



Спектрополаризација : Нови поглед у центар активних галаксија

Лука Ч. Поповић

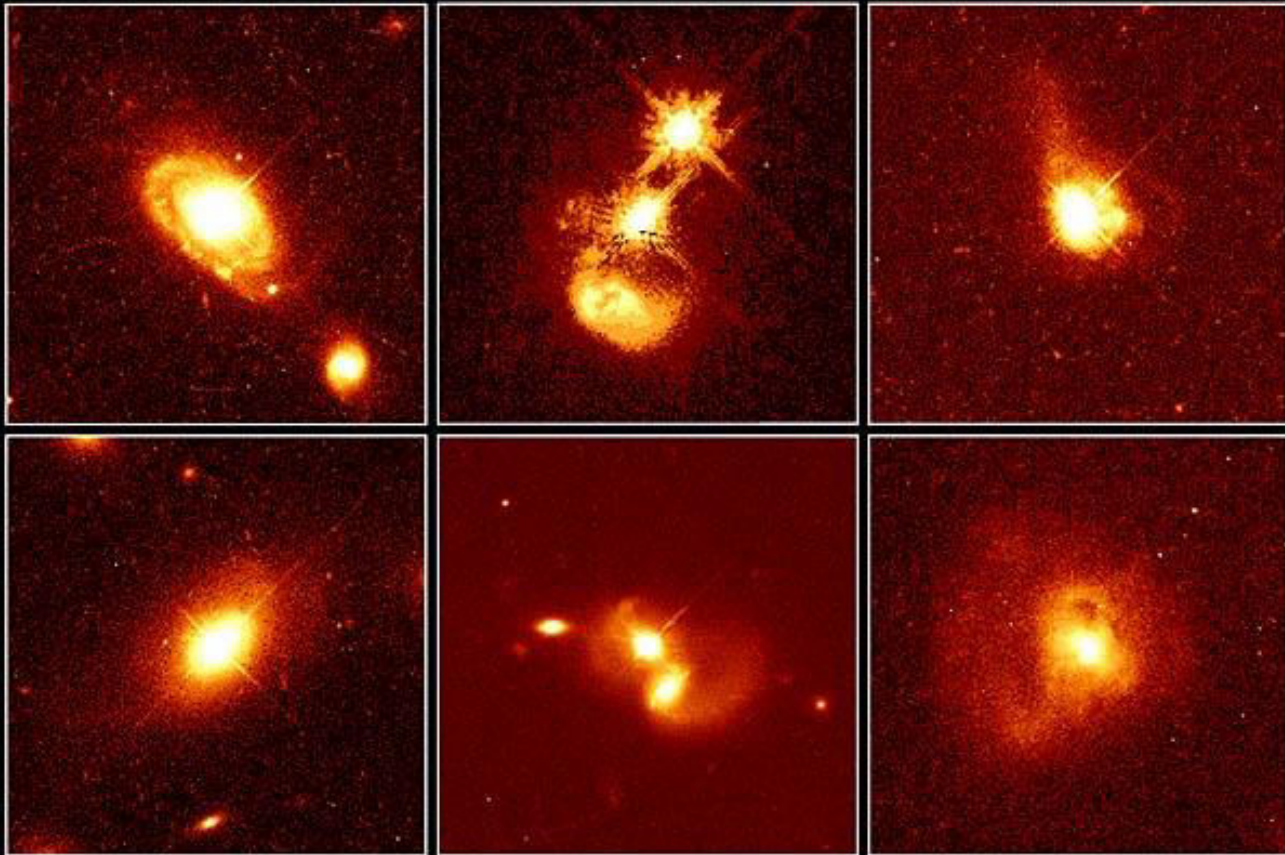
Астрономска опсерваторија, Београд

Активне галактичка језгра

- Најјачи извори енергије у васиони – видљиви на великим космолошким растојањима
- У центрима спиралних и елиптичких галаксија – еволуција галаксија
- Акреција око супермасивне црне рупе – екстремни физички услови, особине

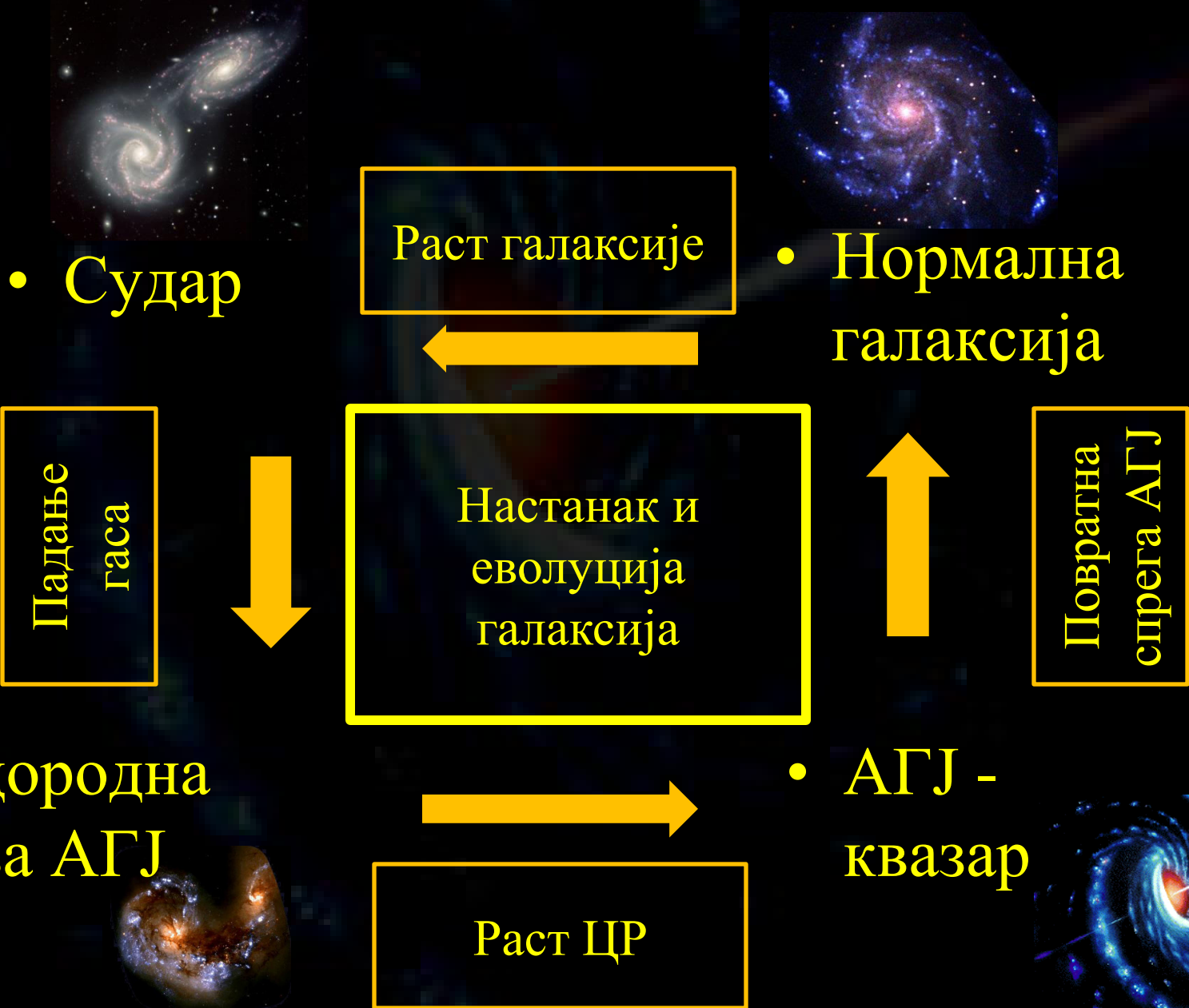
Галаксије – домаћини квазара

- Тешко посматрати због сјаја центра
- Углавном показују структуре судара

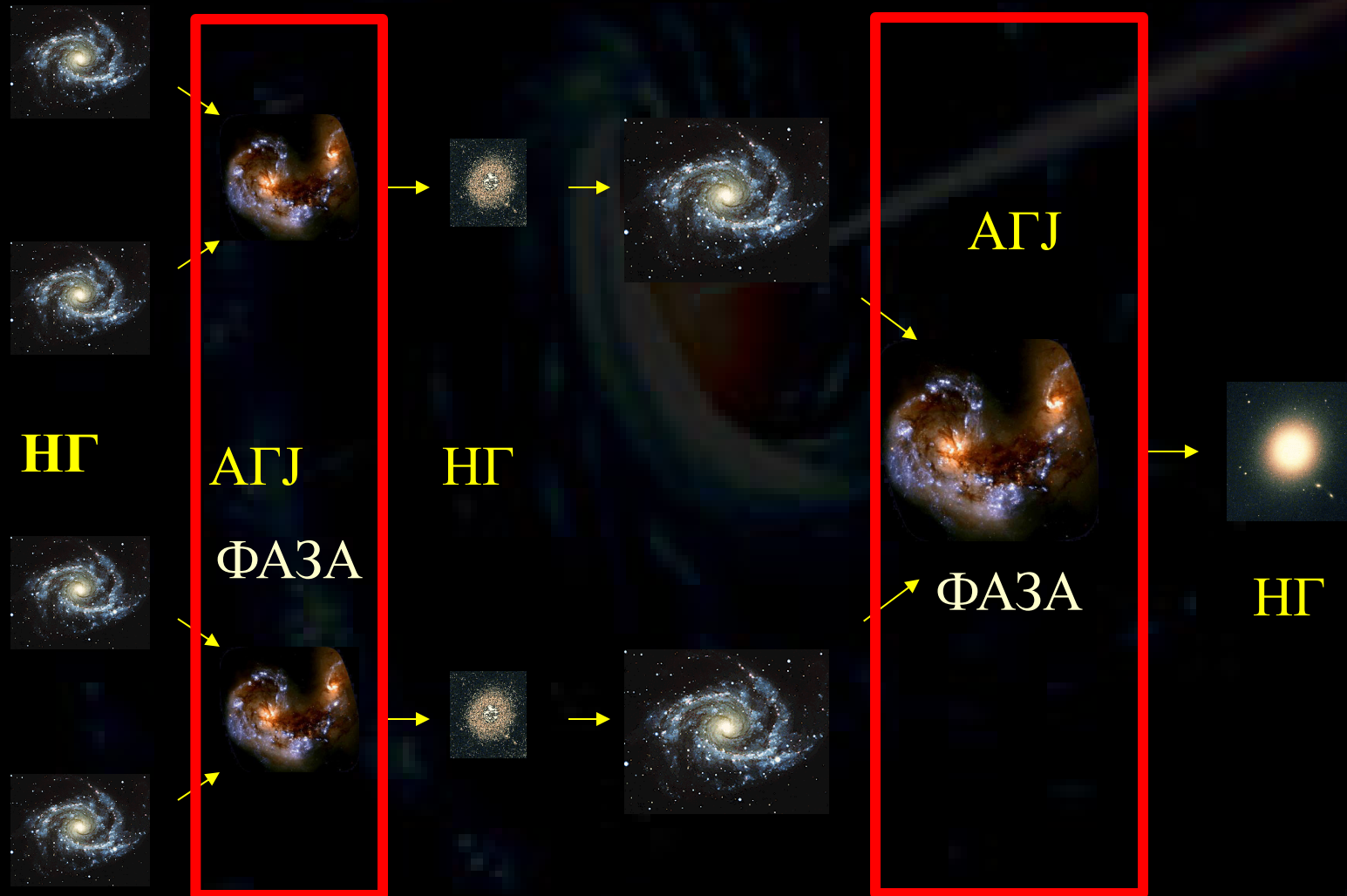


Облик галаксија у чијем је центру квазар

Коеволуција ЦР и галаксија



Хијерархија у формирању галаксија

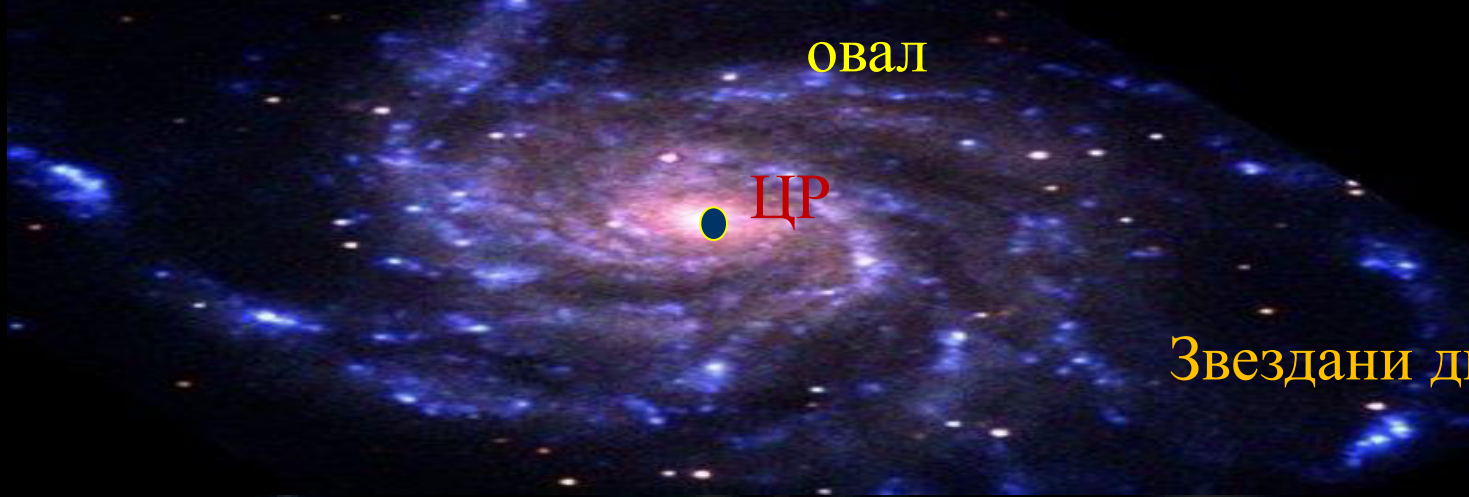


Активне галактичка језгра

- Улога црних рупа у еволуцији галаксија – значај одређивања параметара супермасивне црне рупе (маса, спин)

Улога супермасивних црних рупа у развоју галаксија и васионе

- Налазе се у центрима (свих) галаксија
- Масае: $M_{\text{ВН}} = 10^5 - 10^{10} M_{\text{sun}}$
- Расту помоћу судара и акреције
- Имају утицај на галаксију-домаћина
- Утичу на формирање и еволуцију галаксија, а тиме и великих структура у васиони



Овал

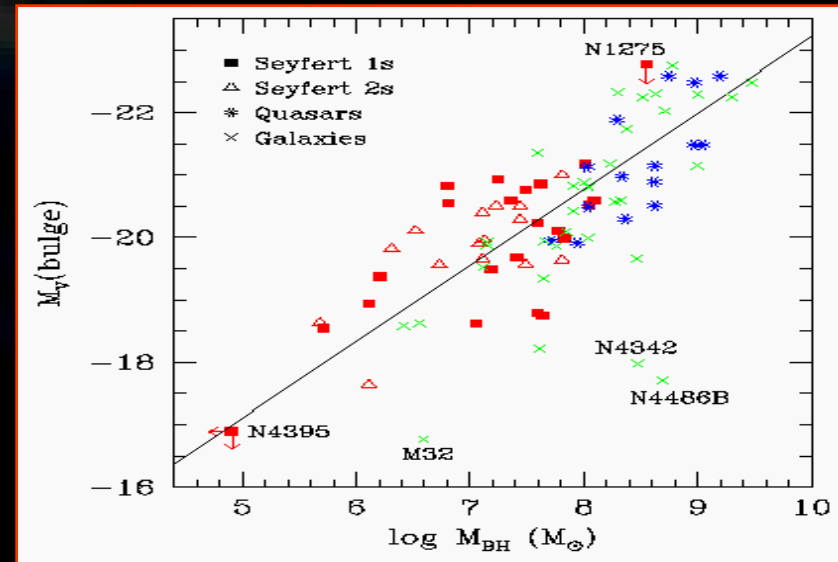
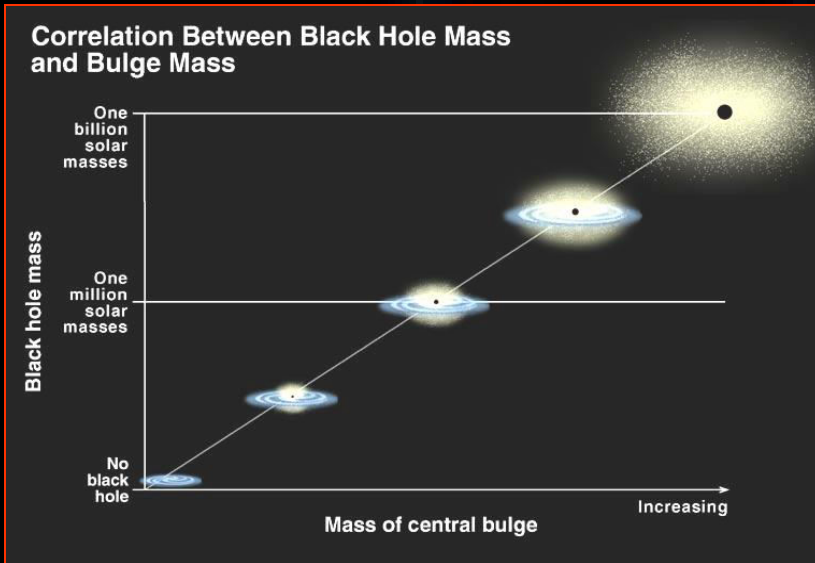
ЦР

Звездани диск

Веза ЦР- овал

$$M_{\text{BH}} = 0.2 \% M_{\text{bulge}}$$

$$M_{\text{BH}} \propto M_{\text{bulge}}^{1.74}$$

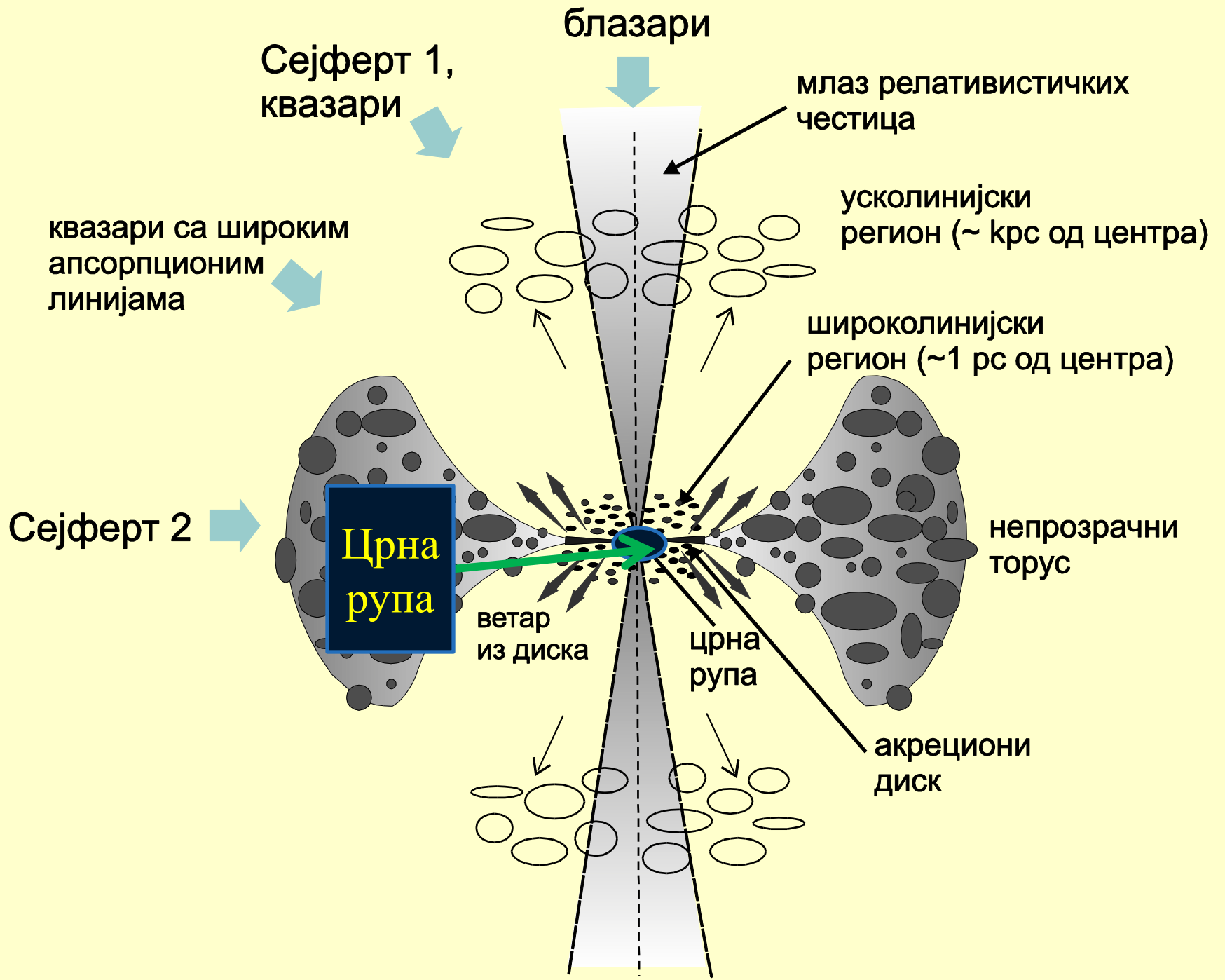


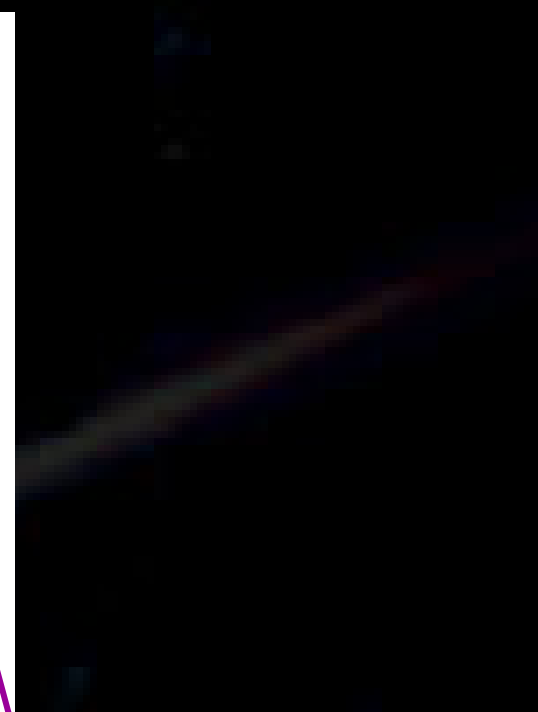
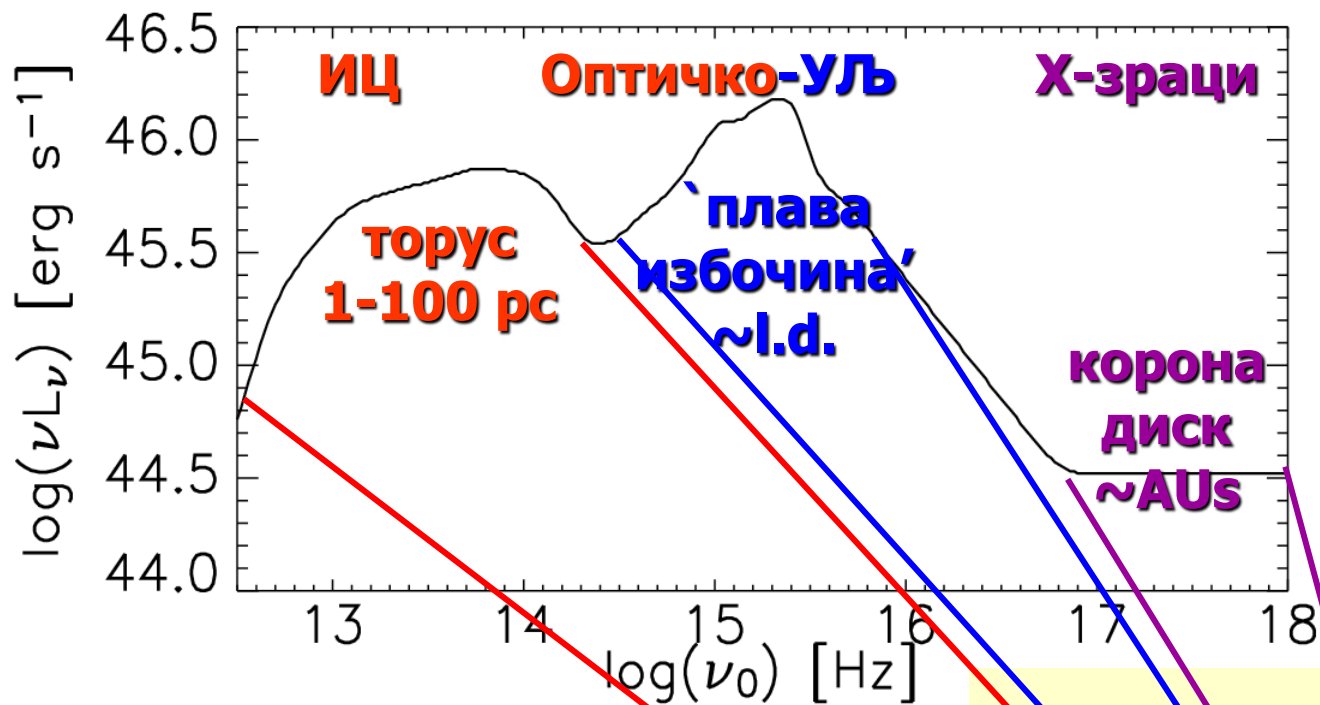
Отворена питања:

- Еволуција универзума - Улога црних рупа (од примордиалних до супермасивних)
- Огромна израчена енергија - Физички процеси који су у позадини
- Улога судара у формирању различитих структура у васиони и покретања активности код галаксија
- ИТД

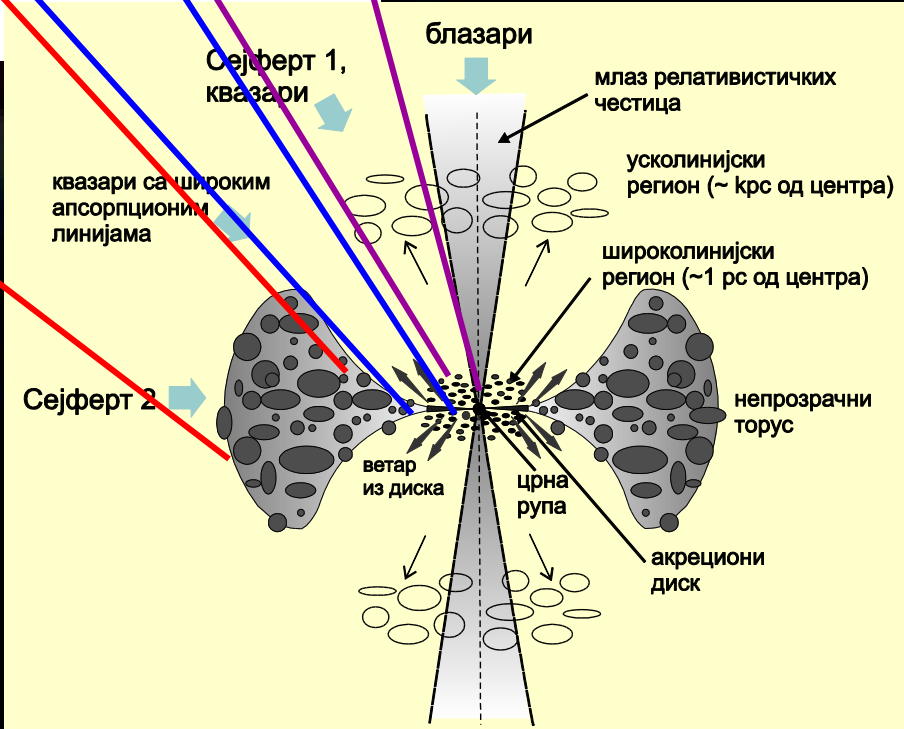
Шта су активна галактичка језгра?

- Звездолики објекти у центрима једног броја галаксија – који немају звездани спектар
- Емитију огромну количину енергије у целом електромагнетном спектру (од гама до радио зрачења)
- У зависности од спектралних карактеристика деле се у различите групе (Sy1, Sy2, QSOs, квазари, блазари, итд.)

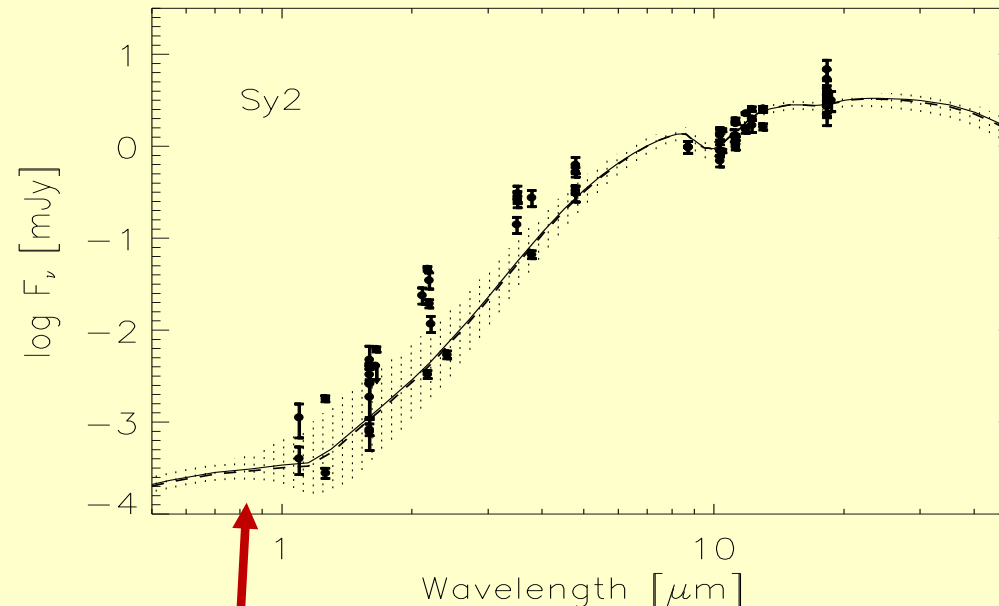
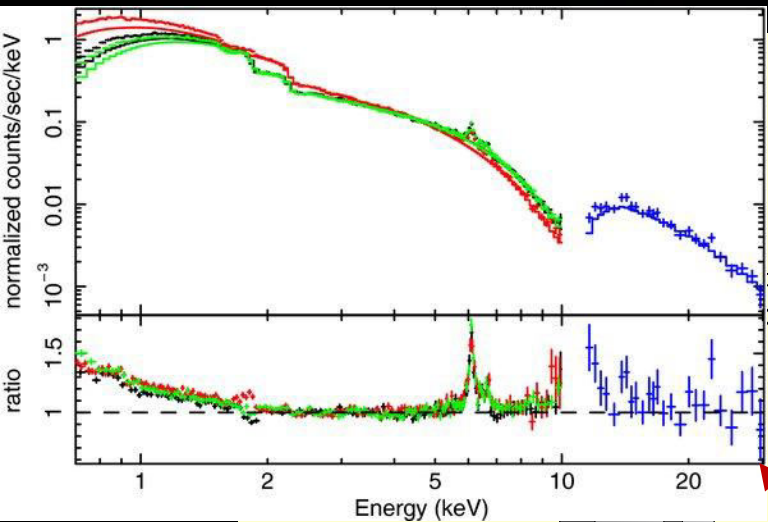




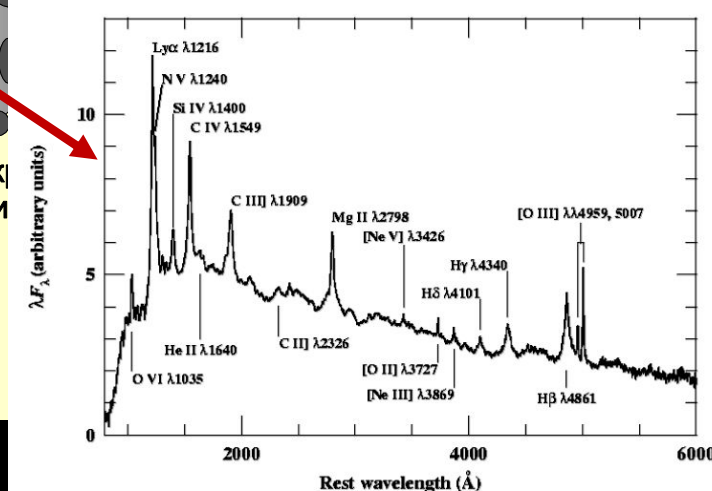
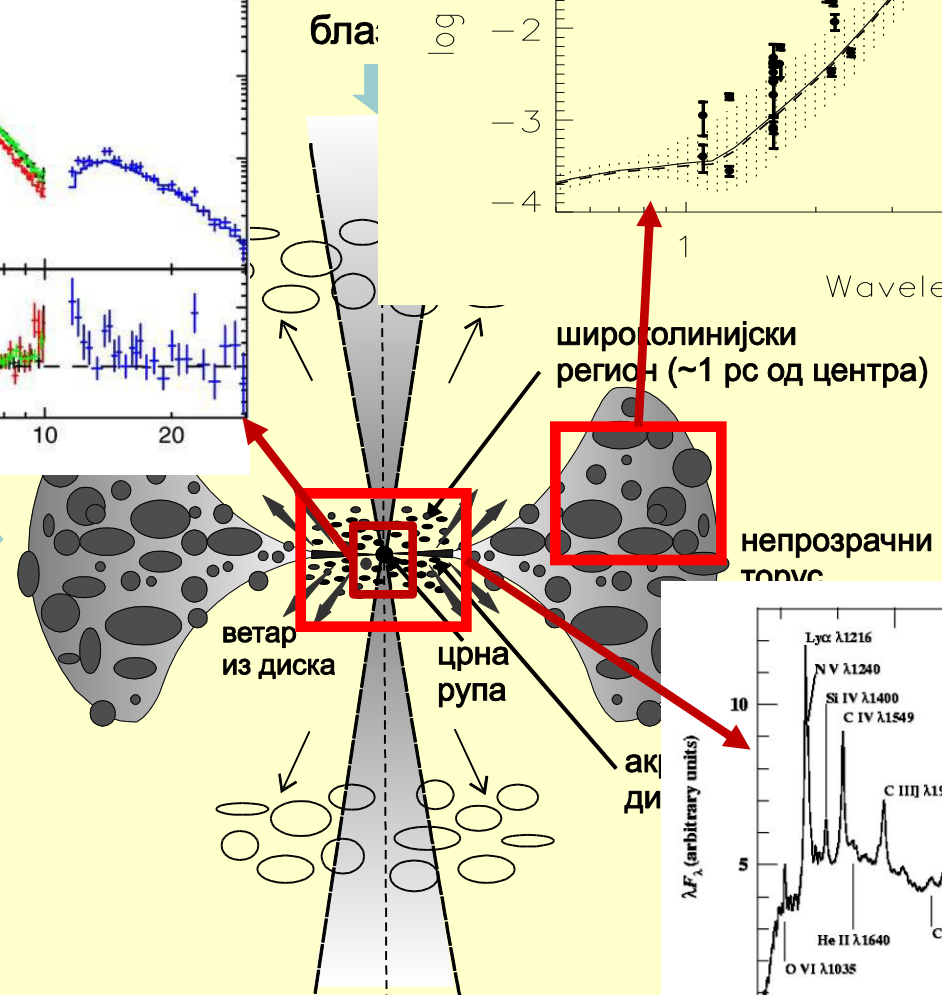
Енергија у спектру – емисионе области



Линијски спектар

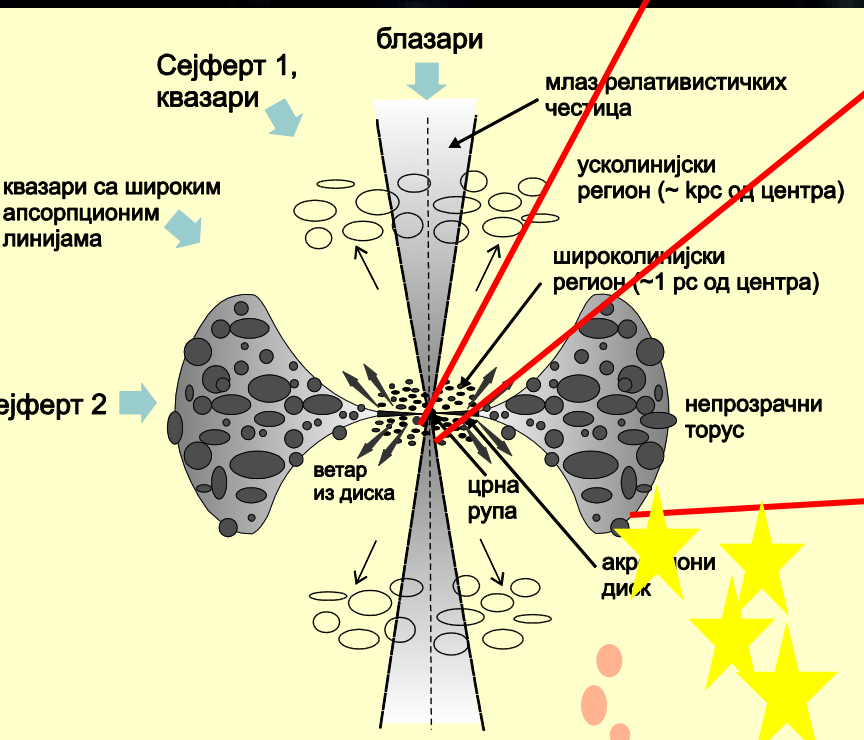


Сејферт 2



Истраживања код нас

- Центар – гравитација, маса црне рупе (П. Јовановић, Д. Илић, Е. Бон, А. Ковачевић, С. Симић)

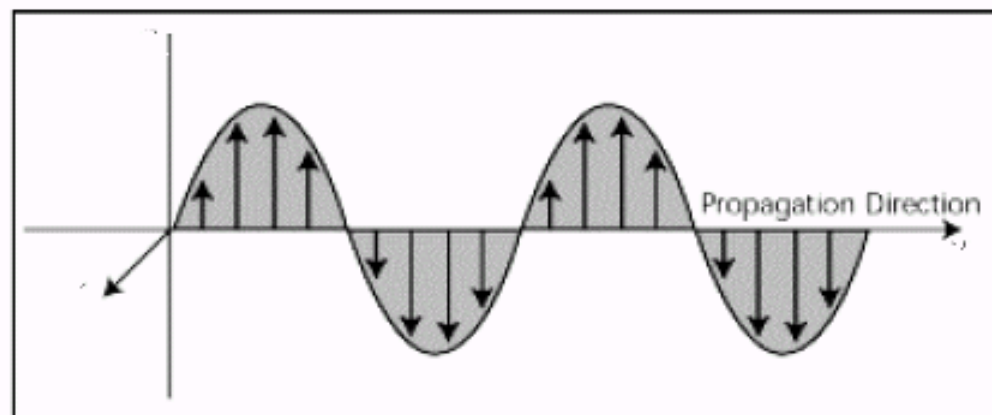
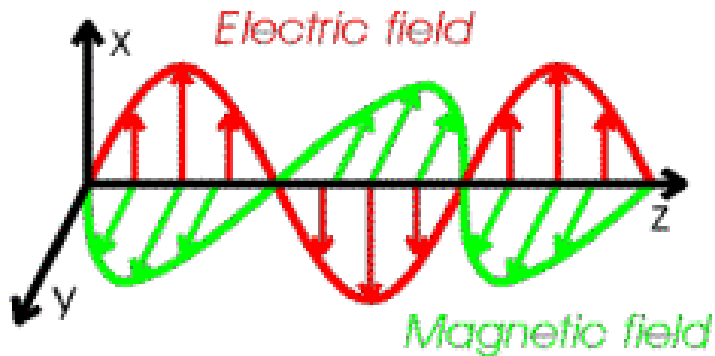


- Спектралне карактерист. Ем. рег. (Ј. Ковачевић-Дојчиновић, М. Лакићевић, С. Мандић)
- Торус и звездана популација (Н. Бон, М. Сталевски)

Поларизација у спектру: Укратко о поларизацији електромагнетни талас

$$\vec{E}_x(z,t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \vec{x}$$
$$\vec{E}_y(z,t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \vec{y}$$

Нпр ако је на x , $E_{0x} = 0$,
постоји само једна
компонента по y



A. Linearly Polarized Light in the Vertical Direction

Стоксови параметри описани помоћу електричног поља

$$\left(E_{0x}^2 + E_{0y}^2\right)^2 - \left(E_{0x}^2 - E_{0y}^2\right)^2 - \left(2E_{0x}E_{0y}\cos \varepsilon\right)^2 = \left(2E_{0x}E_{0y}\sin \varepsilon\right)^2$$

Дефинишемо четири
Стоксоа параметра:

У случају линеарне поларизације $V=0$:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right)$$

$$Q = P \cos 2\Theta$$

$$U = P \sin 2\Theta$$

$$S_0 = I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2$$

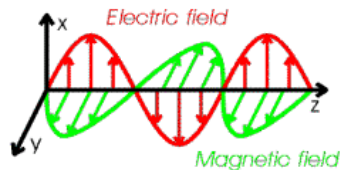
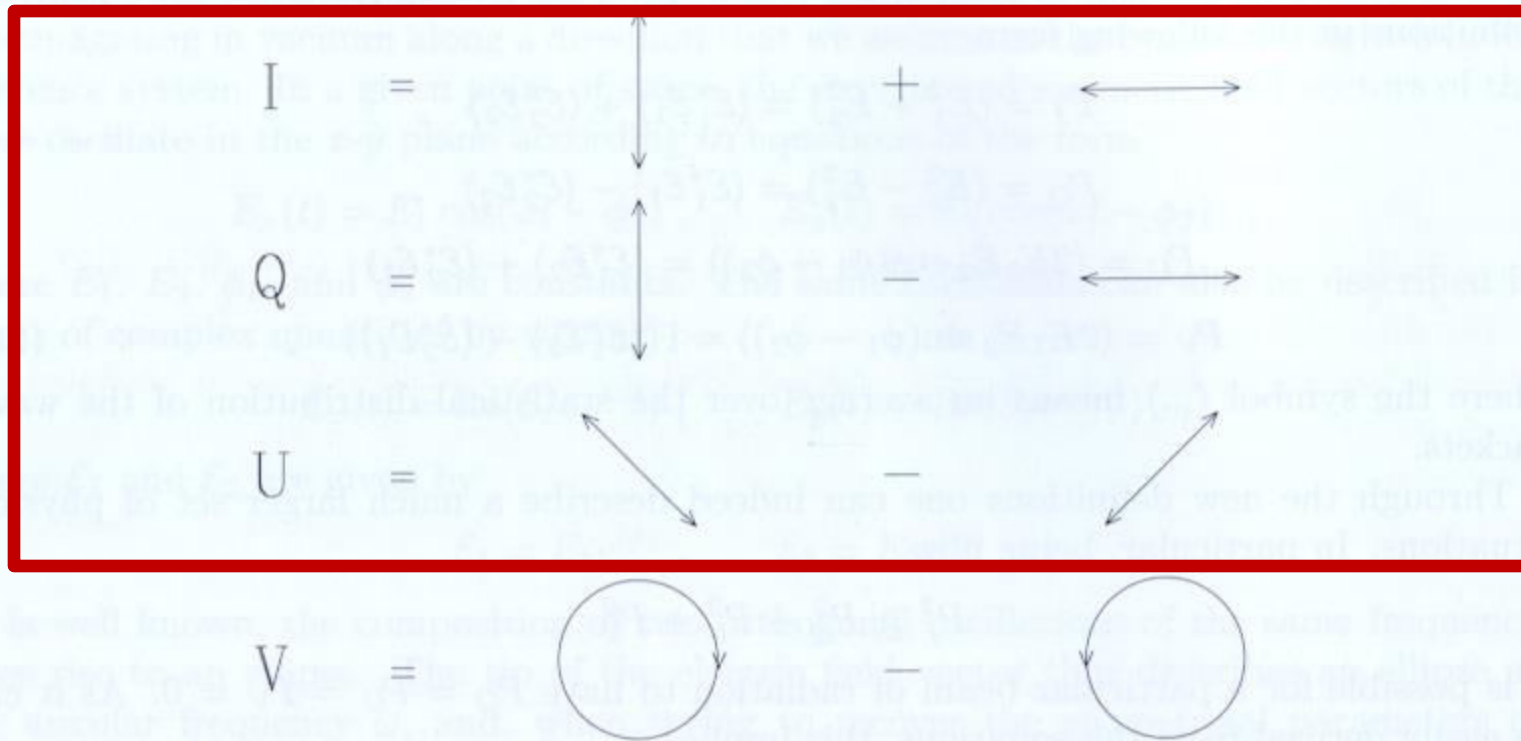
$$S_1 = Q = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$$

$$S_2 = U = 2E_{0x}E_{0y}\cos \varepsilon$$

$$S_3 = V = 2E_{0x}E_{0y}\sin \varepsilon$$

Два параметра, степен
поларизације и
поларизациони угао

Шема стоксових параметара – вектори!



representation of the Stokes parameters. The observer is supposed to face the radiation source.

Поларизација у линијама и континууму АГЈ



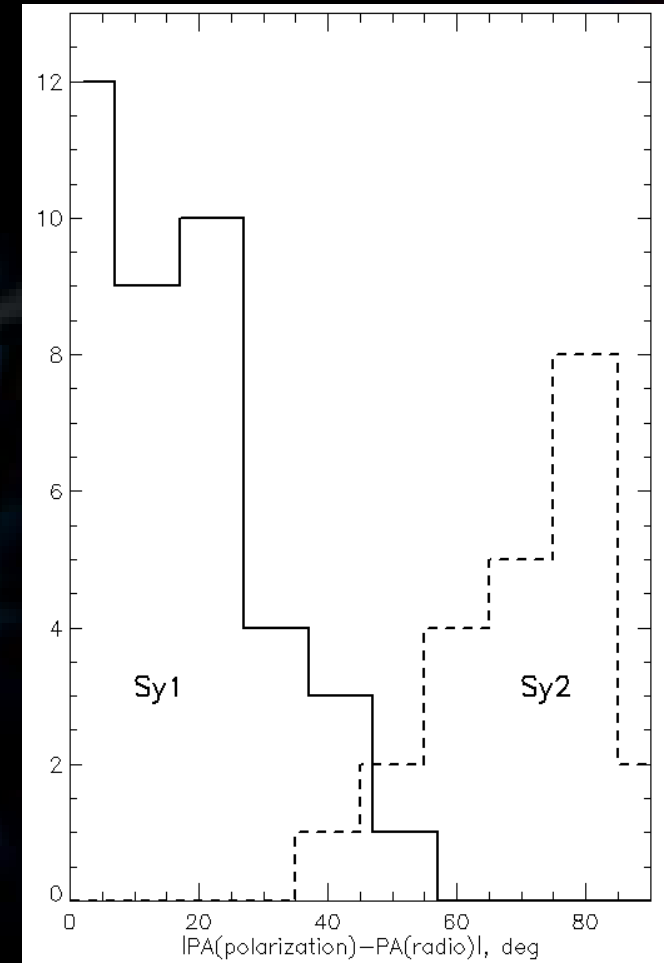
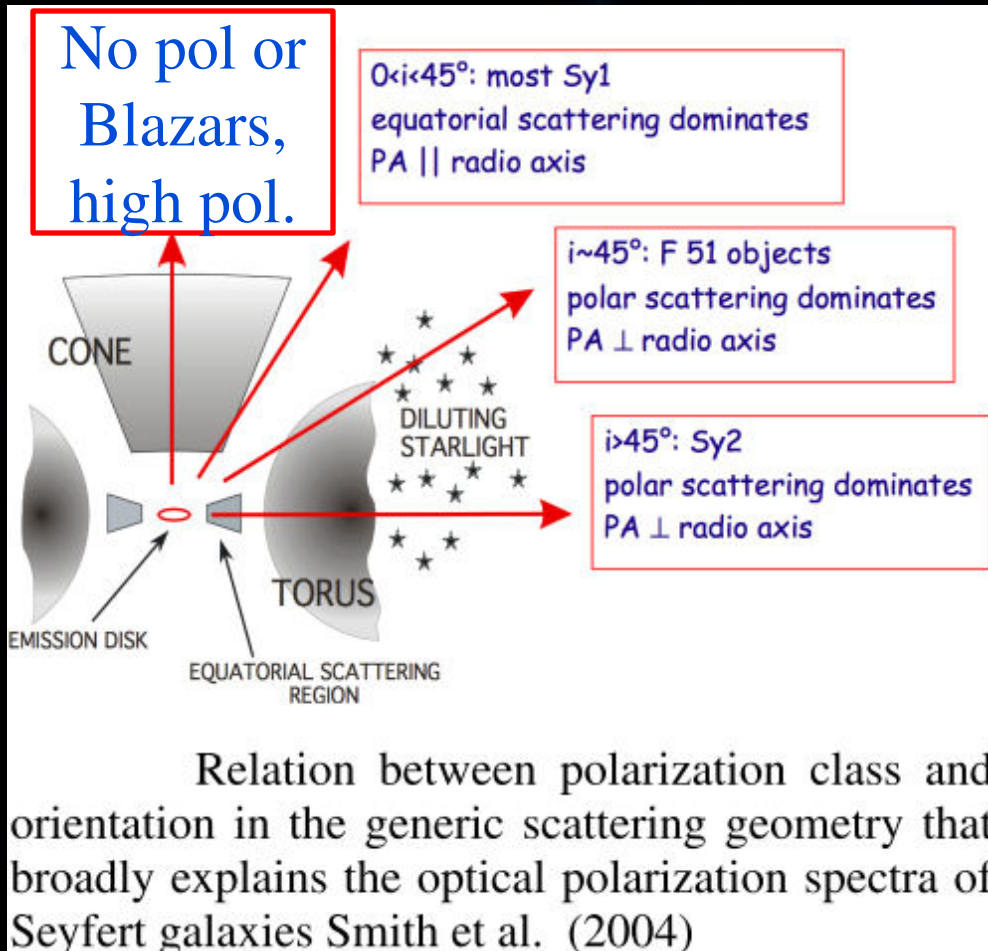
Поларизација у континууму

- ✓ Пренос зрачења у АД
- ✓ Синхотронско зрачење у млазу
- ✓ Расејање на прашини у торусу

Поларизација у линијама

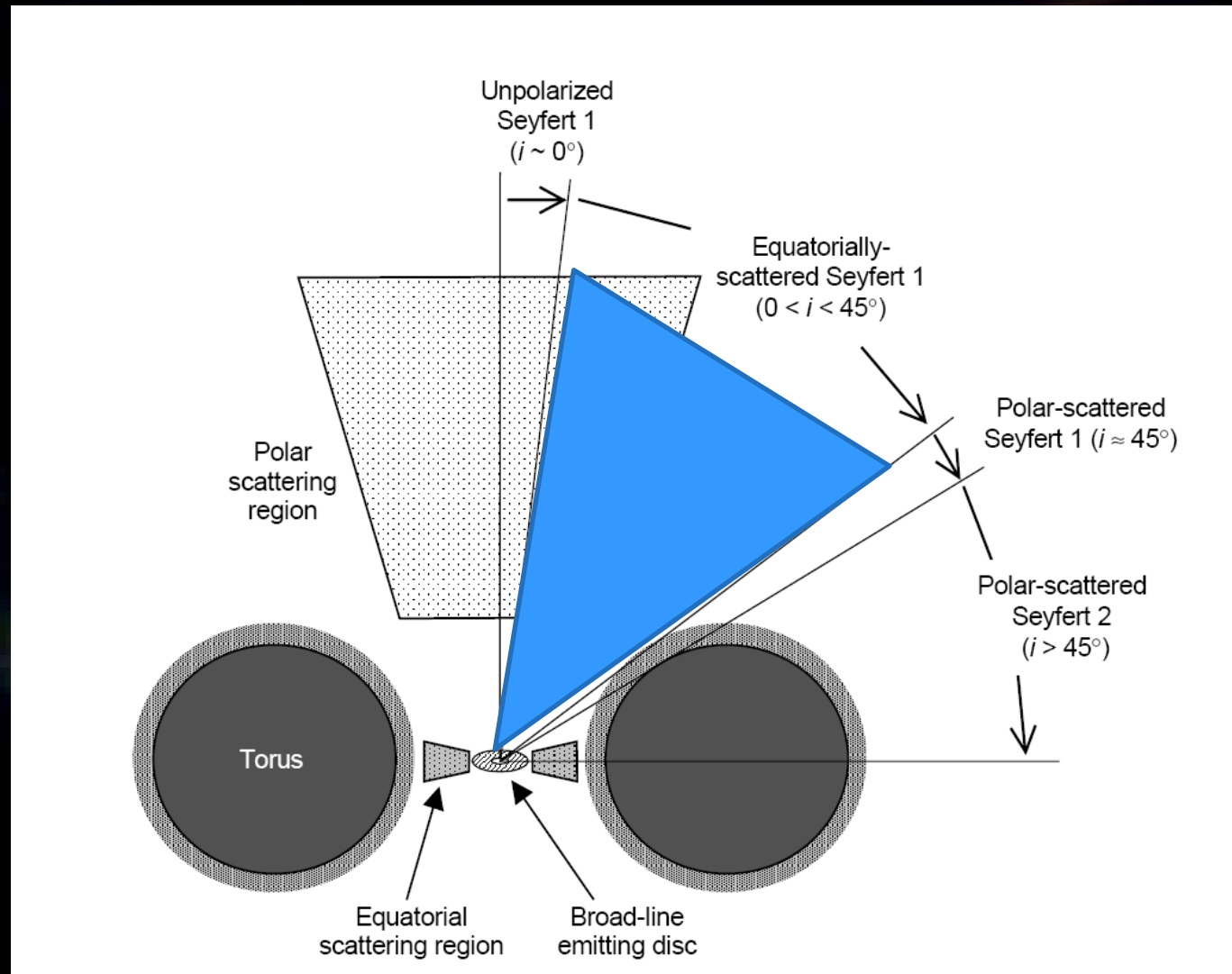
- ✓ Расејање (торус)
- ✓ Пренос зрачења у линији

Поларизација код АГЈ



Важна је оријентација

Широке линије (Sy 1) – Smith et al. 2004, поларна и екваторијална поларизација



Наша спектрополарометријска посматрања:

Мотив

- Проучавање промењивости у поларизованом спектру код Типа 1 АГЈ
- Одређивање димензија и природе поларизационе

Методе

- Посматрање и мерење линеарне поларизације (Стоксови параметри) код Типа 1 АГЈ. Ниска спектрална резолуција, али већи обег таласних дужина, посматрање у неколико
- Реверберација, процена димензија поларизационе области и упоређивање са димензијама широколинијске
- Моделирање података са кодом STOKES (развијен од стране Рене Гусмана)

Инструмент

- 6-м телескоп + SCORPIO, спектрални опсег 4000-8000 АА
- Различит тип анализера - Savart plate, Wollaston-ова призма
- Спектрална резолуција 5-40АА,
- Тачност мерења у поларизацији ~ 0.1-0.3%

Посматрања

$$Q(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I_{90}(\lambda)}{I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)},$$

$$U(\lambda) = \frac{I_{45}(\lambda) - I_{135}(\lambda)}{I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)},$$

Стоксови параметри

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda) + I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)$$

$$P(\lambda) = \sqrt{Q(\lambda)^2 + U(\lambda)^2}, \quad \varphi(\lambda) = \frac{1}{2} \arctg[U(\lambda)/Q(\lambda)].$$

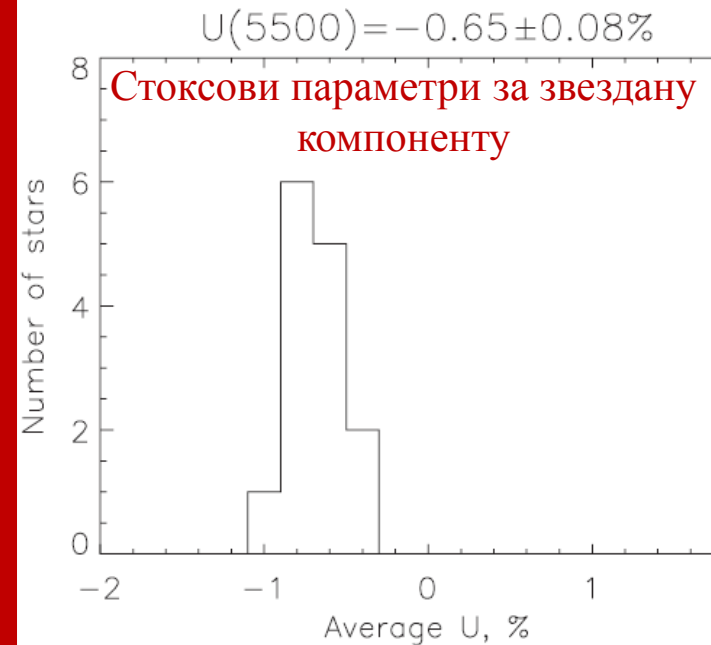
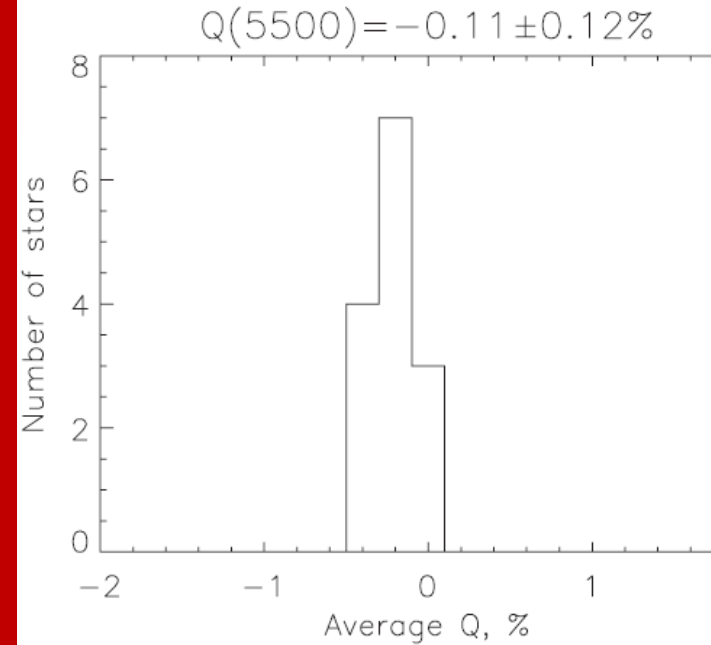
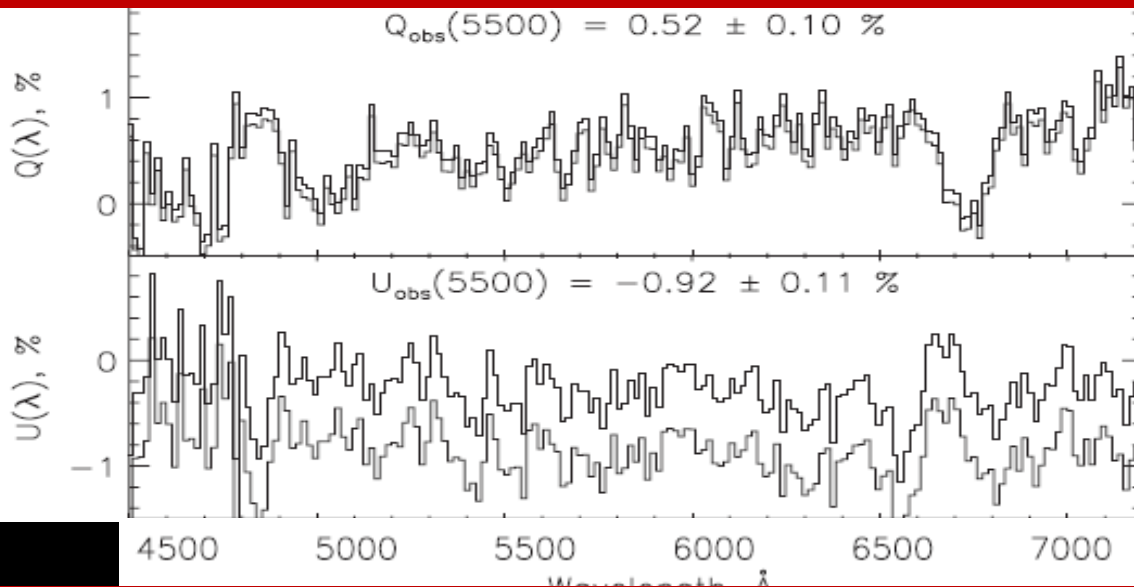
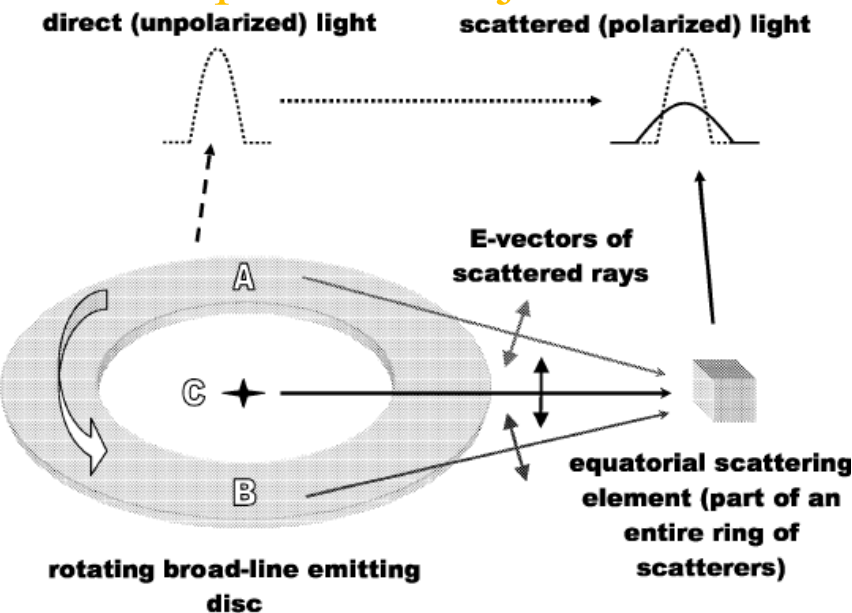


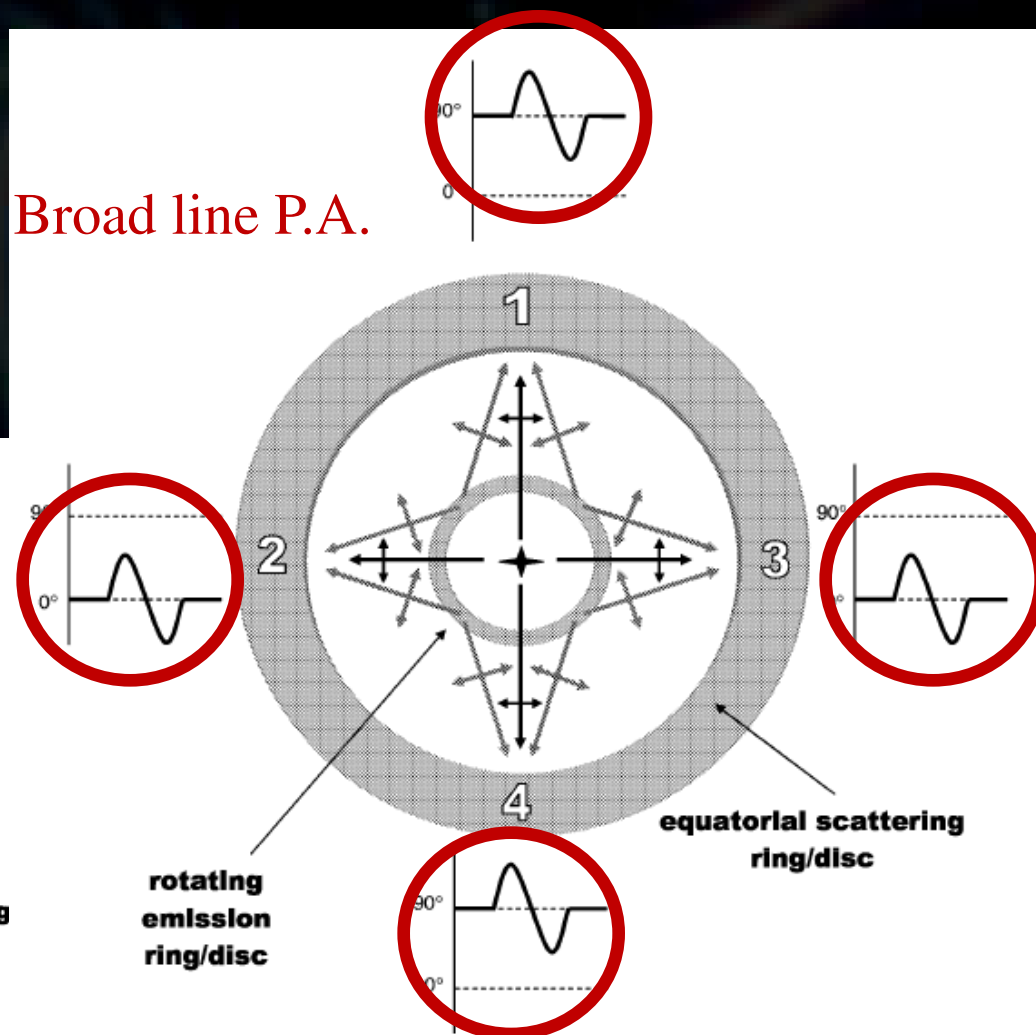
Figure 1. Histograms of ISM polarization parameters measured from stars around Mrk 6.

Тип 1 АГЈ: Екваторијална поларизација у широким линијама (Smith et al. 2004,2005)

Облик поларизованих широких линија



Broad line P.A.



Спектрополарометрија Mrk 6 (IC 450)

Sy 1.5 галаксија, $z=0.0185$, $m(B)=14.29$, $M(B)=-20.41$

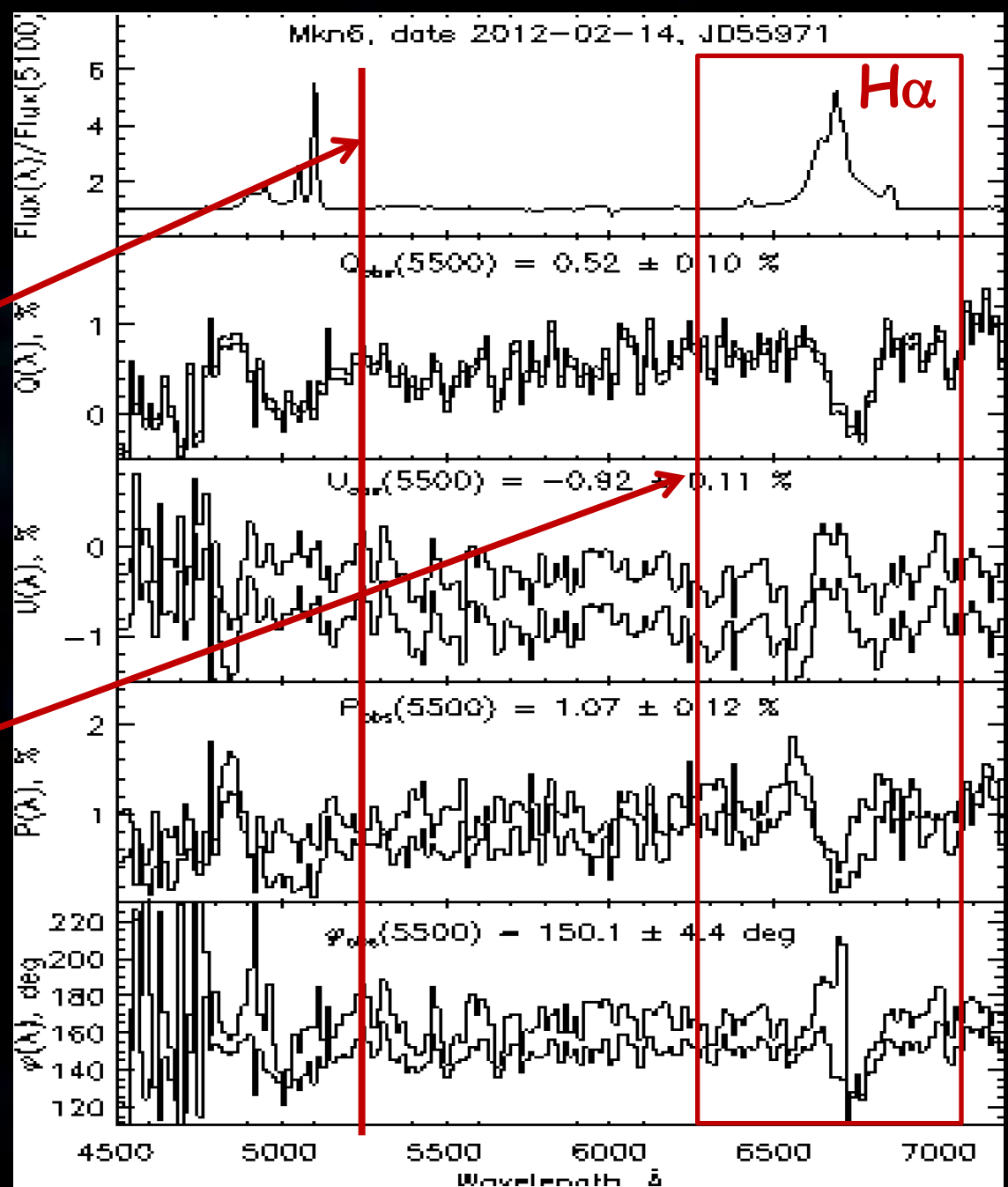
- Посматрана на 6 –m телескопу САО РАС у периоду 2010-2013;
- Спектар из 12 епоха у спектралном опсегу од H β до H α са спектралном резолуциом од 7-8 Å ;
- Међузвездана поларизација обрачуната
- Прецизност мерења Стоксових параметара је 0.2%

Afanasiev, V. L., Popovic, L. C., Sharovalova, A. I. Ilic, D.,
2014, MNRAS, 440, 519

Посматрања

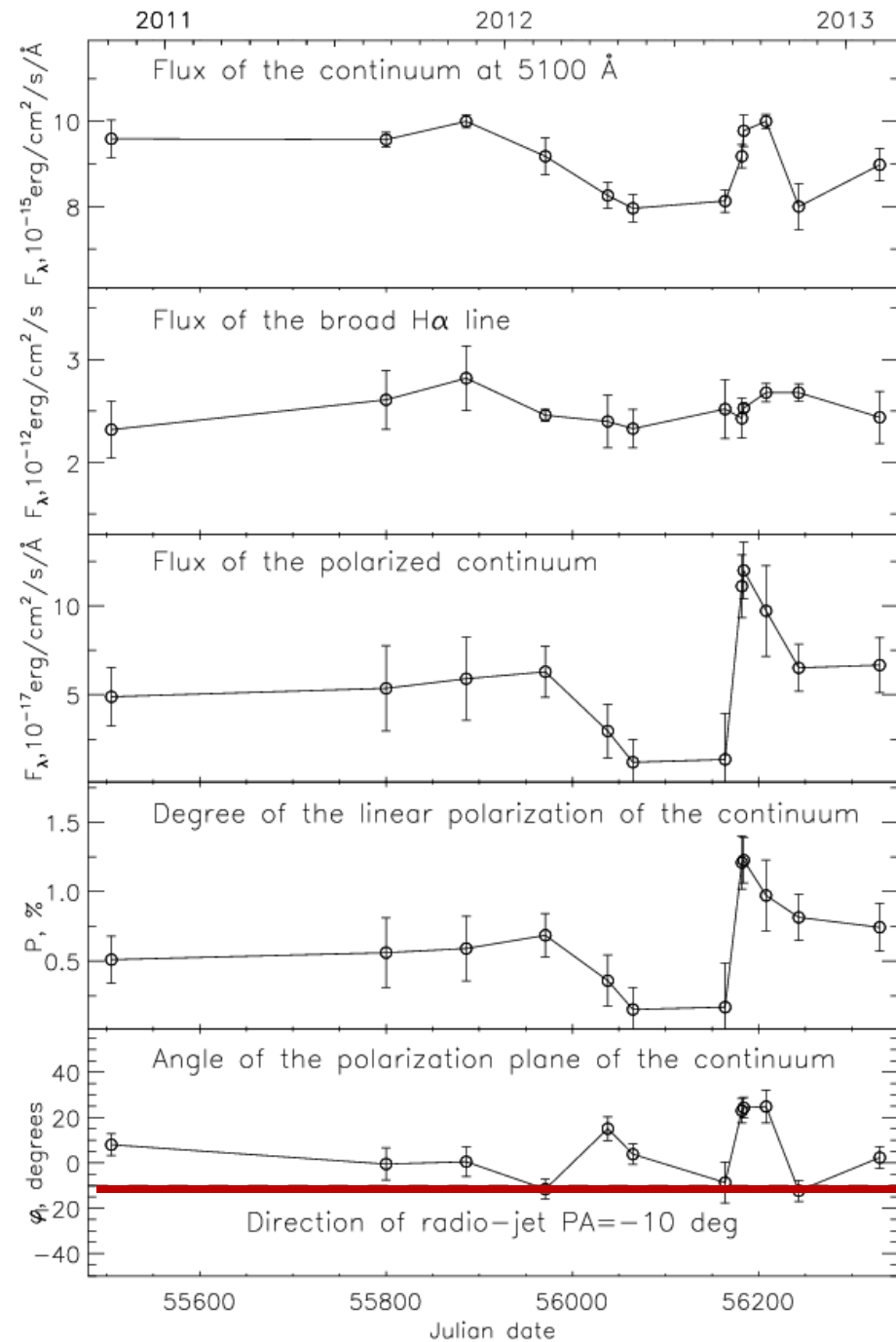
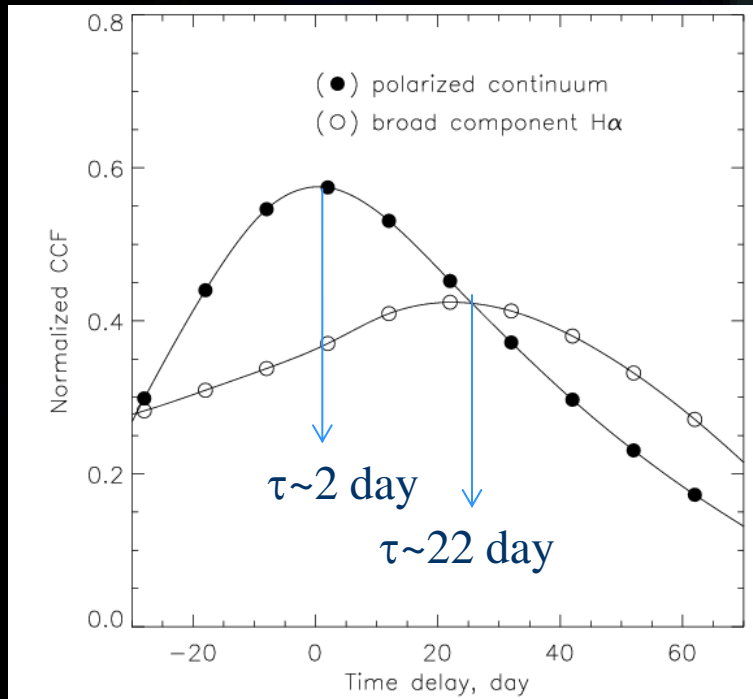
КОНТИНУУМ

КОНТИНУУМ И
ЛИНИЈЕ



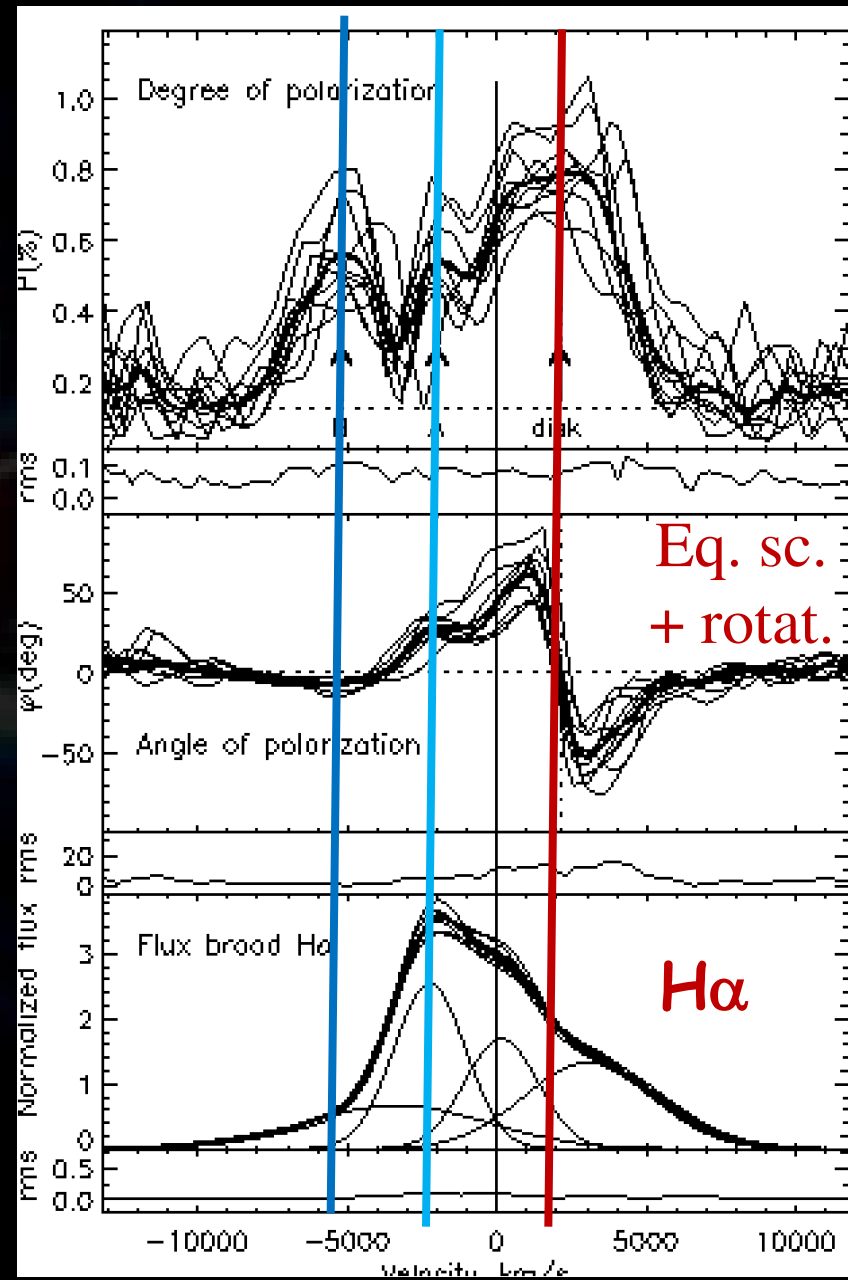
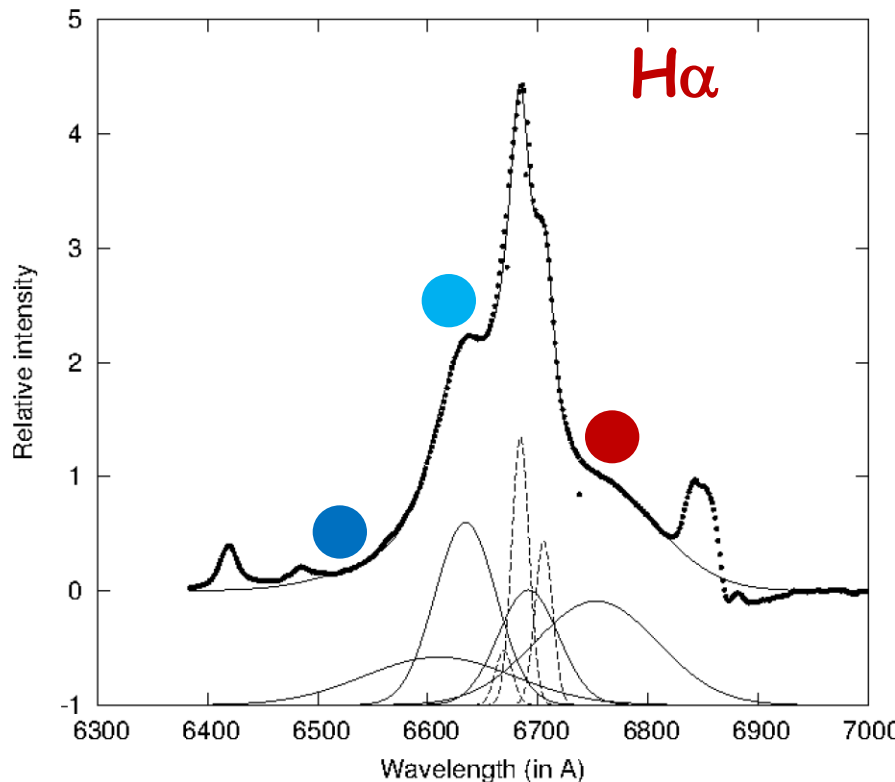
Промењивост

димензије пол обл у
континууму ~ 0.002 pc,
област линија ~ 0.2 pc

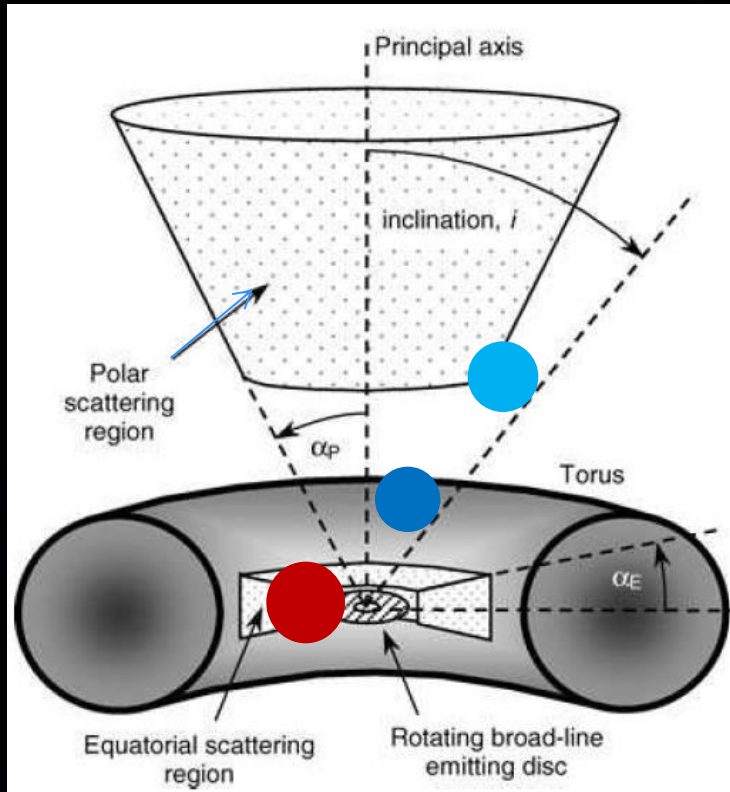


Поларизација у широким линијама

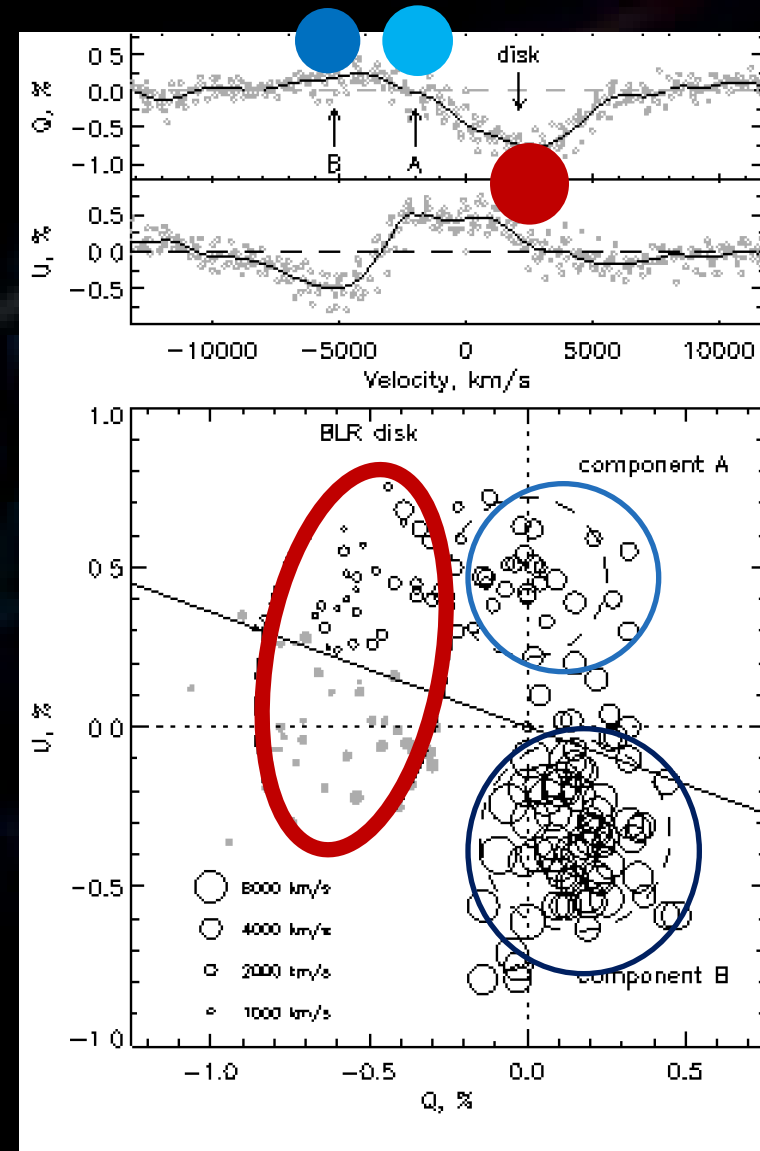
Afanasiev, V. L., Popovic, L. C., Shapovalova, A. I. Ilic, D., 2014, MNRAS, 440, 519



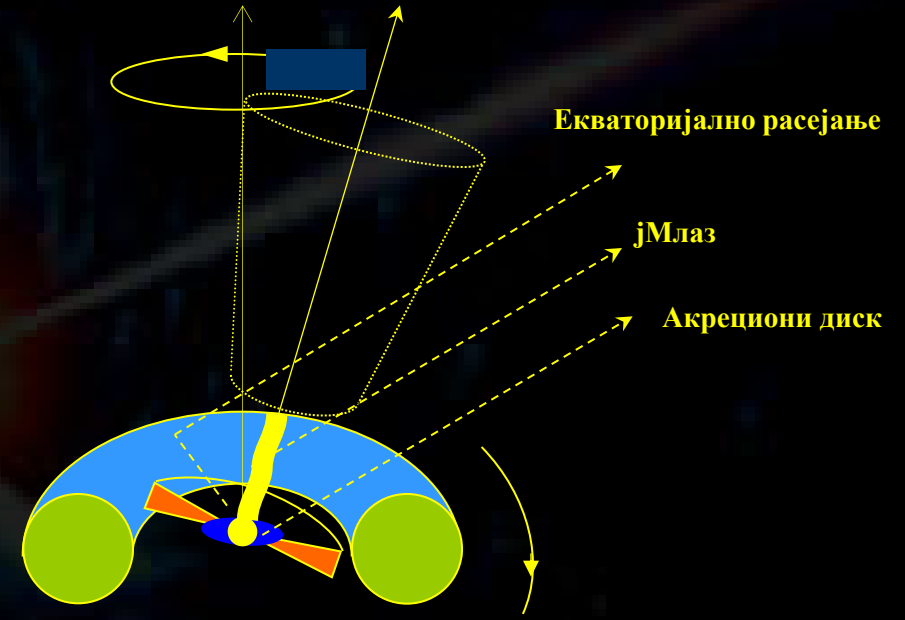
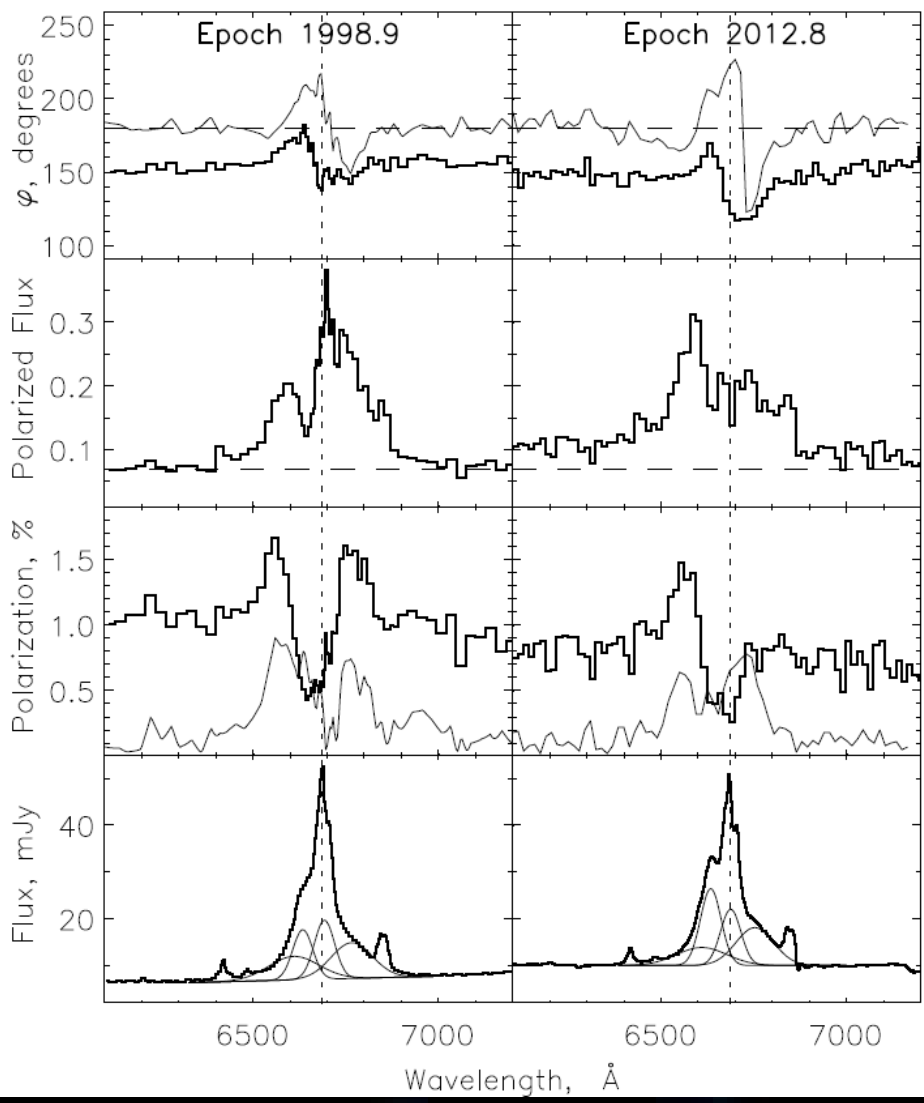
Три поларизационе области



-Торус – екваторијална поларизација
- две додатне области, вероватно у млазу, поларно расејање.



Промена у широкој $H\alpha$ на временској скали од 10 година



Да ли долази до прецесије млаза?

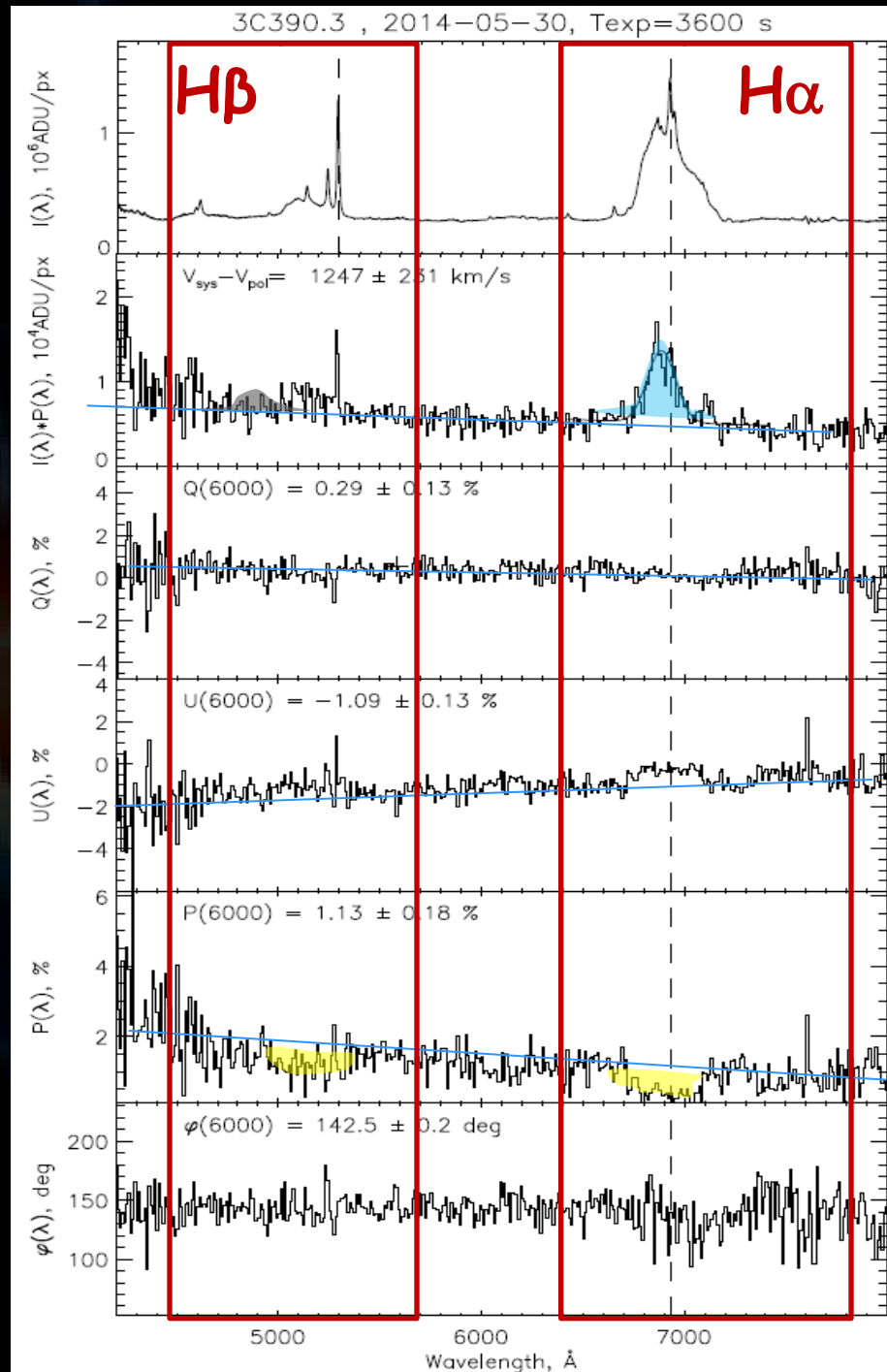
Нови поглед на центар Mrk 6

- Широколинијска област је комплексна, три области од чега једна прати кретање акреционог диска, а друге две су млазеви (један са великим брзинама)
- Кашњење у пол континууму ~ 2 дана, а у широким линијама ~22 дана;
- Дугорочан промењивост (10 година) промена у структури ширококолинијске области?

Спектрополарометрија ЗС390.3

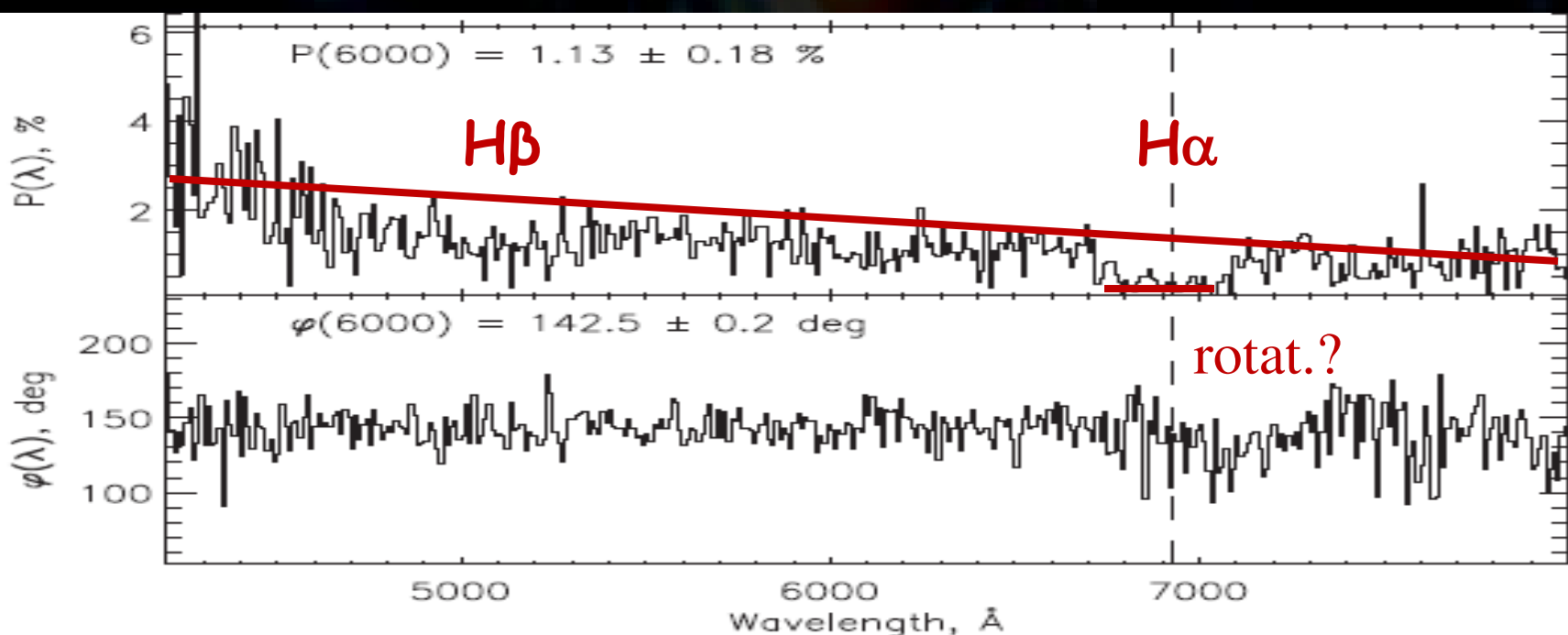
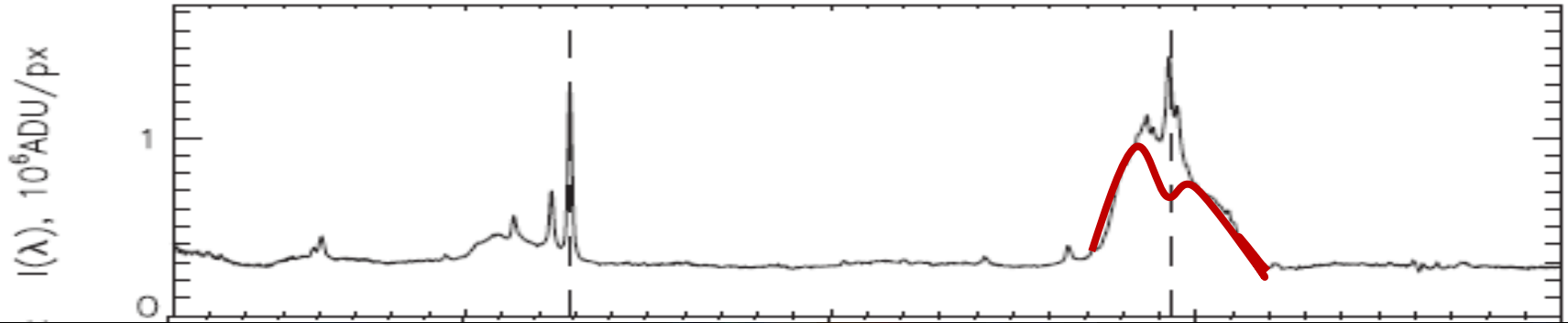
Afanasiev, V. L., Shapovalova,
A. I., Popovic, L. C., 2015,
MNRAS, 448, 2889

Промене у $H\alpha$ линији и
континууму

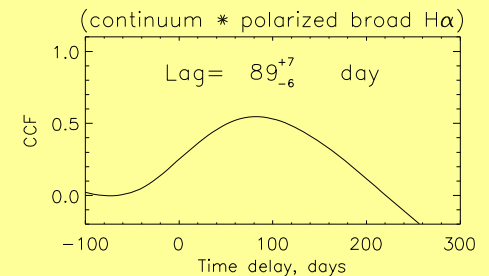
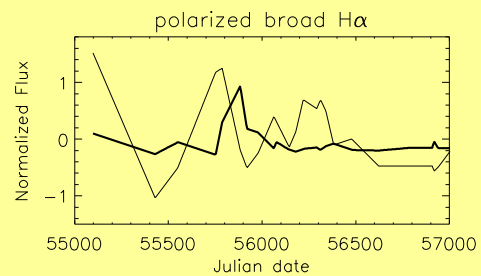
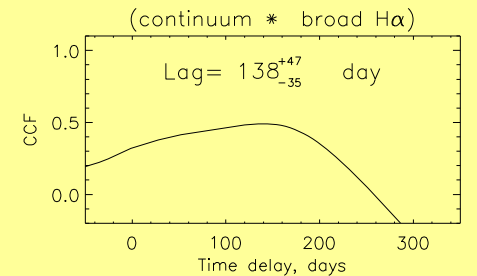
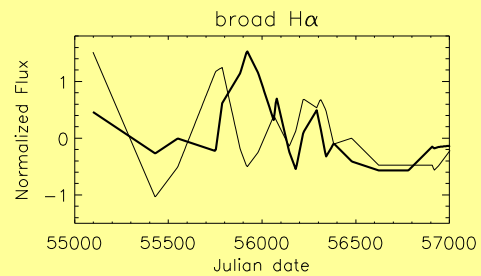
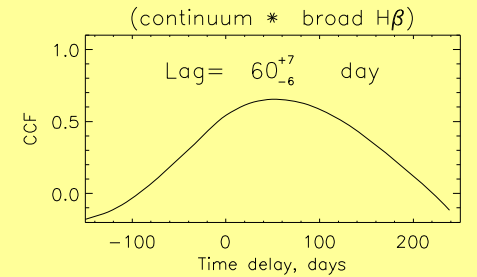
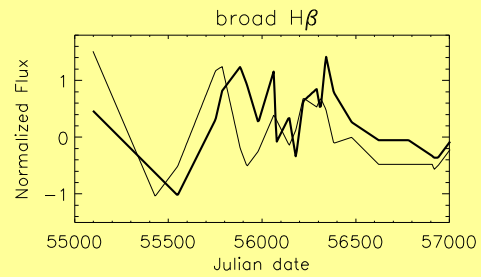
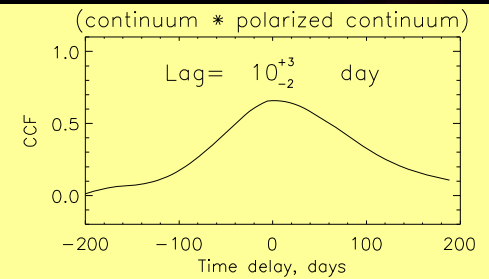
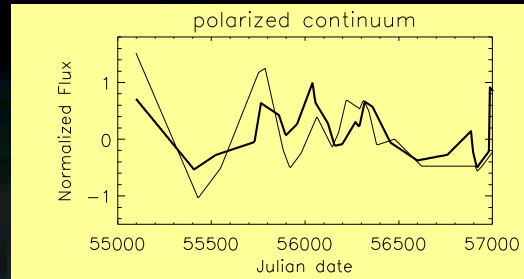
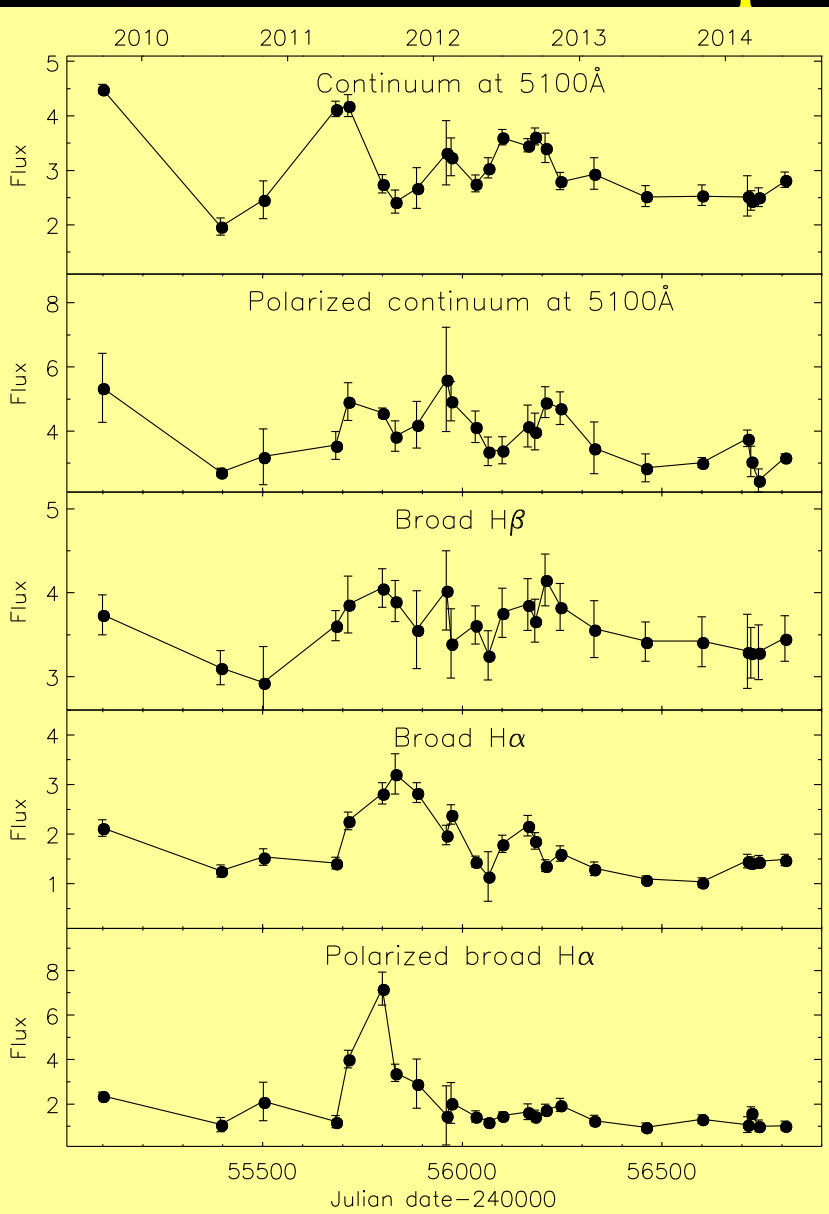


Поларизација зависи од таласне дужине, у линији $P \sim 0$?

3C390.3, 2014-05-30, $t_{\text{exp}} = 3600$ s

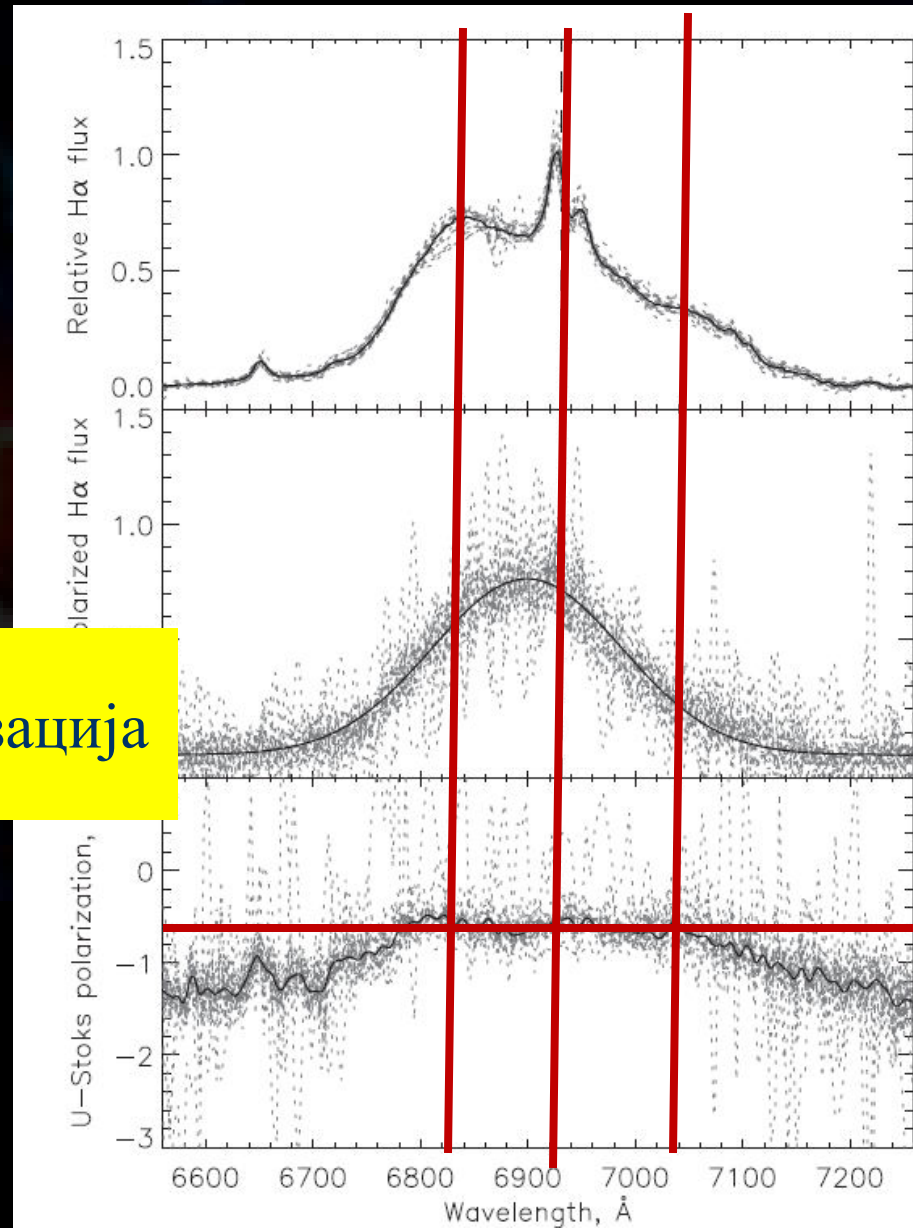
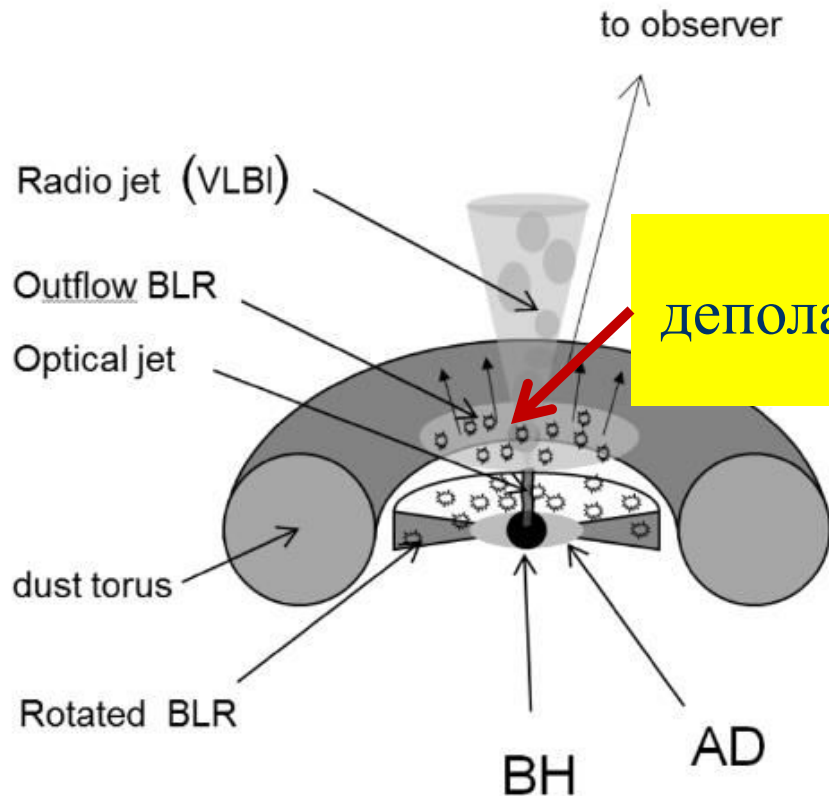


Промењивост



Деполаризација у широким линијама 3C390.3

Afanasiev, V. L., Sharovalova,
A. I., Popovic, L. C., 2015,
MNRAS, 448, 2889



Нови поглед у центар 3C390.3

- зависност поларизације од таласне дужине
- деполаризација у $H\beta$ и $H\alpha$, вероватно област изнад диска
- плави померај (-1200 km/s) у поларизованој компоненти – млаз из центра
- Промењивост у поларизованом зрачењу :
 - мало кашњење (~ 10 дана) између неполаризованог и поларизованог континуума, много мањи него кашњење у широким линијама ($H\alpha$) ~ 138 ($H\beta$) ~ 60 дана
 - Кашњење у поларизованој широкој линији ($H\alpha$) ~ 89 дана, много мање него у неполаризованој ~ 140 дана

Одређивање маса црних рупа у центрима галаксија

- Неколико метода (динамика звезда, гаса, масери, реверберација, итд.): Директне и индиректне методе (нпр види Peterson 2014 SSR_{rev})
- Да ли може спектрополарометрија помоћи?

Широке емисионе линије АГЈ - реверберација

Веома близу црне рупе -
виријализација:
Ширина линије \sim
ротационој брзини



Добија се из ширинелиније

$$M_{BH} = f \frac{R_{BLR} v^2}{G}$$

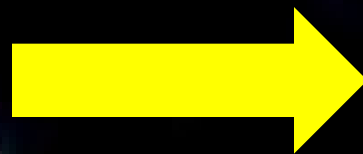
Димензија из
кашњења+реверберација

Фактор који зависи од
геометрије и поља брзина

Оцена масе црне рупе – v vs. R



$$v = \sqrt{\frac{GM_{BH}}{R_{EC}}}$$

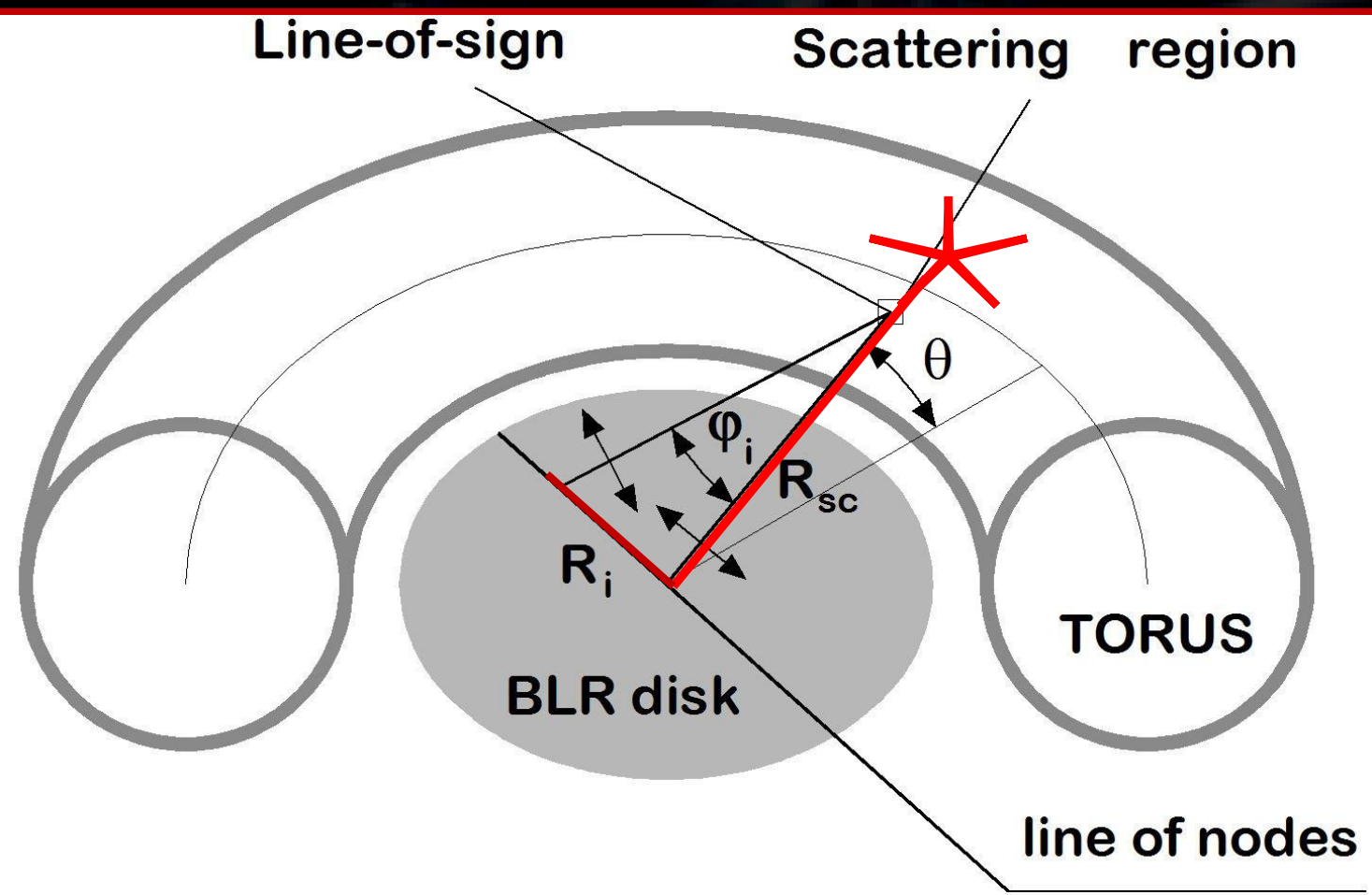


$$M_{BH} = \frac{R_{EC} v^2}{G}$$

$$v_i = \sqrt{\frac{GM_{BH}}{R_i}}$$

$$R_i / R_{sc} = \tan(\varphi)$$

$$R_{sc} = \text{const.}$$



$$v_i = \sqrt{\frac{GM_{BH}}{R_{SC} \tan(\varphi_i)}},$$

$$\log(v_i) = a - b \log(\tan(\varphi_i)),$$

$b = 0.5$, Keplerian motion

$$a = f\left(\frac{M_{BH}}{R_{SC}}\right)$$

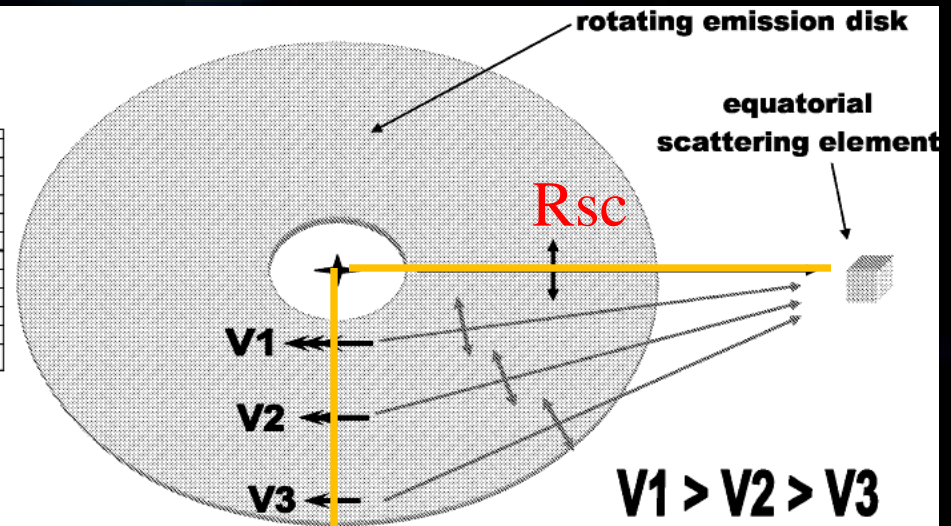
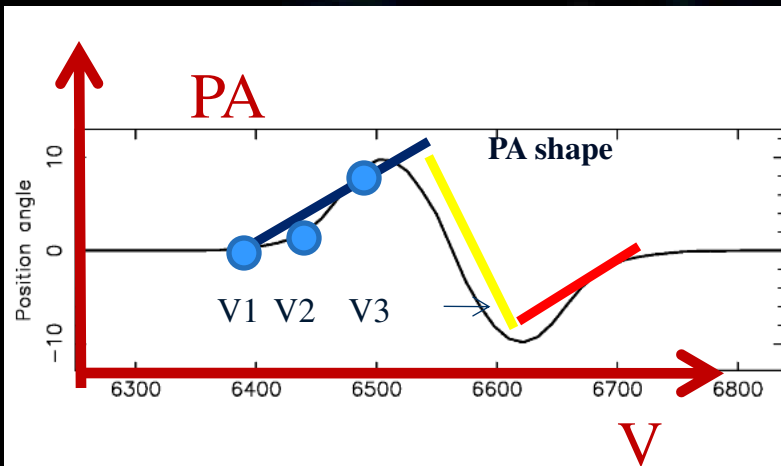
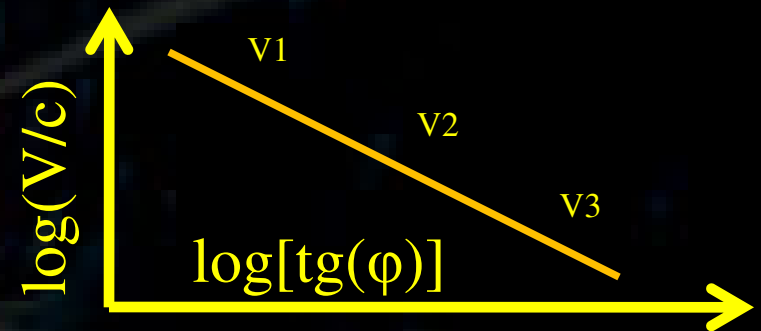
Поларизација у широкој Нα. Екваторијално расејање - идеја

$$v_i = \sqrt{\frac{GM_{BH}}{R_{SC} \tan(\varphi_i)}},$$

$$\log(v_i) = a - b \log(\tan(\varphi_i)),$$

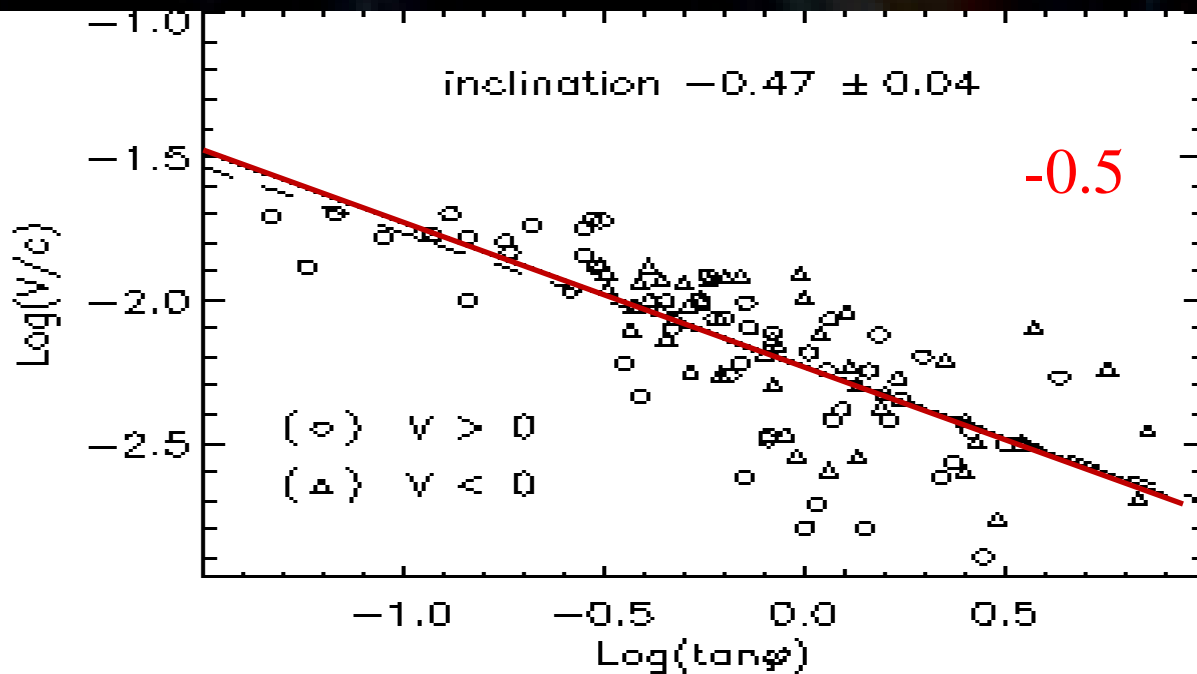
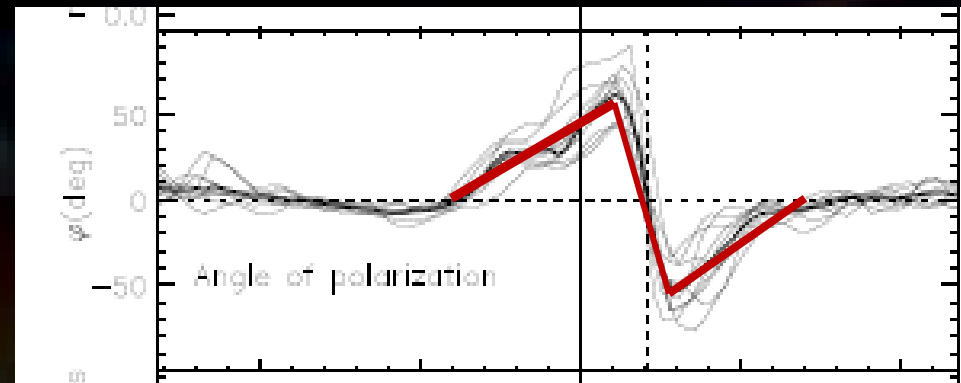
$$b = 0.5$$

$$a = f\left(\frac{M_{BH}}{R_{SC}}\right)$$



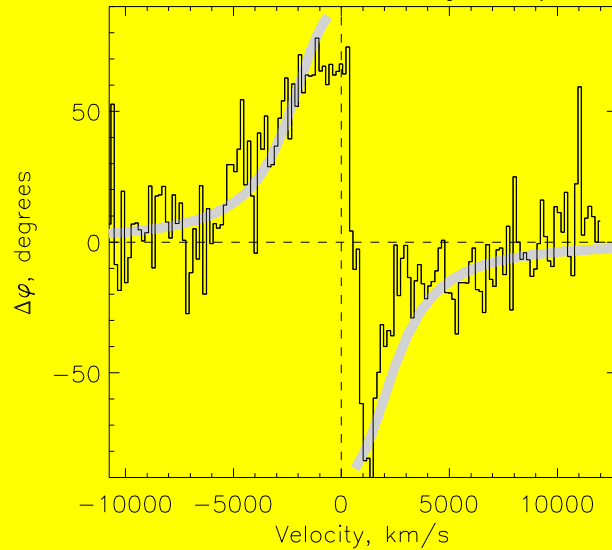
V vs. $\tan(\varphi)$ – директна провора Кеплеровог кретања

$$\log\left(\frac{V_i}{c}\right) = a - b \cdot \log(\tan(\varphi_i))$$



Посматрани Р.А, Afanasiev & Popovic 2015

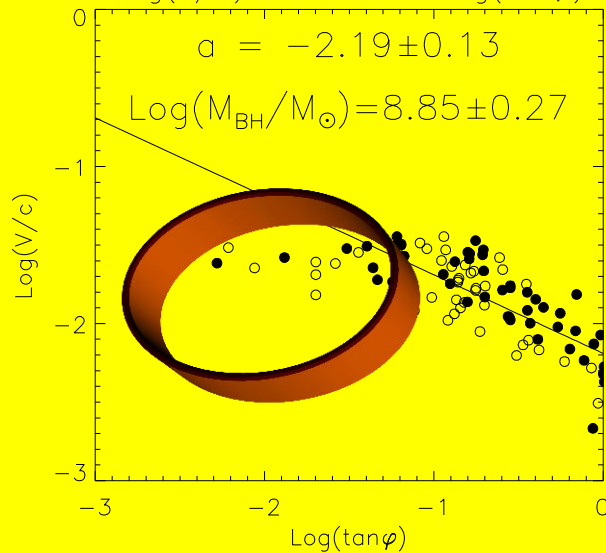
3C273, $R_{sc}=953$ ligh days



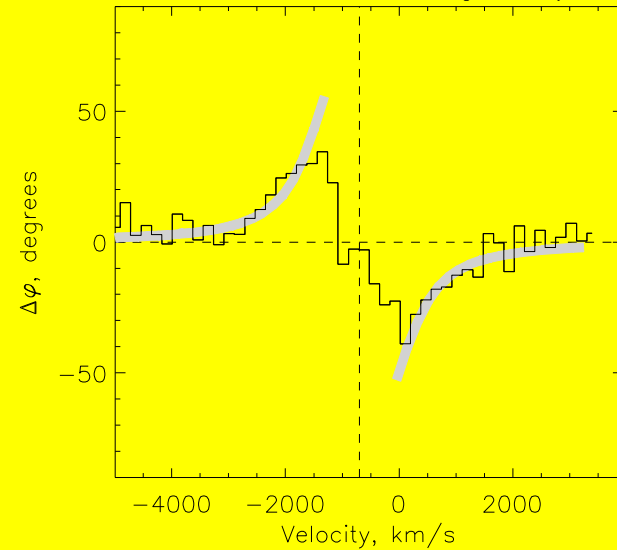
$$\text{Log}(V/c) = a + 0.5 \text{Log}(\tan\varphi)$$

$$a = -2.19 \pm 0.13$$

$$\text{Log}(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.85 \pm 0.27$$



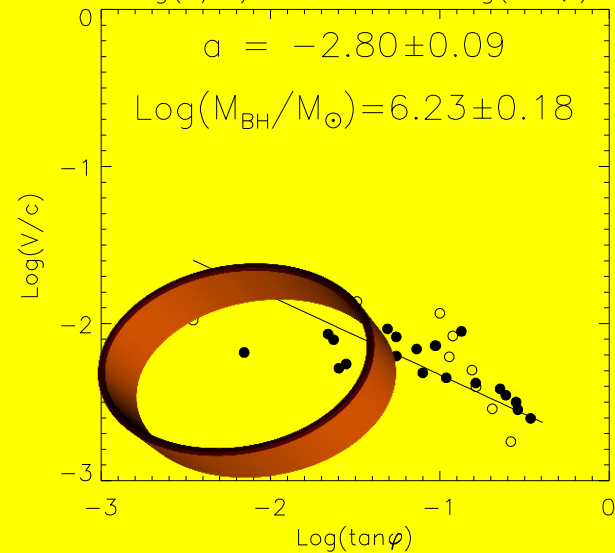
NGC4051, $R_{sc}=38$ ligh days



$$\text{Log}(V/c) = a + 0.5 \text{Log}(\tan\varphi)$$

$$a = -2.80 \pm 0.09$$

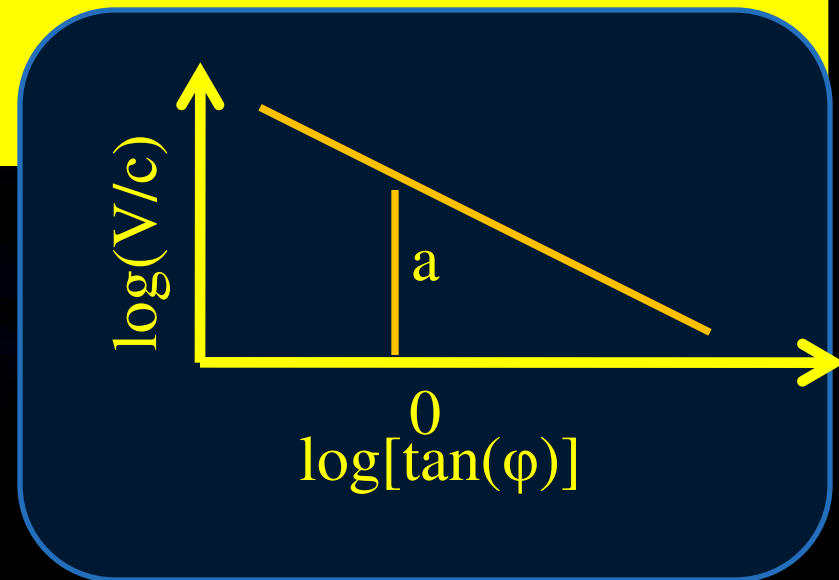
$$\text{Log}(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 6.23 \pm 0.18$$



$$\log(v_i) = a - b \log(\tan(\varphi_i)),$$

$$b = 0.5$$

$$a = f\left(\frac{M_{BH}}{R_{SC}}\right)$$



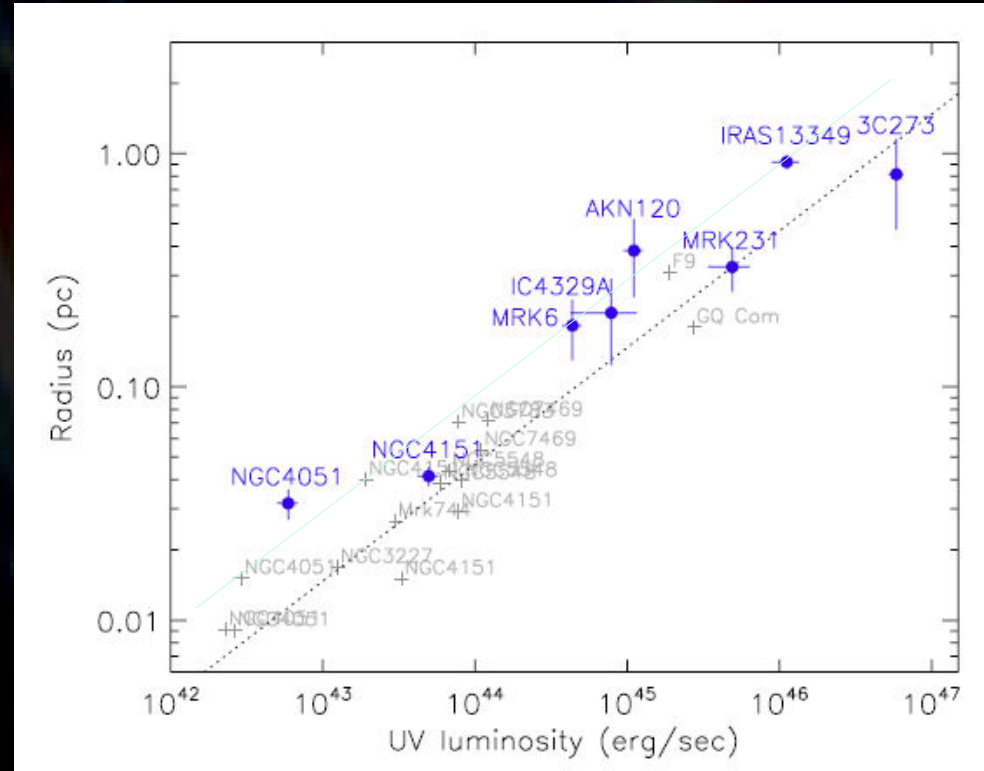
Процена димензија R_{sc} торуса

M. Kishimoto et al., A&A
527, A121 (2011)

Мерења из IR (2-3 μm)
Кашњење између K и V-
спектралне области.

ИЛИ

Помоћу релације:



$$R_{in} \simeq 1.3 \cdot \sqrt{L_{46}^{AGN}} \cdot T_{1500}^{-2.8} \quad [\text{pc}]$$

Нови метод за мерење маса супермасивних црних рупа, Afanasiev & Popovic 2015, ApJL, 800, L35

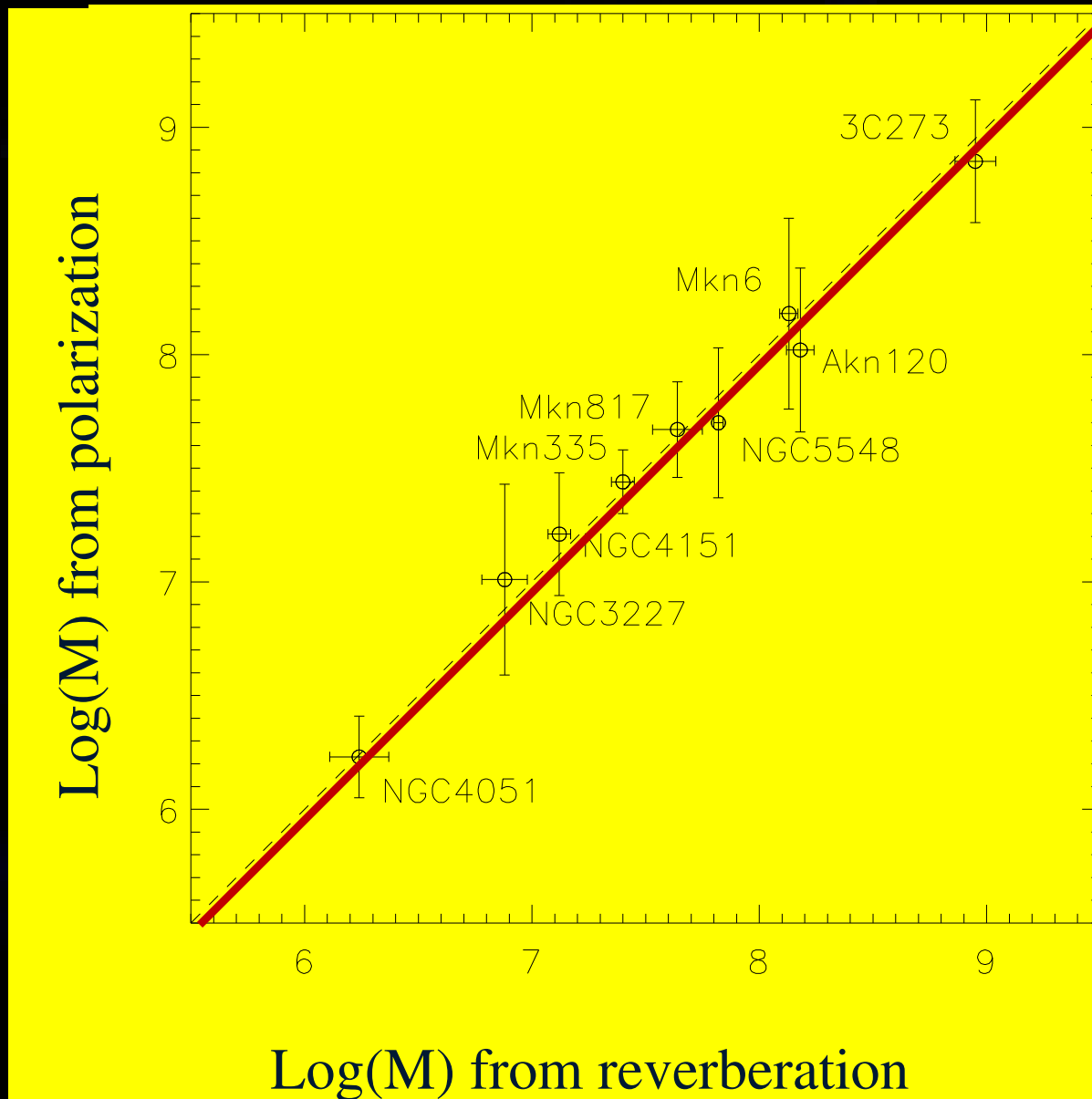
Table 1

List of Observed AGNs with Basic Data and Measured Black Hole Masses Using the Polarization in Broad Line (Column 7) Compared with Ones Measured by the Reverberation Method (Column 8)

Object	Type	z	R_{SC} (pc)	References	$-a$	$\log(M_{\text{POL}})(M_{\odot})$	$\log(M_{\text{REV}})(M_{\odot})$	References
Mkn 6	1.5	0.0188	0.185	1	2.19 ± 0.21	8.18 ± 0.42	8.13 ± 0.04	3
3C273	1.0	0.1583	0.809	1	2.19 ± 0.13	8.85 ± 0.27	8.95 ± 0.09	4
Akn 120	1.0	0.0323	0.380	1, 2	2.44 ± 0.18	8.02 ± 0.36	8.18 ± 0.06	4
NGC 4051	1.0	0.0024	0.032	1, 2	2.90 ± 0.09	6.23 ± 0.18	6.24 ± 0.13	4
NGC 4151	1.5	0.0033	0.037	1, 2	2.34 ± 0.13	7.21 ± 0.27	7.12 ± 0.05	4
Mkn 335	1.2	0.0258	0.119	2	2.48 ± 0.07	7.44 ± 0.14	7.40 ± 0.05	3
NGC 3227	1.5	0.0039	0.021	1, 2	2.32 ± 0.21	7.01 ± 0.42	6.88 ± 0.10	5
NGC 5548	1.5	0.0172	0.096	2	2.30 ± 0.27	7.70 ± 0.33	7.82 ± 0.02	6
Mkn 817	1.5	0.0315	0.151	2	2.42 ± 0.11	7.67 ± 0.21	7.64 ± 0.11	5

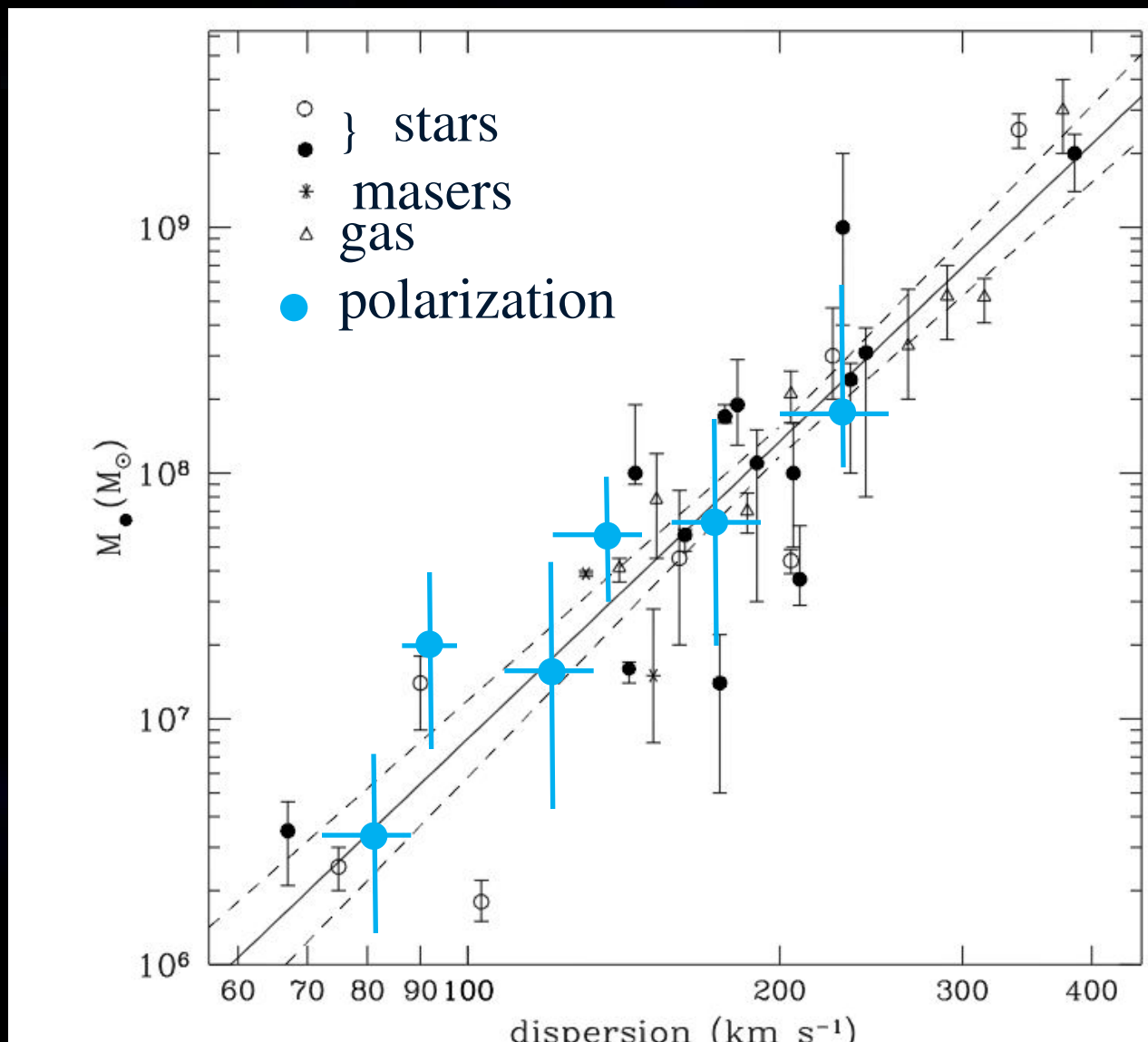
References. The estimates for R_{SC} are taken from (1) Kishimoto et al. (2011) and (2) Koshida et al. (2014). The reverberation measurements of black hole masses are taken from (3) Grier et al. (2012), (4) Peterson et al. (2004), (5) Denney et al. (2010), and (6) Bentz et al. (2007).

Поларизација и реверберација



Различите метод

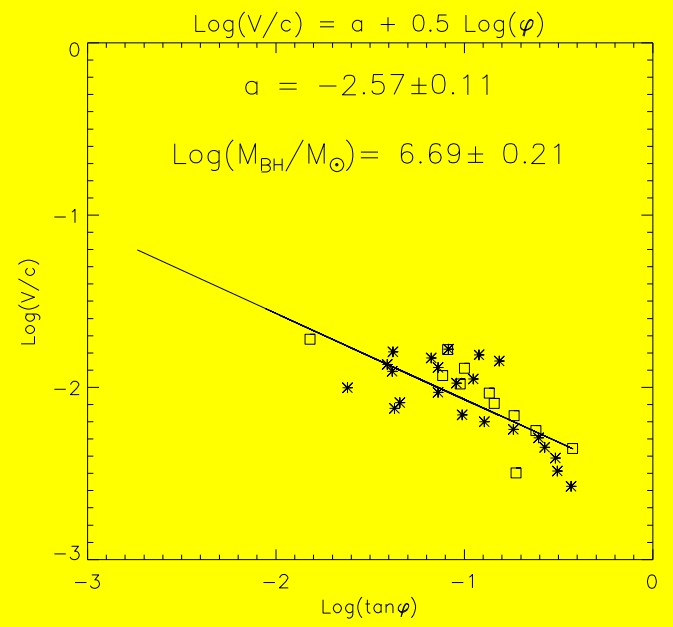
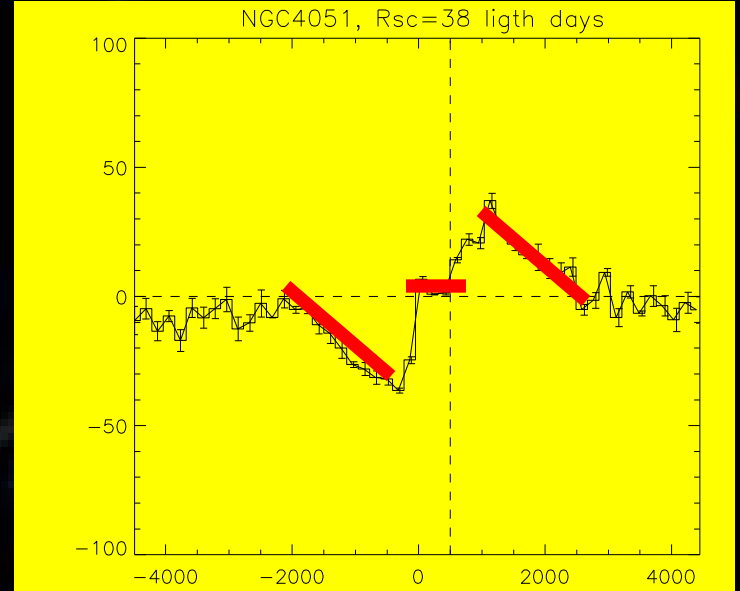
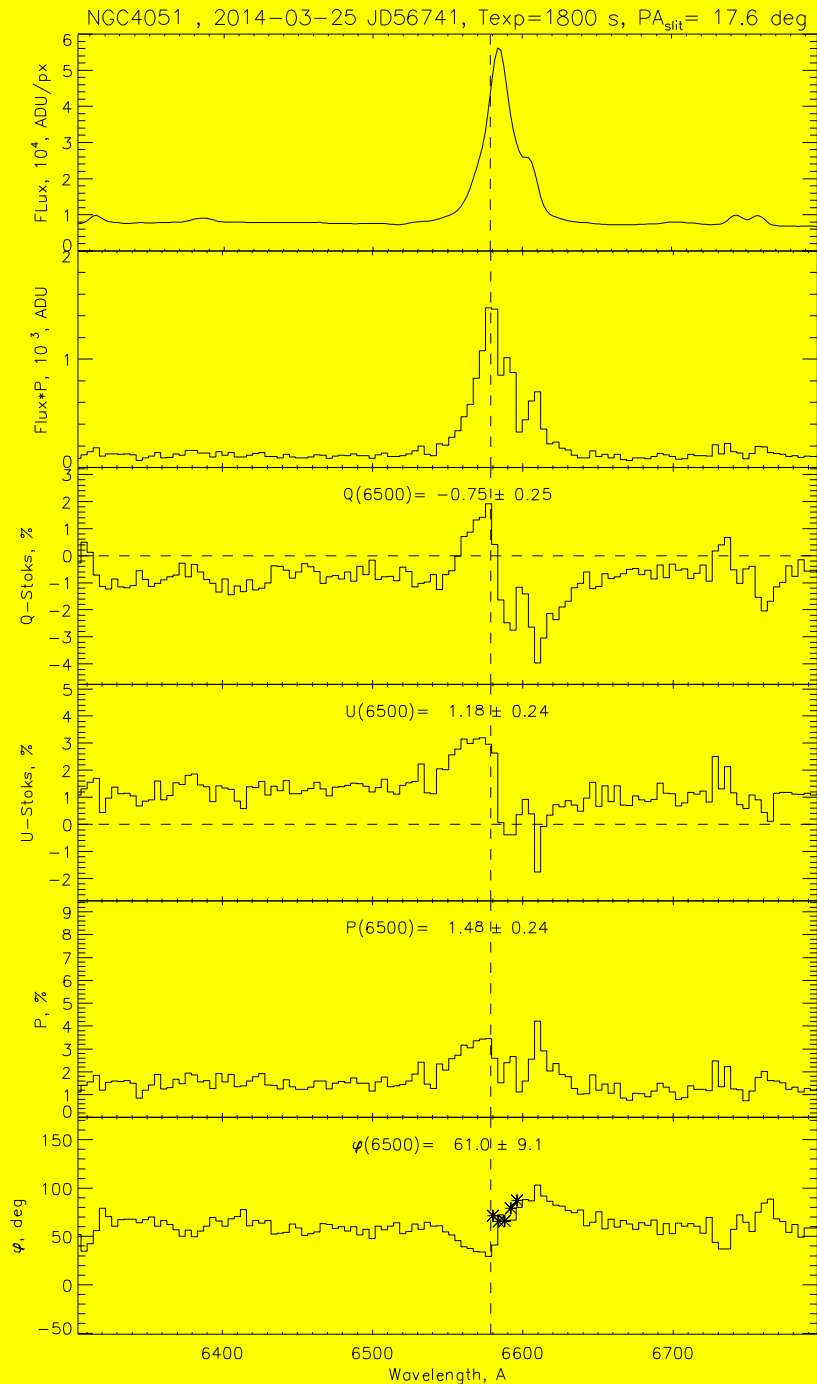
Tremaine et al., ApJ, 2002, 574, 740 (наши подаци – плаве тачке)



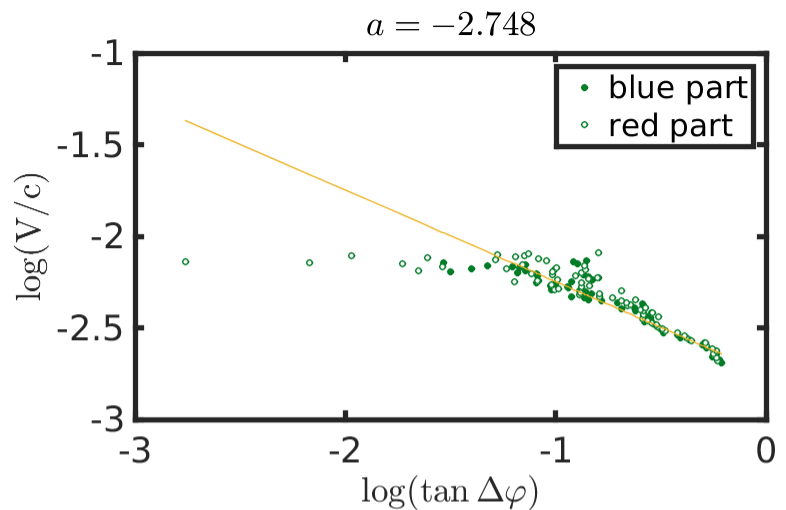
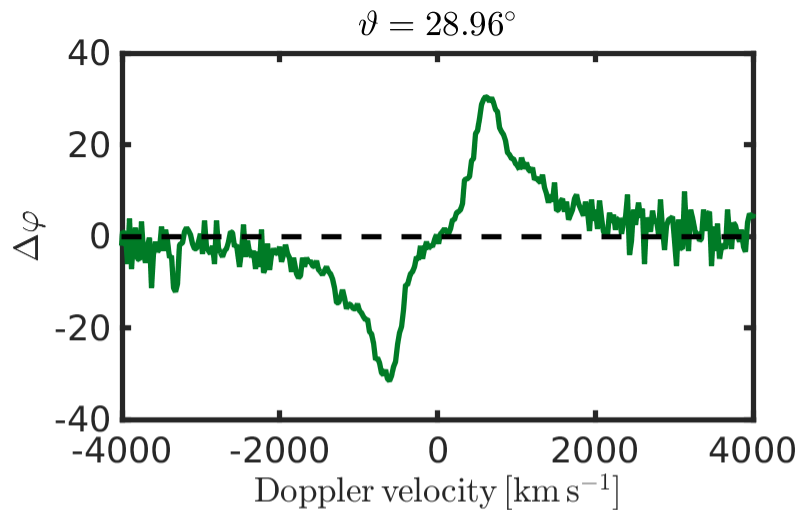
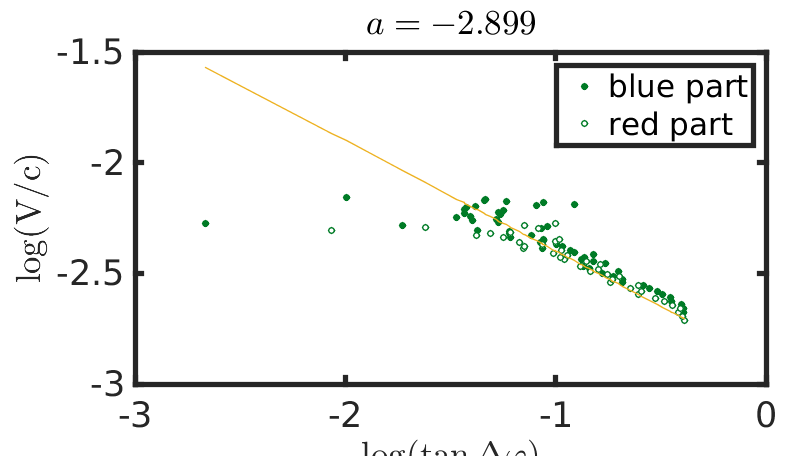
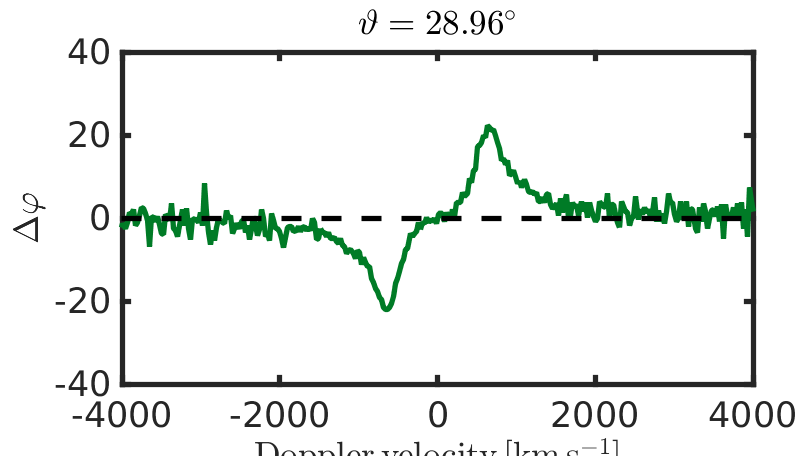
Спектрополаризација АГЈ – рад у току (будући рад)

- ✓ У програму посматрање преко 40 Sy 1 АГЈ – тренутно обрада података и анализа (Афанасиев)
- ✓ Моделирање поларизације у широколинијском региону (Ђорђе Савић и Рене Гусман)
- ✓ Прелиминарни резултати за NGC 4051
- ✓ BLR (ld) 4.3 – 15 ld, Торус 38 – 54 ld, $V = 400$ km/s, τ 0.5 и 0.8, угао посматрања од 30 степени

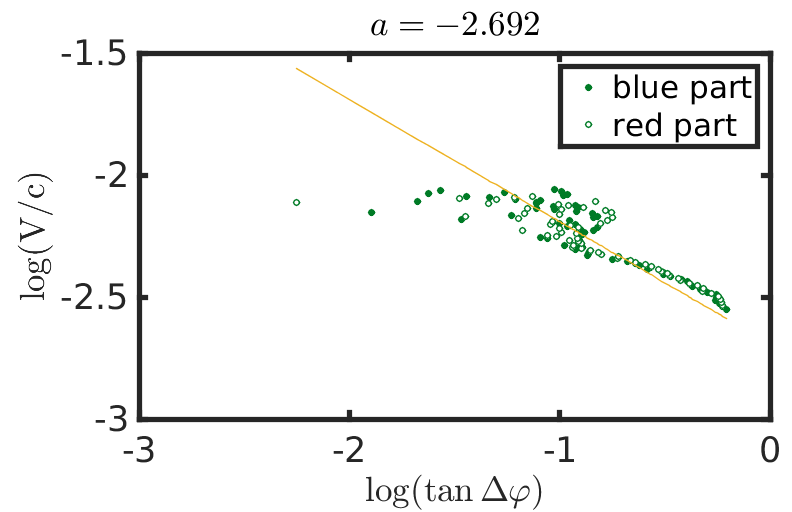
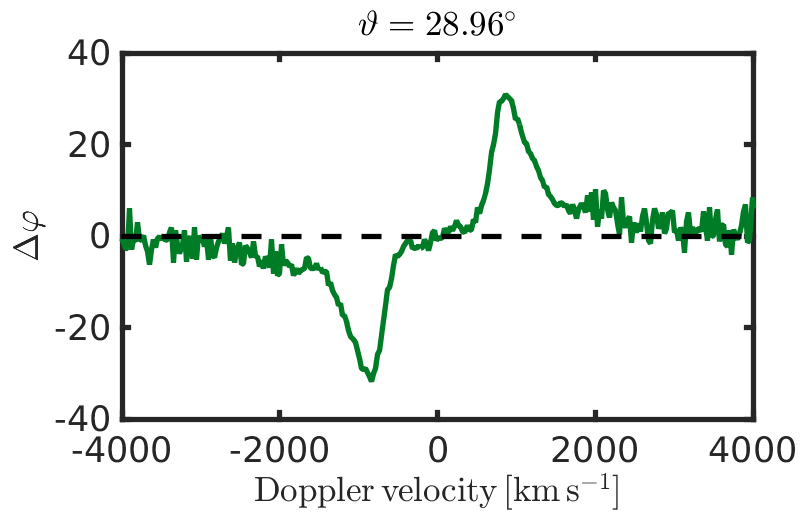
Посматрања NGC 4051



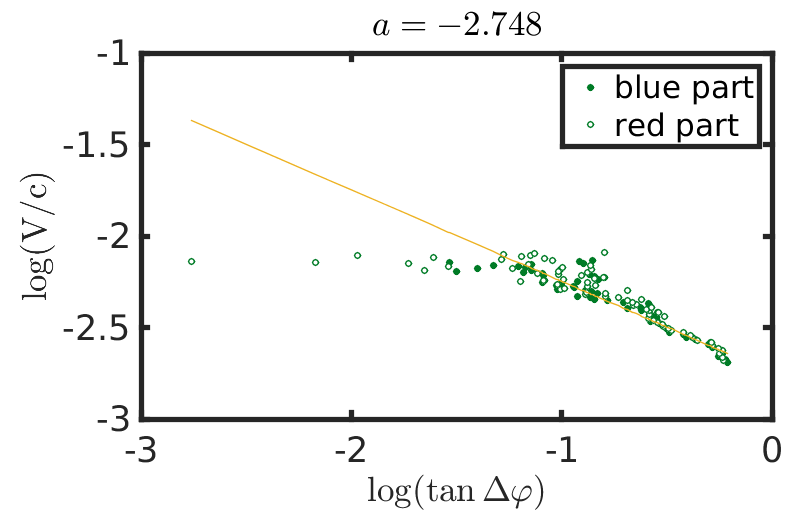
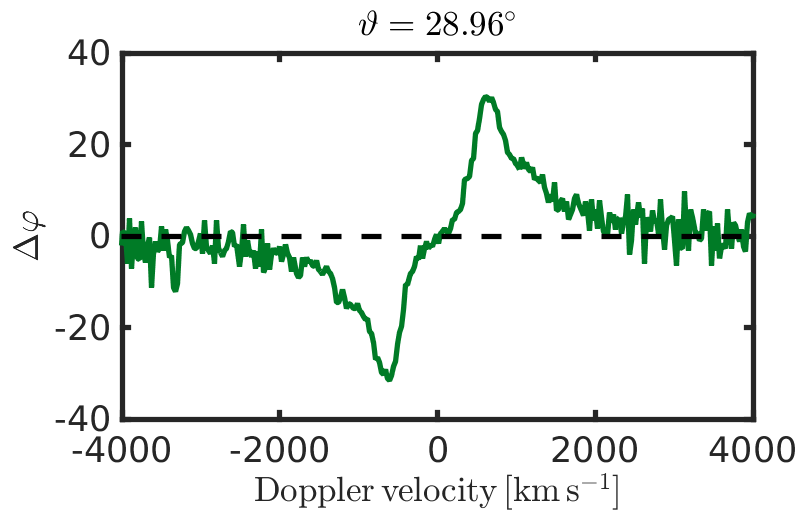
Промена оптичке дебљине од 0.5 до 0.8



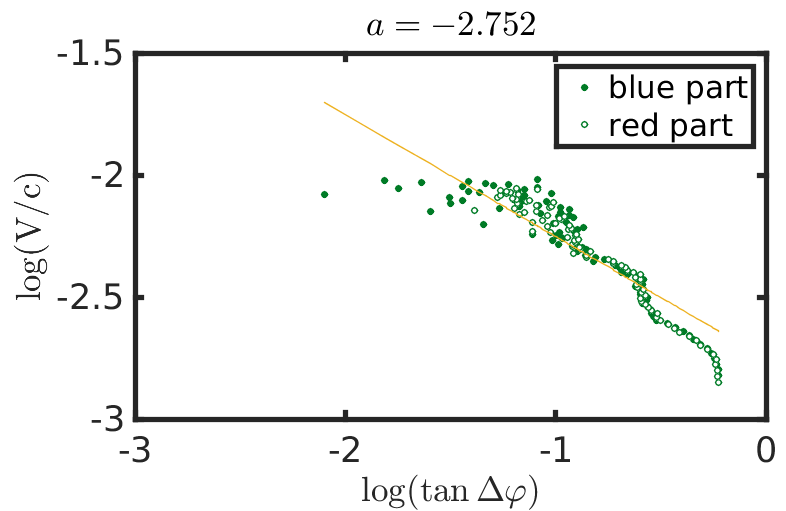
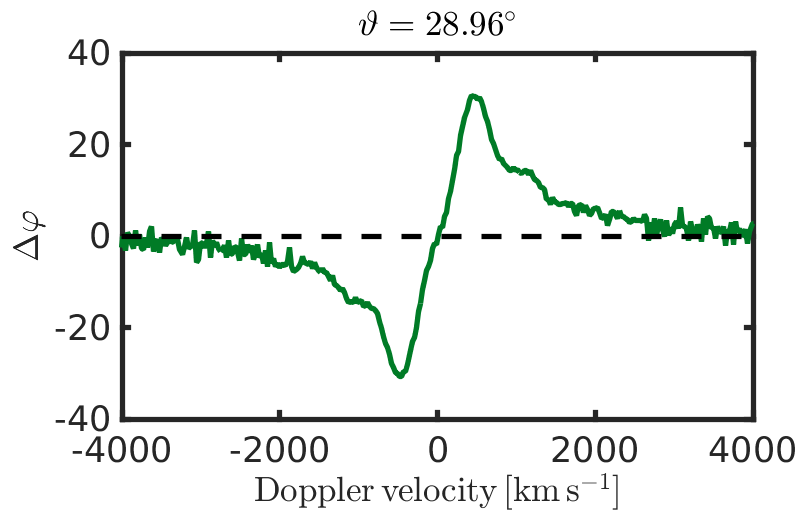
BLR 4.3-101d



BLR 4.3-151d



BLR 4.3-201d



Више о овоме у предавању Ђ.Савић (ускоро)

Метод: предности и проблеми

1. Само једно квалитетно посматрање
 2. Одређивање маса ЦР из различитих линија у спектру на исти начин – одређивање маса ЦР на различитим растојањима на исти начин
 3. Виријализација се провера, не узима се априори
-
1. Проблем са доприносом међузвездане поларизације
 2. Оцена унутрашњег радијуса торуса
 3. Проблем где екваторијална поларизација није доминантна

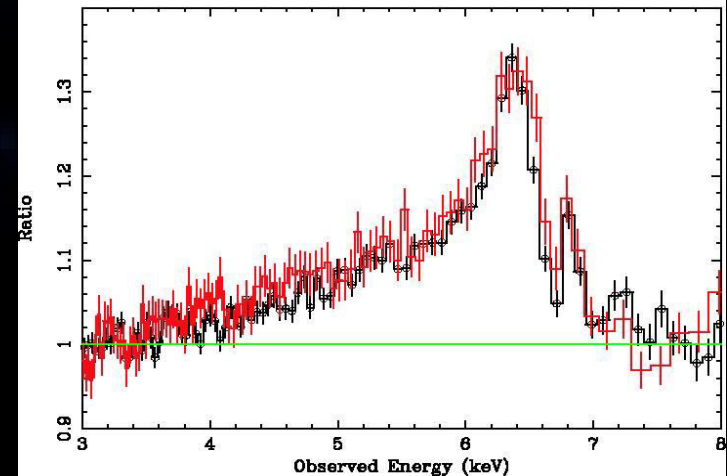
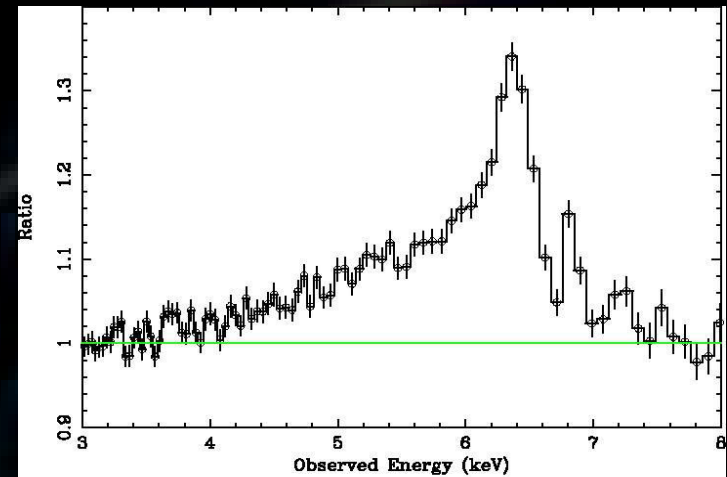
Закључак

- Изгледа да је екваторијално расејање доминантно код Тип 1 АГЈ, међутим други ефекти су присутни (млазеви, врела плазма која деполаризује итд.)
- Поларизација у континууму и спектралним линијама – више података о централној области (пројекција вектора на правац посматрања)
- Нови метод за оцену маса црних рупа

ХВАЛА НА ПАЖЊИ!

3. Како измерити спин и масу црне рупе

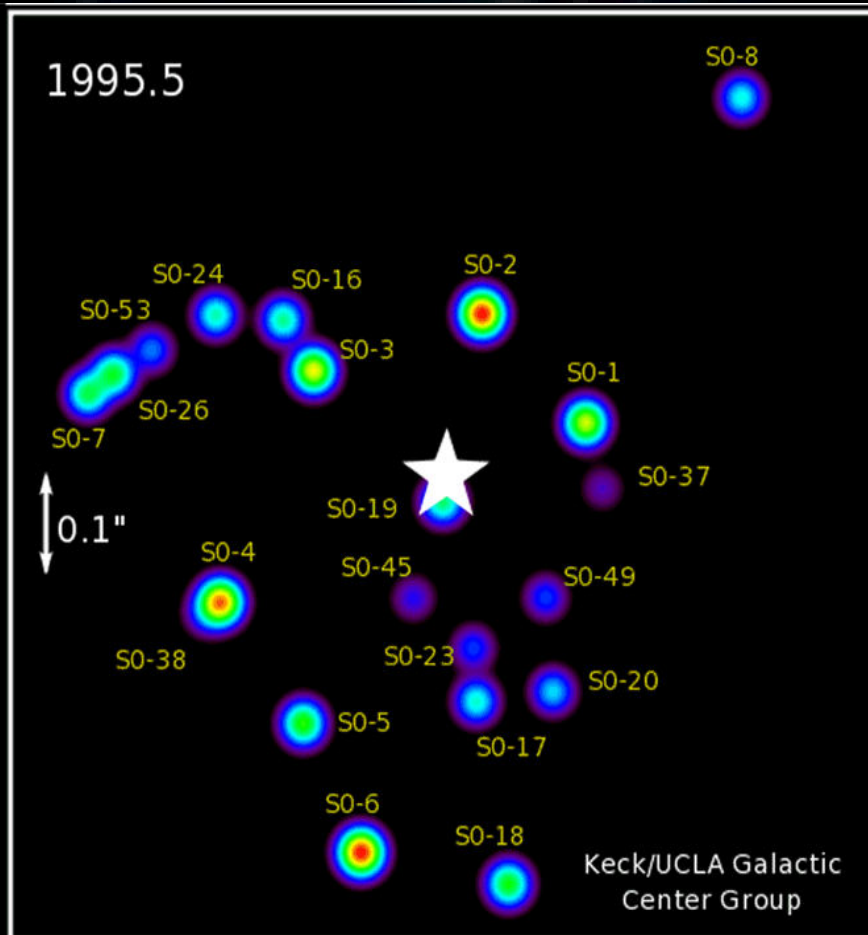
- Акрециони диск – веома јака Fe K линија (6.4 keV)



Како измерити масу црне рупе

Наша галаксија (Genzel et al. 1997,2003; Ghez et al. 1998, 2005)

$M_* = 3.6 \text{ E6 } M_{\text{sun}}$

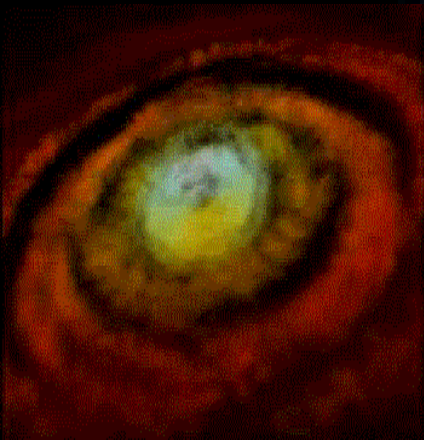


Неки примери, код ближих галаксија

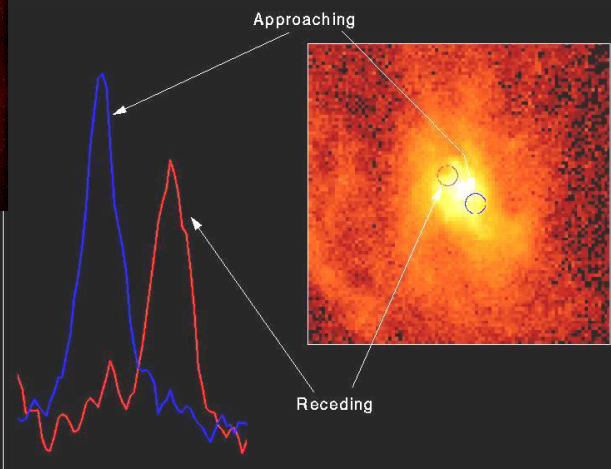
– Оптичке емисионе линије

M87: H, [NII]

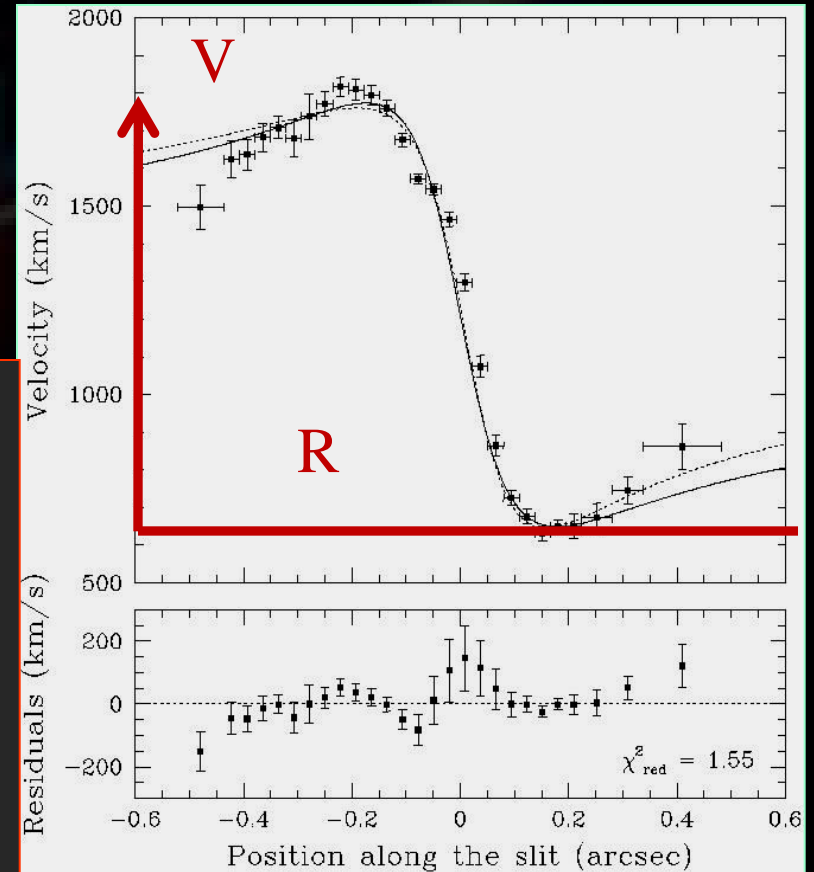
$M_* = 2.4E9 M_{\text{sun}}$



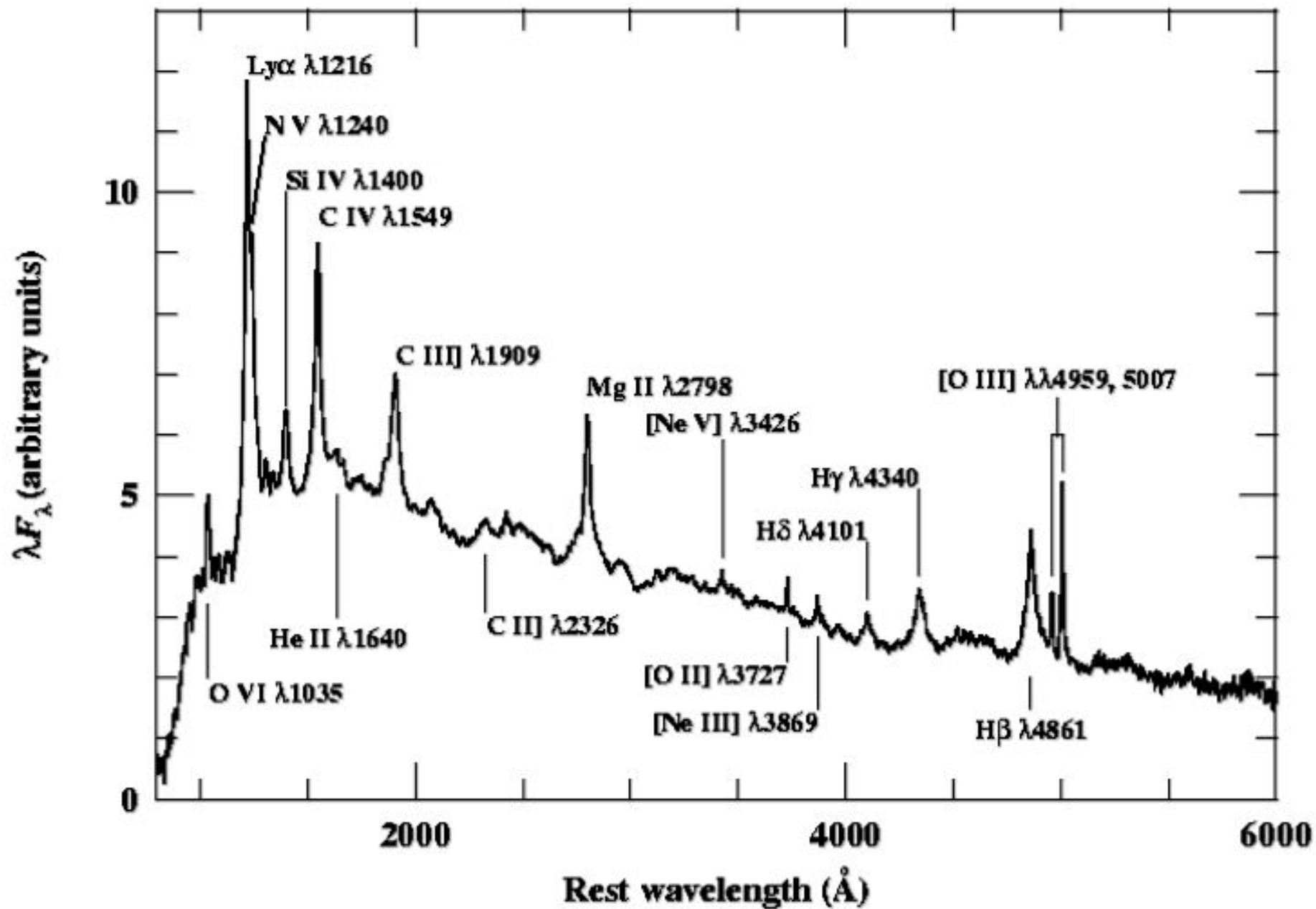
Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph



Macchetto et al. (1997)



Проблем код удаљених објеката - централна област неразлучива

- Мерење $V=f(R)$
- V – ширине емисионе линије
- R – тешко мерити f
- **Битна геометрија широколинијског региона**

Програми спектроскопских праћена АГЈ

- Сарадња са Русијом, Немачком и Мексиком (радови Sharovalova+, Porovic+ 2008–2016)
 - ревербрационо мапирање
 - гас око црне рупе је фотојонизован

accretion

Кашњење
између
промене у
континууму и
линији



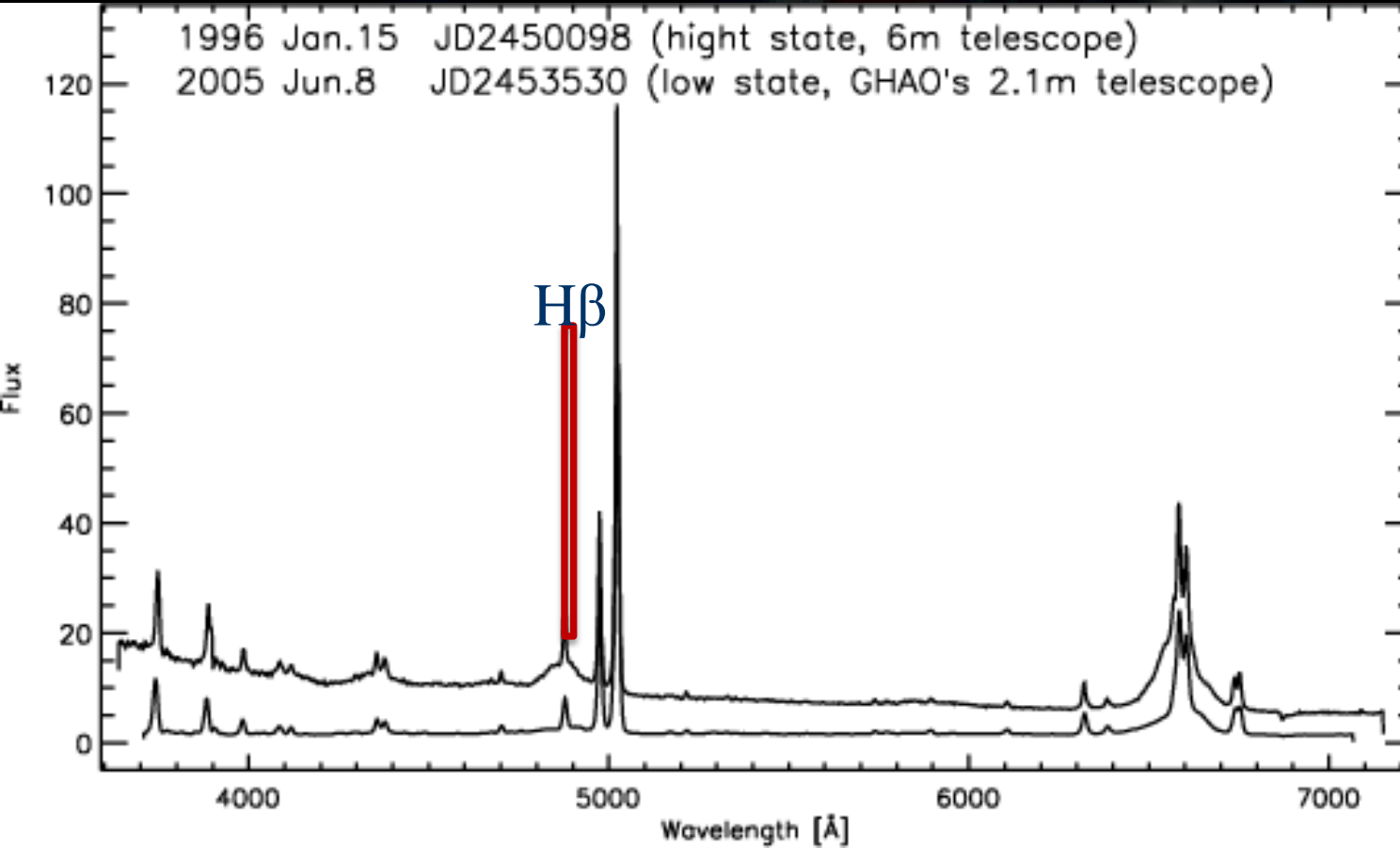
Посматрања

- 6m + 1m телескопи - SAO RAS (Russia)
- 2.1 m телескоп - Guillermo Haro Observatory, Cananea, Sonora, Mexico
- 2.1 m телескоп- Observatorio Astronómico Nacional, San Pedro Martir, Baja California, Mexico



Промена у широким линијама

- NGC4151



Маса ЦР и широке линије

Геометрија

Видљива теорема

$$M_{BH} = f \frac{R_{BLR} FWHM^2}{G}$$

Потребно:

- Широке линије
- Особина емисионе области

- $R_{BLR} = a * (L_{5100})^\gamma$ рс

Добијена емпиријска релација

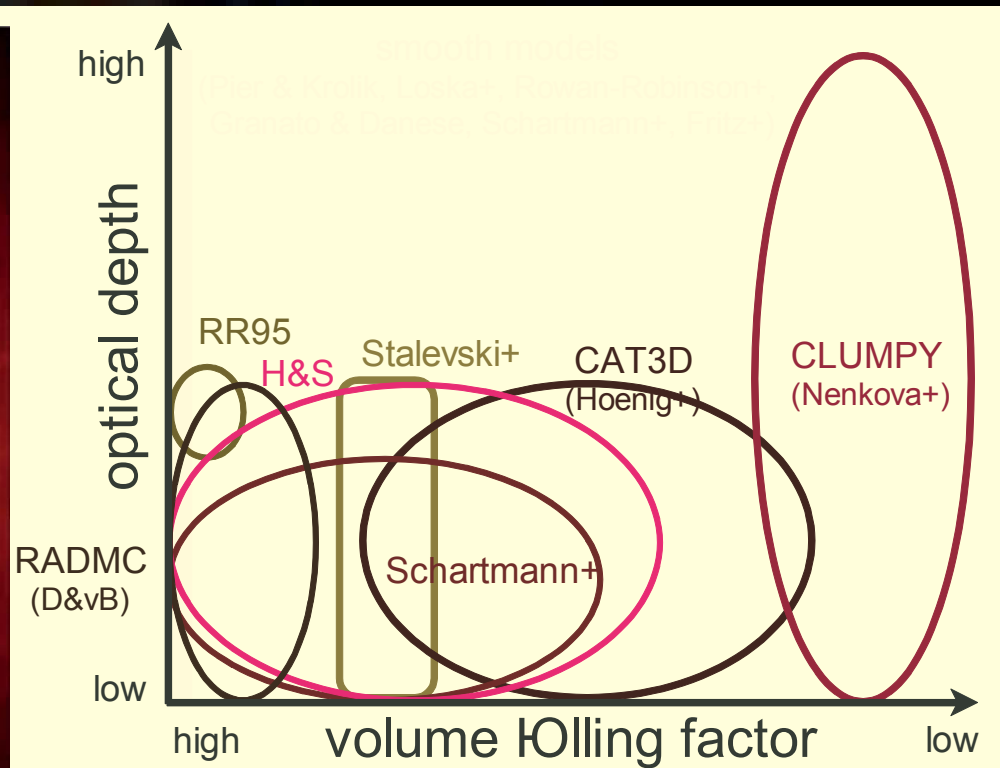
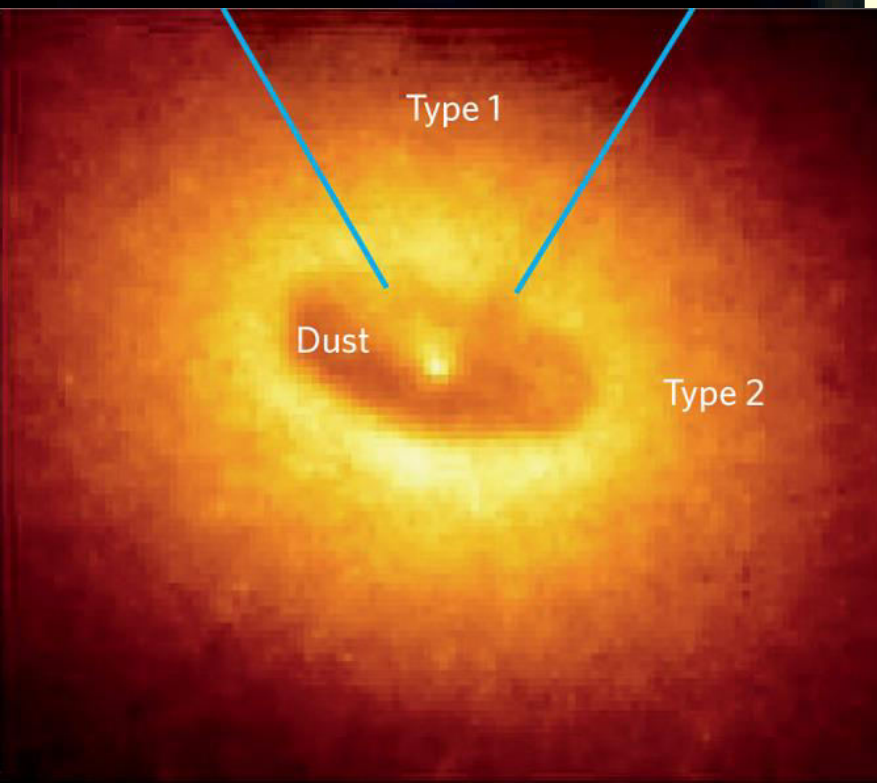
- L_{5100} : луминозност континуума (λL_λ) на 5100 А у 10^{46} erg s^{-1}
- $\gamma = 0.6 \pm 0.1$, зависи од линије (нпр H β , $a \simeq 0.4$ рс)

Проблеми

- Релација може бити употребљена на само једно посматрање, али АГЈ су промењиви објекти
- Геометрија емисионе области, нпр избацавање гаса
- Како проверити да је доминантно гас гравитационо везан
- Да ли поларизација може помоћи?

4. Улога торуса и поларизација

- Садржи материјал неопходан за акрецију
- Сакрива активност код неких АГЈ
- Поларизација



Улога торуса у емисији $i=0$ deg

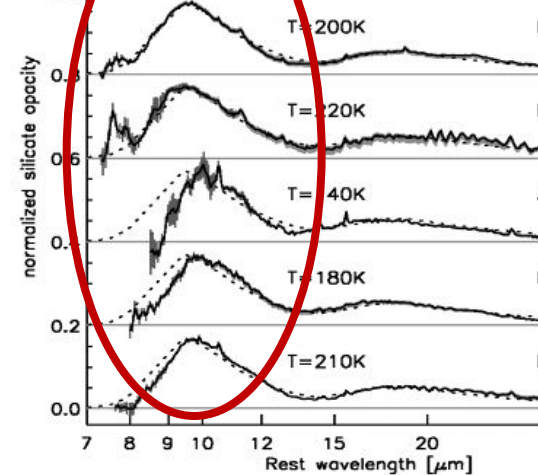
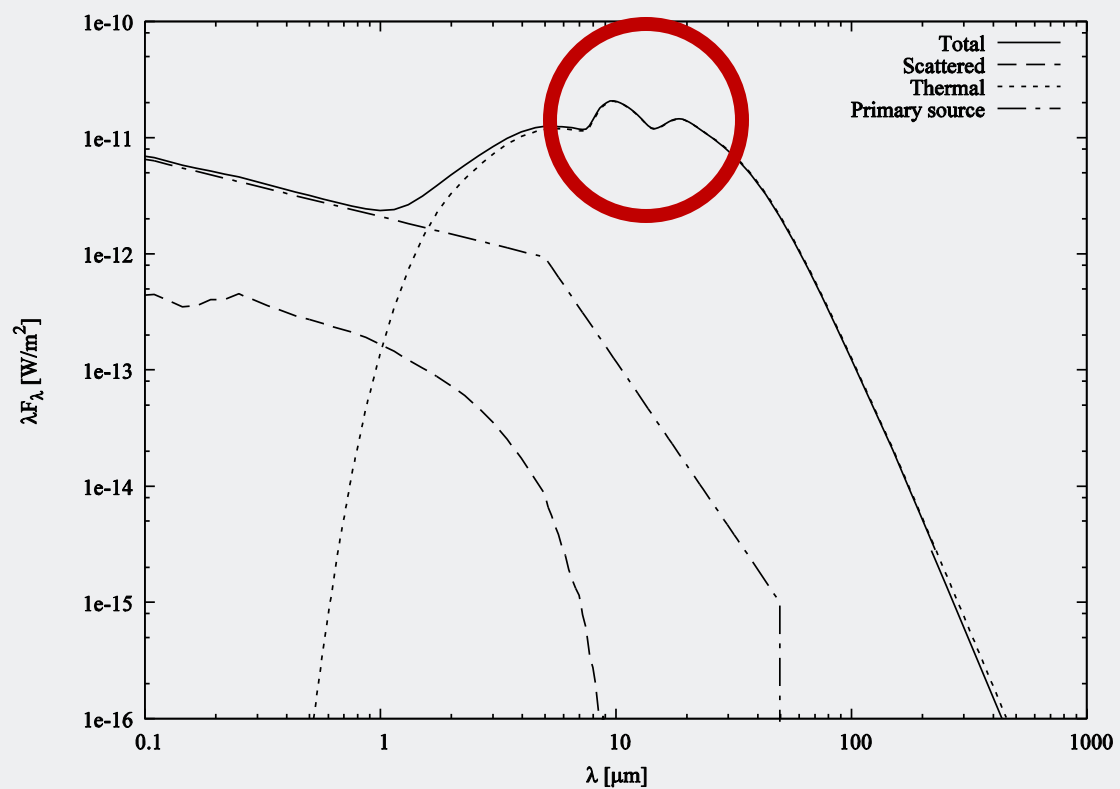
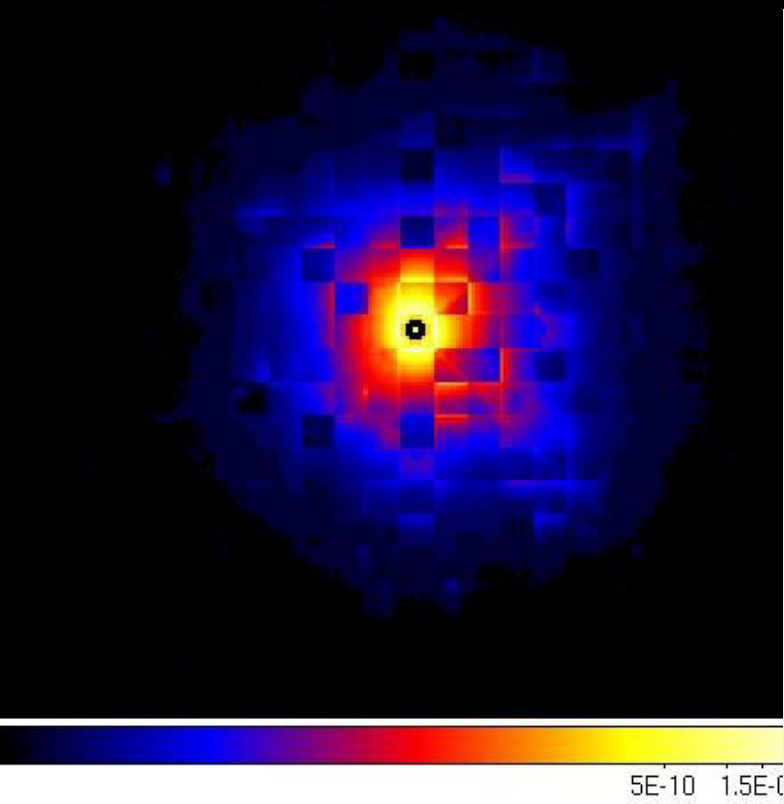
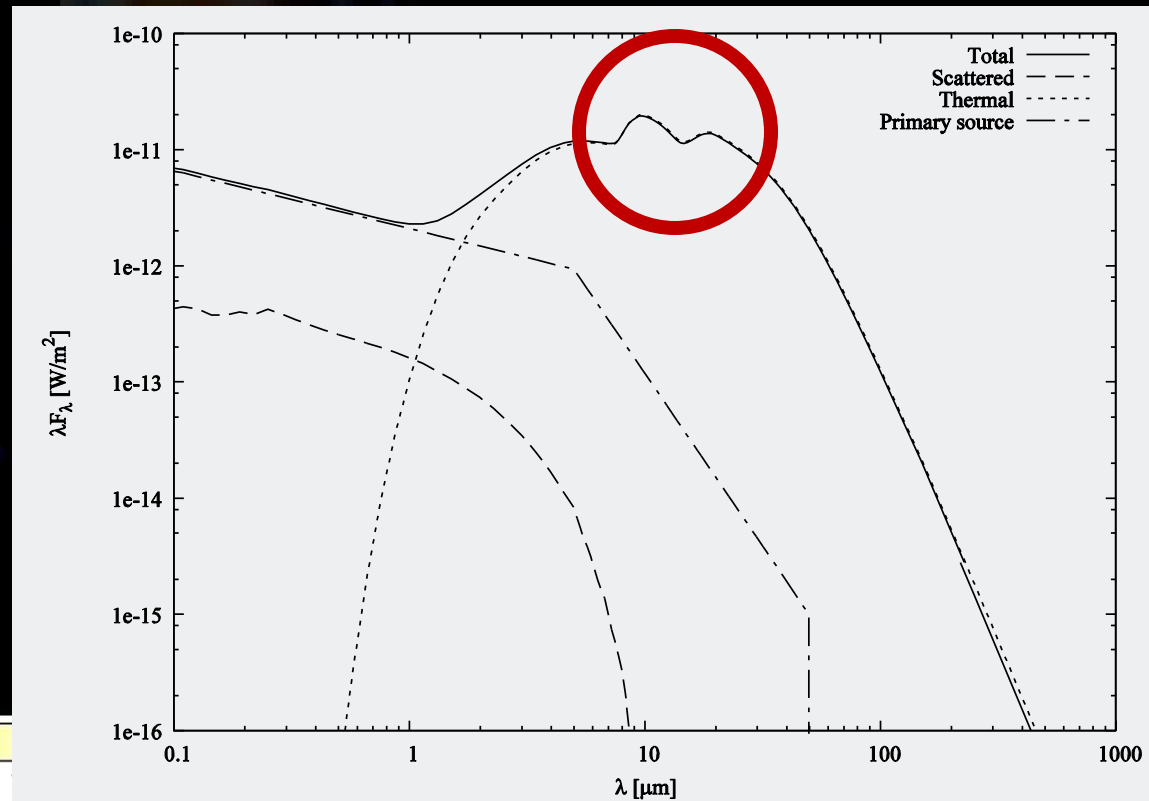
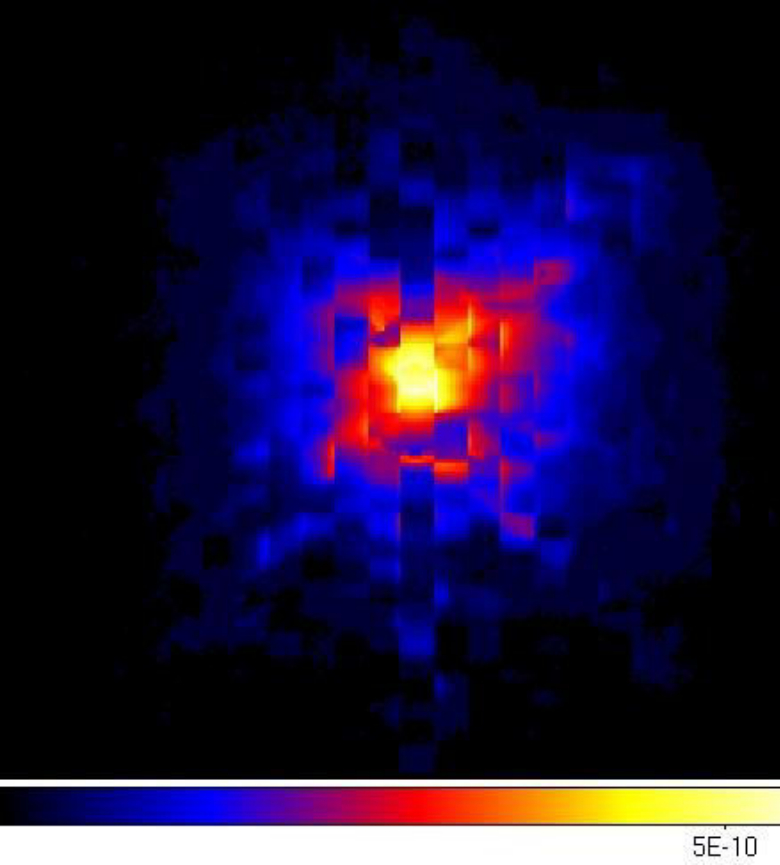


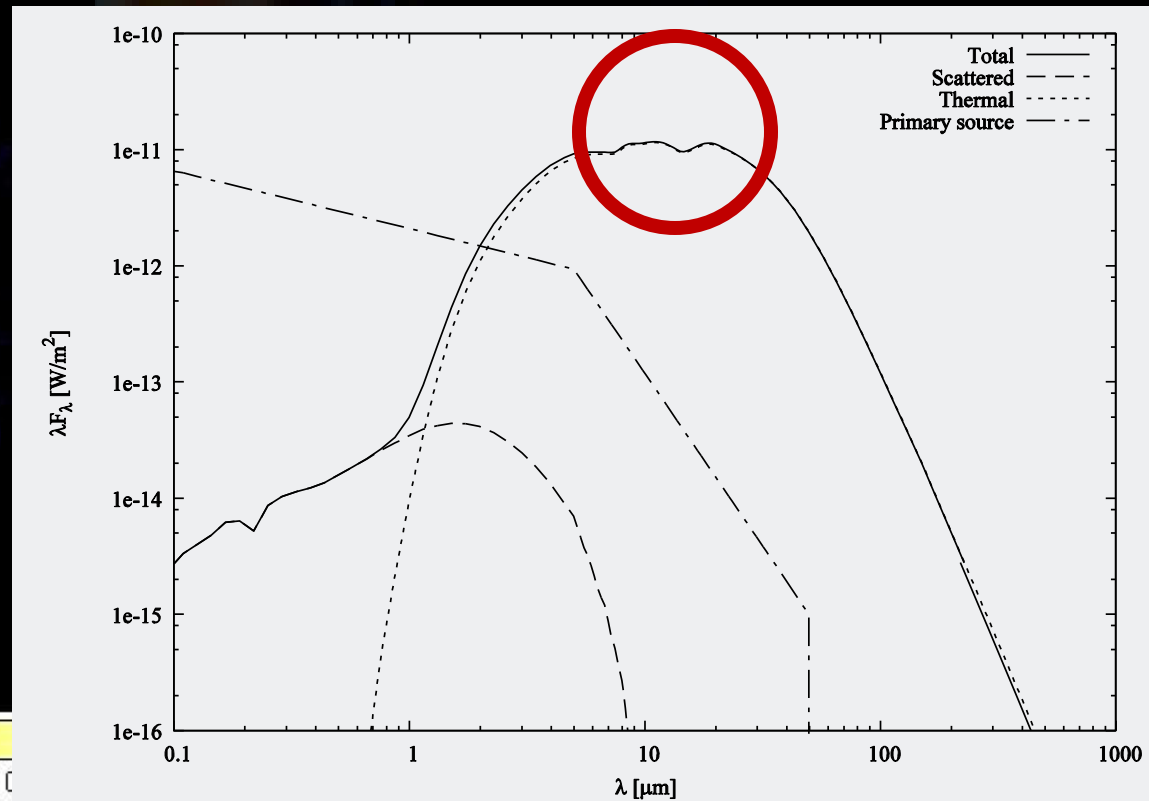
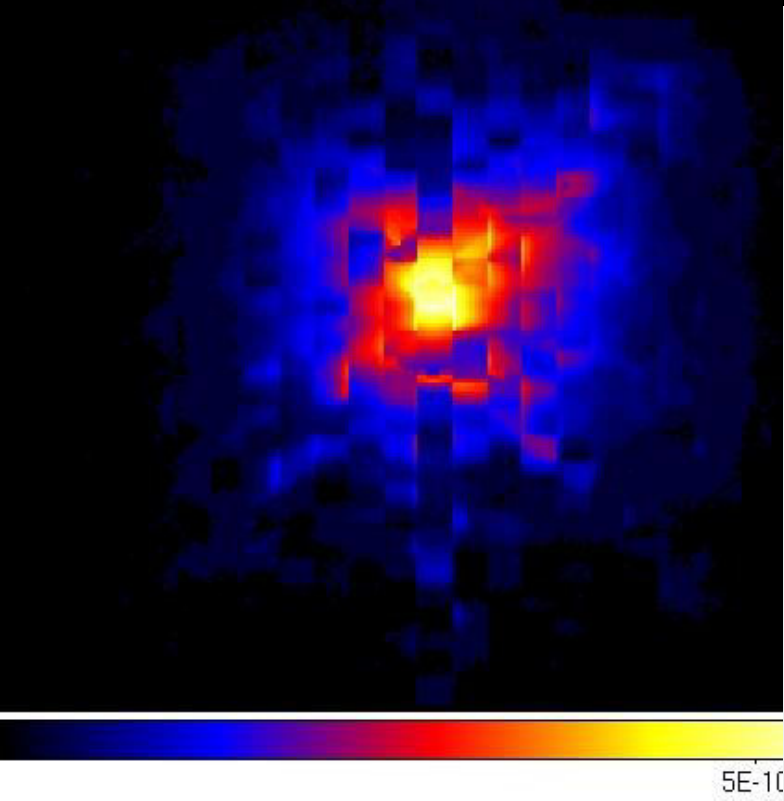
FIG. 3.—Opacity spectra for the five PG quasars compared to a synthetic silicate opacity curve of Weingartner & Draine (1999) and Draine (2001). The opacity spectra from the quasars are dashed lines, and the adopted silicate grain temperature and are scaled and offset for clarity. The shaded areas indicate the uncertainty in the silicate opacity. The shaded areas indicate the uncertainty in the silicate opacity produced by the uncertainty in the observed spectrum and choice of grain temperature.



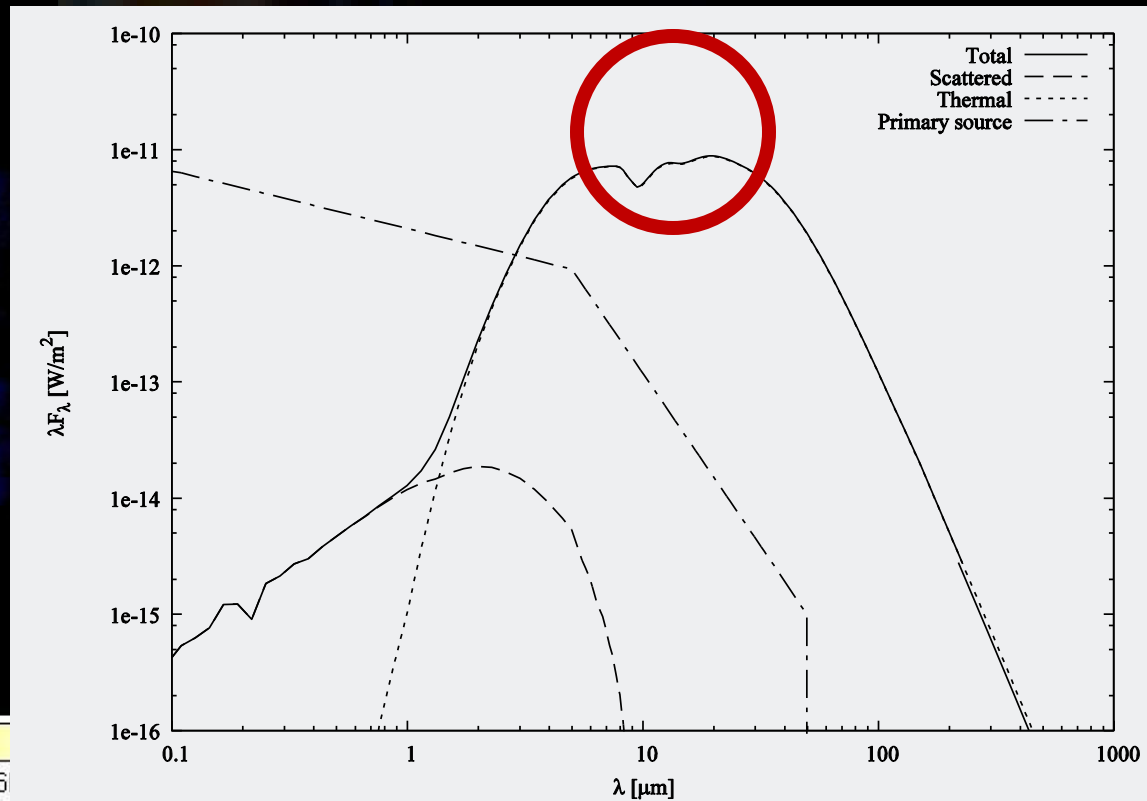
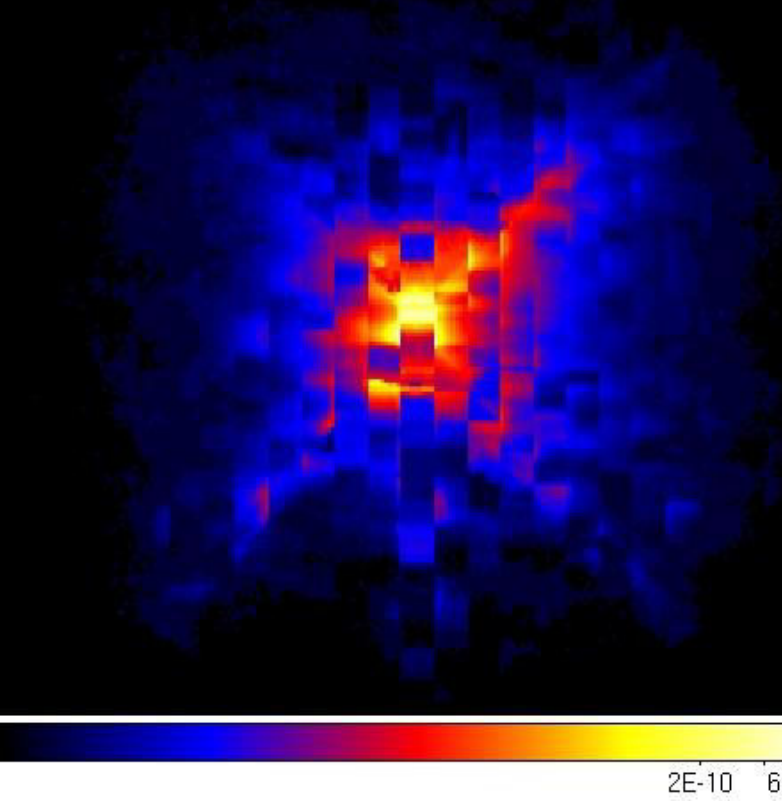
Улога торуса у емисији АГЈ, $i=20$ deg



Улога торуса у емисији АГЈ, $i=40$ deg

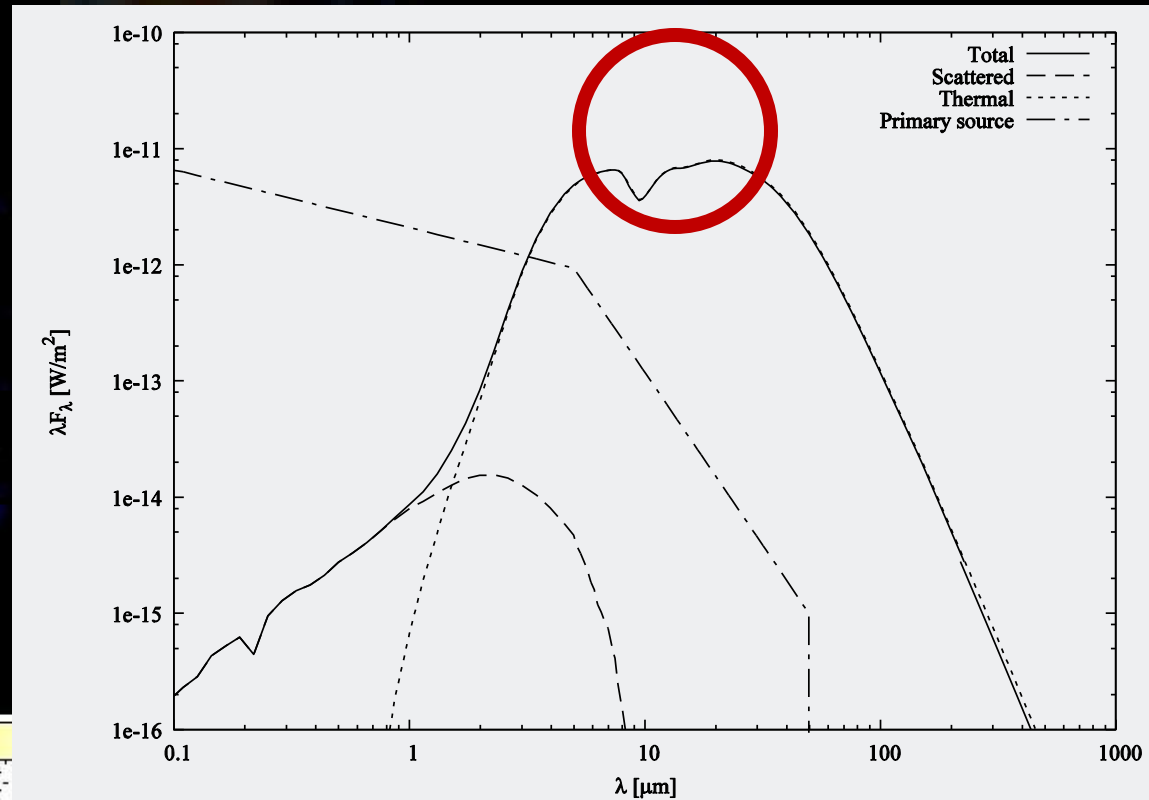
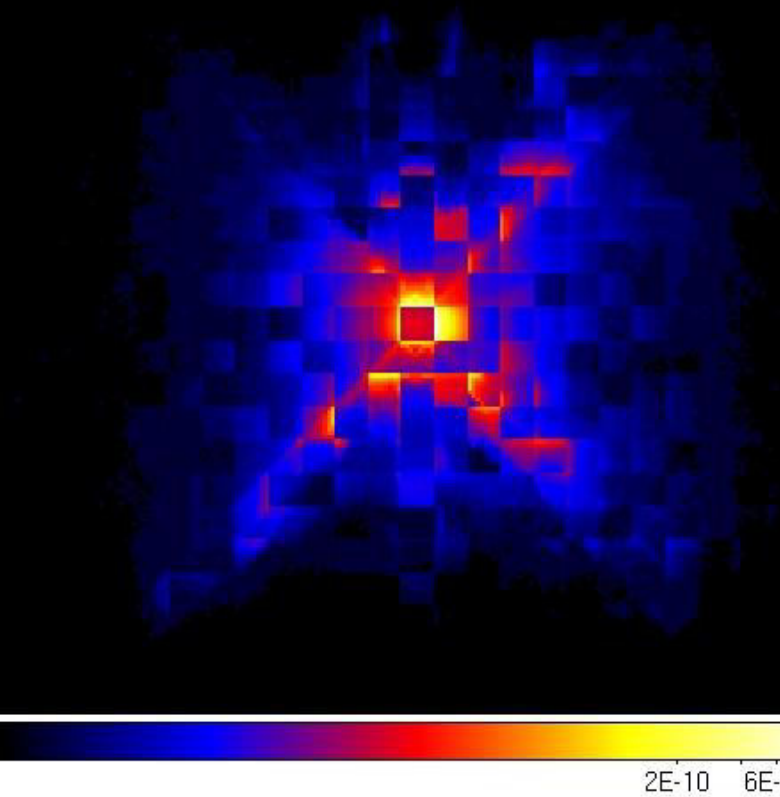
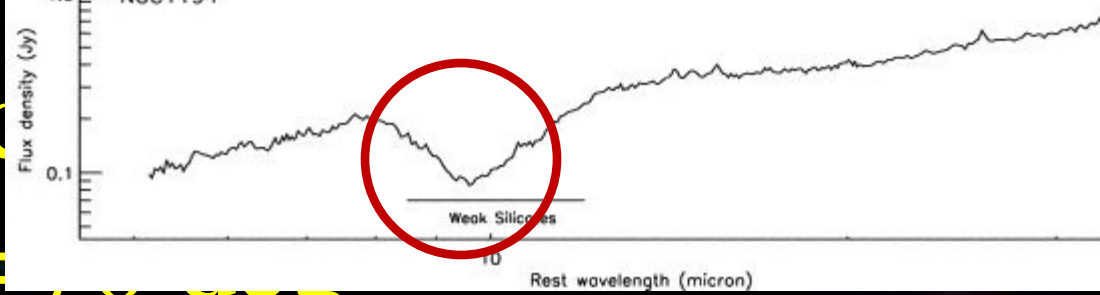


Улога торуса у емисији АГЈ, $i=50$ deg

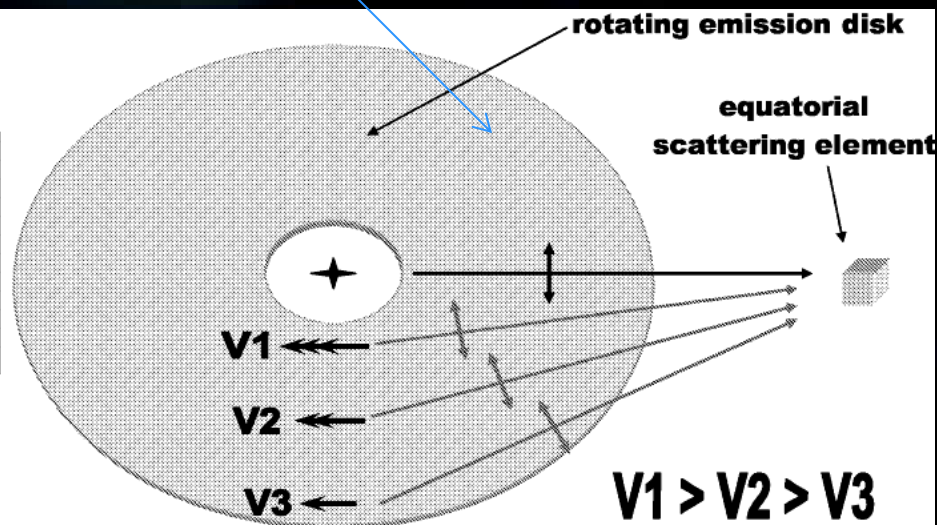
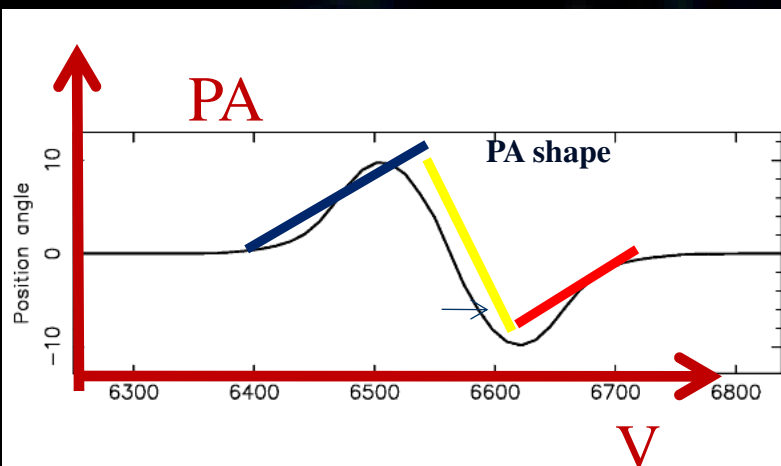
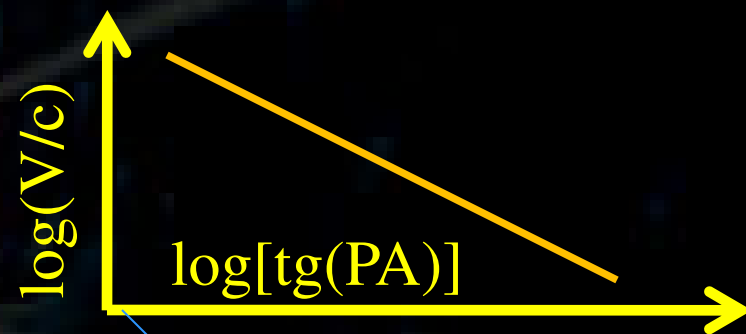
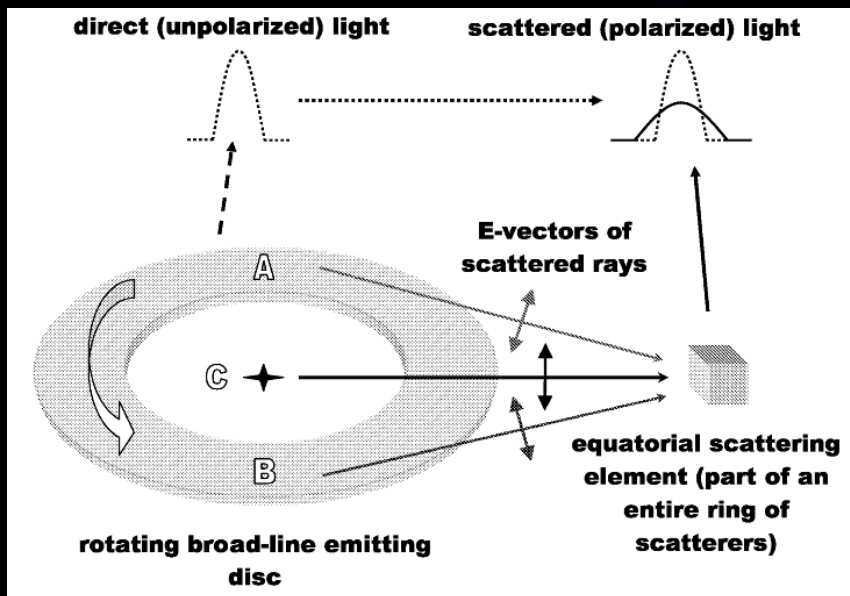


Улога торуса

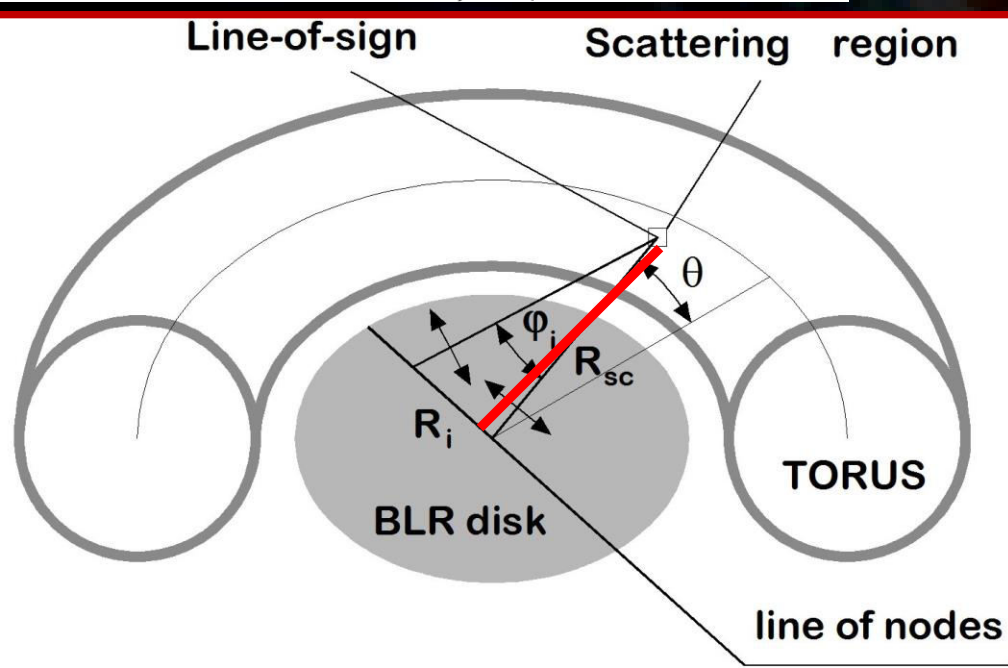
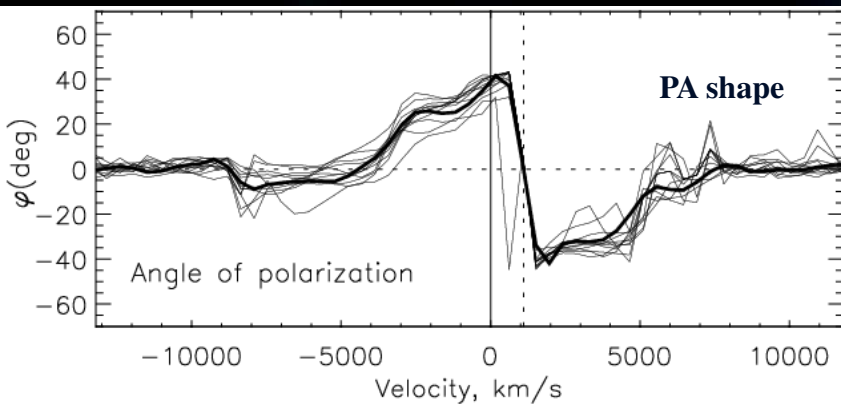
$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$



Поларизација у широкој $H\alpha$ линији - екваторијално расејање



Afanasiev et al. 2014 (Mrk 6); Afanasiev & Popovic 2015, ApJL, 800, L35



$$V_i = V_i^{\text{rot}} \cos(\theta) = \sqrt{\frac{GM_{\text{BH}}}{R_i}} \cos(\theta),$$

$$R_i = R_{\text{sc}} \cdot \tan(\varphi_i),$$

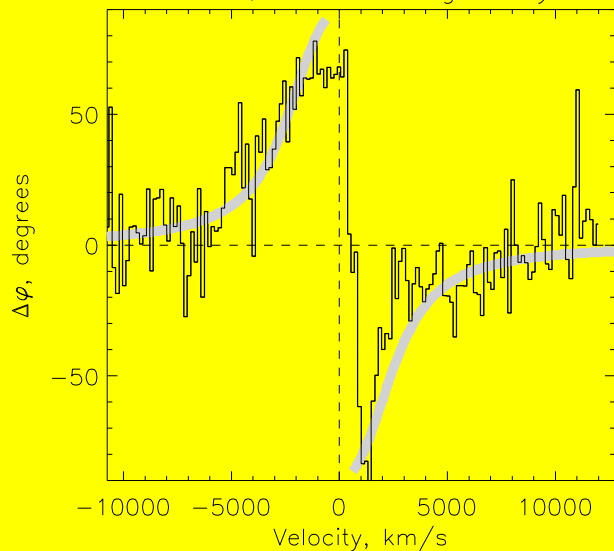
$$\log\left(\frac{V_i}{c}\right) = a - b \cdot \log(\tan(\varphi_i)),$$

$$a = 0.5 \log\left(\frac{GM_{\text{BH}} \cos^2(\theta)}{c^2 R_{\text{sc}}}\right).$$

$$\log\left(\frac{V_i}{c}\right) = a - b \cdot \log(\tan(\varphi_i)),$$

Посматрања, 6м телескоп САО

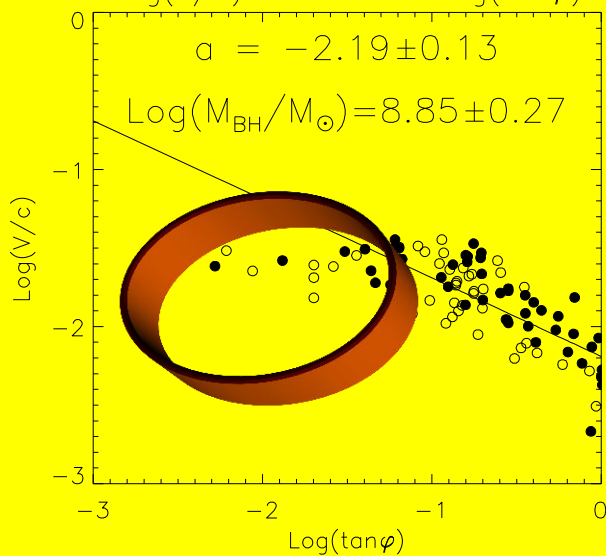
3C273, $R_{sc}=953$ lighth days



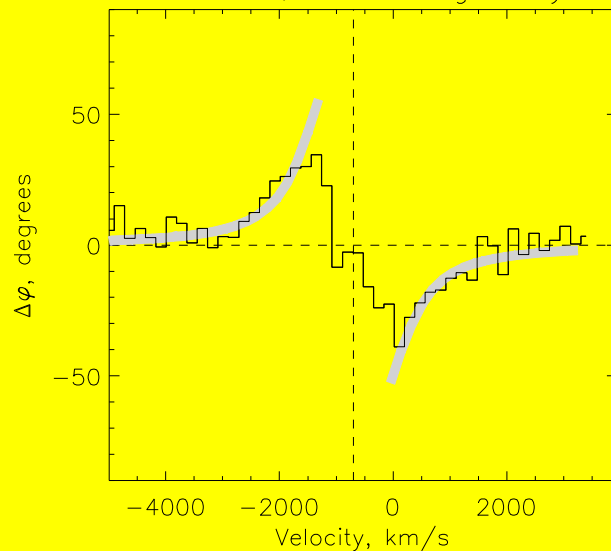
$$\text{Log}(V/c) = a + 0.5 \text{Log}(\tan\varphi)$$

$$a = -2.19 \pm 0.13$$

$$\text{Log}(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.85 \pm 0.27$$



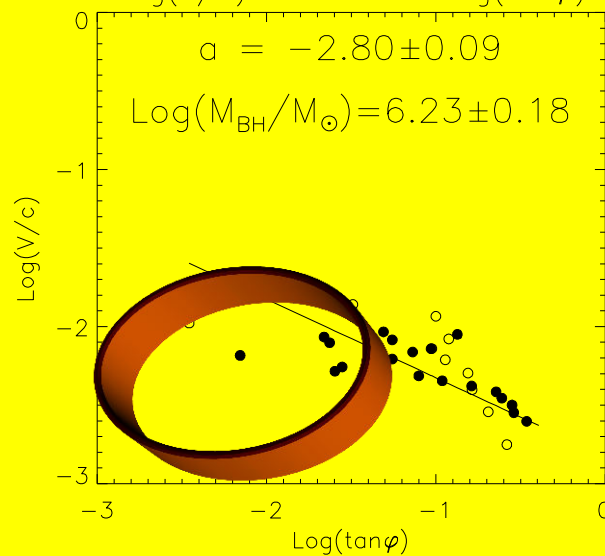
NGC4051, $R_{sc}=38$ lighth days



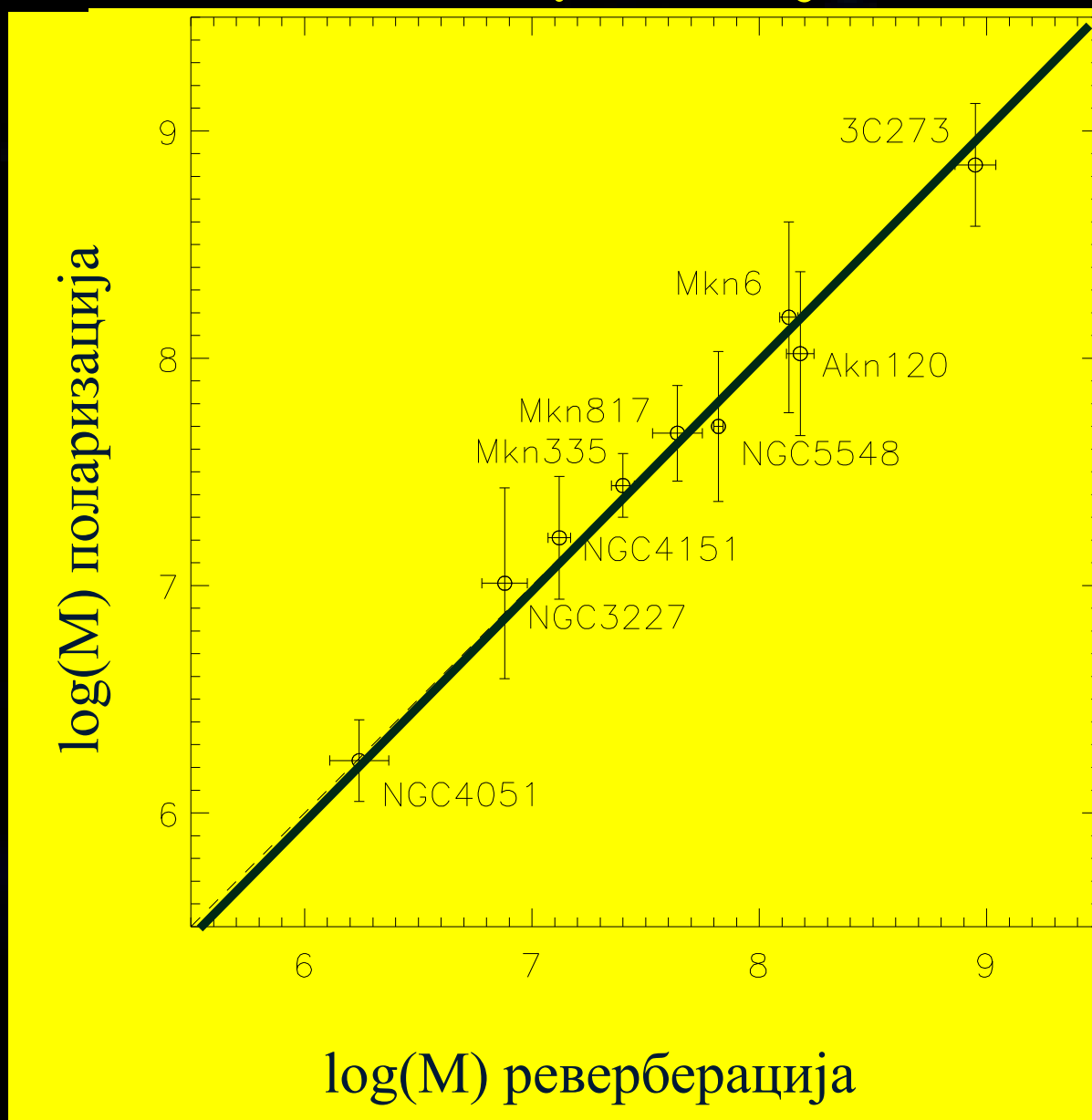
$$\text{Log}(V/c) = a + 0.5 \text{Log}(\tan\varphi)$$

$$a = -2.80 \pm 0.09$$

$$\text{Log}(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 6.23 \pm 0.18$$



Мерене масе ЦР, реверберација и поларизација



Уместо закључка

- Од 2010, објављен 41 рад у М23, од чега 23 рада у М23 (односно цитирани више од 400 пута (АДС))
- Велики број отворених питања у овој области експертима

Хвала на пажњи