

---

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ “СВ. КЛ. ОХРИДСКИ”  
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ  
КАТЕДРА “АСТРОНОМИЯ”

---

***Променливост на различни типове  
активни галактични ядра***

АВТОРЕФЕРАТ

на

**Милен Станимиров Минев**

за присъждане на образователна и научна степен “доктор”

Научна специалност

4.1 Физически науки (Астрономия и астрофизика)

Научен ръководител: доц. д-р Е. П. Овчаров

София 2021г.

---

# Съдържание

1. Въведение	1
2. Активни галактични ядра	3
3. Фотометрични наблюдения на околополюсни квазари	4
3.1. Избрани обекти	4
3.2. Наблюдения и обработка	4
3.3 Резултати	8
4. Квазарът QSO B1312+7837 (QSO 09)	13
4.1. Наблюдения и определяне на период	14
4.2. Оптимизиране на параметрите и избор на модел	17
4.3. Стохастична променливост и Damped Random Walk модел	18
4.4. Модел за двойни свръхмасивни черни дупки	19
5. Наблюдения на блазари	20
5.1 СТА 102	20
5.2 4C 71.07	26
5.3 3C 279	32
5.4 BL Lac	37
5.5 B2 1420+32	43
6. Приноси на автора	51
Благодарности	53
Литература	54

# 1. Въведение

В дисертационен труд са разгледани 16 отдалечени АГЯ (11 квазара и 5 блазара). Основните цели, които сме си поставили, са следните:

1. Дългогодишен мониторинг на блясъка на 11 отдалечени ( $z > 1$ ) околополюсни квазара:
  - Получаване на качествен наблюдателен материал с инструментариума на Националната астрономическа обсерватория (НАО) Рожен (50/70см Шмид телескоп и 2м RCC (Ritchey Chretien Coude) телескоп) и Студентска астрономическа обсерватория (САО) Плана.
  - Обработка на получените наблюдения – първоначална обработка, радиална корекция, диференциална фотометрия.
  - Прехвърляне на стандарти за сравнение от полета на Stetson и подбиране на най-подходящите от тях.
  - Стандартна фотометрия и съставяне на идентификационни карти със стандарти.
  - Изследване на променливостта – криви на блясъка и структурни функции.
  - Определяне на физически параметри.
2. Участие в международни кампании (например Whole Earth Blazar Telescope) за многовъннов мониторинг на блазари:
  - Наблюдения на блазари в оптичната област с телескопите на НАО Рожен.
  - Обработка на получените наблюдения и изпращане на фотометричните резултати на организаторите на съответната кампания.

Дисертационната работа се базира предимно на наблюдения в оптичния диапазон с инструментариума от Националната астрономическа обсерватория (НАО) Рожен.

В Глава 2 е направен кратък исторически обзор на изследването на АГЯ и развитието на тази област. Въвеждат се основните типове АГЯ и класификацията им според

техните параметри. Обръща се внимание на основните характеристики на този тип обекти – електромагнитно излъчване, области на формиране на тесни и широки емисионни линии, модел за обединение.

В Глава 3 е представена същността на настоящия труд. Описани са фотометричните наблюдения на 11-те избрани околополюсни квазара и получените резултати. Главата започва с въвеждането на литературна информация за всеки един обект, след което са представени методите на наблюдения и обработка на оригиналните данни. За получаването на стандартни звездни величини е извършена процедура по прехвърляне на стандарти в полето, която е подробно описана. Главата завършва с резултати от оригиналните наблюдения – криви на блясъка, структурни функции и определянето на някои физични параметри.

В Глава 4 са представени резултати за квазара QSO B1312+7837 (QSO 09), който показва нестандартна оптична променливост. В кривата на блясъка се забелязва периодична променливост с период приблизително 6 години и амплитуда от 0.2 звездни величини (в R филтър). В главата са разгледани различни модели за анализиране и оптимизиране на данните и възможността тази периодична променливост да се дължи на наличието на две свръхмасивни черни дупки в ядрото.

В Глава 5 са представени подробно пет блазара, за които са проведени наблюдения от НАО Рожен в подкрепа на многовълнови изследвания към международни проекти.

## 2. Активни галактични ядра

Активните галактични ядра (АГЯ) представляват едни от най-екзотичните обекти във Вселената. В централните области на активните галактики има свръхмасивна черна дупка, върху която акретира вещество. Процесите, които протичат, са толкова високоенергетични, че няма други обекти или явления, които да се съпоставят с такова излъчване. Излъчената енергия покрива целия електромагнитен диапазон, а в скорошни изследвания бе установено, че от АГЯ се излъчват също гравитационни вълни и неутрино.

В централните области на активните галактики има свръхмасивна черна дупка, върху която акретира вещество. Двата най-големи подтипа АГЯ са Сийфъртовите галактики и квазарите. Основната разлика между тях е количеството енергия, излъчено от компактният източник в ядрото. Например, за стандартна Сийфъртова галактика, излъчването от ядрото е еквивалентно на светимост  $\sim 10^{11} L_{\odot}$ , а при типичен квазар е 100 – 1000 пъти повече.

Изучаването на АГЯ е способ, чрез който може да се изследва развитието и еволюцията не само на самите галактики, а и на Вселената като цяло. Именно поради високата им светимост, те са най-далечните обекти в наблюдаемата Вселена. Определянето на физическите параметри на този тип обекти допълва и разширява познанията ни в области като релативистката физика, астрофизиката на високите енергии, космологията и много други.

# 3. Фотометрични наблюдения на околополюсни квазари

## 3.1. Избрани обекти

Настоящата работа представя дългопериодични изследвания (основно в оптичния диапазон) на различни типове АГЯ, разположени на голямо червено отместване ( $z > 1$ ). Направени са фотометрични наблюдения в оптичната област с телескопите от НАО (Национална Астрономическа Обсерватория) Рожен. Избраните обекти се намират на  $\delta > 70^\circ$ , което ги прави подходящи за наблюдение през цялата година от нашите географски ширини. Тези АГЯ са слабо изследвани досега и общата информация за тях е систематизирана в таблица 1. В допълнение на дългопериодичния мониторинг на околополюсните квазари, по-подробно са изучени и два други квазара – Q 2203+292 (Ovcharov et al., 2008) и SDSS J07548.86+303355.1 (Valcheva et al., 2009).

## 3.2. Наблюдения и обработка

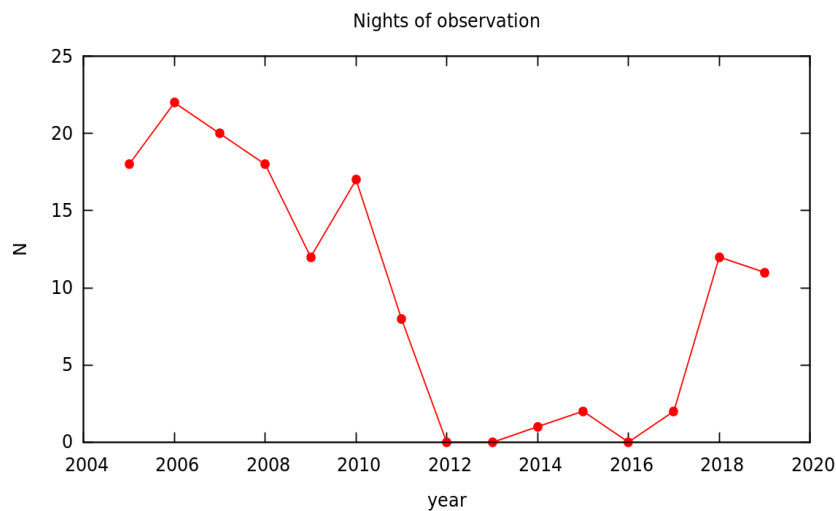
В настоящата работа са представени 15-годишни изследвания на околополюсни квазари. Фотометричните наблюдения са направени с 2m RCC и 50/70 cm Шмид телескоп към НАО Рожен. С 6 m телескоп към САО РАН са получени спектрални изображения за два квазара. За периода на наблюденията са използвани общо 8 CCD камери снабдени със

Таблица 1 Наблюдавани околополюсни квазари.

ID	SIMBAD ID	Type	z	magV	RA	DEC
QSO 03	QSO B0014+812	FSRQ	3.4	16.5	00:17:08.5	+81:35:08.1
QSO 04	QSO B0153+744	LPQ/RLQ	2.3	16.5	01:57:35.0	+74:42:43.2
QSO 05	8C 0546+726	QSO	1.6	18.0	05:52:53.0	+72:40:45.1
QSO 06	4C 71.07	QSO/FSRQ	2.2	16.5	08:41:24.4	+70:53:42.2
QSO 07	QSO B0933+733	RQQ	2.5	17.3	09:37:48.9	+73:01:58.1
QSO 08	QSO B1039+811	LPQ/FSRQ	1.3	16.5	10:44:23.1	+80:54:39.4
QSO 09	QSO B1312+7837	QSO	2.0	16.4	13:13:21.3	+78:21:53.8
QSO 10	QSO B1634+706	RQQ/HyLIRG	1.4	14.7	16:34:29.0	+70:31:32.4
QSO 11	QSO B1759+756	QSO	3.0	16.5	17:57:46.4	+75:39:16.2
QSO 12	HS 1803+7517	QSO	1.1	16.4	18:01:28.4	+75:18:07.7
QSO 13	QSO B1946+770	RQQ	3.1	15.8	19:44:54.9	+77:05:52.7

Таблица 2 Наблюдателна техника.

Observatory	Telescope	D [cm]	F [cm]	Camera	Pixel size [ $\mu m$ ]	Chip size [px]	FoV [']	Scale [" px <sup>-1</sup> ]
HAO Рожен	Schmidt	50/70	172	SBIG ST-8	9	1534×1020	27.6×18.4	1.08
HAO Рожен	Schmidt	50/70	172	SBIG STL-11000M	9	4008×2672	72.1×48.1	1.08
HAO Рожен	Schmidt	50/70	172	FLI PL-16803	9	4096×4096	73.7×73.7	1.08
HAO Рожен	2m RCC	200	560	VersArray 512 B	24	512×512	7.5×7.5	0.88
HAO Рожен	2m RCC	200	560	Photometrics CE200A	24	1024×1024	15.0×15.0	0.88
HAO Рожен	2m RCC	200	1600	VersArray 1300 B	20	1340×1300	5.8×5.6	0.26
HAO Рожен	2m RCC	200	560	VersArray 1300 B	20	1340×1300	16.5×16.0	0.74
HAO Рожен	2m RCC	200	1600	Andor iKon-L	13.5	2048×2048	5.8×5.8	0.17
HAO Рожен	2m RCC	200	560	Andor iKon-L	13.5	2048×2048	17.1×17.1	0.50
CAO РАН	6m BTA	600	2400	SCORPIO (EEV 42-40)	13.5	2048×2048		



Фигура 1 Разпределение на наблюдателните нощи за периода от 2005 г. до средата на 2019 г.

стандартни UBVRI фотометрични филтри от системата Johnson-Cousins. Използваната апаратура е систематизирана в таблица 2. Направените експозиции са в диапазона от 90 сек. за 2 m телескоп до 300 сек. за Шмид телескопа с типичен сийнг около 2-3 arcsec. Разпределението на наблюдателните нощи през годините е представено на фигура 1.

Първоначалната обработка на изображенията е извършена с IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). От суровите кадри са извадени шумът на изчитане и токът на тъмно, разделени са на плоски полета от съответния филтър. Поради големия брой наблюдателен материал (над 3000 изображения), с цел улесняване на фотометричната процедура, кадрите са наместени и сортирани по обект, година, оптична система и детектор.

Избраните квазари се намират на голямо разстояние от нас и техните галактики-домакини не могат да бъдат детектирани. Поради това, може да бъде направена апертурна фотометрия, тъй като PSF (point spread function) профилът на квазара не се различава от PSF профила на звездите в полето. Измерени са FWHM и стандартните флукутации на фона за всяко едно изображение и е извършена фотометрия с APPHOT пакетите на IRAF. Цялостната процедура по обработката е подпомогната от над 200 скрипта, написани на *Fortran*, *Linux Shell*, *C++* и *IRAF Scripts* конкретно за наблюденията на тези обекти с

телескопите на НАО Рожен.

Допълнителна корекция е приложена при изображенията, които са получени в прекия фокус (без фокален редуктор) на 2 m телескоп. Установено е наличието на пространствена радиална зависимост – намаляване на сигнала към краищата на кадъра (Markov, 2005). За период от 5 години Markov изследва задълбочено проблема и предлага метод за коригиране на наблюдаваните инструментални звездни величини. Той установява следната зависимост:

$$R = c_\rho \rho^2 + R_{inst}, \quad (1)$$

където  $c_\rho$  е характерен коефициент за всяка камера, а  $\rho^2$  е параметър, изразяващ разстоянието от центъра на детектора,  $x$  и  $y$  са пикселните координати на обекта, а  $x_c$  и  $y_c$  – координатите на центъра на изображението.

При направени тестове със стандарти на Stetson (2000) в кълбовидните звездни купове NGC 2420 и NGC 7790, за камерата VersArray 1300B е установено, че  $c_\rho = 0.17$  (Ovcharov et al., 2008). Зависимостта е проверена с допълнителни наблюдения на полета със стандарти на Stetson през последните години и не се забелязва промяна в коефициента  $c_\rho$ .

За да се определи светлинният поток от наблюдаваните квазари, те трябва да се сравнят с непроменливи обекти с известни стандартни звездни величини. Подобно на квазарите, които до този момент не са били добре изследвани, звездите около тях също не са сред често наблюдаваните обекти и в каталозите липсва информация за техните стандартни звездни величини във фотометричната система Johnson-Cousins.

Това наложи прехвърлянето на стандарти от полета, в които са добре изследвани (стандарти на Stetson). За целта е необходимо да се заснемат полета (обикновено звездни купове), съдържащи от няколкостотин до няколко хиляди звезди, с известни стандартни звездни величини в съответната фотометрична система. След това се определят параметрите за трансформиране от инструментална към стандартна звездна величина и се прилагат към набор от звезди, намиращи се в полето на изследвания обект. За да бъде коректно прехвърлянето на стандарти, е необходимо стандартните полета и изследваните обекти да са заснети в една и съща нощ, за да е сигурно, че фотометричните условия са максимално близки.

Заедно с 11-те околополюсни квазара, с Шмид телескопа са извършени наблюдения на звездните купове M92, NGC 7790, NGC 188 и Draco. Тяхната обработка се състои от следните стъпки:

1. Първоначална обработка и наместване на получените изображения със стандарти.
2. Фотометрия на всички обекти в полето.
3. Изключване на звездите, намиращи се в краищата на изображенията.



4. Изключване на звездите от стандартите на Stetson, които са твърде слаби или твърде ярки ( $12^m \leq m \leq 19^m$ ).
5. Астрометрични измервания по няколко звезди за всеки звезден куп и създаване на каталог с екваториални координати  $(\alpha, \delta)$  и инструментални звездни величини.
6. Идентифициране на общите звезди от двете полета – изображението от Шмид телескопа и полето със стандарти на Stetson.

След това се определя зависимостта на инструменталната звездна величина от въздушната маса, епохата и цвета на обекта

$m_{inst} = m_{inst}(m_{Stetson}, Airmass, UT, Color)$ . Това става чрез апроксимиране с уравнение от следния вид:

$$m_{inst} = m_{Stetson} + \eta_0 + \eta_1 Airmass + \eta_2 UT + \eta_3 Color, \quad (2)$$

където коефициентите  $\eta_i$  са характерни за наблюдателните условия и апаратура. Грешката се пресмята по следния начин:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{m_{Stetson}}^2 + \sigma_{\eta_0}^2 + \sigma_{\eta_1}^2 Airmass^2 + \sigma_{\eta_2}^2 UT^2 + \sigma_{\eta_3}^2 Color^2} \quad (3)$$

Поради големия брой звезди има вероятност част от тях да са променливи или да имат голяма фотометрична грешка. Тези звезди ясно се открояват от апроксимацията и се премахват, за да не внасят допълнителна грешка. От наблюденията на полета със стандарти на Stetson във VRI филтри се получават уравнения със следните коефициенти на трансформация:

$$\begin{aligned} V_{inst} &= V_{Stetson} + 2.085 + 0.203 Airmass + 0.001 UT + 0.638(V_{inst} - R_{inst}), \\ \sigma &= 0.016; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_{inst} &= R_{Stetson} + 2.344 + 0.114 Airmass + 0.001 UT + 0.309(R_{inst} - I_{inst}), \\ \sigma &= 0.015; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{inst} &= I_{Stetson} + 2.593 + 0.103 Airmass + 0.001 UT - 0.022(R_{inst} - I_{inst}), \\ \sigma &= 0.018. \end{aligned} \quad (6)$$

Получените трансформационни уравнения участват при преминаването от инстру-

ментални към стандартни звездни величини на набор от звезди в полетата на изследваните обекти. Подборът на звезди-стандарти около квазарите е направен на няколко етапа, използвайки изображенията получени през целия наблюдателен период:

- При всеки квазар е направена апертурна фотометрия на  $\sim 30$  звезди със сходен блясък и в близост до него ( $\lesssim 3 \text{ arcmin}$ ).
- Чрез диференциална фотометрия са избрани по-стабилните звезди във времето с  $\Delta m < 0.1^m$  ( $\sim 20$  звезди за всеки квазар).
- Установена е средно претеглената стойност и съответната ѝ грешка на избраните звезди. Най-стабилните по блясък ( $\sigma < 0.04^m$ ) са избрани за кандидат-стандарти ( $\sim 10 - 15$  за всеки квазар).

Апертурна фотометрия на така избраните кандидат-стандарти се прилага и върху кадрите от нощите, в които са наблюдавани заедно със стандартите на Stetson. Чрез процедурата *invertfit* в IRAF и трансформационните уравнения се пресмята стандартната звездна величина на звездите. Тези от тях, които пасват най-добре на апроксимацията ( $\sigma < 0.02$ ), са избрани за стандарти за сравнение. На фигура 2 са показани идентификационни карти, с обозначени използвани стандарти.

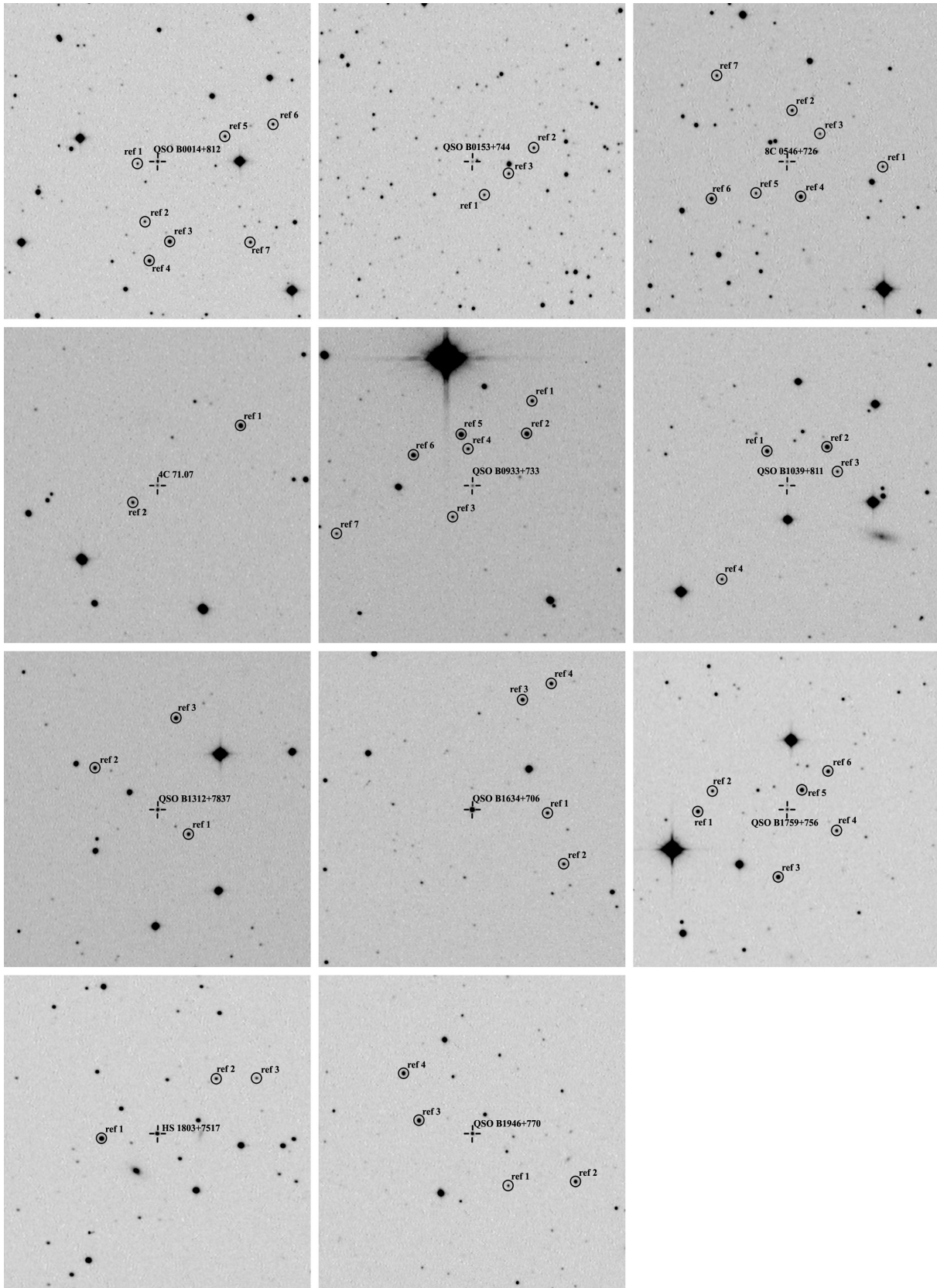
### 3.3. Резултати

В тази глава са представени резултати от фотометричните наблюдения на 11-те околополюсни квазара (част от резултатите са публикувани в научния журнал *Journal of Physics and Technology, Volume 4, page 20*, Minev et al., 2020). За всеки квазар са построени криви на блясъка във VRI филтри, диаграми цвят-звездна величина и структурна функция (например за QSO 03 – фиг. 3, останалите са представени в дисертационния труд).

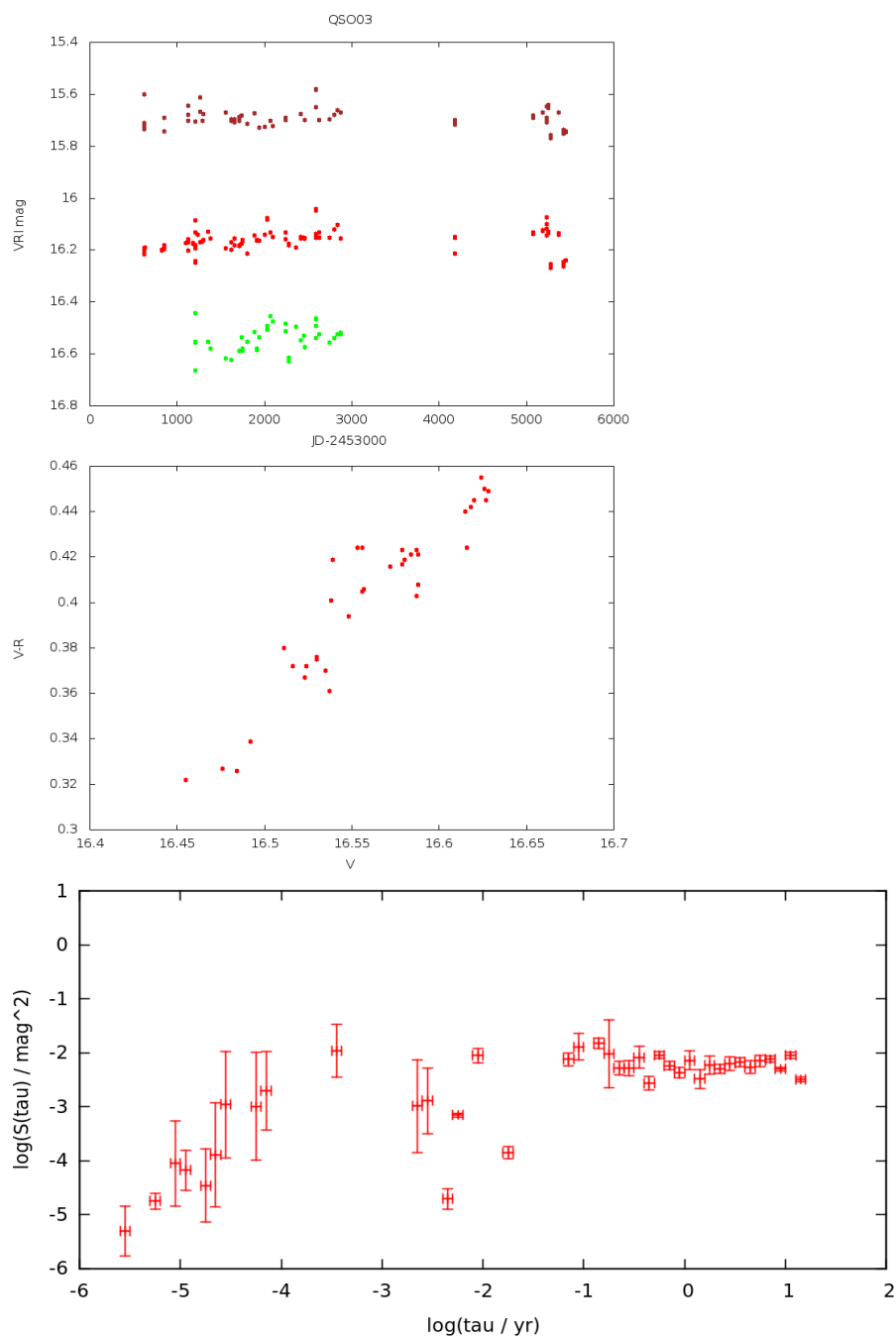
В допълнение са проведени Монте Карло симулации, за да се провери доколко измерените промени в блясъка на квазарите са реални. За всеки квазар са направени по един милион симулации с  $N_i$  брой измервания на константен източник с блясък  $M_i$ . Тук  $M_i$  е средната звездна величина на съответния квазар, а  $N_i$  броя на реалните фотометрични измервания. Симулираните точки са генерирани чрез Гаусово разпределение от наблюдателните грешки на съответното измерване. Резултатите от симулациите са представени в таблица 3.

Знаейки разстоянията до квазарите от литературата и от наблюдаваните визуални звездни величини, може да се определи тяхната абсолютна звездна величина. За R филтър, например, тя се пресмята чрез следното уравнение:

$$M_R = R - A_R - 5 \log d_L - 25 - K_R(z). \quad (7)$$



Фигура 2 Идентификационни карти на стандартите в полето на околополюсните квазари. Размерът на всяко поле е  $7' \times 7'$ , север е нагоре, изток наляво.



Фигура 3 QSO B0014+812 (QSO 03). В горния панел е представена крива на блясъка на квазара за периода 2005-2019 година. Звездните величини във VRI филтри са обозначени чрез съответните цветове – зелен, червен и кафяв. Средният панел изобразява диаграма цвят-звездна величина V-R(V). Долният панел представя структурна функция за филтър R.

Таблица 3 Резултати от Монте Карло симулации за променливостта на околополюсните квазари – установени са средните звездни величини, променливостта за VRI филтри ( $V_{mean}(\Delta V)$ ;  $R_{mean}(\Delta R)$ ;  $I_{mean}(\Delta I)$ ) и вероятността наблюдаваната променливост да е реална ( $P_V$ ;  $P_R$ ;  $P_I$ ).

QSO-ID	$V_{mean}(\Delta V)$	$P_V$	$R_{mean}(\Delta R)$	$P_R$	$I_{mean}(\Delta I)$	$P_I$
QSO 03	16.55 (0.05)	100 %	16.16 (0.06)	95.3 %	15.69 (0.05)	33.2 %
QSO 04	17.97 (0.22)	100 %	17.29 (0.29)	100 %	16.51 (0.29)	100 %
QSO 05	17.56 (0.07)	100 %	17.06 (0.07)	100 %	16.66 (0.06)	0 %
QSO 06	17.08 (0.11)	100 %	16.74 (0.11)	100 %	16.39 (0.11)	100 %
QSO 07	17.30 (0.17)	67.7 %	16.95 (0.35)	60.1 %	16.52 (0.20)	64.6 %
QSO 08	18.23 (0.13)	97.2 %	17.77 (0.13)	100 %	17.40 (0.25)	100 %
QSO 09	16.20 (0.07)	100 %	16.03 (0.08)	100 %	15.65 (0.07)	100 %
QSO 10	14.57 (0.08)	99.8 %	14.26 (0.34)	86.9 %	14.02 (0.08)	100 %
QSO 11	17.03 (0.05)	99.7 %	16.68 (0.07)	74.9 %	16.27 (0.04)	100 %
QSO 12	16.02 (0.03)	30.3 %	15.55 (0.04)	100 %	15.19 (0.04)	100 %
QSO 13	16.36 (0.07)	100 %	16.00 (0.07)	100 %	15.52 (0.05)	100 %

Тук  $A_R$  е Галактичната екстинкция,  $d_L$  е “фотометричното разстояние”, а  $K_R(z)$  е К-корекция.  $d_L$  се дефинира от Peacock (1999):

$$d_L[Mpc] = \frac{c}{H_0}(1+z) \int_0^z (\Omega_\Lambda + \Omega_M(1+z)^3)^{-1/2} dz, \quad (8)$$

като константата на Hubble е  $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  и при плоска Вселена космологичната константа е  $\Omega_\Lambda = 0.714$ , а  $\Omega_M = 0.286$  (Wright, 2006). К-корекцията се дефинира като сума от два компонента:

$$K(z) = K_1 + K_2 = 2.5 \log(1+z) + 2.5 \log \left[ \frac{\int_0^\infty F(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty F(\frac{\lambda}{[1+z]})S(\lambda)d\lambda} \right]. \quad (9)$$

Втората компонента на К-корекцията е определена за филтър R от Ovcharov et al. (2009), използвайки наблюденията от SDSS (Schneider et al., 2005) на квазари на различно червено отместване, а галактичната екстинкция е определена от Schlafly et al. (2011). В таблица 4 са представени получените стойности за абсолютна звездна величина и светимостта на околополюсните квазари във филтър R, както и използваните параметри за изчисленията. За пресмятането на  $M_R$  е приложена К-корекция (Ovcharov PhD thesis, 2008), пресметнато е фотометричното разстояние и е отчетена индивидуалната екстинкция (NED – NASA/IPAC Extragalactic Database).

Таблица 4 Таблицата съдържа стойностите на Галактичната екстинкция ( $A_R$ ), фотометричното разстояние ( $\log d_L$ ) и К-корекцията ( $K_R(z)$ ) за околуполусните квазари. Пресметнати са техните абсолютни звездни величини ( $M_R$ ) и светимости ( $L_R$ ) за R филтър.

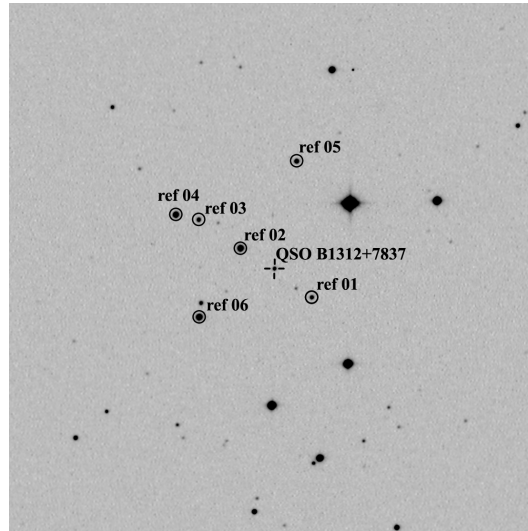
QSO-ID	$R_{mean}$ [mag]	$A_R$ [mag]	$\log d_L$	$K(z)$ [mag]	$M_R$ [mag]	$L_R$ [ $L_\odot$ ]
QSO 03	16.16	0.40	4.47	2.05	$-33.6 \pm 0.2$	$1.8-2.6 \times 10^{15}$
QSO 04	17.29	1.06	4.28	1.74	$-31.9 \pm 0.2$	$3.8-5.4 \times 10^{14}$
QSO 05	17.06	0.43	4.06	1.22	$-29.9 \pm 0.2$	$6.0-8.6 \times 10^{13}$
QSO 06	16.74	0.07	4.24	1.65	$-31.2 \pm 0.2$	$2.0-2.9 \times 10^{14}$
QSO 07	16.95	0.09	4.32	1.76	$-31.5 \pm 0.2$	$2.6-3.8 \times 10^{14}$
QSO 08	17.77	0.05	3.95	1.06	$-28.1 \pm 0.2$	$1.1-1.6 \times 10^{13}$
QSO 09	16.03	0.07	4.19	1.53	$-31.5 \pm 0.2$	$2.6-3.8 \times 10^{14}$
QSO 10	14.26	0.09	3.98	1.11	$-31.8 \pm 0.2$	$3.4-5.0 \times 10^{14}$
QSO 11	18.68	0.12	4.41	1.97	$-30.5 \pm 0.2$	$1.0-1.5 \times 10^{14}$
QSO 12	15.55	0.13	3.87	0.91	$-29.9 \pm 0.2$	$6.0-8.6 \times 10^{13}$
QSO 13	16.00	0.26	4.40	1.95	$-33.2 \pm 0.2$	$1.3-1.8 \times 10^{15}$

## 4. Квазарът QSO B1312+7837 (QSO 09)

В настоящата глава са представени резултати от дългопериодични наблюдения на квазара QSO B1312+7838 ([VV2006] J131321.4+782153 Véron-Cetty & Véron, 2006), разположен на червено отместване  $z = 2.0$  (Hagen, Engels & Reimers, 1999). Средната му звездна величина е  $B \sim 16.4^m$ , отговаряща на абсолютна величина от  $M_B = -30.1^m$  (Mickaelian et al., 1999), което го прави с  $\sim 3.5^m$  по-ярък от средностатистически квазар на същото червено отместване (Souchay et al., 2015). Наблюдения в рамките на една нощ с едноминутен каданс не показват признаци на краткопериодична променливост (Bachev et al., 2005).

Дългопериодичните наблюдения на QSO B1312+7838 показват вероятна периодична променливост. Една от възможните причини е наличието на две свръхмасивни черни дупки (SMBHs) в ядрото на квазара. Това явление може да се случи при взаимодействие на две галактики, в следствие на което се образува ново ядро, съдържащо две SMBHs (Begelman et al., 1980).

Един от методите за изследването на двойни SMBHs е наблюдението на периодичността в излъчването на неразрешено активно галактично ядро, породена от орбиталното движение на двете компоненти (Sillanpää et al., 1988). Могат да бъдат разгледани различни механизми, които поражда периодична променливост. Една от възможностите е акреционният темп да се променя под действие на орбиталното движение (D’Orazio et al., 2013), а друг вариант е преминаването на “вторичната” свръхмасивна черна дупка пред акреционния диск на “първичната” (Lehto & Valtonen, 1996). За да наблюдаваме периодична променливост в потока е необходимо двете свръхмасивни черни дупки да се намират на разстояние под  $1 \text{ pc}$  една от друга. В такива случаи е възможно двете компоненти да извършват спираловидни движения към центъра на масите и евентуално да се слоят (Begelman et al., 1980). Този тип движение поражда силни гравитационни вълни, които би трябвало да бъдат детектирани от последните експерименти (Kelley et al., 2019), но подобни събития са рядкост. Изучаването на двойните свръхмасивни черни дупки е важно за изучаването на галактичните сливания, природата на самите черни дупки, както и на физиката на гравитационните вълни.



Фигура 4 Идентификационна карта ( $10 \times 10$  дъгови минути) около QSO B1312+7837 (отбелязан с кръст). Звездите, използвани за сравнение, са отбелязани с кръгове. Север е нагоре, изток е наляво (Minev et al., 2021).

## 4.1. Наблюдения и определяне на период

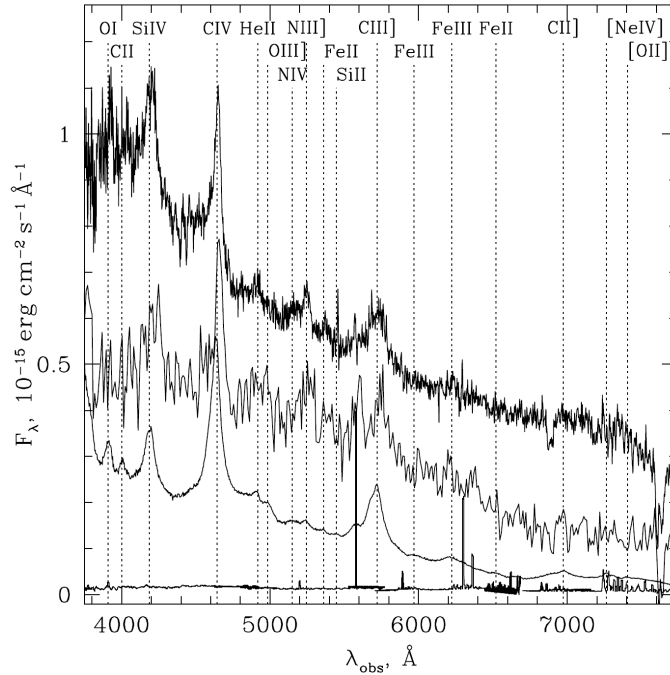
Фотометрични наблюдения на квазара QSO B1312+7837 (QSO 09) са описани в Глава 3. За този обект са получени спектрални изображения от 6 m ВТА телескоп към САО РАН (Специальная астрофизическая обсерватория, Российской академии наук). Наблюденията са извършени на 18-ти февруари 2018 г. с апарата SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometrical Observations; Afanasiev & Moiseev, 2005), снабден с дифракционна решетка VHPG550G (Volume Phase Holographic Grating) и  $2048 \times 2048$  EEV 42-40 CCD-детектор. С тази конфигурация и процеп с ширина 1 arcsec зрителното поле (по дължината на процепа) е 6.1 arcmin, а резолюцията е  $R \approx 550$  с FWHM=10 Å в диапазона  $\lambda 3700 - 7700$  Å. Времето за експониране на всеки кадър е  $5 \times 600$  sec. Изображенията са преминали през стандартна първоначална обработка, а самите спектри са калибрирани по поток и дължина на вълната – фигура 5. Червеното отместване, измерено по линиите *N V* 1240, *Si IV* 1394, *Si IV* 1403, *C IV*

1549, *He II* 1640, *Ne III*

1750, *C III*] 1909 е  $z = 1.999 \pm 0.004$ , което не се различава от данните в литературата (Hagen, Engels & Reimers, 1999). Грешката е определена като стандартно отклонение от червените отмествания, измерени от седемте линии (Ivanov et al., 2016).

За търсене на периодичност е използвана модифицирана версия на софтуера *Eco-Striker* (Trifonov 2019), който осигурява лесен достъп до голямо количество алгоритми за времеви анализ. В търсене на сигнали за периодичност е построен *Generalized Lomb-Scargle* (GLS; Zechmeister & Krüster 2009) периодограмен спектър (по наблюденията в R филтър) с граница на статистическа значимост (FAP – False Alarm Probability)  $10^{-3}$  (0.1%) и изследван честотен диапазон от един ден до два пъти наблюдателния ред. В допълнение е

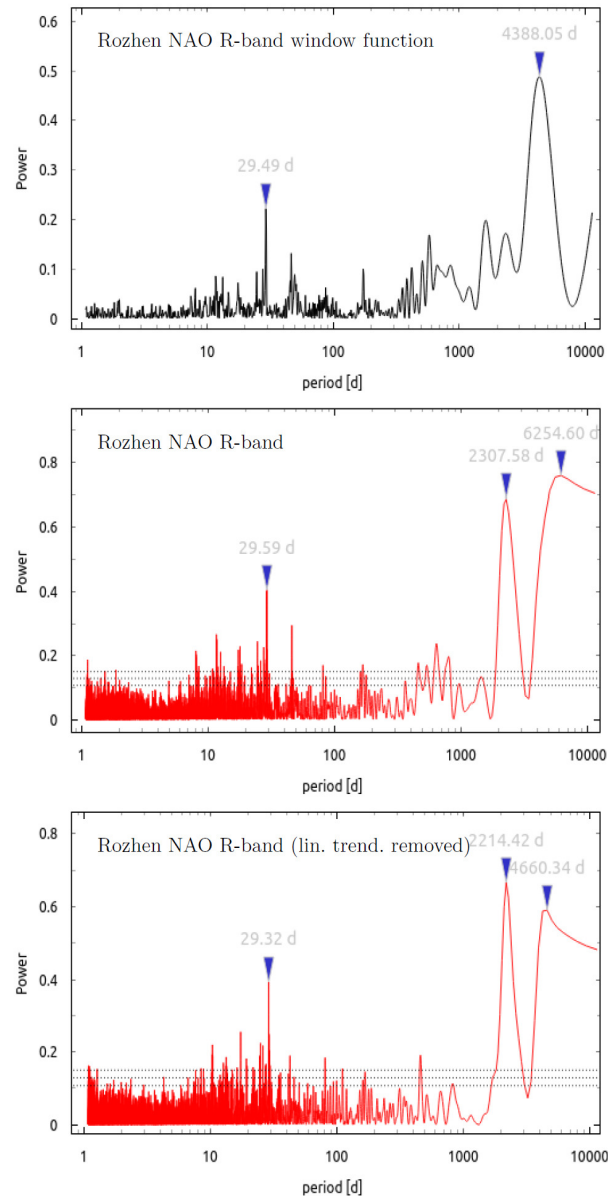




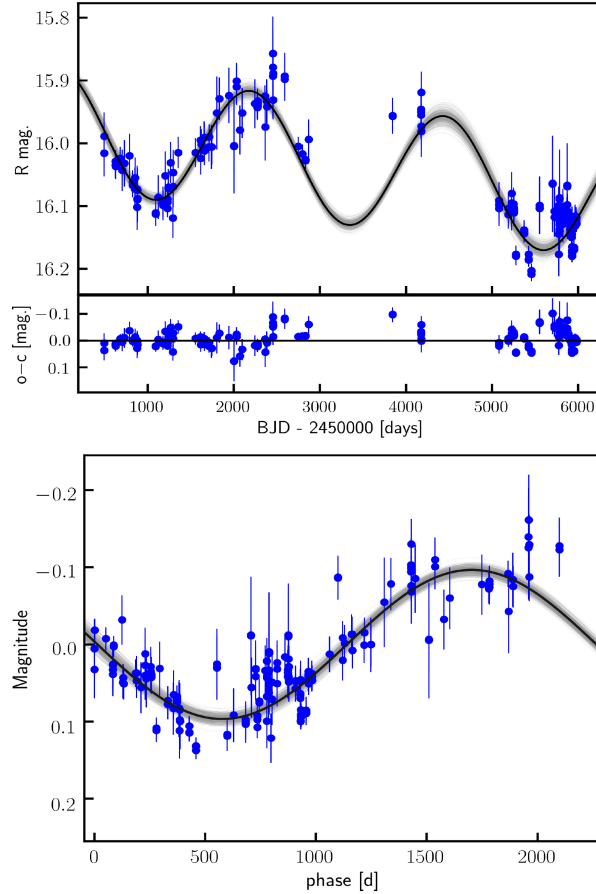
Фигура 5 Оптичен спектър на QSO B1312+7837 от (отгоре надолу): 6-м ВТА телескоп (Minev et al., 2021); 2.2-m телескоп от Calar Alto (отместен с 0.3 с визуализационна цел; Hagen, Engels & Reimers, 1999), комбиниран SDSS спектър на квазар с червено отместване  $z=2$  (Vanden Berk et al., 2001) и небесен спектър. Отбелязани са някои характерни емисионни линии при квазарите (Minev et al., 2021).

направен и дискретен Фурие анализ за изследване на *Window Function* (WF) на данните, засягащи търсения период.

Фигура 6 показва резултатите от WF и GLS. В най-горния панел са изобразени резултатите от WF. Виждат се много пикове, като най-силният е при 4388 дни. Вторият по значимост пик е при 29.5 дни, което е близко до лунния синодичен месец. Средният панел показва GLS периодограма с два значими пика: единия с период от 2307.6 дни ( $FAP < 10^{-49}$ ), а втория с период 6254.6 дни ( $FAP < 10^{-58}$ ). Вторият период е по-дълъг от наблюдателния ред и неговото детектиране не може да бъде потвърдено. Възможно е той да се дължи на допълнителна компонента, която не може да бъде разграничена в нашите наблюдения. В действителност при визуален преглед на фотометричните данни във всички филтри се забелязва намаляване на блясъка. Това се потвърждава и с линейна апроксимация на всички точки в R филтър. В най-долния панел на фигура 6 е показана GLS периодограма с отчетено линейно спадане на блясъка, където също се забелязват два значими пика: значимостта на нискочестотния е намаляла и той се е изместил при период от  $\sim 4660$  дни, а с най-голяма значимост е пикът при период 2214.4 дни. Сигналът в периодите при 4660 дни и 29 дни е породен в следствие на WF и истинският период на квазара е 2214 дни.



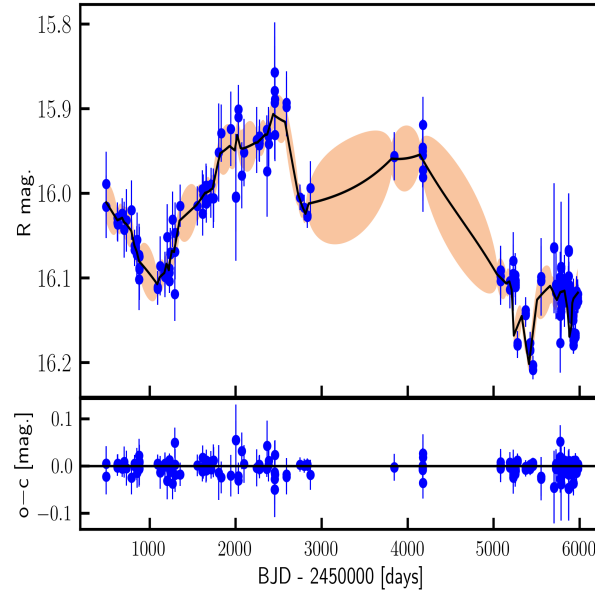
Фигура 6 *Горен панел:* спектър на *Window Function* (WF) по фотометрията в R филтър. Наблюдава се силен сигнал с период 29.49 дни и 4388.05 дни. *Среден панел:* GLS спектър на данните в R филтър. Хоризонталните прекъснати линии индикират FAR с 10%, 1% и 0.1%. Трите най-значими сигнала са с периоди 29.59 дни, 2307.58 дни и 6254.60 дни. *Долен панел:* същия като средния, но след изваден линеен тренд от фотометрията в R филтър. Истинският период е около 2214.42 дни, докато тези при 4660.34 дни и 29.32 дни са в следствие на пиковете в WF при 4388.05 дни и 29.59 дни (Minev et al., 2021).



Фигура 7 Горният панел показва най-добрата апроксимация от *Exo-Striker* (в черно) по наблюденията в R филтър. Апроксимацията е съставен от фиксирана периодична компонента и допълнителна компонента за намаляване на блясъка, които добре описват наблюдателните данни. Долният панел показва крива на блясъка в R филтър, насложена по период (Minev et al., 2021).

## 4.2. Оптимизиране на параметрите и избор на модел

За оптимизиране на негативните логаритми на вероятностната функция ( $-\ln\alpha$ ) е използван *Simplex* алгоритъм (Nelder & Mead, 1965), съчетан с три конкуриращи се модела: (i) “нулев” модел, в който се приема, че няма сигнал в данните; (ii) синусоидален модел, където оптимизираните параметри са фотометричният сигнал, амплитудата, фазата и периода; (iii) синусоидален модел като (ii), но с допълнителна компонента за линейно намаляване на блясъка. Началните параметри за оптимизиране при модели (ii) и (iii) са взети от вече получените стойности чрез GLS анализа. Най-добрите апроксимации за трите модела, изразени чрез *Bayesian Information Criteria* (BIC) са следните:  $BIC_{flat} = -414.98$ ,  $BIC_{Sine} = -618.25$  и  $BIC_{Sine+trend} = -739.37$ .  $\Delta BIC = BIC_{flat} - BIC_{Sine+trend} = 329.39$ , което е много силно доказателство в подкрепа на периодичната променливост на квазара. Получените окончателни резултати са за променливост с период  $2237 \pm 12$  дни (отговарящи на  $746 \pm 4$  дни в системата на квазара), а крива на блясъка е представена на фиг. 7. Направени са и Монте Карло симулации, които потвърждават получените стойности.



Фигура 8 Същото като горния панел на фиг. 7, но за DRW GP модел (Minev et al., 2021).

### 4.3. Стохастична променливост и Damped Random Walk модел

От литературата е известно, че оптичката променливост при квазарите може да бъде обяснена и чрез стохастични процеси, породени от т.нар. червен шум (Kelly et al., 2009). В този контекст, от значителна важност е да се провери дали наблюдаваната променливост при QSO B1312+7837 наистина е периодична или е в следствие от червен шум. Често използван стохастичен процес за моделиране на оптичката променливост при квазарите е *Damped Random Walk* (DRM) модела (Kelly et al., 2009). За тази цел в софтуера *Exo-Striker* са имплементирани *RealTerm Gaussian Process* (GP) и *celerite Python* пакета (Foreman-Mackey et al., 2017). Моделът използва *random walk* процес от вида:  $\kappa(\tau) = a_j e^{-c_j \tau}$ , където  $a$  е амплитуда, а  $c$  дефинира характеристичното време на GP. На фигура 8 е представена най-добрата апроксимация на модела, а стойностите, получени за параметрите от DRW са:  $a = 0.0058^{+0.0017}_{-0.0001}$ ,  $c = 0.0015^{+0.0002}_{-0.0011}$ ,  $rms = 0.0117 \text{ mag}$  и  $BIC_{DRW} = -849.54$ . Тогава  $\Delta BIC = BIC_{Sine+trend} - BIC_{DRW} = 110.17$ , което дава значително предимство на DRW модела, спрямо разглеждания периодичен модел. Възможно е оптичката променливост на QSO B1312+7837 да се дължи на стохастични процеси, породени от червения шум.

Тази възможност не бива да се отхвърля, но трябва да се отбележи, че в използвания DRW модел има поне няколко големи пропуски. DRW моделът се характеризира с високочестотно поведение и има силна тенденция да пре-апроксимира данните. Моделът ще е адекватен само ако има ясни начални условия за стохастичните процеси при квазарите, които да ограничават  $a$  и  $c$ . Директното сравняване между строгия синусоидален модел и гъвкавия GP модел е трудно поради липсата на точни начални условия за построяване на GP модела. Освен това Kozłowski (2017) установява, че наблюденията трябва да бъдат поне 10 пъти по-дълги от характеристичният период на DRW модела. При изследванията

на QSO B1312+7837 характеристичния период от DRW е  $\approx 660_{-80}^{+1800}$  дни, а наблюденията са само  $\sim 15$  години, което е недостатъчно за категорични резултати от DRW модела. DRW вероятно е неподходящ да опише променливостта на наблюдавания квазар въпреки доброто апроксимиране на данните. За по-категорични резултати трябва още фотометрични наблюдения, но за това ще са необходими поне няколко десетилетия.

#### 4.4. Модел за двойни свръхмасивни черни дупки

Полученият спектър позволява да се направят оценки на масите на двете свръхмасивни черни дупки. Това може да стане чрез ширината на линията  $C\ IV\ 1549.06\ \text{\AA}$  и светимостта на континуума при  $1350\ \text{\AA}$  (Vestergaard & Peterson, 2006; уравнения 2 и 4). От спектъра става ясно, че тясната и широката компонента на  $C\ IV$  имат съответни ширини  $2700 \pm 200\ \text{km s}^{-1}$  и  $9700 \pm 600\ \text{km s}^{-1}$ . Връзката от Vestergaard & Peterson (2006) дава оценка за масата:  $\log(M_{BH}/M_{\odot}) \sim 8.1 \pm 0.1$ .

Тук могат да бъдат разгледани два сценария, които няма как да бъдат разграничени един от друг. Ако разстоянието между двете свръхмасивни черни дупки е голямо, то всяка от тях има собствен акреционен диск и орбиталното движение около общия им център на масите не допринася за разширяването на емисионните линии. При втория сценарий двете свръхмасивни черни дупки са близко една до друга и са потопени в общ акреционен диск. Тогава от ширината на емисионните линии може да бъде определена само горната граница на общата им маса.

Ако приемем, че свръхмасивните черни дупки се движат по кръгови орбити, техните маси са в диапазона  $\log(M_{BH}/M_{\odot}) \sim 8 - 8.6$  и отношението им е между 0.5-1. Тогава орбиталната скорост на основната черна дупка е в диапазона  $3600 - 8600\ \text{km s}^{-1}$ , а на вторичната  $5500 - 11500\ \text{km s}^{-1}$  (D’Orazio et al., 2015b). Анализът на наклона на спектъра показва, че наблюдаваната скорост по лъча на зрение трябва да бъде  $v \sin i \sim 8550\ \text{km s}^{-1}$ , което е на границата за орбиталната скорост на основната черна дупка, но добре съответства на диапазона от скорости на вторичната.

От получения порядък на масите и третия закон на Kepler може да се изведе голямата полуос на орбитата –  $0.008 - 0.012\ \text{pc}$ . Тази стойност е значително по-голяма от най-вътрешната стабилна кръгова орбита за свръхмасивни черни дупки ( $r_{IRSO} \sim 10^{-4} - 10^{-5}\ \text{pc}$ ; Tanaka & Menou, 2010).

## 5. Наблюдения на блазари

WEBT (Whole Earth Blazar Telescope) представлява международно сътрудничество между астрономи, изучаващи активните галактични ядра. Проектът стартира през 1997 г., като основната му цел са многовъълнови наблюдения на блазари. Чрез наземни обсерватории се обхваща нискоенергетичната част от електромагнитния спектър (радио-, инфрачервено и оптично излъчване), а с орбитални телескопи – високоенергетичното излъчване (ултравиолетово, рентгеново и гама). Благодарение на разнообразието от географски координати на наземните обсерватории, изследваните обекти могат да се наблюдават непрекъснато. Това позволява подробното изучаване на променливостта в излъчването на тези обекти и разбирането на протичащите физични процеси. Към момента са приключили над 40 организирани кампанийни наблюдения с участието на над 100 телескопа.

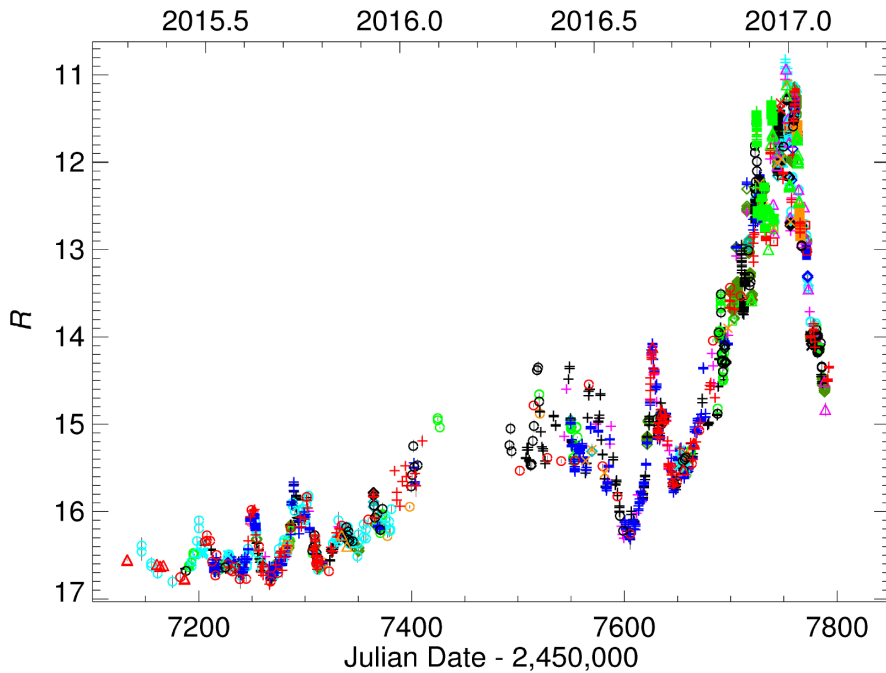
През септември 2007 г. стартира нов проект към WEBT: GASP (GLAST-AGILE Support Program). В този проект активно участие взимат двата орбитални сателита за гама-наблюдения GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) и AGILE (Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero), като списъкът с изследваните обекти включва 28 блазара.

България е част от това международно сътрудничество. Наблюденията в оптичната област с телескопите на НАО Рожен, АО Белоградчик и САО Плана допринасят за изследването на блазарите към програмата GASP-WEBT. В тази глава са представени част от резултатите, получени в следствие на многовъълновите наблюдения в периода 2017-2020 година.

### 5.1 СТА 102

#### Многовъълнови наблюдения

Наблюденията в настоящето изследване от Fermi-LAT са осъществени почти изцяло в обзорен режим за периода от 1-ви януари 2013 г. (MJD 56293) до 9-ти февруари 2017 г. (MJD 57793). Общото наблюдателно време в диапазона 0.1 – 300 GeV е 125005 s със среден поток  $(93.8 \pm 0.6) \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  и спектрален наклон  $\alpha = 2.16 \pm 0.01$ . Този поток отговаря на излъчване в гама-диапазона от  $(5.1 \pm 0.1) \times 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ . За сравнение през предходните 4 години (август 2008 – юли 2012) регистрираният гама-поток е приблизително 6 пъти по-малък –  $(16.1 \pm 0.5) \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . В построената крива на блясъка се забелязват

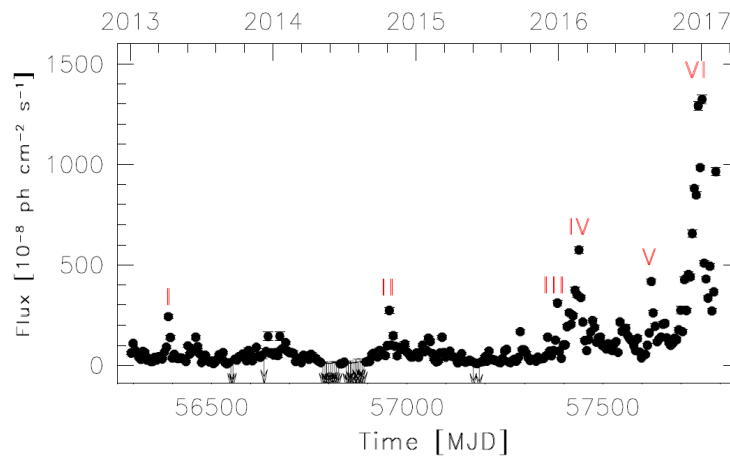


Фигура 9 Крива на блясъка на СТА 102 през последните два наблюдателни сезона (Raiteri et al., 2017). Звездните величини в R филтър са представени като функция на юлианския ден. Различните цветове и символи обозначават отделните телескопи, допринесли към кампанията на WEBT. Наблюдаваният максимум на 28 декември 2016 г. е с приблизително 6 звездни величини по-ярък от най-ниското засечено ниво.

6 пика с повишаване на потока между 2.5 и 14 пъти спрямо средното ниво на излъчване (фиг. 10). На 28-ми декември 2016 г. е регистрирано едно от най-високите излъчвания в гама-диапазона от блазар –  $(2200 \pm 111) \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  или  $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$ .

Чрез орбиталния сателит Swift (Gehrels et al., 2004) са проведени 73 наблюдения за периода 24-ти март 2013 г. (MJD 56436) – 18-ти януари 2017 г. (MJD 57771). Потокът, детектиран от рентгеновия инструмент (XRT; Burrows et al, 2005; 0.3-10keV), варира между  $7.6 \times 10^{-13}$  и  $68.1 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . С ултравиолетово-оптичния инструмент (UVOT; Roming et al., 2005; 170-600 nm) е регистрирано повишаване на блясъка (спрямо спокойното състояние на блазара) с около 5 звездни величини в наблюдаваните филтри: V=11.44-16.86; B=12.56-17.24; U=11.78-16.27; W1=11.33-16.18; M2=11.36-16.17; W2=11.52-16.46.

От радио- до оптичния диапазон се наблюдава повишаване на амплитудата на променливост с повишаване на вълновата честота, последвано от спад в ултравиолетовата област. Рентгеновото излъчване е със значително по-ниска амплитуда на променливост в сравнение с гама-диапазона. На фигура 11 са сравнени криви на блясъка, получени от инфрачервения до гама-диапазона по време на периода на висока активност (11-ти ноември 2016 г. – 8-ми февруари 2017 г.: MJD 57003-57792), като всички потоци са нормирани спрямо максималната (вляво) или минималната (вдясно) наблюдавана стойност в съответния диапазон. В гама-диапазона се забелязват четири значителни повишавания на блясъка: 15-ти декември 2016 г. (MJD 57737), 22-ри декември 2016 г. (MJD 57744), 27-



Фигура 10 Крива на блясъка на СТА 102 в енергийния диапазон 0.1-300 GeV за периода 1 януари 2013 г. – 9 февруари 2017 г. (D’Ammando et al., 2019). Отделните повишавания на блясъка са обозначени с идентификационен номер.

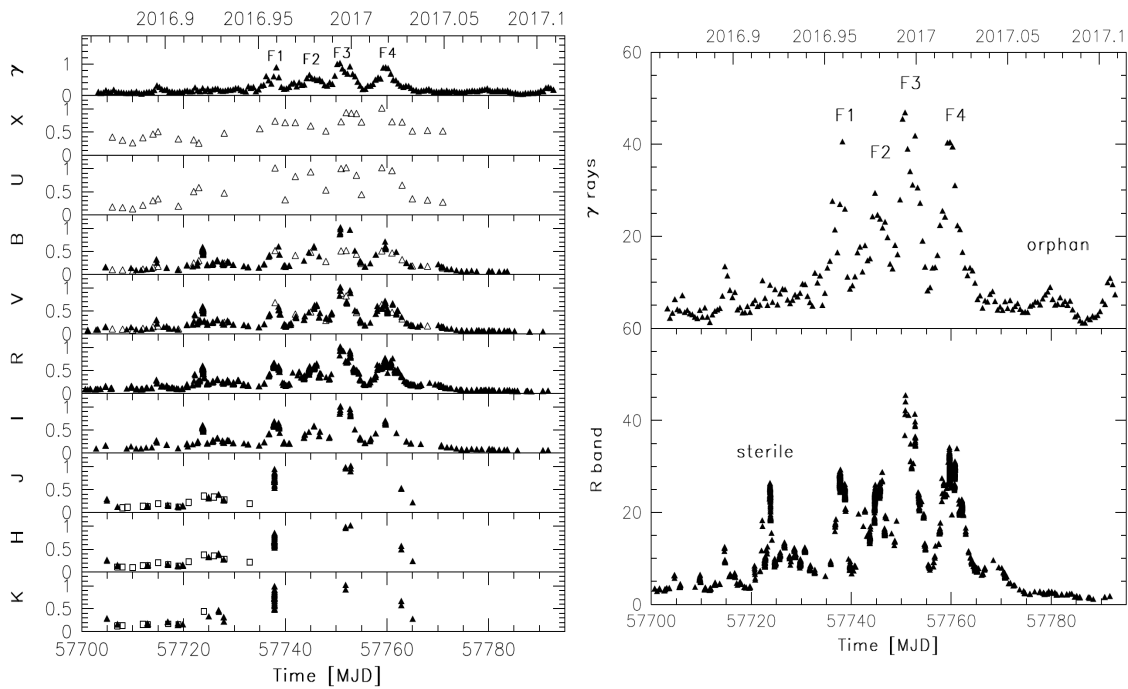
ми декември 2016 г. (MJD 57749) и 4-ти януари 2017 г. (MJD 57757). По същото време се наблюдават 4 пика и в оптичния диапазон, като три от тях са със сходна амплитуда на съответстващите им повишавания в гама-диапазона. От друга страна, не всички събития в оптичната област имат отговарящи им в гама-диапазона и обратно – самостоятелен пик в оптиката се наблюдава около 1-ви декември 2016 г. (MJD 57723), а самостоятелни пикове в гама-диапазона около 24-ти януари 2017 г. (MJD 57777) и 6-ти февруари 2017 г. (MJD 57790). Това показва, че връзката между оптичното и гама-излъчването не е пряка и променливостта на блазара се описва от по-сложни процеси. Поради липса на данни, в инфрачервената област са регистрирани само два пика. Цялостно повишаване на излъчването в рентгеновата област се наблюдава между първия и втория пик, а на последните два отговарят ясно различни събития.

### Изследване излъчването на релятивистката струя

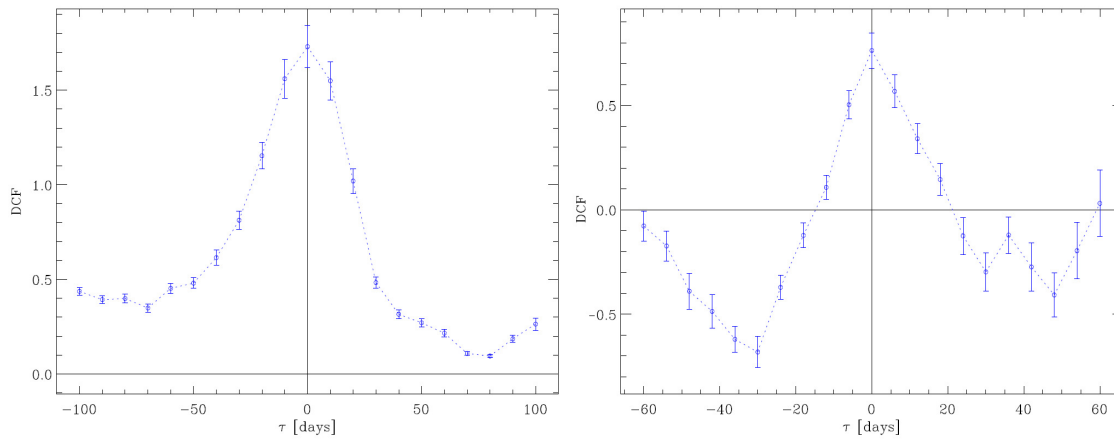
За да се определи синхротронното излъчване от релятивистката струя на блазара, приносът от диска, праховия тор и областта на широките линии трябва да бъде изваден. За тази цел се моделира топлинното излъчване на ВВВ, като към него влизат и излъчването от акреционния диск и областта на широките линии (в частност линиите на  $Mg II$  и  $H\alpha$ , които попадат съответно в оптичния V и инфрачервения J филтър). Приносът на праховия тор в цялостното излъчване се определя по данни от инфрачервените сателити IRAS (Impey & Neugebauer, 1988) и Spitzer (Malmrose et al., 2011). Оставащото излъчване от релятивистката струя варира от 0.047 до 166 mJy с отношение в потока над 3500 пъти.

Анализът във времевата разлика на променливост между отделните диапазони ще помогне да се определи дали излъчването идва от една и съща област в джета или не. За целта се използва DCF (discrete correlation function; Edelson & Krolik 1988; Hufnagel & Bregman 1992). Анализът за сравнение между оптичната крива на блясъка и този в гама-





Фигура 11 *Вляво*: многочестотна крива на блясъка, нормирана към максималната стойност, наблюдавана в периода 11 ноември 2016 г. – 8 февруари 2017 г. (MJD 57003-57792) в следните енергийни диапазони: гама-лъчи (100 MeV–300 GeV), рентгенови лъчи (0.3-10 GeV), B, V, R, I, J, H, K. Запълнени триъгълници: WEBT; празни триъгълници: UVOT; празни квадрати: REM. Основните повишавания в гама-потока са обозначени с F1, F2, F3 и F4. *Вдясно*: сравнение между Fermi-LAT крива на блясъка в гама-диапазона и крива на блясъка в R филтър, нормирани към най-ниския поток, наблюдаван в периода 11 ноември 2016 г. – 8 февруари 2017 г. (D’Ammando et al., 2019)

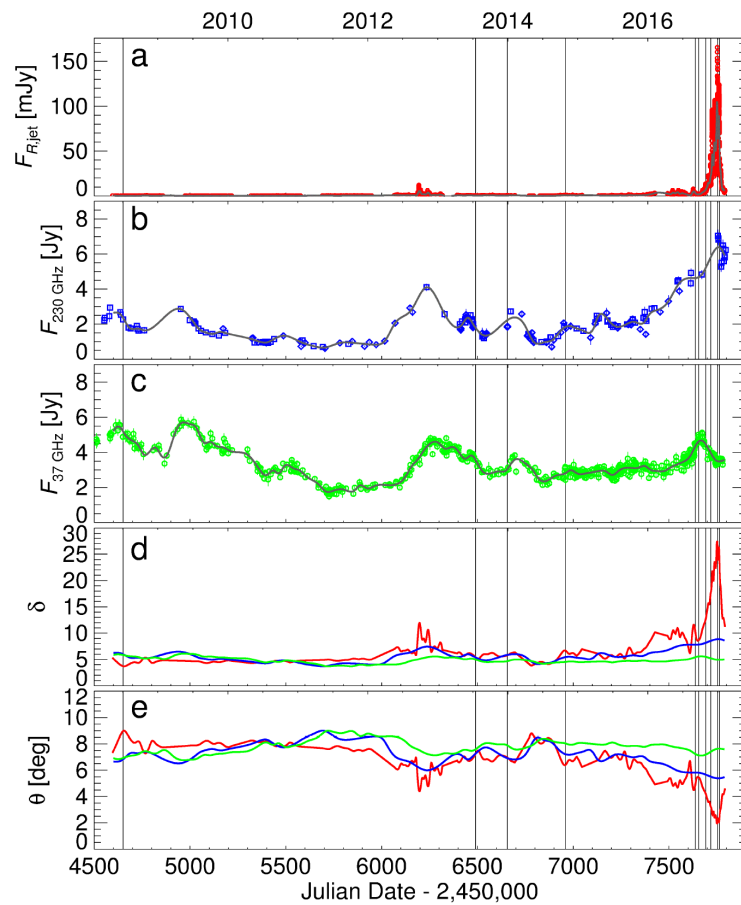


Фигура 12 Дискретна корелационна функция между потоците в гама-диапазона и R филтър (вляво) / рентгеновия поток (вдясно), получена за целия период от 2013 до 2017 година (D'Ammando et al., 2019).

диапазона за целия период показва максимум съответстващ на нулево времево отместване (фиг. 12 - вляво), а неопределеността на резултата се получава чрез 1000 Монте Карло симулации (техника, използвана от Peterson et al., 1998; Raiteri et al., 2003) – във времево отместване между 0 и 0.6 дни попадат 78.3% от симулациите. Въпреки че амплитудата на променливост в ултравиолетовия и рентгеновия диапазон е по-малка от тази в гама-диапазона, анализът показва подобен резултат от нулево времево отместване (фиг. 12 – вдясно).

Връзката между радиоизлъчването и това в останалите диапазони е несигурна. Като цяло, радиоизлъчването се отличава от останалото, но на моменти има сходно поведение с положително или отрицателно времево отместване. Двете повишавания на блясъка в оптичната област през 2012 и 2016-2017 година са съпроводени с повишено излъчване и в радиодиапазона, но с много различно отношение на потоците. Освен това през 2012-та година оптичната активност е последвана от радиоактивността (както обикновено се наблюдава при блазарите: Villata et al., 2009), докато през 2016-2017 година първо се наблюдава повишаване на потока в радиодиапазона. Тази сложна радио-оптична връзка предполага, че излъчването в двата диапазона идва от различни части на релятивистката струя или нейната ориентация се променя с времето.

В кривите на блясъка в оптичния диапазон ясно се различават резки повишавания на блясъка, насложени на продължителен тренд на повишаване. Когато източникът е по-ярък, кратките повишавания на блясъка са по-ясно изразени и с по-големи амплитуди. Това е ефект, който се наблюдава, когато дългопериодичният тренд на промяна на блясъка се дължи на промяна на Доплеровия фактор  $\delta$ . Наблюдаваният поток през 2012-та година достига до 1.1 mJy, а при по-високото ниво на активност през 2016-2017 година до 18 mJy, което е индикатор, че дългопериодичната промяна в потока най-вероятно се дължи на промяна на Доплеровия фактор  $\delta$ . Ако се приеме тази хипотеза, може да се проследи поведението на  $\delta$  с времето на три честоти: оптичен R филтър; 230 GHz и 37 GHz (фиг. 13).



Фигура 13 Многовъълново поведение на излъчването от релятивистката струя на СТА 102 за периода 2008-2017 година (Raiteri et al., 2017). *a-c*: кривите на блясъка в R филтър, на 230 GHz и на 37 GHz съдържат съответно 10462, 170 и 576 точки. *d-e*: Доплеровия фактор  $\delta$  и наблюдавания ъгъл  $\theta$  за оптичното (червено), 230 GHz (синьо) и 37 GHz (зелено) излъчване.

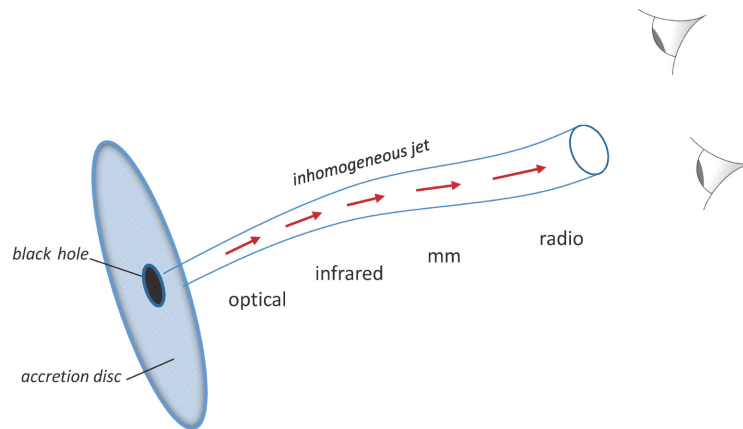
Ако се вземат типичните стойности за Лоренцовия фактор  $\Gamma = 20$  и за максималния ъгъл по лъча на зрение  $\theta_{max} = 9^\circ$  (Savolainen et al., 2010), тогава за основна стойност на Доплеровия фактор се получава  $\delta_{base} = 3.7$ . Резултатите не се повлияват значително при избор на други стойности за  $\Gamma$  и  $\theta_{max}$ . Наблюдателните данни ограничават отношението  $\delta(t)/\delta_{base}$ , а изборът на  $\theta_{max}$  ограничават  $\Gamma$  (за получаване на разумни стойности за  $\theta_{min}$ ). Знаем, че за блазарите е характерно  $5^\circ < \theta_{max} < 15^\circ$ , което отговаря на  $10 < \Gamma < 35$ . Промяната на Доплеровия фактор може да се дължи на промяна в ориентацията на релятивистката струя. Това твърдение се подкрепя от разработените симулации на осево-несиметрични нестабилности в магнитохидродинамиката на джета (Mignone et al., 2010) и VLBI наблюдения на спираловидни и усукващи се релятивистки струи (Perucho et al., 2012; Britzen et al., 2017). Знаейки  $\delta(t)$  и  $\Gamma$  може да се получи ъгъла, който сключва релятивистката струя с лъча на зрение. Това е показано на фигура 13, където се вижда, че повишаването на блясъка за дадена честота отговаря на по-добро съосъвяване на излъчващата област от джета с лъча на зрение. Това се случва и при оптичeskото повишаване през 2016-2017 година. Според този сценарий излъчването на различни честоти идва от различни области на релятивистката струя (т.е. тя е нехомогенна), с различна ориентация спрямо лъча на зрение, която се променя с времето (представено схематично на фигура 14). Променливостта в амплитудите на  $\theta$ ,  $\delta$  и потока е по-малка и по-гладка в радиодиапазона спрямо по-късовълновото излъчване. Това се дължи на факта, че радио-излъчващите области в изкривената релятивистка струя са значително по-широки. Следователно променливостта, дължаща се на осредненото излъчване от широки области с голям набор от ъгли по лъча на зрение, би била по-ниска.

## 5.2 4C 71.07

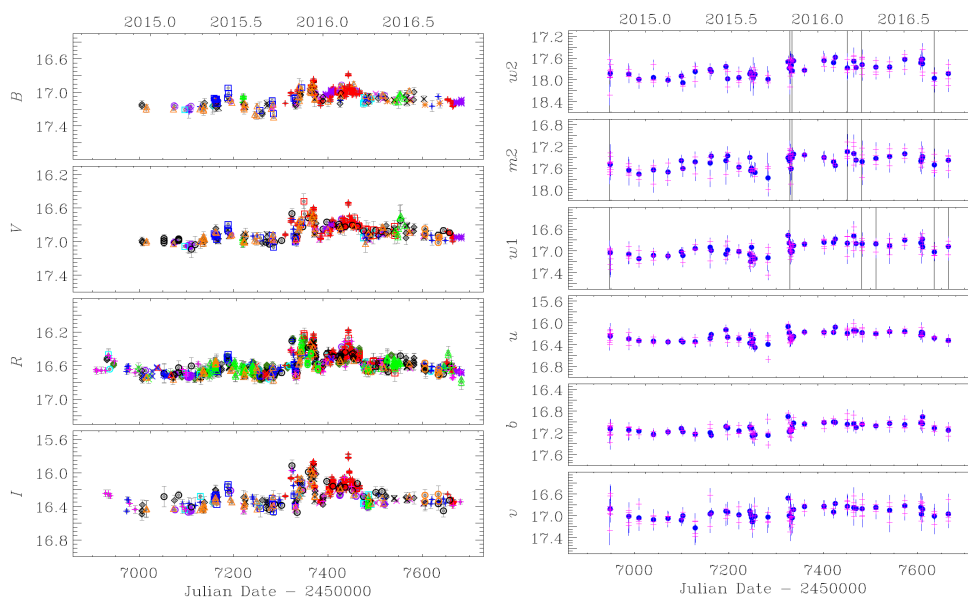
Според досегашните изследвания на блазара 4C 71.07 се счита, че масата на свръхмасивната черна дупка е  $3 \times 10^9 M_\odot$ , размерът на областта на широките линии е  $1.5 \times 10^{18}$  cm, светимостта на акреционния диск е  $2.25 \times 10^{47}$  erg s<sup>-1</sup> (Ghisellini et al., 2010). При анализирането на поведението на блазара в различни честотни диапазони е установена корелация между излъчването в гама-диапазона и оптичeskата област (Akyuz et al., 2013).

По време на наблюдателната кампания са засечени три повишавания на блясъка, видими на оптичните криви на блясъка (JD=2457320, JD=2457370 и JD=2457443) – фиг. 15. Нарастването на амплитудата на променливост от синята към червената област е знак за излъчване, породено от ВВВ (Big Blue Bump).

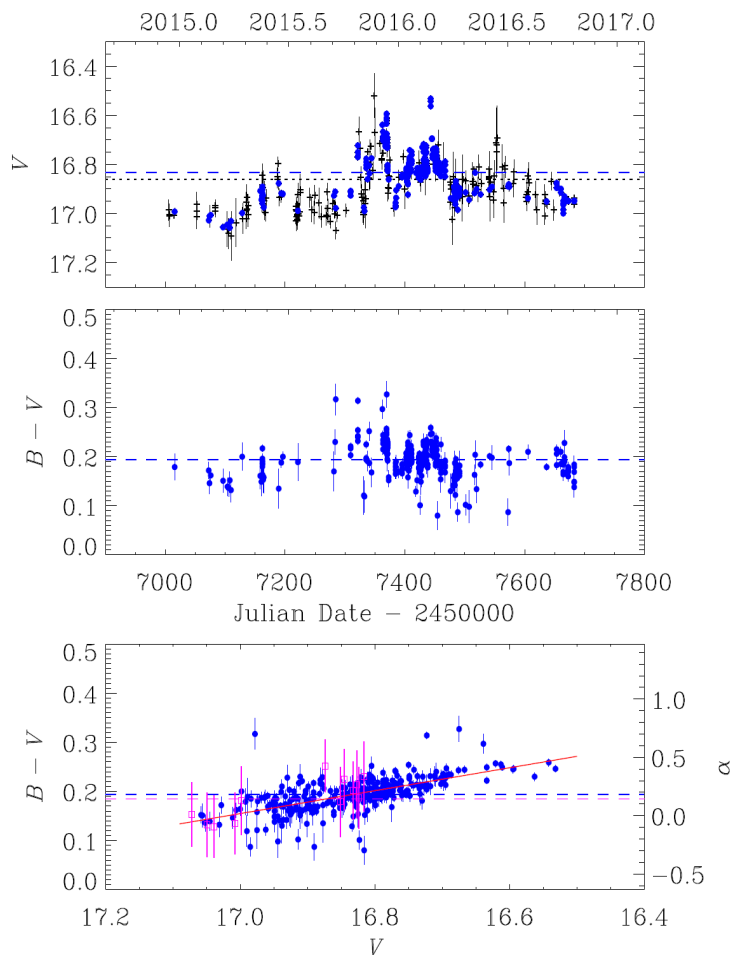
За да се изследва спектралното поведение на източника, се построява зависимост цвят-звездна величина (фиг. 16). За целта са използвани данни от В и V изображения, получени от един и същи телескоп в рамките на 15 min и с фотометрична грешка под  $0.03^m$ . При нарастване на яркостта на обекта се забелязва почервяване, което най-вероятно се дължи на нарастване на излъчването на “червената” синхротронна компонента и постоянно излъчване от ВВВ (Villata et al. 2006).



Фигура 14 Схематично представяне на предложения нехомогенен модел за релятивистката струя (Raiteri et al., 2017). Фотоните с различни честоти идват от отделни области в релятивистката струя. Поради нейното изкривяване тези области имат различна ориентация. Съответното излъчване е повече или по-малко насочено към наблюдателя в зависимост от по-доброто или по-лошото съосъвяване по лъча на зрение. Структурата на джета е динамична и ориентацията на отделните области се изменя с времето. Двете очи вдясно представляват два различни ъгъла спрямо лъча на зрение. “Горният” наблюдател ще вижда повишаване в оптичестката активност и относително слабо излъчване в радиодиапазона, а при “долният” наблюдател най-насоченото излъчване ще бъде от милиметровия диапазон.



Фигура 15 *Вляво*: оптични криви на блясъка за блазара 4C 71.07 по наблюдения към WEBT. С различни цветове и символи са обозначени данните получени от отделните инструменти. *Вдясно*: ултравиолетови и оптични криви на блясъка за блазара 4C 71.07 получени от инструмента UVOT към космическия апарат Swift. Лилавите символи представляват фотометрията от единични изображения, а сините са получени след сумирането на изображенията от дадена епоха (Raiteri et al., 2019).

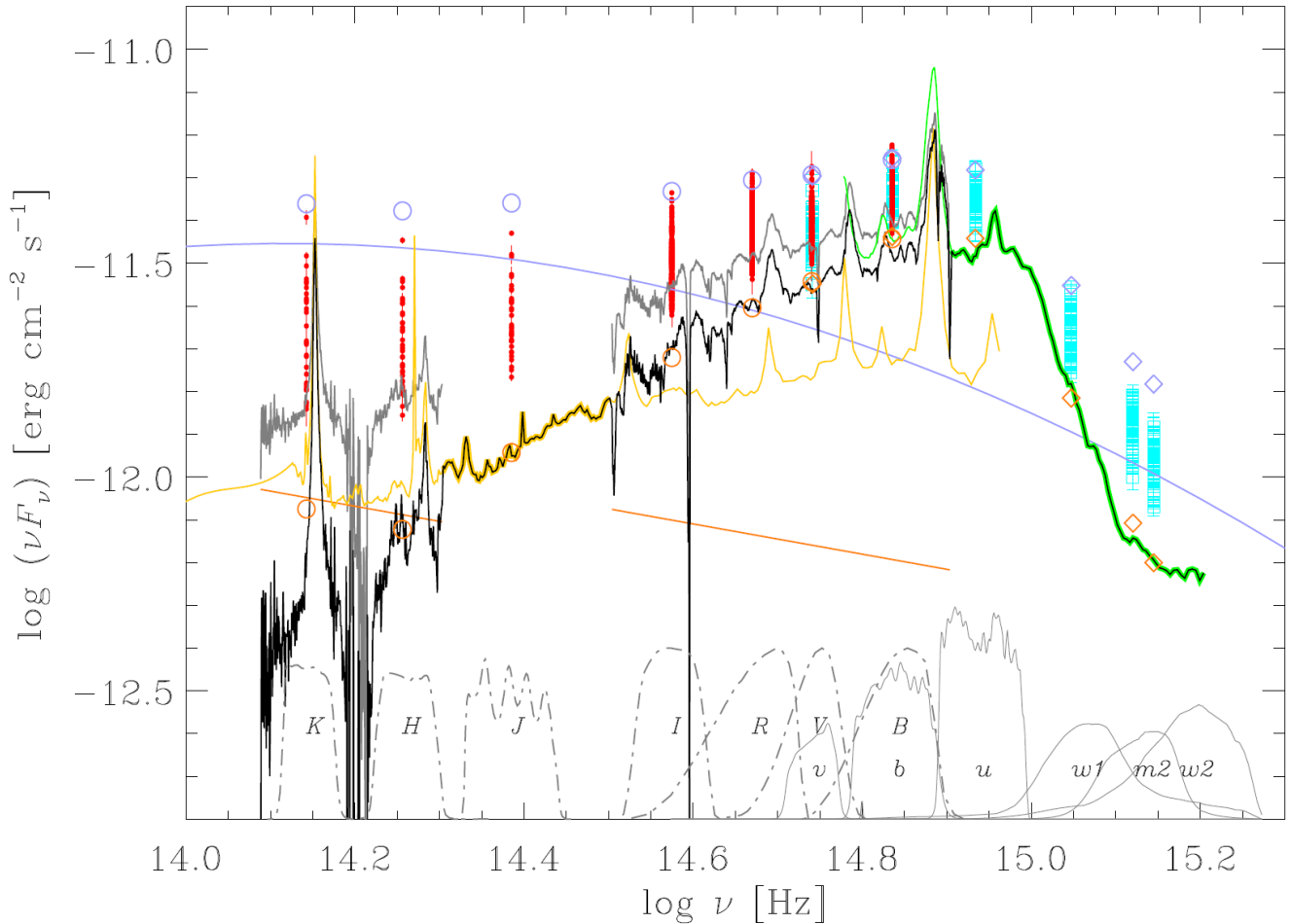


Фигура 16 В-V цветови индекси като функция на времето (среден панел) и светимост (долен панел); пунктираната синя линия обозначава средните стойности. Крива на блясъка във V филтър е показана за сравнение в горния панел. Черните символи показват всички наблюдения, а сините – само тези, използвани за получаването на цветовите индекси. В долния панел с червена линия е изобразен линейна апроксимация на данните. Спектралният индекс  $\alpha$  от закона  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$  е показан вдясно. Лилавите символи са данните от UVOT (Raiteri et al., 2019).

Въз основа на инфрачервените наблюдения от WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer), 2MASS (Two Micron All-Sky Survey), Campo Imperatore и Teide observatories, Raiteri et al. (2014) съставя модел на спектралното разпределение на енергията в диапазона от инфрачервената до ултравиолетовата област. Моделът представлява суперпозиция от две компоненти – релятивистка струя и ядрена термална компонента, включваща излъчването от акреционния диск и областта на широките линии. До този момент моделите, описващи ядрената компонента не са били много точни, но благодарение на получените фотометрични и спектроскопични наблюдения по време на двугодишната кампания към WEBT, моделът може да се прецизира и да се установи приносът на топлинното излъчване в различните диапазони. На фигура 17 е представено спектрално разпределение на енергията на 4C 71.07 от близката инфрачервена област до ултравиолетовата. Всички данни са коригирани за Галактична екстинкция. Получени са 24 оптични спектъра (12 от WHT и 12 от NOT) и два инфрачервени от TNG. Спектрите включват излъчването от двете компоненти на източника. За да се отдели излъчването от ВВВ, първо трябва да се премахне нетоплинното излъчване от релятивистката струя, което може да се моделира със степенен закон. След премахването ѝ остава излъчването само от ядрената компонента. Сравнението на спектралното излъчване на ядрената компонента с модел на средностатистически квазар (Polletta et al., 2007 and Lusso et al., 2015) показва, че излъчването от ВВВ има значителен принос (фиг. 17). От тук може да се изчисли фотометричният принос на ВВВ за отделните филтри.

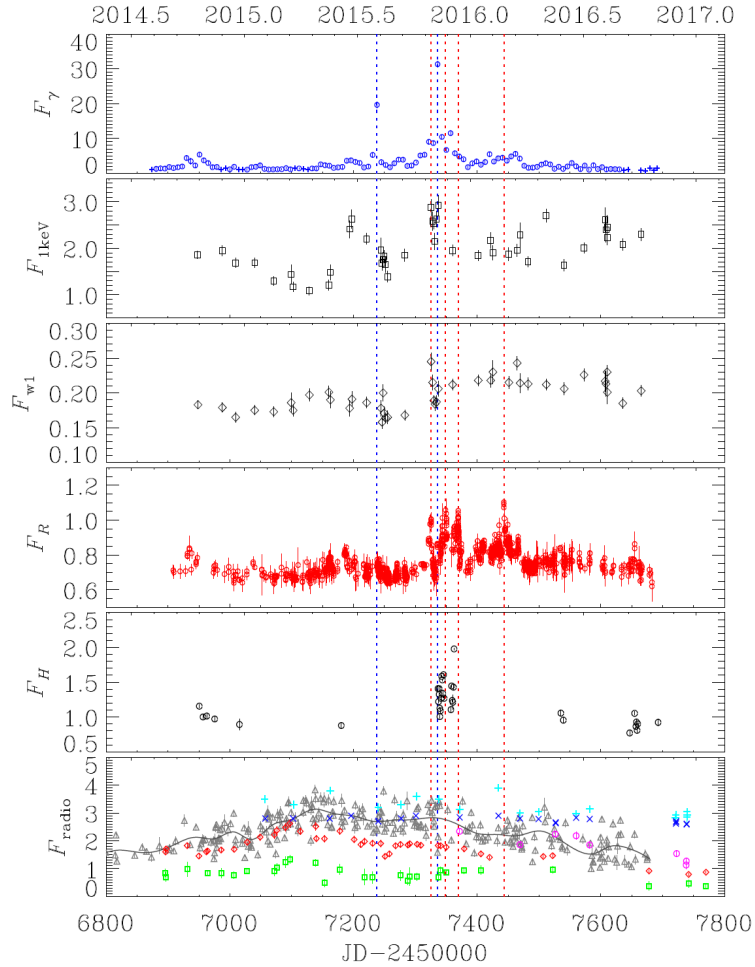
От получените наблюдения може да се оцени и болометричната светимост на диска. Това става чрез апроксимиране на излъчването от ВВВ с полином от трета степен и стойността, която се получава е  $L_{disc} = 2.45 \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ , приемайки, че фотометричното разстояние е 17585 Мрс. Този резултат е в съгласие със стойността, получена по напълно различен метод от Ghisellini et al. (2010) –  $L_{disc} = 2.25 \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ . Максимумът на топлинното излъчване се намира на  $\log \nu_{rest} \simeq 15.46$  и е със светимост  $(\nu L_\nu)_{peak} = 1.35 \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ . Отношението на светимостта на целия диск към светимостта на максимума е  $L_{disc}/(\nu L_\nu)_{peak} = 1.8$ , което е в съответствие със стойността за такъв тип квазари (Ghisellini & Tavecchio, 2015; Calderone et al., 2013). Честотата на максималното излъчване съвпада и с предсказаната от моделите за акреционни дискове с такава светимост (Hubeny et al., 2000). От светимостта на диска може да се определи масата на черната дупка и акреционния темп (Calderone et al., 2013). Масата на свръхмасивната черна дупка на блазара 4C 71.07 е  $M_{BH} = (1.61 - 1.62) \times 10^9 M_\odot$ , а акреционният темп на диска е  $M = (18.0 - 18.3) M_\odot \text{ yr}^{-1}$ .

Сравнение на поведението на 4C 71.07 на различни дължини на вълната (от гама- до радиодиапазона) е представено на фигура 18. В кривата на блясъка в гама-диапазона се наблюдават две отличителни повишавания на блясъка ( $JD = 2457238$  и  $JD = 2457336$ ). Рентгеновите наблюдения показват повишаване в излъчването, съвпадащо с втория пик в гама диапазона. По време на първия липсват данни, но се забелязва повишаване в излъчването в периода преди това. Друг максимум в рентгеновата област се наблюдава при



Фигура 17 Спектрално разпределение на енергията от близката инфрачервена до ултра-виолетовата област (Raiteri et al., 2019). Червените и сините символи отговарят на данни, получени от WEBT и Swift-UVOT. Средният инфрачервен и оптичен поток е показан в сиво; степенните закони, използвани за корекция на синхротронното излъчване от джета, са обозначени с оранжеви линии. Примерни модели за спектрално излъчване на квазари са показани в светло оранжево (Polleta et al., 2007) и зелено (Lusso et al., 2015). Финалният емпиричен модел за 4C 71.07 е представен с черна линия. Виолетовата линия представя излъчването от релятивистката струя по време на високо ниво на активност.

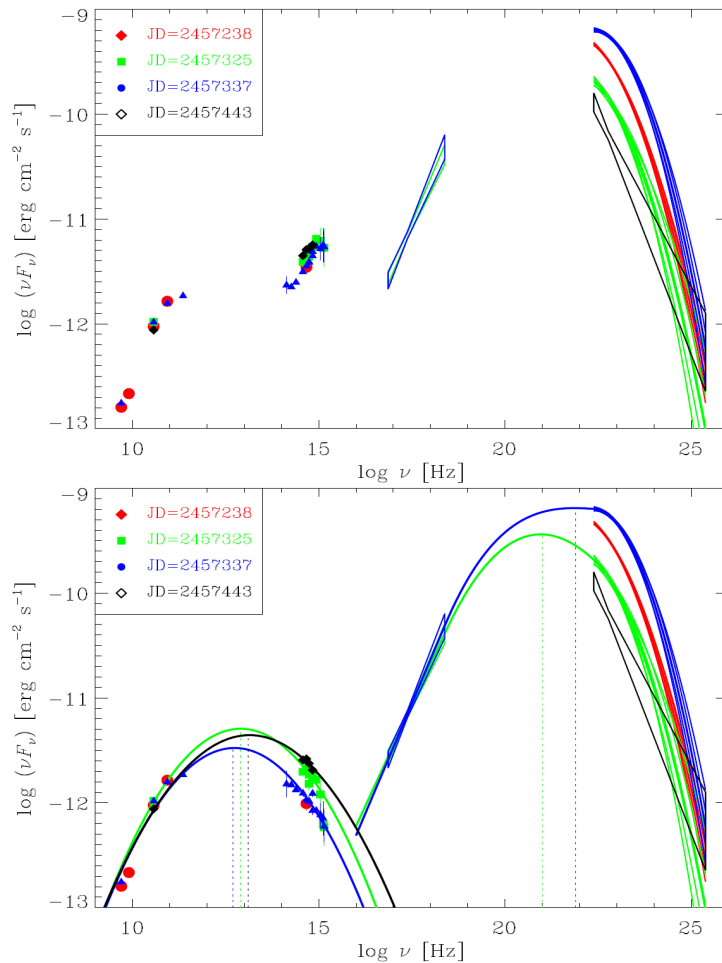




Фигура 18 Многовълнова крива на блясъка на 4C 71.07 (Raiteri et al., 2019). От горе надолу: *i*) поток ( $10^{-7} \text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) в диапазона 0.1-300 GeV от Fermi-LAT; *ii*) плътност на потока ( $\mu\text{Jy}$ ) при 1 keV от Swift-XRT; *iii*) плътност на потока (mJy) при *w1* филтър от Swift-UVOT; *iv*) плътност на потока (mJy) в R филтър; *v*) плътност на потока (mJy) в H филтър; *vi*) плътност на потока (Jy) в радио диапазона на 5 GHz (циан), 8 GHz (синьо), 24 GHz (виолетово), 37 GHz (сиво), 86 GHz (червено), 228 GHz (зелено). Сините и червените вертикални линии обозначават повишавания на блясъка в гама- и оптичeskия диапазон.

$JD = 2457325$ , който съвпада с максимуми в ултравиолетовата и оптичeskата област. Три забележителни нива на излъчване в рентгеновата област се достигат на  $JD = 2457197$ ,  $JD = 2457511$  и  $JD = 2457607$ . При първия максимум се наблюдава леко повишаване в излъчването в оптичeskата област и гама-диапазона, при втория повишаване само в гама-диапазона, а при третия не се наблюдава съпоставяне с промяна на блясъка в други области от електромагнитния спектър. В радиодиапазона на честотите 37, 86 и 228 GHz се наблюдава повишаване в излъчването преди останалите диапазони, след което постепенно намалява.

Спектрални разпределения на енергиите за четири епохи са представени на фигура 19. Две епохи отговарят на пиковете в гама-диапазона, а другите на първия и четвъртия оптичен максимум. В горния панел е изобразено пълното излъчване на източника (ядрена компонента и релятивистка струя), а в долния панел – излъчването само от релятивистката

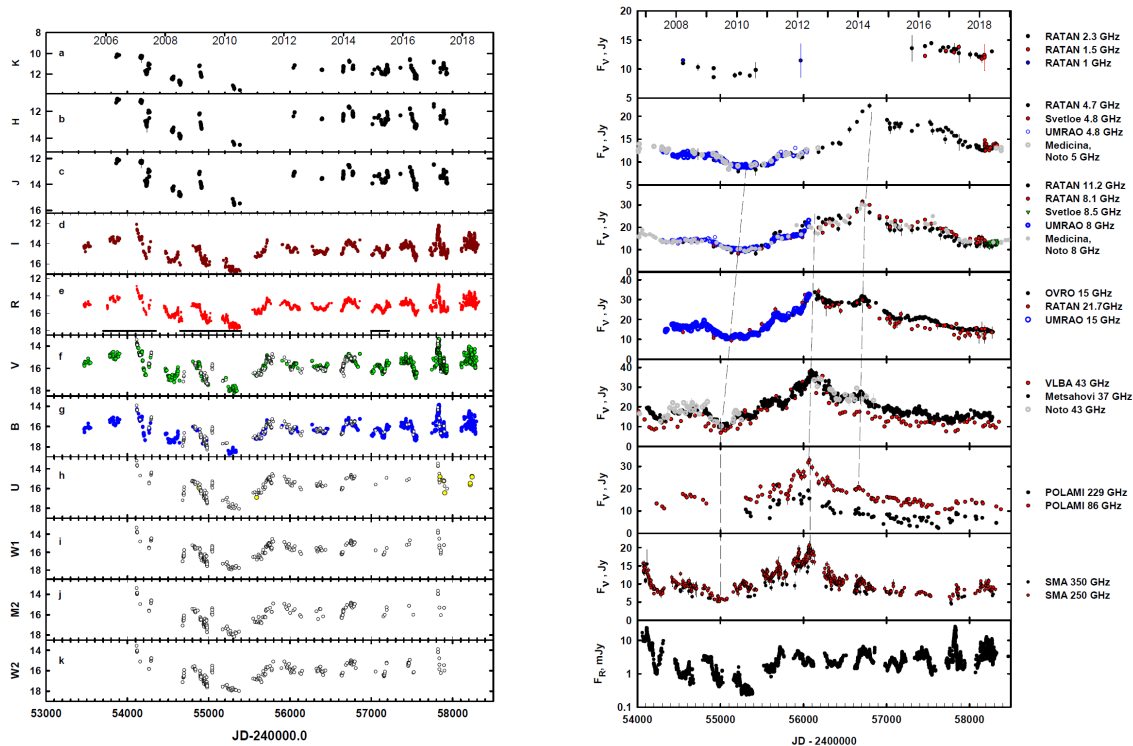


Фигура 19 Спектрално разпределение на енергията на 4C 71.07 за четири епохи (Raiteri et al., 2019).

струя. От тази графика се забелязва, че с повишаването на яркостта от близката инфрачервена област до ултравиолетовата, яркостта в гама-диапазона намалява. Също така може да се изчисли и болOMETричната светимост на релятивистката струя. На  $JD = 2457325$   $L_{jet} = 9.42 \times 10^{49} \text{ erg s}^{-1}$ , като 98.5% се дължат на високоенергетичното излъчване.

### 5.3 3C 279

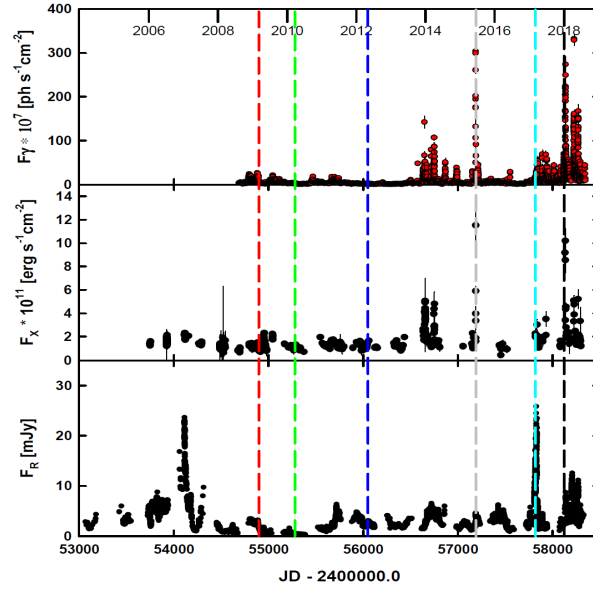
Квazarът 3C 279 е от тип FSRQ с червено отместване  $z = 0.5362$  (Marziani et. al, 1996) и за него са характерни големи промени на яркостта му в целия електромагнитен спектър (повече от 5 звездни величини в оптичния диапазон; Mead et al., 1990). Поради тази причина е обект на изследване в много многовъълнови кампании и през 1996 г. е наблюдавано едновременно повишаване на блясъка в рентгеновия и гама-диапазона (Wehrle et al., 1998). След изстрелването на Fermi са проведени наблюдателни кампании във възможно най-широк въълнови диапазон с цел да се изследва променливостта и да се подобрят знанията за 3C 279. Спектрални наблюдения, получени от Steward Observatory, показват наличието на силни “червени крила” при линията на  $Mg II$  (Punsly, 2013). Радиоизслед-



Фигура 20 Криви на бляска от радио- до ултравиолетовия диапазон на 3C 279 за периода 2005-2018 година (Larionov et al., 2020).

ванията показват движения на отделни структури в релятивистката струя със скорост от 4c до 22c. Rani et al. (2018) установяват, че релятивистката струя сключва ъгъл с лъча на зрение  $\Theta \leq 2.6$ , а Qian et al. (2019) предполагат, че тя може да прецесира и това да се дължи на система от две свръхмасивни черни дупки в ядрото. В продължение на едно десетилетие (1996-2007) е проведен мониторинг в радио- (14.5 GHz), оптичния (R филтър) и рентгеновия диапазон. В резултат на това е намерена силна зависимост между оптичния и рентгеновия поток, а радиопроменливостта изостава с над 100 дена от тях (Chatterjee et al., 2008).

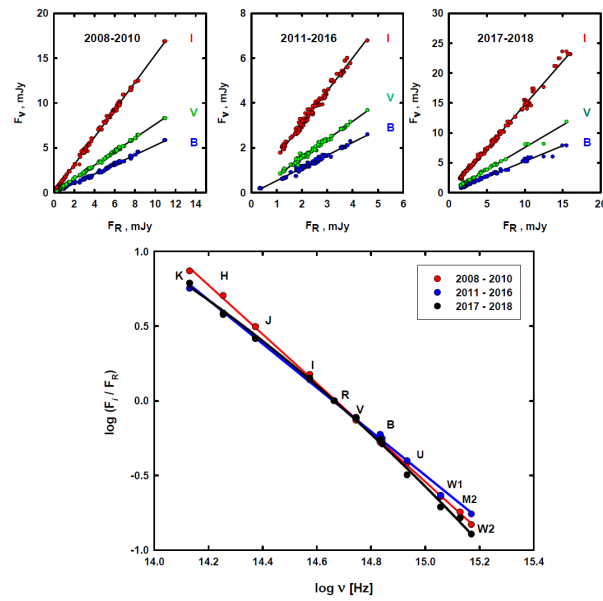
Криви на бляска на 3C 279 са показани на фигура 20 (оптично и радиоизлъчване) и фигура 21 (високоенергетично излъчване – Fermi LAT и Swift XRT). Както е характерно за наблюдателните кампании на WEBT, те са доста плътни и с добро покритие по време за всеки наблюдателен сезон (близо 5000 точки в R филтър и 1000-1500 за B, V и I). Променливостта, която се наблюдава, може да се дължи на наслагването на излъчването от отделни променливи компоненти. Hagen-Thorn et al. (2008) предлагат метод за отделянето на приноса на всяка компонента при променливост в кратки времеви интервали. Методът се базира на построяването на диаграми на плътността на потока за отделните филтри и относително спектрално разпределение на енергията с получените наклони от отношенията на потока в използваните филтри. Този подход е използван и в настоящето изследване, и на фиг. 22 е представена плътността на потока във B,V,I филтър към тази в R филтър. Горните три панела са получени при различен интервал от време след повишаване на активността. Заедно с аналогични зависимости в ултравиолетовата и



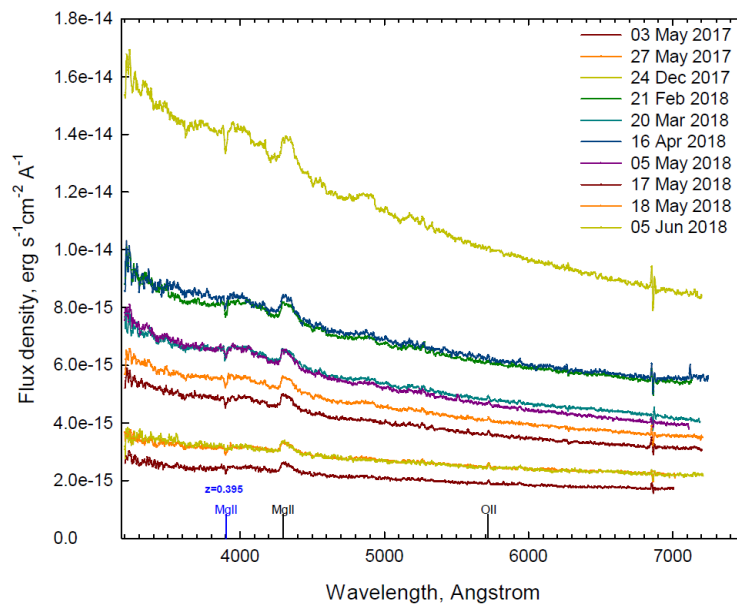
Фигура 21 Криви на бляска на 3C 279 във високите енергии и R филтър за сравнение в периода 2006-2018 година (Larionov et al., 2020).

инфрачервената област, може да се разграничи относителният спектър на променливата компонента (долния панел). Така могат да се определят промените на спектралния индекс  $\alpha$  в ултравиолетовия и инфрачервения диапазон. Могат да се разгледат три времеви диапазона: 2008-2010 (период на понижена активност), 2011-2016 (период на нормална активност) и 2017-2018 (период на повишена активност). Тогава за стойности на спектрален индекс се получават  $\alpha_{2008-2010} = 1.65 \pm 0.02$ ;  $\alpha_{2011-2016} = 1.47 \pm 0.02$ ;  $\alpha_{2017-2018} = 1.60 \pm 0.02$ . Тези стойности се отнасят за честота, отговаряща на R филтър и са валидни само за променливата компонента, а не за цялото излъчване.

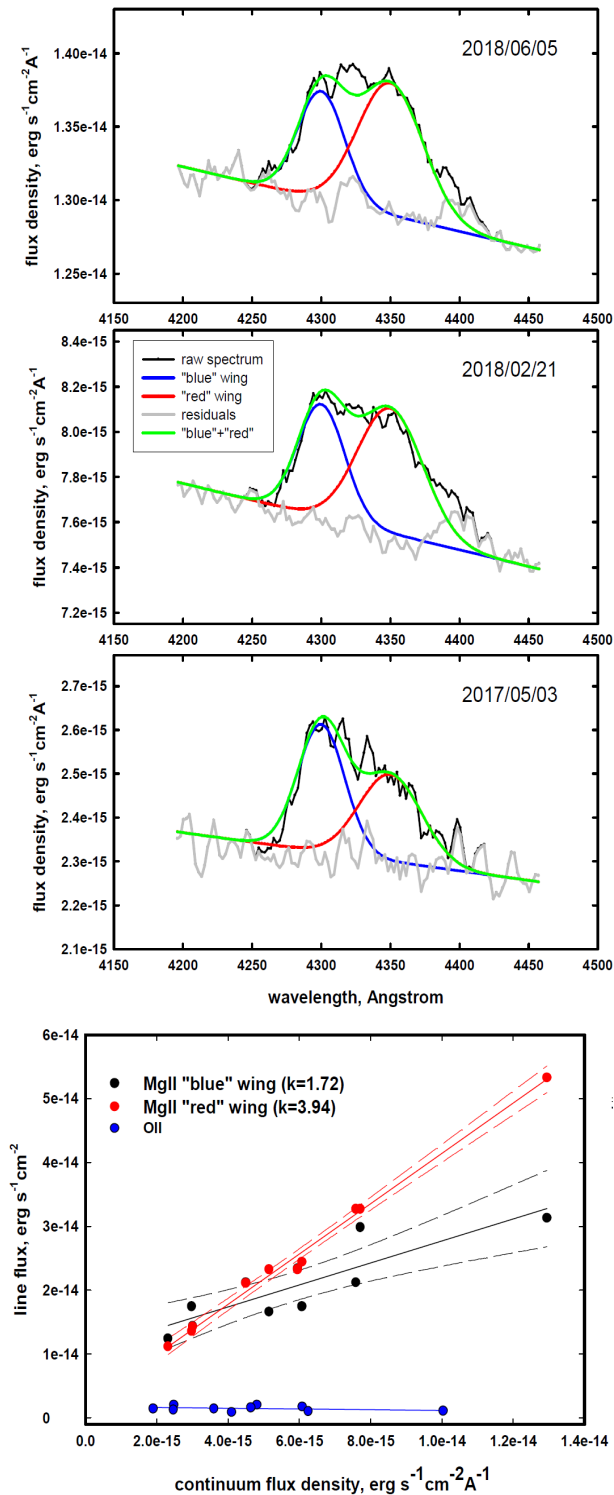
Чрез 4.3 m DCT телескоп са получени оптични спектри на 3C 279 (фиг. 23). В спектъра се забелязват емисионните линии на  $Mg II$  ( $\lambda 2800 \text{ \AA}$ ), отместена на  $\lambda 4280 \text{ \AA}$  и линията на  $O II$ , както и абсорбционна линия на  $Mg II$  ( $\lambda 3906 \text{ \AA}$ ) породена от галактика по лъча на зрение на  $z = 0.395$  (Stocke et al., 1998). Изследването на спектъра разкрива асиметрия в  $Mg II$  емисионната линия (отбелязана от Punsly, 2013) и корелация между нейния поток и потока от континуума.  $Mg II$  линията може да се представи като комбинация от два насложени компонента с Гаусова функция и да се построи зависимост на потока от “синята” и “червената” компонента към потока от континуума (фиг. 24). Подобна зависимост е открита и при  $Mg II$  линия на квазара 3C 454.3 (León-Tavares et al., 2013). Двуконентният профил на емисионната линия може да се обясни с попадането на материя върху акреционния диск. Тогава скоростта на “червената” компонента е  $\sim 3500 \text{ km s}^{-1}$ . Скоростта на падащо вещество на разстояние  $R_{pc} = 1 \text{ pc}$  от черна дупка с маса  $M_9 = 10^9 M_\odot$  е  $v_{in} = 2940(M_9/R_{pc}^{1/2}) \text{ km s}^{-1}$ . Масата на черната дупка при 3C 279 се оценява на  $10^{8.9} M_\odot$  (Nilsson et al., 2009). Тогава при скорост  $v_{in} \sim 3500 \text{ km s}^{-1}$  за разстояние от черната дупка се получава  $R_{pc} \sim 0.6 \text{ pc}$ .



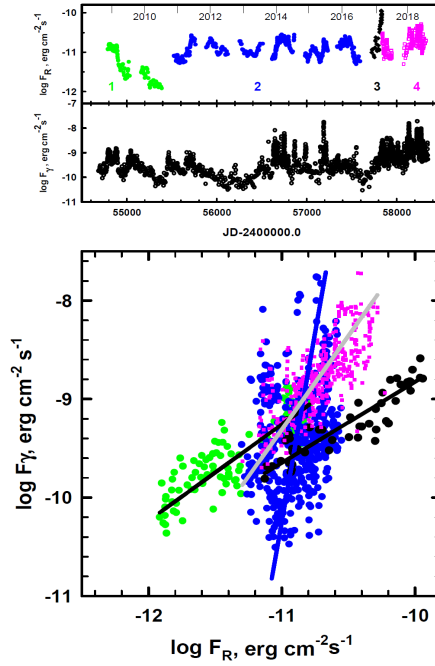
Фигура 22 Поток-поток зависимост на  $F_B$ ,  $F_V$  и  $F_I$  от  $F_R$  (горните три панела). Относителен спектър на континуума от променливата компонента за излъчване от ултравиолетовата до инфрачервената област (долния панел) (Larionov et al., 2020).



Фигура 23 Спектри на 3C 279 от 2017 и 2018 година (Larionov et al., 2020).



Фигура 24 В горните три панела са представени примери на Гаусова апроксимация на профила на линията  $Mg II$  за различни нива на континуума. В долния панел е представена зависимостта на потока от  $Mg II$  линията към континуума и тази на  $O II$  линията за сравнение (Larionov et al., 2020).



Фигура 25 В горните два панела са представени криви на блясъка в оптичния и гама-диапазона. С цветове са обозначени различни нива на активност. В долния панел – оптическа-гама поток-поток диаграма. Наклоните на линейните апроксимации са: (1)  $0.97 \pm 0.04$ , (2)  $7.7 \pm 1.2$ , (3)  $0.82 \pm 0.06$ , (4)  $1.90 \pm 0.09$  (Larionov et al., 2020).

Рентгеновите и гама-наблюденията показват наличието на силна корелация без значимо времево отместване между тях. Слаба корелация се забелязва и във вариациите на потока в оптичния и гама-диапазона с отместване от  $1.06 \pm 0.47$  дни. Въпреки това има детектирани повишавания на блясъка само в единия от двата диапазона. На фиг. 25 са представени криви на блясъка в оптичния и гама-диапазона и тяхното отношение за различни етапи на активност. Наклоните на зависимостта  $\log F_\gamma - \log F_R$  за четирите представени етапа са: (1)  $0.97 \pm 0.04$ , (2)  $7.7 \pm 1.2$ , (3)  $0.82 \pm 0.06$ , (4)  $1.90 \pm 0.09$ . Тези промени в наклона ни дават информация за промяната на различни физични параметри, които са разгледани подробно в Larionov et al., 2020. В статията е описана и кинематиката на джетата, изследвана чрез VLBA радионаблюдения.

## 5.4 BL Lac

Последно повишаване на блясъка е засечено през лятото на 2021 г. (Minev et al., 2021). По време на една от многовълновите кампании се наблюдават ниски нива на активност в гама-диапазона (Abdo et al., 2011b), а слабото излъчване на гама-лъчи се обяснява с процеси, свързани с Комптъново разсейване (Madejski et al., 1999; Böttcher & Bloom, 2000). По наблюдения към WEBT за периода 2008-2012 година Raiteri et al. (2013) допускат, че променливостта на блазара може да се дължи на промяна на ориентацията на излъчващите области. В допълнение на това Wehrle et al. (2016) изследват рентгеновото (NuSTAR)

и гама-излъчване (Herschel) и попълват пропуските в спектралното разпределение във високите енергии. Те наблюдават спорадични промени в гама-диапазона и обясняват повишеното излъчване с наличието на турбулентна плазма на разстояние 5 pc от черната дупка.

Многовълновото поведение на BL Lac е представено на фиг. 26. Излъчването в гама-диапазона се увеличава в рамките на десет дена, достигайки максимум на 29-ти септември (MJD: 58755), след което спада за два дена. В оптичeskия диапазон също се наблюдава повишаване на блясъка, като в R филтър излъчването се променя от  $\sim 20$  mJy до  $\sim 35$  mJy, след което отново спада до 20 mJy. В оптиката се наблюдават флуктуации на кратки времеви скали (от часове до дни), които няма как да бъдат засечени в гама-диапазона поради ниския поток и малкия брой регистрации на източника. Голямото повишаване на блясъка от 19-ти септември (MJD: 58745) е идентифицирано на всички дължини на вълната.

На фигура 27 са сравнени криви на блясъка в гама-диапазона от Fermi-LAT и в оптичeskата област от TESS и WEBT (R филтър). Максимумът на гама-излъчването от 29-ти септември се вижда в по-големи детайли. За тази дата данните от WEBT са оскъдни, но от TESS има добро покритие и се наблюдават отделни структури. Високата активност във видимата област от 19-ти септември е регистрирана и от WEBT, и от TESS.

Голямата плътност на наблюдателни точки от TESS позволява да се направи позадълбочен анализ на кривата на блясъка. Наблюденията могат да се разделят на отделни еднoчасови интервали, всеки от които съдържа по 30 фотометрични точки. Всяка отделна еднoчасова крива на блясъка се проверява за променливост чрез ANOVA (analysis of variance; Diego 2010). Методът засича 107 променливи периода, което е  $\sim 20\%$  от целия наблюдателен период.

Резултатите от ANOVA позволяват да се определи и времевата скала на оптичeskата променливост  $\tau_{opt}$ . За целта се разглеждат двойките измервания, които отговарят на критерия

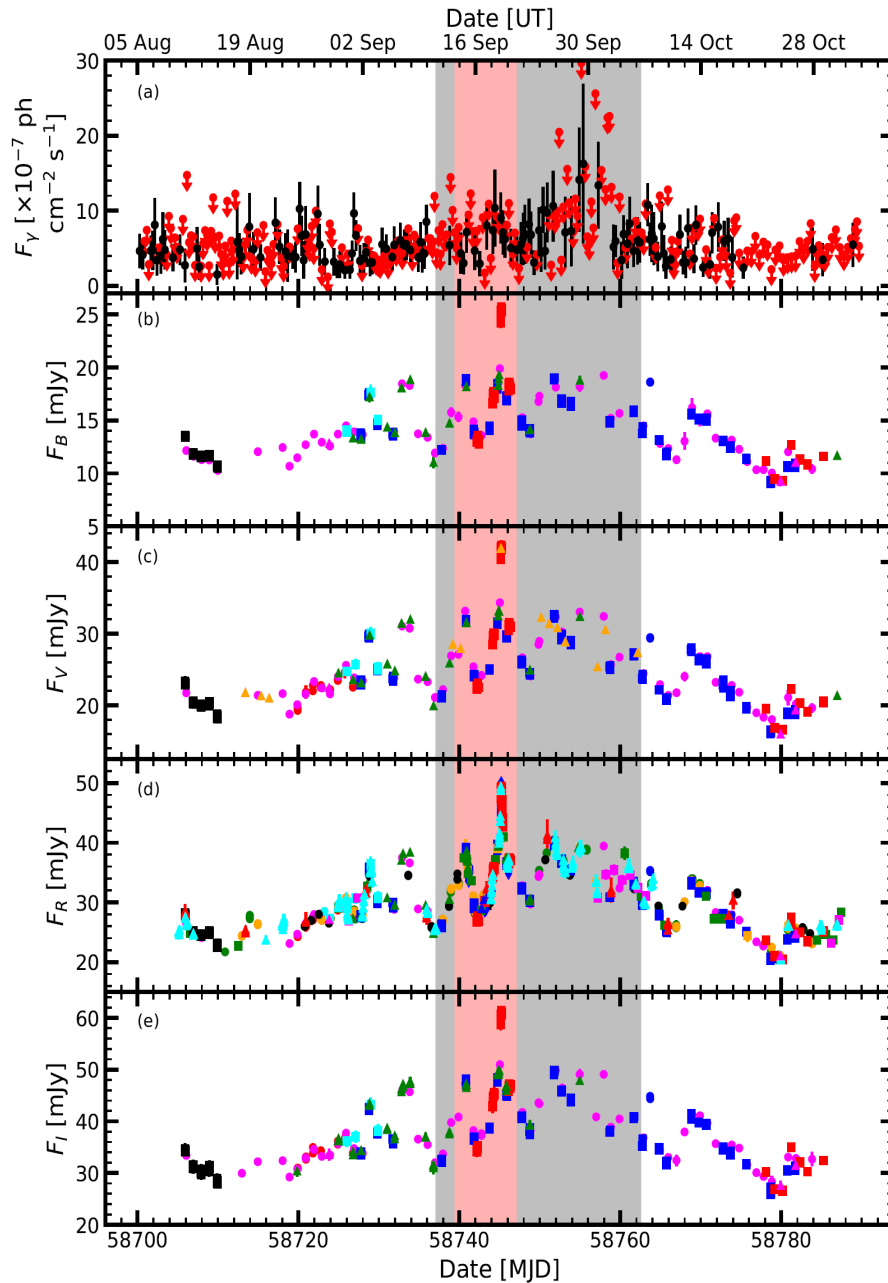
$$S_2 - S_1 > \frac{3}{2}(\sigma_{S_1} + \sigma_{S_2}), \text{ където } S_i \text{ и } \sigma_{S_i} \quad (10)$$

са потокът и грешката на всяко измерване. От  $\sim 50000$  възможни комбинации,  $\sim 11000$  отговарят на този критерий. За тези двойки  $\tau_{opt}$  се пресмята по следния начин (Burbidge et al., 1974):

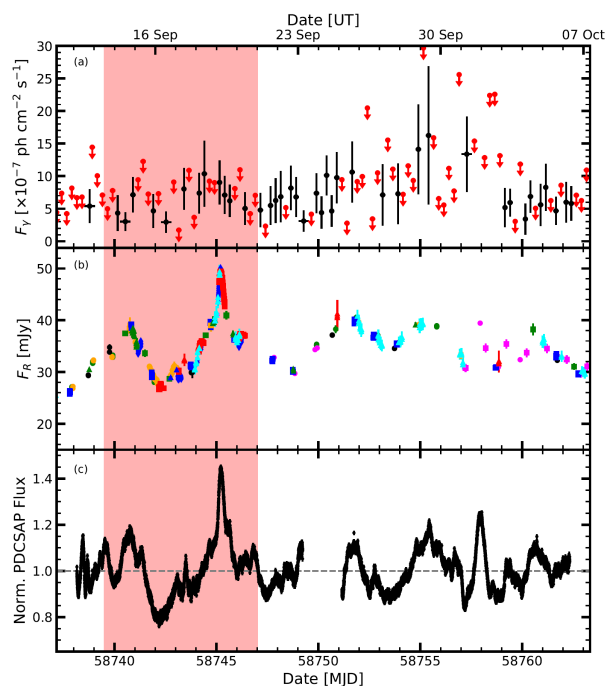
$$\tau_{opt} = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{S_2}{S_1}\right)}, \text{ където } S_2 > S_1 \text{ и } \Delta t = |t_2 - t_1| \quad (11)$$

Средният времеви интервал е 15 часа със стандартно отклонение от 7 часа (фиг. 28). Същият метод за променливост е приложен и в рентгеновата област (по данните от Swift XRT и NuSTAR). От 210 наблюдателни двойки, 69 отговарят на критерия за променливост и средният времеви интервал е 36 часа със стандартно отклонение от 10 часа.

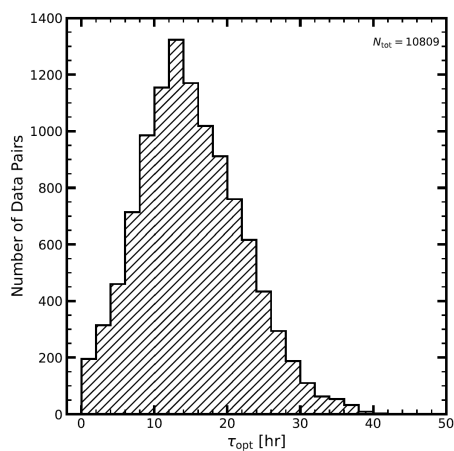




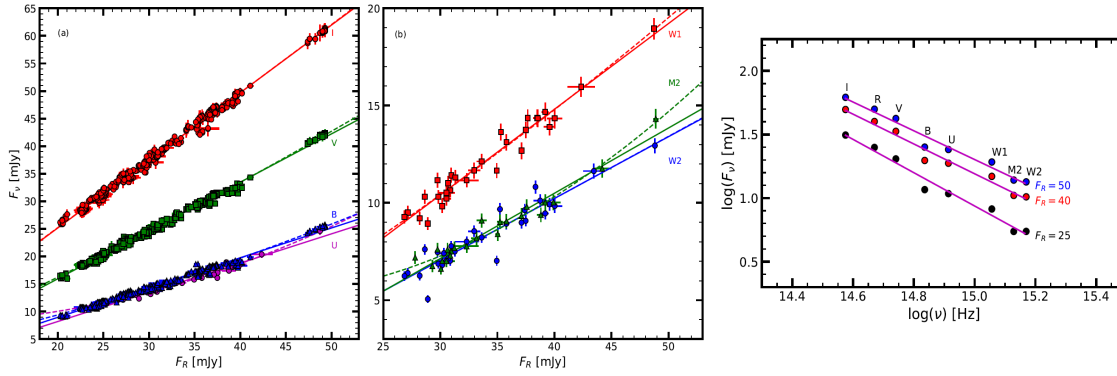
Фигура 26 Криви на блясъка по време на WEBT кампанията (Weaver et al., 2020): (a) Fermi-LAT гама-излъчване, със стрелки надолу са обозначени горни граници; (b-e) WEBT BVRI излъчване. Цветовете и символите представят наблюдения от различните телескопи. Във всички панели сивата площ обозначава времето на наблюдение с TESS, а червената площ наблюденията с NuSTAR и Swift.



Фигура 27 BL Lac – TESS наблюдения (Weaver et al., 2020): а) Fermi-LAT гама-излъчване, със стрелки надолу са обозначени горни граници; (b) WEBT излъчване в R филтър, цветовете и символите представят наблюдения от различните телескопи); (c) TESS 2-минутен интервал, нормализиран TESS PDCSAP поток. Във всички панели червената площ обозначава времето на наблюдения с NuSTAR и Swift.



Фигура 28 Хистограма на времевата променливост на BL Lac по данни от TESS (Weaver et al., 2020).



Фигура 29 Зависимост поток-поток в оптичския и ултравиолетовия диапазон (Weaver et al., 2020). (a) WEBT BVI и Swift U към R филтър. (b) Swift W1, M2, и W2 към R филтър. В тези два панела плътните и пунктирани линии представляват линейна апроксимация и полином от втора степен съответно. В десния панел са представени синтетични спектри за 3 различни нива на излъчване в R филтър, 25 mJy, 40 mJy и 50 mJy, розовите линии представляват линейна апроксимация към спектрите.

Чрез анализ на данните от инфрачервения до ултравиолетовия диапазон, излъчването може да се раздели на отделни компоненти, всяка от които със собствени свойства на променливост. За да се изолира приносът на всяка компонента се използва методът на връзките поток-поток в отделните филтри (Choloniewski 1981; Hagen-Thorn 1997). На фигура 29 са представени връзките поток-поток в оптичския и ултравиолетовия диапазон към R филтър по наблюдения от WEBT (левите два панела). Използвани са само ултравиолетови наблюдения, които са максимално близко по време до наблюдения в R филтър, а за BVI зависимостите – наблюдения, които са почти едновременни. В десния панел на фигура 29 е показан синтетичен спектър на BL Lac за три нива на излъчване в R филтър ( $F_R = 25, 40, 50$  mJy). Коэффициентите, описващи степенен закон от вида  $\log(F_\nu) = \alpha \log(\nu) + \beta$ , са:

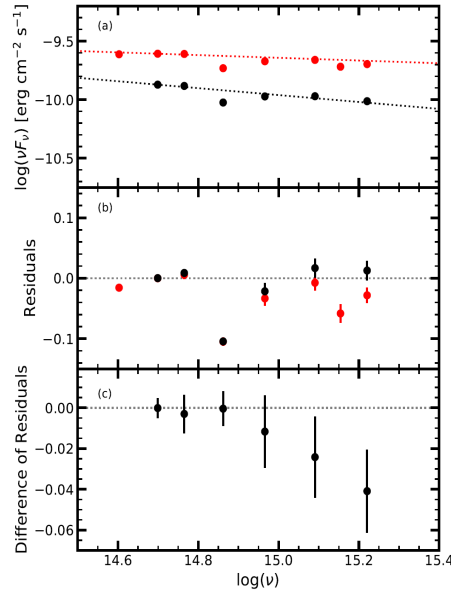
$$- F_R = 25 \text{ mJy: } \alpha = -1.31 \pm 0.08; \beta = 20.6 \pm 1.2$$

$$- F_R = 40 \text{ mJy: } \alpha = -1.17 \pm 0.08; \beta = 18.6 \pm 1.2$$

$$- F_R = 50 \text{ mJy: } \alpha = -1.13 \pm 0.08; \beta = 18.3 \pm 1.2$$

където  $\alpha$  е оптичския спектрален индекс. При различна яркост се наблюдава лека промяна в наклона на синтетичния спектър, като с повишаване на яркостта наклонът намалява.

Raiteri et al. (2009) установяват термално оптично и ултравиолетово излъчване в спектъра на BL Lac, породено от акреционен диск. Те моделират диска като абсолютно черно тяло с температура  $\geq 20000$  K и светимост  $6 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ . За да се изследва приносът на акреционния диск към спектралното разпределение на енергията са разгледани два случая на висока и ниска активност (фиг. 30 (a)). Данните са апроксимирани със степенен



Фигура 30 BL Lac: (а) оптично и ултравиолетово спектрално разпределение на енергията на BL Lac за ниско ниво на активност (в черно) и високо ниво (червено). (b) отклонения от степенния закон. (c) разлика между отклоненията от степенния закон при високо и ниско ниво на активност (Weaver et al., 2020).

закон с вече получените спектрални индекси и малките отклонения от апроксимацията показват, че излъчването може да се опише по този начин (фиг. 30 (b)). По време на ниска активност се наблюдава ултравиолетов ексцес. Това ясно се вижда на фиг. 30 (c), където са представени разликите на отклоненията от апроксимацията при високо и ниско ниво на активност на BL Lac. Такава разлика не би трябвало да се наблюдава според параметрите на акреционния диск, определени от Raiteri et al. (2009). Като се има предвид, че акреционният диск може драстично да промени своето излъчване в рамките на няколко месеца до години (Kaspi et al., 2000), то може да се заключи, че неговият принос в цялостното излъчване на BL Lac е намален през последните години.

При няколко FSRQ източника е наблюдавана корелация между променливостта в оптичното и гама-излъчването за времеви интервали от 0 до  $\sim 3$  дни (Bonning et al., 2009; Gaur et al., 2012; Kushwaha et al., 2017; Gupta et al., 2017). По време на тримесечните многовълнови наблюдения на BL Lac такава корелация се наблюдава за три пика. В R филтър излъчването се повишава съответно с 0.2, 3.4 и 10.0 дни по-рано спрямо гама-излъчването. Анализът на наблюденията от TESS разкрива връзка между оптичния и рентгеновия диапазон. Рентгеновото излъчване изостава с  $0.38^{+0.08}_{-0.11}$  дни за 0.3 – 3 keV,  $0.29^{+0.04}_{-0.09}$  дни за 3 – 10 keV и  $0.051^{+0.007}_{-0.005}$  дни за 10 – 22 keV. Това отместване на излъчването в отделните вълнови диапазони предполага, че източниците им са пространствено разделени. Подобна корелация и излъчване на рентгеновите лъчи е характерна за обратно Комптъново разсейване на фотони (с честота от  $\sim 10^{12}$  Hz до  $\sim 10^{15}$  Hz) с релятивистки електрони на границата на релятивистката струя (Marscher & Gear, 1985). Времето закъснение между

ускорението и загубата на енергия на излъчваща плазма се дава от следното уравнение:

$$t'_{loss} \sim 7.7 \times 10^8 [(B^2 + 8\pi u_{ph})\gamma]^{-1} s, \quad (12)$$

където  $B$  е силата на магнитното поле, измерена в Gauss,  $u_{ph}$  е енергийната плътност на фотоните за обратно Комптъново разсейване в  $\text{erg cm}^{-3}$  и  $\gamma$  е електронната енергия в масови единици в покой. За системата на наблюдателя е в сила следната зависимост  $t_{loss} = t'_{loss}(1+z)/\delta$ , където  $\delta$  е Доплеровият фактор. От спектралното разпределение на енергията се вижда, че синхротронното инфрачервено излъчване и обратното Комптъново гама-излъчване са съизмерими. Тогава може да се приеме, че  $B^2 \sim 8\pi u_{ph}$  и стойността  $\gamma$  за синхротронно излъчване за дадена честота на наблюдение е:

$$\gamma \sim 6.0 \times 10^{-4} [\nu(1+z)/(B\delta)]^{-1/2}, \quad (13)$$

където  $\delta \approx 8$  (Jorstad et al., 2017) е Доплеровият фактор и  $z = 0.069$  е червеното отместване. Средната стойност на  $\gamma$  за обратно Комптъново разсейване зависи от честотата като  $\nu^{1/2}$ . Тогава:

$$t_{loss} \sim 0.8 \left[ \frac{B(1+z)}{\delta} \right]^{1/2} \left( \frac{\nu}{\nu_{TESS}} \right)^{-1/2} (B^2 + 8\pi u_{ph})^{-1}, \quad (14)$$

където  $\nu_{TESS} = 4 \times 10^{14}$  Hz е средната честота на наблюденията от TESS, а  $t_{loss}$  се измерва в дни. Минималната времева променливост, детектирана от TESS (0.5 hr), може да се приравни на  $t_{loss}$  и уравнението да се реши за  $B$ . Тогава за стойността на магнитното поле се получава  $B \sim 3$  G.

## 5.5 B2 1420+32

### Повишаване на блясъка през 2020 година

QSO B1420+326 е известен със своята силна променливост във високите енергии. Няколко периода на повишаване на блясъка са наблюдавани до този момент от Fermi-LAT, като последният започва през декември 2019 година (Ciprini & Cheung, 2020). На 30-ти и 31-ви декември средно-дневният гама-поток ( $E > 100$  MeV) достига до  $(0.9 \pm 0.1) \times 10^{-6}$   $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  и  $(1.7 \pm 0.2) \times 10^{-6}$   $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , което съответства на повишаване в потока с около 110 и 210 пъти спрямо средния поток за последните осем години. Поради повишената активност във високите енергии, телескопите MAGIC също провеждат наблюдения на обекта. На 21-ви януари 2020 г. за първи път се детектира много високо енергийно излъчване ( $E > 100$  GeV) от QSO B1420+326 (Mirzoyan, 2020). Това е четвъртият най-отдалечен обект с много високо енергийно излъчване. Повишеното ниво на гама-активност е оповестено чрез астрономически телеграми и в наблюденията на блазара се включват обсерватории и в други вълнови диапазони.

Таблица 5 QSO B1420+326 – фотометрични резултати (Atel#13421; Atel#13428)

Дата	U (err)	B (err)	V (err)	R (err)	I (err)	Обсерватория
2020 Jan 24.13	14.44 (0.03)	15.01 (0.03)	14.59 (0.03)	14.16 (0.01)	13.58 (0.02)	Rozhen NAO
2020 Jan 24.35			14.54 (0.04)	14.07 (0.03)	13.42 (0.03)	La Silla
2020 Jan 25.11	14.22 (0.03)	14.81 (0.03)	14.42 (0.03)	13.99 (0.02)	13.45 (0.02)	Rozhen NAO
2020 Jan 26.11	14.82 (0.03)	15.36 (0.03)	14.92 (0.03)	14.46 (0.02)	13.87 (0.02)	Rozhen NAO
2020 Jan 29.34			14.47 (0.08)	14.12 (0.04)	13.70 (0.04)	La Silla

На 19-ти и 22-ри януари рентгеновият апарат Swift ( $0.3 \leq E \leq 10$  KeV) засича повишаване на излъчването –  $(5.6 \pm 0.5) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  и  $(5.8 \pm 0.5) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , докато на 2-ри януари потокът е бил  $(4.4 \pm 0.5) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Ramazani et al., 2020). Повишаване се наблюдава и в двата ултравиолетови филтъра –  $W1 = 12.65 \pm 0.05$  (от 2-ри януари  $W1 = 14.23 \pm 0.06$ ) и  $W2 = 13.52 \pm 0.03$  (от 2-ри януари  $W2 = 14.28 \pm 0.06$ ).

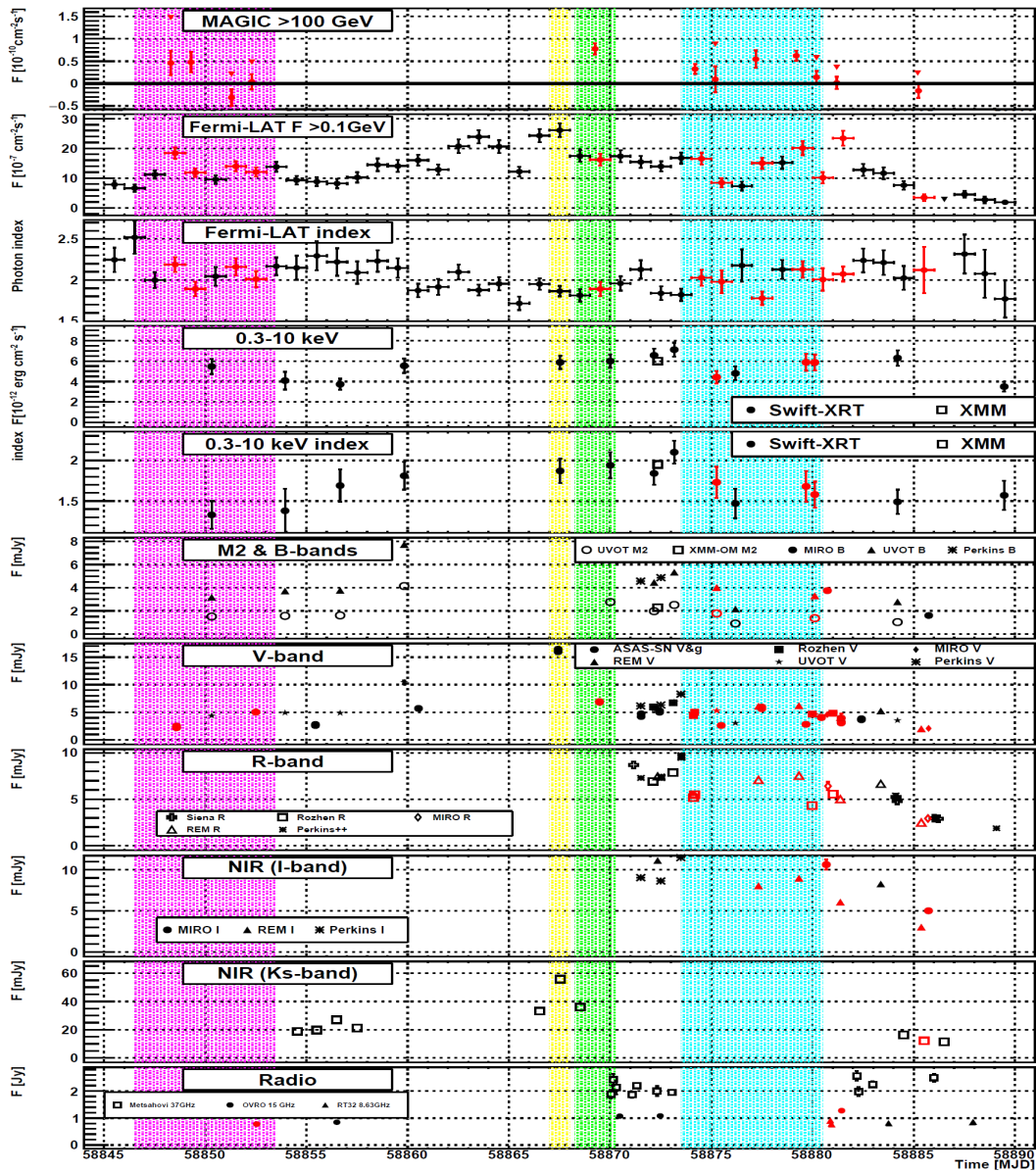
Minev et al. (2020) и D’Ammando et al. (2020) докладват за повишаване на блясъка и в оптичния диапазон. Извършени са фотометрични наблюдения с 2-m и 50/70 cm Шмид телескоп към **НАО Рожен, България**, и 60 cm REM телескоп към La Silla, Chile. Направени са оценки в UBVRi филтри, като са използвани звезди за сравнение от каталозите SDSS DR12 и APASS. Фотометричните резултати са представени в таблица 5.

В радиодиапазона също се наблюдава повишаване в потока (Kharinov, 2020; Marchili et al., 2020). Наблюдения на честота 8.63 GHz са проведени с 32-m телескоп към IAA RAS Badary Radio Astronomical Observatory. Получени са данни от 1-ви, 4-ти и 8-ми февруари:  $835 \pm 48 \text{ mJy}$ ;  $809 \pm 43 \text{ mJy}$  и  $847 \pm 52 \text{ mJy}$ . Този поток е приблизително 1.5-1.8 пъти по-висок спрямо архивните данни от наблюдения през 2007 година. С 64-m Sardinia Radio Telescope (SRT, INAF) обектът е наблюдаван на честоти 6.1 и 23.8 GHz на 29-ти февруари и 21-ви март. Измереният поток за двете епохи е съответно  $775 \pm 10 \text{ mJy}$  (6.1 GHz);  $1640 \pm 30 \text{ mJy}$  (23.8 GHz) и  $847 \pm 10 \text{ mJy}$  (6.1 GHz);  $1710 \pm 30 \text{ mJy}$  (23.8 GHz). За да се направи сравнение с предходните радионаблюдения са интерполирани стойностите за честота 8.63 GHz:  $\sim 940 \text{ mJy}$  и  $\sim 1090 \text{ mJy}$ , което показва, че потокът в радиодиапазона продължава да нараства.

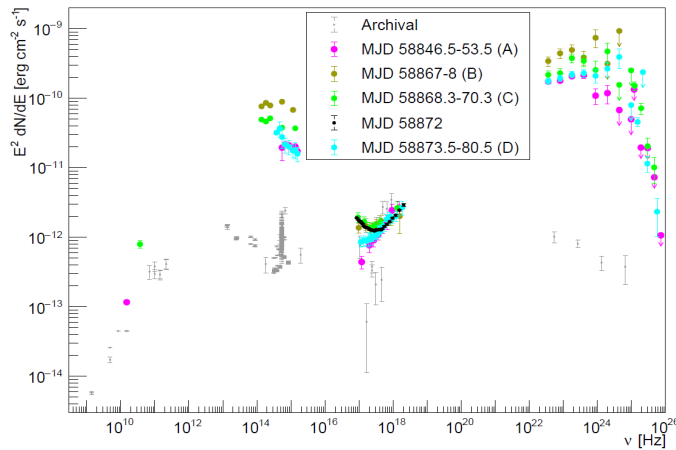
Поради драстичната промяна в излъчването си, QSO B1420+326 привлича вниманието на астрономи, работещи във всички сфери на електромагнитния спектър и са организирани многовъълнови наблюдения. По-подробно описание за самите наблюдения и участващите обсерватории може да намерите в Acciari et al. (2021).

## Резултати от многовъълновите наблюдения

Многовъълнова крива на блясъка е представена на фигура 31. Въз основа на състоянието на източника в най-високите енергии са дефинирани три периода – А: от 29-ти декември 2019 г. до 5-ти януари 2020 г. (MJD=58846.5-58853.5): без детектиране на гама излъчване; С: 20-22 януари 2020 г. (MJD=58868.3-58870.3): повишаване в потока; D: от 25-ти януари 2020 г. до 1-ви февруари 2020 г. (MJD=58873.5-58880.5): проследяване на гама активността



Фигура 31 Многочълнова крива на блясъка на QSO B1420+326 за периода от 28-ми декември 2019 г. (MJD=58845) до 11-ти февруари 2020 г. (MJD=58890) (Acciari et al., 2021). Оптичните и ултравиолетовите наблюдения са коригирани за екстинкция. Точките в червено са едновременни ( $\pm 12$  часа) с наблюдения от MAGIC. Затъмнените периоди показват времеви интервали на 4-те периода на активност. Горните граници на потока в първите два панела са обозначени с триъгълници.



Фигура 32 Многовънново спектрално разпределение на енергията на QSO B1420+326 през януари/февруари 2020 г (Acciari et al., 2021). Цветовете на точките съответстват със зашрихованите области от фиг. 31. В допълнение са включени черни токи от XMM от 24-ти януари 2020 г. (MJD=58872). Точките от MAGIC не са коригирани за EBL. Сивите точки са архивни данни от ASI Space Science Data Center, Fermi-LAT и Swift-XRT.

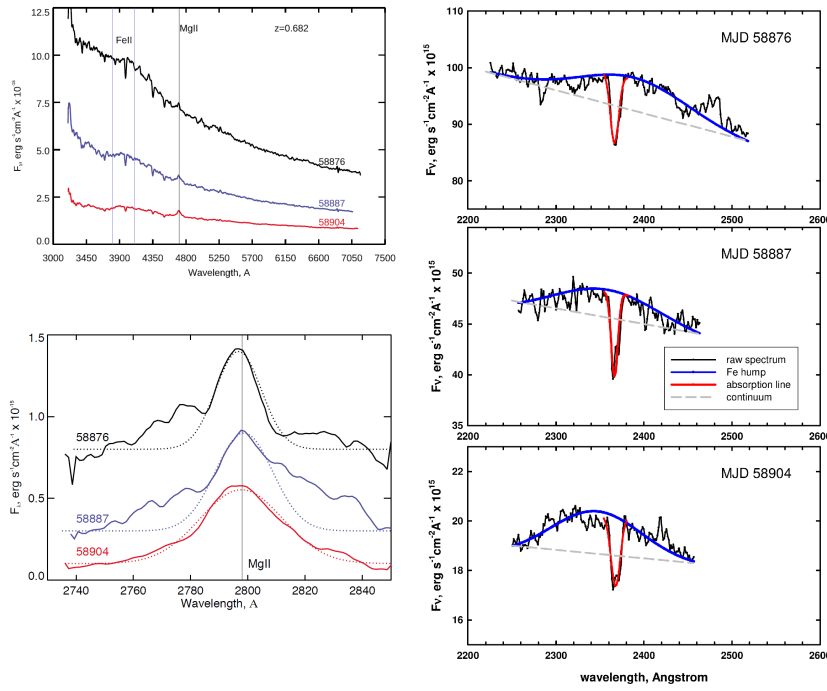
за по-дълъг период от време. В допълнение е добавен и четвърти период – В: 19-20 януари 2020 г. (MJD=58867-58868), в който липсват наблюдения от MAGIC, но се достига максимум на излъчването в оптичната и инфрачервената област, съпроводен с повишаване и във високите енергии. За всеки период е построена крива със спектралното разпределение на енергията (фиг. 32).

Първото детектиране на много високоенергийно излъчване от QSO B1420+326 е осъществено на 20-ти януари 2020 г. (MJD=58868) със статистическа значимост от  $14.6\sigma$ . Наблюдаваният поток от MAGIC ( $> 100$  GeV) достига  $(7.8 \pm 1.3) \times 10^{-11}$  ph cm $^{-2}$  s $^{-1}$ . При последвалите наблюдения (период D) сигналът достига до  $6.6\sigma$  и плътността на потока е приблизително два пъти по-ниска  $\sim (3.9 \pm 0.6) \times 10^{-11}$  ph cm $^{-2}$  s $^{-1}$ .

Блазарът е детектиран във високите енергии около една година по-рано (декември 2018 г.; Cirrini, 2018), като повишава излъчването си с повече от два порядъка спрямо средния поток, определен от 4FGL каталога. През юли 2019 отново се забелязва повишаване в блясъка (Angioni 2019) и са регистрирани фотони с енергия над 10 GeV. На фигура 31 се вижда, че потокът във високите енергии ( $E > 100$  MeV) е променлив с времето. Максимум в дневния поток се достига на 19-ти януари 2020 (MJD=58867):  $(2.6 \pm 0.2) \times 10^{-6}$  cm $^{-2}$  s $^{-1}$ , което е около 300 пъти повече от средния поток от 4FGL. Най-високоенергийните фотони наблюдавани от Fermi-Lat са два дни по-рано (17-ти януари 2020; MJD=58865) с енергия  $\sim 150$  GeV.

В рентгеновото излъчване не се наблюдава силна променливост. Има лек тренд на повишаване на блясъка в периода от 5-25 януари 2020 г. (MJD=58853-58873), като по време на максималното излъчване потокът се увеличава двойно. От фигурата се вижда, че рентгеновият спектрален индекс е променлив – увеличава се около максимума на оптично и гама-излъчване, след което отново спада. Това е признак за отместване на максимума на





Фигура 33 *Горе вляво*: оптичен спектър на QSO B1420+326, получен с LDT. *Долу вляво*: Наблюдавана (пътна линия) и моделирана (пунктирна линия) на  $Mg II$  линия за три епохи. Линиите на 28-ми януари 2020 г. (MJD=58876), 8-ми февруари 2020 г. (MJD=58887) и 25-ти февруари 2020 г. (MJD=58904) са отместени съответно с 0.8, 0.3 и 0.1 за по-добра визуализация. *Вдясно*: Наблюдавано (в черно) и моделирано (в синьо)  $Fe II$  повишаване за три епохи. Червените линии представят Гаусово апроксимиране на абсорбционните линии, а сивата прекъсната линия – нивото на континуума (Acciari et al., 2021).

синхротронно излъчване на източника, което е ясно видимо на фигура 32.

В сравнение с историческите наблюдения, оптичното излъчване се повишава около 30 пъти в изследвания период. По време на максимума в излъчването, засечено от Fermi-LAT, оптичният поток се увеличава почти десет пъти. Оптични спектри на блазара са получени с LDT за три епохи (фиг. 33). В спектърта се наблюдават  $Mg II$  емисионна линия на  $\lambda = 4706 \text{ \AA}$  ( $\lambda_0 = 2798 \text{ \AA}$ ) и повишаване на континуума между  $3800 \text{ \AA}$  и  $4100 \text{ \AA}$  ( $\lambda_0 \sim 2260 - 2450 \text{ \AA}$ ), което се дължи на  $Fe II$  емисионния комплекс със силни ултравиолетови линии между  $2200 - 2600 \text{ \AA}$  (Baldwin et al., 2004). Забелязват се и три абсорбционни линии на  $\lambda \sim 4001 \text{ \AA}$ ,  $4337 \text{ \AA}$  и  $4477 \text{ \AA}$  с дълбочина, зависеща от интензивността на квазара. Най-вероятно абсорбциите са породени от  $Mg II$  системи на червени отмествания  $z \approx 0.43, 0.55$  и  $0.60$ . Емисиите, породени от  $Mg II$  и  $Fe II$ , са анализирани за 3-те епохи (фиг. 33) и в таблица 6 са представени параметрите на Гаусовата апроксимация, скоростите на облаците и потока на линиите. Наблюдава се значителна разлика в поведението между  $Mg II$  линията и  $Fe II$  излъчването:

- Потокът на  $Mg II$  линията не зависи от континуума и остава постоянен, докато  $Fe II$  приносът се увеличава при повишаване на континуума.
- Излъчването на  $Mg II$  не се отмества, а при  $Fe II$   $\lambda_0$  се отмества към синята област

Таблица 6 Параметри на линиите. Колоните съдържат: (1) епоха на наблюдението; (2) емисионна линия; (3) централна дължина на вълната на Гаусовата апроксимация в  $\text{\AA}$ ; (4) амплитуда на Гаусовата апроксимация в  $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ ; (5) пълната ширина на половината максимум (FWHM) на Гаусиана в  $\text{\AA}$ ; (6) скоростта на газа в  $\text{km s}^{-1}$ ; (7) потока на линията в  $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; (8) плътност на потока на континуума при максимума на линията в  $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ ; (9) еквивалентна ширина в  $\text{\AA}$ .

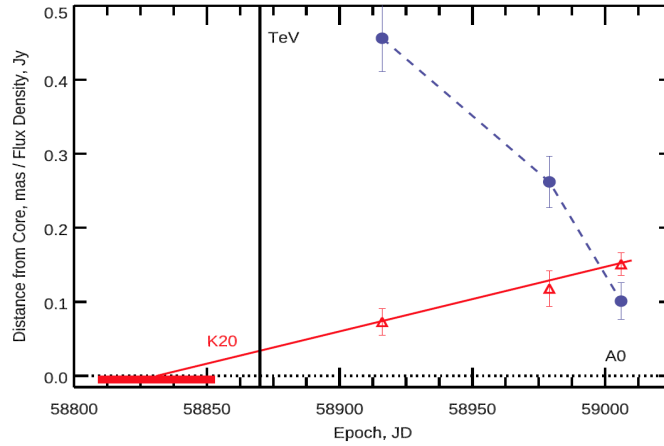
MJD	Line	$\lambda_0$	Amp	FWHM	v	Flux	$S_{cont}$	EW
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
58876.578	<i>MgII</i>	$2795 \pm 2$	$0.37 \pm 0.04$	$18.4 \pm 1.3$	$1982 \pm 140$	$13 \pm 3$	$7.1 \pm 0.2$	$2 \pm 1$
58887.497	<i>MgII</i>	$2798 \pm 3$	$0.36 \pm 0.06$	$26.0 \pm 2.6$	$2787 \pm 278$	$18 \pm 4$	$3.3 \pm 0.2$	$6 \pm 3$
58904.368	<i>MgII</i>	$2797 \pm 2$	$0.31 \pm 0.02$	$28.6 \pm 0.7$	$3074 \pm 75$	$16 \pm 2$	$1.5 \pm 0.2$	$11 \pm 2$
58876.578	<i>FeII</i>	$2390 \pm 5$	$0.49 \pm 0.05$	$91 \pm 3$	–	$84 \pm 9$	$9.2 \pm 0.5$	–
58887.497	<i>FeII</i>	$2357 \pm 5$	$0.23 \pm 0.06$	$91 \pm 2$	–	$58 \pm 5$	$4.5 \pm 0.2$	–
58904.368	<i>FeII</i>	$2348 \pm 5$	$0.15 \pm 0.06$	$91 \pm 1$	–	$27 \pm 7$	$1.8 \pm 0.3$	–

след високоенергетично събитие.

- Ширината на *FeII* излъчването е много стабилна въпреки промяната в потока, а скоростите на газа, който поражда *MgII* излъчването се увеличават след високоенергетично събитие.
- Еквивалентната ширина на *MgII* се променя обратнопропорционално с нарастването на континуума.

Повишаването на *FeII* излъчването с континуума и вероятното движение на газа пораждащ *FeII* линиите към наблюдателя представляват интерес. Краткото времево забавяне между промяната в континуума и емисионните линии предполага, че областта на излъчване на *FeII* е много по-малък от този на *MgII*. Възможно е нетермалната релятивистка струя да взаимодейства с *FeII*-излъчващ облак, а *MgII* емисията да се причинява от влиянието на акреционния диск. Според Ghisellini et al. (2014) може да се направи оценка за светимостта на акреционния диск (AD), знаейки светимостта на областта на широките линии (BLR):  $L_{AD} \approx 10 \times L_{BLR}$ . От получения поток на *MgII* линията и моделът за областта на широките линии, конструиран от Vanden Berk et al. (2001) може да се установи пълната светимост на BLR:  $L_{BLR} = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{45} \text{ ergs}^{-1}$ . Тогава за светимостта на акреционния диск на QSO B1420+326 се получава  $L_{AD} \approx 2 \times 10^{46} \text{ ergs}^{-1}$ .

Данните от OVRO показват повишаване на потока за изследвания период. На изображенията, получени от VLBI се забелязва ярко ядро (A0) и издължена структура на позиционен ъгъл  $\sim 130^\circ$  (възел K20). На фигура 34 е представено раздалечаването на K20 от ядрото като функция от времето. Според линейната апроксимация K20 се движи със собствена скорост  $\mu = 0.30 \pm 0.04 \text{ mas yr}^{-1}$ , което отговаря на свръхсветлинно движение с видима скорост  $\beta_{app} = 12.0 \pm 1.7c$ . Такова движение предполага, че отделянето на K20

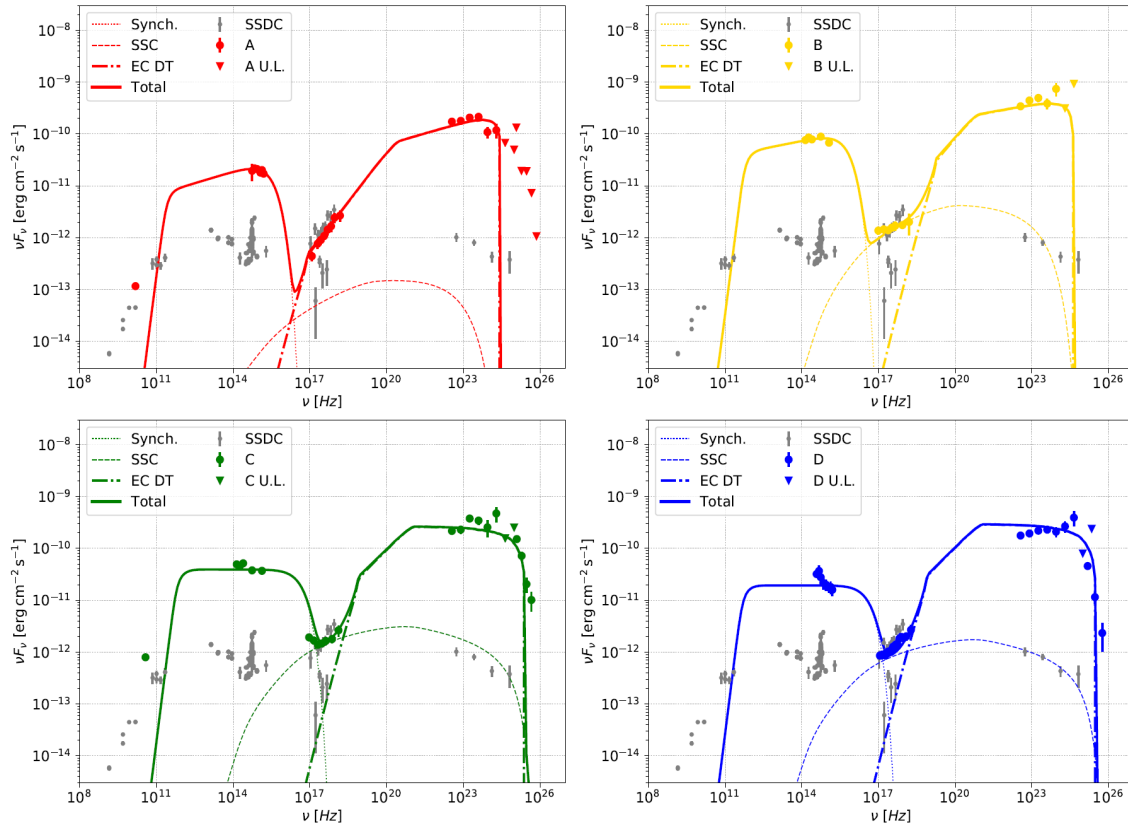


Фигура 34 Отдалечаване на K20 от ядрото (Acciari et al., 2021): червената линия представлява линейна апроксимация на движението според модела. Сините точки и прекъснатата линия отговарят на крива на блясъка на K20 при 43 GHz. Черната вертикална линия обозначава момента на много високоенергийно събитие.

от ядрото се е осъществило на MJD  $58831 \pm 21$  (13-ти декември 2019 г.). На фигурата се вижда и бързо понижаване на потока ( $\sim 4$  пъти) в рамките на три месеца, което отговаря на променливост от  $0.16 \pm 0.03$  yr (Burbidge et al., 1974). Тази променливост и големината на K20 ( $0.084 \pm 0.015$  mas) дава стойност за Доплеровия фактор на K20  $\delta = 33 \pm 9$  (Jorstad et al., 2005). От видимата скорост може да се определи и Лоренцовият фактор  $\Gamma = 19 \pm 9$ , откъдето и ъгълът на K20 спрямо лъча на зрение  $\Theta = 1.1^\circ \pm 0.6^\circ$ .

## Спектрално разпределение на енергията

Гама-излъчването при FSRQ обектите обикновено се обяснява с външен Комптънов (EC – External Compton) модел. Най-вероятно подхранване на този процес се осъществява от излъчването на праховия тор. Като най-опростен модел може да се приеме, че централният източник излъчва сферично и има хомогенно, изотропно магнитно поле и разпределение на електроните. Тези електрони са пряко изложени на радиационното лъчение от праховия тор. Моделът приема пръстеновидна геометрия за праховия тор с вътрешен радиус, отговарящ на разстоянието до черната дупка. Минималният размер на излъчване на централния източник е ограничен от условията на променливост. Стойностите, които се използват в модела на QSO B1420+326 въз основа на наблюдаваната променливост са  $r_{cs} = 3 - 6 \times 10^{16}$  cm, отговарящи на времеви интервал 12 – 24 h. За област на излъчване се приема разстоянието до  $d = 2.5 \times 10^{18}$  cm. От светимостта на акреционния диск ( $L_{disk} = 2 \times 10^{46}$  erg s $^{-1}$ ) могат да се определят размерите на областта на широките линии и праховия тор (Ghisellini & Tavecchio, 2009). Тогава праховият тор може да се моделира като тънък пръстен с радиус  $R_{DT} = 1.1 \times 10^{19}$  cm (3.6 pc), а областта на широките линии с радиус  $R_{BLR} = 4.4 \times 10^{17}$  cm (0.14 pc). Излъчването от централния източник не е изцяло засегнато от областта на широките линии и голяма част от него се намира в радиационно-



Фигура 35 Многовънново спектрално разпределение на енергията за четири периода (Acciari et al., 2021): A – преди повишаването в блясъка; B – оптично повишаване на блясъка; C – повишаване на блясъка в много високите енергии; D – след повишаването на блясъка и архивни данни (в сиво). Различните радиационни процеси са показани с различни линии. Данните са коригирани за EBV спрямо Dominguez et al. (2011).

то поле на праховия тор. Според модела 60% от излъчването на диска се подхранва чрез външен Комптънов ефект от праховия тор. На фигура 35 са представени спектрални разпределения на енергията за четирите наблюдавани епохи. За повече подробности относно моделирането и другите механизми на нетермално излъчване, вижте Acciari et al. (2021).

## 6. Приноси на автора

- В резултат от 15-годишен мониторинг на 11 околополюсни квазара са получени криви на блясъка в ивиците VRI, състоящи се от 40 до  $\sim 200$  фотометрични точки. Определени са амплитудите на променливост на 11-те квазара, които са от порядъка на няколко десети от звездната величина. Построени са структурни функции.
- В полето на всеки квазар са прехвърлени стандарти за сравнение чрез полета на Stetson. Направени са идентификационни карти и подбраните стандарти могат да бъдат използвани за фотометрични изследвания и на други обекти в полето. Подробно е описана методиката за прехвърляне на стандарти.
- При квазара QSO B1312+7837 (QSO 09) се наблюдава периодична променливост в блясъка, която е възможно да се дължи на наличието на две свръхмасивни черни дупки в ядрото на галактиката. Направена е оценка за тяхната маса.
- Даден е съществен принос в наблюденията на 4 блазара към международната кампания за многовълнови изследвания WEBT. Засечено е повишаване на блясъка с 5 звездни величини на блазара QSO B1420+326 в оптичната област, в следствие на което е организирана многовълнова кампания. По време на кампанията най-много данни в ивиците R и V са получени от НАО Рожен и САО Плана.

**Резултатите, описани в трета, четвърта и пета глава на дисертационния труд са представени в следните научни публикации:**

1. Minev, M., Ovcharov, E., Valcheva, A., Bozhilov, V., Nedialkov, P., *High-Redshift AGNs: Preliminary Results of a Long-Term Optical Study*, 2020, JPT, 4, 1
2. Minev, M., Ivanov, V. D., Trifonov, T., Ovcharov, E., Fabrika, S., Sholukhova, O., Vinokurov, A., Valcheva, A., Nedialkov, P., *Periodic variability of the  $z=2.0$  quasar QSO B1312+7837*, 2021, MNRAS, 508, 2937
3. Raiteri, C. M., Vilata, M., Acosta-Pulido, J. A., . . . , Minev, M., . . . , et al., *Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet*, 2017, Nature, 552, 374 (**73 цитирания към 10.12.2021 г.**)

4. D'Ammando, F., Raiteri, C. M., Vilata, M., . . . , Minev, M., . . . , et al., *Investigating the multiwavelength behaviour of the flat spectrum radio quasar CTA 102 during 2013-2017*, 2019, MNRAS, 490, 5300 (**10 цитирания към 10.12.2021 г.**)
5. Raiteri, C. M., Vilata, M., Carnero, M. I., . . . , Minev, M., . . . , et al., *The beamed jet and quasar core of the distant blazar 4C 71.07*, 2019, MNRAS, 489, 1837 (**3 цитирания към 10.12.2021 г.**)
6. Larionov, V. M., Jorstad, S. G., Marscher, A. P., . . . , Minev, M., . . . , et al., *Multiwavelength behaviour of the blazar 3C 279: decade-long study from  $\gamma$ -ray to radio*, 2020, MNRAS, 492, 3829 (**21 цитирания към 10.12.2021 г.**)
7. Weaver, Z. R., Williamson, K. E., Jorstad, S. G., . . . , Minev, M., . . . , et al., *Multiwavelength Variability of BL Lacertae Measured with High Time Resolution*, 2020, ApJ, 900, 137 (**7 цитирания към 10.12.2021 г.**)
8. Minev, M., Valcheva, A., Kostov, A., Vasileva, R., Mitrev, R., *BL Lac still in optical high state*, 2021, ATel, 14854
9. Minev, M., Kurtenkov, A & Ovcharov, E., *Multi-band photometry of the flaring blazar B2 1420+32 at its peak*, 2020, ATel, 13421 (**1 цитиране към 10.12.2021 г.**)
10. MAGIC collaboration, . . . , Minev, M., . . . , et al., *VHE gamma-ray detection of FSRQ QSO B1420+326 and modeling of its enhanced broadband state in 2020*, 2021, A&A, 647, 163 (**2 цитирания към 10.12.2021 г.**)

**Част от резултатите, получени в рамките на това изследване, са представени на две научни конференции:**

1. VIII National Student Conference on Physics, 31 Oct – 1 Nov 2019, Plovdiv, Bulgaria – *High-Redshift AGNs: Preliminary Results of a Long-Term Optical Study*
2. MAGIC General Meeting, 22-26 June 2020, Online – *B2 1420+32 flare and MWL campaign in Jan 2020*

# Благодарности

Искам да благодаря на ръководителя ми доц. д-р Евгени Овчаров за напътствията, които ми даваше през тези години и затова, че ме въведе в наблюдателната астрономия.

Изключително много благодаря на Трифон Трифонов и Валентин Иванов за голямата помощ, която оказаха при специфичната обработка на периодичния квазар и съдействието при изготвянето и публикуването на резултатите.

Специални благодарности на доц. д-р Петко Недялков, благодарение на когото бяха получени спектрални наблюдения, чрез които научните изследвания бяха допълнени.

Искам да благодаря на всички колеги от катедра Астрономия на СУ и Института по Астрономия към БАН, които през всички тези години са подпомогнали наблюденията по един или друг начин.

Благодаря на Калина Стоименова, Ангел Димитров, Ваня Ботева и на всички мои приятели, които са били до мен и са ме подкрепяли и помагали.

Този труд е осъществен с подкрепата на Фонд научни изследвания (Министерство на образованието и науката) – договори DN 18-10/2017, КР-06-Русия-09/2019 и чрез Национална пътна карта (Министерство на образованието и науката) – договори DO1-153/28.08.2018, DO1-157/28.08.2018, DO1-268/16.12/2019, DO1-277/16.12/2019, DO1-383/18.12.2020 (“Регионален астрономически център за изследвания и образование – РАЦИО”).

# Библиография

- [1] Abdo, A. A., et al., 2011, *ApJ*, 730, 101
- [2] Acciari, V. A., et al., 2021, *A&A*, 647, 163
- [3] Afanasiev, V. L. & Moiseev, A. V., 2005, 31, 194
- [4] Bachev, R., Strigachev, A., & Semkov, E., 2005, *MNRAS*, 358, 774
- [5] Begelman, M. C., Blandford, R. D. & Rees, M. J., 1980, *Natur*, 287, 307
- [6] Bonning, E. W., et al., 2009, *ApJL*, 697, 81
- [7] Burbidge, G. R., Jones, T. W. & O'Dell, S. L., 1974, *ApJ*, 193, 43
- [8] Calderone, G., et al., 2013, *MNRAS*, 431, 210
- [9] Chatterjee, R., et al., 2008, *ApJ*, 689, 79
- [10] Choloniewski, J., 1981, *AcA*, 31, 293
- [11] Ciprini, S., 2018, *ATel*, 12277
- [12] D'Ammando, F., et al., 2019, *MNRAS*, 490, 5300
- [13] D'Ammando, F., Fugazza, D. & Covino, S., 2020, *ATel*, 13428
- [14] Diego, J. A., 2010, *AJ*, 139, 1269
- [15] Domínguez, A., et al., 2011, *MNRAS*, 410, 2556
- [16] D'Orazio, D. J., Haiman, Z. & MacFadyen, A., 2013, *MNRAS*, 436, 2997
- [17] D'Orazio, D. J., Haiman, Z. & Schiminovich, D., 2015, *Natur*, 525, 351
- [18] Edelson, R. A. & Krolik, J. H., 1988, *ApJ*, 333, 646
- [19] Foreman-Mackey, D., et al., 2017, *AJ*, 154, 220
- [20] Ghisellini, G., et al., 2010, *MNRAS*, 402, 497
- [21] Ghisellini, G. & Tavecchio, F., 2015, *MNRAS*, 448, 1060
- [22] Hagen, H. J., Engels, D. & Reimers, D., 1999, *A&AS*, 134, 483
- [23] Hagen-Thorn, V. A., et al., 2008, *ApJ*, 672, 40
- [24] Hubeny, I., et al., 2000, *ApJ*, 533, 710
- [25] Hughes, P. A., Aller, H. D. & Aller, M. F., 1992, *ApJ*, 396, 469
- [26] Ivanov, V. D., et al., 2016, *A&A*, 588, 93
- [27] Jorstad, S. G., et al., 2017, *ApJ*, 846, 98



- [28] Kaspi, S., et al., 2000, *ApJ*, 533, 631
- [29] Kelley, L. Z., et al., 2019, *MNRAS*, 485, 1579
- [30] Kelly, B. C., Bechtold, J. & Siemiginowska, A., 2009, *ApJ*, 698, 895
- [31] Kharinov, M. A., 2020, *ATel*, 13479
- [32] Kozłowski, S., 2017, *A&A*, 597, 128
- [33] Larionov, V. M., et al., 2020, *MNRAS*, 492, 3829
- [34] Lehto, H. J. & Valtonen, M. J., 1996, *ApJ*, 460, 207
- [35] León-Tavares, J., et al., 2013, *ApJL*, 763, 36
- [36] Lusso, E., et al., 2015, *MNRAS*, 449, 4204
- [37] Madejski, G. M., et al., 1999, *ApJ*, 521, 145
- [38] MAGIC Collaboration, 2021, *A&A*, 647, 163
- [39] Markov, H., 2005, *ARBI*, 20, 171
- [40] Marscher, A. P. & Gear, W. K., 1985, *ApJ*, 298, 114
- [41] Marziani, P., et al., 1996, *ApJS*, 104, 37
- [42] Mead, A. R. G., et al., 1990, *A&AS*, 83, 183
- [43] Mickaelian, A. M., et al., 1999, *Ap*, 42, 1
- [44] Mignone, A., et al., 2010, *MNRAS*, 402, 7
- [45] Minev, M., et al., 2020, *JPT*, 4, 1
- [46] Minev, M., et al., 2021, *ATel*, 14854
- [47] Minev, M., et al., 2021, *MNRAS*, 508, 2937
- [48] Minev, M., Kurtenkov, A. & Ovcharov, E., 2020, *ATel*, 13421
- [49] Mirzoyan, R., 2020, *ATel*, 13412
- [50] Nelder, J. A. & Mead, R., 1965, *comjnl*, 7, 308
- [51] Nilsson, K., et al., 2009, *A&A*, 505, 601
- [52] Ovcharov, E., 2008, *PhDT*
- [53] Ovcharov, E. P., et al., 2008, *MNRAS*, 386, 819
- [54] Peacock, J. A., 1999, *RSPTA*, 357, 133
- [55] Perucho, M., et al., 2012, *ApJ*, 749, 55
- [56] Peterson, B. M., et al., 1998, *PASP*, 110, 660
- [57] Polletta, M., et al., 2007, *ApJ*, 663, 81
- [58] Qian, S. J., et al., 2019, *A&A*, 621, 11
- [59] Raiteri, C. M., et al., 2013, *MNRAS*, 436, 1530
- [60] Raiteri, C. M., et al., 2014, *MNRAS*, 442, 629
- [61] Raiteri, C. M., et al., 2017, *Natur*, 552, 374

- [62] Raiteri, C. M., et al., 2019, MNRAS, 489, 1837
- [63] Ramazani, V. F., et al., 2020, ATel, 13417
- [64] Rani, B., et al., 2018, ApJ, 858, 80
- [65] Savolainen, T., et al., 2010, A&A, 512, 24
- [66] Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P., 2011, ApJ, 737, 103
- [67] Schneider, D. P., et al., 2005, Vizier Online Data Catalog, VII/243
- [68] Sillanpaa, A., et al., 1988, ApJ, 325, 628
- [69] Souchay, J., et al., 2015, A&A, 583, 75
- [70] Stetson, P. B., 2000, PASP, 112, 925
- [71] Stocke, J. T., et al., 1998, AJ, 115, 451
- [72] Tanaka, T. & Menou, K., 2010, ApJ, 714, 404
- [73] Trifonov, T., 2019, The Exo-Striker: Transit and radial velocity interactive fitting tool for orbital analysis and N-body simulations
- [74] Valcheva, A., et al., 2009, BlgAJ, 11, 71
- [75] Véron-Cetty, M. P. & Véron, P., 2006, A&A, 455, 773
- [76] Vestergaard, M. & Peterson, B. M., 2006, ApJ, 641, 689
- [77] Villata, M., et al., 2006, A&A, 453, 817
- [78] Weaver, Z. R., et al., 2020, ApJ, 900, 137
- [79] Wehrle, A. E., et al., 1998, ApJ, 497, 178
- [80] Wehrle, A. E., et al., 2016, ApJ, 816, 53
- [81] Wright, E. L., 2006, PASP, 118, 1711
- [82] Zechmeister, M. & Kürster, M., 2009, A&A, 496, 577