материје, са овим открићем он свету „открива“ Универзум и приближава нам га више него што смо могли да замислимо.

Захваљући открићима до којих је дошао Хабл, научници после њега добијају огромну количину нових података и информација које је потрбно изучити. Након њега, на историјску сцену тамне материје ступа америчко-швајцерски научник Фриц Цвики, често у литератури називан и као „отац тамне материје“. Наиме постојала је претпоставка, као што је већ наведено на почетку рада, да се маса целог Универзума састоји у највећој мери од звезда, али 1933. године Цвики је истраживао велики скуп галаксија Кома¹ и дошао до сазнања да постоји велико одступање од онога што смо звали теоријом и онога како заправо јесте [5-7]. Просечна брзина самих галаксија које се налазе унутар кластера зависи од укупне масе кластера, а разлог за то је што сваку галаксију привлачи гравитација свих осталих галаксија. На основу посматране брзине галаксија које се крећу унутар јата Кома, Цвики успева да израчуна његову укупну масу. Затим је помоћу све светлости која је долазила из галаксија у кластеру израчунао масу која је

¹ Скуп Кома представља скуп галаксија која се још називају и галктичким јатима и представљају структуре које садрже од неколико стотина до неколико хиљада галаксија и које су повезане гравитацијом и највероватније и тамном материјом. Само још неке од познатих галактичких јата су скуп Вирго, скуп Фрорнакс и скуп Херкулес. Више галактичких јата се могу груписати и тиме формирати суперјата.

добијена из било каквих објекта који емитују светлост. Податак до кога је дошао је да маса добијена из брзине галаксија је око десет пута већа од масе јата коју је добио из светлосне снаге. Одавде он закључује да скуп галаксија Кома мора садржати огромну количину невидљиве материје, које омогућава галаксијама да се држе на окупу и да имају ту брзину, чиме би се надокнадила та невидљива материја. Ову материју Цвики званично назива „тамна материја“ и са њим започиње „проблем“ тамне материје.

3 „Знам да ништа не знам“-Сократ

Након Фрица Цвикија коначно смо дошли до званичних података да тамо горе нешто постоји. Од тог тренутка на даље већина научника је сигурна да се горе налази нешто што ми не знамо шта је, али и даље постоји група њих који су скептични. Иако у том тренутку једино што смо знали о тамној материји је да постоји, сама спознаја да тамо горе нешто постоји што не знамо шта је, је од огромног значаја, али ипак, за сада баш као и Сократ: „Знамо да ништа не знамо“. У наредном делу ћемо приказати начине на које су научници, после Цвикија, долазили до потврда да тамна материја заиста постоји.

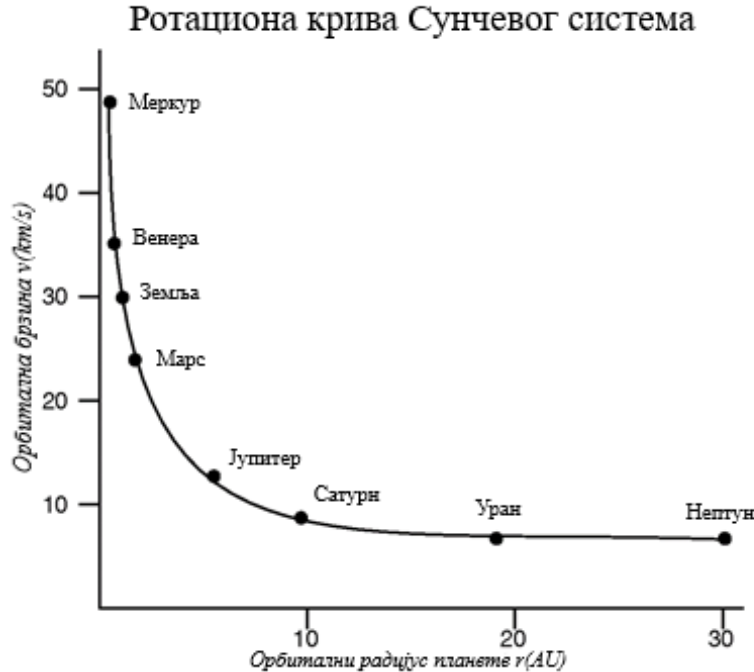
3.1 Исто а опет другачије-ротациона крива

Посматрајући Сунчев систем увиђамо ротациону криву која опада. Наиме, зато што се највише масе у нашем Сунчевом систему налази у центру, односно тамо где је Сунце, брзина планета опада како се удаљавамо од њега, што је и математички логично. До тог прорачуна је дошао Јоханес Кеплер и он гласи:

$$v = \sqrt{GM/r}$$

где је v брзина објекта у Сунчевом систему, G гравитациона сила, M маса објекта и r удаљеност објекта од Сунца.

На основу овог примера научници посматрајући спиралне галаксије², где се највише звезда налази ближе центру, у почетку су очекивали да по истом принципу орбитална брзина објекта у галаксијама опада како се удаљавамо од центра.



Слика 2: Ротациона крива Сунчевог система

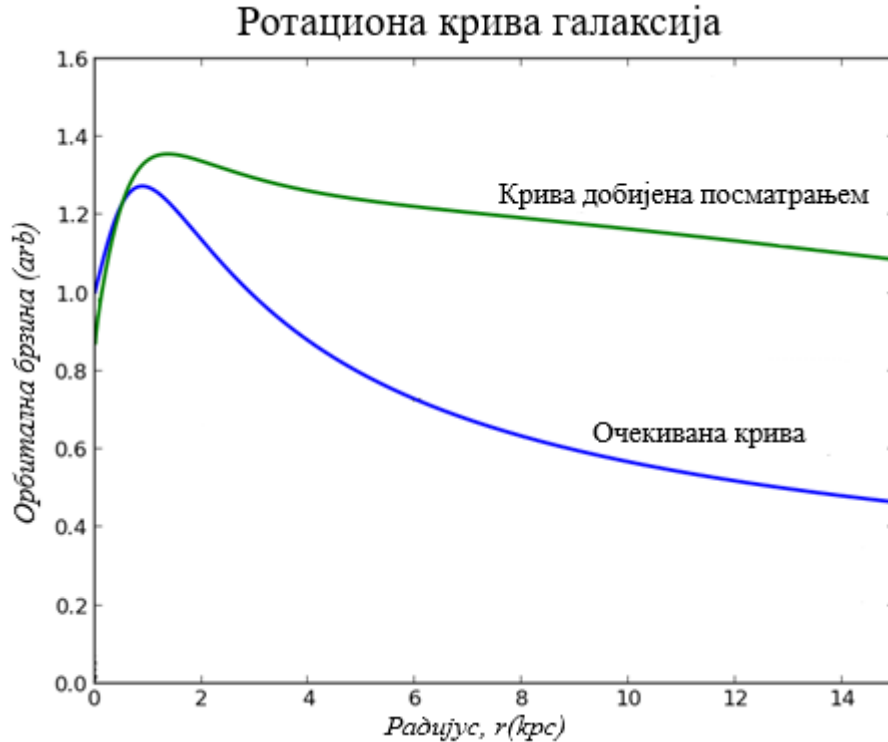
Крајем 1970-их појављује се научница Вера Рубин, која уз помоћ научника Кента Форда, прави доплерове опсервације орбиталних брзина у спиралним галаксијама. Начин на који су долазили до брзине галкесије је у том тренутку већ био познат [3,5,6]. Наиме, ако је диск галаксије нагнут према нама, као посматрачима, звезде са једне стране нам се приближавају, док се оне звезде које се налазе на другој страни диска, удаљавају од нас. Код звезда које се крећу ка нама, оне као извор светлост, емитују светлост код које се таласна дужина смањује, и тиме се приликом посматрања спектрометром, та светлост помера ка плавом крају спектра. Када се извор светлости од нас одмиче, таласна дужина се повећава, па се самим тим и помера ка црвеном крају спектра. Ово представља Доплеров ефекат, а промена таласне дужине пропорционална је брзини извора светлости у односу на посматрача.

² Спиралне галаксије представљају један од типова галксија које имају спиралну структуру сачињену од звезда, гасова и прашине образујући диск.



Слика 3: Галаксија Млечни пут као пример спиралне галаксије

Оно што је открила је било потпуно неочекивано. Звезде које су се налазиле далеко од центра галаксија, на крајевима репова галаксија, су се кретале истом брзином као и оне звезде које су много ближе центру. То је било веома чудно јер видљива маса галаксија није била довољно велика да би се све звезде кретале толиком брзином. Из тога је уследио закључак да се у спољним областима галаксија мора налазити огромна количина неке невидљиве материје у којој она позната чини релативно мали део. Вера Рубин и Кент Форд су након једног испитивања, проучавали још преко 60 нових спиралних галаксија и увек су долазили до истих закључака. Да би се све звезде у галаксијама кретале том брзином, потребно је готово десет пута већа маса од оне видљиве [7,8]. Иако су многи научници након Фрица Цвикија били скептични по питању тамне материје, Вера Рубин је својим истраживањем открила уверљиве доказе да Цвикијева тамна материја постоји.



Слика 4: График зависности орбиталне брзине од радијуса где је:

- 1) плава линија-очекивана крива на основу посматрања Сунчевог система
- 2) зелена линија-крива која се добија посматрањем објекта у галаксијама

4 Невидљива тама

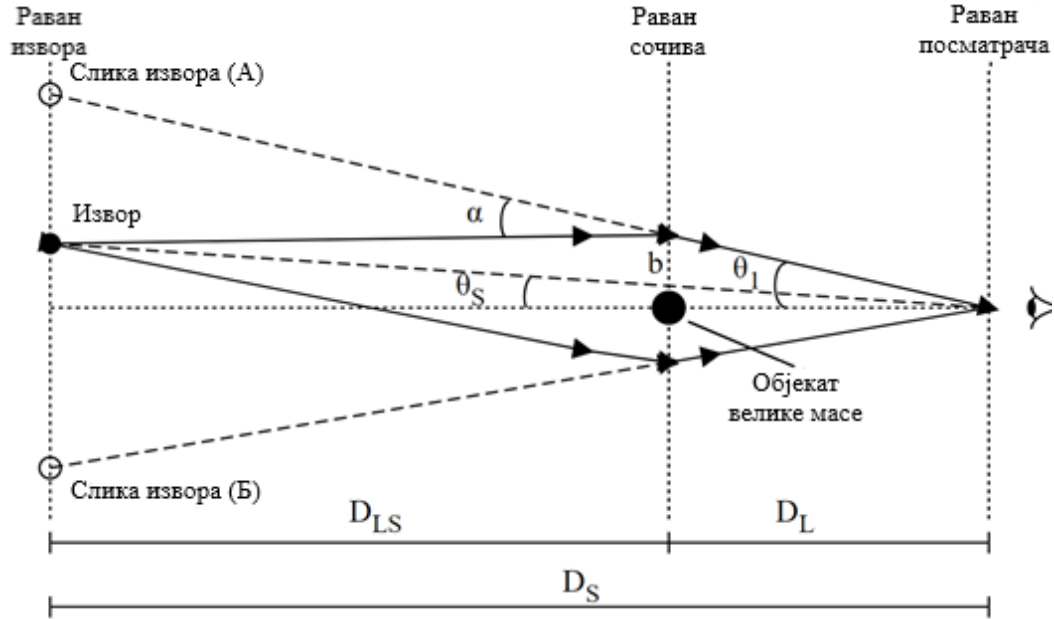
После Вере Рубин и њених прорачуна, можемо рећи да је теорија да горе нешто постоји, дефинитивно тачна. После ње, ово откриће и већ нова теорија пушта корене у астрономији и подстиче много већу групу научника да се бави истраживањем ове теме. След догађаја из све веће заинтересованости за ову тему био је пре свега све већи број доказа да она постоји али и претпоставка шта би она могла да буде. У наредном делу рада представићемо неке од тих доказа.

4.1 Савитљива светлост

Према Ајнштајновој општој теорији релативности велике масе попут: планета, звезда, галаксија и кластера, савијају простор. Једна од последица Ајнштајнове теорије је да гравитација на одређени начин савија и пут светлосног снопа који ми можемо да детектујемо. То би значило да велики масивни предмети могу искривити слику удаљеног извора светлости на начин који подсећа на слику коју можемо добити лупом. Овај ефекат се у астрономији назива гравитационо сочиво и данас представља једно од најзучаванијих подручија у модерној космологији.

Наиме, научници траже места у свемиру на којима се налази огроман скуп галаксија, које су релативно близу, и које се налазе између Земље и неких далеких извора попут светлих галаксија и квазара³. Када научници проуче добијене слике извора, може се израчунати колико је тај кластер који савија светлост масиван. Затим, када су добили масу објекта који стоји између нас и извора, научници могу израчунати масу из видљиве материје. Тиме се заправо добија велика разлика у масама истог објекта, која је само још један доказ да постоји нешто што ми називамо тамна материја и које има много више пута него обичне, барионске материје. Космолози су одавде само још једном закључили да су кластери, као скупови галаксија, а и саме галаксије сачињене од огромне количине тамне материје, које у неким случајевима има чак и преко 10 пута више од обичне материје.

³ Квазари су нама најсјајнији и најудаљенији познати астрономски објекти. Налазе се у центру неких галаксија и верује се да своју огромну енергију добијају од масивних црних рупа у центру галаксија где су квазари детектовани.

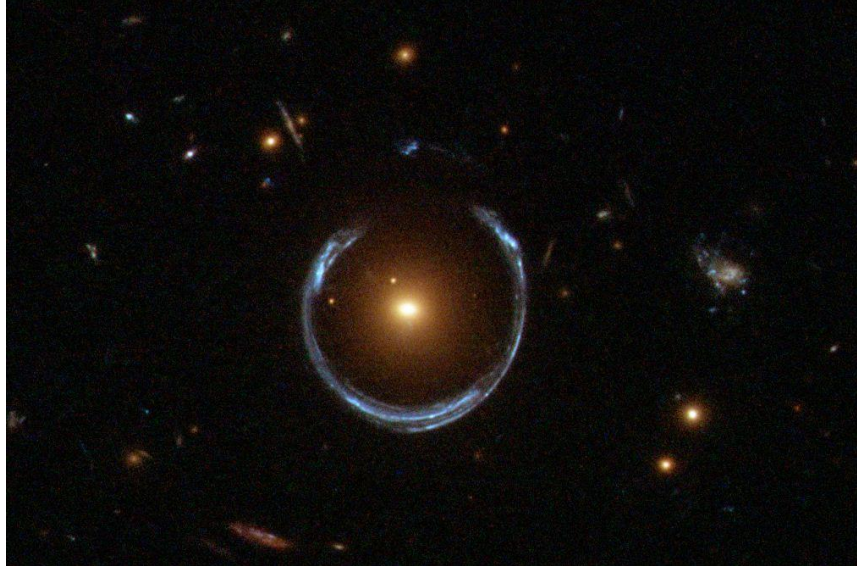


Слика 5: Шема Ајнштајновог гравитационог сочива

На шеми Ајнштајновог гравитационог сочива, (Слика 5) видимо на који начин функционише приказ извора који се налази иза објекта велике масе. Он својом масом савија светлост чиме добијамо две слике извора (А и Б).

Уз помоћ телескопа Хабл⁴ који је заслужан за разне, широкој маси, најпознатије фотографије Универзума, успео је да визуелно забележи бројне примере гравитационог сочива. Само један од специфичних примера у коме се не виде само две слике извора већ се прави извор иза кластера огромне масе поставио тако да формира готово савршен круг (Слика 6). Овај редак пример се назива и Ајнштајнов прстен [3, 5-8]. Међутим, оно што се такође дешава је да се појављује и по неколико идентичних објеката за које научници тек после неког дужег времена открију да су то заправо слике једног истог објекта који се уопште не види, али помоћу шеме на Сlici 5 могу прецизније одредити где се тај објекат тачно налази.

⁴ Телском Хабл-добио је име у част астронома Едвина Хабла и као захвалност његовом доприносу нашем разумевању и гледању неба изнад нас. Лансиран је 1990. године и од тада констатно прави нова открића због којих упознајемо Универзум све боље.



Слика 6: Пример Ајнштајновог прстена забележеног телескопом Хабл

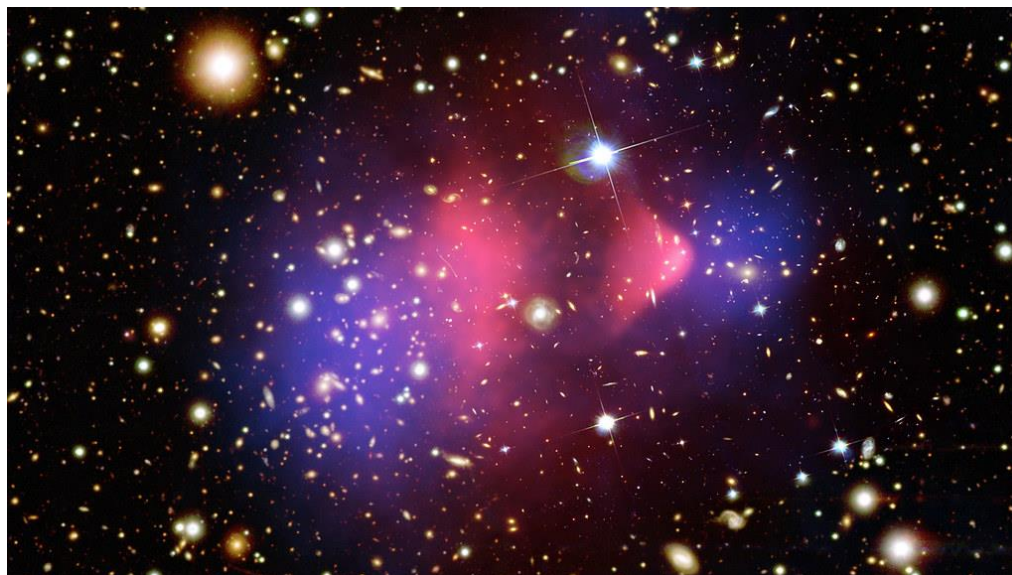
4.2 Отворена ватра

Један од најдинамичнијих догађаја у свемиру представља Метак јато (*engl. The bullet cluster*). Наиме галаксије се састоје од свега 2% звезда и негде између 5-15% гаса и плазме. Сва остала маса коју ми измеримо на начине које смо објаснили у претходном делу рада је заправо тамна материја. Метак јато представља судар галаксија. У том судару веома ретко се дешава да се сударају звезде, али зато долази до интеракције гаса и плазме унутар галаксија. Оне заједно интерагују кроз гравитацију као и кроз електромагнетно трење, а оно што се очекује од тамне материје је да не дође до судара већ да само прођу право корз другу галаксију великим брзинама [4-7]. Приликом судара, плазма унутар галаксија емитује радијацију у опсегу X-зрака, а звезде емитују инфрацрвену светлост. Уз помоћ примене сочива успели смо да детектуемо положај гасова унутар метак јата, који је на Слици 7 представљен црвеном бојом. Питање које се поставље је: шта се дешава са тамном материјом?

Гравитациона сочива галаксија иза метак јата нам веома помажу при томе да одредимо масу унутар њих. Склапајући све добијене податке, научници долазе до закључка да је највећа концентрација масе, самим тим и тамне материје, просторно у највећој мери одвојена од центра масе осталих барионских честица. Објашњење за ово јесте да су

научници практично сигурни да оно што видимо посматрањем метак јата је заправо барионска и тамна материја које реагују на другачије начине приликом судара.

Начин на који то објашњавају је следећи. Када се сударе два јата, галаксије у најчешћим случајевима наставе да се крећу, а гас значајно успори. Као што смо већ рекли, највећи део барионске материје у галаксијама су плазма и гасови, а оно што је забележено је да се њихова брзина приликом судара смањи. Након 100 милиона година, овај однос брзина и даље остаје, док притом сама маса галаксија, попут звезда, је све даља од центра судара. Тиме се и очекује, по Ајнштајновој теорији релативности, да тамо где има највише материје, у овом случају тамо где је гас и плазма, је и гравитација већа. Уместо тога, склапањем свих података које научници имају, дошли су до закључка да је материја највише сконцентрисана око галаксија. Одатле закључују да на крајевима галаксија, у овом случају целог судара мора постојати и нека друга материја сем звезда, планета и нама осталих познатих небеских објеката [3,7]. Научници тврде да је за ово једино могуће објашњење тамна материја и да је ово један од најчвршћиих доказа да она заправо постоји, јер мора постојати огоромна количина масе која ће све држати на окупу.



Слика 7: Метак јато забележено телескопом Хабл

5 Топло-хладно

Иако још увек не знамо шта је тамна материја, научници претпостављају да постоје две врсте тамне материје. Прва је топла тамна материја: материја код које се честице крећу веома великим релативистичким брзинама, то јест брзинама приближним брзини светлости. Пример овакве честице је неутрино који има малу масу, слабо интерагује и учествује у гравитацији. Друга тамна метрија би била хладна тамна материја и њена карактеристика је то што се њене честице крећу мањим брзинама од брзине светлост [7,8]. Без обзира на то што је подела тамне материје направљена, научници су више наклоњени идејама да је тамна материја честица велике масе а мале брзине, хладна тамна материја.

6 У ком жбуну лежи зец?

Још са првим доказима да тамна материја постоји, почело је да се поставља питање шта би она могла да буде. Наравно, прво што је научницима пало на памет била је материја попут камења, топлих гасова, хладни неутрални водоник,... Међутим са сваком таквом претпоставком долазило се на крају до закључка да то не може да буде та врста материје. Јер приликом дифузије топлог гаса дошло би до отпуштања X-зрака, које би ми могли да детектујемо, хладни неутрални водоник се види у абсопционим линијама квазара, а обично камење или прашина у себи садржи метале које ми можемо да детектујемо. У наредном делу рада ћемо укратко представити неке од главних кандидата тамне материје.

6.1 МАЧО

МАЧО честице (*engl. MACHO, Massive compact halo objects*) су заправо назив за све објекте од најмањих звезда до најмасивнијих црних рупа. Ови објекти представљају једне од првих кандидата за тамну материју. Састављени су од обичне барионске материје, попут протона, неутрона и електрона. У њих спадају црне рупе, неутронске звезде, смеђи

патуљци,... Астрономи детектују МАЧО објекте користећи гравитационе ефекте светлости удаљених објеката, која се савија на различите начине. Испитивањем ових објекта, научници су дошли до прорачуна да је максимум 15-20% тамне материје сачињено од ових честица [9-12]. Детекција је често тешка јер објекти који се највише у овом случају траже, а то су смеђи и бели патуљци, емитују врло мало светлости или у неким случајевима не емитују уопште. Разлог за њихову слабу или готово никакву видљивост је Ајнштајнова теорија релативности и појава гравитационих сочива, која је приказана у претходном делу рада. Међутим иако ова невидљива, али материја коју можемо детектовати, чини никада више од 15-20% тамне материје, маса ових објекта и даље није довољна како би надоместила толико масу Универзума коју ми не видимо. Шта би онда још тамна материја могла да буде?

6.2 ВИМП

ВИМП честице (*engl. WIMP, Weakly interacting massive particle*) су хипотетичке честице које су скроз супротне од барионских честица за које ми знамо. Оне би интераговале са гравитацијом и било којим другим slabим силама, без губитка снаге, што би на крају објаснило толико невидљивог у Универзуму.

Ако би ВИМП честице постојале, научници су уз помоћ математичког моделирања дошли до податка да би морало да их буде око пет пута више од материје коју ми познајемо, и тиме би се та материја поклопила са количином тамне материје у Универзуму коју ми детектујемо. Замишљене су као веома масивне честице које слабо интерагују, само са собом или неким другим облицима масе. Притом, имале би масу знатно већу масу од протона. Пошто су толико масивне, оне би биле како се у астрономији каже „хладне“, што би значило да је брзина тих честица знатно испод брзине c . Једна од могућности за ове честице су у почетку били неутрини, који представљају слабо интерактивне честице али које нису масивне, па због тога не могу бити ВИМП честице [2,9,10]. Поред тога неутрини се крећу веома великим брзинома, мало испод брзине c .

Постоји доста експеримената који се и даље воде у циљу детектовања оваквих честица. Такође постоје експерименти који траже тамну материју на Земљи. За детекцију тамне

материје користи се велики акцелератори честица, а о једном ће бити речи у наредном делу рада. Али, постоји могућност да ће се на крају испоставити да су ВИМП честице само још један део тамне материје или можда чак да оне уопште и не постоје, па ће тако остати само хипотетичке. ВИМП честице се узимају за најбољег кандидата тамне материје јер као честице представљају и своје античестице и део су теорије суперсиметрије која већ постоји.

6.3 АКСИОН

АКСИОН (*engl. AXION*) представља још једну хипотетичку честицу. То су честице мале масе, које су споро покретне и имају веома слабе интеракције са другим материјама, због чега се веома тешко детектују, али то није и немогуће. АКСИОН честице решавају дуготрајне проблеме у нуклеарној физици и могле би да буду објашњење која стоји иза тога шта је то тамна материја. Задовољавају два критеријума која су потребна за тамну материју: 1) нерелативистичка количина АКСИОН-а може бити присутна у нашем Универзуму у довољној мери да објасни густину и количину тамне материје и под 2) приликом судара не долази до никаквих промена, што би значило да су једине њихове интеракције дугог домета гравитационе.

АКСИОН експеримент познатији и ако АДМХ (*engl. ADMX, Axion Dark Matter Experiment*) представља аксионски халоскоп који користи веома јака магнетна поља, која претварају тамну материју у фотоне које можемо детектовати [5,6,11]. У току је АДМХ Г2 експеримент који предводи Министарство енергетике САД-а, а у току су припреме за још нових истраживања. За овај експеримент користе се велики магнети, микроталасне шупљине и ултра-осетљива електроника са веома ниским нивоом буке.

6.4 Калуз-Клајнова теорија

Теорија Калуз-Клајн⁵ је изграђена на основу постојања невидљиве пете димнзије која је увијена у простор поред три нама просторне компоненте: висина, ширина и дубина, и

⁵ Калуз-Клајнова теорија (*engl. The Kaluza-Klein theory*) настала је хипотезом Теодора Калуза 1919. године коју је 1926. године Оскар Клајн подупрео квантном интерпретацијом.

четврте компоненте, времена. Ово је претеча теорије струна, која предвиђа постојање честица чија маса може бити чак од 550 до 650 протона, и такве би могле да представљају честице тамне материје. За ову честицу знамо да би могла интераговати и са електромагнетном и са гравитационом силом, па се по томе разликује од осталих у великој мери. Пошто овакву честицу не можемо детектовати само посматрањем, за њено детектовање и мерење морамо користити снажне машине. То су веома снажни акцелератори честица попут Великог хадранског сударача⁶, који судара честице тако да можемо да их измеримо. Судари су толико јаки да се честице претворе у неутрине и фотоне.

Пошто тамна материја интерагује са обичном материјом путем слабих нуклеарних сила, она при тој интеракцији оставља трагове судара тих великих честица [6,12,17,18]. Претпоставља се да се тамна материја може понашати као што се понашају неутрини, јер као и тамна материја, неутрини не интерагују са обичном материјом сем индиректно. Због тога се научници надају да ће можда Великим хадронским сударачом доћи до честица тамне материје.

6.5 Гравитон

У комбинацији опште теорије релативности и суперсиметрије предвиђа се постојање честице која се зове гравитино. Суперсиметрија објашњава много појава у физици, а једно од њих је да све честице имају „суперпартнера“, као што фотон има фотин. Претпоставља се да када би гравитино био суперпартнер гравитона, за кога се сматра да поседује силу гравитације, код неких модела супергравитације гравитино би био веома лаган и могао би да представља тамну материју.

Данас научници из истраживачког центра Макс Планк развијају нови модел који би представљао новог кандидата за тамну материју: супертешки гравитино. Основа развитка супертешког гравитина јесте то што гравитино представља веома лаку честицу, али више то није случај. Ова нова хипотетичка честица би имала много већу масу, али

⁶ Велики хадрански сударач (*eng. LHC, Large Hadron Collider*) [14] представља највећи и најснажнији акцелератор честица на свету и налази се у ЦЕРН-у (*fra. CERN, Conseil européen pour la recherche nucléaire*). Изграђен је са циљем да одговори на многобројне претпоставке и питања која поставља физика, а само једно од њих је постојање тамне материје.

оно што је још битније, интераговала би са нормалном материјом путем других сила. Јер оно што изазива највише проблема јесте то што тамна материја интерагује само путем гравитације, међутим ове честице би интераговале и електромагнетно са обичном материјом. Ова честица би била 10 квантилиона пута тежа од протона и неутрона.

Када би се испоставило да ова хипотетичка честица постоји било довољно имати једну честицу на $10\,000\text{ km}^3$ и тиме би се могло објаснити постојање тамне материје. Оно до чега се долази овом теоријом је да ако супертешки гравитини заиста постоје, они би оставили неке трагове на нашој земљи јер интерагују са обичном материјом путем електромагнетних сила и јаким нуклеарних сила [1,7,14]. Тако би ове честице оставиле трагове јонизације у стенама, али би био проблем разликовати их од других честица. За сада ово остаје само још једна хипотетичка честица.

7 Можда јесте, а можда ипак није...

Наравно, када су у питању нова открића која још увек нису у потпуности доказана, често постоји група научника која тврди да заправо то нешто није тако као што мислимо да јесте. Наиме неки астрономи покушавају да негирају чињеницу да тамна материја постоји, постављајући постулат који се зове МОНД (Модификована Њутнова динамика). Идеја која се заступа иза овог постулата јесте да се гравитација понаша потпуно другачије када су у питању много веће размере, а та разлика у понашању гравитације на различитим скалама представља објашњење за изглед ротационе криве галаксије, коју приписујемо тамној материји [2,9-13]. Иако МОНД има научнике који овај постулат подржавају и постоји објашњење за ротационе криве неких галаксија, тренутна верзија МОНД-а не може објаснити кретање материје у много великим структурама, попут кластера па неки научници сматрају да у овом тренутку уопште није валидно разматрати ову још увек непотпуну теорију.

Тамна енергија

8 Као векна хлеба

Већ је у овом раду више пута споменут научник од изузетног значаја у астрономији, Едвин Хабл. Он је још пре готово једног века открио да се Универзум шири тиме што је показао да се галаксије удаљавају једне од других брзином која је одређена Хабловим законом:

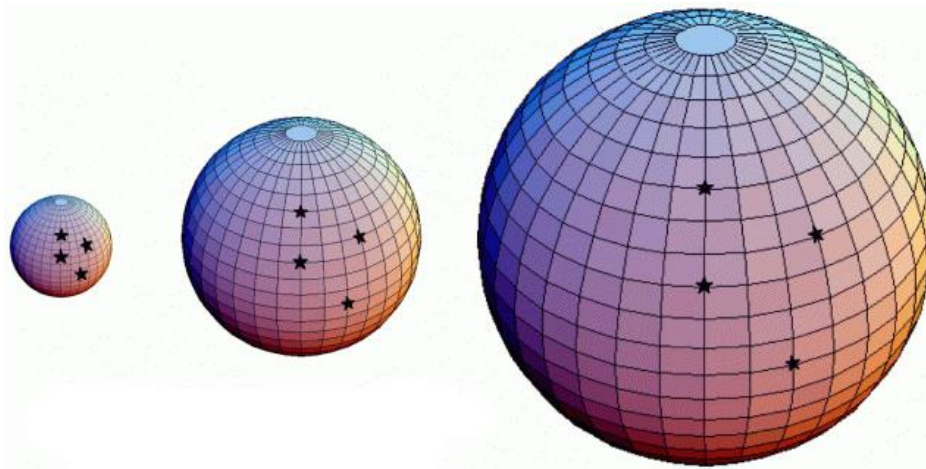
$$v = H * r$$

где v представља брзину галаксије у односу на нас, H представља Хаблову константу⁷ и r удаљеност од Земље.

Хаблова константа нам даје савршену слику универзума који се шири. По Хабловом закону ако узмемо галаксију која је од нас удаљена тачно 1 Мрс она ће се удаљавати од нас брзином од 70 km/s, али ако бисмо узели галаксију удаљену од нас тачно 100 Мрс она ће се од нас удаљавати тачно 100 пута већом брзином. Тако да нам Хаблов закон на веома добар начин даје објашњење на који начин се Универзум шири и на који начин се објекти удаљавају једни од других, Слика 8.

Сличност која се често употребљава да би се боље објаснио Хаблов закон је и векна хлеба која у себи садржи грожђице. Наиме током печења хлеба свака грожђица која се налази у хлебу се удаљава од друге. Међутим, иако се овим примером може разумети на који начин се шири Универзум, овај пример се не може у потпуности узети као валидано објашњење јер у векни хлеба постоји центар, а у Универзуму не.

⁷ Хаблова константа износи око 70(km/s)/Мрс. Најчешће се изражава у (km/s)/Мрс што нам даје брзину галаксије у km/s која је удаљена 1 Мрс = $3,09 * 10^{19}$ km



Слика 8: Визуелни приказ којим се може објаснити Хаблов закон

На врло великим скалама, Ајнштајнова теорија релативности предвиђа одступања од линеарног Хабловог закона. Када се промени количина и врста масе коју посматрамо, мења се и брзина рецесије, познатија и као црвени помак. Односом црвеног помака и растојања, које можемо добити Хабловим законом, можемо добити колика количина материје утиче на црвени помак, и колико ту има утицаја тамна материја. Неколико деценија касније научници су вршили експерименте посматрајући Универзум и дошли до одговора који ћемо представити у наредном делу рада.

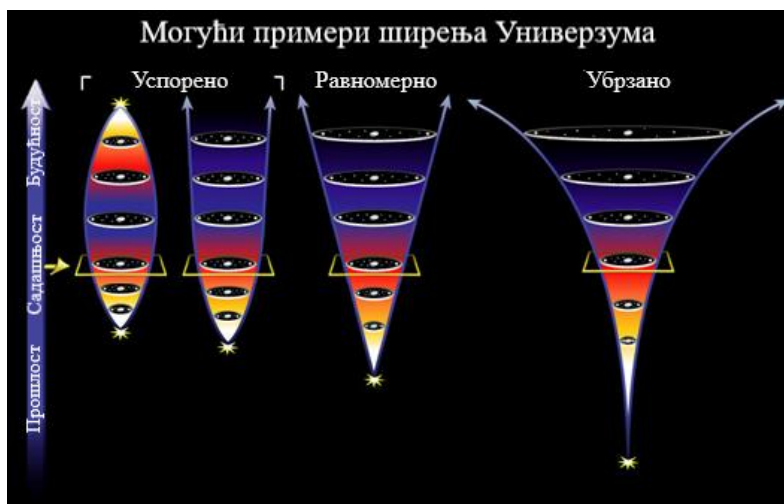
9 Једном давно

Све ово, почело је још са Великим праском⁸ пре око 13,7 милијарди година. На почетку је постојала веома врућа и густо сабрана материја, која се у једном тренутку проширила у свим правцима. Отприлике после 100 секунди након Великог праска, температура Универзума пада за 1 милијарду степена К. Тек након 380 хиљада година, Универзум се довољно охладио како би се протони и неутрони скупили и формирали неку прву материју. Међу елементима који су први настали били су литијум, хелијум и водоников изотоп деутеријум. Пошто је на почетку живота у Универзуму било толико протона, водоник,

⁸ Велики прасак у физичкој космологији представља научну теорију о пореклу Универзума и ширењу простора и материје.

као најлакши елемент са само једним протоном, настаје у највећој мери. У том тренутку, према истраживањима НАСА агенције⁹, водоник чини готово 95% атома Универзума а преосталих 5% је у највећој мери хелијум [7,13]. Након 200 милиона година од Великог праска формирају се прве звезде и тиме настају и остали нама познати елементи, који у том тренутку чине само 1% укупне материје Универзума. Оно што знамо јесте да приликом Великог праска настаје и тамна материја која је представљена у првом делу рада, али као што смо већ приказали не можемо одредити у ком облику је тамна материја постојала од самог почетка живота нашег Универзума, јер још увек не знамо шта би она заправо била.

Иако као што смо већ рекли, тамна материја је откривена још 1930-их година, тек пре око 30 година научници су открили да свемир садржи још нама нешто много чудније и непознатије од тамне материје. Начин на који смо дошли до новог открића непознатог је тако што смо почели да постављамо питања попут: Да ли постоји довољно тамне материје да би се свемир распршио на све стране? Или, питање које је још интригантније: Да ли постоји довољно тамне материје да би ширење Универзума преокренуло свој смер, што би проузроковало да се Универзум уруши сам у себе? Да ли се Универзум уопште шири или се скупља? Како се и како ће се у будућности развијати Универзум?



Слика 9: Сви могући модели(исходи) ширења Универзума

⁹ НАСА-Национална ваздухопловна и свемирска администрација(engl. *National Aeronautics and Space Administration*) је агенција која је одговорна за цивилни део свемирског програма САД-а, али поред тога задужена је и за истраживањима у областима ваздухопловства и астрономије. Основана је 1958. година и представља један од најзначајнијих извора истраживања у астрономији вођених у историји човечанства.

На Слици 9 видимо све могуће исходе живота Универзума, од Великог праска па све до сада и како ће се ширити на даље. Прве две могућности би биле успорено ширење Универзума то би значило да ће се у једном тренутку зауставити са својим ширењем или се неком силом поново сабити и вратити на почетак, тамо где смо били пре 13,7 милијарди година. Друга могућност би била да се Универзум шири и да ће се ширити равномерном брзином у будућности. Трећа могућност би била убрзано ширење Универзума и на први изглед најмање вероватна могућност.

10 Како је осећамо?

У наредном делу рада покушаћемо да укратко објаснимо и представимо начин на који су научници дошли до открића и шта би ова енергија која покреће Универзум могла да буде.

10.1 Требаће нам мало свећа!

Релативно скоро, 1998. године основан је тим чији је једини циљ био посматрање Супернове¹⁰. Већ следеће године представљени су подаци коју су показали неочекиване податке. Универзум се ширио. Ова истраживања водили су тројица научника: Адам Рис, Брајан Шмит и Сол Петматер¹¹.

Да би научници утврдили шта ће се десити са Универзумом и на који начин ће се он ширити користили су Супернове. Разлог за коришћење ових звезда али искључиво Супернових типа Ia(Слика 10) је тај што ове звезде, све до једне, експлодирају на исти начин, при чему сагоре исту количину горива, испуштајући исту количину енергије током истог времеског периода, и при свему томе емитују исту количину светлости. Због оволике количине подударности између сваке од њих оне нама могу служити као нека

¹⁰ Истраживачки тим за супернове (*engl. High-Z Supernova Search Team*) [17,18] представља интернационалну сарадњу између астронома, која је покренута са циљем одређивања на који се начин Универзум шири.

¹¹ Група тројице америчких научника која је 2011. године добила Нобелову награду за физику због доказа да се Универзум шири убрзано.

врста мерила у бесконачном Универзуму, и такви објекти називају се „стандардне свеће“. Оне се користе за прорачуне удаљености и најдаљих галаксија Универзума.



Слика 10: Супернова типа Ia G299

Стандардне свеће својом правилношћу научницима веома олакшавају прорачун, пошто све супернове типа Ia имају исту јачину светлости, што је она даља ми ћемо је видети слабије, што је ближа ми ћемо је видети светлије. Након мерења јачине њихове светлости, коју ми видимо, можемо лако израчунати њихову удаљеност од нас. Међутим постоји још један начин на који можемо израчунати нашу удаљеност од неких галаксија а то је помоћу брзине њиховог удаљавања [2,6,15]. Као што је Хабл већ показао, Универзум се шири, и његовим законом смо видели да објекти који су даље од нас заправо се још брже удаљавају од нас, за разлику од оних ближих. Тако да мерењем брзине удаљавања галаксије од нас, помоћу црвог помака, можемо лако одредити и на овај начин колико је галаксија удаљена од нас.

Проблем до ког су научници дошли је да су упоређујући два добијена резултата посматрањем исте галаксије, добили да брзина исте галаксије није иста у оба прорачуна. Постављају се две претпоставке: или наше супернове нису довољно добре стандардне свеће, или наше схватање у мерењу брзине космоса није довољно добро. Испоставило се да су супернове типа Ia савршене стандардне свеће. Одавде се закључује да су галаксије удаљеније него што би њихова брзина, добијена мерењем њихове јачине светлости, то показала. За ово није постојало друго објашњење сем позивање на космолошку константу. Ово откриће представља први непосредни доказ да постоји нека одбојна сила која прожима цео Универзум и супротставља се гравитацији. Закључак је да постоји енергија која доводи до убрзаног ширења Универзума, које представља објашњење за различите јачине црвеног помака посматраних супернова типа Ia. Одговор за ту силу био је тамна енергија.

10.2 Путовање кроз време

Од како су се фотони ослободили, Универзум се проширио за фактор 1000 али се и космичко позадинско зрачење охладило за фактор 1000, а сви фотони коју су тада, на почетку Великог праска, чинили видљиво светло сада имају 1000 пута мање енергије. Они сада предствалају само микроталасе, из чега је настао назив „Космичко микроталасно позадинско зрачење“ (*engl. CMB, Cosmic Microwave Background*). Занимљиво је то што ако овако наставимо, за неких 50 милијарди година од сада астрофизичари ће писати о космичком радио-таласном зрачењу.

Постојање КМПЗ¹² је предвидео амерички физичар руског порекла Џорџ Гамов са колегама, још 40-их година прошлог века. Његова идеја је проистекла из једног од радова белгијског физичара и свештеника Жоржа Леметра. Њему се, као што је Фрицу Цвикују придато уз име „отац“ тамне материје, додаје и „отац“ космологије великог праска. Гамов предлог на основу процене постојања КМПЗ-а је да је Универзум својевремено био много топлији, и да се тиме може одредити физика раног Универзума [16]. Међутим 1948. су се појавила двојица научника, Ралф Алфер и Роберт Херман, који су проценили колака би треба да буде температура космичког позадинског зрачења. Њихова процена

¹² КМПЗ-Космичко микроталасно позадинско зрачење

је била вредност температуре од 5 К. Ипак иако су дошли до неке температуре, та вредност није тачна. Данас знамо да је тачно измерена температура тих микроталаса 2,725 К.

КМПЗ сасвим случајно први пут опажају 1964. године амерички физичари Арно Пензиас и Роберт Вилсон. Тих година иако су сви знали за постојање микроталаса, скоро нико није имао технологију којом би их детектовао. Међутим тада у компанији *Bell Telephone Laboratories* развијају антену управо због те намене. Ова двојица научника су били физичари и њихов циљ ни у једном тренутку није било детектовање космичког микроталасног позадинског зрачења, већ само отварање новог канала за комуникацију компаније *AT&A*. Оно што су они радили јесте да су спроводили експеримент и од својих података су одузели све познате земљске и космичке изворе сметњи које су могли да идентификују. Иако после одбијања свих тих сигнала, део њих и даље није нестајао. Када су погледали тањир антене приметили су да се на њему угнездили голубови, и можда на први поглед уклањање и чишћење тањира би довело до коначног решења, након чишћења, сметње су се донекле смањиле али не и у потпуности. Због овог необјашњеног вишка антенске температуре они су написали и рад¹³.

Неколико година касније, тим физичара под вођством Роберта Дикија, правио је детектор наменски за детекцију КМПЗ али постојао је проблем јер нису имали довољно средстава. Када су сазнали за рад двојице физичара који су дошли сасвим случајно до неких неправилности за које нису знали шта је у питању, они одмах имају одговор на то. Вишак антенске температуре, као и сигнал који је долазио из свих смерова на небу се апсолутно уклапа у све прорачуне вођене до тада.¹⁴ Након ових открића 2006. године Џон Малтер и Џорџ Смут добијају Нобелову награду за снимање КМПЗ-а дуж широког распона спектра, чиме целој космологији дају звање прецизне и експерименталне науке.

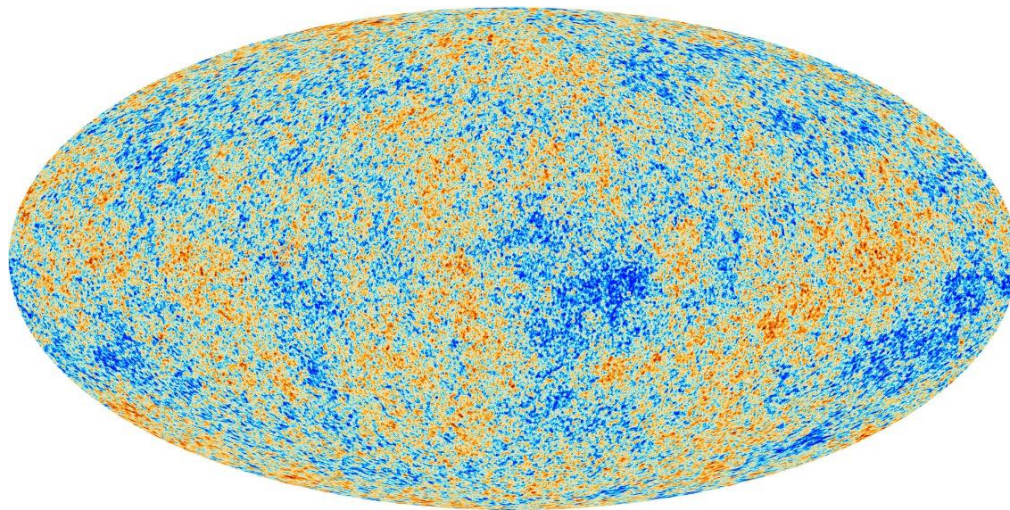
Ако детаљно мапирамо добијене податке космичког позадинског зрачења видећемо да није у потпуности равномерно. Постоје неке тачке које су мало топлије а неке које су мало хладније од просека. Проучавањем ових промена у температури КМПЗ-а, односно

¹³ А. А. Пензиас и Р. В. Вилсон су написали рад који је објављен 1965. године у *Астрофизичком* журналу под оригиналним насловом „*A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*“.

¹⁴ Због својих открића Пензијас и Вилсон 1978. године добијају Нобелову награду из физике.

можемо рећи и проучавањем структуре површине последњег расејања, можемо извести каква је била структура и састав материје у раном Универзуму.

Данас, ми делимично знамо распрострањеност материје по нашем свемиру, видимо оближње галаксије, њихова јата и суперјата. Међутим да би утврдили како су сви ти системи настали нама је најбољи извор информација космичко позадинско зрачење које нам омогућава да путујемо уназад кроз време.



Слика 11: Приказ добијен мапирањем космичког позадинског зрачења

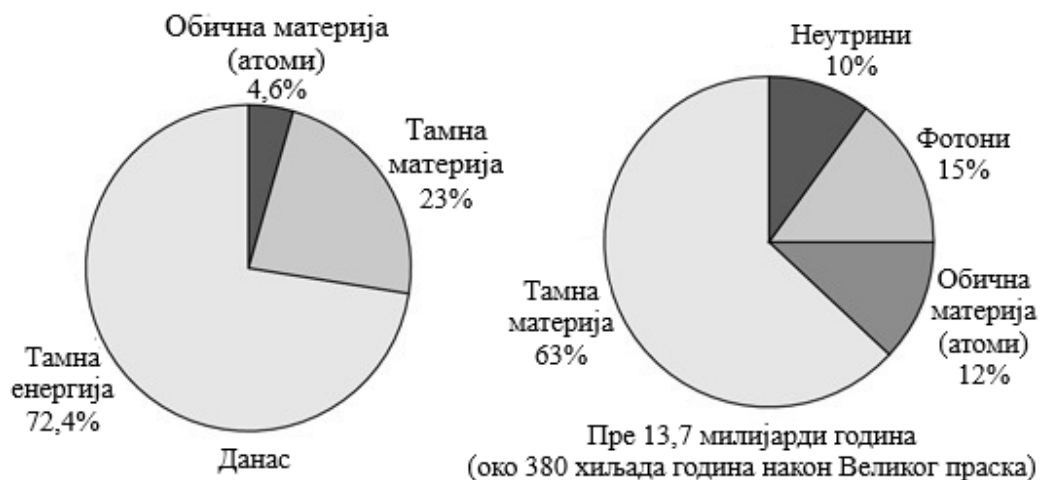
На Слици 11 видимо космичко микроталасно позадинско зрачење, забележено од стране Европске свемирске агенције (*engl. ESA, European Space Agency*) Планковим телескопом 2013. године. На слици се може приметити различитости у боји које представљају различите варијације температуре које успевамо да детектујемо посматрајући КМПЗ [15,16]. Ова слика, која представља детаљану и прецизну мапу космичког микроталасног позадинског зрачења, космологију претвара у савремену науку.

Ови подаци нам објашњавају све основне карактеристике космоса. Па тако ако упоредимо варијације величина и температура топлих и хладних области, можемо да изведемо колико је тада била јака сила гравитације и колико се брзо таложила материја, формирајући разне структуре. Одавде можемо да изведемо колико се постоји обичне материје, тамне материје али и тамне енергије и тиме онда утврдимо да ли ће се Универзум ширити заувек.

Откриће КМПЗ-а је од невероватне важности, јер нам пружа сазнање о постајању тамне енергије које је све више, али нам оно представља темељ космологије на коме сада можемо да базирамо наша нова сазнања и закључке.

11 Црно да црње не може бити...

Као што смо представили у досадашњем делу рада, пронађени су разни начини за детектовање тамне материје и тамне енергије, а најзначајнији начин нашег сазнања о њиховом развоју током историје Универзума је посматрање космичког микроталасног позадинског зрачења. Његовим анализирањем добијамо да 85% материје у универзуму је материја за коју не знамо шта је и називамо је тамном материјом. Међутим поред те тамне материје, постоји и тамна енергија. Ако у размену састава Универзума убацимо и тамну енергију добићемо податак да тамна енергија чини ~73%, тамна материја ~23% а обична материја чини отприлике свега 5% масе Универзума. На Слици 12 видимо приказ састава Универзума данас и пре 13,7 милијарди година, отприлике 380 хиљада година након Великог праска када су елементи почели да се формирају. Оно што видимо је да процентуално, количина обичне материје, опада док је тамне материје све више. Данас такође, баш у овом тренутку Универзум се шири, па је тако тамне енергије данас више него јуче.



Слика 12: Приказ састава Универзума данас и пре 13,7 милијарди година

12 Адреса и контакт телефон-где их можете пронаћи

У поглављу 6 овог рада под називом: У ком грму лежи зец?, представили смо само два места на којима се ради на открићу ових честица. Заправо у овом истраживању учествују истраживачи и истраживачке станице широм света. Да би детектовали тамну материју потребна је да истраживачка станица буде далеко од космичког зрачења, под земљом. Зато се сензори постављају дубоко у земљи да не би дошло до померања атома приликом експеримента. Оно што преостаје у овој врсти експеримента је да се чека да нека честица тамна материје удари у неки атом и направи неку врсту померања коју ће забележити веома осетљиви сензори. На оваквим врстама истраживања раде разни пројекти а само једни од њих су ХЕНОН и ДАМА/ЛИБРА, ЦДМС,...

Други начин посматрања је из свемира. Наиме, верујемо да када би се честице тамне материје судариле, произвеле би нешто што би могли да видимо, на пример гама зраке. За то је задужен ФГТС телескоп (*engl. FGTS, Fermi Gamma-ray Space Telescope*) који је усмерен да посматра нашу галаксију и прати да ли ће доћи до било које реакције.

Још један начин на који покушавамо да детектујемо тамну материју, већ споменут у претходном делу рада, јесте тако што ћемо је сами направити. На овој врсти експеримента ради Велики хадронски сударац у Церну, који судара протоне са великим брзинама и посматра да ли ће се при судару емитовати неке честице, на пример ВИМП честице [9,10,14].

На посматрању тамне енергије је задужено више телескопа истовремено широм света који посматрају делове Универзума. Телескопи праве фотографије након чега се упоређују фотографије истих делова, на којима се на основу интензитета сјаја звезда показује да се универзум шири. Такође у току је истраживање са Спектроскопским инструментом тамне енергије (*engl. DESI, Dark energy Spectroscopic Instrument*) који се састоји од 5000 оптичких влакана, где свако делује као мини телескоп. То омогућава телескопу да снима светлост од 5000 различитих галаксија и тиме тачно измери њихову удаљеност помоћу светлости. За сада је забележио објекте који су удаљени 10 милијарди светлосних година што значи да према томе видимо 10 милијарди година у прошлост. Још један телескоп у свемиру који детектује тамну енергију је Х-зрак телескоп (*engl. XRT, X-ray telescope*) који се налази у Земљиној атмосфери [2,7,17,18].

Тамна материја и тамна енергија

Као што се може видети на откривању ове две таме нашег Универзума раде бројни телескопи и научници који воде разне експерименте широм света. Тако да ако приметите неку тамну материју или осетите неку тамну енергију, обратите се најближем астроному или астрономској станици.

Закључак

На основу овог рада можемо извести закључак да простор који ми видимо да је празан заправо није. Он је испуњен са три основне ствари. Прва од њих, нама за сада једино стварно позната, је обична материја која предстаља све од чега смо сви ми и све што можемо да видимо састављени. Она има своју гравитацију и интерагује са светлошћу. Друга ствар од које је сачињен Универзум је тамна материја која нама за сада представља мистериозну супстанцу која има своју гравитацију у много већој мери него обична материја али не интерагује са светлошћу на било који нама познат начин. Трећи део нашег Универзума је енергија, и то тамна. Она такође представља још једну мистерију нашег Универзума, која га прожима у сваком делу. Тамна енергија је непознати притисак у вакуму свемира који константно делује у смеру супротном од гравитације, изазивајући да се шири брже него што је ико могао да претпостави.

Утицај тамне материје је стваран, и то можемо да закључимо из разних открића која смо показали у овом раду, једино што не знамо какав је. Она се понаша тако да не интерагује путем јаке нуклеарне силе, такође не интерагује са електромагнетном силом. Знамо још да нити упија, нити емитује, а и не одбија или расејава светлост на било који начин. Међутим након свих ових година истраживања то је једино што знамо о њој.

Тамна енергија представља основну карактеристику космоса која испуњава цео наш Универзум. Оно што нама остаје, а и свим астрономима и астрофизичарима широм Универзума, је да водимо евиденцију о сваком детаљу који можемо да сазнамо захваљујући космичком позадинском зрачењу, јер у сваком тренутку сваки део Универзума је све даљи и даљи од нас. Због тамне енергије се постављају питања на која можда никада нећемо добити одговор, а то је: Да ли је нама, због тамне енергије, ускраћен приступ неким кључним странама целе космичке приче које представља наш Универзум и да ли ће нам ти неки делови Универзума који су сада удаљени од нас милијардама светлосних година, заувек остати непознати?

Надамо се да смо макар мало подстакли машту свакоме ко је пожелео да прочита овај рад и подстакли да постави себи питање: Шта је заправо та тама нашег Универзума?

Литература

- [1] Kristofer de Pri, Kosmos, Laguna (2017) [ISBN: 978-86-521-2361-2](#)
- [2] Karl Segan, Kosmos, Vulkan (2019) [Isbn: 9788610029130](#)
[ISBN:978-86-80328-07-2](#)
- [3] G. Bertone and D. Hooper, A History of Dark Matter, FERMILAB-PUB-16-157-A. (2016) ,
[DOI: 10.1103/RevModPhys.90.045002](#)
- [4] Erik Zackrisson, Introduction to Dark Matter, Excerpts from the Ph.D. Thesis Quasars and Low Surface Brightness Galaxies as Probes of Dark Matter ([Uppsala University 2005](#))
- [5] J. Primack, A Brief History of Dark Matter, University of California, Santa Cruz
https://kiss.caltech.edu/workshops/dark_matter/presentations/primack.pdf
- [6] Nil de Gras Tajson, Astrofizika za ljude kojima se žuri, Urban Reads (2017) [ID: A157529](#)
- [7] Nil de Gras Tajson, Smrt u crnoj rupi i druge kosmičke nevolje, McMillan (2016)
- [8] J. Primack, Dark Matter and Galaxy Formation, (2009) [DOI: 10.1063/1.3274198](#)
- [9] ENCYCLOPEDIA OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, [WIMPs and MACHOs](#)
- [10] B. D. Fields, K. Freese, D. S. Graf, Massive Compact Halo Objects Viewed from a Cosmological Perspective: Contribution to the Baryonic Mass Density of the Universe, New Astronomy, (1998) [UMN-TH-1620/98](#)
- [11] P. W. Graham, I. G. Irastorza, S. K. Lamoreaux, A. Lindner and K. A. van Bibber, Experimental Searches for the Axion and Axion-like Particles (2016) [doi: 10.1146](#)
- [12] Jeff Filippini, UC Berkeley Cosmology Group (August 2005)
http://cosmology.berkeley.edu/Education/CosmologyEssays/The_Cosmic_Microwave_Background.html
- [13] G. Baym, D. H. Beck, J. P. Filippini, C. J. Pethick and J. Sheltona, Searching for low mass dark matter via phonon creation in superfluid 4He, (2020) [arXiv:2005.08824](#)
- [14] G. Van Ekeren, G. St. Bernards School Secondary School Freshman Physics Course LARGE HADRON COLLIDER [What's the big deal anyway?](#)
- [15] Gravitational Lensing by Clusters of Galaxies, EVIDENCE FOR DARK MATTER, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA USA, NASA 2017, https://chandra.harvard.edu/xray_astro/dark_matter/index3.html

- [16] Ruth Durrer, Cosmology II: The CMB, dark matter and dark energy, Département de Physique Théorique et CAP Université de Genève Suisse, CERN Summer school July 26, 2017, <https://indico.cern.ch/event/634061/attachments/1476161/2333296/lesson2.pdf>
- [17] A. V. Filippenko, A. G. Riess, RESULTS FROM THE HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM, Phys.Rept. 307 (1998) 31-44 DOI: [10.1016/S0370-1573\(98\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00052-0)
- [18] J. L. Tonry, B. P. Schmidt, B. Barris ,et al Cosmological Results from High-z Supernovae The Astrophysical Journal, Vol 594 1, Carroll (2001) <http://www.livingreviews.org/Articles/>
- [19] Dark Energy Instrument's Lenses See the Night Sky for the First Time – Lawrence Berkeley National Laboratory, 4/3/2019
- [20] M. E. Levi & L. E. Allen, The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), Astro2020 APC White Paper, <https://arxiv.org/pdf/1907.10688.pdf>
- [21] DESI Collaboration, Aghamousa, A., et al., “The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design,” (2016) [arXiv:1611.00036](https://arxiv.org/abs/1611.00036)
- [22] J. Guy DESI The Dark Energy Spectroscopic Instrument, (LPNHE/Paris) Moriond Cosmology, March 2016