

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Դավիթ Արայի Զարգարյան

ԱԿՏԻՎ ԳԱԼԱԿՏԻԿԱԿԱՆ ՄԻՋՈՒԿՆԵՐԻ ՄԵԾ
ՄԱՍՇՏԱԲՈՎ ՇԻԹԵՐԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա.03.02 - «Աստղաֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսությամբ

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Давид Араевич Заргарян

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ
СТРУЙ В АКТИВНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЯДРАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.03.02 – “Астрофизика”

ЕРЕВАН – 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Վ. Հ. Համբարձումյանի անվան Բյուրականի աստղադիտարանի գիտական խորհրդի նիստում

| | | |
|---------------------------|--------------------|---------------------|
| Գիտական ղեկավար՝ | Ֆ. մ. գ. թ. | Հ. Ա. Հարությունյան |
| Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ | Ֆ. մ. գ. դ., պրոֆ. | Մ. Գ. Աբրահամյան |
| | Ֆ. մ. գ. դ., պրոֆ. | Է. Ս. Պարսամյան |

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2018թ. հունիսի 14-ին ժամը 15:00-ին, ԵՊՀ-ում գործող ՀՀ ԲՈՀ-ի «Ֆիզիկա» 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում (Երևան, 0025, Ա. Մանուկյան 1):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2018թ. մայիսի 12-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզ. -մաթ. գիտ. թեկնածու



Ս. Ա. Հակոբյան

Тема диссертации утверждена на заседании ученого совета Бюраканской астрофизической обсерватории им. В.А. Амбарцумяна НАН РА

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А. А. Арутюнян

Официальные оппоненты: д-р физ.-мат. Наук, проф. М. Г. Абрамян

д-р физ.-мат. Наук, проф. Э. С. Парсамян

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита состоится 14-го июня, 2018 года в 15:00 часов на заседании специализированного совета ВАК 049 "Физика" Ереванского государственного университета (ЕГУ) (Ереван, ул. Алека Манукяна, 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ

Автореферат разослан 12-го мая 2018 г.

Ученый секретарь спец. совета

канд. физ.-мат. наук



А. А. Акопян

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Թեմայի արդիականությունը

Ակտիվ գալակտիկական միջուկները (ԱԳՄ) էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ամենապայծառ և կայուն աղբյուրներն են: Քանի որ ԱԳՄ-ների ճառագայթումն առաջանում է ֆիզիկական պրոցեսներից, որոնք տարբերվում են ջերմամիջուկային ռեակցիաներից (աստղերի ճառագայթման էներգիայի հիմնական աղբյուրը), ապա դրանք կարող են դիտարկվել որպես հատուկ լաբորատորիաներ ծայրահեղ ֆիզիկական և ռելյատիվիստիկական արտանետումներն ուսումնասիրելու համար:

ԱԳՄ-ների մեծ հզորությամբ ճառագայթումն առաջանում է կենտրոնական գերծանր մարմնի (ամենայն հավանականությամբ սև խոռոչ) վրա ընկնող նյութի պոտենցիալ էներգիայի փոխակերպմամբ: Կենտրոնական մարմնի շուրջը ձևավորվում է ակրեցիոն սկավառակը, որից առաջանում է չափազանց էներգետիկ մասնիկների խիստ ուղղորդված պլազմայի արտանետում՝ այսպես կոչված շիթ: Կախված շիթի՝ դիտողի նկատմամբ ունեցած անկյունից՝ ԱԳՄ-ները բաժանվում են տարբեր դասերի, օրինակ, ԱԳՄ-ների բլազար ենթադասերի շիթն ուղղված է դեպի դիտողը, իսկ ռադիոգալակտիկաների դեպքում այդ շիթը կազմում է ավելի մեծ թեքման անկյուն: Տարբեր դասերի ԱԳՄ-ների հետազոտությունը բազմալիքային տիրույթում հանդիսանում է ժամանակակից աստղաֆիզիկայի ամենաարդիական և քննարկվող ուղղություններից մեկը:

ԱԳՄ-ների շիթերը ձևավորվում են կենտրոնական մարմնից (միջուկից) և տարածվում են այնքան ժամանակ, քանի դեռ շիթում ներքին ճնշումը գերազանցում է արտաքին ճնշմանը: Շիթի պլազման (նյութը) շարժվում է լույսի մոտ արագություններով և հիմնականում կազմված է էլեկտրոններից և պրոտոններից: Այդ մասնիկները էֆեկտիվորեն արագանում են շիթում մինչև $> S\bar{E}4$ տիրույթ և փոխազդելով մագնիսական և ֆոտոնային դաշտերի հետ՝ առաջացնում են ոչ ջերմային ճառագայթում բազմալիքային՝ ռադիոյից մինչև ԲԷ-երի գամմա տիրույթներում: Շիթերի չափերը որոշ դեպքերում կարող են հասնել մինչև մի քանի հարյուր կիլոպարսեկի (կպ), դրանք նաև ունեն հետաքրքիր կառուցվածք, օրինակ՝ հանգույցներ (knot), որոնք կոմպակտ և ուժեղ ճառագայթման աղբյուրներ են կամ ջերմ բծեր (hotspot)՝ շիթերի վերջում պայծառ ճառագայթման տիրույթներ: Հատկանշական է, որ շիթից ճառագայթումը գրանցվել է ոչ միայն միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներից, որտեղ շիթի հզորությունը ամենամեծն է, այլ նաև նշված հանգույցներից և ջերմ բծերից (նույնիսկ մինչև ռենտգենյան տիրույթում), ինչը հաստատում է, որ մասնիկները

արագանում են ոչ միայն շիթի սկզբնամասում, այլ նաև նրանից մինչև 100 կպկ հեռավորության վրա:

ԱԳՄ-ների շիթերի առաջացման, ուղղորդված տարածման, նրանցում մասնիկների արագացման, ճառագայթման պրոցեսների և այլնի հետազոտությունը ժամանակակից աստղաֆիզիկայի կարևոր և արդիական խնդիրներից է: Շիթերը և դրանցում տեղի ունեցող պրոցեսները կարելի է հետազոտել տարբեր սիմուլյացիաների միջոցով, եթե շիթը նկարագրող հիմնական պարամետրերը, որոնք կարելի է ստանալ միայն դիտումների արդյունքում հայտնի են: Պետք է նշել, որ ժամանակակից դիտակների օգնությամբ հնարավոր է հետազոտել միևնույն շիթի ճառագայթումը կենտրոնական մարմնից տարբեր հեռավորությունների վրա, ինչը շատ կարևոր է, քանի որ հնարավորություն է տալիս ոչ միայն պարզել այն մեխանիզմները, որոնք առաջացնում են ճառագայթումը, այլ նաև հետևել շիթում տեղի ունեցող պրոցեսների փոփոխությանը: Հետևաբար, տարբեր էներգետիկ տիրույթներում շիթերի ուսումնասիրությունների տվյալների մշակումը և արդյունքների տեսական մոդելավորումը կարող է էականորեն նպաստել շիթերի ֆիզիկական և դինամիկական հասկանալուն:

Ատենախոսությունում ուսումնասիրվել է բարձր էներգիաների (ԲԷ) գամմա տիրույթում գրանցված ռադիոգալակտիկաների լայնամասշտաբ շիթերից ճառագայթումը՝ վերլուծելով «Fermi Large Area Telescope (Fermi LAT)» և «Chandra» դիտակներով գրանցված տվյալները: «Fermi LAT»-ի 2008-2015 թթ. ընթացքում գրանցված տվյալների վերլուծությունը թույլ կտա հետազոտել ճառագայթումը շիթերի <ակ տիրույթներից, իսկ «Chandra» դիտակի եզակի անկյունային լուծողունականության շնորհիվ՝ ճառագայթումը >կպկ տիրույթներից: Այդ վերլուծված տվյալների տեսական մոդելավորման միջոցով հնարավոր կլինի գնահատել շիթերը նկարագրող որոշ կարևոր պարամետրեր, ինչպիսիք են ճառագայթող մասնիկների էներգիայի խտությունը և բաշխվածությունը, մագնիսական դաշտը և այլն: Հաշվի առնելով վերլուծվող տվյալների և ուսումնասիրվող աղբյուրների մեծ քանակը՝ հնարավոր կլինի հետազոտել և հասկանալ շիթերում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսները:

Ատենախոսության նպատակն ու խնդիրները

Ատենախոսության հիմնական նպատակներն են՝

- Առանձնացնել ԲԷ գամմա տիրույթում գրանցված այն ռադիոգալակտիկաները, որոնց լայնամասշտաբ շիթից ճառագայթումը գրանցվել է ռենտգենյան տիրույթում «Chandra» դիտակով:

- Վերլուծել առանձնացված աղբյուրների 2008-2015 թթ. ընթացքում ԲԷ գամմա տիրույթում «Fermi-LAT» դիտակով գրանցված տվյալները: Տվյալների

սպեկտրալ վերլուծության միջոցով պարզել հոսքի էներգիայից կախման (դիֆերենցիալ սպեկտրի) լավագույն նկարագրությունը, իսկ տվյալների մշակման մեթոդները կիրառելով ավելի փոքր ժամանակային տիրույթների համար՝ պարզել գամմա ճառագայթման հոսքի փոփոխականության ժամանակները:

- Օգտագործելով ռադիո, օպտիկական և ռենտգենյան տիրույթների նախկինում արդեն մշակված արդյունքները՝ նշված աղբյուրների լայնամասշտաբ շիրթում առանձնացնել հանգույցների և ջերմ բծերի տիրույթները, կոորդինատները, գնահատել դրանց ֆիզիկական չափերը և այլն:

- Առանձնացված հանգույցների և ջերմ բծերի համար վերլուծել «Chandra» դիտակով տարբեր տարիներին կատարված ուսումնասիրությունների տվյալները, գտնել ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթման սպեկտրի (0.5-10 կէՎ) լավագույն նկարագրությունը և հետազոտել՝ արդյոք այդ սպեկտրի նկարագրությունը փոփոխվում է տարբեր տարիների ընթացքում:

- Ընտրված աղբյուրների շիրթի կոմպակտ < պլ և տարածական > կալ տիրույթների ուսումնասիրությունների արդյունքում պատրաստել էներգետիկ սպեկտրալ բաշխվածությունները (էՍԲ-երը) և դրանց տեսական մոդելավորման միջոցով հասկանալ ճառագայթման հիմնական մեխանիզմները: Օգտագործելով ստացված արդյունքները՝ գնահատել շիրթի հզորությունը համապատասխանաբար միջուկին մոտ և հեռու տիրույթներում:

- Քննարկել և մեկնաբանել տեսական մոդելավորման արդյունքում ստացված պարամետրերը՝ հաշվի առնելով մասնիկների արագացման և ճառագայթման մեխանիզմները:

- Նշված մեթոդներով ավելի մանրամասն հետազոտել 3C 120 ռադիոգալակտիկայի շիրթից ոչ ջերմային ճառագայթումը, քանի որ աղբյուրի լայնամասշտաբ շիրթը (մինչև 100 կպկ) ունի հետաքրքիր կառուցվածք՝ մի քանի հանգույցներ, որոնք շատ լավ ուսումնասիրված են ռադիո, օպտիկական և ռենտգենյան տիրույթներում, իսկ կենտրոնից ԲԷ գամմա ճառագայթումը կտրուկ փոփոխական է:

Գիտական նորույթը

- Վերլուծվել են M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207 և 3C 111 ռադիոգալակտիկաների 2008-2015 թթ. ընթացքում ԲԷ գամմա տիրույթում գրանցված տվյալները, գնահատվել են ճառագայթման դիֆերենցիալ սպեկտրի պարամետրերը, ինչպես նաև հետազոտվել է հոսքի փոփոխականությունը ժամանակի ընթացքում: Ցույց է տրվել, որ բոլոր աղբյուրների գամմա ճառագայթման հոսքերը նկարագրվում են $\Gamma_{\gamma} > 2.1$ ֆոտոնային ցուցիչով, իսկ հոսքը միջինում $< (4.87 \pm 0.32) \times 10^{-8}$ ֆոտոն $\text{սմ}^{-2} \text{վրկ}^{-1}$ -ից: Այդ աղբյուրի գամմա

ճառագայթման հոսքի փոփոխականությունը ուսումնասիրվել է ժամանակների տրոհման նորագույն «adaptive binning» մեթոդով:

- Վերլուծվել են M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207, 3C 111 և 3C 120 ռադիոգալակտիկաների շիթերի հանգույցների և ջերմ բծերի ռենտգենյան տիրույթում տարբեր տարիներին «Chandra» դիտակով գրանցված տվյալները: Համեմատելով տարբեր տարիների ընթացքում գրանցված տվյալները, ցույց է տրվել, որ հիմնականում այդ տիրույթներից եկող ռենտգենյան ճառագայթման ցուցիչը $\Gamma_x < 2.0$ էականորեն չի փոփոխվում:

- Նշված ռադիոգալակտիկաների միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներից ճառագայթման սպեկտրի տեսական մոդելավորմամբ ցույց է տրվել, որ այն կարելի է բացատրել ոչ մեծ ռեյատիվիստական ուժեղացման գործակից ունեցող տիրույթներից էլեկտրոնների սինքրոտրոնային և հակադարձ կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմներով: Շիթի անհրաժեշտ հզորությունը տատանվում է $L_{jet} \cong (0.51 - 26.47) \times 10^{44}$ էրգ վրկ⁻¹ տիրույթում, իսկ մագնիսական դաշտը՝ $B \cong (3 - 100)$ մԳա տիրույթում, որոնք բնութագրական են ռադիոգալակտիկաների համար:

- Ցույց է տրվել, որ լայնամասշտաբ շիթի տարածական տիրույթներից ճառագայթումը հիմնականում հնարավոր չէ բացատրել ռադիո-օպտիկական տիրույթում ճառագայթող էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթմամբ և պետք է հաշվի առնել տիեզերական մնացորդային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրումը (եթե շիթում նյութը շարունակում է շարժվել ռեյատիվիստական ($\delta > 8$) արագություններով՝ նույնիսկ կակ հեռավորությունների վրա) կամ երկրորդային ավելի էներգետիկ էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումը:

- Առաջին անգամ համեմատվել են տարբեր դասերի ռադիոգալակտիկաների շիթերը բնութագրող պարամետրերը՝ չափված միջուկին շատ մոտ և նրանից կակ հեռավորությունների վրա գտնվող տիրույթներից: Հետաքրքիր է, որ աղբյուրների մեծամասնության համար լայնամասշտաբ շիթի հզորությունը էականորեն չի նվազում միջուկից մեծ հեռավորությունների վրա, սակայն շիթը դառնում է ոչ էֆեկտիվ ճառագայթման տեսանկյունից:

- Հայտնաբերվել է 3C 120 ռադիոգալակտիկայից ԲԷ գամմա ճառագայթման հոսքի հետաքրքիր փոփոխականություն: 2008-2015թթ. ընթացքում գրանցված հոսքի միջին արժեքն է $(4.11 \pm 0.55) \times 10^{-8}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹, սակայն 2015թ. ապրիլի 24-ին հոսքը կտրուկ աճել է 19 րոպե և 3.15 ժամ ժամանակահատվածների ընթացքում՝ կազմելով համապատասխանաբար $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹ և $(4.71 \pm 0.92) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹, $\geq 10\sigma$ գրանցման

նշանակելիությամբ: Այս ֆոտոնային հոսքին համապատասխանում է $(1.2 - 1.6) \times 10^{46}$ էրգ վրկ⁻¹ լուսատվություն, որն ավելի բնորոշ է բլազարների:

- Ցույց է տրվել, որ 3C 120 աղբյուրի միջուկին մոտ տիրույթներից բազմալիքային տիրույթում ճառագայթումը հանգստի վիճակում կարելի է բացատրել ռեյաստիվիստիկական էլեկտրոնների սինքրոտրոնային և սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ, իսկ ակտիվ վիճակում ազդեցություն ունի նաև արտաքին դաշտերի (օրինակ տորուսից) ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրումը: Հանգույցների ճառագայթումը բացատրվում է $> S\tau$ տիրույթում աստիճանային օրենքով ($a = 2.3 - 2.7$) բաշխված էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթմամբ:

Ստացված արդյունքների գիտական և գործնական արժեքը

Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել շիթերի առաջացման և տարածման մեխանիզմների, ինչպես նաև՝ մասնիկների արագացման և ճառագայթման պրոցեսների հետազոտման խնդիրներում:

Շիթը նկարագրող հիմնական պարամետրերի գնահատման մեթոդը՝ հիմնված միևնույն շիթի տարբեր տիրույթներում դիտումների տվյալների վերլուծության և արդյունքների տեսական մոդելավորման վրա, կարելի է կիրառել այլ դասերի ԱԳՄ-ների լայնամասշտաբ շիթերը հետազոտելու համար:

Հանգույցների և ջերմ բժերի էՍԲ-երի տեսական մոդելավորման ժամանակ ճառագայթման սպեկտրը կարելի է բացատրել՝ օգտագործելով տարբեր ժամանակներում արագացված էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխվածությունները, ինչը ցույց է տալիս, որ ռադիոգալակտիկաների լայնամասշտաբ շիթերում, նույնիսկ միջուկից մեծ հեռավորությունների վրա, էլեկտրոնները կարող են էֆեկտիվորեն արագանալ, ինչը կարելի է կիրառել այլ աղբյուրների շիթերից ճառագայթման մեխանիզմների ուսումնասիրություններում:

Պաշտպանության ներկայացվող ատենախոսության հիմնական դրույթները

1. Վերլուծվել են M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207, 3C 111 և 3C 120 ռադիոգալակտիկաների 7 տարվա ընթացքում գրանցված ԲԷ գամմա տիրույթի տվյալները, գնահատվել է գամմա ճառագայթման հոսքը, ֆոտոնային ցուցիչը և հետազոտվել է հոսքի փոփոխականությունը ժամանակի ընթացքում:

2. Առանձնացված աղբյուրների շիթերի միջուկներին մոտ գտնվող ենթապարսեկանոց չափերի տիրույթներից ճառագայթման էՍԲ-երը մոդելավորվել են՝ օգտագործելով պարամետրերի գնահատման «Markov Chain Monte Carlo» մեթոդը: Ցույց է տրվել, որ ճառագայթումը բազմալիքային տիրույթում կարելի է

բացատրել էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման և այդ սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմներով:

3. Վերլուծվել են թվով 30 հանգույցների և 6 ջերմ բծերի՝ տարբեր տարիների ընթացքում ռենտգենյան տիրույթում «Chandra» դիտակի ուսումնասիրությունների մեծ քանակությամբ տվյալները, և պատրաստվել է տվյալների բազա: Ցույց է տրվել, որ որոշ հանգույցներից և ջերմ բծերից ճառագայթումը ռադիոյից մինչև ռենտգենյան տիրույթ հնարավոր չէ բացատրել՝ օգտագործելով էլեկտրոնների միայն մեկ բաշխվածություն: Ցույց է տրվել, որ եթե շիթում պլազման շարունակում է շարժվել ռելյատիվիստական արագություններով նույնիսկ կակ հեռավորությունների վրա, ապա ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթումը կարող է բացատրվել մնացորդային միկրոալիքային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ: Իսկ եթե շիթի տարածական տիրույթներում նյութը չի շարժվում, ապա ռենտգենյան ճառագայթումը կարելի է բացատրել ավելի ուշ արագացված էներգետիկ էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթմամբ:

4. Տեսական մոդելավորման միջոցով գնահատվել են մի շարք ռադիոգալակտիկաների շիթերը նկարագրող հիմնական պարամետրերը (օրինակ՝ լուսատվությունը, մագնիսական դաշտը, մասնիկների խտությունը և այլն) միջուկներին մոտ և ավելի հեռու գտնվող տարածական տիրույթներից, ինչը անհրաժեշտ է շիթի դինամիկան հասկանալու համար: Հետազոտվել են շիթում մասնիկների արագացման և ճառագայթման մեխանիզմները:

5. Գրանցվել է 3C 120 ռադիոգալակտիկայի ԲԷ գամմա ճառագայթման հոսքի կտրուկ փոփոխականություն՝ $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$ առավելագույն արժեքով, որին համապատասխանում է 1.6×10^{46} էրգ վրկ $^{-1}$ լուսատվություն:

6. Ցույց է տրվել, որ 3C 120-ի շիթի միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներից ԲԷ գամմա տիրույթում ճառագայթումը հանգիստ և ակտիվ վիճակներում բացատրվում է համապատասխանաբար սինքրոտրոնային և արտաքին դաշտերի հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ, իսկ տարածական տիրույթներից՝ ավելի ուշ արագացված էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթմամբ:

Աշխատանքի ներկայացումը

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ գիտաժողովներում՝

1. «The 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016)», Հուլիս 11-15, 2016թ, Հայդելբերգ, Գերմանիա
2. «High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VI», Սեպտեմբեր 11-15, 2017թ, Մոսկվա, Ռուսաստան

Ինչպես նաև քննարկվել են ՀՀ ԳԱԱ Իկրանետ կենտրոն ՄԿ-ի սեմինարների ժամանակ և Մաքս Պլանկ Ինստիտուտի (Գերմանիա) Բարձր էներգիայի աստղաֆիզիկայի խմբում:

Հրապարակումները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 5 գիտական աշխատանքներում, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլխից, եզրակացությունից և 136 հղումներից: Ատենախոսությունը պարունակում է 46 նկար և 13 աղյուսակ, իսկ ծավալը կազմում է 108 էջ:

Ատենախոսության բովանդակությունը

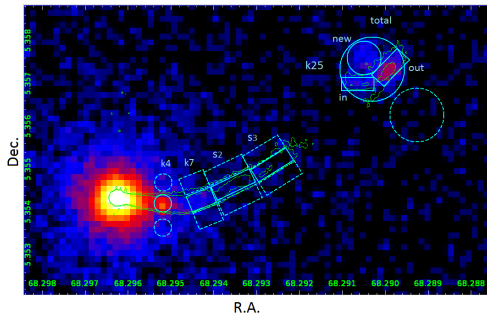
Առաջաբանում ներկայացված են աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են հիմնական խնդիրները և նպատակները, գիտական նորույթը, պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, ինչպես նաև՝ ատենախոսության հակիրճ բովանդակությունը:

Առաջին գլխում ներկայացված են ընդհանուր տեղեկություններ ԱԳՄ-ների, դրանց դասակարգման, տեսակների, կառուցվածքի և այլնի մասին, ինչպես նաև քննարկված է ԱԳՄ-ների ուսումնասիրությունների արդիականությունը: Պատկերավոր ներկայացված է ԱԳՄ-ների կառուցվածքը և միասնական նկարագրման սխեման: Մանրամասն ներկայացված են ռադիոգալակտիկաների կառուցվածքի բաղադրիչները և դրանց Fanaroff-Riley (FR) դասակարգման սխեման: Ներկայացվել են տեղեկություններ շիթերի և դրանք նկարագրող հիմնական պարամետրերի մասին, ինչպես նաև քննարկվել են շիթերում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսները: Քննարկվել են շիթերում էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման և սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմները, որոնք օգտագործվել են շիթերից տարբեր ալիքային տիրույթներում դիտարկումների վերջին տվյալների մոդելավորման համար:

Երկրորդ գլխում ներկայացված են ատենախոսության մեջ օգտագործված ռենտգենյան տիրույթում գործող «Chandra» և ԲԷ զամնա տիրույթի «Fermi-LAT» դիտակներով գրանցված տվյալների մշակման մեթոդները և այդ դիտակների տեխնիկական պարամետրերը: **2.1** ենթագլուխը նվիրված է «Fermi-LAT» դիտակի կառուցվածքի, տեխնիկական պարամետրերի (օրինակ՝ լուծողունականություն, էֆեկտիվ մակերես, գրանցման ներքին էներգիական շեմ և այլն) և ԲԷ ֆոտոնների գրանցման մեխանիզմների ներկայացմանը: Ներկայացված են տվյալների

ներբեռնման և վերլուծության մեթոդները, ինչպես նաև աղբյուրների գամմա ճառագայթումը նկարագրող ազատ պարամետրերի գնահատման առավելագույն ճշմարտանմանության մեթոդը: 2.2 ենթագլխում ներկայացված են «Chandra» դիտակի ընդհանուր տեխնիկական բնութագրիչները, կառուցվածքը և ռենտգենյան ֆոտոնների ֆոկուսացման և գրանցման եղանակները: Մանրամասն ներկայացված են գրանցված պատկերներից տվյալների վերլուծության համար անհրաժեշտ տիրույթների ընտրության և «CIAO» ծրագրային փաթեթով սպեկտրալ անալիզի համար անհրաժեշտ ֆայլերի պատրաստման մեթոդները, ինչպես նաև՝ «Sherpa» ծրագրային փաթեթով տվյալների մշակման քայլերը:

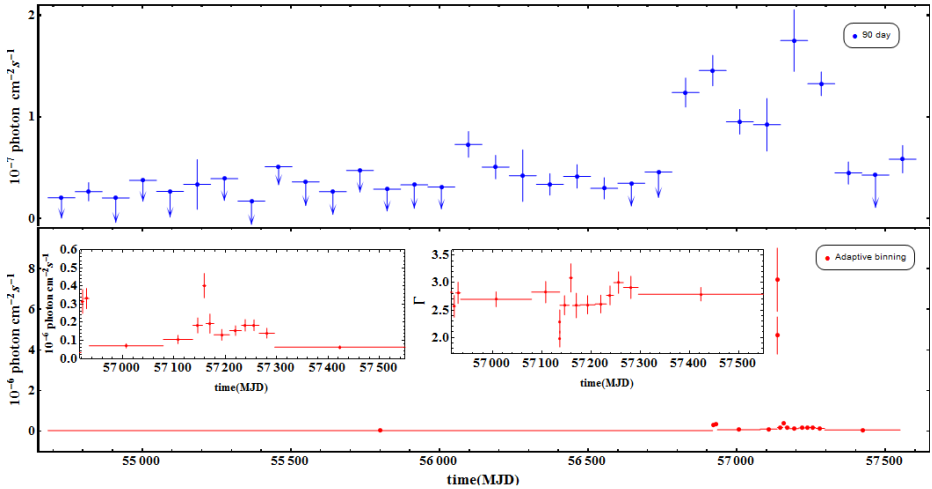
Երրորդ գլխում մանրամասնորեն քննարկված է ճառագայթումը 3C 120 ռադիոգալակտիկայի հզոր և հետաքրքիր կառուցվածք ունեցող լայնամասշտաբ շիթից: Այս աղբյուրի հզոր շիթից ճառագայթումը գրանցվել է ոչ միայն միջուկին մոտ, այլ նաև դրանից 25 կպ հեռավորության վրա գտնվող տիրույթներից: 3C 120-ի շիթը ունի հետաքրքիր կառուցվածք և այն յուրահատուկ է դրանում մասնիկների բաշխվածության, խտության, մագնիսական դաշտի և այլ կարևոր պարամետրերի, ինչպես նաև մասնիկների ճառագայթման մեխանիզմները հետազոտելու համար:



Նկար 1: 3C 120 ռադիոգալակտիկան ռենտգենյան տիրույթում: Ներկայացված են նաև հանգույցների տիրույթները:

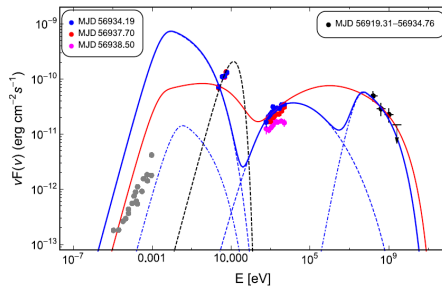
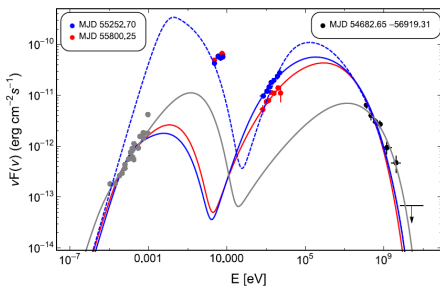
Նկար 1-ում պատկերված է 3C 120 ռադիոգալակտիկայի «Chandra» դիտակով ուսումնասիրությունների «count map»-ը, որտեղ նկատելի է շատ ուժեղ և ինտենսիվ ճառագայթում աղբյուրի միջուկի շուրջը, ինչպես նաև՝ ճառագայթում հանգույցներից ամբողջ շիթի երկայնքով (ռադիո տիրույթում ուսումնասիրությունների կոնտուրները պատկերված են կանաչ գույնով): Ատենախոսության այս գլխում հետազոտվել են ճառագայթման մեխանիզմները միջուկին մոտ գտնվող ենթապարսեկանոց տիրույթից, ինչպես նաև՝ տարածական (k4, k7, s2, s3, k25(in, out, new)) տիրույթներից:

3C 120-ի շիթի միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներից բազմալիքային տիրույթում ճառագայթումը հետազոտվել է՝ վերլուծելով «Swift» դիտակով օպտիկական ու ռենտգենյան և «Fermi-LAT»-ով՝ ԲԷ գամմա տիրույթներում գրանցված տվյալները:



Նկար 2. 2008 -2016 թթ. ընթացքում «3C 120»-ի հոսքի ժամանակային փոփոխականությունը 90-օր ինտեգրված (կապույտ) և «adaptive binning» ժամանակի տրոհման եղանակով (կարմիր)։

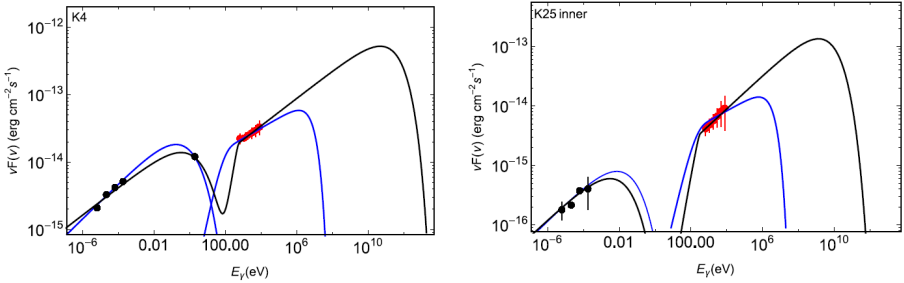
«Fermi-LAT» դիտակով ութ տարվա ընթացքում (2008.08.04-2016.08.04) գրանցված տվյալների ժամանակային վերլուծության արդյունքները ցույց են տալիս, որ աղբյուրը գտնվել է ԲԷ գամմա ճառագայթման ակտիվ և հանգիստ ճառագայթման վիճակներում: Օրինակ՝ նկար 2-ից, որտեղ պատկերված է հոսքի փոփոխականությունը ժամանակի ընթացքում, երևում է, որ մինչև 2014.09.19 (MJD 56919.31) աղբյուրից ԲԷ գամմա ճառագայթումը թույլ է և «Fermi-LAT» դիտակով գրանցվում է միայն մի քանի անգամ, իսկ այնուհետև այն կտրուկ աճում է: Հոսքի ամենակտրուկ աճերը գրանցվել են 2014թ. սեպտեմբերի 21-ից 27-ը և 2015թ. ապրիլի 20-ից 26-ը: Օրինակ, ապրիլի 24-ին 19 րոպե և 3.15 ժամ ժամանակահատվածների ընթացքում հոսքերը կազմել են համապատասխանաբար $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$ և $(4.71 \pm 0.92) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$, իսկ գրանցման նշանակելությունը $\geq 10\sigma$ -ից: Այս առավելագույն ճառագայթման հոսքին համապատասխանում է $(1.2 - 1.6) \times 10^{46}$ էրգ վրկ $^{-1}$ գամմա ճառագայթման լուսատվություն, որը գերազանցում է գամմա տիրույթում գրանցված այլ ռադիոգալակտիկաների գամմա ճառագայթման լուսատվությունը և ավելի բնութագրական է բլազարներին: Հոսքի կտրուկ փոփոխականությունը կարճ ժամանակահատվածում ցույց է տալիս նաև, որ ճառագայթում առաջանում է շիթի կոմպակտ (ենթապարսեկանոց) տիրույթից:



Նկար 3. «3C 120»-ի ակտիվ և հանգիստ վիճակներում ճառագայթման սպեկտրների տեսական մոդելավորման արդյունքները:

Օգտագործելով «Swift UVOT/XRT»-ի օպտիկական, ռենտգենյան և «Fermi-LAT»-ի ԲԷ գամմա տիրույթներում գրանցված տվյալները աղբյուրի ակտիվ և հանգիստ ճառագայթման վիճակներում՝ ԷՍԲ-երի տեսական մոդելավորմամբ հետազոտվել են շիթում տեղի ունեցող պրոցեսները և դրանց փոփոխությունները: Արդյունքները ցույց են տալիս, որ հանգիստ վիճակում բազմալիքային տիրույթում ճառագայթումը կարելի է բացատրել ռեյաստիվիստական արագության $(\delta = 10)$ շարժվող տիրույթից էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման և սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմներով (նկար 3, ձախ): Իսկ ակտիվ վիճակում, ամենայն հավանականությամբ, ԲԷ գամմա տիրույթում ճառագայթումը պայմանավորված է արագ շարժվող տիրույթում արտաքին ֆոտոնային դաշտերի հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ (նկար 3):

«Chandra» դիտակի բարձր լուծողունականության շնորհիվ օգտագործելով ռենտգենյան ճառագայթումը հնարավոր է առանձնացնել և ուսումնասիրել նաև շիթի «k4», «k7», «s2», «s3», «k25 (new, in, out)» հանգույցները: Տարբեր տարիների ընթացքում գրանցված տվյալների մշակման արդյունքները վերադրելով նշված հանգույցների ռադիո և օպտիկական տիրույթներում ուսումնասիրությունների հետ՝ մոդելավորվել են ճառագայթման ԷՍԲ-երը՝ հաշվի առնելով հանգույցներում էլեկտրոնների սինքրոտրոնային, տիեզերական մնացորդային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման և երկրորդ՝ ավելի մեծ էներգիաներով էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման մեխանիզմները: Ցույց է տրվել, որ ռենտգենյան ճառագայթումը կարելի է բացատրել տիեզերական մնացորդային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ (նկար 4 (սև)) միայն, եթե շիթում նյութը շարունակում է շարժվել ռեյաստիվիստական արագություններով՝ նույնիսկ կակ հեռավորությունների վրա, հակառակ դեպքում էլեկտրոնների խտությունը պետք է շատ գերազանցի մագնիսական դաշտի խտությանը:



Նկար 4. 3C 120-ի «k4» և «k25 inner» հանգույցների էՄԲ-ների տեսական մոդելավորումները: Ռադիոյից օպտիկական տվյալները վերցված են նախորդ ուսումնասիրություններից (սև կետեր), իսկ ռենտգենյան տվյալները ստացվել են առենախոսության մեջ (կարմիր կետեր):

Մյուս կողմից, եթե հանգույցներում էլեկտրոնները նորից արագանում են, ապա այդ երկրորդային՝ ավելի էներգետիկ (ՏէՎ-ից մեծ էներգիաներով) էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումը կարող է բացատրել գրանցված ռենտգենյան ճառագայթումը (նկար 4 (կապույտ)): Մոդելավորման արդյունքները ցույց են տալիս, որ շիթի լուսատվությունը, չափված կենտրոնին մոտ և տարածական տիրույթներում, համարյա նույն կարգի է (10^{44} էրգ վրկ $^{-1}$), միայն մագնիսական դաշտի և մասնիկների խտության նվազման հետևանքով շիթը դառնում է ոչ արդյունավետ ճառագայթման տեսանկյունից: Սա հետաքրքիր է, քանի որ սպասվում էր, որ FR I դասերի աղբյուրների շիթերի ինտենսիվությունը պետք է արագ նվազի կենտրոնից հեռու տիրույթներում, սակայն 3C 120-ի դեպքում ստացվում է հակառակը:

Չորրորդ գլխում հետազոտվել են ԲԷ գամմա տիրույթում գրանցված այն ռադիոգալակտիկաների շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսները, որոնց հանգույցների ճառագայթումը ռենտգենյան տիրույթում գրանցվել է «Chandra» դիտակով: Դրանք են՝ M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207 և 3C 111: Այդ աղբյուրներից մի քանիսի շիթերի վերջում գրանցվել են նաև ջերմ բծեր: Առանձնացված աղբյուրների մեծամասնությունը FR II դասի ռադիոգալակտիկաներ են, ինչը բնական է, քանի որ ընդունված է համարել, որ այդ աղբյուրների շիթերում էներգիան էֆեկտիվ տեղափոխվում է մեծ հեռավորությունների վրա՝ ի տարբերություն FR I դասի աղբյուրների: Աղբյուրներից յուրաքանչյուրի համար պատրաստվել է տվյալների բազա, որը պարունակում է այլ հաճախային տիրույթներում ուսումնասիրությունների արդյունքներ և աղբյուրների տարբեր պարամետրեր (օրինակ՝ կենտրոնական մարմնի գանգվածը, շիթի թեքման անկյունը, շիթում գնահատված նյութի շարժման արագությունը և այլն):

Աղյուսակ 1. «Fermi-LAT» դիտակով գրանցած տվյալների մշակման արդյունքները

| Աղբյուրը | Դասը | Γ_γ | F_γ^{**} | $d(cm)$ | $L_\gamma(erg s^{-1})$ | TS |
|-----------------|-------|-----------------|------------------|-----------------------|------------------------|---------|
| M87 | FRI | 2.02 ± 0.04 | 0.18 ± 0.018 | 5.68×10^{25} | 8.18×10^{41} | 1033.52 |
| NGC 6251 | FRI | 2.35 ± 0.03 | 2.81 ± 0.15 | 3.26×10^{26} | 2×10^{43} | 1001 |
| 3C 111 | FR II | 2.70 ± 0.05 | 4.87 ± 0.32 | 6.32×10^{26} | 8.2×10^{43} | 254.75 |
| 3C 303 | FR II | 2.02 ± 0.19 | 0.149 ± 0.08 | 1.84×10^{27} | 7.16×10^{43} | 26 |
| Pictor A | FR II | 2.53 ± 0.12 | 1.38 ± 0.37 | 4.57×10^{26} | 1.48×10^{43} | 118.66 |
| 3C 207 | FR II | 2.63 ± 0.08 | 1.58 ± 0.23 | 8.69×10^{27} | 5.69×10^{45} | 120.8 |
| 3C 275.1 | FR II | 2.47 ± 0.12 | 1.1 ± 0.24 | 7.23×10^{23} | 3.12×10^{45} | 106 |

Հանգույցներից և ջերմ բժերից «Chandra» դիտակով գրանցված տվյալների մշակման արդյունքները

| | | vF_ν^* | Γ_X | | | vF_ν^* | Γ_X |
|-----------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|
| M87 | HST1 | 92.01 ± 1.2 | 2.36 ± 0.02 | 3C 111 | K9 | 12.14 ± 0.57 | 0.71 ± 0.09 |
| | D | 57.84 ± 0.68 | 2.12 ± 0.01 | | K30 | 4.32 ± 1.01 | 0.99 ± 0.16 |
| | A | 64.49 ± 0.13 | 2.38 ± 0.01 | | K61 | 6.89 ± 1.57 | 1.23 ± 0.13 |
| | B | 6.31 ± 0.15 | 2.64 ± 0.04 | | NHS | 1.92 ± 0.65 | 1.41 ± 0.24 |
| Pictor A | A | 2.66 ± 0.24 | 1.87 ± 0.07 | NGC 6251 | A | 1.07 ± 0.5 | 1.61 ± 0.46 |
| | B | 2.02 ± 0.17 | 0.84 ± 0.14 | | C | 0.87 ± 0.19 | 2.29 ± 0.28 |
| | C | 1.61 ± 0.21 | 1.81 ± 0.10 | 3C 207 | A | 4.01 ± 0.84 | 1.14 ± 0.16 |
| | WHS | 67.08 ± 1.5 | 1.93 ± 0.01 | | B | 3.58 ± 1.51 | 1.15 ± 0.17 |
| 3C 275.1 | NHS | 2.04 ± 0.68 | 1.67 ± 0.3 | 3C 303 | WHS | 5.18 ± 1.8 | 1.51 ± 0.32 |

* - $\times 10^{-14}$ էրգ սմ⁻² վրկ⁻¹; ** - ($> 90 MeV$) $\times 10^{-8}$ ֆոտոն սմ⁻² վրկ⁻¹;

3C 120-ի շիթի ուսումնասիրության մեթոդը կիրառվել է նաև այս աղբյուրների շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսները հետազոտելու համար: Մասնավորապես վերլուծվել են այդ աղբյուրների 2008.08.04-2015.08.04թթ. ընթացքում «Fermi-LAT» դիտակով գրանցված տվյալները՝ իրականացնելով մանրամասն ժամանակային և սպեկտրալ վերլուծություններ: Յուրաքանչյուր աղբյուրի համար գնահատվել է գամմա ճառագայթման հոսքը, ֆոտոնային ցուցիչը, գրանցման նշանակելիությունը (աղյուսակ 1) և հոսքի փոփոխականության ժամանակները: Ինչպես կարելի է տեսնել աղյուսակ 1-ից, բացառությամբ M87 և 3C 303 աղբյուրների՝ գամմա ճառագայթման ֆոտոնային ցուցիչը $\Gamma_\gamma > 2.3$, ինչը ցույց է տալիս, որ հիմնական ներդրումը տալիս են ցածր էներգիաներով էլեկտրոնները: Գամմա տիրույթում ճառագայթման հոսքը փոփոխվում է $(0.14 - 4.87) \times 10^{-8}$ ֆոտոն սմ⁻² վրկ⁻¹ տիրույթում, իսկ հզորությունը՝ $(8.18 \times 10^{41} - 5.67 \times 10^{45})$ էրգ վրկ⁻¹ տիրույթում, ինչը բնութագրական է FRI և FR II դասի ռադիոգալակտիկաների համար:

Նշված աղբյուրների շիթերում ընդհանուր առմամբ կարելի է առանձնացնել 30 հանգույցներ և 6 ջերմ բժներ, որոնք մի քանի անգամ դիտարկվել են «Chandra» դիտակով: Ամենահետաքրքիրը 3C 111 աղբյուրի շիթն է, որը տարածվում է ավելի

քան 100 կպկ և կազմված է 9 հանգույցներից և 2 ջեռն բծերից: Վերլուծվել են նշված բոլոր աղբյուրների շիթերի՝ «Chandra» դիտակով տարբեր տարիների ուսումնասիրությունների տվյալները, գնահատվել են ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթման հոսքերը և ֆոտոնային ցուցիչները (աղյուսակ 1, որտեղ ներկայացված են ընտրված աղբյուրների միայն ամենաուժեղ հանգույցները): Հատկանշական է, որ որոշ դեպքերում (օրինակ՝ M87-ի HST1 և D հանգույցների և Pictor A-ի WHS ջեռն բծի) տարածական տիրույթներից (զծային չափերը > կպկ) ռենտգենյան ճառագայթման հոսքերը ($\approx 10^{-8}$ ֆոտոն $\text{սմ}^{-2}\text{վ}^{-1}$) նույն կարգի են, ինչ ճառագայթված նրանց միջուկին մոտ տիրույթներից: Մյուս կողմից, մի շարք հանգույցներից ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթման ֆոտոնային ցուցիչը $\Gamma_X < 2.0$, ինչը նշանակում է, որ մեծ էներգիաներով էլեկտրոնների ազդեցությունը գերակշռում է: Օրինակ 3C 111 աղբյուրի շիթի համարյա բոլոր տիրույթների համար $\Gamma_X < 1.41$ (բացառությամբ k97, $\Gamma_X = 2.07$), ինչը ցույց է տալիս, որ շիթի ամբողջ երկայնքով հանգույցներում մասնիկները շարունակաբար արագանում են, հակառակ դեպքում, եթե դրանք արագանային միայն մեկ տիրույթում, էներգիայի արագ կորստի հետևանքով չէին կարող հասնել մինչև տարածական տիրույթներ:

Տեսական մոդելավորման ժամանակ աղբյուրների շիթերի միջուկին մոտ գտնվող տիրույթների՝ ռադիոյից մինչև օպտիկական (որոշ դեպքերում մինչև ռենտգենյան) ճառագայթումը բացատրվում է շիթի կոմպակտ և ռեյաստիվիստական արագություններով շարժվող տիրույթում էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթմամբ, իսկ ռենտգենյան և ԲԷ զամմա տիրույթներում՝ սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրմամբ: Բազմալիքային տիրույթում ճառագայթումը կարելի է բացատրել այդ մեխանիզմով, եթե էլեկտրոնները արագանում են ԳէՎ էներգիաներից մեծ տիրույթում, իսկ նրանց դիֆերենցիալ սպեկտրի աստիճանային օրենքի ցուցիչը փոխվում է $> (2.2-2.3)$ տիրույթում: Նաև գնահատվել է, որ մագնիսական դաշտը (3-100) մԳա կարգի է, որը բնութագրական է ռադիոգալակտիկաների համար, իսկ էլեկտրոնների էներգիայի և մագնիսական դաշտի խտությունների հարաբերությունը փոփոխվում է 10-600 տիրույթում:

Տարածական տիրույթներից ճառագայթումը բացատրելու համար օգտագործվել են տարբեր մեխանիզմներ՝ կախված ռենտգենյան տիրույթում գրանցված սպեկտրից: Օրինակ՝ երբ $\Gamma_X > 2.0$, ճառագայթումը ռադիո, օպտիկական և ռենտգենյան տիրույթներում կարելի է բացատրել միևնույն էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումով: Ի տարբերություն, երբ $\Gamma_X < 2.0$ (այսինքն ռենտգենյան ճառագայթման սպեկտրը ունի աճող տեսք vFv ներկայացման դեպքում)՝ պետք է հաշվի առնել լրացուցիչ բաղադրիչի

ազդեցությունը: Հաշվի առնելով 3C 120-ի շիթի ուսումնասիրության արդյունքները՝ օգտագործվել են տիեզերական մնացորդային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման և երկրորդային էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման մեխանիզմները: Տույց է տրվել, որ երկու մոդելներ կարող են բացատրել գրանցված տվյալները, եթե առաջինի դեպքում շիթում շարժվող նյութը էականորեն չի կորցնում արագությունը, իսկ երկրորդի դեպքում մասնիկները պետք է էֆեկտիվորեն արագանան (ՏԷՎ և մեծ էներգիաներ) հանգույցների ամբողջ ծավալում: Գնահատվել է հանգույցներում և ջերմ բծերում մագնիսական դաշտը, որը ≤ 430 մկԳա է, որը էականորեն ավելի փոքր է, քան միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներում, ինչը բնական է, քանի որ այն նվազում է շիթի լայնացման հետևանքով:

Հետաքրքիր է գնահատել շիթի լուսատվությունը՝ պայմանավորված էլեկտրոնների կինետիկ էներգիայով և մագնիսական դաշտով: Շիթի կոմպակտ տիրույթներից ճառագայթումը կարելի է բացատրել, երբ $L_{jet} = (0.51 - 46.47) \times 10^{44}$ էրգ վրկ⁻¹, իսկ հանգույցների կամ ջերմ բծերի մոդելավորման ժամանակ անրաժեշտ է $L_{jet} < 5 \times 10^{46}$ էրգ վրկ⁻¹: Հետաքրքիր է, որ համարյա բոլոր աղբյուրների համար նույնիսկ շիթից մեծ հեռավորությունների վրա այն էականորեն չի նվազում:

ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Վերլուծվել են 2008-2015 թթ. ընթացքում «Fermi LAT» դիտակով M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207 և 3C 111 ռադիոգալակտիկաների դիտարկումների տվյալները, գնահատվել է նրանց գամմա ճառագայթման հոսքը (փոփոխվում է $F_{\gamma} \approx (0.14 - 4.87) \times 10^{-8}$ ֆոտոն սմ⁻² վրկ⁻¹ տիրույթում), ֆոտոնային ցուցիչը՝ $\Gamma_{\gamma} = (2.02 - 2.70)$ և կառուցվել են հոսքի ժամանակային պայծառությունների կորերը:

2. Տույց է տրվել, որ նշված աղբյուրների շիթերի միջուկներին մոտ գտնվող ենթապարսեկանոց տիրույթներից ճառագայթումը բազմալիքային տիրույթում կարելի է բացատրել շիթի կոմպակտ և արագ շարժվող տիրույթից էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման և այդ սինքրոտրոնային ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման մեխանիզմներով: Մոդելավորման ժամանակ օգտագործելով պարամետրերի գնահատման «Markov Chain Monte Carlo» մեթոդը՝ գնահատվել է, որ մագնիսական դաշտը (3–100) մԳա կարգի է, իսկ էլեկտրոնները պետք է արագանան ԳԷՎ-ից բարձր տիրույթ, իսկ նրանց և մագնիսական դաշտի խտությունների հարաբերությունը փոփոխվում է 10-600 տիրույթում: Պատրաստվել է տվյալների բազա՝ վերլուծելով ընտրված աղբյուրների շիթերի տարածական տիրույթների (թվով 36)՝ «Chandra» դիտակով ռենտգենյան տիրույթում տարբեր

տարիների դիտումների տվյալները: Ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթման հոսքը փոփոխվում է $F_x = (0.4 - 92) \times 10^{-14}$ էրգ սմ⁻²վրկ⁻¹ տիրույթում՝ չնայած որոշ դեպքերում (օրինակ՝ M87-ի HST1 և D հանգույցների և Pictor A-ի WHS ջերմ բծի) տարածական և միջուկին մոտ կոմպակտ տիրույթներից ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթման հոսքերը մոտավորապես նույն կարգի են: Ցույց է տրվել, որ ռենտգենյան տիրույթում ճառագայթումը կարող է բացատրվել մնացորդային միկրոալիքային ֆոնային ճառագայթման ֆոտոնների հակադարձ կոմպտոնյան ցրման կամ ավելի ուշ արագացված էներգետիկ էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթման մեխանիզմներով:

3. Տեսական մոդելավորման միջոցով, միջուկներին մոտ և ավելի տարածական տիրույթներում, գնահատվել և համեմատվել են շիթի բնութագրական պարամետրերի արդյունքները, ինչպիսիք են՝ լուսատվությունը, մագնիսական դաշտը, մասնիկների խտությունը և այլն: Գնահատվել է, որ հանգույցներում և ջերմ բծերում մագնիսական դաշտը (≤ 400 մկԳս) և էլեկտրոնների խտությունը շատ ավելի փոքր է, քան միջուկին մոտ գտնվող տիրույթներում, սակայն շիթի լուսատվությունը ($<$ պկ միջուկի մոտ և $>$ կպկ տարածական տիրույթներում) էականորեն չի փոփոխվում:

4. Հայտնաբերվել է 3C 120 ռադիոգալակտիկայի ԲԷ-երի գամմա տիրույթում ճառագայթման հոսքի կտրուկ աճ, 2015թ. ապրիլի 24-ին այն աճել է $\sim 10^{-7}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹-ից մինչև է $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹, որին համապատասխանում է 1.6×10^{46} էրգ վրկ⁻¹ լուսատվություն՝ մի քանի անգամ ավելի մեծ, քան ռադիոգալակտիկաների գամմա տիրույթում միջին արժեքը:

5. Տեսական մոդելավորման միջոցով ցույց է տրվել, որ բռնկման ժամանակ 3C 120 շիթից ԲԷ գամմա տիրույթում ճառագայթում կարող է առաջանալ արտաքին ֆոտոնային դաշտերի հակադարձ կոմպտոնյան ցրումից, իսկ տարածական տիրույթներից ռենտգենյան ճառագայթումը՝ նոր արագացված էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումից:

Ատենախոսության ստացված արդյունքների հիման վրա հրատարակված հոդվածների ցանկը

1. Sahakyan, N.; **Zargaryan, D.**; Baghmanyanyan, V, "On the gamma-ray emission from 3C 120", Astronomy & Astrophysics, Volume 574, id.A88, 5 pp., (2015).
2. **Zargaryan, D.**, "The gamma-ray emission from broad-line radio galaxy 3C 120", American Institute of Physic Conference Proceedings, Volume 1792, Issue 1, id.050008, pp 1-6, (2017); doi: 10.1063/1.4968954
3. Sahakyan, N.; Baghmanyanyan, V, **Zargaryan, D.**, "Gamma-ray emission from non-blazar AGNs", American Institute of Physics Conference Proceedings, Volume 1792, Issue 1, id.050002, pp 1-6 , (2017); doi: 10.1063/1.4968948
4. **Zargaryan, D.**, Gasparyan, S., Baghmanyanyan, V., & Sahakyan, N., "Comparing 3C 120 jet emission at small and large scales", Astronomy & Astrophysics, Volume 608, id.A37, 10pp, (2017).
5. **D. Zargaryan**, N. Sahakyan, and H. Harutyunian, "Chandra observations of gamma-ray emitting radio galaxies", International Journal of Modern Physics D, (2018), doi: 10.1142/S0218271818440224

Summary

The thesis is dedicated to study the high energy emission processes in the large scale jets of the Active Galactic Nuclei (AGNs). These jets are powerful sources of multiwavelength emission (from radio to very high energy gamma-ray bands) and sometimes their sizes exceed up to a few hundred kpc. Interestingly, the emission from jets is detected not only from sub-parsec regions around the nuclei, but also from kpc distance from it. The jet observations in different scales and the theoretical modeling of the results allow to compare the jet parameters in different distances from the nuclei, which are crucial for investigating the evolution of several important parameters describing the jet (e.g., luminosity, magnetic field, particles energy density, etc.). Such studies are also crucial for understanding the particle acceleration and emission processes in the jets.

The thesis starts with introduction where the topic studied in the thesis is reviewed and its main aim and goals are presented.

In chapter 1 the main properties of AGNs, their unification scenario, their basic components (knots, hot spots etc.) and the main radiation processes responsible for the emission in radio galaxies are briefly described.

In chapter 2 the steps and methods to analyze the Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) and Chandra data are presented. Namely, Fermi-LAT data extraction and the likelihood analysis methods are described by providing detailed information on spectral and temporal analyses, light curve preparation, etc. Next, the analyses of X-ray data from Chandra observations of large scale jet knots are described, showing the data extraction, preparation, source and background region selections, spectral analyses with Sherpa, etc.

In Chapter 3 the constraints on the physical parameters in the innermost (\leq pc) and outer (\geq kpc) regions of the 3C 120 jet are compared by means of a detailed multiwavelength analysis and theoretical modeling of their broadband spectra. The radio galaxy 3C 120, at a distance of ≈ 144.9 Mpc, is an active and powerful emitter in all the observed wavebands. In the radio band, its characteristics are closer to the Fanaroff-Riley I (FRI) radio sources with a powerful one-sided radio jet, which is extended up to 100 kpc scales. The main properties of the powerful jet of 3C 120 are investigated using the multiwavelength data from the jet observations on sub-pc and kpc scales. Namely, the data collected by Fermi-LAT (γ -ray band), Swift (X-ray and ultraviolet bands) and Chandra (X-ray band) are analyzed together and the spectral energy distributions are modeled using a leptonic synchrotron and inverse Compton models, taking into account the seed photons originating inside and outside of the jet.

The results of the γ -ray data analyses show that the γ -ray flux from the inner jet of 3C 120 was characterized by rapid variation from MJD 56900 to MJD 57300. Two strong flares were observed on April 24, 2015 when, within 19.0 minutes and 3.15 hours the flux was as high as $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $(4.71 \pm 0.92) \times 10^{-6} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectively, with $\geq 10\sigma$. During these flares the apparent isotropic γ -ray luminosity was $L_\gamma \simeq (1.20 - 1.66) \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ which is not common for radio galaxies and is more typical for BL Lacs. The synchrotron/ synchrotron self Compton mechanism can reasonably explain the multiwavelength emission in the quiescent and flaring states. The increase and rapid changes in the flaring state can be also explained assuming an additional contribution from the blob where the dominant photon fields are of external origin. The necessary jet kinetic power is $L_{jet} \simeq (1.31 - 48.0) \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$. The X-ray emission from the knots has a hard photon index of $\simeq (1.6 - 1.8)$ with a luminosity of $L \simeq (1.0 - 4.01) \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ and can be explained by IC/CMB models only if the jet Doppler factor is $\delta > 10$. If the X-rays are produced from the direct synchrotron radiation of the second population of electrons, which are produced more recently than the cooler population responsible for the radio-to-optical spectrum, lower jet luminosity and no bulk relativistic motion on kpc scales is required. Interestingly the jet luminosities measured for the innermost and outer regions are comparable.

In chapter 4 the emission processes in the large scale jets of γ -ray emitting radio galaxies which have knots or hotspots in their jets are investigated. Initially, the Fermi-LAT data from the 7-year observations of these radio galaxies (M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207 and 3C 111) are analyzed and corresponding spectra are estimated. Then, the X-ray data from Chandra observations of the knots or hot spots in their jet are analyzed, estimating the X-ray photon index and the flux. The emission from the regions near the nuclei are modeled by the synchrotron/ synchrotron self Compton mechanism, while the emission from large scale structures (knots, hotspots) by inverse Compton scattering of cosmic microwave background photons or synchrotron emission from second more energetic population of electrons. By theoretical modeling of the SEDs in two different scales of the jet, its main parameters (e.g., luminosity, magnetic field, etc.) are estimated and compared. The results show that the jet luminosities of the innermost and outer regions are comparable, suggesting that the jet does not suffer significant energy losses when propagates from the regions close to the black hole to those at hundreds of kiloparsecs from it. However, at larger distances the magnetic field and the particle energy density decrease and the jet becomes radiatively inefficient.

In the **Summary** the main results and conclusions are presented.

Резюме

Диссертация посвящена изучению высокочастотного излучения крупномасштабных струй активных галактических ядер (АГЯ). Эти струи являются мощными источниками многоволнового излучения (от радиоволн до высокоэнергетических γ -лучей), и их размеры иногда превышают несколько сотен кпк. Наблюдения струй в разных масштабах и теоретическое моделирование результатов позволяют сравнить параметры струи в разных масштабах, что имеет решающее значение для понимания эволюции нескольких важных параметров струи (светимость, магнитное поле, плотность энергии частиц и т.д.). Такие исследования имеют решающее значение также для понимания процессов ускорения частиц и излучений в струях.

Тезис начинается с введения, где рассматривается изучаемая тема в диссертации, и представлена её основная цель. Задачи представлены следующим образом.

В первой главе кратко описаны основные свойства АГЯ, включая их сценарий унификации и основные компоненты (узлы и горячие пятна и т.д.), а так же основной радиационный процесс, ответственный за излучение в радиогалактиках.

Во второй главе представлены этапы и методы анализа данных космических γ телескопов “Fermi-LAT” и “Chandra”. Речь идет об извлечении данных “Fermi-LAT” и методах анализа, подробно описаны пошаговые этапы анализа данных (спектральный и временной анализ, подготовка кривых яркости и т.д.). Далее описаны методы анализа рентгеновских данных “Chandra” по наблюдениям узлов крупномасштабных струй, показан способ извлечения и соответствующая подготовка данных, выбор источника и фоновой области, спектральный анализ с использованием программного пакета “Sherpa” и т.д.

В третьей главе сравниваются физические параметры струи 3C 120 в самых внутренних (\leq пк) и внешних (\geq кпк) областях, с помощью подробного многоволнового анализа и теоретического моделирования их широкополосных спектров. Радиогалактика 3C 120, находящаяся на расстоянии $\approx 144,9$ Мпк, является активным и мощным источником во всех наблюдаемых диапазонах излучения. В радиодиапазоне его характеристики являются ближе радиоисточникам типа FRI с мощной односторонней струей в размерах от субпарсекного до 100 кпк. Основные свойства мощной струи 3C 120 исследованы с использованием многоволновых данных (данные “Swift XRT / UVOT”, “Fermi-LAT” и “Chandra”) полученных из наблюдений в субпарсекных и кпк величин. 24 апреля 2015 г. наблюдались две сильные вспышки γ -излучения самой внутренней струи 3C 120, когда в течение 19.0 мин и 3.15 часа поток был выше соответственно $(7.46 \pm 1.56) \times 10^{-6}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ и $(4.71 \pm 0.92) \times 10^{-6}$ фотонов $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ для энергий

выше 100 МэВ, что соответствует изотропной γ -лучевой светимости $(1.2-1.6) \times 10^{46}$ эрг сек $^{-1}$. Такая яркость необычна для радиогалактик и более характерна для галактик типа BL Lac. Механизм синхротронного/ обратного комптоновского излучения может разумно объяснить многоволновое излучение в спокойном и возбужденном состояниях. Требуемая кинетическая мощность струи должна быть равна $L_{jet} \simeq (1.31 - 48.0) \times 10^{44}$ эрг сек $^{-1}$. Индекс рентгеновского излучения фотонов получается равным $\Gamma_X \simeq (1.6 - 1.8)$, а светимость $L \simeq (1.0 - 4.01) \times 10^{41}$ эрг сек $^{-1}$. Это рентгеновское излучение может объясняться моделями обратного комптоновского излучения на фотонном поле реликтового излучения, при условии что $\delta > 10$. Если рентгеновские лучи образуются из синхротронного излучения вторичной популяции электронов, которые формируются гораздо позднее электронов радио-оптического спектра, то необходима более низкая яркость струй, а так же отсутствие релятивистского движения на дистанции в кпк.

В четвертой главе представлен процесс излучения в крупномасштабных струях γ -излучающих радиогалактик, которые имеют узлы или горячие пятна в их исследованных струях. Вначале анализируются данные “Fermi-LAT” 7-летних наблюдений радиогалактик (M87, Pictor A, 3C 303, 3C 275.1, NGC 6251, 3C 207 и 3C 111) и оцениваются соответствующие спектры. Затем анализируются данные рентгеновских наблюдений “Chandra” узлы или горячие пятна в их струе, оцениваются индекс и поток рентгеновских фотонов. Излучение из областей вблизи ядер объясняется синхротронным /синхротронным само комптоновским механизмом, а излучение от крупномасштабных структур (узлы, горячие пятна) путем обратного комптоновского рассеяния космических микроволновых фоновых фотонов или синхротронного излучения от второй более энергетической популяции электронов. Основные параметры струи (светимость, магнитное поле и т.д.) оцениваются в разных масштабах (внутренней ($< \text{пк}$) и внешней ($> \text{кпк}$)) и ограничениях. Результаты показывают, что светимости струй внутренних и внешних областей сопоставимы, что говорит о том, что струя не несет значительных потерь энергии при распространении из областей, близких к черной дыре, к тем, которые находятся на сотнях килопарсеков от нее. Однако на больших расстояниях магнитное поле и плотность энергии частиц уменьшаются, и струя становится радиационно неэффективной.

В заключение представлены основные результаты и выводы.