

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА

МАТУРСКИ РАД
ИЗ ПРЕДМЕТА ФИЗИКА

**ТРАГАЊЕ ЗА ХИГСОВИМ БОЗОНОМ
ПОМОЋУ МИОНСКОГ СПЕКТРОМЕТРА
АТЛАС ДЕТЕКТОРА**

Ученик

Вукашин Милошевић, 4е

Ментор

Мр Ненад Врањеш

Београд, јун 2011.

САДРЖАЈ

УВОД	3
1. СТАНДАРДНИ МОДЕЛ	4
1.1. Увод	
1.2. Атом	
1.3. Стандардни модел и подела честица	
2. ХИГСОВ БОЗОН	12
2.1. Увод	
2.2. Хигсов механизам	
2.3. Особине Хигсовог бозона	
3. АТЛАС ДЕТЕКТОР	15
3.1. LHC	
3.2. АТЛАС експеримент	
4. АПЛИКАЦИЈА НУРАТИА	18
4.1. Увод	
4.2. Основе	
4.2.1. Детектовање трагова честице	
4.2.2. Детектовање честица које се распадају на друге честице	
4.2.3. Мерење ширине честице	
4.2.4. <i>Emiss</i> : Недостајући импулс/енергија	
4.3. Основни делови апликације	
5. ТРАГАЊЕ ЗА ХИГСОВИМ БОЗОНОМ ПОМОЋУ МИОНСКОГ СПЕТРОМЕТРА АТЛАС ДЕТЕКТОРА	23
5.1. Увод	
5.2. Експеримент	
5.3. Закључак	
ЛИТЕРАТУРА	27

Увод

Физика елементарних честица је грана физике која се сваким даном све више и више развија и чији је основни задатак одговор на питање „Шта је основ свега?“ Како је одговор на ово једноставно питање изузетно сложен и дугачак, физичари се труде да све одговоре стопе у један свеобухватни, јединствени. Колико је то огроман и тежак посао говоре чињенице да највећи светски научници још увек нису успели да дају јединствен одговор на ово просто питање (*Ајнштајн је последњих 20 година свог живота провео тражећи једначину за „Теорију свега“ али у томе није успео*).

Теоријски део овог матурског рада представља својеврсан увод у физику честица, упознавање са елементарним честицама, њиховим интеракцијама, Стандардним моделом и упознавање са највећом мистеријом у свету честица, Хигсовим бозоном. Зашто је он тако посебан? По чему се он разликује од других честица? Какво ће нам он сазнање донети о свему што нас окружује па и о нама самима? То су нека од питања на која ће (теоријски) бити одговорено у овом раду.

У практичном делу овог рада, тачније у главама 4. и 5, биће говора о програму *Hypatia* (опис и основе) и о посматрању симулираних догађаја распада Хигсовог бозона на четири миона (такозвани „златни“ распад).

Овај рад може послужити свима који би желели да се упознају са физиком честица, свима онима који би желели да боље разумеју оно што их окружује, а можда касније и наставе са даљим проучавањем, имајући у виду да је ово само мали делић физике елементарних честица, науке која тежи откривању и разумевању основе целог Универзума.

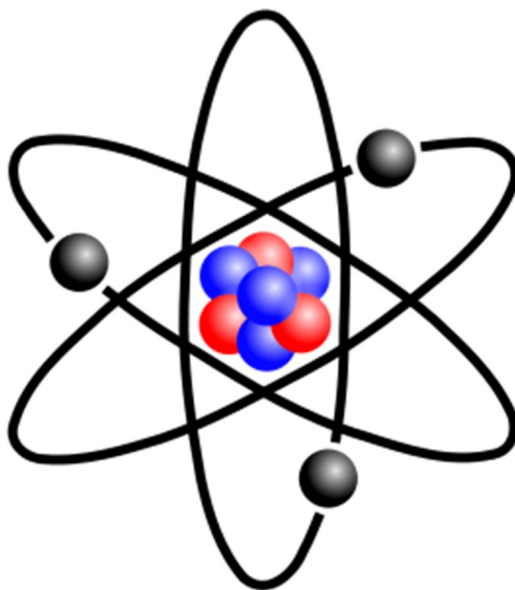
1. СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

1.1. Увод

Од најстаријих времена људи су покушавали да пронађу и класификују објекте који су једноставни и без структуре, тј. нису састављени ни од чега мањег.

Грчки мислилац **Емпедокле** је извршио поделу на четири елемента: ватру, воду, ветар и земљу. **Древни Кинези** су сматрали да су земља, ватра, вода, дрво и метал пет основних компонената физичког универзума, док је у Индији (III век п.н.е) **Исваракрсна у Самкхајакарикас** веровао да су простор, ваздух, ватра, вода и земља пет великих елемената.

1.2. Атом



Слика 1: Графички приказ модела атома

“Оно што се не може разделити” - **áтoмoν**- гр. атомон.

“По конвенцији постоји боја, по конвенцији постоји слатко, по конвенцији постоји горко, али стварно постоје атоми и простор.” Ово су биле речи Грчког филозофа Демокрита из Абдере (~400 п.н.е). По њему свет се састојао из атома и празног простора у коме се атоми вечно крећу чинећи да настају и нестају све ствари.

Почетком XX века људи су представљали атоме као лопте унутар којих одскакују делићи електрицитета. Како је уочено да се атоми могу класификовати у

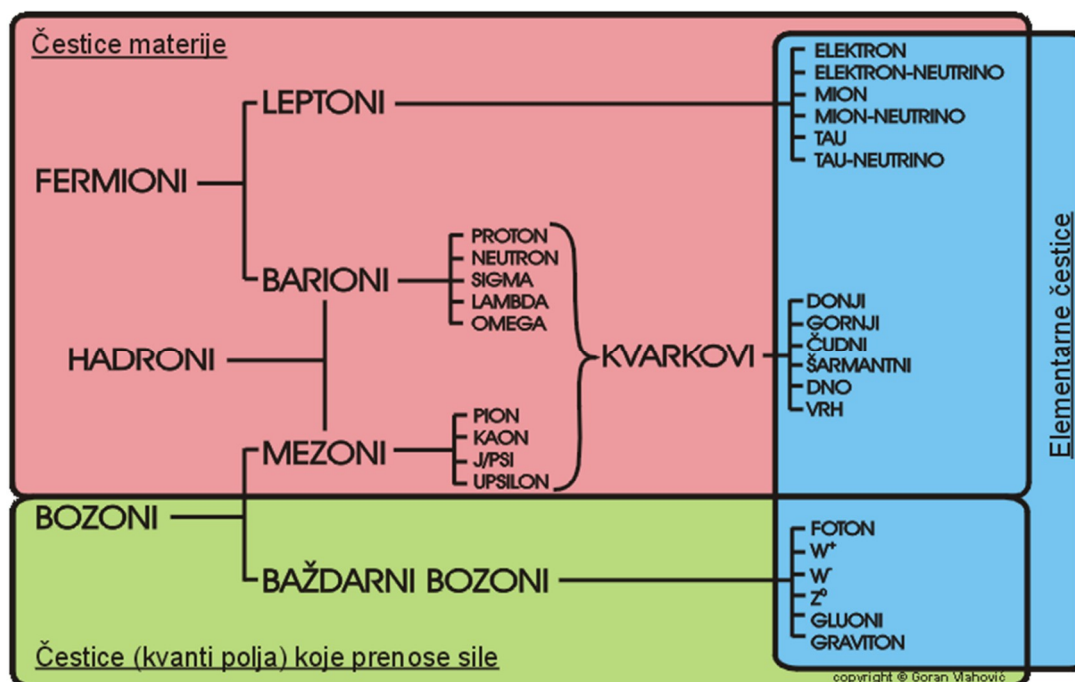
групе које имају сличне хемијске особине (нпр. Периодни систем елемената), закључено је да су атоми сачињени од једноставнијих делова, чије комбинације одређују хемијске особине елемената. Експериментима је утврђено да се атоми састоје од мајушног и густо позитивно наелектрисаног језгра и облака негативно наелектрисаних електрона (Радерфордов експеримент). После је утврђено да се језгро састоји од позитивно наелектрисаних протона (p) и неутрона (n) који су без наелектрисуња, а каснијим експериментима је доказано да се протони и неутрони састоје из још мањих честица које су назване **кваркови**.

Колико се до сада зна, кваркови, електрони (и још неке честице) су као тачке у геометрији, тј. нису сачињене од било чега другог.

1.3. Стандардни модел и подела честица

Стандардни модел је свеобухватна теорија која објашњава од чега је састављен свет који нас окружује и шта га држи на окупу као целину. То је свеобухватна и једноставна теорија која објашњава све **стабилне честице** и њихове сложене интеракције са само:

- **шест кваркова,**
- **шест лептона и**
- **честицама које преносе силу.**



Слика 2: Дијаграмски приказ елементарних честица

Кваркови и лептон имају **античестице** (изузетак су можда неутрини). Како се античестица и честица разликују само по електричном набоју, а пошто гравитација нема особине набоја, следи да ове честице имају једнаке масе. Када се честице материје и антиматерије сусретну, оне анхилирају. Материје има много више у Универзуму од антиматерије и то је појава коју физичари, за сада, не могу објаснити.

Кваркови су елементарне честице које сачињавају протоне, неутроне и све остале сложене честице. Постоји шест аромата кваркова (*аромат означава само различит тип кваркова*). Два најлакша називамо **u (up - горе)** и **d (down- доле) кварк**. Они чине цео космос јер су они облик кваркова са најмањом масом стога најмањом енергијом, тј. најстабилнији су. Трећи кварк је назван **s (strange- чудан)** због необично дугог времена живота честице K, која садржи овај кварк. Четврти кварк се зове **c (charm - шарм)**, док се пети и шести кваркови зову **t** и **b** кварк (**top - врх, bottom – дно**; *раније су се звали truth - истина и beauty - лепота*). **Набој боје** понаша се различито од електромагнетног набоја (наелектрисања). Док кваркови имају набој боје, сложене честице састављене од кваркова немају набој боје (безбојне су). Постоје три набоја боје и три одговарајуће антибоје (црвена, зелена и плава, а спој црвене, зелене и плаве боје је неутрална исто као и спој антицрвене и црвене боје). Сваки кварк има један од три набоја боје, док сваки антикварк има један од три набоја антибоје. Боја је величина која се одржава.

Хадрони су сложене честице које се састоје од кваркова и имају две битне особине. Прва особина хадрона је да су у њима кваркови груписани тако да хадрони имају целобројно нето наелектрисање. Друга битна особина је да хадрони немају набој боје, мада сами кваркови имају. За хадроне је необично да врло мали део њихове масе потиче од кваркова од којих су састављени.

Постоје две врсте хадрона: бариони и мезони.

Бариони су хадрони састављени од три кварка (нпр. qqq).

$$p^+ \rightarrow uud, n \rightarrow udd$$

Мезони су хадрони састављени од једног кварка и једног антикварка ($\bar{q}q$).

$$\pi\bar{\pi}$$

Због тога што се састоје од честице и античестице мезони су врло нестабилни.

Лептони су други тип елементарних честица материје (лепто - гр. *мала маса*). Немају боју па због тога не интерагују јаким интеракцијама. Они могу постојати и као самосталне честице. У универзуму постоји шест типова лептона: електрон, мион, тау лептон и три одговарајућа неутрина.

Електрон, мион и тау су лептони који имају наелектрисање. Мион и тау имају много веће масе од електрона.

Три неутрина - за сваки лептон по један и нису наелектрисани. У Стандардном моделу неутрина имају масу једнаку нули. Неутринске осцилације (прелазак једног неутрина у други) су могуће само ако неутрини имају масу, а постојање осцилација је доказ да Стандардни модел није комплетна теорија. Како немају електрични или јак набој, неутрини скоро никад не интерагују са другим честицама. Већина неутрина прође директно кроз Земљу, а да не интерагује са било којим атомом у њој. Неутрини се продукују у различитим интеракцијама, посебно при распаду честица. Зато што се неутрини тако обилно продукују и ретко интерагују са материјом, има их тако много у Универзуму. Њихова веома мала маса али огроман број, могу допринети укупној маси Универзума и утицати на његово ширење (*мада знамо да их нема довољно да би то било критично*).

Распади лептона - Електрони и три врсте неутрина су стабилни. Мион и тау нису стабилни и они се распадају. Како важе закони одржања, мион може да се распадне само на лакше честице (електроне), при чему се добија електрон, његов антинеутрино и мионски неутрино. Тау, пошто је тежи, може да се распадне на: електрон и неутрина (електронски и тау), мион и неутрина (мионски и тау) или на хдроне (тј. кваркове) и тау неутрино. Лептони се групишу у три **лептонске генерације** које се састоје од лептона и одговарајућег неутрина. Сваку лептонску генерацију карактерише **лептонски број** који се одржава у распаду лептона (лептонски број се одржава у фамилији). Уз помоћ овог (и других) закона одређујемо да ли је распад могућ. Пример: Електрон и његов одговарајући неутрино имају електронски број +1, док позитрон и његов антинеутрино имају -1.

Пример лептонског распада налази се на слици 3.

	mion		mionski neutrino		elektron		elektronски antineutrino
jednačina:	μ	\rightarrow	ν_{μ}	+	e^{-}	+	$\bar{\nu}_e$
elektronски broj:	0	=	0	+	1	+	-1
mionski broj:	1	=	1	+	0	+	0
tau(onski) broj:	0	=	0	+	0	+	0

Слика 3: Распад миона на електрон, мионски неутрино и електронски антинеутрино

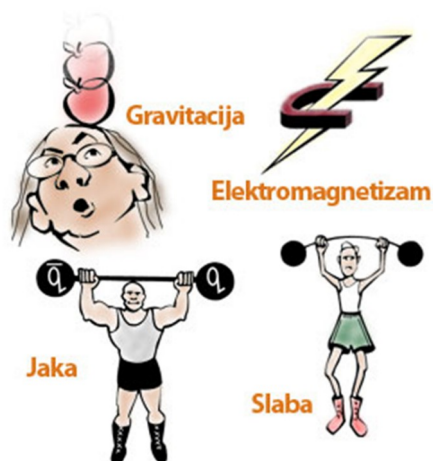
Генерације материје - Сва видљива материја у Универзуму је састављена од честица прве генерације. Нуклеони и језгра се састоје из **u** и **d** кваркова, атоми у себи имају и електроне, док електронски неутрино учествује у реакцијама на Сунцу и звездама (као и у природној радиоактивности). Честице које припадају другој и трећој генерацији су нестабилне и брзо се распадају на стабилне честице прве генерације (генерације су уређене према растућим масама). Посебну групу елементарних честица чине интермедијарни (калибрациони) бозони – преносиоци интеракција између бозона и кваркова.

Kvarkovi	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptoni	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	Generacije materije		

Слика 4: Приказ генерација материје

Четири интеракције - Универзум који познајемо постоји тако што фундаменталне честице интерагују. Постоје четири фундаменталне интеракције између честица и све остале силе се приписују овим интеракцијама:

- Гравитација
- Електромагнетизам
- Јака
- Слаба



Слика 5: Графичка илустрације четири интеракције

Интеракције честица укључују све силе које делују на њу, али такође укључују распадае и анхилације које би честица могла да претрпи. Преносиоце интеракције обично називамо **честицама преносиоцима силе**. У основи, сила није само нешто што се дешава честицама. То је нешто што је пренесено између две честице. Важна ствар коју морамо знати о честицама које преносе силе је да одређена честица, која преноси силе, може бити апсорбована или продукована само од честице материје на коју делује дотична сила. На пример, електрони и протони имају наелектрисање, тако да могу да произведу или апсорбују фотон (честица која преноси електромагнетну силу). Са друге стране, неутрини немају наелектрисање, тако да не могу да произведу или апсорбују фотон.

Гравитациона сила није укључена у Стандардни модел пошто она постаје значајна тек када масе објеката достигну ред величине Планкове масе (ипак, *аналогно са осталим интеракцијама, теорија предвиђа постојање честице преносиоца гравитационе силе – гравитона*).

Електромагнетна сила (ЕМ) делује тако да се објекти истог наелектрисања одбијају, док се објекти различитог наелектрисања привлаче. Многе од свакодневних сила као што су трење и магнетизам су узроковани електромагнетним силама. На пример, сила која нас спречава да пропаднемо кроз под је електромагнетна сила која пружа отпор померању атома наших ногу, односно пода. Резидуална ЕМ сила је ефекат који утиче да се атоми везују заједно, тј. да наелектрисани делови једног атома могу интераговати са наелектрисаним деловима другог атома. Честица која преноси електромагнетну силу је **фотон**. Он је честица без масе мировања која може постојати само ако се креће брзином светлости. Наелектрисање фотона је такође једнако нули.

Јака сила држи на окупу кваркове и формира хадроне, стога се честице које преносе ову силу називају **глуони**. Назив потиче од енглеске речи *glue*, која значи лепак. То је најјача сила у природи. Јача је и од електромагнетне и због ње се протони држе заједно у језгрима атома. Делује само на врло малим

растојањима. Код тешких атома језгра се распадају, јер је електромагнетна сила која раздваја честице истог набоја једнака укупном збиру свих сила присутних протона и надјачава резидуалну јаку силу, која делује само на суседне честице (протоне или неутроне) и држи их скупа. Неутрони су овде само посредници који онемогућавају директан контакт између протона.

Ако су два протона удаљена више од $2 * 10^{-15} m$, на њих више не делује јака сила. Она се појачава уласком преко граничног прага силе а најјача је при растојању од $10^{-15} m$. Међутим, ако се нуклеони приближе преко границе где је сила најјача, онда ће она почети да слаби да би код растојања од око $0.5 * 10^{-15} m$ постала одбојна.

И кваркови и глуони су обојене честице. Када су два кварка близу, они измењују глуоне и тако стварају јако поље обојене силе која везује кваркове у хадроне. Када се кваркови удаљавају, онда јака сила почиње да се повећава. Кваркови стално мењају боју приликом размене глуона са другим кварковима, а како је боја величина која се одржава, очекивали бисмо девет различитих глуонских набоја, али из глуонских прорачуна се види да има само осам комбинација. Честице са набојем боје су стално заробљене у хадроне који су безбојни. Кваркови не могу постојати индивидуално пошто сила боје расте приликом њиховог растављања. Наиме, ако се кварк откине од свог „суседа“, поље силе се растегне између тог кварка и суседа додавајући све више и више енергије пољу. У једном тренутку постаје енергетски ефикасније за поље да пукне, производећи нови кварк-антикварк пар (енергија се одржава јер се енергија претвара у масу нових кваркова, а поље силе се враћа назад у своје основно стање).

Слаба сила је одговорна за распад тешких кваркова и лептона. Када кварк или лептон мења свој тип, каже се да мења аромат. Све промене аромата потичу од слабе интеракције. Честице преносиоци слабих интеракција су W^+ , W^- и Z бозони. W бозони су наелектрисане док је Z електрично неутрална. Стандардни модел је објединио електромагнетне и слабе интеракције у једну обједињену интеракцију која се зове електрослаба интеракција (електрослаба теорија). Физичари су закључили да слабе и електромагнетне силе имају у суштини једнаку јачину (на одређеној енергији). То је зато што јачина интеракције јако зависи од масе преносилаца силе и од растојања на коме делује. Разлика између њихових опсервираних јачина потиче од огромне разлике у маси W и Z честице, које имају велике масе и фотона који, колико знамо, нема масу.

Особина честице која нам је од велике важности је **спин**. Велики објекти као што су планете могу имати ангуларни момент и магнетно поље због своје ротације (енгл. *спин*). Како и честице имају сопствени ангуларни момент и мале магнетне моменте, физичари их називају спином. Спин је квантован у јединицама $0, 1/2, 3/2, \dots$ (пута Планкова константа \hbar).

Паулијев принцип искључења говори да две честице у истом квантном стању не могу постојати на истом месту у истом тренутку.

Али, откривена је група честица које не задовољавају Паулијев принцип и оне су назване бозони, док су оне која га задовољавају назване фермиони.

Фермион је било која честица која има полуцели спин. Кваркови и лептони и већина сложених честица као што су протони и неутрон, су фермиони.

Бозони су честице са целобројним спином. Све честице преносиоци силе су бозони, као и сложене честице са парним бројем фермиона (мезони).

Језгро атома је фермион или бозон у зависности од тога да ли је укупан број протона и неутрона паран или непаран.

2. ХИГСОВ БОЗОН

2.1. Увод

Хигсов бозон је хипотетичка масивна елементарна честица чије је постојање предвиђено Стандардним моделом. Она је последица такозваног Хигсовог механизма који је део Стандардног модела и чија је функција објашњење порекла масе свих познатих елементарних честица.

Хигсов Бозон је једина честица Стандардног модела која није откривена експериментално. Тренутно се врше експерименти уз помоћ којих би требало да се потврди постојање ове честице (LHC у CERN-у и Tevatron у Fermilab-у).

Хигсов бозон би, уколико буде откривен, објаснио разлику између фотона (који нема масу и преноси електромагнетну силу) и W и Z бозона (који имају масу и преносе слабу силу).

Хигсов бозон припада честицама скаларних бозона (бозони имају целобројан спин, док је спин скаларних бозона 0). У природи не постоји елементарни скаларни бозон, али многе сложене спин-0 честице су познате.

2.2. Хигсов механизам

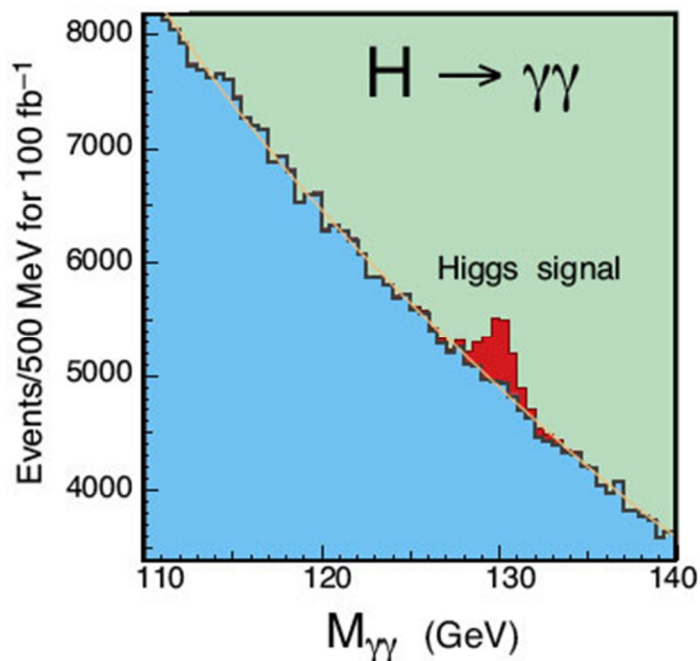
Физичарима је још од седамдесетих година прошлог века познато да се електромагнетна и слаба сила могу ујединити у једну јединствену, електрослабу, силу, под условом да су честице које преносе те силе безмасене. Фотон, преносиоц електромагнетне силе је без масе док преносиоци слабе силе (W и Z бозони) имају масу од око 80 и 90 GeV. Међутим, уједињење ових двеју сила је могуће претпостављањем постојања нове масивније скаларне честице (Хигсовог бозона) која омогућава да W и Z бозони постану масивније честице (Хигсов механизам спонтаног нарушења симетрије). Наиме, претпостављено је да поред већ познатих поља у природи постоји бар још једно скаларно Хигсово поље и да кваркови, наелектрисани лептони, а такође и W и Z бозони стичу масу интерагујући са Хигсовим пољем.

2.3. Особине Хигсовог бозона

Да би у потпуности разумели механизам генерисања масе честица физичари морају да пронађу Хигсов бозон или да оповргну његово постојање. Иако Хигсов бозон још увек није откривен, теоријски су предвиђене све његове особине осим масе, која је слободан параметар у моделу. У ком масеном опсегу би онда требало тражити Хигсов бозон?

Из претходних експеримената, у којима није откривен Хигсов бозон, изведен је закључак да Хигсов бозон мора имати масу већу од 114.4 GeV, док по теоријском модулу следи да би његова маса требало бити мања од 1000 GeV (масу хиљаду протона), али је уз помоћ прецизнијих мерења распада Z и W бозона горња граница масе Хигс бозона постављена на 200 GeV. Цео овај опсег енергија је доступан на LHC који је пројектован да ради на 14 TeV (тако да ће се уз помоћ њега разрешити мистерија Хигс бозона).

На LHC енергијама Хигсов бозон се, уколико постоји, углавном производи анихилацијом два глюона, честица које преносе јаку интеракцију. Знатно ређе, Хигсов бозон се производи и анихилацијом кварка и антикварка уз продукцију W и Z бозона. Постоји више начина на које би Хигс бозона могао да се распадне, а они зависе од његове масе. Уколико му је маса већа о две масе W бозона ($2m_W$), он се распада у пар калибрационих (баждарних) бозона ZZ и WW . Распад Хигса на два Z бозона, који се даље распадају на по два лептона, или $ZZ \rightarrow 4\ell$, назива се **златни канал**, јер има прилично јасан експериментали потпис и ослобођен је фонских процеса (слика 12б). Уколико му је маса мања од $2m_W$, онда се примарно распада на пар тежих фермиона, кварк и његов антикварк или на тау лептон и његову античестицу. Међутим, трагање за Хигсовим бозоном би у овим случајевима било изузетно тешко, јер ће фонски процеси који потичу од лакших u, d, s и s кваркова и о глюона бити сувише велики. Због тога се, углавном, за лакшим Хигсом трага уз помоћ распада на два фотона ($H \rightarrow \gamma\gamma$). Вероватноћа овог распада је веома мала и износи 0.002 али је сигнатур лако препознатљив у детектору.

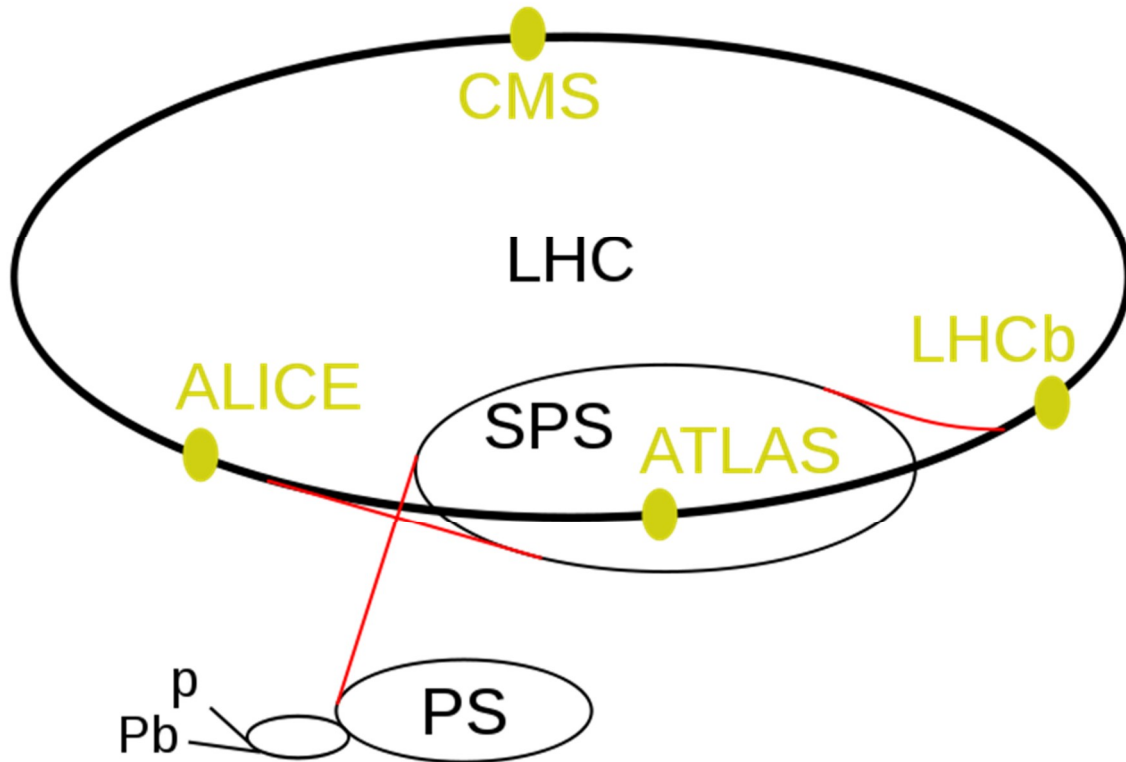


Слика 6: Инваријантна маса Хигс бозона (црвена боја) се истиче изнад фона (плава боја)

Сви досадашњи прорачуни показују да ће АТЛАС детектор (у оквиру LHC) детектовати Хигсов бозон уколико постоји. Међутим, уколико је Хигс релативно лак, а на основу прецизних мерења са колајдера LEP очекујемо да јесте, откриће Хигса на LHC-у неће ићи тако лако и захтеваће две или три године сакупљања података, након што LHC почне да ради на енергији за коју је пројектован, да би Хигс био пронађен (уколико постоји).

3. АТЛАС ДЕТЕКТОР

3.1. LHC

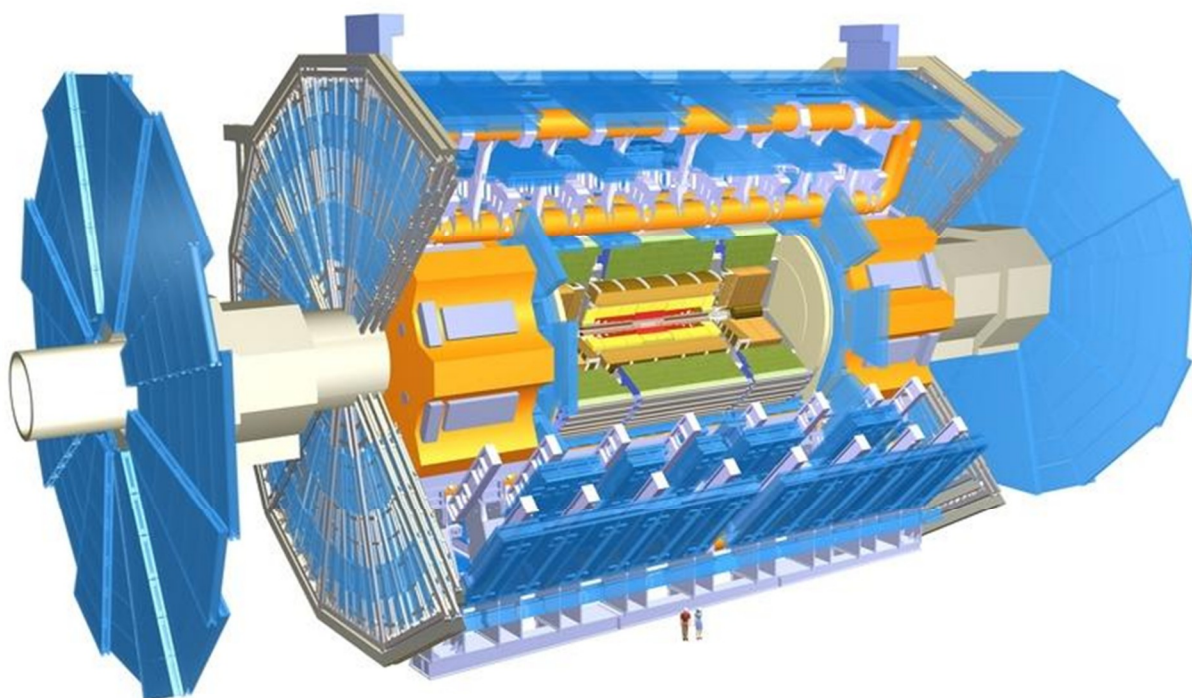


Слика 7: Акцелераторски комплекс у CERN-у

Велики хадронски колајдер (енгл. *Large Hadron Collider*) је највећи светски акцелератор. Од њега се очекује да пружи одговоре на многа фундаментална питања физике, унапређујући људско разумевање најдубљих закона природе. LHC се налази у тунелу испод Француско-Швајцарске границе близу Женева (Швајцарска). Дизајниран је да омогућава сударе протона на енергији од 7 тераелектронволта по протону. Израз хадронски у његовом називу указује да су честице које се сударају хадрони (протони) или су сачињене од хадрона (језгра олова). Састављен је од стране Европске организације за нуклеарна истраживања (CERN) ради, између осталог, потврђивања постојања теоријски предвиђеног Хигзовог бозона.

3.2. Атлас експеримент

АТЛАС (енгл. *A Toroidal Lhc ApparatuS*) је један од шест детектора честица конструисаних у оквиру LHC-а. Дугачак је 44м, широк 25м у пречнику, укупне тежине од 7000 тона. Четири главне компоненте АТЛАС детектора су: унутрашњи детектор, електромагнетни и хадронски калориметар, мионски спектрометар и магнетни систем.



Слика 8: 3Д модел АТЛАС детектора

Унутрашњи детектор почиње неколико центиметара од осе протонског зрака, шири се до пречника од 1.2 м, док је дугачак 7 м дуж цеви зрака. Његова основна функција је да прати наелектрисане честице детектујући њихову интеракцију са материјалом у дискретним тачкама, откривајући детаљне информације о њеном импулсу. Магнетно поље које окружује читав унутрашњи детектор, присиљава наелектрисане честице да се крећу по закривљеним путањама. Правац криве открива наелектрисање честице, док степен закривљености открива њен импулс.

Калориметри су позиционирани изнад соленоидног магнета који окружује унутрашњи детектор. Њихова сврха је да мере енергију честица апсорбујући их. Постоје два калориметарска система: унутрашњи, електромагнетни и спољашњи, хадронски калориметар.

Мионски спектрометар је изузетно велики систем који се простире од радијуса 4.25м око калориметара до пуног радијуса детектора 11м. Његова изузетна величина је потребна ради тачног мерења импулса миона, који пролазе кроз остале елементе детектора. Спектрометар мери импулсе и реконструира трајекторије миона, јединих наелектрисаних честица које се не заустављају у калориметрима. Мерење импулса је могуће независно од унутрашњег детектора и заснива се на скретању мионских трагова у магнетном пољу суперпроводних аир-цоре тороидних магнета.

Магнетни систем - Атлас детектор користи два велика суперпроводна магнетна система да искриви путање наелектрисаних честица тако да њихов импулс буде мерљив. Ово скретање је последица Лоренцове силе, која је пропорционална брзини. Како се све честице произведене у LHC-овом судару протона крећу брзинама близу брзине светлости, сила честица различитих импулса је једнака (*по теорији релативности, импулс није пропорционалан брзини при толиким брзинама*). Пошто ће честице са великим импулсом имати мало закривљену путању, честице са мањим импулсом ће имати знатно већу закривљеност. Степен закривљености може бити израчунат и импулс честице може бити израчунат уз помоћ њега.

4. АПЛИКАЦИЈА НУРАТИА И ОСНОВЕ ДЕТЕКТОВАЊА ЧЕСТИЦА

4.1. Увод

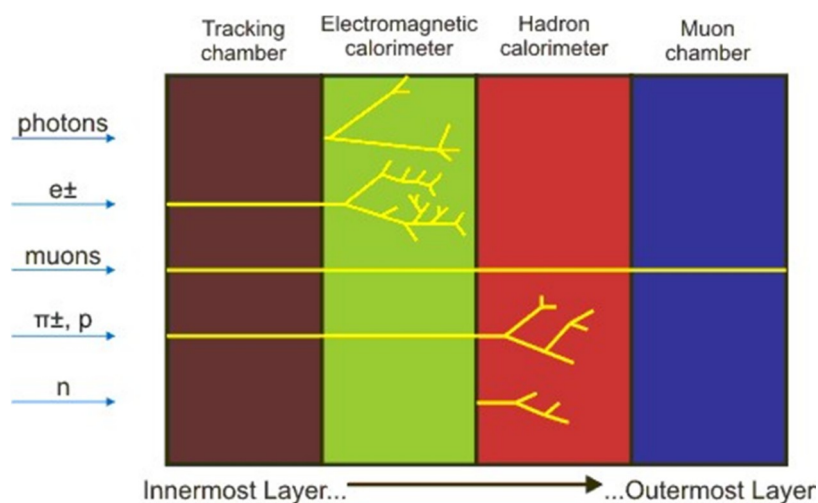
Нуратиа (*Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in Atlas* - енгл.) је едукациони програм намењен изучавању честичне физике. Пројекат Нуратиа (<http://hypatia.phys.uoa.gr/>) омогућава изучавање основних честица материје и њихових интеракција уз обсервирање и графичку визуелизацију продуката судара честица на LHC-у. Ови продукти су “догађаји” детектовани од стране АТЛАС експеримента у новом светском најснажнијем акцелатору честица (LHC) у CERN-у.

4.2. Основе

4.2.1. Детектовање трагова честице

Кроз цео пројекат циљ свега је посматрање различитих догађаја насталих сударом протона са протонима. Први предмети посматрања биће трагови које честица оставља у различитим деловима детектора и путања које се добијају спајањем трагова исте честице. Гледано од центра детектора (места где долази до судара), постоје кратки и дугачки трагови. Кратки трагови могу припадати било којој наелектрисаној честици али дуги трагови могу припадати само мионима који су једине наелектрисане честице које могу да доспеју до најудаљенијих делова детектора.

Следећа слика (слика 9) показује како различите честице интерагују са различитим деловима детектора. Битно је нагласити да неутралне честице остављају трагове само у калориметрима, док са друге стране неутрино су “невидљиви”, односно не остављају никакав траг. Једини начин да се открије њихово присуство је услед постојања недостајуће енергије.



Слика 9: Графички приказ проласка честица кроз делове детектора

4.2.2. Детектовање честица које се распадају на друге честице

Када се примети да два или више трагова у детектору потичу из исте тачке (која се назива “vertex”), то значи да они могу потицати од једне честице која се распала. Како би се проверила та тврдња мора се израчунати “инваријантна маса” оригиналне честице и истражити да ли су продукти распада дошли од исте те честице.

Инваријантна маса, која се такође назива и “маса мировања”, је карактеристична за честицу. По Ајнштајновој теорији, инваријантна маса је величина која се не мења са променом брзине или референтог оквира. Ако су јединице изабране тако да је брзина светлости $c=1$, онда је инваријантна маса дефинисана као

$$m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

при чему је E енергија, а p импулс честице. Ако посматрамо продукте распада те честице, морамо измерити енергију и импулс сваке честице и онда израчунати суму свих њихових енергија

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

и импулса

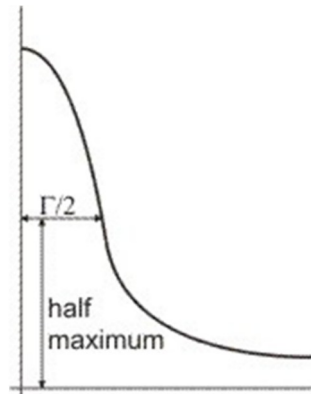
$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots$$

Резултат је инваријантна маса и уколико је посматрана једна честица, онда би израчуната маса при сваком догађају требало да буде приближно иста, стога уколико мерите масу при различитим догађајима, видећете (на графику) “шиљак” (врх) око масе честице.

4.2.3. Мерење ширине честице

Из разлога који су повезани са принципом неодређености, следи да уколико је период живота честице кратак, онда њена енергија, а уједно и инваријантна маса, има неодређеност $(\Delta p \Delta x \sim \Delta(p c) \Delta(\frac{x}{c}) \sim \Delta E \Delta t \theta \lesssim \hbar)$.

Она нема увек исту вредност али њен хистограм (дистрибуција вредности) има “врх” око номиналне масе и има неку ширину.



Слика 10: Хистограм инвариантне масе

Ширина полумаксimumа је обележена са Γ и она је повезана са полуживотом честице. Ширина честице даје веома важне информације и мора бити измерена. Као пример наглашава се да је мерење ширине Z-бозона у LEP-у (бившем акцелератору у CERN-у који је замењен са LHC-ом) дало веома добру процену о броју различитих типова неутрина који постоје.

4.2.4. Emiss: Недостајућа енергија

Ово је енергија која није измерена у детектору, али је очекивана због закона одржања енергије и импулса. Емисија је генерално везана за честице које прођу кроз детектор непримећене, као неутрини (иако изгледа да недостатак енергије може бити од непрецизног мерења енергије детектоване честице). У LHC-у, иницијални импулс конституената судара по осам зрака није познат (јер је енергија сваког хадрона подељена и стално се размењује између његових конституената), стога количина недостајуће енергије не може бити одређена. Али, иницијалне енергије и импулси трансверзално на осу снопа износе нула, стога сваки импулс означава недостајућу попречну енергију (Emiss). Она је представљена (на приказу догађаја) са испрекиданом линијом која поред вредности (*магнитуда попречне недостајуће енергије*) показује и правац нестале трансверзалне енергије.

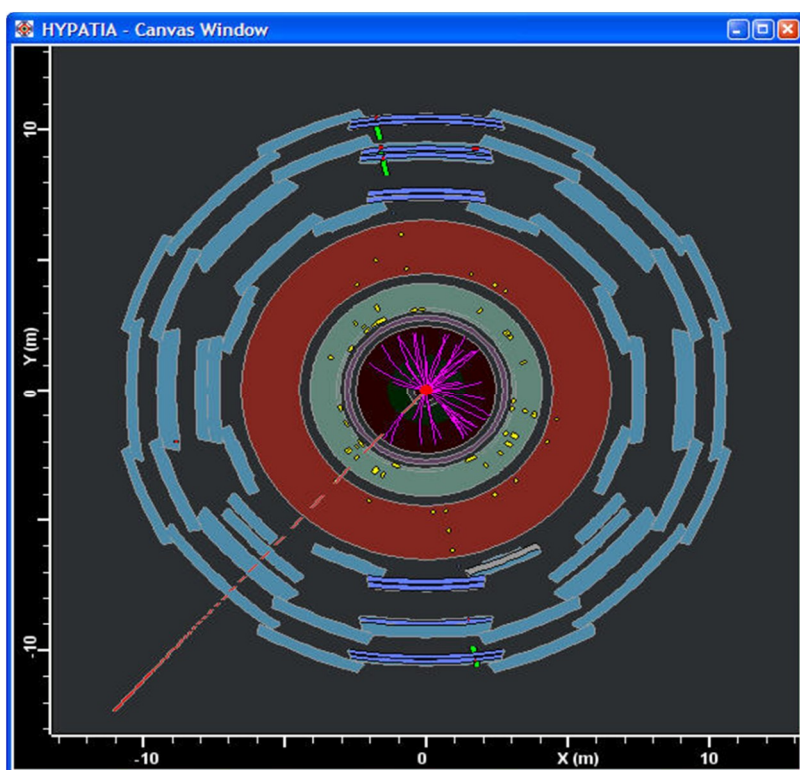
4.3. Основни делови апликације

У Hupatia постоје четири прозора (windows) на којима се налазе све потребне информације:

- Invariant Mass Window
- Canvas Window
- Track Momenta Window
- Parameters Window

Invariant Mass Window – главни прозор за анализирање података у апликацији. На њему се могу видети трагови сваког догађаја (или неког, *све зависи како корисник жели*), као и све физичке величине битне за даљу анализу (импулс...). За сваки догађај програм аутоматски рачуна инваријантне масе комбинације изабраних честица.

Canvas Window – прозор у којем се налази главни дисплеј догађаја (Atlantis). Свака компонентна детектора је графички приказана (у кружном облику), као и сваки траг догађаја (*слика 11*).



Слика 11: Canvas Window апликације Hupatia

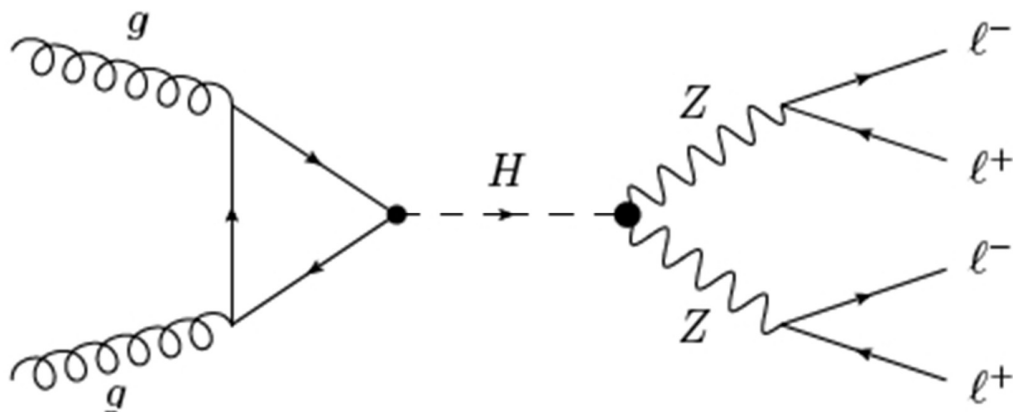
Постоје два могућа погледа на детектор која се могу мењати кроз опцију “Control window”. Поглед спреда је пројекција нормална на осу зрака. У тој пројекцији почетни импулс једнак је нули, стога укупан импулс представља недостајући трансверзални импулс (енергију). У овом случају он је представљен испрекиданом линијом која показује смер недостајућег импулса (енергије). Вредност E_{miss} је приказана у заглављу “Track momenta” прозора. Али, због оваквог посматрања може доћи до погрешне процене да одређене честице нису дошле до спољних слојева, иако јесу (због немогућности процене када се честица креће претежно напред).

Track Momenta Window – на њему се могу видети сви импулси и све енергије трагова који су обележени од стране корисника и убачени у анализу.

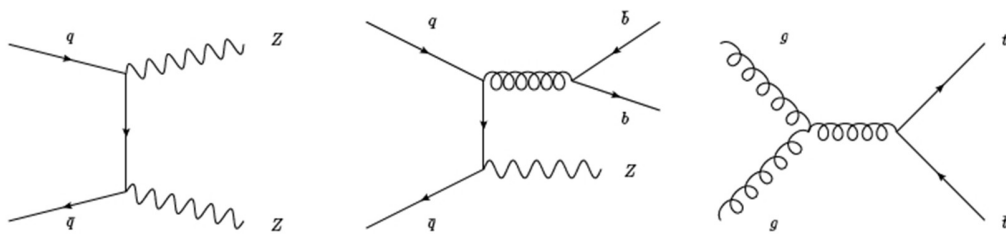
Control Window – омогућава промену погледа, обележавање трагова који ће бити праћени. Користи се за подешавање параметара у апликацији.

4.4. Кратак преглед експеримента

Распади Хигсовог бозона који су најлакши за тражење су они на: четири миона, четири електрона или два електрона и два миона (слика 12а). За сврху овог експеримента у прозору “Invariant Mass” ће бити анализирана четири трага. Треба изабрати и убацити у прозор четири трага за која се сматра да су последица Хигсовог распада. Тада ће инваријантна маса четири честице бити израчуната у колони . Уколико добијена инваријантна маса није “задовољавајућа” могу се изабрати нека друга четири трага и програм ће аутоматски израчунати нову инваријантну масу. Уколико Хигсов бозон постоји и уколико су изабрани “добри” трагови видеће се акумулација догађаја око неке специфичне вредности масе, која је, надамо се, Хигсов бозон.



Слика 12а: Распад Хигсовог бозона на два Z бозона



Слика 12б: Дијаграм фонских процеса (ZZ, Zbb , tt)

5. ТРАГАЊЕ ЗА ХИГСОВИМ БОЗОНОМ УЗ ПОМОЋ МИОНСКОГ СПЕКТРОМЕТРА АТЛАС ДЕТЕКТОРА

5.1. Увод

Трагање за Хигсовим бозоном је један од главних циљева LHC-а. Маса Хигсовог бозона је слободан параметар у Стандардном моделу, али постоји велико очекивање, подржано претходним експериментима, да ће Хигсов бозон мале масе (114.4-199 GeV) бити откривен у LHC-у. Експериментално „најчистији” траг за откривање Хигсовог бозона је „златни” распад на четири лептона миона или електрона (у овом раду су коришћени распади на четири миона):

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$

Најизазовнији масени регион је онај између 120-150GeV где је један од Z бозона изван љуске (енг. off shell – Z^*) производећи лептоне малог трансверзалног импулса. У овом региону фон потиче од $Zb\bar{b}, t\bar{t}$ и ZZ . Одлична резолуција енергије и линеарност реконструисаних миона доводе до уског четворолептонског врха на графику инваријантне масе.

5.2. Анализа догађаја

Пре обрађивања података (који су симулирани и налазе се у .xml формату) у Hupatia програму, морају се поставити услови под којима би посматрани миони били продукти распада Хигсов бозона.

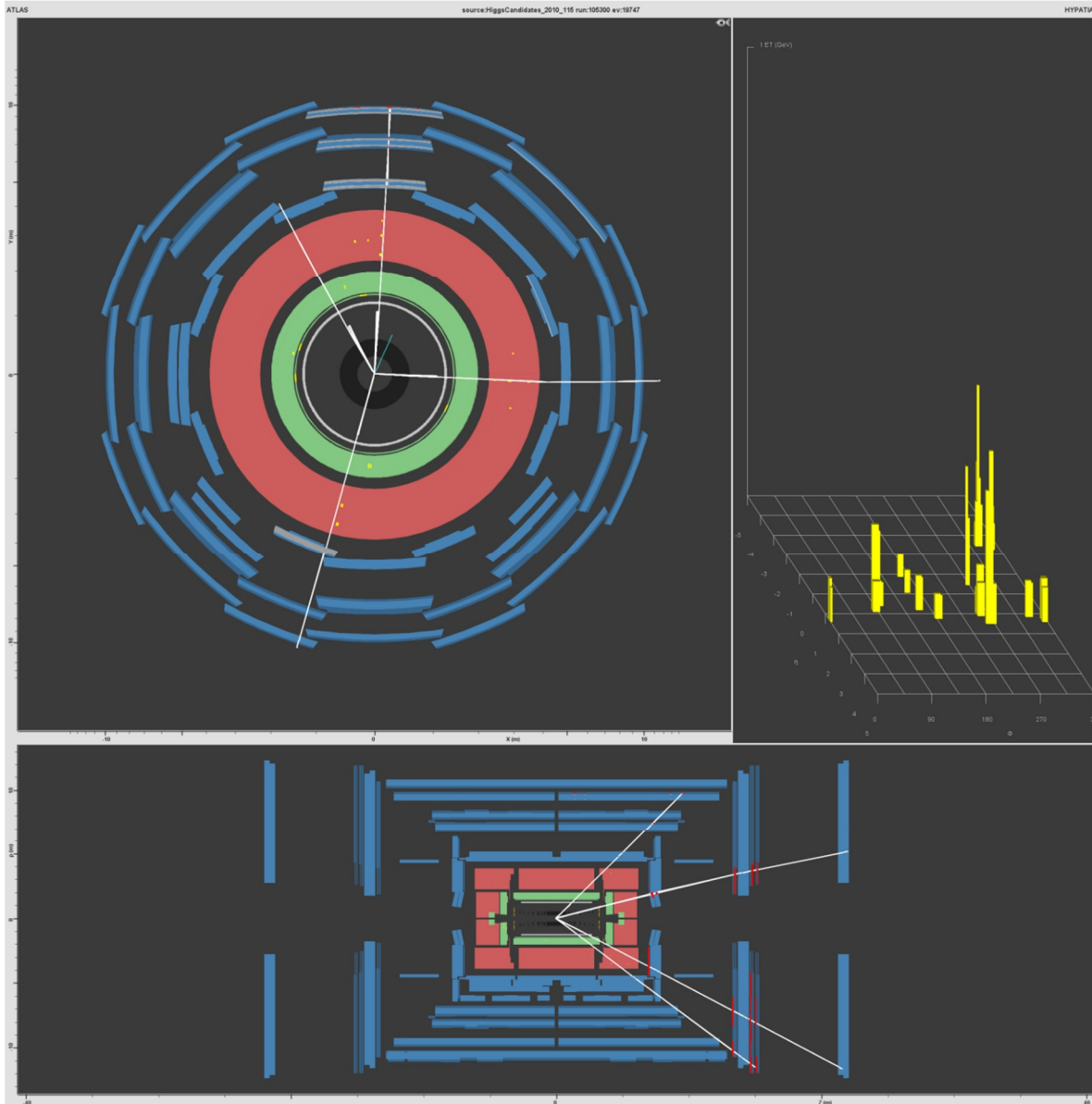
Први услов би био да трансверзални импулс сваког посматраног миона мора бити већи од 7GeV ($p_t > 7\text{GeV}$), односно да у посматраном догађају постоје бар четири миона чији је трансверзални импулс већи од 7GeV и да од та четири миона два морају бити „+” а два „-” знака.

Други услов би био да бар два од посматрана четири импулса (супротног знака) морају имати трансверзални импулс већи од 20GeV-а и да је инваријантна маса та два лептона у опсегу од 76-106 GeV ($p_t > 20\text{GeV}, 76\text{ GeV} < m_{2\mu} < 106\text{ GeV}$) што је у распону масе Z бозона ($m_Z \sim 91\text{ GeV}, (91 - 15)\text{ GeV} < m_{2\mu} < (91 + 15)\text{ GeV}$).

Трећи услов је да инваријантна маса остала два миона буде већа од 20 GeV (последича off shell Z^* бозона $m_{2\mu} > 20\text{ GeV}$).

Поред ових главних услова постоје још два помоћна која би могла олакшати разматрање, што је од изузетне помоћи када постоји више од четири кандидата. Први би био да сваки мион мора бити изолован, да у његовој близини не сме бити других трагова (тј. да миони нису произведени у распаду jet-ова), док би други услов био да Emiss („недостајућа” енергија) буде мала. Наравно, ови помоћни услови могу, а и не морају бити коришћени. Битно је још напоменути да

се ови догађаји морају посматрати из више перспектива јер се може десити да мион пролази све до крајње коморе а да остане не селектован приликом анализе због „варке“ која је створена гледањем само попречног пресека.



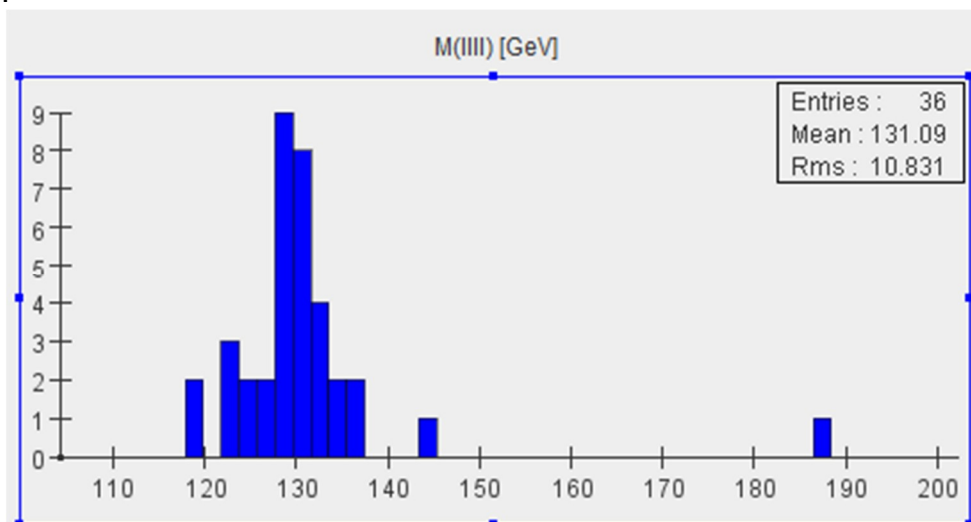
Слика 13: Снимак Canvas Window (Atlantis) са четири миона која пролазе све услове (један од миона је малог импулса па стиже само до прве коморе тако да је коришћен и иннер детектор за његово реконструисање).

Део табеле догађаја која се добија у Invariant mass window после извршене селекције је приказан на слици 14.

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	ψ	η	M(2l) [GeV]	M(4l) [GeV]	e/lj
HiggsCandidates_2010_95.xml	45.176	Tracks 0	59.2	+	45.3	-1.030	0.763	90.892	128.796	μ
		Tracks 11	40.5	-	40.4	2.123	0.065			μ
		Tracks 1	15.3	+	12.3	-0.423	-0.688	37.416		μ
HiggsCandidates_2010_97.xml	8.869	Tracks 2	24.0	-	13.5	3.119	1.179			μ
		Tracks 5	46.6	+	40.9	-2.379	-0.525	85.261	132.135	μ
		Tracks 47	64.8	-	64.4	-0.632	0.105			μ
		Tracks 1	21.5	-	21.0	0.987	-0.228	32.663		μ
HiggsCandidates_2010_98.xml	4.388	Tracks 8	13.3	+	13.3	-2.653	0.055			μ
		Tracks 6	35.4	+	23.5	2.940	0.969	80.148	118.178	μ
		Tracks 0	164.1	-	70.0	-0.828	1.497			μ
		Tracks 12	11.9	-	11.9	-1.615	-0.014	26.049		μ
HiggsCandidates_2010_99.xml	8.114	Tracks 5	37.9	+	17.2	-2.567	1.428			μ
		Tracks 16	80.7	-	75.3	-2.900	0.376	92.097	131.409	μ
		Tracks 21	41.0	+	25.9	-0.073	1.033			μ
		Tracks 20	11.2	-	11.2	1.301	0.108	23.867		μ
HiggsCandidates_2010_100.xml	77.062	Tracks 0	16.7	+	8.8	-2.449	-1.259			μ
		Tracks 2	79.0	-	67.0	0.127	-0.591	82.707	129.704	μ
		Tracks 85	28.9	+	24.4	1.995	0.804			μ
		Tracks 3	30.0	+	20.3	-1.687	-0.943	31.671		μ
HiggsCandidates_2010_102.xml	26.342	Tracks 63	8.9	-	7.5	2.048	0.615			μ
		Tracks 0	85.1	+	29.2	2.269	-1.731	90.835	130.688	μ
		Tracks 6	28.2	-	21.3	-2.040	0.787			μ
		Tracks 1	11.7	-	7.5	2.141	1.010	29.032		μ
		Tracks 41	20.4	+	18.2	-0.255	-0.492			μ

Слика 14: Табела у invariant mass window

Применом наведених услова на догађаје у програму Hypatia (<http://hypatia.phys.uoa.gr/Downloads/>) добија се табела (слика 16) која показује број догађаја који су прошли сваки појединачни селекциони услов. Посматрањем ове табеле видимо да помоћни услови повећавају прецизност наше анализе тако што умањују могућност погрешног препознавања миона и њиховог порекла (самим тим и смањују присуство фона). На основу ове табеле и табеле која се налази у Invariant window уз помоћ програма Hypatia добијамо хистограм масе четири лептона на којем се јасно види „врх“ на приближно 130GeV (слика 15). Уколико се изостави примена помоћних услова више догађаја ће проћи селекцију (нпр. уколико занемаримо велику E_{miss}), али ће врх и даље бити на приближно 130GeV.



Слика 15: Хистограм масе четири лептона добијен селекцијом догађаја у програму Hypatia

Селекција	Прошло	Отпало	Укупно догађаја
Основни услови			67 (100%)
$p_t > 7 GeV$	57 (85.07%)	10 (14.92%)	67 (100%)
Супротног знака	56 (83.58%)	16 (16.42%)	67 (100%)
$p_t > 20 GeV$	51 (76.12%)	11 (23.88%)	67 (100%)
$(91 - 15) GeV < m_{2\mu} < (91 + 15) GeV$	50 (74.63%)	17 (25.37%)	
$m_{2\mu} > 20 GeV$	48 (71.64%)	19 (28.36%)	
Помоћни услови	Основне услове је прошло 45 догађаја		
Мала Emiss	43 (64.18%)	13 (19.40%)	56 (83.58%)
Изолација	39 (58.21%)	17 (25.37%)	56 (83.58%)
Све услове	36 (53.73%)	31 (46.27%)	67 (100%)

Слика 16: Табела догађаја после примењене селекције

5.3. Закључак

Анализом симулираних догађаја „златног распада“ Хигсовог бозона у програму Hupatia и применом одређених услова селекције добијамо „врх“ на хистограму масе четири лептона. На основу теоријске основе и горе наведене анализе види се да су догађаји са распадом Хигсовог бозона добро селектовани јер се „врх“ јавља на предвиђених $\sim 130 GeV$.

За разлику од симулираних догађаја за доказ постојања Хигсовог бозона и налажење његове масе било би потребно много више података, услова, посматрања и наравно времена.

Литература:

1. Марија Милосављевић, "Search for the MSSM H/A Higgs boson decaying to muons"
2. <http://particleadventure.phy.bg.ac.rs/index.html>
3. Г.П.Шкоро, Увод у експерименталну физику честица
4. <http://hypatia.phys.uoa.gr/>
5. <http://www.atlas.ch/>
6. <http://cdsweb.cern.ch/record/1174256/files/ATL-PHYS-PUB-2009-054.pdf>
7. Републички семинар о настави физике 2010: Драган С. Поповић, Љиљана Симић, Питања за Велики хадронски колајдер у CERN-у