

## ИСТРАЖИВАЊЕ ОБЛИКА СПЕКТРАЛНИХ ЛИНИЈА АКТИВНИХ ГАЛАКСИЈА НА АСТРОНОМСКОЈ ОПСЕРВАТОРИЈИ У БЕОГРАДУ

ЛУКА Ч. ПОПОВИЋ

*Астрономска опсерваторија, Волгина 7, 11160 Београд-74, Југославија  
E-mail: lpopovic@aob.bg.ac.yu*

**Резиме.** На Астрономској опсерваторији у Београду се од 1994. године истражују облици спектралних линија код активних галактичких језгара. У почетку, истраживања су била теоријска, при чему је истраживан утицај гравитационог поља на облик спектралних линија. Касније ова истраживања су проширена анализом посматраних спектралних линија. На основу анализе посматраних емисионих спектралних линија врше се моделирања емисионих области код активних галактичких језгара. Посебна пажња се посвећује изучавању временске промене оних емисионих линија које указују на постојање две широколинијске емисионе области код ових објеката.

### 1. Увод

Истраживање облика и параметара спектралних линија помаже нам да разумемо физичке услове и стање плазме из које долазе. У ствари, једини начин да се изврши дијагностика плазме ван Сунчевог система је да се врше спектроскопска истраживања њеног зрачења (спектралних линија и континуума). Истраживања облика и параметара спектралних линија су веома значајна и зато што највише информација о небеским објектима добијамо управо анализирајући ове параметре.

Једни од најинтересантнијих објеката у космосу су активна галактичка језгра. Ови објекти, у које спадају и квазари, представљају веома моћне изворе зрачења, а једна од карактеристика тих објеката је да су у њиховим спектрима присутне веома јаке емисионе линије. Ове емисионе линије су карактеристичне за активне галаксије и код неких је према облику ових линија изведена подела. На пример Сејфертове галаксије са уским линијама у спектру (пуна ширина на половини висине – FWHM око неколико стотина km/s) припадају типу два – Sy 2, а оне које поседују широке линије (FWHM до неколико хиљада km/s) припадају типу један – Sy 1.

Широко је прихваћено мишљење да се у центру ових објеката налази црна рупа око које је акрециони диск. Овај систем је обавијен емисионом облашћу. На основу истраживања спектралних линија ових објеката (види

нпр. Osterbrock 1989) уочено је да се емисиона област у којој настају може поделити на више делова који имају различите физичке особине. Углавном су уочљива два таква региона:

1. Широколинијски регион или област (Broad Line Region – BLR), из које долазе широке, углавном водоничне и хелијумске, линије. Ова област се налази у околини акреционог диска, а њене димензије су мање од једног парсека. Састављена је од згуснућа материје – облака, који поред преовлађујућег ротационог кретања имају и сопствено кретање. Брзине ових облака, које су добијене на основу полуширина линија, крећу се у просеку око неколико хиљада  $\text{km/s}$  (види нпр. Osterbrock 1989). У овој области се електронска концентрација креће од  $10^7 \text{cm}^{-3}$  до  $10^{11} \text{cm}^{-3}$ , а температура је око 10000 К.
2. Усколинијска област (Narrow Line Region – NLR), из које долазе уске линије је већа и достиже до неколико килопарсека. Из ове области долази зрачење високојонизованих емитера (О III, С IV). Уочљиве су и линије из забрањених прелаза (нпр. О III[4959,5007]). Иначе у овој области је веома мала концентрација емитера, креће се од  $10 \text{cm}^{-3}$  до  $10^3 \text{cm}^{-3}$ .

Наравно, строго говорећи емисиона област је много комплекснија, тако нпр. наша истраживања усколинијског регион код галаксије Mkn 817 су показала да се овај састоји из два дела (Popović and Mediavilla 1997). Понекад у емисиону област можемо укључити и диск, тј. ефекти диска се могу одразити на облик спектралних линија, као што је то случај код галаксије III Zw 2 (Popović et al. 1997).

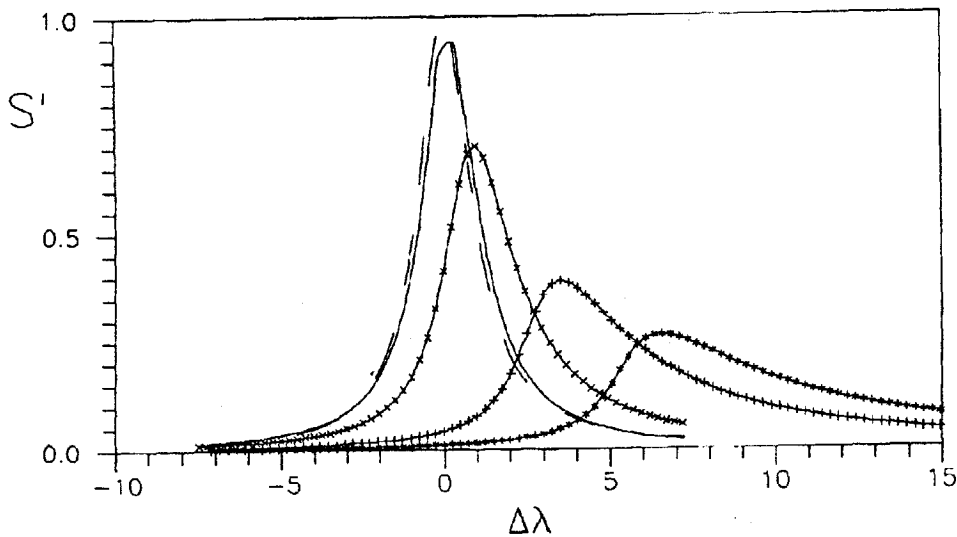
Истраживања облика спектралних линија код Сејфертових галаксија и квазара на Астрономској опсерваторији у Београду почела су 1994. године. Прва истраживања су била теоријска и била су везана за испитивање утицаја гравитационог поља на облик спектралних линија (Popović and Vince 1994, Popović et al. 1994ab, Atanacković et al. 1994, Popović et al. 1995a). Касније су та истраживања проширена на анализу облика посматраних спектралних линија са Кримске астрофизичке опсерваторије (Popović 1996). Овде укратко дајемо преглед ових истраживања на Астрономској опсерваторији у Београду. Ова истраживања се обављају у оквиру задатка *Истраживање облика спектралних линија код активних галактичких језгара*, а као део истраживачког пројекта Астрономске опсерваторије.

## 2. Утицај гравитације на облик спектралних линија

Истраживања утицаја гравитационог поља на облик спектралних линија код активних галактичких језгара су покренула истраживања везана за природу активних галактичких језгара на Астрономској опсерваторији. С обзиром на модел активног галактичког језгра, где је у центру језгра црна рупа, а област из које долазе линије, тзв. широколинијска област је у непосредној близини црне рупе, тј. налази се у јаком гравитационом пољу, може се очекивати да ово поље дејствује на емитовано зрачење које долази из ових објеката. У ком смислу? Прво, с обзиром да посматрану линију

добијамо као сумарно зрачење облака који се налазе у правцу посматања, а који су на различитим растојањима од центра, односно у различитим тачкама гравитационог поља, емитовано зрачење од појединих облака има различити гравитациони помак. Другим речима, зрачење оних облака који су ближе центру биће померено ка црвеном у односу на зрачење оних који су даље од црне рупе. Наравно, при томе морамо имати у виду да се ми као посматрачи налазимо у релативно слабом гравитационом пољу у односу на емитере који се налазе у широколинијској области или у акреционом диску активног галактичког језгра. У сваком случају то ће довести до деформисања облика спектралних линија ових објеката. Друго, емитери ће се налазити у јаком гравитационом пољу, па се то поље мора узимати у обзир кад рачунамо атомске параметре емитера (јачину осцилатора, вероватноћу прелаза и јачину у линији).

Као што је речено, прва истраживања су била везана за утицај гравитационог црвеног помака на облик емисионих спектралних линија у случају када је недеформисани профил Лоренцов (Popović and Vince 1994, Popović et al. 1994ab) и Војтов (Ataacković et al. 1994, Popović et al. 1995a). У оба случаја извели смо аналитичке изразе за урачунавање овог утицаја.



Слика 1. Облик деформисаног профила спектралне линије за различите таласне дужине прелаза  $\lambda_0$ , у поређењу са недеформисаним Лоренцовим профилем (испрекидана линија). Употребљене ознаке су: (—) за  $\lambda_0 = 1000 \text{ \AA}$  (пуна линија), (-x-x) за  $\lambda_0 = 10000 \text{ \AA}$ , (+-+-) за  $\lambda_0 = 50000 \text{ \AA}$ , (-\*-\*) за  $\lambda_0 = 100000 \text{ \AA}$ .  $\Delta\lambda$  је изражено у Лоренцовим полуширинама (Popović et al. 1994b)

У случају када је недеформисани профил емисионе линије Лоренцов ( $S(\lambda)$ ), аналитчки израз за деформисани профил ( $S'(\lambda, r, M)$ ) услед неједнаког гравитационог помака је (Popović et al. 1994ab)

$$S'(\lambda, r, M) = S(\lambda) \cdot \Phi(\lambda, r, M) \quad (1)$$

где је  $\Phi(\lambda, r, M)$  корекциони фактор који зависи од удаљености емисионе области од црне рупе  $r$  и масе централног објекта  $M$ .

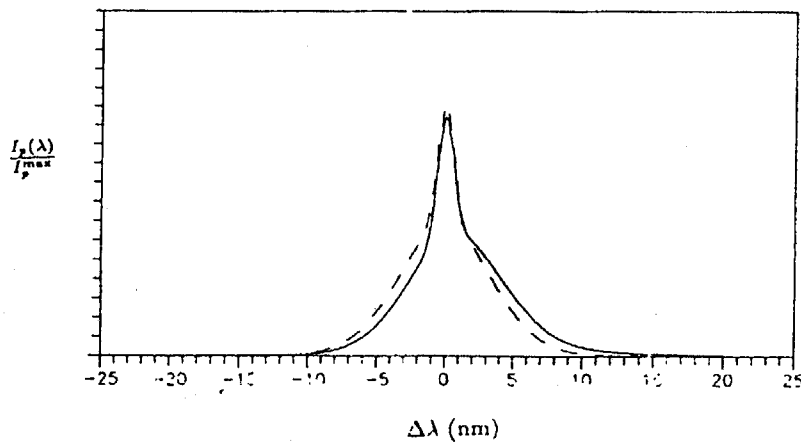
У случају када је недеформисани профил Војтов ( $H(a, x)$ ), израз за деформисани профил ( $H'(a, x, r, M)$ ) је (Porović et al. 1995a)

$$H'(a, x, r, M) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(a, x) \cdot \Phi(a, x, y, r, M) dy \quad (2)$$

где је  $h(a, x)$  подинтегрални функција Војтовог профила

$$h(a, x, y) = \frac{e^{-y^2}}{a^2 + (x - y)^2},$$

$a$  је однос Лоренцове и Доплерове ширине, а  $x = \lambda - \lambda_0$  изражено у Доплеровим полуширинама. Корекциона функција  $\Phi(a, x, y, r, M)$  има исти аналитички облик као и у случају Лоренцовог профила.



Слика 2. Деформисана  $H_\beta$  линија услед гравитационог дејства (пуна линија) у поређењу са недеформисаном (испрекидана линија). Узет је модел активног галактичког језгра који претпоставља постојање три емисионе области (Porović et al. 1995a).

Утицај гравитационог помака на облик спектралне линије је разматран за оптички танку и оптички густу средину. Изведен је закључак да овај утицај доводи до деформисања профила спектралне линије тако да линија постаје проширенија, мањег интензитета, померана ка црвеном и асиметрична такође ка црвеном делу спектра (Слика 1). Овај утицај је израженији код оптички ретке средине, што у ствари важи за широколиниску област која је ближе црној рупи (Corbin 1997). Код активних галактичких језгара деформација емисионе линије требало би да буде видљива у

широкој компоненти, док у уској компоненти овај ефекат није изражен. Истраживања других аутора, која су рађена касније дала су сличне резултате (Corbin 1995, 1997ab).

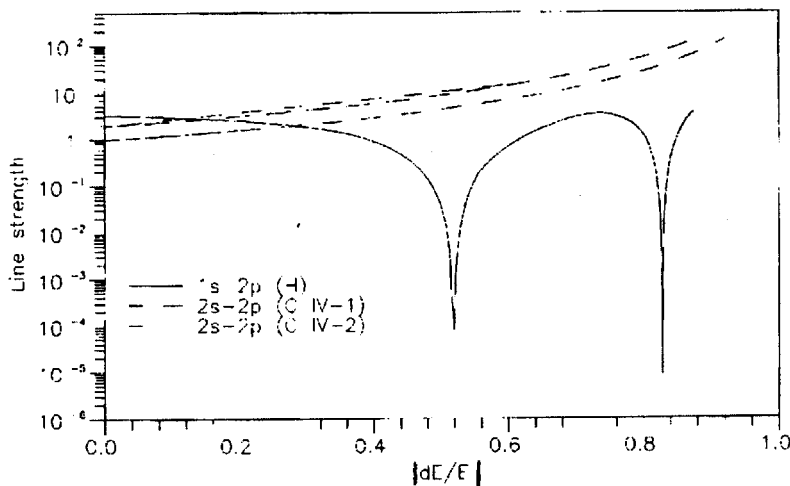
Релативно скоро почела су истраживања везана за утицај гравитационог поља на атомске параметре емитера (Popović 1997a, Popović 1999ab). Наиме, за посматрача који се налази у слабом гравитационом пољу, зрачење емитера ће бити померено ка црвеном, тј. посматрач ће упоређујући квантни систем у јаком гравитационом пољу са квантним системом у свом пољу измерити да се енергијски нивои разликују као

$$E'_i = E_i + \Delta E_i \quad (3)$$

где су  $E_i$  енергије нивоа квантног система у средини посматрача, а  $E'_i$  енергије квантног система одакле нам долази зрачење, а  $\Delta E_i$  је енергијска разлика која зависи од разлике у јачини гравитационих поља. Ова разлика се може израчунати код активних галактичких језгара знајући вредност гравитационог црвеног помака као (Popović 1999ab)

$$\Delta E_i \approx -\frac{z_G}{1+z_G} E_i, \quad (4)$$

где је  $z_G$  гравитациони помак. Конкретни прорачуни за јачине осцилатора и вероватноће прелаза изведени су за случај  $Ly_\alpha$  линије и резонантних линија код  $C IV$  емитера (Popović 1999a). Ове линије су интензивне у  $UV$  спектру активних галаксија.

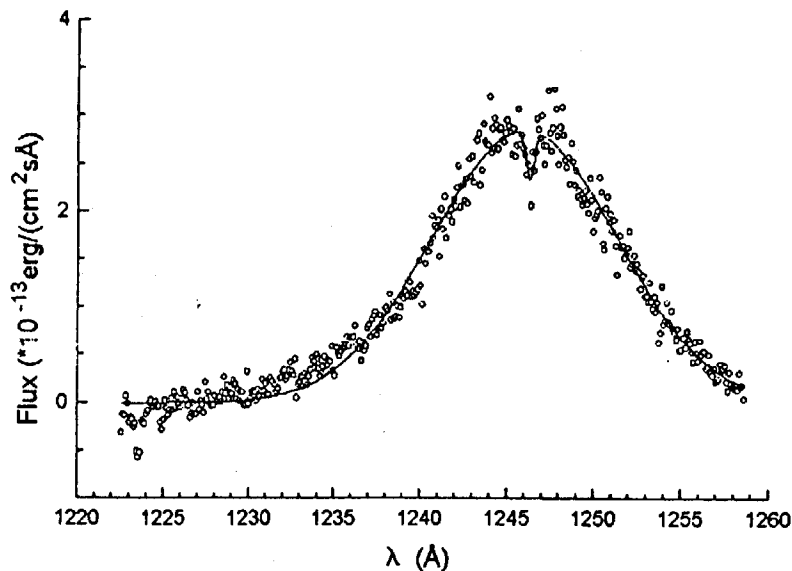


Слика 3. Јачина линије (у атомским јединицама) за  $Ly_\alpha$  (пуна линија) и резонантне  $C IV$  линије – испрекидане линије (Popović 1999a).

Овај ефекат требало би да буде урачунат при моделирању акреционог диска и широколинијске области код активних галактичких језгара на основу посматраног облика спектра линија. Такође, овај ефекат може бити значајан и код неутронских звезда.

### 3. Анализа посматраних профила емисионих линија активних галактичких језгара

После теоријског разматрања утицаја гравитационог поља на облик и параметре спектралних линија код активних галаксија, природно је било да се експериментално провере ови резултати. У ту сврху требало је анализирати профиле посматраних линија из спектра Sy 1 галаксија или квазара, где је у укупном профилу линије изражена широколинијска компонента, тј. компонента која долази из широколинијске области и/или акреционог диска. Прво такво истраживање је била анализа  $Ly_{\alpha}$  линије из спектра Sy 1 галаксије Mkn 335 која је добијена Хабловим космичким телескопом (Popović et al. 1995a). У ту сврху, извршено је растављање сложеног профила  $Ly_{\alpha}$  на две Гаусове компоненте. Испоставило се да је широка компонента померена ка плавом делу спектра. Када је од посматрања одузета уска компонента, добијен је профил који је имао црвену асиметрију (Слика 4). За објашњење таквог профила, направљен је модел где су сумирана зрачења облака која се налазе у различитим гравитационим пољима. При томе је узето да је присутно веома јако избацивање материје, тј. кретање облака ка посматрачу. Овакав модел где је узет утицај гравитационог поља дао је добро слагање са посматраним профилем код галаксије Mkn 335 (Popović et al. 1995b).



Слика 4. Широколинијска компонента  $Ly_{\alpha}$  линије код Mkn 335: тачке су резултат посматрања, док је пуна линија синтетизовани профил где је коришћен модел широколинијске области у којем су урачунати гравитациони ефекти (Popović et al. 1995b).

Потреба да се прибави посматрачки материјал, тј. посматрања већег броја активних галаксија у  $H_{\beta}$  линији како би се анализом посматраних

профила утврдио овај ефекат иницирала је обраду великог броја спектрограма Кримске астрофизичке опсерваторије (Popović 1996). Из овог посматрачког материјала извршена је анализа спектра  $H_\beta$  линије код три Sy 1 галаксије, са циљем да се уочи утицај гравитационог поља на ову линију. Зашто је изабрана област спектра око  $H_\beta$  линије? Првенствено због тога што се у малом распону таласних дужина у њеној околини налазе широка  $H_\beta$  линија и две уске O III [4959,5007] линије које скоро искључиво долазе из усколинијске области. Ово омогућава да се у анализу посматраног профила која је изведена фитовањем посматраних линија Гаусовим профилима уведу додатна ограничења која ће смањити могућност погрешног закључивања о емисионим областима.

У анализу помоћу Гаусових функција су уведене следеће претпоставке (Popović and Mediavilla 1997):

1.  $H_\beta$  линија је фитована најмање са три Гаусове компоненте које, због тога што долазе из различитих делова емисионе области, имају различите ширине, помаке и интензитета.
2. Извршено је повезивање усколинијских компоненти широке  $H_\beta$  линије и уских O III [4959,5007] линија. Наиме, узето је, с обзиром да долазе из исте области, да уске компоненте имају исти помак, а да се Гаусове полуширине линија ( $\Delta W$ ) односе као

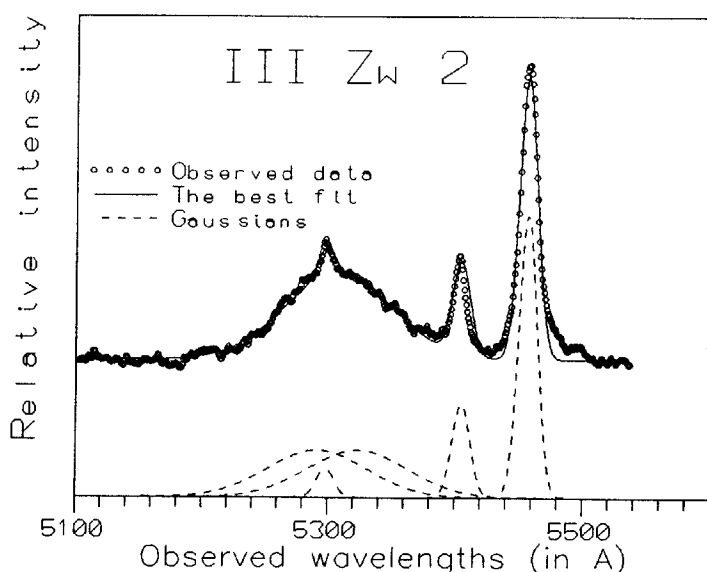
$$\frac{\Delta W_{H_\beta(NLR)}}{4861} = \frac{\Delta W_{4959}}{4959} = \frac{\Delta W_{5007}}{5007}.$$

3. Узимајући у обзир да су две линије O III настале прелазом унутар истих мултиплета, онда је узето да се њихови интензитети односе као њихове јачине у линији

$$\frac{I_{5007}}{I_{4959}} \approx 3.03$$

Извршена је анализа профила код три активна галактичка језгра: III Zw 2, 3C120 и Mrk 817. Ова три објекта су изабрана зато што код њих нису примећене брзе и велике промене облика линија. Поред тога ради се о Sy 1 галаксијама и квазарима код којих можемо очекивати да гравитациони ефект буде видљив. Узета су посматрања са Кримске астрофизичке опсерваторије из дужег периода, потом је извршено усредњавање спектра, при чему су сумирани спектри из краћег периода да би се неутралисали шумови који настају услед краткпериодичних промена. Добијени спектри су анализирани и тражено је да код свих спектра једног објекта  $H_\beta$  буде растављена на исти број компоненти. После анализе посматраних профила код ова три активна галактичка језгра примећено је да је широколинијска компонента углавном померана ка црвеном делу спектра у односу на компоненту која долази из усколинијске области, што је сагласно са нашим теоријским истраживањима. То је посебно уочљиво код Mrk 817 и III Zw 2 (Popović 1997, Popović et al. 1998a, 1999). Такође је интересантно напоменути да је код Mrk 817 уочено постојање три емисионе области (широколинијска,

средњелинијска и усколинијска), док је код III Zw 2 примећено да се у  $H_\beta$  линији могу уочити ефекти ротационог диска, тј. виде се јасно раздвојене две широколинијске компоненте.



Слика 5. Профили  $H_\beta + O III[4959, 5007]$  III Zw2 разложени на компоненте. Јасно се види да  $H_\beta$  има два врха која указују на диск који зрачи у домену  $H_\beta$ .

#### 4. Истраживање промена профила линија

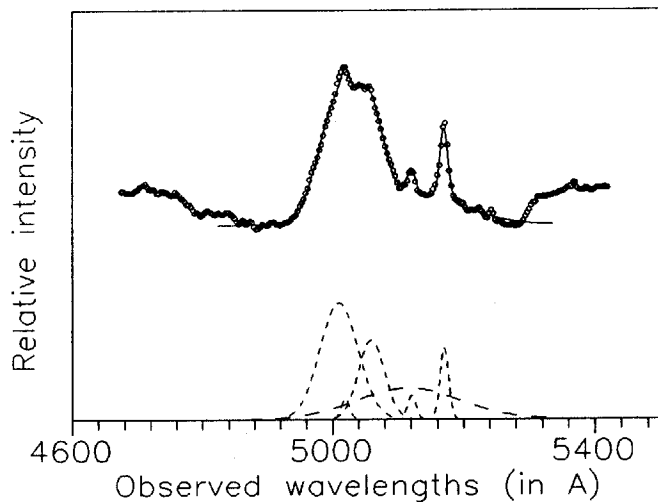
С обзиром на велики посматрачки материјал који се налази на Астрономској опсерваторији, а који је посматран на 2.6 метарском телескопу Кримске астрофизичке опсерваторије од стране К. К. Чувајева, истраживања облика спектралних линија су проширена на истраживања промене облика линије у дужем временском периоду. Наиме, урађена је анализа  $H_\beta$  профила код Акп 120 (Poročić et al. 1998b). Профили линија ове галаксије су веома промењиви, што указује на бурне реакције у широколинијској области. Испоставило се да  $H_\beta$  профил код ове галаксије добро описује модел са три области. Једна од њих је усколинијска, а две су широколинијске.

Код Акп 120 у црвеном крилу  $H_\beta$  линије налази се веома широка компонента која доста варира а која вероватно припада линијама гвожђа и широким  $O III$  линијама (најшира компонента на Слици 6).

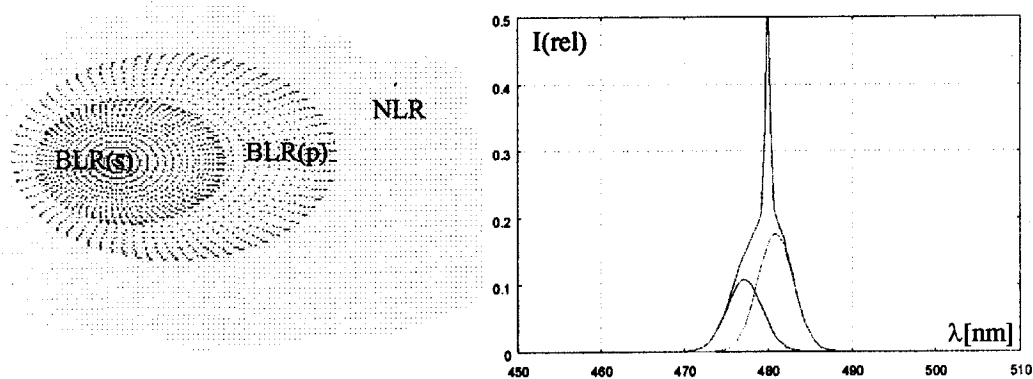
Ова истраживања дугопериодичних и краткопериодичних промена су скренула пажњу на објекте типа 3C390.3, а који су интересантни због тога што постоји могућност да се код тих објеката у центру налази двојна црна рупа (Gaskell 1996). С обзиром да поседујемо посматрања  $H_\beta$  линије квазара 3C390.3 у дужем временском периоду, почели смо да развијамо један



теоријски модел тесно двојне црне рупе, или боље речено тесно двојних широколинијских региона, Слика 7, (Poročić et al. 1998c). Ова истраживања се раде са циљем да се објасне комплексне линије посматране код 3C390.3 квазара и објеката који имају линије сличне овом објекту.



Слика 6. Профил  $H_{\beta}$  код Акп 120 садржи две широколинијске компоненте. Кружићи су посматране вредности, пуна линија је најбољи фит. Испрекидане линије представљају Гаусове компоненте.



Слика 7. Модел тесно двојних широколинијских региона (лево) и облик  $H_{\beta}$  линије коју емитује такав систем (десно). Ознаке на слици су:  $BLR(p)$ ,  $BLR(s)$  – широколинијске области примара и секундара, редом;  $NLR$  – усколинијска област. Уски врх линије потиче из усколинијске области (Poročić et al. 1998c).

Ова истраживања ће бити настављена у наредном периоду. Пре свега развијени теоријски модел (Popović et al. 1998c) биће примењен за моделирање  $H\beta$  линије код квазара 3C390.3 чија посматрања обухватају период од око двадесетак година (Popović 1996). Са друге стране, и облик  $H\beta$  код Акн 120 такође указује на постојање две широколинијске области, што захтева даља истраживања.

Такође, облик  $H\beta$  линије код III Zw 2 стимулисао је истраживања везана за диск код ове галаксије. Са циљем одређивања параметара њеног диска извршена су посматрања ове галаксије по нашем предлогу на Исак Њутн телескопу (INT) на Канарским острвима. Обрада ових посматрања, као и посматрања C IV и  $Ly\alpha$  линија III Zw 2 донеће нам више информација о природи овог објекта.

### Референце

- Atanacković-Vukmanović O., Popović L. Č., Vince I. and Kubičela A.: 1994, *Bull. Astron. Belgrade* **150**, 1.
- Corbin M. R.: 1995, *Astrophys. J.* **447**, 496.
- Corbin M. R.: 1997, *Astrophys. J.* **487**, 517.
- Corbin M. R.: 1997, *ASP Conference Series*, **113** (eds. B. M. Peterson, F.-Z. Cheng and A. S. Wilson), p. 260.
- Gaskell C. M.: 1996, *Astrophys. J. Lett.* **464**, 107.
- Osterbrock D. E.: 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebula and Active Galactic Nuclei*, Mill Valley, California.
- Popović L. Č.: 1996, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **54**, 49.
- Popović L. Č.: 1997a, *Abstracts of 29th EGAS* (ed. H.-D. Kronfeldt), Technische Universität, Berlin, p. 516.
- Popović L. Č.: 1997b, Abstracts of JENAM – 97, (July 2–5), Thessaloniki, Greece, p. 197.
- Popović L. Č.: 1999a, *Serb. Astron. J.* **159**, to be published.
- Popović L. Č.: 1999b, in preparation.
- Popović L. Č. and Vince I.: 1994, Abstracts of IAU Sym. 159 *Active Galactic Nuclei across the Electromagnetic Spectrum*, p. 55.
- Popović L. Č., Jevremović D., Vince I. and Milovanov T.: 1995, *Publ. Obs. Astron. Belgrade* **50**, 107 – 110.
- Popović L. Č., Vince I. and Kubičela A.: 1994a, In *Multi-Wavelength Continuum Emission of AGN* (eds. T.J.-L. Courvoisier and A. Blacha) p. 456.
- Popović L. Č. and Mediavilla E.: 1997, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **57**, 95.
- Popović L. Č., Salim S. and Vince I.: 1997, Abstract book of GA IAU 27, Kyoto (August 17 – 30), p. 190.
- Popović L. Č., Pavlović R., Živkov V., Djurašević G. and Kubičela A.: 1998c, *19th SPIG, August 31 – September 4, 1998, Zlatibor*, Contribution, (eds. N. Konjević, M. Ćuk and I. R. Videnović), Faculty of Physics, University of Belgrade, Belgrade, p. 639.
- Popović L. Č., Trajković N. and Kubičela A.: 1998a, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **60**, 67.
- Popović L. Č., Trajković N., Kubičela A., Doroshenko V. T., Sergeev S. G., Bon E. and Stanić I.: 1998b, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **61**, 139.
- Popović L. Č., Vince I., Kubičela A. Atanacković-Vukmanović O. and Samurović S.: 1994b, *Bull. Astron. Belgrade* **149**, 9.
- Popović L. Č. Vince I., Atanacković-Vukmanović O. and Kubičela A.: 1995a, *Astron. Astrophys.* **293**, 309.
- Popović L. Č., Vince I., Kubičela A., Salim S.: 1999, Proceedings of IAU Symp. No. 184 (Aug. 18–22 1997, Kyoto), *The Central Regions of the Galaxy and Galaxies*, to be published.