

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
Վ. Ն. ՀԱՄԲԱՐԶՈՒՄՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԲՅՈՒՐԱՎԱՆԻ ԱՍՏՂԱԴԻՏԱՐԱՆ

Գասպարյան Սարգիս Արմենի

Բլազարների ուսումնասիրությունը բարձր էներգիաների գամմա-տիրույթում

Ա.03.02 - «Աստղաֆիզիկա, ռադիոաստղագիտություն»
մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԲՅՈՒՐԱՎԱՆ-2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
Бюраканская астрофизическая обсерватория имени В. А. Амбарцумяна

Гаспарян Саргис Арменович

ИССЛЕДОВАНИЕ БЛАЗАРОВ В ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОМ γ -
ДИАПАЗОНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

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

БЮРАКАН–2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Վ. Հ. Համբարձումյանի անվան
Բյուրականի Աստղադիտարանի (ԲԱ) գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.թ. Հ. Ա. Հարությունյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆ. Ա. Ա. Մահարյան
ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ Գ. Բ. Ալավերդյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական Համալսարան (ԵՊՀ)

Պաշպանությունը կայանալու է 2019 թ. հուլիսի 1-ին ժամը 12:00-ին, ՀՀ ԳԱԱ
Բյուրականի Աստղադիտարանում գործող ՀՀ ԲՈԿ-ի «Աստղագիտություն» 048
մասնագիտական խորհրդի նիստում (0213, Բյուրական, Արագածոտնի մարզ):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Բյուրականի Աստղադիտարանի
գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2019թ. մայիսի 17-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզմաթ. գիտ. թեկնածու

Ե.Հ. Նիկողոսյան

Тема диссертации утверждена ученым советом Бюраканской астрофизической
обсерватории им. В. А. Амбарцумяна НАН РА.

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

Официальные оппоненты: д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Саарян
канд. физ.-мат. наук Г. Б. Алавердян

Ведущая организация: Ереванский государственный университет (ЕГУ)

Защита состоится в 1-го июля, 2019 года в 12:00 часов на заседании
специализированного совета ВАК 048 "Астрономия" Бюраканского
астрофизического обсерватория имени В. А. Амбарцумяна НАН РА (0213, Бюракан,
Арагацотнская область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке обсерватории.

Автореферат разослан 17-го мая 2019 г.

Ученый секретарь спец. совета

канд. физ.-мат. наук

Е. Г. Никогосян

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Թեմայի արդիականությունը

Աստղաֆիզիկական աղբյուրներում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսների ուսումնասիրության մեթոդներից մեկը դրանց՝ ռադիոյից մինչև բարձր և գերբարձր էներգիաների (ԲԷ; > 100 ՄԷՎ և ԳԲԷ; > 100 ԳԷՎ) γ -տիրույթներում դիտումների արդյունքների թվային/տեսական մոդելավորումն է: Բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման աղբյուրներից են Ակտիվ Գալակտիկական Միջուկները (ԱԳՄ-ները), որոնք հանդիսանում են Տիեզերքի ճառագայթման ամենահզոր և կայուն աղբյուրները: ԱԳՄ-ների մեծ հզորությամբ ճառագայթումն առաջանում է կենտրոնական գերծանր սև խոռոչի (որի զանգվածը հաճախ հասնում է մինչև $10^9 M_{\odot}$) վրա ընկնող նյութի պոտենցիալ էներգիայի փոխակերպմամբ: Այդ սև խոռոչի շուրջը պտտվող զազից գոյանում է ակրեցիոն սկավառակ, որը ճառագայթում է օպտիկական և ուլտրամանուշակագույն (ՌԻՄ) տիրույթներում: Սև խոռոչի շուրջը՝ $\sim 10^3$ Շվարցշիլդի շառավղով տիրույթից, դիտվում են ֆոտոիոնիզացված գազին բնորոշ լայն գծեր, իսկ շատ ավելի ընդարձակ տիրույթից՝ նեղ գծեր: ԱԳՄ-ների միջուկից գրանցված ուժեղ ինֆրակարմիր ճառագայթումը ցույց է տալիս, որ նրա շուրջը գոյություն ունի նյութի զանգված՝ տորանման («torus») կառուցվածքով: Ակրեցիոն սկավառակից առաջանում է չափազանց էներգետիկ մասնիկների խիստ ուղղորդված պլազմայի արտանետում, այսպես կոչված շիթ, որի չափերը կարող են հասնել մինչև մի քանի կիլոպարսեկի: Կախված շիթի՝ դիտողի նկատմամբ ունեցած անկյունից, ԱԳՄ-ները բաժանվում են տարբեր դասերի: ԱԳՄ-ների ամենահետաքրքիր ենթադասը բլազարներն են, երբ շիթն ուղղված է դեպի դիտողը և Դոպլեր ուժեղացման շնորհիվ ճառագայթումն ավելի պայծառ է դիտողի համար (1): Բլազարներն իրենց հերթին բաժանվում են «BL Lacertae (BL-Lac)» և «Flat-Spectrum Radio Quasars (FSRQ)» դասերի, որոնք առանձնանում են գրանցված ճառագայթման գծերի տարբեր հատկություններով:

Բլազարների շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսների ուսումնասիրությունը ժամանակակալից աստղաֆիզիկայի ամենաարդիական խնդիրներից մեկն է, քանի որ այն հնարավորություն է տալիս հետազոտել ոչ միայն ռեյադիոփստական պրոցեսները և արտանետումները ամենաէքստրեմալ պայմաններում, այլ նաև ուսումնասիրել Տիեզերքի լայնամասշտաբ կառուցվածքը: Չնայած բլազարները միշտ եղել են ուսումնասիրության առարկա, նրանց շիթերում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսները դեռևս լիովին պարզաբանված չեն: Դեռևս անհասկանալի է շիթում ճառագայթման տիրույթի դիրքը. արդյո՞ք այն գտնվում է կենտրոնական սև խոռոչին մոտ, թե՛ լայն գծերով ճառագայթման տիրույթից (LQS-ից) դուրս, ինչպես են շիթերում մասնիկներն արագանում մինչև ԳԲԷ-ի տիրույթ և այլն: Նշված խնդիրները կարելի է հետազոտել միայն մեծ քանակության տվյալների մոդելավորման միջոցով:

Ատենխտության նպատակն է ուսումնասիրել տարբեր դասերի բլազարների շիթերում տեղի ունեցող ոչ ջերմային պրոցեսները՝ լայն էներգետիկ տիրույթում սպեկտրների տեսական մոդելավորման օգնությամբ: Մասնավորապես, պատրաստվել է ծրագրային փաթեթ, ինչը հնարավորություն է տալիս յուրաքանչյուր տեսական մոդելի շրջանակում գտնել այն ազատ պարամետրերի համախումբը, որը վիճակագրորեն լավագույնս նկարագրում է գրանցված տվյալները: Այս նպատակով օգտագործվել է հայտնի Markov Chain Monte Carlo (MCMC) մեթոդը: Ծրագրում ներառված են շիթում մասնիկների արագացման և փոխազդեցության բոլոր հնարավոր մեխանիզմները, ինչը թույլ է տալիս քննարկել ճառագայթման առաջացման տարբեր հնարավորությունները, ինչպես նաև հետազոտել տարբեր պարամետրերից և ճառագայթման տիրույթի դիրքերից կախված ճառագայթման սպեկտրի փոփոխությունները: Նշված ծրագրային փաթեթի միջոցով ուսումնասիրվել է ԳԲԷ γ -տիրույթում գրանցված FSRQ-երի՝ PKS 1510-089-ի, PKS 1222+216-ի և 3C 279-ի շիթերում բռնկումների առաջացման մեխանիզմները: PKS 1441+25 և CTA 102 հեռավոր բլազարների շիթերում տեղի ունեցող ոչ ջերմային պրոցեսները ուսումնասիրելու համար վերլուծվել են օպտիկական, ՌՄ, ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթում գրանցված տվյալները: Տեսական/թվային մոդելավորման արդյունքները քննարկվել են մասնիկների արագացման և ճառագայթման տարբեր տեսությունների շրջանակներում:

Ատենխտության նպատակն ու խնդիրները

- Ուսումնասիրել ԱԳՄ-երի ենթադաս հանդիսացող բլազարների ռեյաստիվիստական շիթերում մասնիկների արագացման և ճառագայթման մեխանիզմները:
- Հետազոտել ճառագայթման սպեկտրները և նրանց փոփոխությունը ճառագայթման տիրույթի տարբեր դիրքերում:
- Պատրաստել ծրագրային փաթեթ բլազարների շիթերի բազմալիքային տիրույթում դիտումների արդյունքների տեսական/թվային մոդելավորման համար՝ օգտագործելով պարամետրերի գնահատման վիճակագրական մեթոդներ:
- Ուսումնասիրել ԳԲԷ γ -տիրույթում գրանցված FSRQ դասի բլազարների շիթերից ճառագայթման մեխանիզմները՝ աղբյուրների ճառագայթման հանգիստ և ակտիվ վիճակներում:
- Ուսումնասիրել հեռավոր PKS 1441+25 ($z = 0.939$) բլազարում տեղի ունեցող բարձր և գերբարձր էներգիաների պրոցեսները, որոնց արդյունքում աղբյուրի ճառագայթումը գրանցվել է MAGIC և VERITAS դիտակների համակարգերով:
- Հետազոտել 2016-2018թթ. ընթացքում CTA 102 բլազարի օպտիկական, ՌՄ, ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում գրանցված բռնկումների առաջացման մեխանիզմները:

Գիտական նորույթը

- Բլազարների բազմահաճախային տիրույթում գրանցված Էներգիայի Սպեկտրալ Բաշխվածության (ԷՄԲ) մոդելավորման համար պատրաստվել է ծրագրային փաթեթ, որն ազատ պարամետրերի գնահատման համար օգտագործում է MCMC մեթոդը, ինչը թույլ է տալիս գտնել ազատ պարամետրերի այն արժեքները, որոնք վիճակագրորեն լավագույնս նկարագրում են գրանցված արդյունքները:

- Ցույց է տրվել, որ PKS 1510-089-ի, PKS 1222+216-ի և 3C 279-ի ճառագայթումը ԲԷ տիրույթում հնարավոր է բացատրել միայն այն դեպքում, երբ ճառագայթման տիրույթը գտնվում է ԼԳՏ-ից դուրս, և ճառագայթումը առաջանում է տորուսից ճառագայթած ֆոտոնների հակադարձ Կոմպտոնյան ցրումից (ՀԿՑ-ից): Մոդելավորմամբ գնահատվել է աղբյուրների շիթերը նկարագրող պարամետրերը ճառագայթման հանգստի և ակտիվ վիճակներում:

- Ցույց է տրվել, որ PKS 1441+25-ը գտնվել է բռնկման վիճակում ԲԷ γ -տիրույթում 2015 հունվարի 24-ին, երբ հոսքը աճել է մինչև $(2.22 \pm 0.38) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$: Մոդելավորման արդյունքները ցույց են տալիս, որ երբ աղբյուրի ճառագայթումը գրանցվել է ԳԲԷ γ -տիրույթում, շիթում արագացված էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխման ցուցիչը փոքրացել է դառնալով՝ 1.98 ± 0.03 .

- Ցույց է տրվել, որ CTA 102-ը գտնվել է ակտիվ ճառագայթման վիճակում ալիքային բոլոր տիրույթներում, 2016 նոյեմբերից մինչև 2017 փետրվարը: 2016թ. դեկտեմբերի 16-ին, 4.31 բոպեի ընթացքում, ԲԷ γ -տիրույթում լուսատվությունը եղել է $\approx 3.25 \times 10^{50}$ էրգ վրկ $^{-1}$, ինչը բլազարներից մինչ այժմ գրանցված ամենամեծ լուսատվությունների կարգի է: Ցույց է տրվել, որ ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում հոսքի աճին զուգահեռ ֆոտոնային ցուցիչը նվազում է, իսկ հոսքի փոփոխության ամենակարճ ժամանակը կազմում է 4.08 ± 1.44 ժամ:

- Ցույց է տրվել, որ ակտիվ վիճակում CTA 102-ի ճառագայթումը առաջանում է շիթի կոմպակտ տիրույթում, որը գտնվում է ԼԳՏ-ից դուրս, և գրանցված տվյալները բացատրվում են տորուսի ֆոտոնների ՀԿՑ-ով:

Ստացված արդյունքների գիտական և գործնական արժեքը

Բլազարների բազմահաճախային տիրույթում ԷՄԲ մոդելավորման համար պատրաստված ծրագրային փաթեթը կարող է օգտագործվել այլ աղբյուրներում տեղի ունեցող ոչ ջերմային պրոցեսները ուսումնասիրելու համար:

PKS 1441+25-ի և CTA 102-ի շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսների մանրամասն ուսումնասիրությունը ունի կարևոր նշանակություն FSRQ դասի բլազարների ֆիզիկան հասկանալու համար:

PKS 1510-089-ի, PKS 1222+216-ի և 3C 279-ի հանգստի և բռնկման վիճակներում ճառագայթման սպեկտրների մոդելավորման արդյունքները կարող են օգտագործվել BL Lac և FSRQ դասերի բլազարների շիթերում մասնիկների արագացման և

ճառագայթման պրոցեսների հետագա հետազոտություններում:

Պաշտպանության ներկայացված ատենախոսության հիմնական դրույթները

1) Պատրաստվել է ծրագրային փաթեթ՝ բլազարների բազմահաճախային ճառագայթման ԷՄԲ-ի թվային/տեսական մոդելավորման համար, որը ազատ պարամետրերի գնահատման համար օգտագործում է MCMC մեթոդը:

2) Ցույց է տրվել, որ PKS 1510-089, PKS 1222+216 և 3C 279 բլազարների բնկումները կարելի է բացատրել ճառագայթման տիրույթի դիրքի և/կամ Դոպլեր գործակցի փոփոխությամբ:

3) Հայտնաբերվել է, որ PKS 1441+25-ի ԲԷ γ -տիրույթում հոսքը կտրուկ աճել է 2015 հունվարին, իսկ ապրիլին սպեկտրի ֆոտոնային ցուցիչը եղել է՝ $\Gamma = 1.54 \pm 0.16$, ինչը բնութագրական չէ FSRQ բլազարների համար: Նույն ժամանակահատվածում հայնտաբերվել է դիֆերենցիալ սպեկտրի շեղում աստիճանային օրենքից:

4) Տեսական մոդելավորմամբ ցույց է տրվել, որ 2015թ. ապրիլին PKS 1441+25-ի բնկման ժամանակ գրանցված ճառագայթումը բացատրվում է տորուսից ճառագայթող ֆոտոնների $Z\gamma\delta$ -ով և ցույց է տրվել, որ շիթում ճառագայթող էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխածության ցուցիչը փոքրացել է մինչև՝ $\alpha = 1.98$, ինչի հետևանքով աղբյուրի ճառագայթումը գրանցվել է ԳԲԷ γ -տիրույթում:

5) Հայտնաբերվել է, որ 2016թ. դեկտեմբերի 16-ին CTA 102-ի γ -ճառագայթումը 4.31 բոպեի ընթացքում աճել է մինչև $(3.55 \pm 0.55) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$, որին համապատասխանում է 3.25×10^{50} էրգ վրկ $^{-1}$ լուսատվություն, որը բլազարներից գրանցված ամենամեծ լուսատվության կարգի է: Հայտնաբերվել է, որ ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում հոսքի աճին զուգահեռ ֆոտոնային ցուցիչը նվազում է:

6) Ցույց է տրվել, որ CTA 102 աղբյուրի γ -տիրույթում բնկման ընթացքում գրանցված տվյալները բացատրվում են ԼԳՏ-ից դուրս էներգետիկ էլեկտրոնների և տորուսից ճառագայթված ֆոտոնների $Z\gamma\delta$ -ով:

Աշխատանքի ներկայացումը

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ միջազգային գիտաժողովներում.

1. The 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016), July 11-15, 2016, Heidelberg, Germany,
2. High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VI, September 11-15, 2017, Moscow, Russia,

ինչպես նաև՝ քննարկվել են ԻԿԴԱՆԵՏ կենտրոնի և Վ. Համբարձումյանի անվան Բյուրականի աստղադիտարանի սեմինարների ժամանակ:

Հրատարակումները

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

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 5 գլխից, եզրակացությունից և 152 հղումների ցանկից: Ատենախոսությունը պարունակում է 33 նկար և 9 աղյուսակ, իսկ ծավալը կազմում է 127 էջ:

Ատենախոսության բովանդակությունը

Առաջաբանում հակիրճ ներկայացված են թեմայի կարևորությունը և արդիականությունը՝ մատնանշելով առաջադրված նպատակներն ու խնդիրները, ինչպես նաև ատենախոսության հակիրճ բովանդակությունը:

Առաջին գլխում ներկայացված են ԱԳՄ-ների և բլազարների հիմնական հատկությունները և նրանց դասակարգումը, ինչպես նաև քննարկվել են բլազարների բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման բնութագրերը: Ներկայացվել է ռեյատիվիստական համակարգերից դեպի անշարժ համակարգ անցնելիս տարբեր մեծությունների ձևափոխությունները:

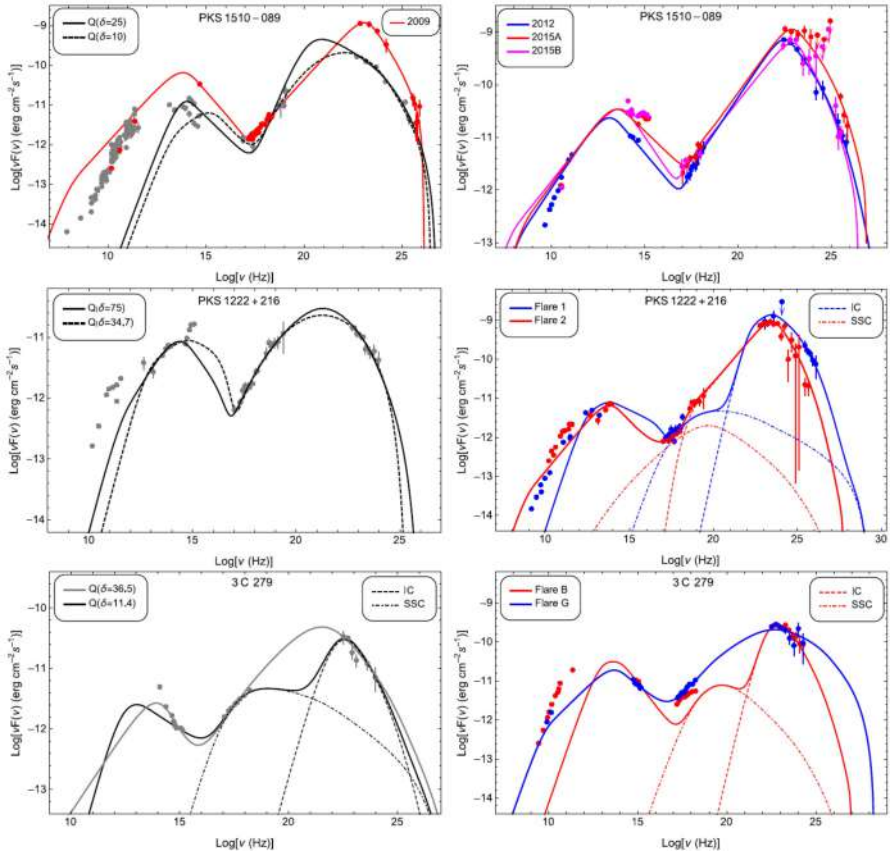
Երկրորդ գլխում քննարկվել են բլազարների շիթերում մասնիկների արագացման և ճառագայթման մեխանիզմները: Մանրամասն ներկայացված է մեկ էլեկտրոնի և էլեկտրոնների համախմբի սինքրոտրոնային ճառագայթումը, և ՀԿՑ-ը, ներկայացվել են ճառագայթման սպեկտրները և միավոր ժամանակում էներգիայի կորուստի արագությունը: Քննարկվել են բլազարների ճառագայթման սպեկտրում ԲԷ բաղադրիչի ձևավորումը՝ պայմանավորված տարբեր ֆոտոնային դաշտերի ՀԿՑ-ով: Քննարկվել են նաև մասնիկների հնարավոր էներգետիկ բաշխվածությունները՝ պայմանավորված արագացմամբ և ճառագայթմամբ:

Երրորդ գլուխը նվիրված է բլազարների բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման ԷՄԲ-րի թվային/տեսական մոդելավորմանը: Քննարկվել են տարբեր վիճակագրական մեթոդներ, թե ինչպես գտնել այն պարամետրերը, որոնք տրված մոդելի շրջանակում լավագույնս նկարագրում են գրանցված տվյալները: Մասնավորապես, ներկայացվել է լայն կիրառություն ունեցող Բայեսիան մեթոդը, ինչպես նաև՝ ազատ պարամետրերի օպտիմիզացման մեծ կիրառություն ունեցող անալիտիկ (χ^2 , log-likelihood և այլն) և թվային (Newton's, Steepest-descent, MCMC, և այլն) մեթոդները: Ավելի մանրամասն քննարկված է MCMC մեթոդի affine-invariant ալգորիթմը (2) և վերջինիս հիմնական դրույթները: Նշված ալգորիթմի միջոցով պատրաստվել է ծրագրային փաթեթ, ինչը մոդելավորման ժամանակ թույլ է տալիս գտնել այն ազատ պարամետրերի համախումբը, որոնք վիճակագրորեն լավագույնս բացատրում են գրանցված տվյալները: Ներկայացված է ծրագրային փաթեթի կառուցվածքն ու աշխատանքի հիմնական սկզբունքները, և որպես ծրագրի կիրառություն՝ մոդելավորվել են PKS 0537-441 և Mkn 501 բլազարների բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման ԷՄԲ-րը: Մոդելավորման միջոցով հնարավոր է գնահատել մասնիկների էներգետիկ բաշխվածությունը նկարագրող

պարամետրերը՝ առավելագույն և նվազագույն էներգիաներ, էներգետիկ բաշխվածության ցուցիչ և այլն, ինչպես նաև շիթի հիմնական պարամետրերը՝ մագնիսական դաշտ, լուսատվություն և այլն: Գնահատված պարամետրերը հնարավորություն են տալիս ոչ միայն հետազոտել մասնիկների արագացման և էներգիայի կորստի մեխանիզմները, այլ նաև հասկանալ շիթերի ֆիզիկան: **4.4-4.7** ենթագլուխներում վերը նշված ծրագիրը օգտագործվել է ԳԲԷ γ -տիրույթում գրանցված FSRQ-ներից երեքի՝ PKS 1510-089-ի, PKS 1222+216-ի և 3C 279-ի շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսները ուսումնասիրելու համար: Յուրաքանչյուր աղբյուրի համար առանձնացվել են մեկական հանգիստ և տարբեր ակտիվ վիճակներին համապատասխանող բազմահաճախային տվյալներ և դրանք մոդելավորվել են տարբեր տեսական մոդելների շրջանակներում: ԷՄԲ-երի համեմատությունը ցույց է տալիս, որ ակտիվ վիճակում ճառագայթման երկու բաղադրիչները աճել են, իսկ որոշ դեպքերում նաև շեղվել են դեպի ԲԷ տիրույթ: Քանի որ աղբյուրների ճառագայթումը գրանցվել է ԳԲԷ տիրույթում, ապա ճառագայթման տիրույթը պետք է լինի ԼԳՏ-ից դուրս, հակառակ դեպքում 100 ԳԷՎ -ից բարձր էներգիա ունեցող ֆոտոնները կկլանվեին: Քննարկվել են հետևյալ դեպքերը. հանգստի վիճակից ակտիվ վիճակի անցնելիս 1) ճառագայթման տիրույթը սկսում է ավելի արագ շարժվել (Լորենց գործակիցը մեծանում է) և լքում է ԼԳՏ-ը, կամ՝ 2) Լորենց գործակիցը մնում է անփոփոխ և տիրույթը պարզապես լքում է ԼԳՏ-ը: Նշված երկու դեպքերում մոդելավորման արդյունքները (աղյուսակ 1) ցույց են տալիս, որ PKS 1510-089 աղբյուրի բռնկումների ժամանակ ԷՄԲ կարելի է բացատրել, երբ էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխվածության աստիճանային օրենքի ցուցիչը $\alpha_1 = (1.91 - 2.11)$, որը փոխվում է $\alpha_2 = (3.68 - 4.13)$, $E_{br} = (0.30 - 0.63) \text{ ԳԷՎ}$ -ից բարձր տիրույթում, իսկ մագնիսական դաշտը $B = (0.34 - 0.46) \text{ Գս կարգի է}$: Բռնկումների

Աղյուսակ 1. Մոդելավորման արդյունքները՝ հանգիստ և ակտիվ վիճակներում:

	α_1	α_2	E'_{br}	B	$L_B/10^{41}$	$L_e/10^{44}$
			GeV	G	erg s ⁻¹	erg s ⁻¹
PKS 1510-089						
Q ($\delta = 10$)	$2.13^{+0.03}_{-0.06}$	$4.05^{+0.16}_{-0.18}$	$1.39^{+0.20}_{-0.28}$	$5.23^{+0.46}_{-0.69}$	16.4	1.5
Q ($\delta = 25$)	$1.83^{+0.05}_{-0.04}$	$3.96^{+0.02}_{-0.02}$	$0.58^{+0.02}_{-0.02}$	$0.37^{+0.01}_{-0.01}$	3.2	22.0
2009 ($\delta = 25$)	$1.91^{+0.01}_{-0.01}$	$4.13^{+0.20}_{-0.20}$	$0.63^{+0.01}_{-0.01}$	$0.45^{+0.01}_{-0.01}$	4.9	537.0
2012 ($\delta = 25$)	$1.93^{+0.03}_{-0.03}$	$3.84^{+0.03}_{-0.02}$	$0.30^{+0.01}_{-0.01}$	$0.36^{+0.002}_{-0.002}$	3.0	604.4
2015A ($\delta = 25$)	$2.02^{+0.10}_{-0.06}$	$3.68^{+0.08}_{-0.06}$	$0.46^{+0.08}_{-0.08}$	$0.34^{+0.01}_{-0.02}$	2.7	759.0
2015B ($\delta = 25$)	$2.11^{+0.04}_{-0.04}$	$4.04^{+0.12}_{-0.09}$	$0.52^{+0.07}_{-0.04}$	$0.46^{+0.02}_{-0.02}$	5.0	598.2
PKS 1222+216						
Q ($\delta = 34.7$)	$2.26^{+0.09}_{-0.07}$	$3.24^{+0.04}_{-0.04}$	$0.50^{+0.07}_{-0.04}$	$2.26^{+0.03}_{-0.03}$	49.8	3.2
Q ($\delta = 75$)	$1.86^{+0.02}_{-0.01}$	$3.93^{+0.06}_{-0.04}$	$1.07^{+0.04}_{-0.02}$	$0.16^{+0.003}_{-0.003}$	5.5	30.3
Flare1 ($\delta = 75$)	$2.24^{+0.42}_{-0.32}$	$3.41^{+0.16}_{-0.14}$	$0.31^{+0.07}_{-0.07}$	$0.42^{+0.03}_{-0.03}$	36.8	10.5
Flare2 ($\delta = 75$)	$1.96^{+0.005}_{-0.004}$	$3.91^{+0.01}_{-0.01}$	$0.33^{+0.005}_{-0.005}$	$0.47^{+0.002}_{-0.002}$	47.2	15.2
3C 279						
Q ($\delta = 11.4$)	$1.98^{+0.09}_{-0.13}$	$3.47^{+0.08}_{-0.03}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$	$2.07^{+0.03}_{-0.06}$	242.0	3.7
Q ($\delta = 36.5$)	$1.91^{+0.01}_{-0.01}$	$4.28^{+0.04}_{-0.07}$	$2.86^{+0.07}_{-0.14}$	$0.02^{+0.0009}_{-0.0003}$	2.3	285.7
Flare B ($\delta = 36.5$)	$2.60^{+0.31}_{-0.54}$	$4.17^{+0.41}_{-0.38}$	$0.48^{+0.06}_{-0.09}$	$0.56^{+0.06}_{-0.06}$	1872.7	9.3
Flare C ($\delta = 36.5$)	$2.10^{+0.05}_{-0.05}$	$3.74^{+0.03}_{-0.03}$	$11.72^{+1.01}_{-0.96}$	$(5.60 \pm 0.30) \times 10^{-4}$	32.0	4801.6

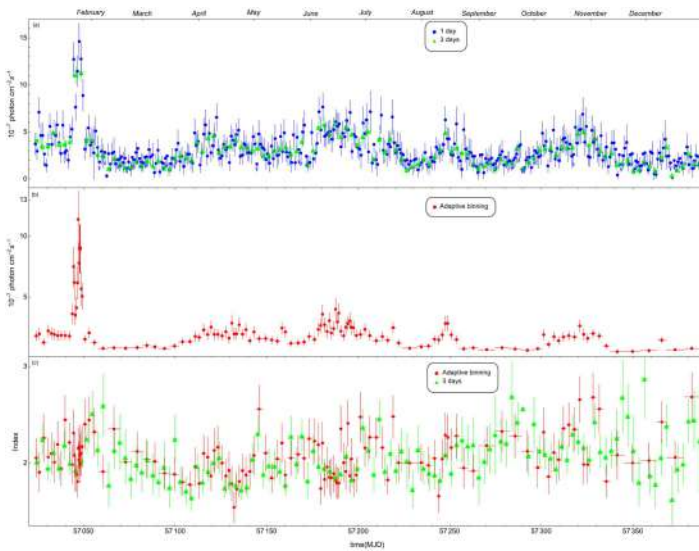


Նկար 1: PKS 1510-089, PKS 1222+216 և 3C 279 բլազարների ճառագայթման հանգիստ և բռնկման վիճակներում էՄԲ-երի մոդելավորման արդյունքները :

Ժամանակ նկատելիորեն աճում է շիթի լուսատվությունը՝ $L_{jet} = (5.4 - 7.6) \times 10^{46}$ էրգ վ⁻¹, իսկ հանգստի վիճակում այն կազմում է $L_{jet} = 1.5 \times 10^{44}$ էրգ վ⁻¹: PKS 1222+216-ի դեպքում հանգստի վիճակում գրանցված էՄԲ-ը հնարավոր է բացատրել սինքրոտրոն ճառագայթման և սինքրոտրոնային ֆոտոնների ՀԿՑ-ով (նկար 1): Բռնկման ժամանակ հոսքը ՄԷՎ-ԳԷՎ տիրություն զգալի աճում է, իսկ ռենտգենյան տիրություն այն գրեթե չի փոփոխվում, ինչը ցույց է տալիս, որ ճառագայթումը այդ տիրություններում պայմանավորված է տարբեր պրոցեսներով: Ռենտգենյան տիրություն ճառագայթումը բացատրվել է որպես սինքրոտրոնային ֆոտոնների ՀԿՑ, իսկ ՄԷՎ-ԳԷՎ տիրություն՝ որպես սոթրուսից ճառագայթված ֆոտոնների ՀԿՑ: Համեմատած հանգիստ վիճակին, երկու բռնկումները կարելի է բացատրել շատ չփոփոխելով $E_{br} \approx 0.3$ ԳԷՎ և $B = (0.42 - 0.47)$ Գս պարամետրերը: Շիթի

անհրաժեշտ լուսատվությունը՝ $L_{jet} = (1 - 3) \times 10^{45}$ էրգ վրկ⁻¹, գրեթե նույն կարգի է ինչ հանգստի վիճակում: 3C 279-ի հանգստի վիճակում օպտիկական տիրույթի տվյալները ցույց են տալիս, որ ցածր էներգիաների բաղադրիչի առավելագույն հաճախությունը չի կարող գերազանցել 10^{14} Հց և այդ ֆոտոնների ՀԿՑ-ը կբացատրի ԲԷ γ -տիրույթի տվյալները միայն Դոպլեր ուժեղացման մեծ գործակցի դեպքում: Հետևաբար, հանգիստ վիճակում ճառագայթումը բացատրվել է սինքրոտրոն ֆոտոնների ՀԿՑ-ով, երբ $\delta = 36.5$, իսկ երբ $\delta = 11.4$, հաշվի է առնվել նաև ԼԳՏ-ից անդրադարձած ֆոտոնների ՀԿՑ-ը: Երկու դեպքում էլ էլեկտրոնների աստիճանային օրենքի ցուցիչները եականորեն չեն տարբերվում՝ $\alpha_1 = 1.98 \pm 0.11$ և $\alpha_1 = 1.91 \pm 0.01$ արժեքներին, սակայն երկրորդ դեպքում պահանջվում է շիթի շատ մեծ լուսատվություն՝ $L_{jet} = 2.9 \times 10^{46}$ էրգ վրկ⁻¹, որը հիմնականում պայմանավորված է էլեկտրոնների ազդեցությամբ: Բռնկումների ժամանակ նկատվել են բազմահաճախային տիրույթում ճառագայթման սպեկտրի տարբեր փոփոխություններ: Օրինակ՝ <> բռնկման ժամանակ գրանցվել է հոսքի միաժամանակյա աճ բոլոր տիրույթներում՝ բացի ռենտգենյան տիրույթից: Հետևաբար, մոդելավորման ժամանակ ռենտգենյան տիրույթի հոսքը հաշվի չի առնվել, իսկ γ -տիրույթում ճառագայթումը բացատրվել է տորուսից ճառագայթած ֆոտոնների ՀԿՑ-ով: <<G>> բռնկման ժամանակ բոլոր ալիքային տիրույթներում գրանցվել են հոսքի միաժամանակյա փոփոխություններ, հետևաբար՝ ճառագայթումը բացատրվել է սինքրոտրոնային ֆոտոնների ՀԿՑ-ով: Ռենտգենյան տիրույթի տվյալները թույլ են տվել մեծ ճշտությամբ գնահատել $\alpha_1 = 2.10 \pm 0.05$ արժեքը, որը բնութագրական արժեք է հարվածային ալիքներով արագացման դեպքում:

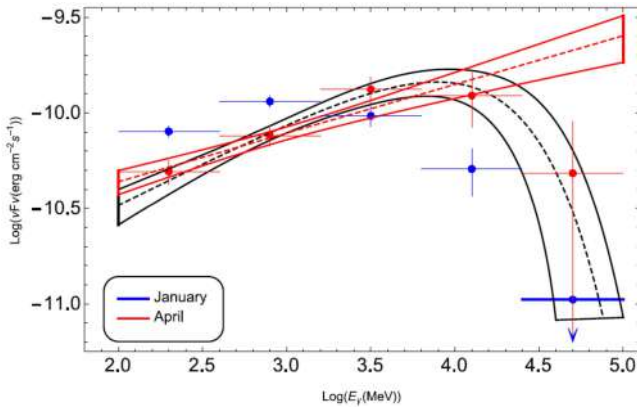
Չորրորդ գլխում մանրամասնորեն հետազոտվել է մինչ այժմ ԳԲԷ γ -տիրույթում գրանցված ամենահեռու FSRQ-ներից մեկի՝ PKS 1441+25-ի ($z = 0.939$) շիթում տեղի ունեցող պրոցեսները: Այս աղբյուրից ԲԷ γ -ճառագայթումը (մինչև 250 ԳԷՎ տիրույթը) առաջին անգամ գրանցվել է 2015թ. ապրիլին՝ MAGIC և VERITAS դիտակների համակարգերի միջոցով (3), (4): PKS 1441+25 աղբյուրից ԲԷ ճառագայթման մեխանիզմների մանրամասն ուսումնասիրության համար վերլուծվել են 2015թ. հունվար-դեկտեմբեր ամիսների ընթացքում *Fermi* LAT դիտակով գրանցված տվյալները: Հոսքի փոփոխությունը ուսումնասիրվել է՝ օգտագործելով ժամանակի հավասար և անհավասար (adaptive binning) տրոհման եղանակները (նկար 2): Աղբյուրը գտնվել է ակտիվ ճառագայթման վիճակում հունվարի 21-27-ը, երբ հունվարի 24-ին հոսքը աճել է մինչև $(2.22 \pm 0.38) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ⁻² վրկ⁻¹: Երբ աղբյուրի ճառագայթումը գրանցվել է ԳԲԷ γ -տիրույթում, ՄԷՎ/ԳԷՎ տիրույթում ճառագայթման ֆոտոնային ցուցիչը փոքրացել է, հիմնականում փոփոխվելով 1.73 – 1.79 տիրույթում, $\Gamma = 1.54 \pm 0.16$ ամենափոքր



Նկար 2: 2015թ. հունվար-դեկտեմբեր ընթացքում γ -ճառագայթման հոսքի փոփոխության ժամանակային կորերը:

արժեքով, որը բնութագրական չէ FSRQ-ների համար: Այս ընթացքում ճառագայթման սպեկտրը նաև շեղվել է պարզ աստիճանային օրենքից (նկար 3): Մասնավորապես, ապրիլի 15-ից մինչև 26-ը գրանցված տվյալները լավագույնս նկարագրվում են $E^{-\Gamma} \text{Exp}(-E/E_{cut})$ օրենքով, որտեղ $\Gamma = 1.56 \pm 0.1$ և $E_{cut} = 17.7 \pm 8.9$ ԳԷՎ: Բռնկման ժամանակ գնահատվել է, որ հոսքի ամենակարճ փոփոխականության ժամանակը $\tau_d = 1.44$ օր է, ինչը թույլ է տալիս սահմանափակել ճառագայթման տիրույթի չափերը $R_b \leq 3.5 \times 10^{16} (\delta/18)$ սմ-ով:

Աղբյուրի շրթում մասնիկների ճառագայթման մեխանիզմները հետազոտվել են, մոդելավորելով ԷՍԲ-երը՝ գրանցված հանգստի վիճակում, 2015թ. հունվարին և ապրիլին: Այս ԷՍԲ-երի համեմատությունը ցույց է տալիս, որ ակտիվ վիճակներում 1) սպեկտրի երկրորդ բաղադրիչը զգալի աճել է, իսկ այդ բաղադրիչի առավելագույն հոսքի էներգիան շեղվել է դեպի ԲԷ տիրույթը, 2) աճել է ցածր էներգիաների բաղադրիչը (ապրիլին գրանցված հոսքը գերազանցում է հունվարին գրանցվածին), սակայն ռենտգենյան տիրույթի սպեկտրի ցուցիչը գրեթե չի փոփոխվել ($\alpha \sim 2.3$) և 3), ակտիվ վիճակներում ԲԷ բաղադրիչը մի քանի կարգով գերազանցում է ցածր էներգիաների բաղադրիչին: Ճառագայթման սպեկտրում նման փոփոխությունները հնարավոր է պայմանավորված լինեն ճառագայթման տիրույթի բոլոր պարամետրերի միաժամանակյա փոփոխմամբ, սակայն երբեմն մեկ կամ երկու պարամետրերի փոփոխությունը բավարար է այդ փոփոխությունները բացատրելու համար: Հաճախ նման փոփոխությունը հաջողությամբ բացատրվում է շրթում ճառագայթման տիրույթի դիրքի փոփոխմամբ: Մասնավորապես, հանգստի



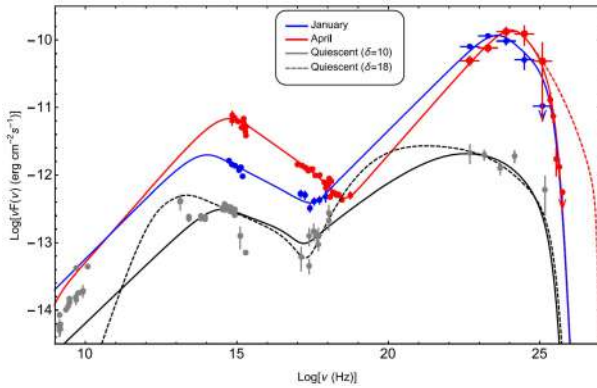
Նկար 3. PKS 1441+25-ի ԲԷ γ -տիրույթում ճառագայթման սպեկտրները հունվար (կապույտ կետեր) և ապրիլ (կարմիր կետեր) ամիսներին:

վիճակում ճառագայթման տիրույթը գտնվում է կենտրոնական աղբյուրին մոտ, իսկ բռնկումների ժամանակ ԼԳՏ-ից դուրս: Հետևաբար, տեսական մոդելավորման ժամանակ ենթադրվել է, որ ճառագայթման տիրույթը, ունենալով $\delta = 10$ Լորենց գործակից, ուղղակի դուրս է գալիս ԼԳՏ-ից, իսկ մյուս դեպքում տեղի է ունենում Լորենց գործակից մեծացում՝ $\delta = 10$ -ից մինչև $\delta = 18$ -ի: Մոդելավորման ժամանակ ենթադրվել է, որ ճառագայթումը առաջանում է մեկ տիրույթից, որտեղ էլեկտրոնների բաշխվածությունը նկարագրվում է՝

$$N(E_e) = \begin{cases} N_0 \left(\frac{E_e}{E_0}\right)^{-\alpha_1} & E_e \leq E_{br} \\ N_0 \left(\frac{E_{br}}{E_0}\right)^{\alpha_2 - \alpha_1} \left(\frac{E_e}{E_0}\right)^{-\alpha_2} & E_e > E_{br} \end{cases},$$

որենքով, որտեղ N_0 -ն կապված է էլեկտրոնների ընդհանուր էներգիայի հետ, $W_e = \int E_e N(E_e) dE_e$: Մոդելի ազատ պարամետրերը գնահատվել են MCMC մեթոդով:

Աղբյուրի ԷՄԲ-երի մոդելավորման արդյունքները պատկերված են նկար 4-ում: Էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումը և սինքրոտրոնային ֆոտոնների չԿՅ-ը կարող են բացատրել աղբյուրի ճառագայթումը հանգիստ վիճակում (աղյուսակ 2): Հունվար և ապրիլ ամիսների ընթացքում գրանցված տվյալների ԲԷ բաղադրիչը մոդելավորվել է տորուսի ֆոտոնների չԿՅ-ով: Երկու դեպքում էլ էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխման ցուցիչը՝ ԲԷ տիրույթում նույն կարգի է՝ $\alpha_2 = 3.46 - 3.64$, քանի որ այն որոշվում է ռենտգենյան տվյալներով: Մյուս կողմից, հնարավոր է գնահատել α_1 -ը՝ օգտագործելով միայն ռենտգենյան տիրույթի տվյալները, որոնք համապատասխանում են ցածր և բարձր էներգիաների բաղադրիչների անցումային տիրույթին: Ապրիլին գրանցված տվյալները բացատրելու համար այն եղել է՝ $\alpha_1 = 1.98 \pm 0.03$, որը ավելի փոքր է, քան հունվարին գնահատված արժեքը՝ $\alpha_1 = 2.10 \pm 0.06$: Աճել են նաև E_{br} -ը և E_{max} -ը,



Նկար 4. PKS 1441+25-ի էՄԲ մոդելավորման արդյունքները:

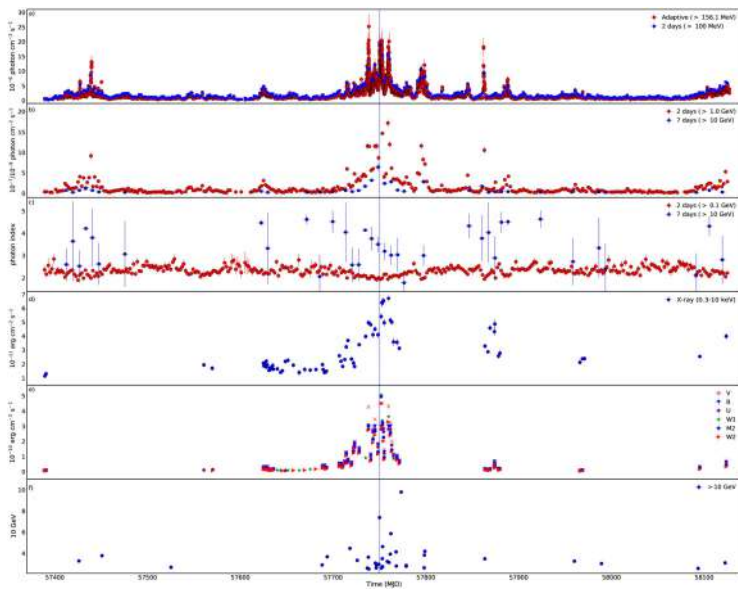
դառնալով համապատասխանաբար 3.1 և 203 ԳեՎ: Ամենայն հավանականությամբ այս շեղումով է պայմանավորված աղբյուրի գրանցումը ԳԲԷ γ -տիրույթում:

Աղյուսակ 2: Մոդելի պարամետրերը

	Parameter	Quiescent	Quiescent	January	April
Doppler factor	δ	10	18	18	18
Normalization of electron distribution	$N'_0 \times 10^{48} \text{ eV}^{-1}$	$10.68^{+3.09}_{-2.64}$	$43.44^{+6.59}_{-7.76}$	$23.83^{+8.11}_{-7.32}$	$6.12^{+1.67}_{-1.56}$
Low-energy electron spectral index	α_1	2.14 ± 0.04	$2.09^{+0.03}_{-0.04}$	$2.10^{+0.04}_{-0.05}$	1.98 ± 0.03
High-energy electron spectral index	α_2	$3.39^{+0.27}_{-0.14}$	3.38 ± 0.06	3.46 ± 0.06	3.64 ± 0.01
Minimum electron energy	E'_{min} (MeV)	$1.84^{+1.75}_{-1.23}$	$286.37^{+30.64}_{-25.39}$	$1.97^{+0.31}_{-0.34}$	$4.16^{+1.00}_{-1.86}$
Break electron energy	E'_{br} (GeV)	$2.83^{+0.51}_{-0.31}$	$1.11^{+0.14}_{-0.12}$	$1.62^{+0.23}_{-0.15}$	$3.11^{+0.15}_{-0.23}$
Maximum electron energy	E'_{max} (GeV)	$46.27^{+49.74}_{-13.36}$	$82.32^{+13.47}_{-17.14}$	$127.82^{+26.74}_{-24.75}$	$202.79^{+21.2}_{-14.6}$
Magnetic field	B [G]	0.19 ± 0.013	0.046 ± 0.002	$0.11^{+0.005}_{-0.004}$	$0.18^{+0.009}_{-0.006}$
Jet power in magnetic field	$L_B \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$	0.49	0.31	1.71	4.51
Jet power in electrons	$L_e \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$	2.11	4.07	9.60	4.47

Օգտագործելով մոդելավորման արդյունքները, $L_e = \pi c R_b^2 \Gamma^2 U_e$ բանաձևով հնարավոր է գնահատել նաև շիթի լուսատվությունը: Այն եղել է՝ $(4.5 - 9.6) \times 10^{45}$ էրգ վրկ $^{-1}$ և $(2.1 - 4.1) \times 10^{45}$ էրգ վրկ $^{-1}$, աղբյուրի ակտիվ և հանգիստ վիճակներում: Ենթադրելով, որ շիթում յուրաքանչյուր էլեկտրոնին համապատասխանում է մեկ պրոտոն (ինչպես օրինակ (5), (6)-ում), շիթի ընդհանուր կինետիկ էներգիան գնահատվել է՝ $L_{\text{kin}} = 8.02 \times 10^{47}$ էրգ վրկ $^{-1}$ և $L_{\text{kin}} = 1.35 \times 10^{47}$ էրգ վրկ $^{-1}$ կարգի, հունվարի և ապրիլի ակտիվությունների ժամանակ:

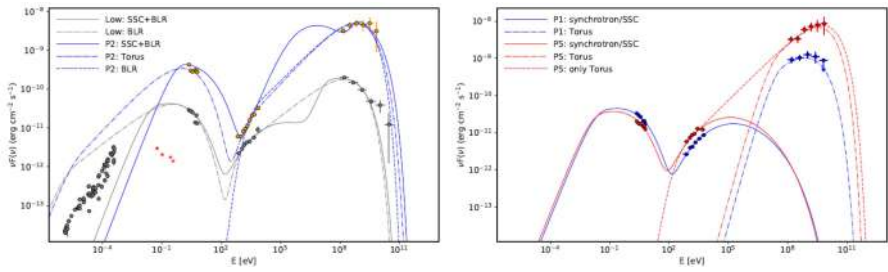
Հինգերորդ գլխում հետազոտվել են CTA 102-ի ($z = 1.037$) շիթի ոչ ջերմային ճառագայթման մեխանիզմները՝ աղբյուրի 2016-2018 թթ. ակտիվ ճառագայթման ժամանակ: Այդ նպատակով վերլուծվել են 2016-2018 թթ. ընթացքում օպտիկական/ՈւՄ, ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում Swift UVOT/XRT, NuStar և *Fermi* LAT դիտակներով գրանցված տվյալները: Աղբյուրի տարբեր էներգետիկ տիրույթներում ճառագայթման հոսքի փոփոխականության կորերը (նկար 5) ցույց են տալիս, որ MJD 57700-57900-ի ընթացքում աղբյուրը գտնվել է ակտիվ ճառագայթման վիճակում՝ նշված բոլոր տիրույթներում: Օրինակ՝ ԲԷ γ -տիրույթում



Նկար 5: CTA 102-ի ճառագայթման հոսքի ժամանակային փոփոխականության կորերը՝ օպտիկական/ՌՄ, ռենտգենյան և ԲԷ γ տիրույթներում:

աղբյուրի հոսքը աճել է մինչև $(3.55 \pm 0.55) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ^{-2} վրկ $^{-1}$, որը մոտավորապես 220 անգամ գերազանցում է աղբյուրի ճառագայթման միջին հոսքին: Այդ հոսքին համապատասխանում է 3.25×10^{50} էրգ վրկ $^{-1}$ լուսատվություն, որը մինչ այժմ բլազարներից գրանցված ամենամեծ լուսատվության կարգի է: Այս ընթացքում փոփոխվել է նաև ճառագայթման հոսքի ֆոտոնային ցուցիչը (նկար 5 (c)), որը կարող է պայմանավորված լինել մասնիկների արագացմամբ կամ արագ ճառագայթմամբ: Պեռատոնի զծային կորելացիայի գործակիցը ցույց է տալիս, որ հոսքի և ֆոտոնային ցուցիչի միջև կա բացասական կորելացիա, այսինքն հոսքի աճին զուգահեռ ֆոտոնային ցուցիչը նվազում է: Ռենտգենյան տիրույթում նույնպես հոսքի աճին զուգահեռ ֆոտոնային ցուցիչը նվազում է:

Աղբյուրի ճառագայթման էՄԲ-երը պատրաստվել են, երբ աղբյուրը գտնվել է հանգստի վիճակում՝ ճառագայթման բոլոր տիրույթներում, ինչպես նաև բռնկման ժամանակ: Ակտիվ վիճակներից ընտրվել են այն ժամանակահատվածները, երբ γ -տիրույթում նկատվել է աղբյուրի ճառագայթման ուժեղացում, և որի ընթացքում աղբյուրը ուսումնասիրվել է նաև Swift կամ NuStar դիտակներով: Մոդելավորվել են միայն հանգստի վիճակում գրանցված էՄԲ-երը, ինչպես նաև՝ P1 (MJD 57625.06-57625.39), P2 (MJD 57738.02-57738.08) և P5 (14.66 բուպե MJD 57862.15-ի շուրջը) բռնկումների ժամանակ, երբ գրանցվել են տարբեր տիրույթներում հոսքի հետաքրքիր փոփոխություններ: ԷՄԲ-երի տեսական/թվային մոդելավորման



Նկար 6: CTA 102-ի էՄԲ-երի մոդելավորման արդյունքները հանգստի, P1, P2 և P5 վիճակներում:

Աղյուսակ 3: Մոդելի պարամետրեր

	low		P1	P2		P5	
	SSC+BLR	BLR	compact	SSC+BLR	Torus	compact	Torus
δ	10	10	20	20	20	20	20
α	2.51 ± 0.11	2.19 ± 0.02	2.12 ± 0.54	2.79 ± 0.44	1.91 ± 0.03	1.78 ± 0.52	1.95 ± 0.03
$E_{min} [\text{MeV}]$	68.25 ± 5.27	0.54 ± 0.03	155.59 ± 109.18	227.25 ± 26.43	1.38 ± 0.15	121.33 ± 67.33	0.63 ± 0.09
$E_c [\text{GeV}]$	0.67 ± 0.1	0.49 ± 0.04	1.42 ± 0.81	1.32 ± 0.43	0.98 ± 0.05	2.36 ± 1.54	3.85 ± 1.57
$E_{max} [\text{TeV}]$	0.57 ± 0.31	0.49 ± 0.31	0.48 ± 0.34	0.50 ± 0.30	0.41 ± 0.18	0.58 ± 0.25	0.54 ± 0.31
$B [\text{G}]$	5.40 ± 0.13	5.37 ± 0.14	0.23 ± 0.29	6.10 ± 0.50	1.01 ± 0.003	0.004 ± 0.042	0.015 ± 0.049
$L_B [\text{erg s}^{-1}]$	1.75×10^{46}	1.73×10^{46}	1.47×10^{42}	1.04×10^{45}	2.86×10^{43}	3.86×10^{38}	6.44×10^{39}
$L_e [\text{erg s}^{-1}]$	4.66×10^{44}	2.90×10^{45}	1.73×10^{46}	2.84×10^{45}	2.74×10^{47}	7.33×10^{46}	1.97×10^{47}

Ժամանակ քննարկվել են կենտրոնական աղբյուրի նկատմամբ ճառագայթման տիրույթի տարբեր դիրքեր, և երբ ճառագայթումը առաջանում է մեկ կամ երկու տիրույթներից: Ենթադրվել է, որ շիրտում արագացած էլետրոնները բաշխված են՝ $N(E) \sim E e^{-\alpha} \text{Exp}(-E_e/E_{cut})$ օրենքով, որը ձևավորվում է հարվածային ալիքներով արագացման դեպքում:

Ճառագայթման հանգիստ վիճակում գրանցված էՄԲ-ը բացատրելու համար ենթադրվում է, որ ճառագայթման տիրույթը գտնվում է ԼԳՏ-ի ներսում, և ճառագայթումը ռենտգենյան և γ -տիրույթում պայմանավորված է սինքրոտրոնային ֆոտոնների և ԼԳՏ-ից անդրադարձած ֆոտոնների շփոթումով: Էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխվածության համար գնահատվել է, որ $\alpha = 2.51 \pm 0.11$ և $E_{cut} = 0.67 \pm 0.1$ ԳԷՎ: Եթե նշված երկու տիրույթներում ճառագայթումը բացատրվի միայն ԼԳՏ-ից անդրադարձած ֆոտոնների շփոթումով, ապա ռենտգենյան տիրույթում հոսքը բացատրելու համար անհրաժեշտ է, որ էլեկտրոնների նվազագույն էներգիան լինի $\gamma_{min} = 1$ կարգի: Մակայն այդ էլեկտրոնների սինքրոտրոնային ճառագայթումը կգերազանցի գրանցված հոսքը ռադիո տիրույթում, ինչը թույլ է տալիս բացառել այդ հնարավորությունը:

P2 բռնկման ժամանակ գրանցված էՄԲ-ը մոդելավորվել է ենթադրելով, որ ճառագայթման տիրույթը գտնվում է ԼԳՏ-ի ներսում կամ դրսում: Երբ այն գտնվում է ԼԳՏ-ի ներսում և էՄԲ-ը բացատրվում է սինքրոտրոնային և ԼԳՏ-ից անդրադարձած ֆոտոնների շփոթումով, ապա ռենտգենյան սպեկտրը $\Gamma = 1.23 \pm 0.05$ ցուցիչով հնարավոր է բացատրել, երբ ճառագայթման տիրույթում մագնիսական դաշտը $B = 6.10 \pm 0.50$ Գս կարգի է և ճառագայթող էլեկտրոնները նկարագրվում են $\alpha = 2.79 \pm 0.44$, $E_c = 1.32 \pm 0.43$ ԳԷՎ և $E_{min} = 227.25 \pm 26.43$ ՄԷՎ

պարամետրերով: Երբ ճառագայթումը առաջանում է միայն L_{QS} -ից անդրադարձած ֆոտոնների Z_{CS} -ով, ապա ճառագայթման սպեկտրը շեղվում է $\sim \gamma^2 \epsilon_{\text{BLR}} \approx 0.52$ կեՎ-ից ցածր տիրույթ, ինչը թույլ չի տալիս բացատրել ռենտգենյան տիրույթում գրանցված տվյալները: Քանի որ տորուսից ճառագայթած ֆոտոնների էներգիան ավելի փոքր է, ապա նրանց հակադարձ Կոմպտոնյան ցրումը կարող է բացատրել ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում գրանցված տվյալները (նկար 6): Մոդելավորման արդյունքում գնահատված արժեքները ներկայացված են աղյուսակ 3-ում: Սա ցույց է տալիս, որ բռնկման ժամանակ ճառագայթման տիրույթը կարող է լինել նաև L_{QS} -ից դուրս:

P1 և *P5* բռնկումների ժամանակ գրանցվել է ԲԷ բաղադրիչի աճ, իսկ ճառագայթման հոսքը մնացած տիրույթներում գրեթե անփոփոխ է, չնայած $\langle\langle P5 \rangle\rangle$ բռնկման ժամանակ ռենտգենյան տիրույթում գրանցվել է փոքր աճ: Այսպիսի փոփոխությունը ցույց է տալիս, որ ճառագայթումն առաջանում է երկու տարբեր տիրույթներից: Քանի որ ռադիո-օպտիկական-ռենտգենյան տիրույթներում ճառագայթումը անփոփոխ է, ամենայն հավանականությամբ այն առաջանում է տարածական տիրույթից, որը գտնվում է L_{QS} -ի ներսում, իսկ արագ փոփոխական ճառագայթումը ԲԷ γ -տիրույթում առաջանում է 4.2×10^{15} սմ չափերով (սահմանափակված հոսքի 4.08 ժամյա փոփոխականությամբ) տիրույթից, որը գտնվում է L_{QS} -ից դուրս: Մոդելավորման ժամանակ, տարածական տիրույթում էլեկտրոնների ազատ պարամետրերը նույնն են ինչ հանգստի վիճակում մոդելավորման արդյունքում ստացված արժեքները, և միայն փոփոխվում են մագնիսական դաշտը՝ B -ն և էլեկտրոնների ընդհանուր քանակը՝ N_0 -ն, իսկ մյուս ճառագայթման տիրույթի բոլոր պարամետրերը ազատ են, միայն նրանց սինքրոտրոնային ճառագայթման հոսքը չպետք է գերազանցի ռադիո տիրույթում գրանցված հոսքը:

Մոդելավորման արդյունքում մեծ չափերով ճառագայթման տիրույթում մագնիսական դաշտը գնահատվել է որպես $B = 5.05 \pm 0.08$ Գս և $B = 3.43 \pm 0.05$ Գս՝ *P1* և *P5* բռնկումների ժամանակ, ինչը ավելի փոքր է քան հանգստի վիճակում, ինչը նշանակում է, որ ռենտգենյան տիրույթում հոսքի փոքր փոփոխությունը պայմանավորված է էլեկտրոնների ընդհանուր քանակի փոփոխությամբ: Գրանցված ԲԷ ճառագայթումը կարելի է բացատրել, երբ նոր արագացված էներգետիկ էլեկտրոնները (նրանց բաշխվածությունը նկարագրվում է < 2.1 օրենքով) փոխազդում են տորուսի ֆոտոնների հետ: Այդ էլեկտրոնները կարող են առաջանալ այն դեպքում, երբ ճառագայթման տիրույթ են թափանցում նոր արագացված էլեկտրոններ կամ շիթում գոյություն ունեցող էլեկտրոնները նորից են արագանում: Սկզբունքորեն, ռենտգենյան և ԲԷ տիրույթում ճառագայթումը կարելի է բացատրել նաև L_{QS} -ից դուրս գտնվող մեկ տիրույթում էլեկտրոնների տորուսից ճառագայթած ֆոտոնների Z_{CS} -ով: Այս դեպքում բռնկումը պայմանավորված է տիրույթում 10 ԳեՎ-

ից մեծ էներգիաներով էլեկտրոնների ներթափանցմամբ, որոնց էներգիայի կորուստը քիչ ազդեցություն է տալիս ռենտգենյան տիրույթում: Ստացված արդյունքները ցույց են տվել, որ CTA 102 աղբյուրի հանգստի վիճակում ճառագայթումը բացատրելու համար անհրաժեշտ է, որ շիթի լուսատվությունը կազմի $L_{jet} \approx 2 \times 10^{46}$ էրգ վրկ⁻¹, իսկ բռնկումների ժամանակ՝ $L_{jet} \approx 3 \times 10^{47}$ էրգ վրկ⁻¹:

ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

- Պատրաստված ծրագրային փաթեթը ներառում է բլազարների շիթերում էլեկտրոնների փոխազդեցության բոլոր հնարավոր մեխանիզմները, իսկ ազատ պարամետրերը գնահատվում են MCMC մեթոդով, ինչը թույլ է տալիս մոդելավորման միջոցով հասկանալ շիթերում տեղի ունեցող պրոցեսները:

- PKS 1510-089, PKS 1222+216 և 3C 279 աղբյուրների հանգստի և բռնկման ժամանակ գրանցված ճառագայթման էՄԲ-երի մոդելավորումը ցույց է տվել, որ բռնկման ժամանակ ճառագայթման տիրույթը գտնվում է ԼՊՏ-ից դուրս, իսկ ԲԷ ճառագայթումը առաջանում է տորուսից ճառագայթած ֆոտոնների ՀԿՑ-ից:

- Ցույց է տրվել, որ PKS 1441+25 աղբյուրի γ -ճառագայթման հոսքը 2015թ. հունվարի 24-ին աճել է մինչև $(2.22 \pm 0.38) \times 10^{-6}$ ֆոտոն սմ⁻²վրկ⁻¹, իսկ ապրիլին այդ ճառագայթման սպեկտրի ֆոտոնային ցուցիչը կոշտացել է մինչև $\Gamma = 1.54 \pm 0.16$ արժեքը, ինչպես նաև գրանցվել է դիֆերենցիալ սպեկտրի շեղում աստիճանային օրենքից:

- Մոդելավորմամբ ցույց է տրվել, որ PKS 1441+25 աղբյուրի ճառագայթումը ԲԷ և ԳԲԷ γ -տիրույթներում բացատրվում է տորուսի ֆոտոնների ՀԿՑ-ով, իսկ ապրիլին գրանցված էՄԲ-ը մոդելավորելու համար արագացված էլեկտրոնների էներգետիկ բաշխումը նկարագրվում է փոքր ցուցիչով՝ $\alpha_1 = 1.98 \pm 0.03$:

- Ցույց է տրվել, որ CTA 102 աղբյուրի 2016-2018թթ. բռնկումների ժամանակ γ -տիրույթում ճառագայթման լուսատվությունը աճել է մինչև 3.25×10^{50} էրգ վրկ⁻¹, ինչը բլազարներից մինչ այժմ գրանցված ամենամեծ լուսատվությունների կարգի է: Նաև ցույց է տրվել, որ ռենտգենյան և ԲԷ γ -տիրույթներում հոսքի աճին զուգահեռ ֆոտոնային ցուցիչը նվազում է:

- Ցույց է տրվել, որ CTA 102 աղբյուրի γ -տիրույթում ճառագայթումը պայմանավորված է ԼՊՏ-ից դուրս, տորուսի ֆոտոնների ՀԿՑ-ով: Այս դեպքում γ -տիրույթում հոսքի արագ փոփոխականությունը պայմանավորված է > 10 ԳԷՎ էներգիաներով էլեկտրոնների էներգիայի արագ կորստով:

Ատենախոսության ստացված արդյունքների հիման վրա հրատարակված հոդվածների ցանկը

1. S. Gasparyan, “Modeling The Multiwavelength Spectra of Blazars”, Armenian Journal of Physics, 2019, ISSN 1829-1171 (<http://ajp.asj-oa.am/1038/>).
2. S. Gasparyan, N. Sahakyan, V. Baghmanyanyan, D. Zargaryan, “On the multi-wavelength Emission from CTA 102”, The Astrophysical Journal, 2018, DOI: 10.3847/1538-4357/aad234.
3. S. Gasparyan, N. Sahakyan and P. Chardonnet, “On the origin of HE and VHE gamma-ray flares from FSRQs”, International Journal of Modern Physics D, 2018, DOI: 10.1142/S0218271818440078.
4. N. Sahakyan and S. Gasparyan, “High Energy Gamma-Ray Emission From PKS 1441+25”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, DOI: 10.1093/mnras/stx1402.
5. N. Sahakyan and S. Gasparyan, “High Energy Gamma-Ray Emission From PKS 1441+25”, AIP Conference Proceedings. 2017, DOI: 10.1063/1.4968951 (<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4968951>).

Օգտագործված գրականության ցանկ

1. *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei*. **Urry C. M., & Padovani P.** Vol. 107, p. 803: Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995.
2. *Ensemble samplers with affine invariance*. **Goodman J. & Weare J.** Vol. 5, No. 1, p. 65-80: Communications in Applied Mathematics and Computational Science, 2010.
3. *Discovery of Very High Energy Gamma-Ray Emission from the distant FSRQ PKS 1441+25 with the MAGIC telescopes*. **Mirzoyan R.** 7416: The Astronomer’s Telegram, 2015.
4. *Very-high-energy gamma-ray emission from PKS 1441+25 detected with VERITAS*. **Mukherjee R.** 7433: The Astronomer’s Telegram, 2015.
5. *The power of blazar jets*. **Celotti A., Ghisellini G.** Vol. 385, Issue 1, p. 283-300: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008.
6. **Ghisellini G.** *Radiative Processes in High Energy Astrophysics*. Berlin : Springer-Verlag, 2013. Vol. 873.

Summary

In the thesis, the particle acceleration and emission processes in the jets of blazars are investigated. Blazars are a sub-class of active galactic nuclei with an extremely bright (highly luminous), rapidly variable and highly polarized emission and apparent superluminal motions detected within a jet's region of a few parsecs, which can be explained if assumed that the blazar jets are pointed almost exactly towards the Earth. Blazars are known to emit electromagnetic radiation in almost all frequencies that are currently being observed, ranging from radio to HE ($> 100 \text{ MeV}$) and Very High Energy ($> 100 \text{ GeV}$) γ -ray bands. The modeling of the observed multiwavelength emission of blazar jets allows to estimate or put constraints on such important physical parameters of the jets as their composition, power, strength of magnetic field, electron energy distribution, etc., which are crucial for understanding of their physics.

In the **Introduction** is given a brief description of the importance and relevance of the thesis, as well as of the goals and objectives and its content.

In **Chapter 1** the key features of AGNs and their blazar sub-class observed in different wavelengths are presented. The relativistic transformations of relevant quantities (e.g., flux, luminosity, time, energy etc.) from the proper to the observer frame are discussed.

In **Chapter 2** the synchrotron radiation and the inverse Compton scattering of jet accelerated electrons are described. The synchrotron emission spectra of one electron and electron population as well as their energy loss rates are presented and discussed. The inverse Compton scattering spectra and energy loss rates are discussed in both Thomson and Klein Nishina regimes. The inverse Compton scattering of various photon fields, such as synchrotron photons (SSC), photons reflected from broad line region and IR photons emitted from torus are discussed in details.

In **Chapter 3** the methods for modeling the blazar multiwavelength spectral energy distributions (SEDs) are discussed. Various statistical methods for fitting the SEDs (such as Bayesian method) and optimization of the model free parameters (e.g., χ^2 , log-likelihood, etc.) are presented. The affine-invariant method of MCMC sampling is described in details. These methods are used to develop a numerical code that allows to model blazar multiwavelength SEDs and find the parameter space with their uncertainties that statistically better describes the observed data. The application of the code is demonstrated by fitting the multiwavelength SEDs of PKS 0537-441 and Mkn 501 blazars. In sub-chapters **4.4-4.7**, the prepared code is used to model the SEDs of PKS 1510-089, PKS 1222+216 and 3C 279 FSRQs observed in the VHE γ -ray bands. By modeling their multiwavelength SEDs in their quiescent and flaring states, there are estimated the parameters of emitting electrons, the magnetic field in the emitting regions and the jet luminosity, which are crucial for the understanding of the origin of flares. It is shown that the flares can be

interpreted by the change of the location of the emitting region. Namely, during the flares the data are best described by assuming the emitting region is outside the BLR and the HE components are formed by IC scattering of dusty torus photons.

In **Chapter 4** a discussion is presented on the origin of the multiwavelength emission from the PKS 1441+25 blazar ($z = 0.939$), based on the analysis of the γ -ray data accumulated by the Fermi Large Area Telescope during January – December, 2015. A γ -ray flare was observed in January 24, when the flux increased up to $(2.22 \pm 0.38) \times 10^{-6} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ with the flux-doubling time-scale being as short as $\sim 1.44 \text{ d}$. The spectral analysis shows that from April 13 to April 28, 2015, the MeV-to-GeV photon index has hardened and changes in the range of $\Gamma = (1.73 - 17.9)$ for most of the time. The hardest photon index of $\Gamma = 1.54 \pm 0.16$ has been observed on MJD 57 131.46 with 11.8σ which is not common for FSRQs. For the same period the γ -ray spectrum shows a possible deviation from a simple power-law shape, indicating a spectral cutoff at $E_{cut} = 17.7 \pm 8.9 \text{ GeV}$. The SEDs during quiescent and flaring states are modelled using one-zone leptonic models that include the synchrotron, SSC and external inverse Compton processes; the model parameters are estimated using the MCMC method. The emission in the flaring states can be modelled assuming that either the bulk Lorentz factor or the magnetic field has increased. The modelling shows that there is a hint of hardening of the low-energy index (~ 1.98) of the underlying non-thermal distribution of electrons responsible for the emission in 2015 April. Such hardening agrees with the γ -ray data, which pointed out a significant γ -ray photon index hardening on 2015 April 13 to 28.

In **Chapter 5** the origin of broadband emission of CTA 102 ($z = 1.037$) during the active states in 2016-2017 is discussed. In the γ -ray band, *Fermi* LAT observed several prominent flares that followed a harder-when-brighter behavior. The peak γ -ray flux above 100 MeV, $(3.55 \pm 0.55) \times 10^{-5} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ was observed on MJD 57,738.47 within 4.31 minutes, corresponds to an isotropic γ -ray luminosity of $L_\gamma = 3.25 \times 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$, comparable to the highest values observed from blazars so far. The analyses of the Swift UVOT/XRT data show an increase in the UV/optical and X-ray bands that is contemporaneous with the bright γ -ray periods. The X-ray spectrum observed by Swift XRT and NuSTAR during the γ -ray flaring period is characterized by a hard photon index of ~ 1.30 . The shortest e-folding time was $4.08 \pm 1.44 \text{ hr}$, suggesting a very compact emission region $R \leq \delta \times 2.16 \times 10^{14} \text{ cm}$. The SEDs of CTA 102 in several periods (having different properties in UV/optical, X-ray, and γ -ray bands) is modeled assuming a compact blob inside and outside the BLR. It is found that the HE data are better described when the infrared thermal radiation of the dusty torus is considered. In the flaring periods when the correlation between the γ -ray and UV/optical/X-ray bands is lacking, the γ -ray emission can be produced from the interaction of fresh electrons in a different blob, which does not make a dominant contribution at lower energies.

Резюме

В диссертации исследованы процессы ускорения и излучения частиц в струях блазаров. Блазары - это подкласс активных галактических ядер (АГЯ), характеризующихся чрезвычайно ярким (высокая светимость), быстро меняющимся и сильно поляризованным излучением, что можно объяснить, если предположить, что их струя направлена на наблюдателя. Известно, что блазары излучают электромагнитное излучение от радиоволн до γ -высоких энергий (ВЭ; > 100 МэВ) и сверхвысоких энергий (СВЭ; > 100 ГэВ). Моделирование этих данных позволяет оценить или наложить ограничение на такие важные физические параметры струй, как их состав, мощность, напряженность магнитного поля, распределение энергии электронов и т.д., которые важны для понимания происходящих там физических процессов.

Во **Введении** подчеркнуты важность и актуальность, а также представлены цели, задачи и краткое содержание диссертации.

В **Главе 1** представлены особенности АГЯ и их подкласса блазаров, наблюдаемых в различных длинах волн. Обсуждено релятивистское преобразование во время перехода от собственной системы в систему наблюдателя.

В **Главе 2** представлены синхротронное излучение и обратное комптоновское (ОК) рассеяние ускоренных в струе электронов. Рассматривались спектры синхротронного излучения и ОК рассеяния одного электрона и электронного распределения. Подробно рассматривается ОК рассеяние различных фотонных полей, таких как синхротронные фотоны (SSC), фотоны, отраженные от широкой линейной области (ШЛО), и ИК-фотоны, излучаемые тором.

В **Главе 3** обсуждаются методы моделирования многоволновых спектральных распределений энергии (СПЭ) блазаров. Представлены различные статистические методы моделирования СПЭ (такие, как метод Байеса) и методы оптимизации свободных параметров модели (например, χ^2 , log-likelihood и т.д.). Подробно описан affine-invariant алгоритм метода Монте-Карло для Марковских цепей (МКМЦ). Эти методы использовались для разработки числового кода, который позволяет моделировать многоволновые СПЭ блазаров и находить пространство параметров с их неопределенностями, которые статистически лучше описывают наблюдаемые данные. Применение кода продемонстрировано путем моделирования СПЭ блазаров PKS 0537-441 и MKN 501. В подразделах **4.4-4.7**, подготовленный код используется для моделирования СПЭ блазаров PKS 1510-089, PKS 1222 + 216 и 3C 279, которые являются квазарами с плоским спектром (КПС) и были зарегистрированы в СВЭ γ -диапазоне. Путем моделирования многоволновых СПЭ этих источников в состоянии покоя и вспышки оценивались параметры излучающих электронов магнитного поля в

излучающих областях и светимости струи, которые имеют решающее значение для понимания происхождения вспышек. Показано, что происхождение вспышки можно объяснить путем изменения местоположения излучающей области. А именно, во время вспышек данные лучше всего описываются, если предположить, что излучающая область находится вне ШЛО и ВЭ компонент образуется благодаря ОК рассеяния фотонов пыльного тора.

В **Главе 4** обсуждается происхождение многоволнового излучения блазара PKS 1441+25, анализируя данные, накопленные телескопом *Fermi* LAT за январь–декабрь 2015 года. Вспышка γ -излучения наблюдалась 24 января, когда поток увеличился до $(2.22 \pm 0.38) \times 10^{-6}$ фотон cm^{-2} сек $^{-1}$, а время удвоения потока составляло ~ 1.44 дня. Спектральный анализ показывает, что с 13 до 28 апреля 2015 года фотонный индекс в МэВ–ГэВ диапазоне уменьшался, и самый маленький индекс $\Gamma = 1.54 \pm 0.16$ наблюдался на MJD 57 131.46, что не характерно для КПС блазаров. За этот же период спектр γ -излучения показывает возможное отклонение от простой степенной формы, указывая на спектральный срез при $E_{cut} = 17.7 \pm 8.9$ ГэВ. СРЭ в спокойном и активном состоянии, моделированом в рамках однозонных лептонных моделей. Показано, что излучение во время вспышек можно моделировать, если предположить, что либо увеличился Лоренц-фактор, либо выросло магнитное поле. Моделирование показывает, что есть тенденция на ужесточение низкоэнергетического индекса (~ 1.98) электронов, ответственных за излучение в апреле 2015 года.

В **Главе 5** обсуждается происхождение широкополосного излучения от СТА 102, когда он находился в активном состоянии в 2016–2017 гг. В диапазоне *Fermi* LAT зафиксированы несколько заметных вспышек: например, MJD 57,738.47 в течение 4.31 минут, поток γ -излучения с энергией выше 100 МэВ был $(3.55 \pm 0.55) \times 10^{-5}$ фотон cm^{-2} сек $^{-1}$, который соответствует изотропной γ -лучевой светимости $L_\gamma = 3.25 \times 10^{50}$ эрг сек $^{-1}$, сравнимой с самыми высокими значениями, наблюдаемыми от блазаров до сих пор. Анализ данных Swift UVOT/XRT показывает увеличение потока в ультрафиолетовом/оптическом и рентгеновском диапазонах во время ярких γ -излучений. Рентгеновский спектр, полученный с помощью телескопов Swift XRT и NuSTAR во время вспышек, характеризуется жестким фотонным индексом (~ 1.30). СРЭ СТА 102 были моделированы в разные периоды, предполагая присутствие компактной излучающей области как внутри, так и вне ШЛО. Показано, что данные лучше описываются, когда для ОК рассеяния рассматриваются инфракрасные фотоны пыльного тора. Во время вспышек, когда корреляция между γ -излучением и ультрафиолетовым/оптическим/рентгеновским диапазонами отсутствует, γ -излучение может возникнуть вследствие взаимодействия свежих электронов в другой компактной области, излучение которого не вносит вклад при низких энергиях.