

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

Пише: Петар Аџић

Увод

У двадесетом веку физика честица је учинила огроман напредак, вероватно већи од свих осталих дисциплина физике. Велике инвестиције последњих деценија прошлог века у ову област физике настављају се и у новом, двадест првом веку. Изградње нових акцелераторских инсталација високих енергија углавном су мотивисане значајним, новим открићима, изучавањем још необјашњених, као и проверама још непотврђених феномена у физици високих енергија.

У Европској организацији за нуклеарна истраживања CERN, познатој и под именом Европска лабораторија за физику честица, надамак Женеве, приводи се крају изградња Великог хадронског судараца (колајдера) - LHC (Large Hadron Collider), највећег акцелераторског постројења за истраживања у физици високих енергија. Ова инсталација има за основни циљ да понуди истраживачке програме највишег нивоа свим физичарима честица у свету, а њен завршетак градње и пуштање у погон се предвиђају за крај 2007. године. У градњи овог грандиозног комплекса учествују најбољи стручњаци, специјалисти и истраживачи из великог броја држава у свету, а готово из свих европских држава међу којима је и наша. У припремању експеримената на акцелераторском комплексу LHC ангажован је такође велики број истраживачких тимова из научних институција са скоро свих континената. Међу овим истраживачким тимовима налазе се и две групе наших истраживача: једну групу чине физичари честица из Института за нуклеарне науке "Винча" и Физичког факултета Универзитета у Београду, док је друга група

састављена углавном од физичара из Института за физику у Земуну.

Основно оруђе физичарима у истраживањима у физици високих енергија представљају акцелератори. За проучавање најситнијих делова материје невидљивим голим оком, почетком двадесетог века, у науци су интензивно коришћени оптички микроскопи, а са принципом функционисања оптичког микроскопа упознали смо се још у основној и средњој школи. Оптичка светлост осветљава предмет чију структуру проучавамо, а онда систем комбинованих сочива својим увећањем омогућава да видимо најситније детаље испитиваног узорка. Резолуција или моћ разлагања микроскопа је лимитирана таласном дужином оптичке светлости, тако да нисмо били у могућности да видимо делове материје чије су димензије биле мање од таласне дужине оптичке светлости (реда микрона).

Када је снап електрона почео да се користи уместо оптичке светлости, чиме смо искористили једно од најзначајних достигнућа модерне физике (таласна и честична својства микрочестица), конструисан је електронски микроскоп којим можемо да посматрамо делове материје до димензија самих атома (10^{-10} m). У изучавању најелементарнијих делова материје, данас физичари користе снопове наелектрисаних честица високог интензитета, које су претходно убрзане у акцелераторима до брзина врло блиским брзини светлости. После интеракције снопа честица са структуром мете, продукти интеракције се региструју и анализирају сложеним детекторским системима. Што ситније детаље материје желимо да видимо, то снап честица мора да има већу енергију. Са захтевима

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

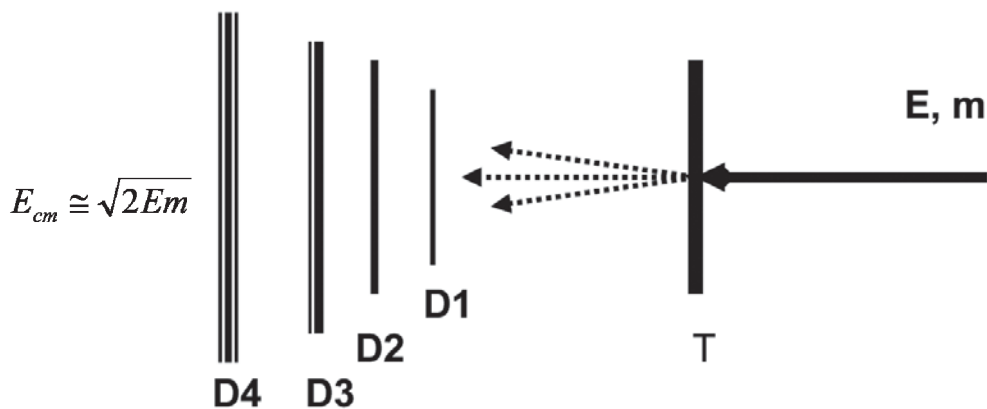
за вишом енергијом, расту и димензије акцелератора, па самим тим и акцелераторско постројење, али и сложени детекторски системи постају већи и скупљи. Да закључимо: уместо оптичке светлости, користимо снопове честица високих енергија, а уместо микроскопа и наших очију, користимо сложене детекторске системе помоћу којих вршимо идентификацију честица, реконструкцију њихових трагова уз прецизно мерење њихових енергија и маса. Можемо да кажемо да детектори данас представљају наше "електронске очи".

Експерименти на LHC-у ће омогућити физичарима да покушају да комплетирају бар један део великог пута који је још давно започео Исак Њутн (Newton) описом гравитације. Као што знамо, у основи гравитационе силе је маса, али до данас ми нисмо успели да објаснимо зашто неке честице имају, а неке немају масу. Постоји реална нада да ће експерименти на LHC-у дати одговор на ово питање. Истовремено, ови експерименти би могли да омогуће боље разумевање још неких феномена који већ дуго времена представљају непознаницу у физици. Међу таквим феноменима вероватно је најмистериознији и најатрактивнији онај који се односи на мистерију недостајуће масе и питање постојања тзв. "тамне материје" у природи. Данас је познато да

материја коју опажамо представља само 4% од укупне материје која би морала да постоји у космосу. Такође се очекује да експерименти омогуће детаљније изучавање разлога због којих ми данас опажамо само материју, а не и антиматерију, иако би број честица (атома елемената) и број одговарајућих античестица на самом настанку космоса требало да буде једнак. Све су ово разлози што се очекује да LHC вероватно може да одигра историјску мисију, да наша сазнања доведе на нови, виши ниво разумевања Космоса, због чега физичари почетак рада ове, до сада најсложеније изграђене машине, очекују са великим нестрпљењем и узбуђењем.

Експерименти на акцелераторима

Стандардна конфигурација експеримената у физици високих енергија са тзв. фиксираним метом, подразумева убрзавање снопа наелектрисаних честица масе m до одређених енергија E , а затим бомбардовање стационарне мете T . Продукти реакција изучавају се уз помоћ детектора постављених иза мете D (Слика 1). Међутим, оваква конфигурација експеримента није могла да обезбеди довољно високе енергије за креацију масивних честица, а посебно оних које су предмет данашњег истраживања у физици честица.

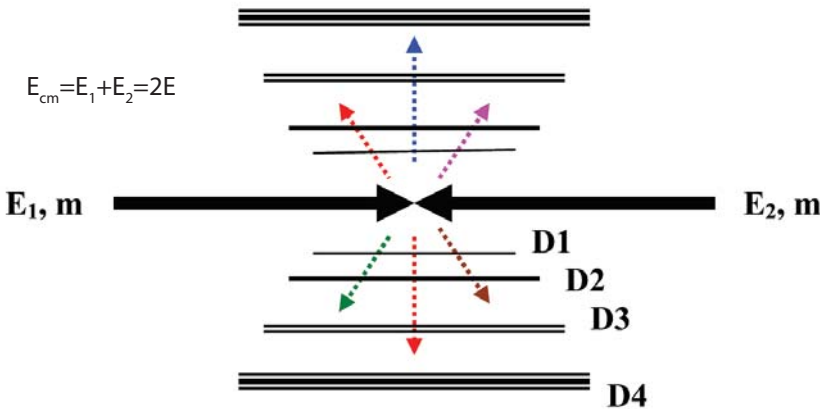


Слика 1. Експерименти са фиксираним метом.

Показало се да се као ограничавајући фактор појављује ефективна енергија (у систему центра масе) која је одговорна за креацију честица, а она у оваквој поставци експеримента расте “само” као квадратни корен енергије снопа и масе честица: $E_{cm} \cong \sqrt{2Em}$. (Да се подсетимо: систем центра масе се дефинише као систем у коме је укупан збир импулса једнак нули).

Идеја коришћења сударајућих снопова (colliding beams) појавила се први пут 1960. године, а добила је у актуелности са захтевом за извођење експеримената на све вишим енергијама са циљем да се открију нове честице и да се изучавају њихова својства. У случају чеоног судара два снопа честица истих маса m , које се крећу релативистичким брзинама енергија E_1 и E_2 , за креирање честица на располагању је целокупна енергија унета од стране оба снопа (Слика 2). Ако су енергије два снопа једнаке, што је најчешћи случај, онда је укупна ефективна енергија (и у лабораторијском систему и у систему центра масе) једнака простом збиру енергија снопова: $E_{cm} = 2E$. Ова предност колајдера (сударача) у достизању виших енергија, на жалост има једну ману, а то је врло мала вероватноћа судара честица унутар снопова. Та вероватноћа се мери параметром познатим под именом **Луминозност**.

Физички смисао луминозности одговара броју догађаја у јединици времена по јединици површине [$cm^{-2}s^{-1}$] за одређену реакцију. Интензитет или број честица у јединици времена при судару два снопа (унутар контуре приближно једнакој површини која захвата површину попречног пресека снопа), третира се као “извор” или “сјајност извора интеракција” (отуда термин луминозност). Недостатак колајдера је ниска фреквенција судара, односно мали број интеракција честица, због чега је много мања луминозност у односу на акцелераторе који оперишу са стационарним метама. Стационарне мете које зависно од експеримента могу да буду у чврстом или гасовитом стању, својом високом густином обезбеђују довољан број интеракција са упадним снопом у поређењу са акцелераторима са сударајућим сноповима где уствари сваки снап представља мету у односу на онај други. Настојање да се овај недостатак код колајдера ублажи, а број судара повећа, посебно код оних колајдера код којих један од снопова чине античестице, довео је до проналаска и успешне примене метода побољшавања квалитета снопова (тзв. “хлађење”). Основни циљ ове сложене методе “стохастичког хлађења” је повећање интензитета, а самим тим и густине снопа.



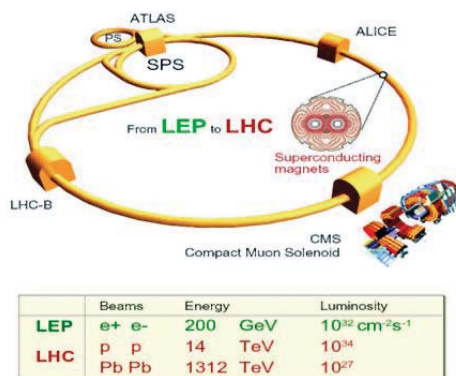
Слика 2. Експерименти са сударајућим сноповима.

✦✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

Због природе физичког процеса креације честица, неопходна енергија у систему центра масе мора да буде иста или већа од масе неутралне честице, или већа од двоструке масе наелектрисане честице. На пример, при судару честица и античестица (укупно наелектрисање таквог система је нула) закон одржања наелектрисања не дозвољава производњу само једне наелектрисане честице, већ се ствара пар супротно наелектрисаних честица. Данас у свету постоји неколико акцелераторских инсталација у којима се сударају два снопа електрона, два снопа протона или два снопа тешких јона. Заједничко за све експерименте са сударајућим сноповима су типични огромни и сложени детектори саграђени од више детекторских слојева у цилиндричној геометрији дуж осе акцелераторске цеви, симетрично у односу на место судара снопова (Слике 2 и 3). Два снопа истих честица или честица и античестица, убрзавају се у супротним смеровима, а око места где долази до њихових судара изграђени су огромни вишеслојни детектори са циљем да региструју што је могуће већи број продуката интеракција насталих у тим сударима у целокупном простору запремине детектора. Основни циљ овакве градње сложених детектора чије димензије достижу и по више десетина метара, је настојање да се постигне висока вероватноћа регистрације и идентификације честица које излазе из места судара у просторном углу 4π .

С друге стране, основни мотив за велике инвестиције у градњи оваквих акцелераторских постројења и сложених детектора су фундаментална истраживања у физици честица. У најкраћем, то укључује производњу елементарних и осталих сложених честица, њихову детекцију, изучавање њихових интеракција, као и феномена који настају у специјалним детекторским медијумима на основу мерења њихових импулса, енергија и реконструкција трагова. Треба ис-

таћи да циљ оваквих истраживања скоро да остаје непромењен још од оснивања модерне физике у првим деценијама 20. века. Поједностављеним речником, настоји се да се достигне што је могуће више енергије у “малом простору” како би се видели најситнији делови структуре материје и како би се боље упознали услови који су владали у тренутку настанка, а затим и у најранијем стадијуму развитка космоса. Та евентуална нова сазнања би требало да употпуне, а можда и коригују постојећу слику микросвета која је уобличена у оквиру данашње владајуће теорије познате под именом Стандардни модел.



Слика 3. Акцелераторски ланац у CERN-у.

Најчешће, синхротрони-колајдери представљају последњи степен у ланцу спрегнутих акцелератора (Слика 3). Убрзавање два снопа честица истог наелектрисања мора да се обави у одвојеним акцелераторским цевима, док процес убрзавања честица различитих наелектрисања у супротним смеровима може да се обави у истој акцелераторској цеви што поједностављује конструкцију и знатно смањује трошкове како при градњи тако и при функционисању и одржавању постројења. Данас у свету постоји неколико великих акцелераторских инсталација у којима доминирају истраживања у физици високих енергија, а свакако највећа и најпознатија међу њима је у CERN-у.

Лептонски и хадронски колајдери

У зависности од честица које се сударају и концепта планираних истраживања у физици, генерално постоје три врсте колајдера: лептонски и хадронски колајдери (Слика 4) и колајдери снопова тешких јона.

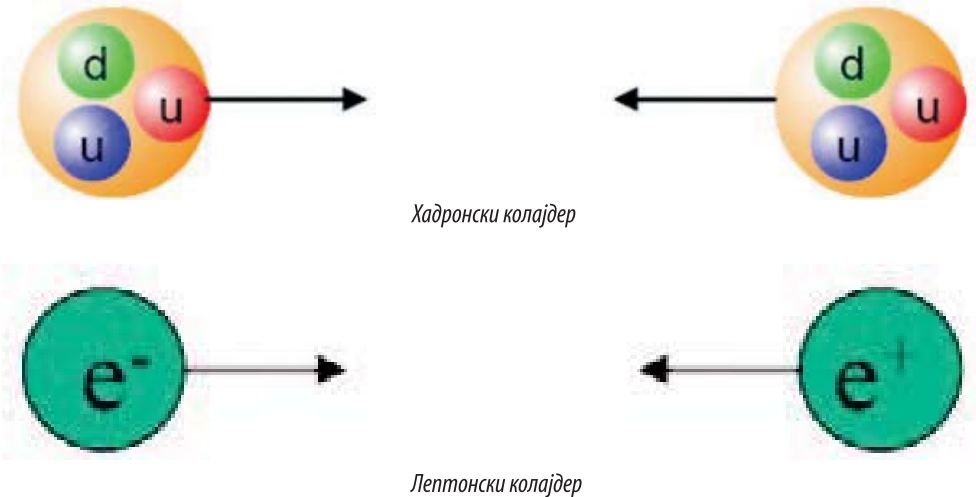
Изучавање и реконструкција трагова у експериментима при судару лептонских снопова нуди значајне предности кад је неопходно да се екстрахују тзв. "чисти" догађаји. Лептони (на пример електрон) су елементарне честице и целокупна енергија коју они унесу (у систем центра масе) при судару је на располагању за креацију нових честица које су предмет изучавања.

С друге стране, озбиљан недостатак код лептонских колајдера је што су енергије до којих ове честице могу да се убрзавају лимитиране. На ултрарелативистичким енергијама, губици услед емисије синхротронског зрачења при убрзавању електрона у циркуларним акцелераторима постају велики (расту као четврти степен енергије), тако да је њихово даље убрзавање неисплативо. Снага израчене

енергије честице синхротронским зрачењем је дата са:

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{m^2 c^3} = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 c}{R^2} \beta^4 \gamma^4 = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{c^3} \gamma^4$$

где су β брзина, a убрзање, m маса честице, e њено наелектрисање, R радијус орбите кретања честице, c брзина светлости и $\gamma = E/E_0$, при чему су са E и E_0 означене укупна енергија и енергија мировања честице респективно. Познато је још из класичне електродинимике да свака промена убрзања при кретању нелектрисане честице има за последицу емисију продорног електромагнетног зрачења. Постоје две врсте оваквог зрачења: закочно и синхротронско зрачење. Док је прва врста електромагнетног зрачења последица лонгитудиналне компоненте убрзања, синхротронско зрачење је последица центрипеталне компоненте убрзања ($a=v^2/R$) што значи да настаје при убрзавању наелектрисане честице по кружној путањи. Синхротронско зрачење се емитије у виду узаног конуса дуж тангенте кружне путање. С обзиром да протон има масу приближно 2000



Слика 4. Шематски приказ судара хадрон-хадрон и лептон-лептон.

✦ ✦ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

пута већу од електрона, на основу горње формуле закључујемо да у случају убрзавања протона енергетски губици услед синхротронског зрачења опадају са квадратом масе, па су драстично мањи у поређењу са електронима. Истовремено, постаје јасно зашто је донета одлука да се више не граде циркуларни акцелератори (синхротрони) за убрзавање електрона, већ ће се у будућности електрони убрзавати у модерним линеарним акцелераторима што ће уз ефикасније убрзавање и смањене енергетске губитке услед синхротронског зрачења омогућити достизање још виших енергија непходних за изучавање феномена у физици честица у лептонским сударима.

При убрзавању хадрона, на пример протона који је најизразитији представник хадрона, и који, као што је већ поменуто, има приближно 2000 пута већу масу од електрона, губици због синхротронског зрачења су мање изражени. Ово може лако да се квантитативно провери на основу горње формуле која одређује енергетски губитак синхротронским зрачењем (квадрат масе фигурише у имениоцу). Међутим, протони су сложене честице и састоје се од три кварка (Слика 4), тако да значајан део кинетичке енергије, као и удео у интеракцији при судару хадрона, носе кваркови као конституенти. Због тога је, поред умањене укупне енергије у систему центра масе у поређењу са укупном енергијом пре судара, природа интеракција сложенија што отежава анализу и реконструкцију догађаја.

Акцелераторски комплекс LHC

Велики хадронски колајдер LHC чини прстен од две акцелераторске цеви у којима се убрзавају снопови протона у супротним смеровима. Оба снопа протона се убрзавају независно до енергије 7 TeV, а затим се доводе у стање судара при укупној енергији у систему центра масе од 14 TeV. Основну компоненту овог син-

хротронског прстена представља суперпроводни диполни магнет у чијем средишту су смештене две акцелераторске цеви. У току процеса убрзавања, да би следили орбиту дефинисану самом акцелераторском цеви, протони су подвргнути дејству снажног магнетског поља индукције 8.4 T. Електромагнетски намотаји начињени од суперпроводног (Ni-Ti) материјала који се као и сама средина магнета одржавају уз помоћ суперфлуидног хелијума на температури близу апсолутне нуле (1.8 K), генеришу изузетно јако магнетско поље истог интензитета дуж обе цеви, али супротног смера (јер је неопходно да се протонски снопови убрзавају у супротним смеровима).



Слика 5. Авионски снимак LHC комплекса са означена четири експеримента.

Сам прстен се инсталира у тунелу дугом 27 km где се већ налазио прстен некадашњег електронског синхротрона LEP (Велики колајдер електрона и позитрона), на просечној дубини од 100 m. Иначе, цео комплекс се простире на простору који обухвата територију на граници Швајцарске и Француске у предграђу Женеве (Слика 5). Захваљујући већ постојећој инфраструктури изграђеној за LEP, очекује се да укупни буџет изградње оваквог гигантског комплекса не пређе четири милијарде швајцарских франака. А када буде



Слика 6. Део прстена LHC-а са једним диполним магнетом у завршној фази инсталације и тестирања у близини експеримента CMS (Cessey, Француска).

завршен и пуштен у погон крајем 2007. године, LHC ће представљати најскупљи и вероватно најсложенији научно технолошки пројект икада предузет до сада. То је инсталација за 21. век са циљем да понуди истраживачке програме врхунског квалитета за све физичаре честица света. У дизајнирању и конструкцији ове инсталације користе се последња достигнућа у модерним технологијама, електроници, материјалима, компјутерској техници. Не памти се да је икада тако велики и одабрани број врхунских научника и специјалиста био истовремено ангажован на једном заједничком пројекту. За те потребе, као и у припреми будућих експеримената, ангажован је велики број научника и специјалиста различитог профила из свих крајева света, укључујући и физичаре из наше средине. Очекује се да ће овај пројект да омогући да Европа и CERN задрже примат у физици високих енергија (бар у прве две декаде 21. века) који су преузели још почетком осамдесетих година од САД.

Да би стекао утисак о каквом је грандиозном пројекту реч, најбоље је да се

наведе неколико основних података о новом истраживачком комплексу LHC. На пример, дуж прстена LHC налазиће се 1332 диполна магнета, а од укупно 27 km дужине прстена, само 24 km биће окупирано магнетима различитих типова (укупно 6000 елемената магнета). Један примерак диполног суперпроводног магнета, просечне дужине 13.6 метара, у стању је да пропушта јачину струје између 6600 и 9500 ампера, а та струја ће на минималној температури од приближно 1.8 K генерисати максималну магнетну индукцију од 8.4 T. Овако снажни диполни магнети су неопходни да би се снопови протона тако високих енергија одржавали у постојећем акцелераторском прстену, док се сам процес убрзавања истог снопа обавља променљивим електричним (RF) пољем високих фреквенција (преко 400 MHz).

Најчешће, акцелераторски комплекси оваквог типа имају у просеку четири позиције где се снопови укрштају, односно сударају и где су постављени огромни детекторски системи са пратећом опремом и експерименталним просторијама. Само на два

++ ФИЗИКА БУДУЋНОСТИ

експериментална места које су окупирале колаборације ATLAS и CMS, већ је ангажовано више од 4000 људи. Буџет за изградњу и експлоатацију LHC-а обезбеђују углавном чланице CERN-а, најразвијеније и водеће државе ЕУ(80%), а значајну контрибуцију у изградњи, како новчану тако и у опреми, пружиле су САД, Русија, Канада, Јапан, Индија, Кина. Као што је споменуто раније, скоро све државе Европе, укључујући и нашу, партиципирају у овом светском пројекту.

Један од последњих снимака једног дела 27 километара дугог прстена у тунелу у близини тачке судара (Point 5, CMS site, Cessy, Француска, видети слику 5), са диполним магнетима у завршној фази инсталације, приказан је на слици 6.

У табели су приказани најважнији параметри Великог хадронског судараца LHC.

Ево кратких објашњења неких најзначајнијих параметара овог сложеног постројења. Енергија ињекције је енергија коју поседује снап при убацивању у акцелераторску цев за убрзавање; интензитет снопа је јачина струје изражена у амперима; банчеви су дисконтинуирани делови снопа који представљају групе честица дефинисане у времену и простору и они се колективно убрзавају. Временска разлика између банчева протона од 25 ns практично одређује и фреквенцију њихових судара код LHC-а; израчена енергија по обртају представља енергетске губитке услед синхротронског и заокочног зрачења при убрзавању; радна температура је условљена суперпроводном технологијом која захтева хлађење течним хелијумом на 1.9 K.

– *наставиће се* –

Параметри LHC-а

• Обим	26.7 km
• Енергија снопа при судару	7 TeV
• Енергија ињекције снопа	0.45 TeV
• Магнетно поље дипола на 7 TeV	8.33 T
• Луминозност	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
• Струја снопа (DC)	0.56 A
• Број протона по банчу	1.1×10^{11}
• Број банчева	2808
• Размак банчева	7.48 m
• Номинална разлика банчева	24.95 ns
• Губици енергије по обртају	6.7 keV
• Укупна израчена снага по обртају	3.8 kW
• Нормирана емитанса (r.m.s.)	3.75 mm
• Укупни угао укрштања снопова	300 μrad
• Критична синхротронска енергија	44.1 eV
• Енергија снопа	350 MJ
• Енергија у магнетима	11 GJ
• Радна температура	1.9 K