



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ
ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТМАН ЗА ФИЗИКУ



Дистрибуција и детекција тамне материје у космосу

- дипломски рад -

Ментор:
Проф. др Душан Мрђа

Кандидат:
Александра Божиловић

Нови Сад, 2021.

Овим путем желим да се захвалим свом ментору проф. др Душану Мрђи на великој помоћи, бескрајном стрпљењу и разумевању приликом израде овог рада.

Захваљујем се својој породици и пријатељима који су увек били уз мене и пружали ми подршку и помоћ.

Садржај

УВОД.....	4
1 ВИДЉИВА И НЕВИДЉИВА МАТЕРИЈА	5
1.1 Кратак историјски увод	5
1.2 Потрага за тамном материјом.....	6
1.3 Ротационе криве галаксија	7
2 УДЕО ЗВЕЗДАНЕ МАТЕРИЈЕ У КОСМОСУ	11
3 ИДЕЈЕ О САСТАВУ ТАМНЕ МАТЕРИЈЕ.....	14
3.1 Појединачне честице.....	14
3.2 Компактни објекти.....	15
4 ДЕТЕКЦИЈА ТАМНЕ МАТЕРИЈЕ.....	17
4.1 Директна детекција.....	17
4.2 Индиректна детекција	18
4.3 Пројекат CRESST	18
4.3.1 CRESST I фаза	19
4.3.2 CRESST II фаза	19
4.3.3 CRESST III фаза.....	21
4.4 Масена дистрибуција галаксије M31	21
5 МОДЕЛИРАЊЕ РОТАЦИОНЕ КРИВЕ ГАЛАКСИЈЕ И СИМУЛАЦИЈЕ УЗМАКА АТОМСКИХ ЈЕЗГАРА У ДЕТЕКТОРУ WIMP-ОВА	23
5.1 Ротационе криве галаксија (квантитативни приступ)	23
5.2 Симулација интеракције неутрона са CaWO_4 детектором као фонских догађаја за WIMP-ове	30
ЗАКЉУЧАК	33
ЛИТЕРАТУРА	34
БИОГРАФИЈА.....	35

Увод

Начини кретања објеката у свемиру не поклапају се увек са претходно створеним теоријским предвиђањима о њима. Овај јаз, између стварних и теоријски претпостављених резултата, премошћен је тако што је уведен појам тамне материје. Ова хипотетичка врста материје гравитационо интерагује са видљивом материјом у космосу, али сама не емитује нити апсорбује електромагнетно зрачење.

Данашње процене говоре нам да видљива материја чини само око 5% садржаја свемира, док остатак сачињавају тамна материја – око 26% и тамна енергија – око 69%. Постоје разне теорије о томе шта би тамна материја могла да буде, али ниједна још није поткрепљена јасним доказима.

У овом раду је планиран приказ актуелног стања у овој области, укључујући и методе детекције тамне материје, али и поједностављено моделирање ротационе криве спиралне галаксије, у циљу добијања одговарајућих квантитативних резултата. Такође, циљ је да се применом Монте-Карло симулација добије одговарајући спектар CaWO_4 детектора у интеракцији са космичким неутронима, имајући у виду да такви догађаји представљају фон, односно ометајуће догађаје за могућу детекцију честица тамне материје, тачније WIMP-ова (слабоинтерагујућих масивних честица).

1 Видљива и невидљива материја

1.1 Кратак историјски увод

Лорд Келвин, шкотско-ирски физичар, био је један од првих научника који је, крајем XIX века, покушао да процени број невидљивих („тамних“) тела у Млечном путу. Посматрао је и мерио дисперзију брзине кружења звезда око језгра галаксије, а ови подаци омогућили су му да процени њену укупну масу. Испоставило се да постоји разлика између масе коју је прорачунао и укупне масе звезда које можемо видети. На једном од својих предавања закључио је да „многе наше звезде, можда велика већина њих, могу бити тамна тела“.

Анри Поанкаре (Henri Poincaré), француски математичар и физичар, коментаришући идеје лорда Келвина у свом делу „Млечни пут и теорија гасова“ из 1906, експлицитно је искористио израз „тамна материја“, или на француском „matière obscure“.

Швајцарско-амерички астроном Фриц Цвики (Fritz Zwicky) вероватно је најпознатији пионир у области проучавања тамне материје. Када је 1933. године проучавао јато галаксија Кома, утврдио је да оно не садржи довољно видљиве материје да се одржи на окупу. Он је запазио да би осамсто галаксија које је издвојио требало да има дисперзију брзине од 80 km/s, међутим стварна вредност била је ближа 1000 km/s. Да се ове галаксије не би разлетеле, тј. да се јато не би у потпуности расуло, маса овог јата би морала да буде огромна.

Цвики је на основу добијених резултата у свом раду закључио: „Ако би ово било потврђено, добили бисмо изненађујући резултат да је тамна материја присутна у много већој количини од луминозне материје.“ Откриће Фрица Цвикија, међутим, није било нарочито цењено и остало је непримећено наредних 40ак година.

Као и други пре њега, Цвики је и претпостављао да се тамна материја састоји од ствари попут хладних звезда, других чврстих тела и гасова. Научна заједница до тада није имала убедљиве доказе да би ова недостајућа маса могла бити било шта друго.

Потрага за тамном материјом истински је почела тек 70-их година прошлог века када је америчка астрономкиња Вера Рубин открила сличан проблем са недостајућом масом, проучавајући ротационе криве спиралних галаксија, о чему ће детаљније бити речи у поглављима која следе. У најкраћим цртама, Рубин је открила да су се звезде у далеким спољним регионима ових спиралних галаксија кретале невероватно брзо, односно једнаким брзинама као и звезде близу галактичког центра, што је било противно свим прорачунима.

Њено откриће показало је да галаксије морају садржати око десет пута више „тамне“ масе него што се може објаснити видљивим звездама. Укратко, најмање деведесет посто масе у галаксијама, па самим тим и у космосу, је невидљиво и неидентификовано.

Током 1970-их година, и други научници су, упркос почетном скептицизму, потврдили ове налазе. Откриће је подстакло постепену промену у начину на који је тамна материја замишљана. Више на њу није гледано само као на неоткривене хладне звезде и чврста тела, већ као на материјал који сачињава већину универзума.

1.2 Потрага за тамном материјом

Велики део материје у свемиру је невидљив и не емитује електромагнетно зрачење, али се присуство овог облика материје може препознати преко њеног гравитационог утицаја на видљиву материју. Проучавања јата галаксија и ротационих кривих галаксија пружају доказе о постојању ове такозване тамне материје.

Густина материје у свемиру ρ може се проценити из посматрања кретања појединих галаксија. Обично се ρ даје у јединицама такозване критичне густине ρ_c .

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

ρ_c означава критичну густину тако да је за $\rho > \rho_c$ универзум затворен, тј. гравитациона интеракција је довољна да обрне ширење универзума у сажимање. G означава гравитациону константу, H је Хаблова константа.

$$H = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1},$$

где $0.4 < h < 1$

Дакле, критична густина је дата са

$$\rho_c = 2 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}$$

Космолошка густина $\Omega \equiv \rho/\rho_c$ одређена из динамике јата у суперјата галаксија је

$$0.1 \lesssim \Omega \lesssim 0.3$$

Посматрања путем сателита InfraRed Astronomy Satellite (IRAS) дају

$$0.25 < \Omega < 2$$

С друге стране, процене барионске густине Ω_b из луминозности галаксија даје знатно мању густину масе

$$\Omega_b < 0.02$$

Ова разлика се генерално тумачи као показатељ постојања невидљиве материје.

Чак и када се узму у обзир сви барионски облици, попут прашине, браон и белих патуљака, неутронских звезда и црних рупа, и даље се чини да је за објашњење свих опажања потребан значајан део небарионске материје. Ово остаје тачно и након што се узму у обзир индикације о такозваним МАСНО објектима (MASSive Compact Halo Object) захваљујући ефектима гравитационог сочива. У наставку ће бити речи о уочљивим доказима који указују на постојање тамне материје.

1.3 Ротационе криве галаксија

Спиралне галаксије представљају скупине великог броја звезда у облику спљоштеног ротирајућег диска (слика 1). Ротациона крива галаксије приказује брзину материје која ротира у спиралном диску, у зависности од радијуса од центра.

Брзина ротације појединих звезда око центра галаксије одређује се из услова за стабилну орбиту. На основу једнакости центрифугалне и гравитационе силе

$$\frac{GmM_r}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

брзина ротације је дата са

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM_r}{r}}$$

где M_r , означава укупну масу у оквиру радијуса r . Ефекти утицаја масе изван радијуса r поништавају се међусобно у случају идеалне сферне или цилиндричне симетрије. У првој апроксимацији, за језгро галаксије се може претпоставити да је сферно, тј.

$$M_r = \bar{\rho} \frac{4}{3} \pi r^3$$

где $\bar{\rho}$ означава средњу вредност густине. Тако добијамо следећи израз за брзину ротације

$$v(r) = \sqrt{\frac{4}{3} \pi G \bar{\rho} r^2} \sim r$$



Слика 1 Лево је спирална галаксија NGC 4565 (Christoph Kaltseis, CEDIC), а десно - M81 окренута за 90 степени (ESA/Hubble). Језгро и танки диск галаксије у који су уграђени спирални кракови јасно су препознатљиви у NGC 4565.

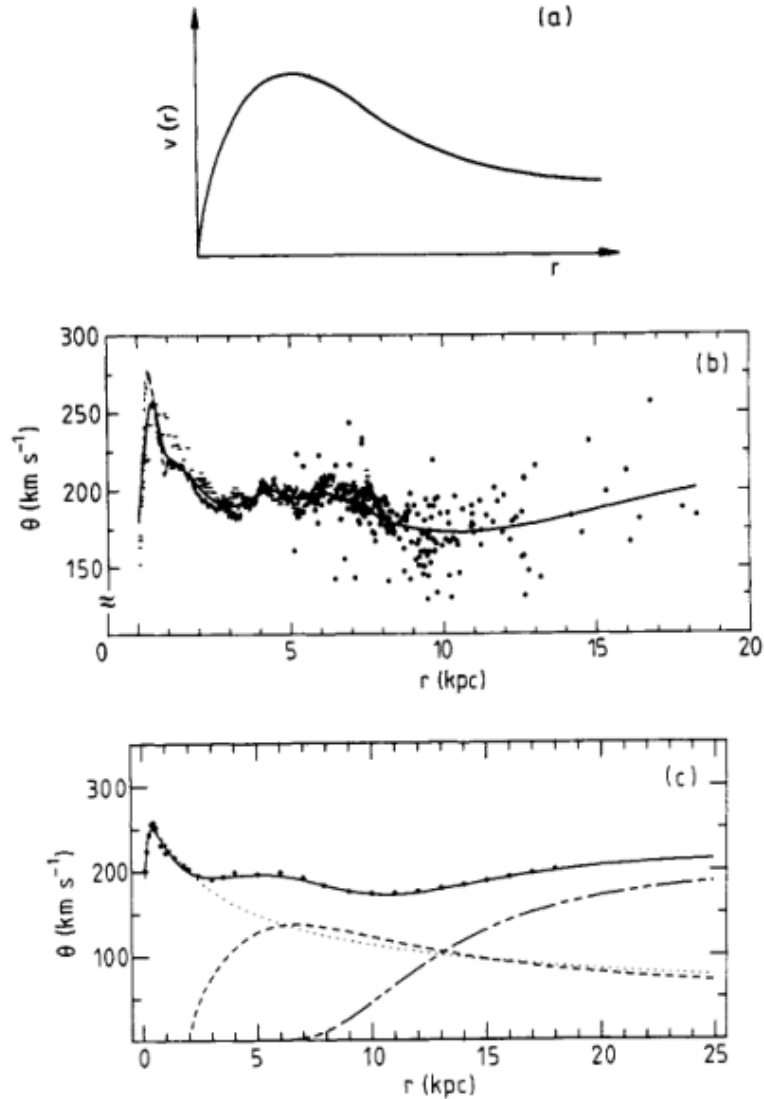
У унутрашњем делу галаксије очекује се линеарно повећање брзине ротације са повећањем удаљености од центра. У спољашњем делу галаксије маса M_r је у суштини константна. Понашање је слично понашању које би имала материјална тачка у центру галаксије:

$$v(r) \sim 1/\sqrt{r}$$

Слика 2 (а) приказује очекивану ротациону криву за спиралну галаксију.

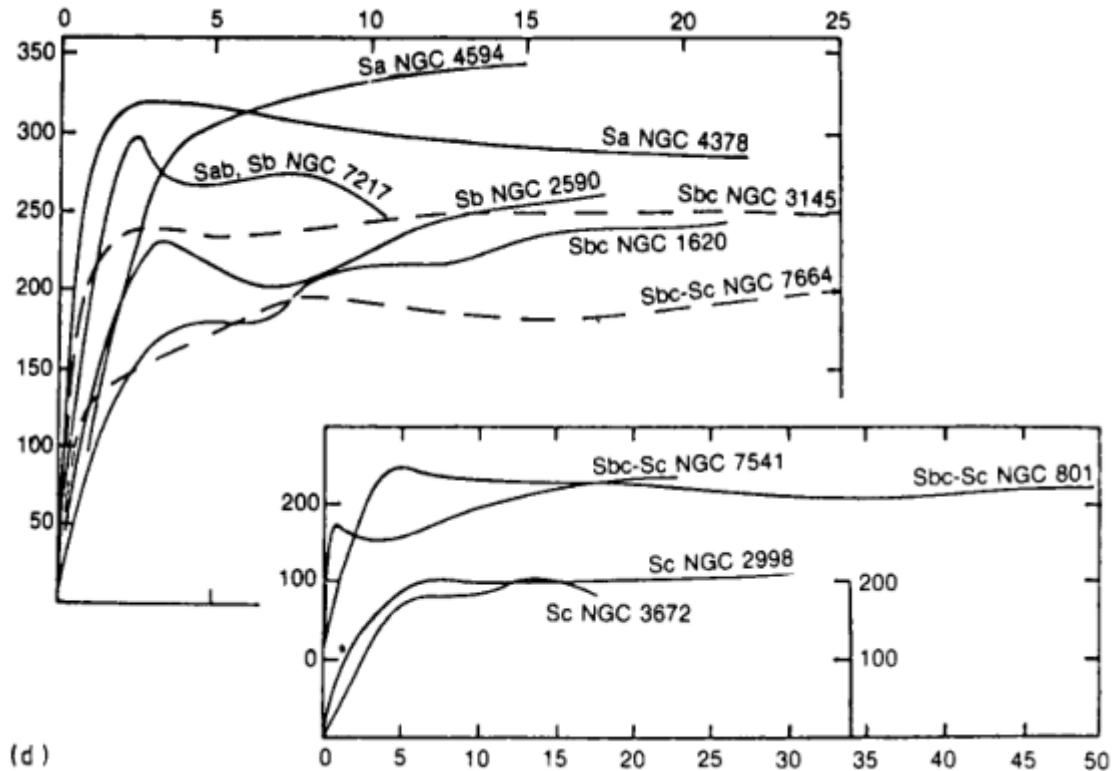
Брзина ротације $v(r)$ се одређује експериментално, на пример мерењем Доплеровог помака у емисионом спектру НП региона око такозваних О звезда. Експерименталне ротационе криве спиралних галаксија не показују смањење $v(r)$ за велике радијусе (слика 2 (b)-(d)). Изучавања воденикове линије на 21 cm (хиперфини прелаз структуре у атомском водонику) коју емитује међузвездана материја дају исти резултат. Чињеница да је $v(r)$ константа за велике радијусе значи да се маса M_r повећава са повећањем радијуса

$$M_r \sim r$$



Слика 2 (а) Очекивани облик ротационе криве галаксије. (b) Орбитална брзина θ објеката у диску Млечног пута (брзина ротације Галаксије) у функцији удаљености r до центра Галаксије. (c) Пример уклапања модела у ротациону криву (уп. (b)) Млечног пута. Модел садржи три компоненте: језгро-диск-хало чији су доприноси, исцртани као θ у односу на r , приказани са $\cdots$, $---$, $- \cdot -$, респективно.

Звезде се, дакле, крећу брже него што би се очекивало за дату количину видљиве материје.



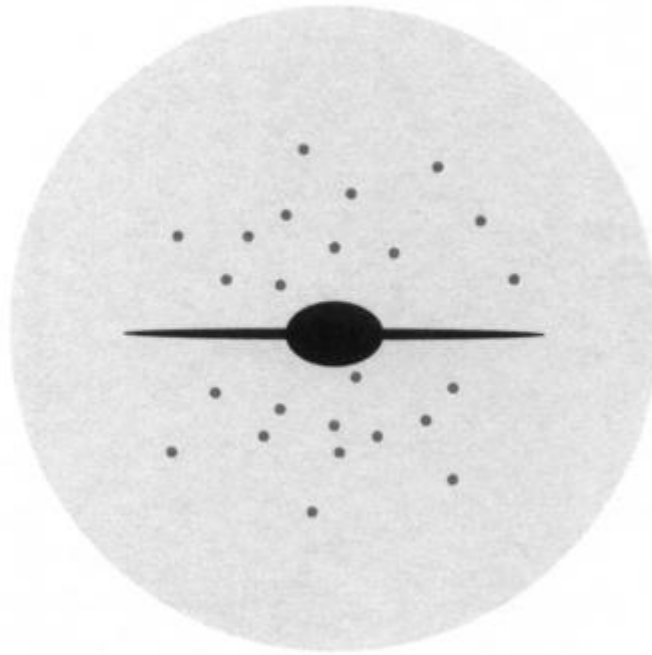
Слика 2 – наставак (d) Уочене криве ротације, θ у односу на r , Sb спиралних галаксија

Проучавајући кретање звезда и околног гаса и прашине око центра галаксије, и посматрајући ротационе криве галаксије Вера Рубин закључила је да овде мора постојати још нека додатна, невидљива маса.

Ова чињеница је даље довела до претпоставке о сферном халоу тамне материје која окружује галаксију и која је одговорна за равни део ротационе криве. Осим тога, сферни хало би такође могао допринети стабилности дисколикког облика галаксија. Модели прорачуна за наш Млечни пут, који су у стању да репродукују ротационе криве узимајући у обзир хало, указују на чињеницу да се значајан део масе налази управо у њему.

С обзиром на садашња запажања, није немогуће да ова материја може бити у потпуности барионска. Међутим, многи модели засновани на звездама мале масе или браон патуљцима су искључени и вероватно је тешко саставити читав хало од њих.

Популарна алтернатива је да је ова невидљива маса садржана у неком новом облику материје, која није барионска и само изузетно слабо ступа у интеракцију са конвенционалном материјом. Обично се претпоставља да овој тамној материји недостаје механизам дисипације који би је могао сконцентрисати у дисколику структуру, какву формирају звезде. Ако је ово тачно, онда би тамна материја требало да буде у облику сферног халоа, што значи чврста сфера са великом густином у центру, која опада при великим радијусима. Диск галаксије и глобуларна јата су усађена у овај хало, као што је приказано на слици 3.



Слика 3 Шематски приказ галактичког диска, са неколико глобуларних јата, уграђених у сферни хало тамне материје.

2 Удео звездане материје у космосу

„V-band filter“ - филтер визуелног опсега, пропушта фотоне у опсегу:

$$500 \text{ nm} < \lambda < 590 \text{ nm}$$

(пропушта таласне дужине у видљивом опсегу у околини зелене и жуте боје, где је око најосетљивије).

Када је у питању Сунце, око 12% Сунчеве луминозности пролази кроз V-band филтер. Према томе, Сунчева луминозност у V-band филтеру износи:

$$L_{\odot,V} \approx 0.12 L_{\odot} \approx 4.6 \times 10^{25} W$$

Истраживање галаксија у локалном универзуму (удаљеност $d \sim 0.1c / H_0$),

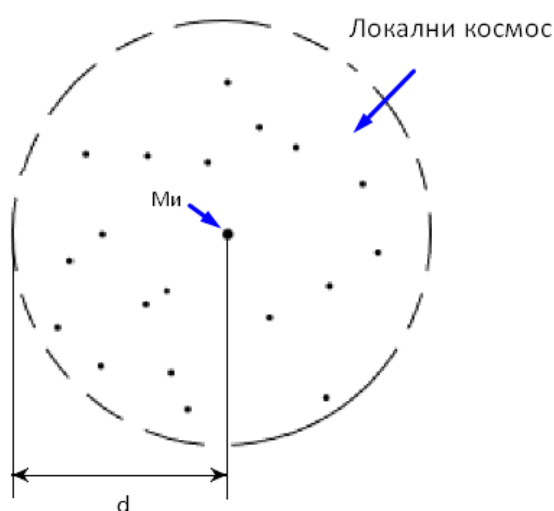
$$d \sim \frac{0.1 \times 3 \times 10^5 \frac{km}{s}}{75 \frac{km}{s \cdot MPc}} \Rightarrow$$

$$d = 400 MPc = 400 \times 10^6 \times 3.26 s.g \Rightarrow$$

$$d = 1.3 \times 10^9 s.g$$

показује да је у локалном универзуму густина луминозности у оквиру визуелног опсега:

$$\Psi_V = 1.1 \times 10^8 L_{\odot,V} \cdot MPc^{-3}$$



Слика 4 Поједностављена илустрација локалног космоса

Да би се конвертовала визуелна густина луминозности у масену густину звезда, ρ_* , морамо да знамо однос масе и визуелне луминозности за звезде. Ако би све звезде биле идентичне Сунцу, могли бисмо једноставно рећи да постоји једна соларна маса по једној соларној визуелној луминозности:

$$\left\langle \frac{M}{L_V} \right\rangle = \frac{1 M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

Међутим, у случају звезда других типова (класа), ситуација је другачија. Нпр. код звезда О типа, са масом $M = 60 M_{\odot}$, визуелна луминозност износи $L_V \approx 20\,000 L_{\odot,V}$, па је однос масе и визуелне луминозности:

$$\frac{M}{L_V} = \frac{60 M_{\odot}}{20\,000 L_{\odot,V}} \approx 0.003 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

што значи да бисмо у случају ових звезда имали само 0.003 соларне масе по једној соларној визуелној луминозности. Са друге стране, звезда М типа са масом $M = 0.1 M_{\odot}$ има визуелну луминозност која износи $L_V \approx 5 \cdot 10^{-5} L_{\odot,V}$, па је однос маса – визуелна луминозност:

$$\frac{M}{L_V} = \frac{0.1 M_{\odot}}{5 \cdot 10^{-5} L_{\odot,V}} \approx 2000 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

тј. 2000 соларних маса по једној соларној визуелној луминозности.

Према томе, однос маса – визуелна луминозност за ансамбл звезда у некој галаксији ће зависити од „мешавине“ типова звезда које галаксија поседује.

У галаксијама које активно формирају звезде данас, однос маса – визуелна луминозност звездане популације износи:

$$\frac{M}{L_V} \approx 0.3 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

тј. око 30% односа маса – визуелна луминозност Сунца. У горњој једначини M представља укупну масу звездане популације у галаксији, L_V је укупна луминозност звездане популације у галаксији.

Међутим, код галаксија које су одавно престале са формирањем нових звезда, однос маса – визуелна луминозност може да износи, тј. да буде висок као

$$\frac{M}{L_V} \approx 8 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

Према томе, обзиром да је наш локални универзум мешавина галаксија у којима се формирају звезде и галаксија у којима је формирање звезда престало, не можемо много погрешити ако за локални космос узмемо усредњену вредност односа маса – визуелна луминозност, тј.

$$\left\langle \frac{M}{L_V} \right\rangle \approx 4 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot,V}}$$

На основу ове вредности, налазимо да је масена густина звезда у (локалном) универзуму:

$$\rho_* = \left\langle \frac{M}{L_V} \right\rangle \cdot \Psi_V = 4 \frac{M_\odot}{L_{\odot,V}} \cdot 1.1 \times 10^8 \frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3} \Rightarrow$$

$$\rho_* \approx 4 \times 10^8 \frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3}$$

Како тренутна критична густина универзума, изражена као масена густина (у јединицама $\left[\frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3} \right]$), износи:

$$\rho_c = 1.28 \times 10^{11} \frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3}$$

то значи да је удео масене звездане густине у критичној густини космоса следећи:

$$\Omega_* = \frac{\rho_*}{\rho_c} = \frac{4 \times 10^8 \frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3}}{1.28 \times 10^{11} \frac{M_\odot}{\text{Mpc}^3}}$$

$$\Omega_* \approx 0.003$$

Ово значи да звездана масена густина доприноси са само 0.3% критичној густини космоса. Односно, укупна звездана маса чини само 0.3% доприноса таквој густини да космос буде раван (као што и јесте раван).

3 Идеје о саставу тамне материје

Иако већина научника сматра да су докази о тамној материји прилично велики, не постоји консензус о томе који она облик заправо има. У наставку је дат низ могућности. Постоје две главне класе: у једној је тамна материја у облику појединачних елементарних честица, док је у другој у виду неке врсте компактних астрофизичких објекта сачињених од више честица.

3.1 Појединачне честице

Честице које су већ откривене:

За разлику од свих наредних кандидата за тамну материју, неутрини имају предност у томе што се зна да постоје. За неутрино се дуго веровало да нема масу, јер је веома лака честица. Међутим, након открића осцилација неутрина, потврђено је да неутрино није честица без масе.

У вези са масом постоје следеће претпоставке.

Лаки неутрино била би врста тамне материје позната као врућа тамна материја, што значи да честице имају релативистичке брзине током барем неког дела живота универзума. Заправо, врућа тамна материја нема повољна својства за формирање структура, а ако неутрино има овакву масу, верује се да би могао допринети само делу густине материје, и да је уз то потребан још неки други облик тамне материје.

Друга могућност је да би неутрино могао бити веома тежак, на пример упоредив са масом протона. Ово је дозвољено јер тако масивне честице не би имале тако велику концентрацију као фотони, јер је у термичкој равнотежи тешко створити честице велике масе. Тешки неутрино пример је хладне тамне материје, што представља честице које имају занемарљиву брзину током историје универзума. За формирање структура пожељно је имати барем мало хладне тамне материје, али је тешки неутрино много мање пожељан на основу физике честица од лаког, и заиста је искључен експериментима физике честица осим ако неутрино нема необична својства.

Честице за које се претпоставља да постоје:

Теорије физике честица (посебно оне које имају за циљ уједињење основних сила) често претпостављају разне врсте нових и још неоткривених честица, од којих су неке вероватни кандидати за тамну материју. Физичари честица сматрају да је суперсиметрија најчвршће утемељено проширење стандардне теорије честица, које свакој познатој честици придружује пратећу честицу, познату као њен суперпартнер. У најједноставнијим сценаријима, најлакша суперсиметрична честица - *LSP* (Lightest Supersymmetric Particle) је стабилна и одличан је кандидат за хладну тамну материју. У зависности од модела, дотична честица би се могла назвати фотино, или гравитино, или неутралино. Понекад су познати и као слабо интерагујуће масивне честице – *WIMP* (Weakly Interacting Massive Particles).

Друге предложене честице укључују ултра лаку честицу познату као аксион, затим ултра тешке честице тамне материје које су се могле, на пример, формирати на

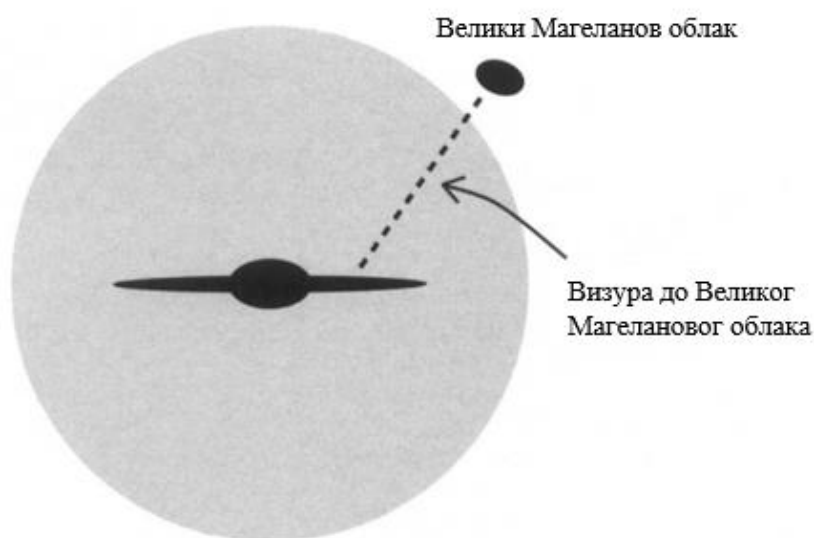
крају периода инфлације космоса, или честице из такозваног „универзума сенки“ (shadow Universe) који са нашим универзумом ступа у интеракцију само гравитационо.

3.2 Компактни објекти

Црне рупе: Популација примордијалних црних рупа, које су се формирале рано у историји универзума, а не након смрти звезда, имала би улогу хладне тамне материје. Оне не морају да се налазе у центрима галаксија. Претпоставка је да се у тамном халоу галаксија налази око милион оваквих објеката. Овакви објекти могу чинити већи део масе свемира иако не спадају у барионску материју.

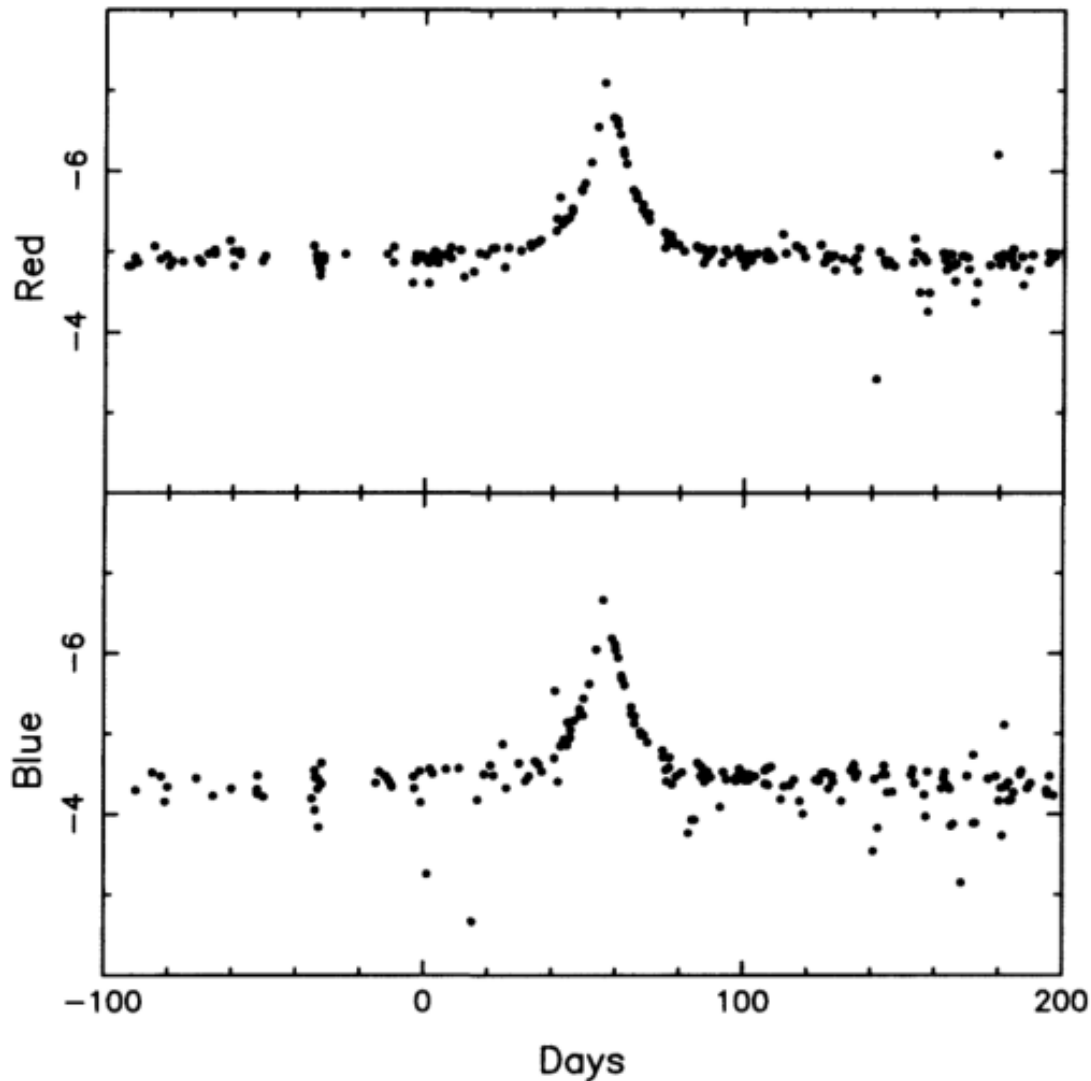
МАСНО: МАСНО објекти су јединствени међу кандидатима за тамну материју по томе што су заиста откривени. Овај акроним означава масивне компактне објекте халоа (МАСНО - MAssive Compact Halo Object). То је израз за компактне објекте чија маса се не разликује превише од звезданих маса, а могу бити барионски или небарионски. Смеђи патуљци су барионски пример, али би такође било могуће замислити небарионске примере.

МАСНО објекти су откривени преко утицаја гравитационог сочива на звезде у Великом Магелановом облаку. Идеја, илустрована на слици 3, је праћење звезда Великог Магелановог облака, које леже изван (или барем према ивици) галактичког халоа. Ако у халоу постоје невидљиви масивни објекти и деси се да они прођу изузетно близу дуж линије нашег посматрања звезде из Великог Магелановог облака, онда њихово гравитационо поље може савити и фокусирати светлост звезде, привремено је учинивши светлијом. Једини проблем је што су такви догађаји, који се називају микроленсирање, толико ретки да се морају пратити милиони звезда у Великом магелановом облаку, сваких неколико дана, током много година. То је постало могуће средином 1990-их, и, на изненађење многих, МАСНО објекти су заиста откривени.



Слика 3 Илустрација стратегије претраживања МАСНО објеката. Посматрање се врши са нашег положаја у диску галаксије ка звездама у Великом Магелановом облаку. Визура пролази кроз хало тамне материје, а ако тамо постоје невидљиви компактни објекти, а пролазе изузетно близу визуре, тада може доћи до ефекта гравитационог сочива на звезде из Великог Магелановог облака.

Слика 4 приказује сјај звезде у Великом Магелановом облаку, праћен око годину дана. Такав график је познат као крива сјаја и видимо привремено повећање сјаја, које је трајало око месец дана. Фаворизовано је објашњење преко гравитационог сочива, а не путем променљиве звезде, из неколико разлога. Прво, повећање сјаја се догодило само једном, тј. не догађа се периодично. Друго, повећање сјаја је исто и у црвеном и у плавом делу спектра, док је у случају променљивих звезда повећање различито на различитим таласним дужинама.



Слика 4 Криве сјаја за звезду у Великом Магелановом облаку. X-оса је дата у данима са произвољним почетком, док у-оса приказује сјај звезде у црвеном и плавом делу спектра (у јединицама магнитуде).

Коначно, симетрични облик криве сјаја одговара ономе што очекујемо када невидљиво гравитационо сочиво прође испред звезде. Маса ових невидљивих објеката се процењује на нешто мање од једне соларне масе. Међутим, иако су присутни, чини се да немају довољну густину да у потпуности објасне галактички хало. Осим тога, могуће је и да дато гравитационо сочиво и звезда истовремено обитавају унутар Великог Магелановог облака.

4 Детекција тамне материје

Постоји више различитих експеримената за детекцију тамне материје. Они се према методи коју користе могу поделити у две групе. То су експерименти са:

- 1) **директном детекцијом** - који истражују расејање честица тамне материје на атомским језгарима унутар детектора;
- 2) **индиректном детекцијом** - који покушавају да открију флукс секундарних честица који настаје, на пример, због анихилације соларне или галактичке тамне материје.

4.1 Директна детекција

Сврха експеримената који се служе методом директне детекције јесте посматрање нискоенергетских узмака атомских језгара (од неколико keV) који настају услед интеракције са честицама тамне материје, за које се претпоставља да пролазе кроз Земљу. Након што дође до узмака, атомско језгро ће емитовати енергију у облику сцинтилационе светлости или фонона. Овакви експерименти одвијају се дубоко под земљом како би се смањиле сметње које потичу од космичког зрачења. Неке од подземних лабораторија са експериментима директне детекције су подземна лабораторија SUPL (Stawell Underground Physics Laboratory) у држави Викторија, SNOLAB (SNO - Sudbury Neutrino Observatory) подземна лабораторија у Седберију (Онтарио), затим Национална лабораторија Гран Сасо (Gran Sasso) у Италији, итд.

У овим експериментима најчешће се користе криогене технологије или технологије детекције помоћу течних племенитих гасова. Криогенички детектори који раде на температурама испод 100 mK, детектују топлоту која настаје када честица погоди атом у кристалном апсорберу као што је, на пример, германијум. Детектори који се базирају на коришћењу течних племенитих гасова детектују сцинтилацију насталу сударом честица у течном ксенону или аргону. Неки од експеримената са криогеничким детекторима су: CDMS (Cryogenic Dark Matter Search), CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers), итд. Експерименти са течним племенитим гасовима укључују пројекте: ZEPLIN, XENON, DEAP (Dark matter Experiment using Argon Pulse-shape discrimination), итд. Обе ове технике усмерене су на своју способност да разликују позадинске честица (које се расејавају о електроне) од честица тамне материје (које се расејавају о језгра).

Још један важан експеримент је DAMA/LIBRA (који је наставак експеримента DAMA/NaI) који има за циљ да пронађе годишњу модулацију броја догађаја детекције, узроковану променом брзине детектора у односу на хало тамне материје, док Земља кружи око Сунца. Налази се под земљом у Националној лабораторији Гран Сасо.

Тренутно, међутим, још не постоји потврда открића тамне материје путем експеримената директне детекције.

4.2 Индиректна детекција

Честице тамне материје могу се тражити индиректно, односно откривањем секундарних честица насталих самоуништавањем (аутоанихилацијом) или распадом тамне материје. У областима са великом густином тамне материје (нпр. центар наше галаксије) две честице тамне материје могу да се сударе и произведу гама зрачење или парове честица – античестица стандардног модела. Са друге стране, ако је честица тамне материје нестабилна, могла би се распасти на честице стандардног модела (или неке друге). Ови процеси се могу индиректно открити преко вишка гама зрачења, антипротона или позитрона који извиру из подручја велике густине у нашој или другим галаксијама. Велика потешкоћа својствена таквим претрагама је та што различити астрофизички извори зрачења могу опонашати сигнал који се очекује од тамне материје.

Честица тамне материје које пролазе кроз Сунце или Земљу могле би се расејавати на атомима и губити енергију. Тако се тамна материја може акумулирати у центру ових тела, повећавајући шансе за судар/анихилацију. Ово би могло произвести карактеристичан сигнал у облику неутрина високе енергије. Такав сигнал би био јак индиректан доказ тамне материје у форми WIMP-ова. Неутрински телескопи високе енергије као што су AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), IceCube и ANTARES траже овај сигнал. Откривање гравитационих таласа од стране LIGO-а (Ласерска интерферометарска опсерваторија гравитационих таласа) у септембру 2015. отвара могућност посматрања тамне материје на нов начин, посебно ако је у облику примордијалних црних рупа.

Предузете су многе експерименталне претраге за емисијом зрачења из анихилације или распада тамне материје. У њима су учествовали телескопи EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope), и Ферми (Fermi Gamma-ray Space Telescope), детектујући вишак гама зрачења у Млечном путу, затим PAMELA експеримент који је открио вишак позитрона и Алфа-магнетни спектрометар са Међународне свемирске станице који је указао на вишак високоенергетског космичког зрачења које би могло бити последица уништења тамне материје.

У остатку овог рада детаљније ће бити описана директна метода детекције WIMP-ова у оквиру експеримента CRESST.

4.3 Пројекат CRESST

Експеримент CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers – криогеничко тражење ретког догађаја помоћу суперпроводних термометара) је дизајниран за детекцију честица тамне материје, тачније за детекцију WIMP-ова. Експериментална поставка се налази у „Националној лабораторији Гран Сасо (Gran Sasso)“ у Италији.

CRESST користи нискофонске криогеничке калориметријске детекторе са термометрима базираним на суперпроводном фазном прелазу за директну детекцију расејања WIMP-ова на језгру [Д. Мрђа, 2004].

На основу теоријских разматрања очекује се интеракција WIMP-ова са обичном материјом путем еластичних расејања на језгрима. Стога су све директне методе, па и CRESST фокусиране на ову могућност. Конвенционалне методе за директну детекцију засноване су на јонизацији или сцинтилирању узрокованим узмаком језгра. Ово води озбиљним ограничењима повезаним са релативно високом енергијом неопходном за остваривање јонизације и са оштрим опадањем јонизације са успорењем језгра.

Криогенички детектори развијени за CRESST користе побуђења за које је потребна знатно нижа енергија - фононе. Будући да је генерисање фонона (узроковано узмаком језгра приликом расејања WIMP-а) много вероватнији процес него јонизација, криогенички калориметри су идеални за детекцију WIMP-ова.

Слика 5 приказује CRESST-ову експерименталну зграду. Централни део садржи He-3/He-4 криостат који омогућава одржавање оперативне температуре детектора (10mK-15mK). Детектор је смештен унутар тзв. „расхладне кутије“ која је произведена од нискофонског OFHC бакра. Криостат и расхладна кутија се налазе унутар фарадејевог кавеза како би се минимизирали спољашњи утицаји електромагнетног поља. [Д. Мрђа, 2004].



Слика 5 Зграда CRESST-а у Гран Сасо тунелу (www.cresst.de)

4.3.1 CRESST I фаза

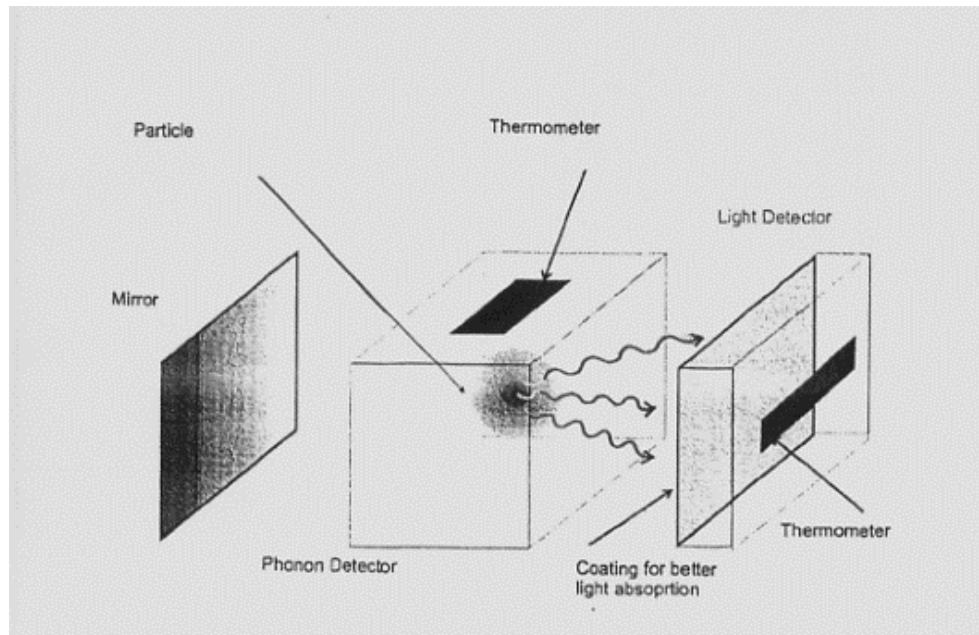
У CRESST I фази коришћен је детектор који се састојао од сафирског кристала (апсорбера) Al_2O_3 , и екстремно осетљивог суперпроводног термометра у μK опсегу. Подаци су сакупљани у периоду од априла до јула 2000.године.

4.3.2 CRESST II фаза

У другој фази детекторски концепт је усавршен. Он се заснива на коинцидентној детекцији фонона и сцинтилационог светла које настаје тако што у апсорбујућем кристалу долази до интеракција честице са кристалном решетком.

Да би се повећала вероватноћа детекције WIMP-ова, потребно је редуковати фон. Ово се постиже јер постоји могућност разликовања узмака електрона (узрокованих фотонима или електронима) од узмака језгра (узрокованих честицама тамне материје, али такође и неутронима).

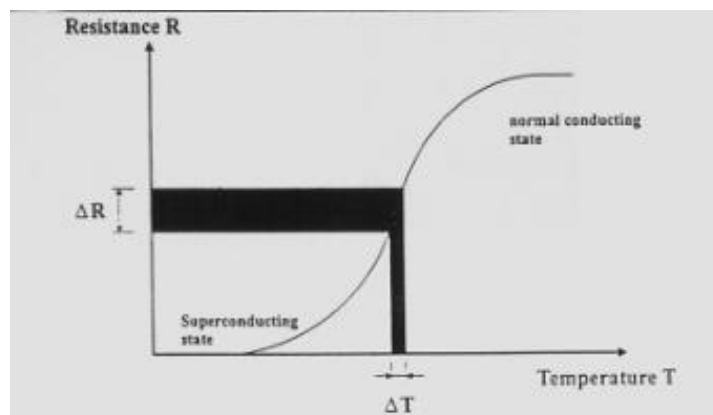
Сафирски кристал је замењен монокристалом CaWO_4 који има улогу апсорбера. Суперпроводни волфрамски филм за детекцију фонона евапориран је на кристал. Сцинтилационо светло се региструје у коинциденцији са фононима и то помоћу другог – сафирског криогеничког детектора на коме се такође налази волфрамски филм. Слика 6 шематски приказује поставку овог композитног детектора.



Слика 6 Шематски приказ детектора

Апсорпцијом фотона у сафирском детектору долази до генерисања фотона, а суперпроводним термометром детектује се пораст температуре у овом кристалу као и у CaWO_4 кристалу.

Када је у питању волфрамски термометар, малим променама температуре одговара релативно велика промена отпора када је W филм у температурној области која се налази на прелазу нормалног проводног стања у суперпроводно стање [Д. Мрђа, 2004].



Слика 7 Принцип рада W термометра

За дату енергију упадне честице однос депоноване енергије у фононском каналу и депоноване енергије у светлосном каналу зависи од типа интеракције. Наиме, узмаци језгара који се дешавају приликом расејања WIMP-ова или неутрона доводе до емитовања знатно мање сцинтилационог светла у сцинтилатору, него што то чине јонизационе интеракције, какве су апсорпција електрона или гама кваната (где се јављају електронски узмаци).

Пошто се већина фононских интеракција базира на јонизационим интеракцијама, симултана детекција фонона и сцинтилационог светла претставља ефикасан метод редуковања фона.

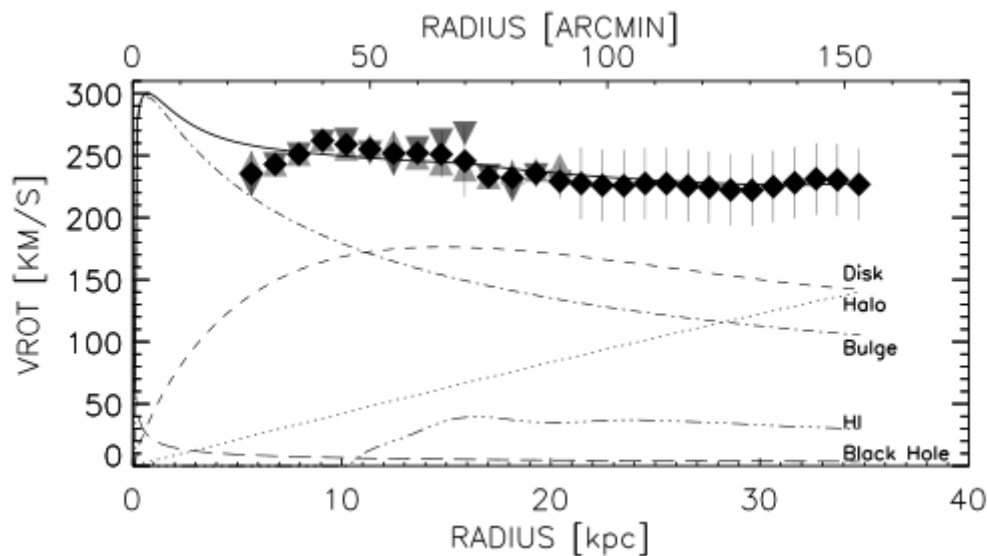
Догађаји који потичу од WIMP-ова и фонски догађаји дају резултујући заједнички допринос, те морамо нагласити да без примене симулације фонских догађаја, ма како они били ретки, не можемо бити сигурни да неки од регистрованих догађаја јесу баш пореклом од интеракције WIMP-ова [Д. Мрђа, 2004].

4.3.3 CRESST III фаза

Касније фазе CRESST експеримента базиране су на истим принципима и циљ CRESST-III фазе је додатно повећање осетљивости експеримента - посебно за честице тамне материје малих маса. На овај начин се могу постићи прагови детектора испод 100eV.

4.4 Масена дистрибуција галаксије M31

У публикацији „Extended HI Rotation Curve And Mass Distribution Of M31“ објављеној у часопису *The Astrophysical Journal Letters*, 2006. године, приказан је график ротационе криве за галаксију M31 (слика 8).



Слика 8 Ротациона крива и модел масене дистрибуције за галаксију M31.

Слика 8 приказује модел дистрибуције масе који најбоље одговара галаксији М31. На слици се могу видети експериментални (посматрачки подаци) који указују на очување брзине орбитирања видљивих објеката у М31 на око 230 - 250 km/s чак и на великим растојањима – до 40ак килопарсека. Такође су приказани различити доприноси ротационој кривој по компонентама, тј. доприноси диска, халоа, HI региона, централног дела и црне рупе.

5 Моделирање ротационе криве галаксије и симулације узмака атомских језгара у детектору WIMP-ова

5.1 Ротационе криве галаксија (квантитативни приступ)

У овом одељку приложен је поједностављен модел квантитативног израчунавања ротационе криве за галаксију M31, рађен у програмском пакету *Mathematica* (<https://www.wolfram.com/>).

Rotacione krive galaksija

(kvantitativni pristup)

Pojednostavljeni model ocekivane rotacione krive na bazi vidljive materije za galaksiju M31

Rastojanje galaksije od Zemlje u megaparsecima

```
In[1]:= M31 GALAXY ["DistanceFromEarth"]  
Out[1]= 0.7889 Mpc
```

podaci o galaksiji: radijus i masa

poluprecnik galaksije u svetlosnim godinama

```
In[2]:= GalaxyData[M31 GALAXY, "Radius"]  
Out[2]=  $7.078 \times 10^4$  ly
```

masa galaksije u Suncевim masama (koja ukljucuje i vidljivu materiju i tamnu materiju) - posmatracki podatak

```
In[3]:= GalaxyData[M31 GALAXY, "Mass"]  
Out[3]=  $8. \times 10^{11} M_{\odot}$ 
```


Univerzalna gravitaciona konstanta

$$\text{In}[4] := \gamma = 6.67408 \times 10^{-11}$$

$$\text{Out}[4] = 6.67408 \times 10^{-11}$$

parsec u metrima:

$$\text{In}[5] := \text{pc} = 3.08567758 \times 10^{16}$$

$$\text{Out}[5] = 3.08568 \times 10^{16}$$

svetlosna godina u metrima

$$\text{In}[6] := \text{ly} = 9.4605284 \times 10^{15}$$

$$\text{Out}[6] = 9.46053 \times 10^{15}$$

masa Sunca u kilogramima

$$\text{In}[7] := M_s = 1.9891 \times 10^{30}$$

$$\text{Out}[7] = 1.9891 \times 10^{30}$$

Primer konkretnog izracunavanja brzine orbitiranja zvezde u galaksiji ako pretpostavimo odgovarajuci iznos mase galaksije koji je obuhvacen orbitom datog poluprecnika

rastojanje od centra galaksije u svetlosnim godinama

(rastojanje koje odgovara vrednosti 0.56 poluprecnika galaksije M31)

$$\text{In}[8] := r = 4 \times 10^4 \times \text{ly}$$

$$\text{Out}[8] = 3.78421 \times 10^{20}$$

pretpostavljena ukupna masa - vidljiva i tamna (u jedinicama mase Sunca) obuhvacena orbitom poluprecnika r
(masa koja odgovara 1/4 vrednosti mase ukupne galaksije M31)

$$\text{In}[9] := M_r = 2 \times 10^{11} \times M_s$$

$$\text{Out}[9] = 3.9782 \times 10^{41}$$

Izracunavanje orbitalne brzine u [m/ s]

$$\text{In}[10] := v = \sqrt{\gamma \times \frac{M_r}{r}}$$

$$\text{Out}[10] = 264.881.$$

Brzina u kilometrima u sekundi:

$$\text{In}[11] := v_{\text{kms}} = v / 1000$$

$$\text{Out}[11] = 264.881$$

(kao primer: brzina orbitiranja Sunca oko centra galaksije Mlečni Put iznosi oko 230 km/s)

Unutrasnji deo galaksije (*napomena poluprecnik u unutrasnjem delu galaksije ce biti oznacen sa "ru")

Srednja gustina MATERIJE (vidljive i tamne) u galaksiji M31 u kg/m³:

$$\text{In[12]}:= M_{31} = 8 \cdot 10^{11} \cdot M_{\odot}$$

$$\text{Out[12]}:= 1.59128 \times 10^{42}$$

$$\text{In[13]}:= r_{31} = 7.078 \cdot 10^4 \cdot \text{ly}$$

$$\text{Out[13]}:= 6.69616 \times 10^{20}$$

$$\text{In[14]}:= v_{31} = \frac{4}{3} (r_{31})^{\frac{1}{2}} \cdot \pi$$

$$\text{Out[14]}:= 1.25767 \times 10^{63}$$

$$\text{In[15]}:= \rho_{31} = \frac{M_{31}}{V_{31}}$$

$$\text{Out[15]}:= 1.26526 \times 10^{-21}$$

Izracunavanje srednje gustine VIDLJIVE materije galaksije M31 u centralnom delu galaksije - do 1/10 poluprecnika

Zapremina sfere poluprecnika koji iznosi 1/10 poluprecnika galaksije M31

$$\text{In[16]}:= V_{31c} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{10} r_{31} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \pi$$

$$\text{Out[16]}:= 1.25767 \times 10^{60}$$

Pretpostavka : Masa VIDLJIVE MATERIJE obuhvacena u sferi poluprecnika 1/10 poluprecnika galaksije

(pretpostavili smo da obuhvacena VIDLJIVA masa iznosi 1/20 ukupne mase galaksije M31)

$$\text{In[17]}:= M_{31c} = \frac{1}{20} M_{31}$$

$$\text{Out[17]}:= 7.9564 \times 10^{40}$$

Gustina VIDLJIVE materije u centralnom (unutrasnjem) delu galaksije

```
In[18]:= ρ31c =  $\frac{M31c}{V31c}$ 
Out[18]:=  $6.32631 \times 10^{-20}$ 
```

Одредјивање сферне запремине и VIDLJIVE масе унутар ње, која одговара полупрецику орбите “ru” у унутрашњем делу галаксије, где је $ru < 1/10 r31$:

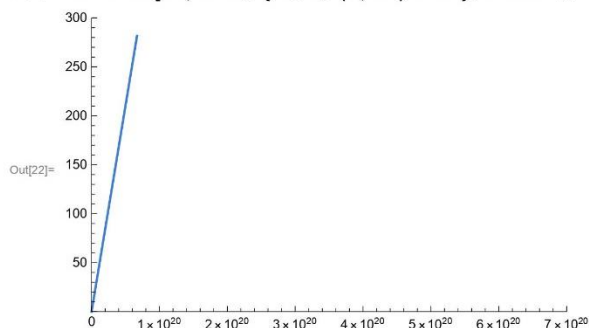
```
In[19]:= Vrc =  $\frac{4}{3} ru^3 * \pi$ 
Out[19]:=  $\frac{4 \pi ru^3}{3}$ 

In[20]:= Mru = Vrc * ρ31c
Out[20]:=  $2.64996 \times 10^{-19} ru^3$ 
```

Одредјивање орбиталне брзине звезда у унутрашњем делу галаксије (до око 1/10 полупрецика) - на основу видљиве масе

```
In[21]:= vu =  $\sqrt{\gamma * \frac{Mru}{ru}}$ 
Out[21]:=  $4.20548 \times 10^{-15} \sqrt{ru^2}$ 

In[22]:= in = Plot[vu/1000, {ru, 0, (1/10) * r31}, PlotRange -> {{0, 7 * 10^20}, {0, 300}}]
```



(видимо да се под наведеним условима добијају орбиталне брзине од око 280 km/s на око 1/10 полупрецика галаксије M31)

Одредјивање орбиталне брзине звезда у
 спољасњем делу галаксије
 (region onih вредности полупрецика орбите
 “rs” који задовољавају услов $\frac{1}{10} r_{31} < r_s < r_{31}$,
 где је r_{31} полупрецик галаксије M31)

сматрамо сада да се у спољасњим слојевима галаксије
 укупна VIDLJIVA маса обухваћена орбитом практично
 не менја са повећањем полупрецика орбите, тј. да је
 приближно константа и грубо одговара маси централног
 дела галаксије

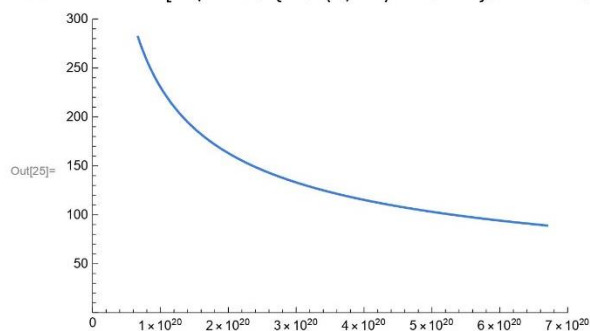
$$\text{In[23]:= } M_{rs} = \frac{1}{20} M_{31}$$

$$\text{Out[23]= } 7.9564 \times 10^{40}$$

$$\text{In[24]:= } v_s = \sqrt{\gamma \star \frac{M_{rs}}{r_s}}$$

$$\text{Out[24]= } 2.30438 \times 10^{15} \sqrt{\frac{1}{r_s}}$$

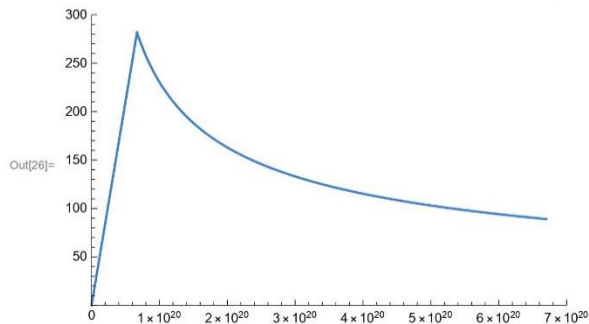
$$\text{In[25]:= } \text{out} = \text{Plot}\left[v_s / 1000, \{r_s, (1/10) r_{31}, r_{31}\}, \text{PlotRange} \rightarrow \{\{0, 7 \times 10^{20}\}, \{0, 300\}\}\right]$$



(vidimo da bi rezultat ovakve pretpostavke bila rotaciona kriva, koja bi
 opadala sa vrednosti orbitalne brzine od oko 280 km/s na $1/10 r_{31}$, do oko
 100 km/s na oko $0.8 r_{31}$)

Očekivana rotaciona kriva galaksije M31 na osnovu prisustva vidljive materije:

In[26]:= Show[in, out, PlotRange -> {{0, 7 * 10^20}, {0, 300}}]



***Pretpostavimo sada LINEARNI PORAST MASE obuhvacene orbitom poluprecnika r_s u opsegu $\frac{1}{10} r_{31} < r_s < r_{31}$ (zbog prisustva TAMNE materije)

Koeficijent pravca k linearne zavisnosti mase od poluprecnika (vrednost k je podesavana tako da orbitna brzina zvezda za velike poluprecnike odgovara priblizno posmatrackim vrednostima za galaksiju M31, koje iznose oko 250 km/s):

In[27]:= $k = 0.4 * M_{31} / r_{31}$

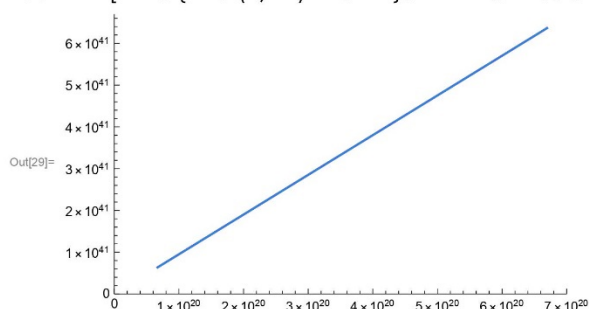
Out[27]:= 9.50562×10^{20}

Linearni porast mase “ M_{rs1} ” u spoljasnjim slojevima galaksije, tj. za velike poluprecnike “ r_{s1} ”:

In[28]:= $M_{rs1} = k * r_{s1}$

Out[28]:= $9.50562 \times 10^{20} r_{s1}$

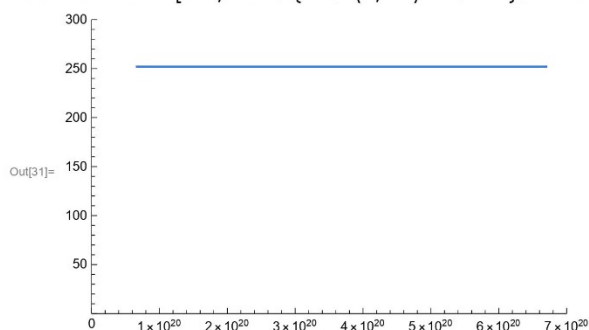
In[29]:= Plot[Mrs1, {rs1, (1/10) r31, r31}, PlotRange -> {{0, 7 * 10^20}, {0, All}}]



In[30]:= vs1 = $\sqrt{\gamma * \frac{Mrs1}{rs1}}$

Out[30]:= 251876.

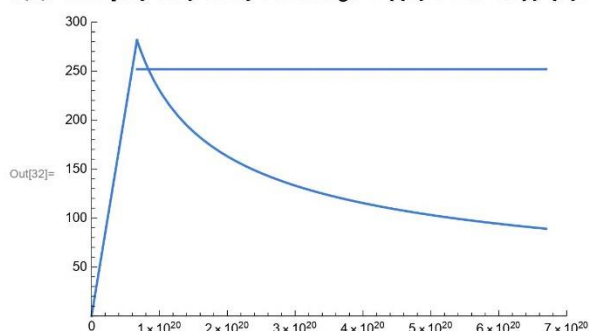
In[31]:= out1 = Plot[vs1/1000, {rs1, (1/10) r31, r31}, PlotRange -> {{0, 7 * 10^20}, {0, 300}}]



(vidimo da brzina ostaje konstantna i za velike poluprecnike, tj. sa vrednoscu od oko 252 km/s)

Kombinovani prikaz rotacionih krivih galaksije M31 bez, i sa prisustvom tamne materije:

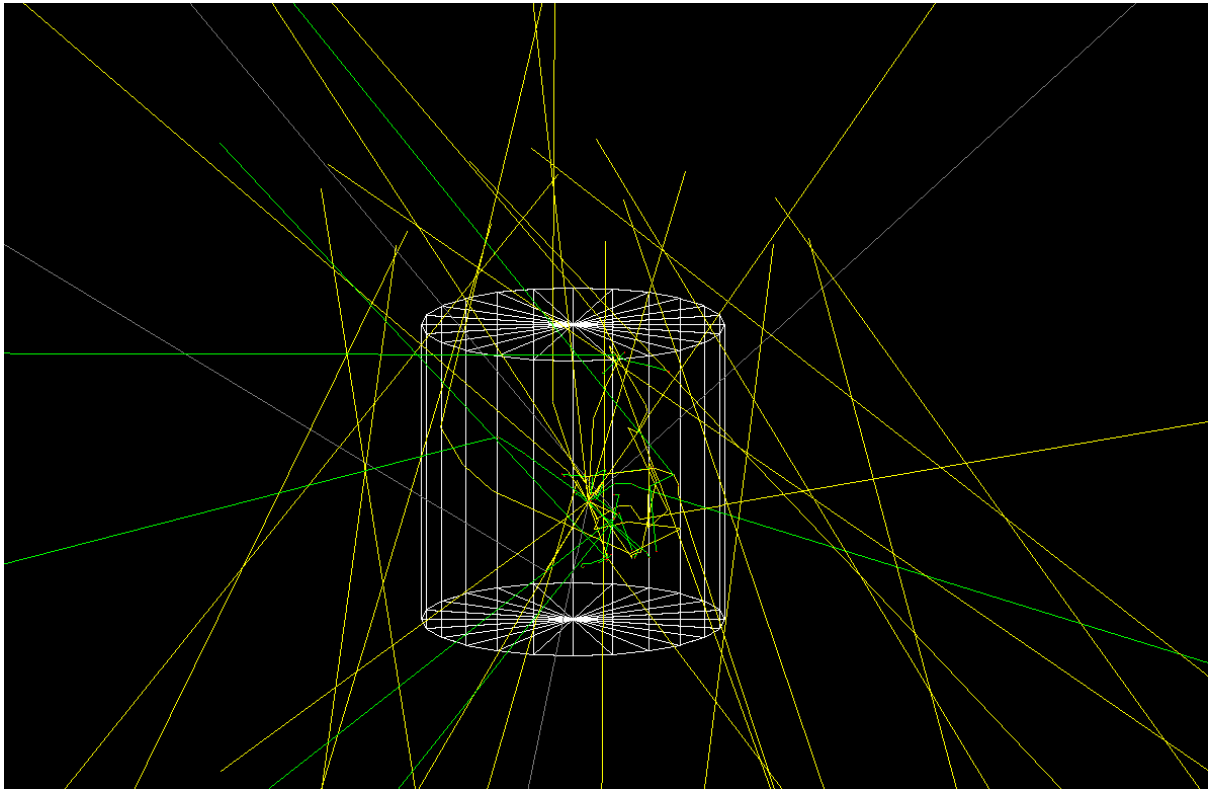
In[32]:= Show[in, out, out1, PlotRange -> {{0, 7 * 10^20}, {0, 300}}]



Видимо да смо и у случају грубих претпоставки начињених у претходном моделу, успели да добијемо квантитативне резултате, када је у питању ротациона крива галаксије М31, који су упоредиви са подацима приказаним на сл.8. Озбиљнији приступ би захтевао моделирање утицаја сваке појединачне масене компоненте поменуте галаксије.

5.2 Симулација интеракције неутрона са CaWO_4 детектором као фонских догађаја за WIMP-ове

Симулације су извршене помоћу софтверског пакета Geant4 (ver.10.7). Емитовано је укупно 250 000 неутрона, при чему је њихова енергетска и угаона расподела одговарала космичким неутронима на нивоу мора. У том циљу коришћена је CRY база података (Cosmic-RaY Shower Library), инкорпорирана у Geant4 пакет. Космички неутрони емитовани су из квадратне површине $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$, постављене изнад CaWO_4 детектора цилиндричног облика, пречника 15cm , и висине такође 15cm . Изглед симулационе поставке видљив је на слици 9.



Слика 9 Геометрија поставке у симулацијама. Цилиндрична запремина представља CaWO_4 детектор. Жуте путање представљају неутроне, док су зелене путање гама кванти, индуковани неутронима

Еквивалентно време, t_{ekv} , које одговара времену за које би у реалности на површину од $S = 0.25\text{m} \times 0.25\text{m} = 0.0625\text{m}^2$ пало 250 000 космичких неутрона, можемо наћи полазећи од вредности флукса космичких неутрона који износи $\Phi_n = 36 \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (то је вредност која достиже око 21.5% флукса космичких миона, имајући у виду да флукс космичких миона износи $167\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$).

Дакле:

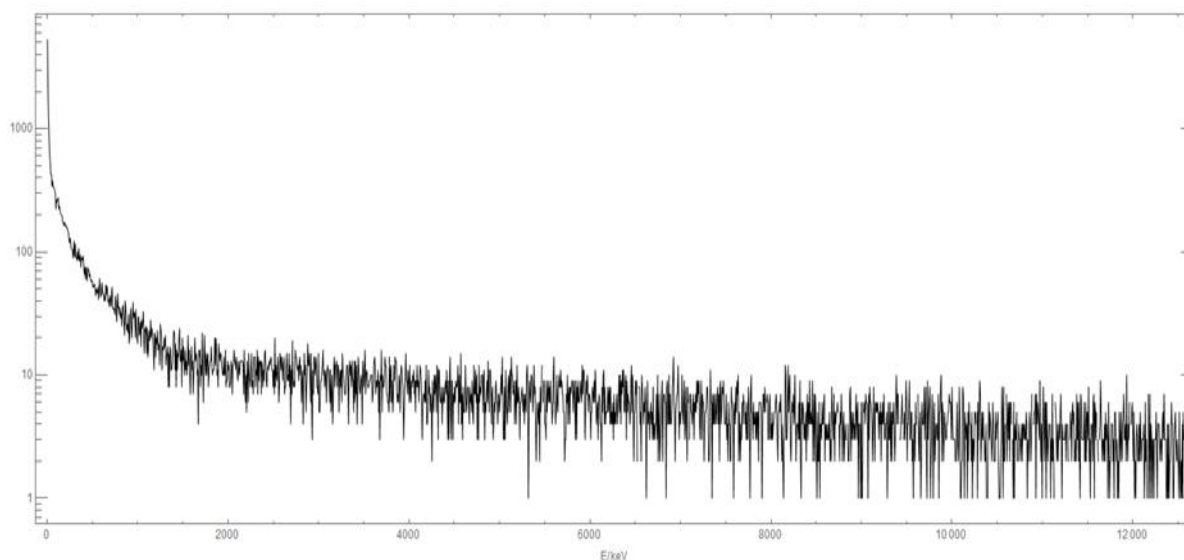
$$\Phi_n = \frac{N_{n.\text{emit}}}{S t_{\text{ekv}}} ,$$

где је $N_{n.\text{emit}}$ број неутрона емитованих у симулацијама. У нашем случају $N_{n.\text{emit}} = 250\,000$.

Одавде следи:

$$t_{ekv} = \frac{N_{n.emit}}{S \Phi_n} = \frac{250\,000}{0.0625\,m^2\,36\,s^{-1}m^{-2}} = 111\,111\,s \approx 1.29\,dana$$

Добијени спектар депонованих енергија у детектору видљив је на слици 10. Карактерише га континуална расподела депонованих енергија, која се протеже и преко 10 MeV.

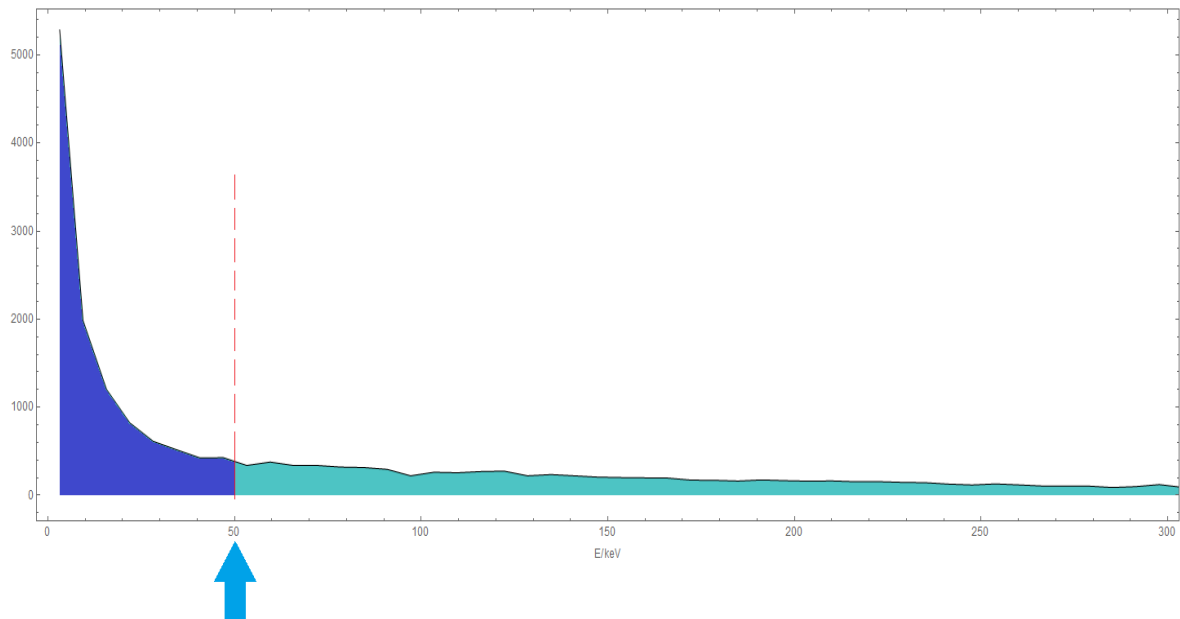


Слика 10 Спектар детектован CaWO_4 детектором услед интеракције са космичким неутронима.

Овакви догађаји узроковани неутронима представљају фонске догађаје који у озбиљној мери маскирају догађаје који би могли бити узроковани WIMP-овима. Нарочито су од значаја нискоенергетски догађаји, испод 50 keV, узроковани узмацима језгара CaWO_4 детектора услед интеракције са неутронима, јер се управо у овој области очекују и узмаци језгара узроковани WIMP-овима, при чему се узмаци услед WIMP-ова и неутрона не би могли међусобно разликовати у погледу детекције.

Регион испод 50 keV, који је добијен као резултат симулација приказан је и означен на слици 11. У овом региону (0 keV-50 keV) регистровано је укупно 11287 догађаја, и представља далеко најинтензивнији део спектра CaWO_4 детектора продукovanог неутронима. Имајући у виду добијено еквивалентно време, одговарајућа брзина бројања у поменутом региону износи:

$$R_{0-50keV} = \frac{11287\,c}{111\,111\,s} = 0.101\,c/s$$



Слика 11 Нискоенергетски регион спектра CaWO_4 детектора

Ради се о брзини бројања која је бар четири или пет редова величине већа од очекиване брзине бројања услед могуће интеракције детекторске запремине са WIMP-овима ($\sim 10 - 100$ догађаја/годишње). Из тог разлога је потребно да се експерименти који имају за циљ детекцију тамне материје изводе дубоко испод површине Земље, како би детекторски систем био изложен што слабијем флуксу космичких неутрона. Ипак, и у таквим условима подземних експеримената, околне стене које садрже тешке радиоактивне елементе, попут U-238, U-235, Th-232, представљају извор неутрона, као што су они из спонтане фисије, који интерагују са детектором узрокујући узмаке атомских језгара.

Имајући ово у виду, симулације су неопходне у процесу детекције WIMP-ова, јер је потребно упоредити резултате симулација неутрона са детектором, са одговарајућим експерименталним подацима. У таквој ситуацији, уколико се у експерименту детектује већи број догађаја него што показују резултати симулација интеракције детектора са неутронима, могуће их је приписати детекцији WIMP-ова.

Закључак

Проблем тамне материје у космосу један је од најзначајнијих и најактуелнијих проблема савремене астрофизике и космологије. Чињеница да само око 5% укупне материје у космосу отпада на видљиву (барионску) материју додатни је мотив истраживачима, како у теоријским настојањима, тако и у експерименталном смислу да се даље позабаве проблемом дистрибуције тамне материје у галаксијама и галактичким јатима, као и да унапреде методе детекције тамне материје.

У овом дипломском раду приказано је актуелно стање у овом пољу истраживања и описане методе детекције тамне материје, са акцентом на детекционе системе, попут CRESST експеримента који имају за циљ детекцију честица тамне материје (WIMP-ова). Поједностављеним приступом, моделирана је ротациона крива галаксије M31, при чему је показано да се чак и на овај начин могу добити квантитативни резултати упоредиви са прикупљеним посматрачким подацима за ову спиралну галаксију.

Применом Монте-Карло симулација, на бази софтверског пакета Geant4 у раду је симулиран одговор CaWO_4 детектора честица тамне материје (WIMP-ова) приликом интеракције са космичким неутронима. Наиме, ово је од кључног значаја за могућу будућу детекцију WIMP-ова, имајући у виду да управо неутрони доводе до узмака атомских језгара у активној запремини детектора, на исти начин како се то очекује и од WIMP-ова, доводећи тако до маскирања догађаја за којима трагамо. Показано је да је добијена брзина бројања у детектору, узрокована неутронима у нискоенергетском региону ($<50 \text{ keV}$) у површински базираној лабораторији, чак 4 или 5 редова величине већа од очекиване брзине бројања услед WIMP-ова. Овај резултат указује на неопходност лоцирања експеримената у којима се трага за тамном материјом дубоко испод површине земље, али и тада симулације интеракције преосталих неутрона (доминантно из спонтане фисије), остају као кључна компонента приступа у будућој детекцији WIMP-ова.

Литература

1. Д. Мрђа - Компаративна студија пасивних заштита за хама спектрометре, магистарска теза, Нови Сад (2004)
2. Andrew R. Liddle - Introduction to modern cosmology, 2ed., Wiley (2003)
3. H. V. Klapdor-Kleingrothaus, A. Staudt - Non-accelerator particle physics, Institute of Physics Publishing (1995)
4. Sanders R.H. - The Dark Matter Problem - A Historical Perspective, Cambridge University Press (2010)
5. Gianfranco Bertone, Dan Hooper, Joseph Silk - Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints, Physics Reports, 405:279-390 (2005)
6. Gianfranco Bertone, Dan Hooper - A History of Dark Matter, Reviews of Modern Physics, 90, 45002 (2018)
7. Gianfranco Bertone - Particle Dark Matter - Observations, Models and Searches, Cambridge University Press (2010)
8. Claude Carignan, Laurent Chemin, Walter K. Huchtmeier, Felix J. Lockman - Extended HI Rotation Curve And Mass Distribution Of M31, The Astrophysical Journal, 641: L109–L112 (2006)
9. Barbara Ryden, Introduction to Cosmology, second edition, Cambridge University Press, (2017)
10. <https://www.wolfram.com/>
<https://www.wolfram.com/mathematica/trial/>
11. https://apod.nasa.gov/apod/image/1902/N4565ps06d_35tp_Kaltseis2019.jpg
12. <https://esahubble.org/images/heic0710a/>
13. <https://www.cresst.de/>
https://www.cresst.de/bigpic_hut.php

Биографија

Александра Божиловић рођена је 13. 8. 1994. у Нишу, где је започела своје школовање. Похађала је основну школу „Учитељ Таса“, а затим уписала природно математички смер Гимназије „Бора Станковић“, такође у Нишу. Одмах након матурирања уписује студије физике на Природно-математичком факултету у Новом Саду, смер астрономија са астрофизиком. За време студија учествовала је на манифестацијама као што су Фестивал науке и студентска астрономска радионица (САР) у Новом Саду и Београду, а такође је присуствовала Студентској Видојевичкој Астрономској пракси (СВАП).



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Монографска документација

TD

Tip zapisa:

Текстуални штампани материјал

TZ

Vrsta rada:

Дипломски рад

VR

Autor:

Александра Божиловић

AU

Mentor:

Проф. др Душан Мрђа

MN

Naslov rada:

Дистрибуција и детекција тамне материје у космосу

NR

Jezik publikacije:

српски (ћирилица)

JP

Jezik izvoda:

српски/енглески

JI

Zemlja publikovanja:

Србија

ZP

Uže geografsko područje:

Војводина

UGP

Godina:

2021

GO

Izdavač:

Ауторски репринт

IZ

Mesto i adresa:

Природно математички факултет, Трг Доситеја Обрадовића 4,
Нови Сад

MA

Fizički opis rada:

5 поглавља/39 страна/11 слика

FO

Naučna oblast:

Физика

NO

Дистрибуција и детекција тамне материје у космосу

<i>Naučna disciplina:</i>	астрофизика
ND	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	тамна материја, WIMP, детекција, ротационе криве, Монте-Карло симулације
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Библиотека департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	нема
VN	
<i>Izvod:</i>	У раду су описане методе детекције честица тамне материје, са акцентом на детекцију WIMP-ова. Моделирана је ротациона крива галаксије M31 како би се добијени квантитативни резултати упоредили са посматрачким подацима. Применом Монте-Карло симулација добијен је спектар интеракције CaWO ₄ детектора са космичким неутронима, који је од суштинског значаја јер ови догађаји маскирају потенцијалну детекцију WIMP-ова.
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	14. 9. 2021.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	28. 9. 2021.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	
KO	
<i>Predsednik:</i>	Проф. др Игор Савић
<i>član:</i>	Проф. др Душан Мрђа
<i>član:</i>	Доц. др Лазар Гавански

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Aleksandra Božilović

AU

Mentor/comentor:

Prof. dr Dušan Mrda

MN

Title:

Distribution and detection of dark matter in the universe

TI

Language of text:

Serbian (Cyrillic)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2021

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

5 chapters/39 pages/11 pictures

PD

Scientific field:

Physics

SF

Дистрибуција и детекција тамне материје у космосу

<i>Scientific discipline:</i>	Astrophysics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	dark matter, WIMP, detection, rotational curves, Monte Carlo simulations
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	This paper describes methods for detection of dark matter particles, with an emphasis on the detection of WIMPs. The rotation curve of the M31 galaxy is modeled in order to compare the obtained quantitative results with the observational data. Using Monte-Carlo simulations, the spectrum of interaction of CaWO ₄ detectors with cosmic neutrons is obtained, which is important because these events mask the potential detection of WIMPs.
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	14. 9. 2021.
ASB	
<i>Defended on:</i>	28. 9. 2021.
DE	
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	Prof. dr Igor Savć
<i>Member:</i>	Prof. dr Dušan Mrđa
<i>Member:</i>	Doc. dr Lazar Gavanski