

Կարծիք Խաչատրյան Հ. Մհերի «Մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների կիրառում բլազարների դասակարգման և դրանց ճառագայթման մոդելավորման համար» թեմայով ատենախոսության վերաբերյալ, ինչը ներկայացված է Ա.03.02 - «Աստղաֆիզիկա, ռադիոաստղագիտություն» մասնագիտությամբ ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար

Բլազարների բազմաալիքային ճառագայթման մեխանիզմների հետազոտումը, տարբեր ժամանակահատվածներում և տարբեր ալիքային տիրույթներում, դիտումների օրեցօր ավելացող բազմաքանակ և մեծածավալ տվյալների տեսական մեկնաբանումը և մոդելավորումը, ժամանակակից բարձր էներգիաների աստղաֆիզիկայի արդիական խնդիրներից են։ Այդ աղբյուրների ճառագայթային «սպեկտրալ էներգիայի բաշխումը» (ՄԷԲ) բաղկացած է երկու լայն կույտից (humps), որոնք ներառում են մոտ 19 կարգի մեծության հասնող էներգիայի տիրույթ՝ ռադիոյից մինչև γ ճառագայթները, նույնիսկ հասնելով մինչև TeV տիրույթը։ Բլազարների արագ փոփոխականությունը, լայն տիրույթում բևեռացված ճառագայթումը և դրանց հնարավոր կապը բարձր էներգիայի նեյտրինոների հետ, թույլ են տալիս հետազոտել ռելյատիվիստական շիթերում տեղի ունեցող մագնիսական դաշտերում մասնիկների արագացման և ճառագայթման գործընթացները, որոնցում հիմնարար դեր է խաղում արտաքին բաղադրիչը՝ կենտրոնական գերզանգվածով սև խոռոչի ակրեցիոն սկավառակը։

Վերջին տարիներին մեքենայական ուսուցման մեթոդները դարձել են հզոր գործիք աստղագիտության և աստղաֆիզիկայի մեջ, հատկապես տվյալների մեծածավալ բազան համակարգող ուսումնասիրության և հաշվողական թանկ խնդիրների համար։ Այս մեթոդները արդյունավետ են դիտողական տվյալներում թաքնված օրինաչափություններ գտնելու, դասակարգելու, ֆիզիկական պարամետրեր գնահատելու և դիտողական նյութի հիմքում ընկած ֆիզիկական մեծությունների միջև ոչ գծային կապերը վերծանելու համար։ Դրանք կարող են օգտագործվել նաև որպես փոխարինող մոդելներ՝ դանդաղ թվային մոդելավորումները արագ մոտարկումներով փոխարինելու համար, զգալիորեն կրճատելով հաշվողական ժամանակը, հնարավոր դարձնելով մեծածավալ և ժամանակատար ուսումնասիրությունները։

Ատենախոսության նպատակն է մեքենայական ուսուցման ժամանակակից եղանակների ներդրումը և կիրառումը բլազարների դասակարգման բարելավման և դրանց բազմաալիքային ճառագայթման մեխանիզմների գործնական հետազոտման խնդիրներում։ Աշխատանքի հիմնավորումը պայմանավորված է ֆիզիկական գործընթացների մոդելավորման գործնական բարելավման կարևոր խնդրի լուծմամբ, ինչը իրականացվում է Fermi-LAT կատալոգների մեծածավալ դիտողական նյութի վերլուծությունից ստացված առանձնահատկությունները համադրելով ճառագայթային մոդելավորման հաշվարկային սպեկտրների հետ։

Ատենախոսությունը բաղկացած է, հինգ զլուխներից, ամփոփումից և օգտագործված գրականության ցանկից։ Ծավալը 129 էջ է, պարունակում է 31 նկար և 7 աղյուսակ։

Ներածության մեջ հիմնավորվում է հետազոտվող թեմայի արդիականությունը, բերվում է բնագավառի համառոտ նկարագրությունը, ձևակերպվում է աշխատանքի նպատակը, հիմնական դրույթները, և հակիրճ շարադրվում է դրա բովանդակությունը։

Առաջին գլխում ներկայացվում են ատենախոսության տեսական և մեթոդաբանական հիմքերը։ Քննարկված են բլազարների շիթերում արագացվող էլեկտրոնների սինքրոտրոնային

ճառագայթումը և հակադարձ Կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմը, նաև հաղորդակցող սցենարները: Ամփոփվում են օգտագործված ճառագայթային բազմալիքային տվյալները, ներկայացված են մասնավորապես Fermi-LAT-ը, Swift դիտակների հիմնական բնութագրերը, Մարկարյանի բազմալիքային տվյալների կենտրոնը (MMDC), և դրանցով գրանցված տվյալների մշակման հիմնական դրույթները: Ներկայացված են նաև մեքենայական ուսուցման ժամանակակից եղանակները, քննարկված են «գրադիենտային ուժեղացված որոշման ծառի ալգորիթմները» («gradient-boosted decision tree algorithms») և «արհեստական նեյրոնային ցանցերը» («artificial neural networks»), որտեղ «կոնվոլյուցիոն նեյրոնային ցանցերը» (ԿՆՑ) («convolutional neural networks» (CNN)) ներկայացվում են որպես բազմալիքային SED արագ «մոդելավորման փոխարինող» («surrogate models») մոդելներ:

Երկրորդ գլխում, օգտագործելով Fermi-LAT չորրորդ կատալոգի գամմա-ճառագայթային տիրույթի տվյալները, իրականացվել է չղասակարգված բլազարների դասակարգումը: Բլազարների սպեկտրալ և ժամանակային հատկությունների հիման վրա ուսուցանվել են «արհեստական նեյրոնային ցանցերը», նաև «գրադիենտային ուժեղացված որոշման ծառի» տիպի ալգորիթմները՝ XGBoost և LightGBM: Ստացված արդյունքների հիման վրա իրականացվել է չղասակարգված բլազարների բաժանումը BL Lac և «Հարթ սպեկտրի ռադիոքվազարներ» «Flat-Spectrum Radio Quasars (FSRQ)» ենթադասերի:

Երրորդ գլխում մշակվել է, մեկ տիրույթից լեպտոնային/SSC + EIC սցենարի մոդելների շրջանակներում ստացված, բլազարի ՄԷԲ-ի մոդելավորման մեքենայական ուսուցման համակարգը: Սա ցույց է տալիս, որ ԿՆՑ-փոխարինողը կարող է վերաբրտադրել դիտարկված բազմալիքային SED-երը և որոշել մոդելի պարամետրերի ֆիզիկապես առավել վստահելի արժեքները:

Չորրորդ գլխում SSC մոդելավորման համակարգը կիրառվում է PKS 2155-304 BL Lac-աղբյուրի SED-երը մոդելավորման համար: Այս աղբյուրը համարվում է, $z = 0.117$ կարմիր շեղումով, բարձր սինխրոտրոնային զագաթնակետային BL Lac աղբյուր: Այն խիստ փոփոխական է՝ օպտիկական/ուլտրամանուշակագույնից մինչև ռենտգենյան և γ -ճառագայթների էներգիաներ, և դրա երկար դիտարկումների պատմությունը այն հարմար է դարձնում ժամանակի լուծաչափով համակարգված մոդելավորման համար: Յուրաքանչյուր ակտիվ վիճակի ենթադրյալ SSC պարամետրերի բաշխումները պասիվ վիճակում (quiescent (QS)) բաշխման հետ համեմատելու համար օգտագործվում է Կոմպոնոմ-Սմիթնոմի (ԿՍ) թեստը: Բազմալիքային բոնկման (MWF) վիճակը զգալիորեն տարբերվում է QS-վիճակից մագնիսական դաշտի արժեքով, էլեկտրոնային լուսատվությամբ, էլեկտրոնային առավելագույն էներգիայով և Դոպլերի գործակցով, բայց ոչ ճառագայթման տիրույթի չափսով կամ էլեկտրոնային ինդեքսով:

Հինգերորդ գլխում ուսումնասիրվում է «Հարթ սպեկտրի ռադիոքվազարների (FSRQ)» դասի PKS 1441+25 բլազարի բազմալիքային ճառագայթումը շատ բարձր էներգիայի (VHE) γ -ճառագայթման վիճակում: Նման դիտումները FSRQ-դասի աղբյուրներում հազվադեպ են, քանի որ դրանց ակրեցիոն սկավառակները և լայն գծի շրջանները (BLR) առաջ են բերում շատ խիտ ֆոտոնային դաշտեր: Այս պատճառով, PKS 1441+25-ից VHE γ -ճառագայթների հայտնաբերումը հատկապես կարևոր է: Օգտագործելով Fermi-LAT, Swift-XRT/UVOT և այլ դիտակներով գրանցված տվյալները՝ կառուցվել են աղբյուրի տարբեր ակտիվության վիճակներին համապատասխան ճառագայթման

սպեկտրներ, որոնք մոդելավորվել են լեպտոնային մոդելի շրջանակում, հաշվի առնելով սինքրոտրոնային ֆոտոնների և արտաքին ֆոտոնային դաշտերի վրա հակադարձ Կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմները: Գնահատվել են ճառագայթման տիրույթի ֆիզիկական պարամետրերը և քննարկվել դրանց փոփոխությունները բռնկման տարբեր փուլերում:

Գիտական նորույթը

1. Կ-ճառագայթային սպեկտրալ և ժամանակային 18 պարամետրերի օգտագործմամբ և արդի մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների միջոցով ստացվել է 4FGL-DR3-ում BCU-ների վիճակագրորեն հիմնավորված դասակարգումը: Դրանց փորձարկումը կատարվել է 2219 հաստատված BL Lac օբյեկտների և FSRQ-ների վրա: Փորձարկված ANN, XGBOOST և LIGHTGBM մոդելներից LIGHTGBM-ը ցույց է տվել լավագույն արդյունավետությունը: Վերջնական դասակարգման մեջ 825 BCU-ներ դասակարգվել են որպես BL Lac թեկնածուներ, իսկ 405-ը՝ որպես FSRQ թեկնածուներ, և 190 աղբյուր մնացել են առանց հուսալի դասի: Դասակարգված նմուշը հետագայում օգտագործվել է FSRQ-ների և BL Lac ենթադասերի միջև կապը Կ-ճառագայթային ֆոտոնային ինդեքսի, սինխրոտրոնային զագաթնակետային հաճախականության և բարձր էներգիայի զագաթնակետային հաճախականության միջոցով ուսումնասիրելու համար:
2. Ինքնահամաձայնեցված մեկ գոտի SSC մոդելի համար կառուցվել է CNN-ի վրա հիմնված արագ փոխարինողը: CNN-ը փորձարկվել է լեպտոնիկ ճառագայթային մոդելների վրա, ներառյալ սինխրոտրոնային ճառագայթումը, հակադարձ Կոմպտոնի ցրումը, էլեկտրոնների սառեցումը և զույգերի առաջացման-ոչնչացման պրոցեսները: Ցանցը փորձարկվել է SOPRANO կինետիկ կոդով ստեղծված սպեկտրների մեծ ընտրանքի վրա, ընդգրկելով սառեցման և զույգերի առաջացման ֆիզիկական էֆեկտները: Դա մեծացնում է մոդելավորման արագությունը մոտավորապես 1000 անգամ, քան ուղղակի թվային հաշվարկները, պահպանելով կապը հիմքում ընկած ֆիզիկական մոդելի հետ: Առաջարկված եղանակը համակցվել է MultiNest-ի հետ՝ Mrk 421 և 1ES 1959+650 բազմաալիքային SED-երը համապատասխանեցնելու և մոդելի պարամետրերի բաշխումները ստանալու համար:
3. Փորձարկված CNN-ը օգտագործվել է PKS 2155-304-ի 253 կիսաժամանակյա SED-երը մոդելավորելու համար մեկ գոտի սինխրոտրոնային ինքնա-Կոմպտոնի շրջանակում պարամետրերի արագ գնահատման համար: Դա հնարավոր է դարձնում միատարր բազմադարաշրջանային պատկերացում կազմել, թե տարբեր ակտիվության վիճակներում ինչպես են փոխվում շիթի մեջ մագնիսական դաշտը, էլեկտրոնային լուսավորությունը, էլեկտրոնային առավելագույն էներգիան, Դոպլերի գործակիցը և մասնիկների արագացման պայմանները: Հիմնավորվել է, որ շիթում հիմնականում գերիշխում են մասնիկները, որոնք բնութագրվում են մագնիսական և էլեկտրոնային հզորությունների դ_B $\approx$ 0.09–0.17 հարաբերակցությամբ, մինչդեռ ռենտգենյան բռնկումները ցույց են տվել մագնիսականության աճ:
4. Կատարվել է FSRQ PKS 1441+25-ի ($z = 0.939$) բազմաալիքային վերլուծությունը: Հունվարի բռնկմանը, ապրիլյան VHE վիճակին և մայիս-հունիս ամիսների հանգստի վիճակներին համապատասխանող SED-երը մոդելավորվել են մեկ գոտի արտաքին հակադարձ Կոմպտոնի շրջանակում, օգտագործելով CNN-ի փոխարինող մոդելներ՝ արդյունավետ պարամետրային տարածության ուսումնասիրության համար: PKS 1441+25-ի մոդելավորումից երևում է, որ դրա 2015 թվականի ակտիվությունը կարելի է հասկանալ որպես ճառագայթող շրջանի էվոլյուցիա

շիթի երկայնքով: Այն է՝ հունվարին «լայն գծի շրջանի» (BLR) ներսում կամ դրան մոտ գտնվող կոմպակտ, մագնիսական դաշտի ավելի ուժեղ շրջան, ինչին ապրիլ-հունիս ամիսներին հաջորդում են BLR-ից այն կողմ մասնիկներով գերակշռող ավելի մեծ շրջանները: Ապրիլ-հունիս վիճակները վերաբառադրվել են թույլ մագնիսական դաշտերով և լայն գծի շրջանից այն կողմ գտնվող մեծ ճառագայթող շրջանով ($R \sim 10^{17}$ սմ), որտեղ գերակշռում են փոշոտ թորային ֆոտոնները, իսկ ներքին $\gamma\gamma$ կլանումը աննշան է, ինչը թույլ է տալիս VHE ֆոտոններին դուրս գալ: Ցույց է տրվել, որ դիտվող ակտիվությունը հիմնականում պայմանավորված է դիսիպացիայի շրջանի էվոլյուցիայով և շիթի երկայնքով տեղափոխմամբ:

Դիտողություններ

Ատենախոսությունը հստակ ցուցադրում է հայցորդի կողմից գործնական տիրապետումը ժամանակակից մեքենայական ուսուցման տեխնիկային, և դրա կիրառմանը աստղաֆիզիկական խնդիրների լուծման գործում: Հատկապես նշանակալից ձեռքբերում է՝ «ԿՆՑ փոխարինողի մշակումը» և դրանով դիտարկված բազմալիքային SED-երի վերծանումը: Սա օրիգինալ ձեռքբերում է և ունի իրական հաշվողական աստղաֆիզիկական արժեք:

1. Սակայն, ատենախոսության մեջ որոշ մեթոդաբանական ասպեկտներ բավարար խորությամբ և մանրամասնորեն չեն լուսաբանված, ինչը հնարավորություն չի ընձեռնում լիարժեքորեն գնահատելու օգտագործված մեքենայական ուսուցումը: Խոսքը վերաբերվում է՝ «տրամաչափական ախտորոշման» (calibration diagnostics), «փոխարինող անորոշության տարածման» (surrogate uncertainty propagation), «վավերացման մեթոդաբանության» (validation methodology) և «մեկնաբանելիության վերլուծության» (interpretability analysis) բացակայությանը: Ցանկալի կլիներ ապագայում դիտարկել հետևյալ ուղղությամբ բարելավումները.

(i) Բռնկման վիճակների միջև ԿՄ- թեստերը համեմատելու փոխարեն, կարելի է օգտագործել «Hierarchical Bayesian Modeling for Population Studies» -«հիերարխիային Բայեզյան մոդելավորումը բնակեցման ուսումնասիրությունների» համար: Այդ դեպքում հնարավոր կլիներ ճիշտ տարածել անորոշությունները (properly propagate uncertainties), խուսափել բազմակի փորձարկման խնդիրներից (multiple-testing issues), և ուղղակիորեն վերծանել վիճակից կախված պարամետրերի բաշխումները:

(ii) Հարկ է իրականացնել «անորոշության գիտակցմամբ պատշաճ փոխարինող մոդելավորում» («Proper Uncertainty-Aware Surrogate Modeling»): Դիտարկված CNN-ը դետերմինիստական են թվում, իսկ փոխարինողը պետք է ապահովի կանխատեսողական միջին և կանխատեսողական անորոշություն:

(iii) Ցանկալի է իրականացնել «խիստ անորոշության-գիտակցմամբ փոխարինող վերծանում» («Rigorous uncertainty-aware surrogate inference»), քանի որ դա ազդում է՝ մոդելի հետին հուսալիության (posterior reliability), ֆիզիկական մեկնաբանության և հավաստիության վրա:

2. Մեքենայական ուսուցումը հիմնականում իրականացվել է բլազարների բազմալիքային ճառագայթման մեխանիզմների միայն պարզագույն տեսական մոդելավորման՝ մեկ տիրույթից լեպտոնային/SSC + EIC մոդելների, շրջանակներում:

Աշխատանքը կշահի, եթե քննարկված ֆիզիկական խնդիրները ապագայում պատշաճ խորությամբ հետազոտվեն նաև ընդունված կարեվոր մյուս տեսական մոդելների շրջանակներում:

Իրոք, EIC մոդելի տեսական մեկնաբանությունը առաջարկվել է 1987թ.-ին Բեգելման և Սիկորայի կողմից, այնուհետև դա վերանայվել է (1994, 1997, 2000)թթ. Սիկորայի և մյուսների կողմից, տես օրինակ (A.Celotti et al., 2007, MNRAS, 375, 417): Կանխատեսվում է, որ «արտաքին» (կամ «սաղմնային») ֆոտոնները ճառագայթվում են ակրեցիոն սկավառակի ամենաներքին տիրույթից և լայն գծերով ճառագայթման տիրույթում (LQS) վերամշակումից հետո մտնում են շիթ, որտեղ ենթադրաբար տեղի է ունենում դրանց «գանգվածային» (bulk) կոմպտոնացումը:

Այս սցենարի հետագա զարգացումը՝ «գանգվածային շարժման կոմպտոնացում» (ՋՇԿ, BMC)-մոդելը, առաջարկվել է Տիտարչուկի կողմից (L. Titarchuk et al., 1997, ApJ, 487, 834): Սպեկտրալ երկու բաղադրիչների գումարի փոխարեն, այն նկարագրում է «գանգվածային» կոմպտոնացման ինքնահամաձայնեցված շարժումը: Ցույց է տրվում, որ զուգամիտող հոսքի «գանգվածային» շարժումը ցրում է ֆոտոններին դեպի վեր ավելի արդյունավետ կերպով, քան ջերմային կոմպտոնացումն է, պայմանով, որ էլեկտրոնների ջերմաստիճանը հոսքի մեջ մի քանի keV-ի կարգի է կամ ավելի քիչ: Այս դեպքում, անվերջությունում դիտվող սպեկտրը բաղկացած է փափուկ բաղադրիչից, որը առաջացել է այն մուտքային ֆոտոններից, որոնք մի քանի ցրումներից հետո դուրս են եկել առանց էներգիայի որևէ էական փոփոխության, և ցուցչային օրենքից, որը տարածվում է բարձր էներգիաների տիրույթ և բաղկացած է այն ֆոտոններից, որոնք ենթարկվել են զգալի դեպի վեր ցրման: Հարկ է ուսումնասիրել նշված խնդիրները նաև այս մոդելի և հաղորդային սցենարների շրջանակներում:

3. Քանի որ շիթի հզորության և ակրեցիոն սկավառակի պայծառության կապը արդեն հաստատված է, և դա մատնանշում է ակրեցիայի կարևոր դերը շիթը սնուցելու գործում, հարկ է առաջնահերթորեն լուծել մեծ կարմիր շեղումով բլազարների ամենահզոր շիթերը հետևողականորեն հայտնաբերելու փնտրողական կարևոր խնդիրը մեքենայական ուսուցման ժամանակակից եղանակներով: Դա ենթադրաբար նշանակում է առավել հզոր ակրեցիոն համակարգերի հայտնաբերում: Վերջինս համարժեք է համապատասխան գեր-գանգվածով սև խոռոչների հայտնաբերելուն: Ավելին, յուրաքանչյուր գրանցված բլազարի համար պետք է գոյություն ունենան ($\sim 2 \Gamma^2 = 200(\Gamma^2/10)^2$) նմանատիպ աղբյուրներ ուղղված այլ ուղղություններով (G. Ghisellini, Mem. S.A.It. Vol. 84, 1, c SAIt 2008; arxiv.1302001[astro-ph.CO], 2013), որտեղ Γ -ն շիթ ճառագայթող պլազմայի Լորենցի «գանգվածային» ֆակտորն է: Գնահատելով Γ -ի արժեքները բլազարների համար, կարելի է նոր սահմանափակումներ ստանալ հզոր շիթային աղբյուրների սև խոռոչի գանգվածի ֆունկցիայի համար:

4. Ստենախոսության մեջ FSRQ PKS 1441+25 բլազարի ճառագայթման մեխանիզմները մոդելավորվել է մեկ տիրույթից լեպտոնային/SSC + EIC մոդելների շրջանակներում: Լեպտոնային համասեռ «սինքրոտրոն + ՀԿ» SSC մոդելը լայնորեն կիրառվում է գրականության մեջ, քանի որ այս մոդելում «ռենտգենյան» բոնկումները բնականոն կորելացվում են «շատ բարձր էներգիաների» (VHE) բոնկումների հետ, ինչը դիտվում է: Միևնույն ժամանակ շատ կարևոր խնդիր է բազմահաճախային տիրույթում ՄԷԲ-երի մոդելավորումը քննարկել նաև երկրորդ «հաղորդային» մոդելի շրջանակներում (Mannheim, K. 1993, A&A, 269, 67), որտեղ շիթերում պրոտոնները արագանում են մինչև ($\sim 10^{20}$ eV) գեր-բարձր էներգիաները (ԳԲԷ) և առաջացնում են սինքրոտրոնային «կասկադներ», որի շնորհիվ էլ ձևավորում են բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման ՄԷԲ-երը: Երկրորդ մոդելը խոստումնալից է, քանի որ դա կարող է նաև բացատրել

որոշ բլազարների մոտ նեյտրինային ճառագայթումը և տիեզերական ճառագայթների ծագումը, որոնք գրանցվել են մինչև ԳԲԷ-ները: Ավելին, քանի որ ՄԷԲ-ի բարձր էներգիայի կույտի (hump) բնույթը դեռ քննարկման փուլում է, այլընտրանքային բացատրություններն են՝ պրոտոնով հարուցված կասկադները կամ սինքրոտրոնային ճառագայթումները ծայրահեղ ռելատիվիստական պրոտոններից (Mücke, A., et al., T. 2003, Astropart. Phys., 18, 593; Aharonian, F. A. 2000, New Astron., 5, 377):

Բերված դիտողությունները կրում են առավելապես առաջարկների բնույթ ապագա ուսումնասիրությունների համար և բնավ չեն նսեմացնում ատենախոսության բարձր արժեքը: Ատենախոսության թեմայի արդիականությունը կասկած չի հարուցում: Բարձր էներգիաների աստղաֆիզիկական և մեքենայական ուսուցման ժամանակակից եղանակների կիրառմամբ ստացված արդյունքները հավաստի են և ամբողջությամբ ներառված են հայցորդի կողմից հրապարակումներում: Ես տպավորված եմ բլազարների բազմաալիքային ճառագայթման բազմաբնույթ տվյալների բազան համակարգող ծավալուն ուսումնասիրությունից: Միննույն ժամանակ, հասկանում եմ, որ ատենախոսության շրջանակները հեղինակին թույլ չեն տվել դիտարկել յուրաքանչյուր խնդիրը առավել խորությամբ և մանրամասնորեն: Ակնհայտ է, որ առաջարկված շատ մոտեցումներ դեռ իրենց հաստատման են սպասում: Բլազարների բազմաալիքային տիրույթում ՄԷԲ մոդելավորման համար պատրաստված ծրագրային փաթեթները կարող են օգտագործվել աստղաֆիզիկական այլ աղբյուրներում ընթացող ոչ ջերմային գործընթացների ուսումնասիրություններում:

Ատենախոսության արդյունքները ներկայացվել են «Աստղաինֆորմատիկա 2026» գիտաժողովում (2026 թվականի փետրվարի 23-27), հաճախակի քննարկվել են ICRA Net Armenia կենտրոնի սեմինարներում: Աշխատանքը ամբողջությամբ քննարկվել է նաև Բյուրականի աստղադիտարանի ընդհանուր սեմինարում:

Ատենախոսության սեղմնագիրը ամբողջապես համապատասխանում է ատենախոսության բովանդակությանը: Գիտական ամսագրերում տպագրված հոդվածները (թվով 4, որոնցից 2-ը՝ MNRAS-ում, 1-ը՝ The Astrophysical Journal-ում, 1-ը՝ Astrophysics-ում, առանց համահեղինակների), լիովին արտացոլում են ատենախոսության հիմնական արդյունքները:

Սույն ատենախոսությունը գիտական թեմայի արդիականությամբ, ստացված հետազոտական արդյունքների ծավալով և կարևորությամբ, բավարարում է Հայաստանի Բարձրագույն Որակավորման Կոմիտեի կողմից՝ ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի աստիճանի համար ներկայացրած բոլոր պահանջներին, և հեղինակը արժանի է այդ կոչմանը՝ A.03.02 դասիչով «Աստղաֆիզիկա, ռադիոաստղագիտություն» մասնագիտությամբ:

Ֆիզ.-մաթ. գ. դոկտոր՝ Գ. Տեր-Ղազարյան
Բյուրականի աստղադիտարանի
«Բարձր էներգիաների աստղաֆիզիկայի» բաժնի վարիչ

Գ. Տեր-Ղազարյանի ստորագրության իսկությունը հաստատում եմ
Բյուրականի աստղադիտարանի փոխտնօրեն
Ֆիզ.-մաթ. գ. թեկնածու՝ Ն. Աբրահամյան



12/05/2026