

Հաստատում եմ

Երևանի պետական համալսարանի  
գիտական հարցերի գծով պրոռեկտոր

Ռ. Հ. Բարխուդարյան



23 ապրիլ 2026 թ.

### Կ Ա Ր Ծ Ի Ք

Արամ Արմենի Հայրապետյանի՝ Ա.Օ4.16 «Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզ.-մաթ. գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման նպատակով ներկայացված «Ստանդարտ մոդելից դուրս երկար ապրող մասնիկների որոնումը CMS (LHC) գիտափորձում և կոորդինատային ու ժամանակային մեծ ճշտությամբ կիսահաղորդչային դետեկտորների մշակումը» թեմայով թեկնածուական ատենախոսության վերաբերյալ:

Ատենախոսությունը քննարկվել և հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի գիտահետազոտական ինստիտուտի միջուկային ֆիզիկայի և աստաղֆիզիկայի կենտրոնի 2026 թ. ապրիլի 21-ին կայացած նիստում: Քննարկմանը մասնակցում էին ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր Խ. Ներկարարյանը, ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր Ա. Բալաբեկյանը, ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկ. Ա. Թումասյանը, ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկ. Գ. Նիկողոսյանը, ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկ. Գ. Հովհաննիսյանը, ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկ. Է. Կարապետյանը ինչպես նաև Մ. Խաչատրյանը, Ա. Գևորգյանը, Ս. Գագինյանը, Է. Զարաջյանը, Ն. Ղարիբյանը, Ա. Մխիթարյանը, Գ. Բաղդասարյանը, Ա. Չոիրաբյանը, Ս. Աղավեյանը:

Թեկնածուական ատենախոսությունը նվիրված է Միջուկային հետազոտությունների Եվրոպական կենտրոնի (CERN) Մեծ հաղրոնային կոլլայդերի (LHC) Կոմպակտ մյուոնային սոլենոիդը (CMS) գիտափորձում Ստանդարտ մոդելից (ՍՄ) դուրս սուպերսիմետրիկ տարբեր մոդելներով կանխատեսվող երկար ապրող մասնիկների (LLP) որոնմանը, և տարածական ու ժամանակային մեծ ճշտությամբ չափումների համար կիսահաղորդչային դետեկտորների մշակմանն ու բնութագրերի ուսումնասիրությանը:

**Ներածության** մեջ համառոտ նկարագրվում է CMS (LHC) գիտափորձում ՍՄ-ից դուրս ֆենոմենների որոնման, մասնավորապես LLP մասնիկների, մոտիվացիան, այդ

հետազոտություններն իրականացնելու համար CMS (LHC) գիտափորձի հնարավորությունները, ինչպես նաև ժամանակային և տարածական մեծ ճշտությամբ չափումներ իրականացնող համակարգերի ստեղծման կարևորությունը ապագայի գիտափորձերի համար՝ մասնավորապես CMS գիտափորձում LHC-ի բարձր լուսատվության ռեժիմում:

**Առաջին գլխում** ներկայացվում է LHC-ն և CMS դետեկտորը: LHC-ն մինչ այժմ ստեղծված ամենաառաջադեմ մասնիկային արագացուցիչն է, որը պրոտոն-պրոտոն և միջուկ-միջուկ բախումների համար ապահովում է աննախադեպ էներգիա և բարձր լուսատվություն (ներկայումս պրոտոն-պրոտոն բախումների էներգիան հսցվել է 13.6 ՏԷՎ իսկ լուսատվությունը՝  $L \sim 2.0 \times 10^{34} \text{ սմ}^{-2} \text{ վ}^{-1}$ ): CMS-ը LHC-ի չորս հիմնական գիտափորձերից մեկն է, և ապահովում է մասնիկների գրանցումը, նույնականացումն ու բնութագրերի ճշգրիտ վերականգնումը էներգիաների մինչև մի քանի ՏԷՎ տիրույթում: Սրա միջուկը գերհաղորդիչ սոլենոիդայ մագնիսն է, որն ապահովում է 3.8 Տ մագնիսական դաշտ սոլիմոդի ներքին տիրույթում: Դետեկտորը կազմված է տրեկերային համակարգից, որն ապահովում է լիցքավորված մասնիկների հետագծերի և փոխազդեցության գազաթների ճշգրիտ վերականգնումը, կապար-վոլֆրամատի (PbWO<sub>4</sub>) բյուրեղներից պատրաստված էլեկտրամագնիսական կալորիմետրից, որը նախահեղիեղային շերտի հետ մեկտեղ ապահովում է էլեկտրոնների և ֆոտոնների գրանցումն ու նույնականացումը, արույր-սցինտիլատորային հաղորնային կալորիմետրից հաղորնների էներգիաների չափման համար, և մյուռնային համակարգից, մյուռնների նույնականացման և բնութագրերի ճշգրիտ չափման համար: Տրվում է նաև 2026-2030թթ. նախատեսվող արդիականացման աշխատանքների նկարագրությունը, որոնք ապահովելու են CMS-ի անխափան աշխատանքն ու գրանցվող տվյալների բարձր որակը LHC-ի բարձր լուսատվության ռեժիմում:

**Երկրորդ գլուխը** նվիրված է ՄՄ-ից դուրս երկար ապրող մասնիկների որոնմանը CMS (LHC) գիտափորձում: Այս մասնիկների գոյությունը կանխատեսվում է մի շարք տեսական մոդելներով: Դիտարկվել է ՄՄ-ի մինիմալ ընդարձակման սցենարը, որտեղ ՄՄ-ի հայտնի մասնիկներին ավելանում է մեկ լիցքաչեզոք սկալյար մասնիկ՝ LLP: Դիտարկվել է B-մեզոնների տրոհումներում այս մասնիկի ծնման հիպոթետիկ պրոցեսը, որում LLP մասնիկները տրոհվում են լիցքավորված կամ լիցքաչեզոք պիոնային զույգի: Դիտարկվել է մոդելային պարամետրերի այնպիսի միջակայք, որի դեպքում LLP մասնիկների տրոհումը տեղի է ունենում CMS դետեկտորի մյուռնային համակարգում առաջացնելով լայն հեղիեղներ: Հետազոտություններն իրականացվել են CMS գիտափորձի 2018թ. 13 ՏԷՎ էներգիայով պրոտոն-պրոտոն բախումների  $\sim 41.6 \text{ ֆբ}^{-1}$  ինտեգրալ լուսատվությամբ փորձարարական տվյալներում: Մշակվել են LLP մասնիկների ռեկոնստրուկցիայի այգորիթմն ու դեպքերի ընտրման պայամանները: Կատարվել է հիպոթետիկ պրոցեսի մոդելավորումը, մշակվել ֆոնային պրոցեսների մոդելները, և փորձարարական տվյալների հետ համամատողյան միջոցով արվել է որոնվող պրոցեսի սահմանափակումը՝ B-մեզոնների դիտակրվող կանալով տրոհման հարաբերական լայնության վերին սահմանի գնահատման տեսքով: Վերին սահմանի գնահատումն իրականացվել է մոդելային պարամետրերի (LLP մասնիկի զանգվածի և կյանքի տևողության) տարբեր արժեքների

համար, և պարամետրերի դիտարկված տիրույթում 95% վստահելիության աստիճանով այն գնահատվել է  $10^{-4}$ : Սա մոտ մեկ կարգով ավելի խիստ սահմանափակում է՝ նախքինում ստացված արդյունքների հետ համեմատած:

**Երրորդ գլուխը** նվիրված է Է. Ֆերմիի ազգային արագացուցչային լաբորատորիայում (Ֆերմիլաբ, ԱՄՆ) ազդանշանի վերլուծության «Կոտորակի հաստատուն տարբերակիչի» (Constant Fraction Discriminator: CFD) մեթոդով չիփի (ASIC) փորձարկմանն ու բնութագրերի ուսումնասիրությանը: Այս էլեկտրոնային ինտեգրալ սխեման (չիփ) ստեղծված է դետեկտորի մոդուլներին անմիջապես ինտեգրված լինելու համար և ծառայում է դետեկտորից եկած ազդանշանն առ շատ կարճ ժամանակահատվածում վերլուծելու համար: CFD մեթոդի կիրառումը կապահովի մի շարք առավելություններ, մասնավորապես՝ ցածր ամպլիտուդաներով ազդանշանների նկատմամբ բարձր զգայունությունը և ժամանակի չափման ճշգրտության բարելավումը: Ուսումնասիրվել են CFD չիփի ժամանակային չափման բնութագրերը լիցքի ներակրման, պիկովայրկյանային լազրային իմպուլսի,  $\beta$ -ռադիոակտիվ աղբյուրի, ինչպես նաև 120 ԳԷՎ էներգիայով պրոտոնային փնջով ճառագայթման փորձարկումներում՝ կախված կիրառված հակադարձ լարումից (bias voltage): Ստացվել է 8-10 պկվ. (պիկովայրկյան՝  $10^{-12}$  վ) ժամանակային լուծողականություն լիցքի ներկրման և լազերային ճառագայթման փորձարկումներում, և  $\sim 30$  պկվ.՝  $\beta$ -ռադիոակտիվ աղբյուրի և պրոտոնային փնջի փորձարկումներում:

**Չորրորդ գլուխը** նվիրված է ցածր ուժեղացման հեղիեղային դիոդների (Low Gain Avalanche Diode: LGAD) տեխնոլոգիայի վրա հիմնված փիքսելային և սթրիփային (շերտավոր) սենսորների նկարագրությանը, ինչպես նաև դրանց բնութագրերի հետազոտմանը: Փորձարկվել են տարբեր լայնության (20, 30, 50 մկմ) և երկարության (0.5, 1.0 սմ) փոփոխական հոսանքի համակցմամբ (AC-LGAD) սթրիփային, ինչպես նաև հաստատուն հոսանքի համակցմամբ (DC-LGAD) տարբեր չափսերի փիքսելային սենսորները՝ օգտագործելով 120 ԳԷՎ էներգիայով պրոտոնային փունջը: Արդյունքում ստացվել է 20-50 պկվ. ժամանակային և 10-50 մկմ. տարածական լուծողականություն:

Այս գլխում նաև նկարագրված է CMS 2026-2030թթ. արդիականացման նախագծում CMS դետեկտորի ժամանակի չափման շերտի եզրային մասի (ETL) նախատիպի և կարդացող չիփի (ETROC) փորձարկման աշխատանքները: Փորձարկվել է նախատիպի երկու օրինակ, որոնք իրենցից ներակայացնում են LGAD-փիքսելային կառուցվածքով (16x16) և ETROC չիփերի համակցումով դետեկտորներ: Նախատիպերից առաջինի փորձարկումներն իրականացվել են լազերային ճառագայթման և 6 ԳԷՎ էներգիայով էլեկտրոնային (DESY, Գերմանիա) փնջերով, որոնց համար ստացվել է 25 և 50 պկվ ժամանակային լուծողականություն և  $\sim 100$  % էֆեկտիվություն: Երկրորդ նախատիպի փորձարկումներուն իրականացվել են 120 ԳԷՎ (Ֆերմիլաբ) և 450 ԳԷՎ (SPS, CERN) պրոտոնային փնջերով, որրտեղ ժամանակային լուծողականությունը չափվել է  $\sim 80$  պկվ., իսկ էֆեկտիվությունը՝  $\sim 40$ %:

**Եզրակացություն** մեջ ամփոփում է ատենախոսության հիմնական նպատակները և արդյունքները: Ներկայացվում է CMS գիտափորձի 2018թ. պրոտոն-պրոտոն բախումների

տվյալներում B-մեզոնների հիպոթետիկ տրոհման արդյունքում ծնվող երկար ապրող մասնիկների (LLP) որոնումը CMS-ի մյուռնային համակարգում: Այս տրոհման համար մոդելային պարամետրերի դիտարկված միջակայքում գնահատվել է տրոհման հարաբերական լայնության վերին սահմանը, որը 95% վստահելիության աստիճանով կազմում է  $\sim 10^{-4}$ , որը բարելավում է նախքին գնահատականը մոտ 10 անգամ: Ներկայացվում է ազդանշանի մշակման համար Ֆերմիլաբում մշակված «կոտորակի հաստատուն տարբերակիչի» (CFD) մեթոդով աշխատող չիփի լիցքի ներակրման, պիկովայրկյանային լազրային իմպուլսի,  $\beta$ -ռադիոակտիվ աղբյուրի և պրոտոնային փնջով փորձարկման արդյունքները, որոնք ցույց են տալիս 8-25 պկվ. ժամանակային լուծողականություն: Ներկայացված է LGAD տեխնոլոգիայով տարբեր չափսերի փիքսելային և սթրիփային սենսորների և համակցված էլեկտրոնիկայի լազերային, էլեկտրոնային և պրոտոնային փնջերով փորձարկման արդյունքները, որոնց համար ստացվել է 20-50 պկվ. ժամանակային և 10-50 մկմ. տարածական լուծողականություն: Ներկայացվում է CMS դետեկտորի համար նախագծված նոր ժամանակային շերտի նախատիպի երկու օրինակների փորձարկման արդյունքները, որոնց համար գրանցվել է մի քանի տասնյակ պկվ. ժամանակային լուծողականություն:

Ատենախոսությունը գրված է տրամաբանորեն պարզ լեզվով և բարձր գիտական մակարդակով, և թույլ է տալիս եզրակացնել ներկայացված աշխատանքում Արամ Հայրապետյանի անձնական ներդրումը: Այն հետևյալն է՝

- CMS գիտափորձի պայմաններում պրոտոն-պրոտոն փոխազդեցություններում LLP մասնիկների ծնման պրոցեսի մոդելավորումը B-մեզոնների տրոհման պրոցեսում մոդելային պարամետրերի տարբեր արժեքների համար,
- CMS մյուռնային համակարգում LLP մասնիկների վերականգնման ալգորիթմի և դեպքերի ընտրման պայմանների մշակումն ու օպտիմալացումը,
- Մոդելավորած և փորձարարական տվյալների վերլուծությունը, ազդանշանային և ֆոնային մոդելների մշակումը,
- Վիճակագրական անալիզն ու գնահատականների դուրսբերումը,
- CFD չիփերի փորձարկումը կիրառված հակադարձ լարման տարբեր արժեքների դեպքում, տվյալների մշակումն ու ժամանակային լուծողականության չափումը,
- LGAD տեխնոլոգիայով ստեղծված սենսորների փորձարկման համակարգերի նախապատրաստումը և անմիջական մասնակցությունը թեստավորման աշխատանքներին,
- Տարբեր չափսերով փիքսելային և սթրիփային սենսորների փորձարկման տվյալների մշակումը, էֆեկտիվությունների, ինչպես նաև ժամանակային և տարածական լուծողականությունների չափումը,
- CMS-ի նոր ժամանակային շերտի մոդուլների նախատիպերի փորձարկումը, ժամանակային լուծողականության և էֆեկտիվության հաշվարկումը:

Որպես թերություն կարելի է նշել հետևյալը՝

- LLP մասնիկների որոնման խնդրում լիովին բացված չէ ընտրված վերջնական վիճակի (LLP-ի երկպիոնային տրոհման կանալի) նպատակահարմարությունը,
- Չի ներկայացվում ETL մոդելների երկրորդ նախատիպի էֆեկտիվության և ժամանակային լուծողականության դեգրադացիայի պատճառները պրոտոնային փնջերով փորձարկման ժամանակ՝ համեմատած լազերային և էլեկտրոնային փնջերով առաջին նախատիպի փորձարկման արդյունքների հետ:

Սակայն նշված թերությունները չեն նսեմացնում կատարված լայնածավալ աշխատանքը:

Հաշվի առնելով ստացված արդյունքների կարևորությունը տարրական մասնիկների և բարձր էներգիաների ֆիզիկայի ինչպես նաև դետեկտորային նորագույն տեխնոլոգիաների մշակման բնագավառներում՝ որոշեցին, որ Ա. Հայրապետյանի «Ստանդարտ մոդելից դուրս երկար ապրող մասնիկների որոնումը CMS (LHC) գիտափորձում և կոորդինատային ու ժամանակային մեծ ճշտության կիսահաղորդչային դետեկտորների մշակումը» թեմայով ատենախոսությունն արժեքավոր ներդրում է բարձր էներգիաների ֆիզիկայի բնագավառում, իսկ դրա հեղինակն արժանի է ֆիզ.-մաթ. գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի շնորհմանը, ուստի Ա. Հայրապետյանի ատենախոսությունը երաշխավորվում է պաշտպանության 024 մասնագիտական խորհրդում Ա.04.16 "Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական ճառագայթների ֆիզիկա" մասնագիտությամբ:

ԵՊՀ Ֆիզիկայի գիտահետազոտական ինստիտուտի

Հեռանկարային հետազոտությունների միջազգային կենտրոնի ղեկավար

Ֆ.մ.գ.դ.. պրոֆ.՝

Անահիտ Բալաբեկյան



ԵՊՀ գիտ. քարտուղար՝

Մ. Վ. Հովհաննիսյան

23.04.26թ.