

Велики хадронски сударац LHC и нова ера физике честица (Други део)

Пише: Петар Аџић

Физичари и велики део светске научне јавности очекују да ће Large Hadron Collider–LHC, чија се градња приводи крају у Европској организацији за нуклеарна истраживања–CERN, у сударима протонских снопова да створи услове за боље разумевање и нова сазнања о фундаменталним интеракцијама и елементарним честицама на енергијама и у условима у којима до сада изучавања ове врсте нису била могућа. Реализација амбициозних истраживачких програма планирана је на до сада највишим енергијама и при рекордним вредностима луминозности што имплицира специфичне услове у којима ће при извођењу експеримената морати беспрекорно да функционишу сви детекциони системи. У таквим експерименталним условима и уз високе истраживачке захтеве, неопходна је висока поузданост сваког дела сложеног детекционог система. Имајући у виду постојеће вишегодишње истраживачке програме у овој области физике, могло је да се очекује да ће такви амбициозни истраживачки циљеви подстаћи промовисање нових технолошких захтева који треба да омогуће напредак и нов замах европске индустрије у развоју најмодернијих технолошких решења, првенствено: у науци о материјалима, у електроници, компјутерској технологији, као и у модерном инжењерству са посебним акцентом на машинство и грађевинарство. Оправданост ове тврдње најбоље може да се илуструје на примеру истраживачких пројеката у CERN-у. У том научном центру у коме раде врхунски истраживачки тимови и чије су лабораторије опремљене увек најмодернијом опремом, крајем 2000. године комплетиран је истраживачки програм на једном сличном акцелераторском постројењу, на Великом колајдеру електрона и позитрона–LEP (Large Electron Positron collider). Изградња и више него успешна једанаестогодишња експлоатација тог, до пуштања у рад LHC-а, још увек највећег и најсложенијег акцелераторског постројења, представљали су драгоцену искуство у готово идеалном споју резултата фундаменталних истраживања и њихове непосредне примене. Познато је да су фундаментална истраживања, поред своје доминантне улоге у подизању стандарда на пољу истраживања и у образовању научних кадрова, увек била генератор развоја примењених истраживања и генератор развоја нових технологија које пак, са своје стране, на најдиректнији начин стимулишу генерацију нових експеримената из којих треба опет да произађу нови истраживачки захтеви и изазови.

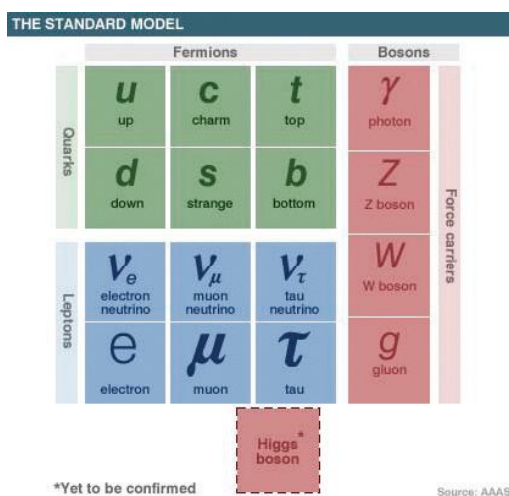
Стандардни модел у физици честица

У најкраћем, може се рећи да је основни циљ физике елементарних честица изучавање структуре материје, најелементарнијих делова од којих је материја састављена, као и изучавање структуре интеракција које међу њима владају. Упркос великом успеху Стандардног модела, владајуће теорије у физици честица, у описивању три интеракције (силе) у природи: електромагнетне, слабе нуклеарне и јаке нуклеарне, постоји још увек велики број феномена које физичари недовољно разумеју. На пример, постојеће тешкоће у разумевању масеног спектра елементарних честица у многоме подсећају на случај од пре једног века када је открићем периодног система

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

хемијских елемената начињен одлучујући корак и коначно уведен ред у свет хемије, али се ипак на коначна решења морало да чека све до појаве планетарног модела атома (E. Rutherford) и његов развој.

У настојању и непрекидној жељи да се достигну што више енергије и да се приближе што ранијем стадијуму развоја универзума (космоса), физичари своја изучавања често поистовећују са путовањем у прошлост. Настојање за досезањем и познавањем стања материје непосредно после Велике експлозије када су, верује се, све силе биле уједињене, заиста се може назвати путем у срце материје. Са својим енергијама (14 TeV), LHC нас води до структуре материје димензија 10^{-18} m што одговара временском тренутку од 10^{-12} дела секунде од "Велике експлозије" када су интеракције доминирале између најелементарнијих честица које познајемо данас, између лептона и кваркова и када је температура била 10^{16} степени.



Слика 7а. Фундаменталне честице.

Према Стандардном моделу који представља најпрецизнију теорију данас у физици, целокупна материја у универзуму изграђена је од дванаест елементарних фермиона (честица са половичним спином) и четири бозона (честица чији је спин нула или цео број) (Слика 7а). Ова четири бозона представљају медијаторе четири основне интеракције (силе) у природи: јаке, електромагнетне, слабе и гравитационе интеракције. Како гравитациона интеракција делује углавном у космичким просторствима, њено дејство се у свету елементарних честица занемарује.

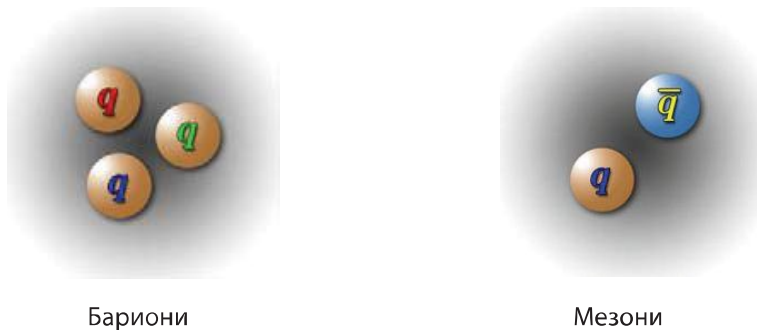


Слика 7б. Лептони и кваркови.

Оствареном достигнућу уједињења електромагнетне и слабе интеракције (силе), које је окончано у спектакуларном експерименту 1983. године управо у CERN-у (Нобелова награда за физику 1984.), недостаје још један корак: експериментална потврда постојања Higgs бозона. Ова честица која је добила име по шкотском физичару Higgs-у (Peter Higgs), би могла да буде одговорна за генерисање маса свих честица у природи и зато њено регистровање представља један од најважнијих истраживачких програма колајдера LHC у CERN-у. Тако се може рећи да, на извесан начин, настављамо изучавања која је још у 17. веку започео Isaac Newton када је постављањем теорије гравитације увео и појам масе чије порекло у природи још увек не разумемо. Верује се да би евентуално регистровање Higgs бозона представљало значајан корак и дефинитивну потврду важења теорије.

Дванаест фермиона који представљају елементарне честице, подељене су у две групе (Слика 76): на **лептоне** који представљају најлакше честице у природи и за које се верује да немају структуру, и на **кваркове** који граде теже честице, које такође третирамо као елементарне, али за које нема доказа да могу да постоје као самосталне честице изван сложених честица-хадрона у чији састав улазе. За разлику од лептона који подлежу електромагнетним и slabим интеракцијама, другу важну групу чине **хадрони** који су сложене честице и које се поковавају јакој и електромагнетској интеракцији. Хадрони се деле у две групе: на **барионе** који представљају фермионе састављене од три кварка (комбинација кваркова и антикваркова) и **мезоне** који се састоје од два кварка (комбинација кварк-антикварк) (Слика 8а).

Хадрони

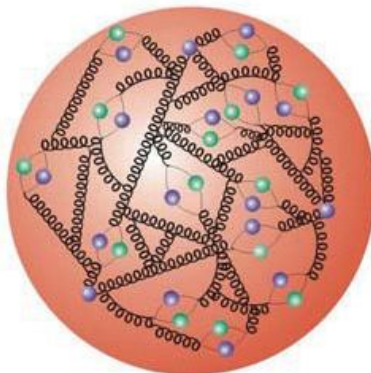


Слика 8а. Две групе хадрона: бариони и мезони.

Данашња сазнања о структури хадрона се знатно разликују од оних која су дуго преовладала. На пример, протон није само прости збир три кварка већ је то, како су теоријска предвиђања предсказала, а експерименти потврдили, један сложени систем (Слика 8б) од два **u** кварка и једног **d** кварка уроњених у тзв. "море" које чине глуони и кварк-антикварк парови (хадронске структуре познате као "млазеви"). Оваква представа о структури хадрона одговара експерименталним резултатима који показују да кваркови процентуално учествују у одређивању својстава хадрона приближно 40%.

Прецизност Стандардног модела на енергијама до 1 TeV је проверена до друге децимале, али је већ одавно било јасно да је на енергијама изнад 1 TeV, и због даљег развоја физике, неопходно да се ова теорија прошири и унапреди. Једна од најприроднијих теорија-кандидата за такво проширење је теорија Суперсиметрије.

✦✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ



Слика 8б. Структура протона.

Већ у наредним годинама, физичари ће у CERN-у на новосаграђеном колајдеру LHC имати прилику да евентуалним открићем бар једне од суперсиметричних честица потврде ову теорију која данас има веома велики број присталица.

Постоји генерално веровање да се можда нека нова физика крије у области енергија изнад 1 TeV, а LHC је дизајниран тако да омогући изучавања управо у том домену енергија. При томе, нагласак је стављен на Higgs сектор чија феноменологија са елементарним Higgs бозоном коме је придружен велики број тзв. суперсиметричних честица, можда изгледа другачије и сложеније него што је нама познато данас. Већ дуго времена, посебно после дефинитивне доминације Стандардног модела, једна од великих загонетки физике је да ли природа при спонтаном нарушењу тзв. калибрационе (gauge) симетрије заиста користи Higgs-ов механизам за генерисање маса честица које опажамо. У познатом Glashow-Weinberg-Salam (GWS) моделу електрослабих интеракција, овај концепт је имплементиран посредством комплексног скаларног поља чији је основни квант скаларни бозон данас познат као Higgs честица. Регистравање једног од Higgs бозона (ако их постоји више), на пример путем једног од распада: $h^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $H^\pm \rightarrow ll\bar{l}$, $lljj$, при чему симбол l представља један од четири лептона (електрон, мион, тау лептон или неутрино), а j млазњак (јет), сматра се вероватно најважнијим задатком у физици честица. Зато, основном скупу елементарних честица којих, као што је већ речено, има дванаест, уз већ позната три бозона-медијатора интеракција, требало би додати бар још једну, Higgs бозон.

Суперсиметријом (SUSY), теоријом која претендује да уједини све четири интеракције у природи, успоставља се симетрија између фермиона и бозона тако да сваком фермиону одговара суперсиметрични бозонски партнер (slepton, squark) у истом супермултиплету, а сваком бозону суперсиметрични фермионски партнер (photino, gluino, higgsino, gravitino,...). На овај начин, сви фундаментални бозони и фермиони могу да се схвате као различите суперсиметричне манифестације једне заједничке “суперчестице”. Суперсиметрија у том смислу представља можда и кандидата за коначну теорију комплетне унификације свих честица. Мада ни један суперсиметрични партнер још није експериментално регистрован, очекује се да SUSY модели (има их више) буду предмет интензивног експерименталног изучавања у оквиру истраживачких програма на LHC-у. Први експерименти чији је главни циљ био регистравање једне од “s” честица (chargino, neutralino,...) или постављање њихових доњих енергетских граница, били су започети у експериментима на LEP-у (LEP200), а наставиће се опет у CERN-у на акцелераторском комплексу LHC.

Познато је да од укупне материје која би требало да постоји у природи, ми данас опажамо само 4%. То је онај део тзв. видљиве материје. Остатак, односно највећи део би требало да чини невидљиви део познат као тамна материја. Можда ће регистровање бар једне од честица тамне материје (на пример, суперсиметричне честице „неутралино“), омогућити нова сазнања или бар да баца мало више светла на овај природни феномен који одавно заокупља пажњу физичара.

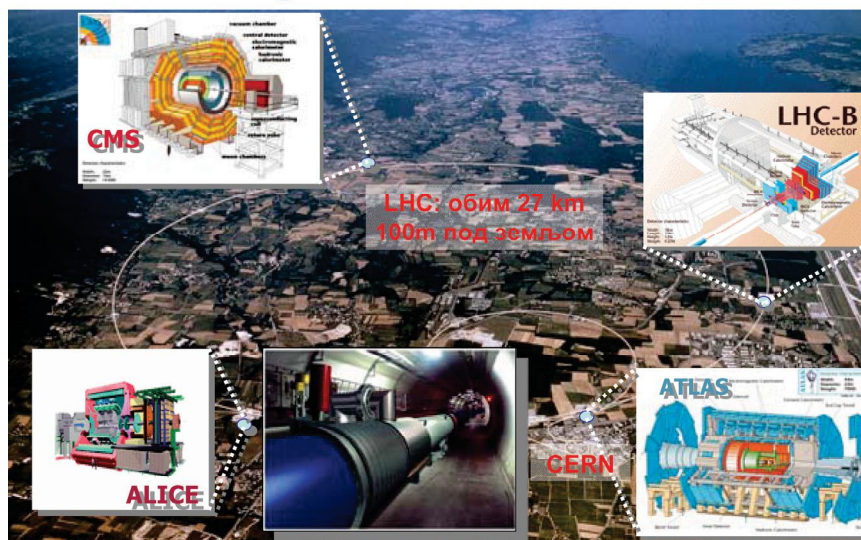
Поред SUSY честица, у оквиру LHC програма очекују се такође експерименти везани за изучавање и других нових честица. Један од циљева сигурно ће бити „лептокваркови“, могуће нове елементарне честице (још елементарније од лептона и кваркова), чије постојање предвиђају неки теоријски модели. Последњих година такође доста пажње привлаче експериментални резултати који наговештавају постојање специфичних стања појединих хадрона, као и хадрона са другачијом конфигурацијом кваркова. Евентуално регистровање неке од ових честица могло би да доведе можда и до промене неких фундаменталних теорија у физици.

Детектори за експерименте на LHC-у

У експерименталној физици високих енергија сложени детекторски системи углавном треба да задовоље три захтева: поуздана идентификација, прецизно регистровање времена интеракције или времена уласка честице у детектор и информација о положају честице. С обзиром да не постоји један независни детектор који задовољава сва три захтева истовремено, данашњи детектори представљају комплексне, вишеслојне мултидетекторске системе цилиндричне форме у којима су обједињене све ове функције.

Детекција и идентификација огромног броја честица насталих у сударима два снопа, као и висока прецизност реконструкције њихових трагова омогућени су захваљујући постојању модерних компјутерских система и развојем врхунских софтвера за ову област истраживања. Свакако да суштински допринос успешности ових истраживања представљају прецизне компјутерске симулације при постављању ек-

Large Hadron Collider - LHC



Слика 9. Локација четири експеримента на LHC-у.

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

сперимената. Овим симулацијама је могуће да се предвиде најкомплекснији појединачни догађаји у складу са важећим теоријама. То је сасвим разумљив поступак ако се имају у виду велика уложена средства у компликоване експерименте ове врсте, јер пре саме њихове реализације, на основу компјутерских симулација, већ се унапред може говорити о циљевима, физичкој реалности, као и о њиховој сврсисходности.

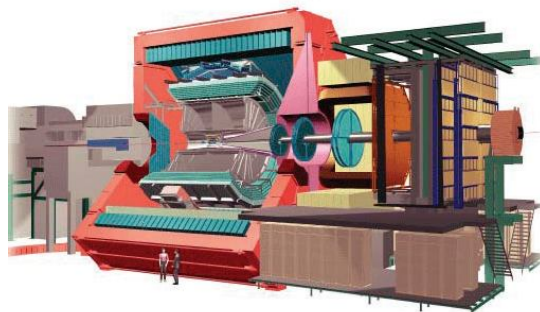
Као што је уобичајено, уз градњу LHC постројења истовремено се одвија градња детектора за будуће експерименте. Планирана су четири експериментална места где ће снопови да се сударају и на сваком од тих места се гради један комплексни (вишеслојни) детекторски систем са одређеном наменом. То су детектори: ALICE, ATLAS, CMS и LHCb по којима одговарајуће међународне колаборације носе имена (Слика 9). Изградња сва четири детектора биће завршена до краја 2007. године. Детектори морају да буду спремни за прве пробне експерименте у 2008. години кад акцелераторски комплекс LHC буде пуштен у рад и кад дође до првих судара два протонска снопа.

Физичари из Групе за физику елементарних честица Института "Винча", заједно са колегама са Физичког факултета Уневерзитета у Београду (CMS Belgrade Group) активно учествују већ више година у припреми експеримента на детектору CMS. Друга група физичара из Института за физику у Земуну партиципира у припреми експеримента ATLAS. Оба ова детектора биће описана у трећем делу овог текста. Као контрибуцију целокупном пројекту LHC, што су урадиле све државе чији истраживачи учествују у овом светском грандиозном научно-технолошком пројекту, Србија је посредством свог Министарства за науку обезбедила одговарајуће делове за детекторе CMS и ATLAS које су специјално за ту намену произвеле српске индустријске фирме: "Застава алати" из Крагујевца и позната индустријска фирма "Лола" из Београда, респективно.

Детектори специјалне намене

Детектор ALICE

Детектор ALICE (A Large Ion Collider Experiment), као и детектор LHCb, намењен је изучавању специјалне области у физици. Детектор је дизајниран и саграђен за експерименте у сударима снопова тешких јона, па ће, на пример, језгра олова (Pb-Pb) која ће, поред протона и других тешких јона, такође моћи да се убрзавају у акцелераторском прстену LHC-а са максималном енергијом судара у центру масе од 5.5 TeV по нуклеону (TeV/u). При укупној енергији судара снопова језгара олова од 1150 TeV (=0.18 mJ) очекује се креација материје у виду кварк-глуон плазме (QGP), а основни циљ експеримената је изучавање својстава те материје, јер се верује да би



Слика 10а. Шематски приказ детектора ALICE.

она приближно могла да одговара густини материје створеној у најранијем стадијуму универзума, тј. непосредно по Великој експлозији.

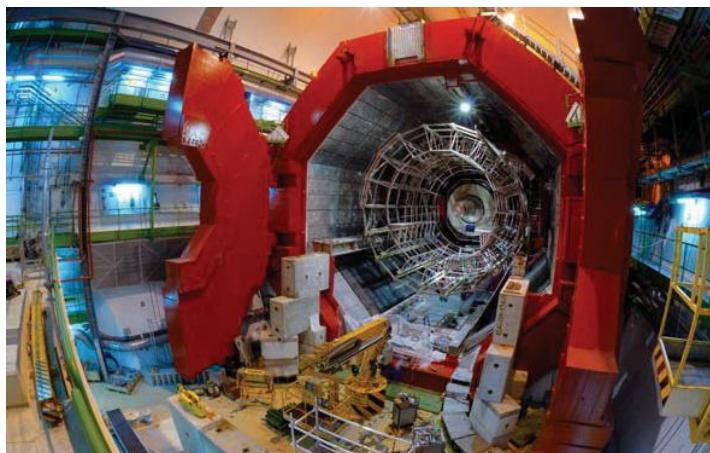
Ова нова форма хадронске материје (QGP) формирала би се после описаних тешко-јонских судара као последица велике густине енергије која достиже вредности од 4 до 8 GeV/fm³ (1fm=10⁻¹⁵m). Биће то коначно изузетна прилика за изучавање стања и структуре такве материје у лабораторијским условима без обзира на врло кратко време њеног живота.

Детектор ALICE се састоји из централног и предњег дела, а колаборација окупљена око њега тренутно броји више од 1000 људи који долазе из 70 институција из 30 држава света.

Централни део детектора ALICE је намењен за регистровање хадрона, електрона и фотона, док предњи део уствари представља мионски спектрометар. Централни део детектора ALICE (Слике 10) је смештен у унутрашњост великог соленоидног магнета (B=0.5T) који је некад био коришћен за детектор L3 у експериментима на некадашњем електронском синхротрону, "Великом сударачу електрона и позитрона"-LEP. Као што је већ споменуто, LEP је демонтиран 2000/2001. године да би у истом тунелу могла да започне инсталација протонског синхротронског прстена LHC-а. Овај централни део детектора ALICE је дизајниран тако да је у стању да региструје честице унутар конуса чије су границе одређене поларним углом 45° до 135°, што одговара вредностима псевдорapidитета $|\eta| < 0.9$. Параметром η се најчешће изражава просторна угловна ефикасност детектора ($\eta=0$ одговара 90°, док $\eta=5$ одговара 0.8°).

У састав централног дела улазе следећи детектори: ITS (Inner Tracking System) - унутрашњи систем вишеслојних силицијумских детектора високе резолуције за реконструкцију трагова честица, TPC - цилиндрична дрифт комора (Time Projection Chamber) која такође служи за идентификацију честица на основу трагова, TOF-PID - два низа детектора (Particle Identification arrays of Time-Of-Flight) које чине заједно сцинтилациони детектори за регистровање честица методом time-of-flight и HMPID-Черенкови детектори и коначно PHOS-електромагнетни калориметар (single-arm electromagnetic calorimeter) чији је основни задатак да региструје фотоне и електроне.

Структура предњег дела детектора ALICE је начињена од комбинације четрнаест слојева мионских комора, диполног магнета и одговарајућих апсорбера. Предњи систем чији детекциони опсег обухвата псевдорapidитет $-5.4 < |\eta| < -1.6$ и $1.6 < |\eta| < 3$, се завршава скупом FMD детектора (Forward Multiplicity Detector) који представљају ка-



Слика 10б. Детектор ALICE у фази инсталације.

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

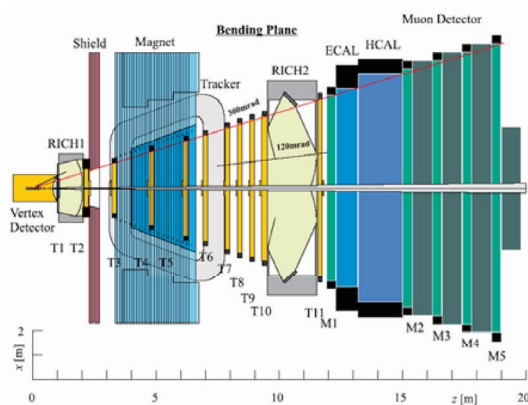
лориметре постављене испред целог детектора ALICE и који су позиционирани дуж осе снопа (ZDC - Zero-Degree Calorimeters). Овај скуп калориметара дуж осе покрива највећи део детекциоиног фазног простора, од $|\eta| < 4$.

Детектор LHCb

Детектор LHCb, чији назив физичарима већ довољно говори каквој је врсти физике намењен, окупља међународну колаборацију истраживача која броји близу 690 људи из 50 институција света. Експерименти су усмерени ка изучавању и регистравању специфичних феномена у хадронским системима који садрже кварк b .

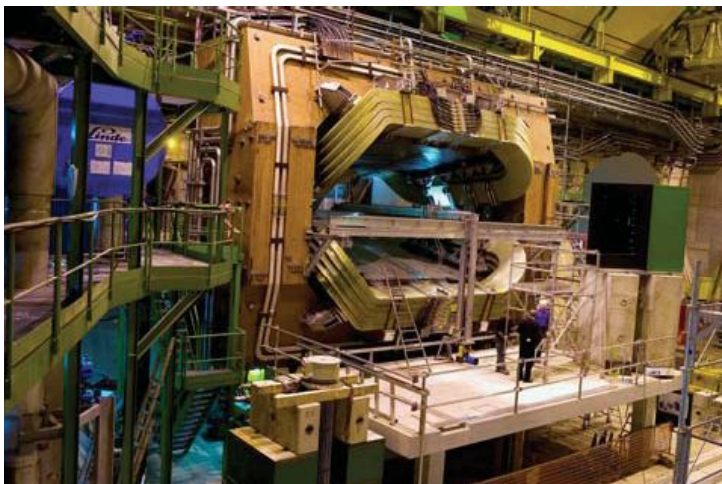
Један од таквих феномена је нарушење симетрије CP која је позната и као “огледалска симетрија”, при чему C и P представљају операторе наелектрисања и парности, респективно. На пример, ако се дејство оператора C, P и T (време) промени, односно ако ови оператори промене знак у било којој интеракцији, физички закони би требало да остану непромењени. Међутим, експерименти су показали да код неких интеракција комбинација C и P се не одржава. У најкраћем, основни циљ ових изучавања је боље разумевање нарушења CP симетрије, јер се тај проблем повезује са одсуством антиматерије у природи.

Досадашњи резултати изучавања у физици честица, као и у астрофизици, показују да видљиви део материје у универзуму чини тек 4% од укупне количине материје. С друге стране, данашње важеће теорије нас уче да су материја и антиматерија биле створене у истим количинама при самом настанку универзума, тако да узрок постојеће асиметрије, односно дисбаланса материје и антиматерије у природи и даље представља мистерију. Овај проблем, поред готово свих грана природних наука, не оставља равнодушним ни философе, али су, ипак, њиме највише оптерећени физичари, јер им стоји на путу комплетнијег разумевања основних закона физике. Заједно са питањем порекла масе честица (првенствено кваркова и лептона), могло би се рећи да питање порекла асиметрије материје и антиматерије представља фундаментални проблем који заокупља физичаре скоро од настанка модерне физике.



Слика 11а. Шематски приказ детектора LHCb.

Нарушење CP симетрије за коју се сматра да би могла да буде узрок постојећег неравнотеже материје и антиматерије у природи, биће проучавано на LHC-у у неутралним хадронским системима који садрже b кварк. Да се подсетимо, хадронима називамо честице које подлежу јаким нуклеарним интеракцијама, а неутрални хадронски систем који је овде предмет изучавања представља B^0 мезон.



Слика 116. Фотографски снимак детектора LHCb.

Овај слаби ефекат нарушења CP симетрије (0.1%) потврђен је 1964. године у експериментима са неутралним K мезонима (K^0) и за овај резултат, шеснаест година касније (1980.), додељена је Нобелова награда из физике (J.W. Cronin, V.L. Fitch). Међутим, многи експерименти са B^0 мезонима су такође потврдили постојање овог ефекта. Боље шансе за његово ефикасније регистровање и изучавање нуде управо такви „тешки“ неутрални системи који садрже b кварк, јер због његове веће масе у оваквом систему ефекат нарушења CP симетрије је израженији. Очекује се да ће експерименти на детектору LHCb имати могућности да на основу креације великог броја различитих b-хадрона у протонским сударима на LHC-у, квалитетно и квантитативно значајно побољшају резултате ранијих експеримената.

Да би остварио врло строге истраживачке захтеве, детектор LHCb (Слике 11) је дизајниран и конструисан да поседује укратко следеће најважније перформансе:

1. Одличну ефикасност (trigger) у идентификацији различитих финалних стања b хадрона и лептона;
2. Способност идентификације K-она и π -она при високим вредностима импулса (1-100 GeV/c);
3. Одличну временску и масену резолуцију.

Иначе, детектор LHCb се разликује од стандардних детектора карактеристичних за експерименте са сударајућим сноповима. Својом формом и геометријом више подсећа на детекторе који се користе у експериментима са фиксираним метом. То је зато што се тешки хадрони (састављени од кваркова: d, s и b) на високим енергијама производе под малим угловима у односу на осу интеракције. Другим речима, геометрија детекторских система је овде подешена према конусу унутар којег се доминантно налазе ови хадрони и који померен строго напред.

Физичари се такође надају да ће експеримент LHCb изучавањем феномена нарушења CP симетрије као и распада хадрона који су саграђени од d, s и b кварка, допринети разјашњењу необјашњених физичких феномена који излазе из домена Стандардног модела. Детектор LHCb чија укупна дужине износи 21 метар, састоји се из више детекторских слојева који су, као што је речено, конструисани тако да омогуће регистровање и изучавање честица емитованих у правцу кретања, тј. под оштрим углом. Чине га следећи детекторски системи (слојеви):

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

1. Vertex Locator
2. Детектори трагова (Tracking system)
3. RICH (Ring Imaging Cherenkov Detectors) system
4. Calorimeters
5. Мионски систем (Muon system)
и Диполни магнет

- Vertex Locator се састоји од два слоја осетљивих силицијумских детектора, а од тачке интеракције (судара) удаљен је 8 mm. Основни задатак овог детекторског система је регистровање и реконструкција вертекса (исходишта) распада честица од интереса.

- Детекторе трагова чине четири дела при чему се први налази испред, а остала три дела су смештена иза диполног магнета. Та три слоја представљају комбинацију силиконских детектора (унутрашњи ID и спољни детектори OD) и савремених дрефт комора.

- Систем Черенковљевих детектора чине два RICH (Ring Imaging Cherenkov) детектора са укупно три радијатора. Радијатори су специфичан материјал којим је испуњен детектор и који омогућава емисију Черенковљевих фотона у току проласка наелектрисане честице. Пажљиви избор радијатора представља изузетно важан и деликатан поступак при констрикцији сваког Черенковљевог детектора. Овај сложени детекторски систем служи за сепарацију и идентификацију наелектрисаних честица на основу ефекта карактеристичног Черенковљевог зрачења. За разлику од стандардног Черенковљевог детектора, RICH користи сферна огледала направљена од лаког материјала (Carbon fiber) којима се Черенковљеви фотони емитовани унутар конуса фокусирају ка низу осетљивих позиционих фото детектора постављених у фокалној равни. Радијус ових сферних огледала зависи од угла емитованих Черенковљевих фотона.

- Калориметријски систем се састоји од Preshower детектора који следе два калориметра: електромагнетски и хадронски калориметар. Preshower детектор се користи у комбинацији са електромагнетским детектором за ефикасну детекцију (положја) високоенергетских гама кваната и електрона, док се хадронски калориметар, као што му само име каже, користи за детекцију хадрона (неутрона, протона, пиона, каона,...).

- Мионски систем чине мионске коморе-станице и апсорбери. Један слој мионских комора се налази испред, док су остале коморе распоређене на крају самог детектора LHCb, непосредно иза два калориметра. Ове коморе се користе за детекцију и одређивање трагова миона који пролазе кроз цео детектор LHCb.

- Диполни магнет класичног типа, који генерише снажно магнетско поље индукције 4Т, поред омогућавања сепарације наелектрисаних честица, има важну улогу у изучавању нарушења CP симетрије.

Због високог ефикасног пресека за парове $b\bar{b}$ (500 μb) и ефикасног trigger система, експеримент LHCb ће моћи да отпочне свој планиран програм физике пуним капацитетом и при нижим вредностима луминозности (10^{30} - 10^{32} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Иначе, овај експеримент је дизајниран тако да вредности луминозности могу да се подешавају према потребама самог истраживања, независно у односу на функционисање LHC-а (максимална дизајнирана вредност 10^{34} cm^{-2} s^{-1}) и независно у односу на остала три експеримента.

Следећи, трећи наставак овог текста биће посвећен детекторима опште намене: ATLAS и CMS по којима и одговарајући експерименти носе име.