

## ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

Ֆ.մ.գ.դ. Հ.Գ.Մկրտչյանի Արամ Հայրապետյանի ֆիզմաթ գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար ներկայացված՝ «Search for Long-Lived particles beyond Standard Model with CMS (LHC) experiment and development of semiconductor detectors for high precision timing and spatial measurement» թեմայով թեկնածուական ատենախոսության վերաբերյալ:

Մոտ 16 տարի առաջ CERN-ում թողարկված Մեծ Հաղորնային Կոլայդերի (LHC) հիմնական նպատակն էր ուսումնասիրել նյութի հիմնարար կառուցվածքային բլոկները և տիեզերքի հիմնական օրենքները: LHC-ում պրոտոն-պրոտոն (կապար-կապար) մասնիկների բախման արդյունքում զանգվածի կենտրոնի էներգիան (centre-of-mass energy) հասնում է մինչև 14 ՏեՎ-ի (5.5 ՏեՎ), իսկ պայծառությունը՝  $L_{peak} = 10 \times 10^{34}$  սմ<sup>-2</sup>վ<sup>-1</sup>: Սա ստեղծում է լավագույն պայմաններ Ստանդարտ մոդելի (SM) կանխատեսումները ստուգելու և դրանից այնդ «նոր ֆիզիկա» որոնել համար, որը LHC-ի կարևորագույն նպատակներից է: Պարզել թե ինչու է տիեզերքը կազմված հիմնականում նյութից, այլ ոչ թե նյութ-հականյութ խառնուրդից, հայտնաբերել և ուսումնասիրել նոր երևույթներ (գերսիմետրիկ մասնիկներ, սև խոռոչներ), պարզել մութ նյութի ու մութ էներգիայի էությունը, որոնք կազմում են տիեզերքի 95%-ը, և նման այլ առեղծվածներ: LHC-ի հիմնական նվաճումներից պետք է նշել Հիգսի բոզոնի հայտնաբերումը (2012 թ.), քվարկ-գլյուոնային պլազմա վիճակի ստեղծումը, բազմաթիվ նոր էկզոտիկ մասնիկների հայտնաբերումը, և այլն:

LHC-ն ունի չորս բախման կետեր, ուր տեղադրված են նրա հիմնական դետեկտորները (ALICE, ATLAS, CMS և LHCb), որոնք օժտված են բարձր էներգիայի պրոտոն-պրոտոն (pp) կամ միջուկ-միջուկ (AA) փոխազդեցությունից առաջացած մասնիկների զրանցման, տարանջատման և նրանց էներգիայի և հետագծի վերականգնման ունակությամբ: Ատենախոսության թեման նվիրված է CMS գիտափորձում հազվագյուտ երկար ապրող մասնիկների (LLPs) տրոհման դեպքերի հայտնաբերմանը, Ստանդարտ մոդելի սահմաններից դուրս “նոր-ֆիզիկայի” նշաններ գտնելուն:

Երկարակյաց մասնիկները (LLPs) կանխատեսվում են բազմաթիվ տեսական մոդելներով, որոնք լուծում են Ստանդարտ մոդելի (SM) թերությունները: Դրանք ներառում են գերսիմետրիկ (SUSY), մութ նյութի և տիեզերքում նյութ-հականյութ ասիմետրիայի մոդելները: Աճող հետաքրքրություն էն առաջացնում վերոնշյալ մոդելների այսպես կոչված մինիմալ տարբերակները, որոնք ընդլայնում են SM-ի

սահմանները միայն մեկ նոր մասնիկի ավելացմամբ: Այն կարող է լինել սկայար, փսևոսկայար, ֆերմիոնային կամ վեկտորային վիճակ: Եթե նոր սկայար ( $\Phi$ ) մասնիկը փոքր է  $B$  մեզոնի զանգվածից, ապա այն առատորեն կարող է ծնվել  $B$ -մեզոնի տրոհումներում:  $B$  մեզոնի տրոհմից առաջացած նոր երկարակյաց սկայար մասնիկների որոնումները նախկինում կատարվել են CHARM, Belle, BaBar և LHCb, համագործակցությունների կողմից, որոնք հիմնականում ուղղված են վերջնական վիճակներին, որտեղ LLP-ն տրոհվում է լեպտոնների զույգի: Սույն աշխատանքում նոր երկարակյաց  $\Phi$  մասնիկի (կամ LLP-ի) որոնումը հիմնված է վերջնական վիճակում զույգ-մյուսների գրանցման վրա, որը թույլ է տալիս գնահատել նման մասնիկի ծնման ամենախիստ սահմանները:

Արժե նշել, որ CMS-ը մեծ միջազգային համագործակցություն է, կազմված 50 երկրների 240 համալսարանների մոտ 4000 ֆիզիկոսներից, ճարտարագետներից և տեխնիկներից: Դառնալ այս համագործակցության մասնակից, կատարել աշխատանքներ, որոնք գնահատվում և ընդունվում են համագործակցության կողմից, մեծ նվաճում է թե՛ ԱՄԳԼ (ԵրՖԻ)-ի, և թե՛ հայցորդ Արամ Հայրապետյանի համար:

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից (Introduction), 4 գլխից (Compact Muon Solenoid experiment on Large Hadron Collider, The search for long-lived particles (LLPs) with CMS detector, The development and testing of the Constant Fraction Discriminator ASIC at Fermilab (FCFD), The CMS Endcap Timing Layer Readout Chip (ETROC) and the survey of AC-LGAD sensors with proton beam), եզրակացությունից (Conclusion), անձնական ներդրման (Personal contribution), շնորհակալական (Acknowledgment) և հղումներ (References) բաժիններից: Ատենախոսության ընհանուր ծավալը կազմված է 127 էջից, որն ընդգրկում է 88 նկար, 19 աղյուսակ, և 88 հղումներով գրականության ցանկ:

**Ներածության** բաժնում համառոտ նկարագրված է LHC կոլայդերի և CMS սարքի նպատակները և հնարավորությունները որոնելու Ստանդարտ մոդելից դուրս (BSM) նոր ֆիզիկա, մասնավորապես «երկար ապրող մասնիկներ» (LLPs): Նշվում է, որ նման մասնիկների որոնման լավագույն միջոցներից է, նրանց ծնումը  $B$ -մեզոնների տրոհման պրոցեսում: Այս բաժնում համառոտ քննարկվում են նաև փոփոխական հոսանքի ցածր ուժեղացմամբ հեղեղային դիոդների (AC-LGAD) ստեղծման և ուսումնասիրման հարցերը: Ներածության վերջնամասը նվիրված է LHC կոլայդերի մեծ ինտենսիվության (HL-LHC) անցման համար CMS սարքի արդիականացման խնդիրներին, մասնավորապես նրա Endcap Timing Layer հանգույցի կատարելագործմանը:

Առաջին գլխում բերած են համառոտ տեղեկություններ LHC կոլայդերի և CMS գիտափորձի վերաբերյալ: Նկարագրված են CMS-ի կարևոր հանգույցները՝ սուլենոիդյալ մագնիսը, մասնիկների հետազդերի վերականգնման, տարանջատման և սվյալների գրանցման համակարգերը: Քննարկվում է CMS սարքավորման տեխնիկական խնդիրները և անհրաժեշտ արդիականացումը ապագա մեծ ինտենսիվության LHC-ի (HL-LHC) անցման պարագայում:

CMS-ը բազմաֆունկցիոնալ, գրեթե հերմետիկ դետեկտոր է, որը նախատեսված է գործարկել (trigger) և տարանջատել էլեկտրոններ, մյուոններ, ֆոտոններ և չեզոք հադրոններ: CMS դետեկտորի ընդհանուր չափսերն են՝ 21.6 մ երկարություն, 14.6 մ տրամագիծ և 12500 տոննա ընդհանուր քաշ: Նրա հիմքը 6 մ ներքին տրամագծով գերհաղորդիչ սուլենոիդն է, որը ապահովում է 3.8 Տլ մագնիսական դաշտ:

Սուլենոիդի ծավալի մեջ տեղակայված են սիլիցիումային պիքսելային (silicon pixel) և շերտավոր հետազդային (strip tracker) սարքերը, կապար-վոլֆրամատի (PbWO<sub>4</sub>) էլեկտրամագնիսական կալորիմետրը և պղինձ-սցինտիլյատորային հադրոնային կալորիմետրը: Նրանցից յուրաքանչյուրը բաղկացած է մեկ զլանային (barrel) և երկու ծայրային կափարիչ (endcap) հատվածներից: Մյուոնները վերակառուցվում են սուլենոիդից դուրս գտնվող պողպատե լծակի մեջ ներդրված գազ-իոնիզացման (gas ionization) դետեկտորների միջոցով՝ օգտագործելով դրեյֆային խողովակներ (DT), կաթոդային շերտավոր խցիկներ (CSC) և դիմադրողական թիթեղային խցիկներ (RPC): CMS-ի սարքերի նպատակն է չափել մասնիկների հետազդերը, որոնք առաջանում են ծնված մեզոնների տրոհման արդյունքում, տարանջատել դրանք և վերականգնել նրանց էներգիան և իմպուլսը:

Ատենախոսության երկրորդ գլուխն ամբողջությամբ նվիրված է CMS սարքով հիպոթետիկ նոր «երկարակյաց մասնիկների» (LLPs) որոնմանը: Քննարկված են LLP-ի, մասնիկների տարանջատման, վերականգնման, փորձարարական սվյալների մշակման, մոդելավորման, սխալների գնահատման և այլ հարցեր: Ատենախոսությունում քննարկվող «Higgs portal» տեսական մոդելը ենթադրում է Ստանդարդ Մոդելից Դուրս (BSM) մեկ սկալյար, պսևդոսկալար, վեկտոր կամ նեյտրինո մասնիկի ավելացում (SM-ին): Մասնավորապես քննարկվում է չեզոք սկալյար LLP-ի ավելացումը: Ենթադրվում է, որ LLP-ին ծնվում է b-կվարկ - s-կվարկ

տրոհման պրոցեսում: Ուստի այս որոնումների համար օգտագործվել են 2018 թ. Run 2 b-հաղորդների տրոհման տվյալները: Պրոցեսի մոդելավորումն արվել է ենթադրելով, որ B մեզոններից մեկը տրոհվում է ծնելով մյուսն, իսկ մյուսը՝  $\Phi$  (LLP) և կաոնի ( $B \rightarrow K + \Phi$ ),  $\Phi$ -ի (LLP-ի) պիոնների զույգի հետագա տրոհմամբ՝  $\Phi \rightarrow \pi^0 \pi^0$  կամ  $\Phi \rightarrow \pi^+ \pi^-$ : Մոդելավորումն արվել է ենթադրելով LLP-ի զանգվածի և կյանքի տևողության մի քանի արժեքներ: Գնահատվել են ֆոնային դեպքերը և սիստեմատիկ սխալները (22-31.5%): Վստահության մակարդակի 95% աստիճանով գնահատվել է հավանականության վերին սահմանը (BR), որ b-հաղորդի տրոհումից կարող է առաջանալ LLP, որով մինչ աժմ եղած գնահատականը բարելավվել է 10 անգամ:

**Երրորդ գլուխը** նվիրված է Fermilab-ում հաստատուն կոտորակային տարբերակիչ (CFD) ASIC-ի մշակմանը և տարբեր մեթոդներով (լիցքի ներարկում, լազերային ճառագայթում,  $\beta$ -ռադիոակտիվ ճառագայթում և 120 ԳԷՎ պրոտոնային փունջ) նրա փորձարկումները: ASIC-ը (An Application-Specific Integrated Circuit) ռադիացիոն ճառագայթմանը դիմացկուն էլեկտրոնային ինտեգրալ չիպ է, որը նախատեսված է մասնիկների բախումներից չափազանց բարձր արագությամբ տվյալները մշակելու փոխանցելու համար: Այս չիպերն ինտեգրված են անմիջապես դետեկտորի մոդուլների վրա՝ տվյալները հայտնաբերելու, վայրկյանում մինչև 40 միլիոն դեպքեր մշակելու և փոխանցելու համար: ASIC-ի աշխատանքը հիմնված է հաստատուն կոտորակային տարբերակման (Constant Fraction Discrimination կամ CDF) տեխնիկայի վրա: CFD մեթոդի կիրառումը կապահովի մի շարք առավելություններ, այդ թվում ցածր ամպլիտուդներով ազդանշանների նկատմամբ բարձր զգայունություն և ժամանակի չափման ճշգրտության բարելավում: CFD տեխնիկան օգտագործող ASIC-ի առաջին նախատիպը փորձարկվել է լիցքի ներարկման, պիկովայրկյանային 1062 նմ ալիքի երկարության լազերային լուսավորման և բետա-ռադիոակտիվ աղբյուրի ճառագայթման միջոցով: Դրանից հետո ստուգումներն արվել են պրոտոնային փնջով FNAL-ի Test Beam Facility-ում: հաստատուն ջերմաստիճանի պայմաններում տարբեր ստուգման մեթոդներով հաջողվել է հասնել 8 պկվ (լիցքի ներմուծմամբ) 10 պկվ (լազերային լույսով) ժամանակային ճշտության:

**Չորրորդ գլուխը** բաղկացած է երկու մասից և նվիրված է CMS Endcap-ի ժամանակային շերտի ընթերցման AC-LGAD չիպի ստեղծմանը և պրոտոնային փնջով նրանց ստուգման աշխատանքներին: AC-LGAD-ները փոփոխական հոսանքի (AC), ցածր ուժեղացման հեղեղային դիոդի (LGAD) նոր սերնդի սարքավորումներ են, որոնք, համեմատած DC-LGAD-ների, թույլ են տալիս գրանցել մասնիկները սենսորի

ամբողջ մակերեսով: Այս աշխատանքում փորձարկվել են տարբեր հաստության (20, 30, 50 մկմ) և երկարության (0.5, 1.0 սմ), տարբեր ձևի և չափերի AC-LGAD պիքսելներ (pixel) և ժապավեններ (strip): Hamamatsu Photonics-ի և BNL-ի կողմից արտադրված այս սենսորների հետազոտությունը կատարվել է 120 ԳԷՎ պրոտոնային փնջով:

Չորրորդ գլխի երկրորդ մասը նվիրված է HL-LHC-ի համար նախատեսված CMS դետեկտորի Endcap Timing Layer (ETL) մոդուլի բջիջների փորձարկմանը և մշակմանը: ETL մոդուլների երկու տարբերակ է փորձարկվել: Յուրաքանչյուր մոդուլ բաղկացած է 3 հիմնական մասից՝ DC-ին միացված LGAD սենսոր, ETL-ի (ETROC) ընթերցման չիպ, որին միացված է LGAD-ը, և PCB, որն օգտագործվում է ETROC-LGAD համակարգի տեղեկություն փոխանցման համար: Մոդուլի տարբերակները փորձարկվել են լիցքի ներարկման, ինֆրակարմիր լազերային ճառագայթման, և պրոտոն/էլեկտրոն փնջերով: Տարբեր մեթոդներով և տարբեր չափումներից ժամանակային ճշգրտությունը գնահատվել է 60-80 պկվ իսկ էֆեկտիվությունը մոտ 40%:

**Եզրակացությունն** ամփոփում է ատենափոսության հիմնական նպատակները և արդյունքները: Աշխատանքում «Երկար ապրող մասնիկներ»-ի (LLP) որոնումը արվել է CMS-ի մյուսնային համակարգում B մեզոնների տրոհման ճանապարհով: LLP-ների ծնման հավանականության վերին սահմանը գնահատվել է  $10^{-4}$ , բարելավելով նախկին գնահատականը 10 անգամ: Մասնիկների գրանցման ժամանակի ճշգրտությունը բարելավելու նպատակով մշակվել և փորձարկվել է CFD ազդանշանի մշակման տեխնիկայի վրա հիմնված կիսահաղորդչային նոր չիպ: CFD-ASIC-ին միացված ցածր ուժեղացմամբ հեղեղային դիոդների (LGAD) վրա հիմնված այս դետեկտորը փորձարկվել է լազերի, բետա աղբյուրի և պրոտոնային փնջի ճառագայթման միջոցով: 20 և 50 մկմ հաստության դիոդների համար ստացվել է մոտ 20 և 30 պկվ ժամանակի, և 20-30 մկմ կոորդինատի չափման ճշտություն: Կատարվել է HL-LHC-ի համար նախագծված CMS դետեկտորի Endcap Timing Layer մոդուլային բջիջների փորձարկում և մշակում: Լազերային և 120/6 ԳԷՎ էներգիայի պրոտոնային/էլեկտրոնային փնջերով չափվել են նախատիպերի ժամանակային չափման ճշտությունը և էֆեկտիվությունը: Առաջին նախատիպի փորձարկման ընթացքում լազերային և էլեկտրոնային փնջերով ստացվել է մոտ 25 և 55 պկվ ժամանակի չափման ճշտություն և 100% էֆեկտիվություն: FNAL-ում և CERN-ում երկրորդ նախատիպի պրոտոնային փնջերի փորձարկումներով հասել են 80 պկվ ժամանակային ճշտության և 40% էֆեկտիվության:

Որևէ էական թերությունն ատենախոսության և սեղմագրի մեջ չեն նկատել: Կուզեմ անել միայն հետևյալ դիտողությունները.

1. Ատենախոսության սահմանափակ ծավալում շատ սեղմ ձևով ընդգրկված է բավականին մեծ և արժեքավոր տեղեկություն, նամանավանք Երկրորդ, Երրորդ և Չորրորդ գլուխներում: Դրանցից յուրաքանչյուրը, որոշ ընդարձակումից հետո, կլինեն բավարար թեկնացուական թեզի համար:
2. Ցանկալի էր ատենախոսության մեջ ներառել ավելի շատ բացատրություններ, թե ինչպես են գնահատվել փորձարարական և ՄԿ հաշվարկների սխալները:
3. CMS-ն աշխատում է չափազանց ինտենսիվ ռադիացիոն պայմաններում, որն էապես վնասում է նրա առանձին գրանցիչները և էլեկտրոնիկան, վատացնելով նրանց էֆեկտիվությունը և ճշտությունը ռադիացիոն պայմանները կլինեն ավելի խիստ երբ LHC-ն անցնի բարձր ինտենսիվության (HL-LHC), և ապագա կոլայդերների (FCC, EIC) համար: Ուստի շատ կարևոր էր ստուգել 3-րդ և 4-րդ գլուխներում մշակված նոր (FCFD AC-LGAD) սարքերի ռադիացիոն դիմացկունությունը:

Սակայն վերոհիշյալ դիտողություններն ավելի շատ ցանկություններ են և ոչ էական: Նրանք չեն կարող են ազդել ատենախոսության բարձր գիտական մակարդակի և ստացված արդյունքների արժեքի վրա: Ատենախոսության թեման, կատարված ուսումնասիրությունները շատ ժամանակակից և արդիական են, իսկ կատարված աշխատանքը կարևոր և կիրառելի:

1. Ներկայացված թեկնածուական ատենախոսությունը իր բովանդակությամբ և ծավալով լիովին համապատասխանում է ԱԱԳԼ-ում գործող ՀՀ ԲՈՂ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի Ա.04.16 «Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությանը:
2. ՑԵՌՆ-ի մեծ հաղորնային կոլայդերի CMS գիտափորձի մեծածավալ տվյալների մշակման արդյունքում ստացվել են ավելի խիստ սահմանափակումներ B-մեզոնների տրոհումներում նոր տեսակի (Ստանդարդ Մոդելից անդին) երկարակյաց մասնիկների (LLPs) ծնման հավանականության վերաբերյալ:
3. Կատարվել են մանրակրկիտ փորձարարական ուսումնասիրություններ, որոնց արդյունքում ստեղծվել և հետազոտվել են բարձր ժամանակային և կոորդինատային ճշտության կիսահաղորդչային դետեկտորներ, որոնք կարող են օգտագործվել HL-LHC-ի և ապագա այլ կոլայդերների գիտափորձերում:

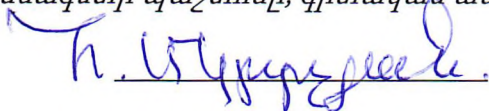
4. Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրատարակված են միջազգային բարձր վարկանիշ ունեցող ամսագրերում, զեկուցվել են միջազգային գիտաժողովներում:

Հավակնորդի հիմնական հրատարակումներում և ատենախոսության մեջ բերված արդյունքները հավաստի են և արժեքավոր, գիտական դրույթները հիմնավորված: Կատարված ուսումնասիրություններում օգտագործել են բարձր էներգիաների փորձարարական ֆիզիկայի արդի մեթոդները, սվյալների մշակման և լավագույն հնարքները: Սեղմագիրը միանգամայն ճիշտ է արտացոլում ատենախոսության բովանդակությունը և ստացված արդյունքները:

Ելնելով վերոհիշյալից, գտնում եմ, որ Արամ Հայրապետյանի «Search for Long-Lived particles beyond Standard Model with CMS (LHC) experiment and development of semiconductor detectors for high precision timing and spatial measurement» թեմայով թեկնածուական ատենախոսությունը լիովին համապատասխանում է ԲԿԳԿ-ի ներկայացված պահանջներին, և նրա հեղինակ Արամ Հայրապետյանը արժանի է ֆիզ. Մաթ. Գիտությունների թեկնածուի կոչման:

Ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր

*(մասնագետի պաշտոնը, գիտական աստիճանը)*



*(ստորագրություն)*

Մկրտչյան Համլետ Գեղամի

*(ա. ա. հ.)*

Մասնագետի (Մկրտչյան Համլետ Գեղամի) ստորագրության իսկությունը

*(ա. ա. հ.)*

Հաստատում եմ.

Էրիկ Խասսոյան

*(ԱԱԳԼ գիտական քարտուղարի ծ/պ)*



*(ստորագրություն և կնիք)*

