



<http://astro.tsinghua.edu.cn>



# Истицање гаса у активним галактичким језгрима: *шта нам откривају спектралне линије?*

Јелена Ковачевић Дојчиновић, Иван Дојчиновић, Маша Лакићевић,  
Лука Ч. Поповић

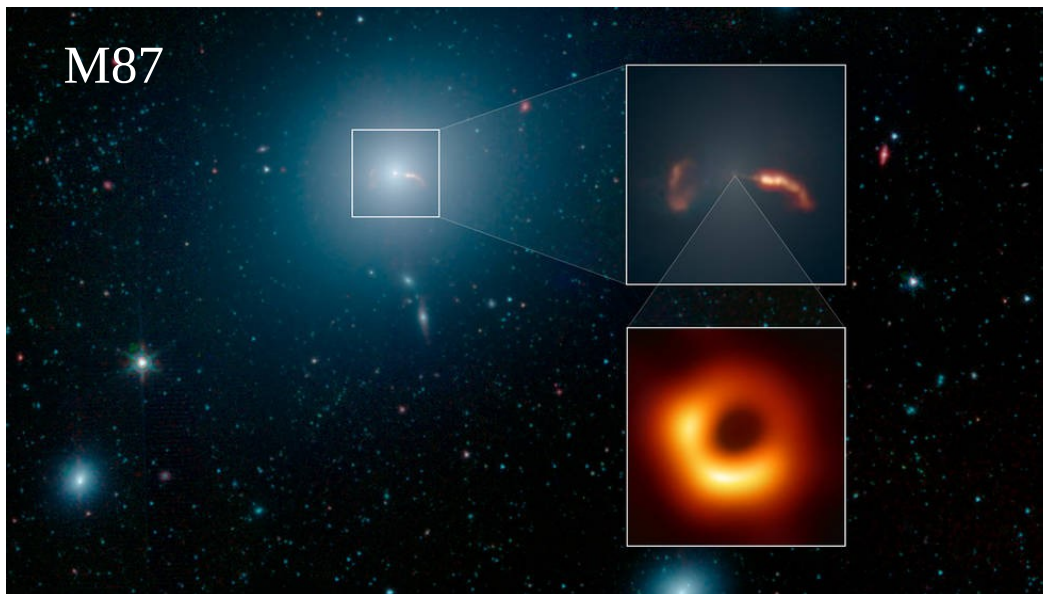
# Садржај предавања

1. Увод
2. Истицање гаса (outflow): физичке собине и начин настанка
3. Значај истицања гаса за еволуцију галаксије
4. Како се истицање гаса види у спектрима АГЈ?
5. Утицај кинематике outflow-а на профиле линија: отворена питања
6. Узорак и анализа
7. Резултати: Outflow vs. гравитација
8. Резултати: процедура за декомпозицију  $H\alpha$  + [NII]
9. Резултати: потпис outflow-а кроз АГЈ спектар
10. Резултати: комплексни облици outflow компоненти
11. Закључци

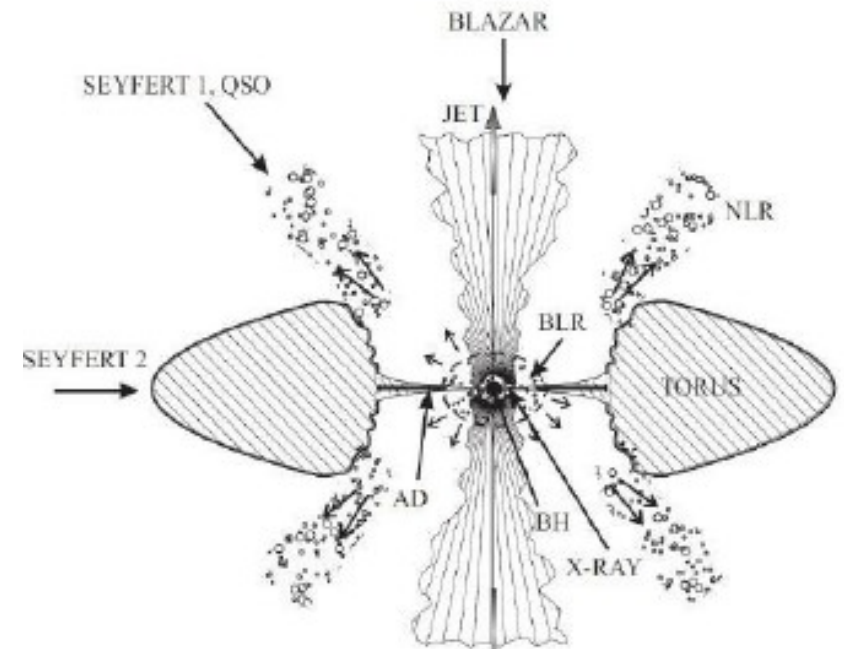
# 1. Увод

- узроци истицање гаса: 1) звездани ветрови и супернове, 2) активна галактичка језгра

- Активна галактичка језгра (АГЈ).



Credit: NASA/JPL-Caltech/Event Horizon Telescope Collaboration



Jovanović & Popović, 2009

- <10% процената свих галаксија садрже АГЈ
- АГЈ имају и до 10000 пута већу луминозност од нормалних галаксија
- настанак зрачења: акреција материје у супермасивну црну рупу
- подела на АГЈ тип 1 или тип 2 према оријентацији у односу на торус прашине
- outflow уочен преко оптичких спектралних линија у 90% АГЈ тип 1 (Rakshit & Woo 2018) и око 40-50 % АГЈ тип 2 (Woo et al. 2016).

## 2. Истицање гаса (outflow): физичке собине

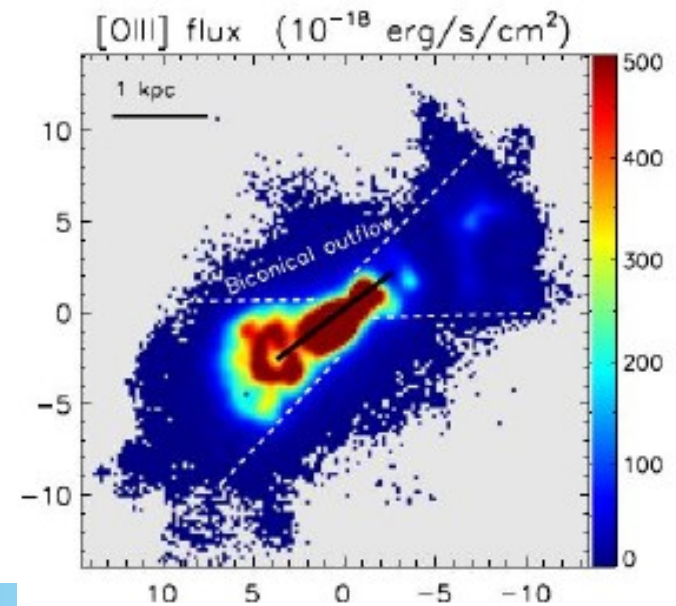
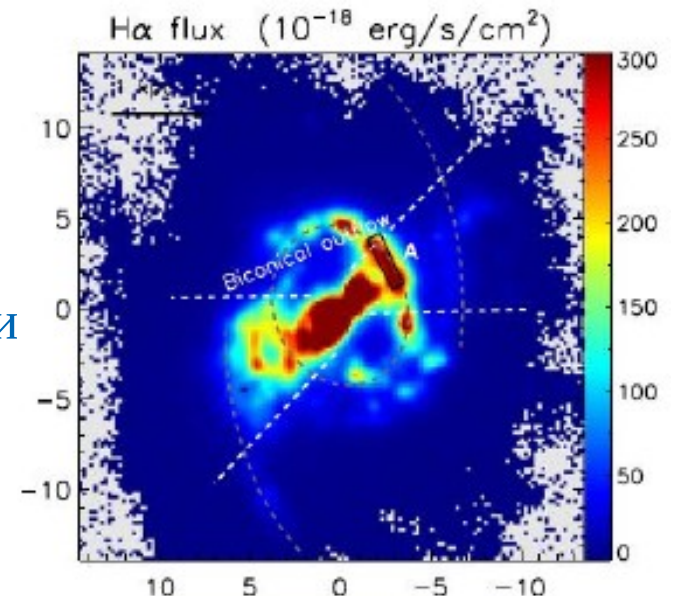
- истицање гаса у АГЈ је посматрано на свим таласним дужинама и на различитим скалама.
- Оријентација им не зависи од главне осе галаксије.

### 1) ултра-брзо истицање гаса на малим скалама (ветрови акреционог диска)

- посматрано преко Х-зрачења и апсорпционих линија у УВ.
- $R \sim 0.01 \text{ pc} - 1 \text{ pc}$ ,  $v < 0.25c$ , (Tombesi et al. 2015, Nature)

### 2) истицање гаса на великим скалама

- посматрано преко оптичких емисионих линија и преко линија молекула у ИЦ.
- $R < 10 \text{ kpc}$ ,  $v < 2000 \text{ km/s}$  (Komossa et al. 2018).
- Истраживање outflow-а на великим скалама је посебно напредовало развојем просторне спектроскопије; одређене скале outflow-а, брзина, проток масе ( $\dot{M} \sim 0.1-1000 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ ), енергија... (Harrison et al. 2014, Karouzos et al. 2016, Kang & Woo 2018, Shin et al. 2019).



NGC 5728: Shin et al. 2019

## 2. Истицање гаса (outflow): начин настанка

- *Механизам који доводи до настанка истицања гаса је под знаком питања.*

### 1) Модел настанка ултра-брзих outflow-а на малим скалама (ветрова акреционог диска):

- приликом акреције материје у црну рупу, када се акреција одвија на Едингтоновој граници или изнад ње (King et al. 2003).



Credit: ESA/ATG medialab

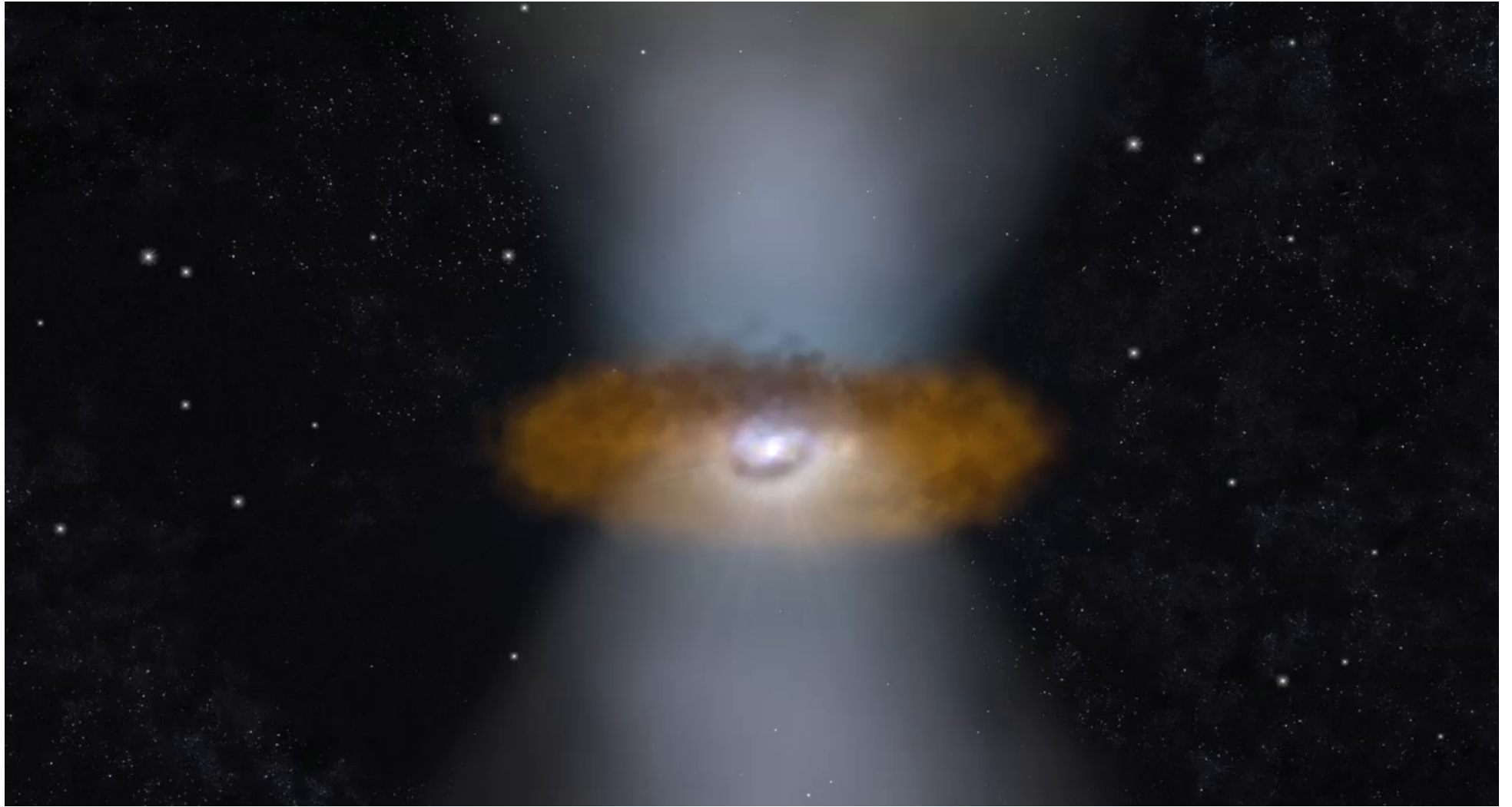
### 2) Модели настанка outflow-а на великим скалама:

- ултра-брзи ветрови акреционог диска на малим скалама ударају у међузвездану материју и стварају ударни талас који прераста у outflow-а на великим скалама (Tombesi et al. 2015; Costa et al. 2020)

- притисак зрачења на прашину (Osterbrock & Ferland 2006; Ishibashi & Fabian 2015),

- интеракција радио џета са облацима гаса (Nesvadba et al. 2008; Mukherjee et al. 2018)

Markarian 573 animation  
credit: NASA's Goddard Space Flight Center

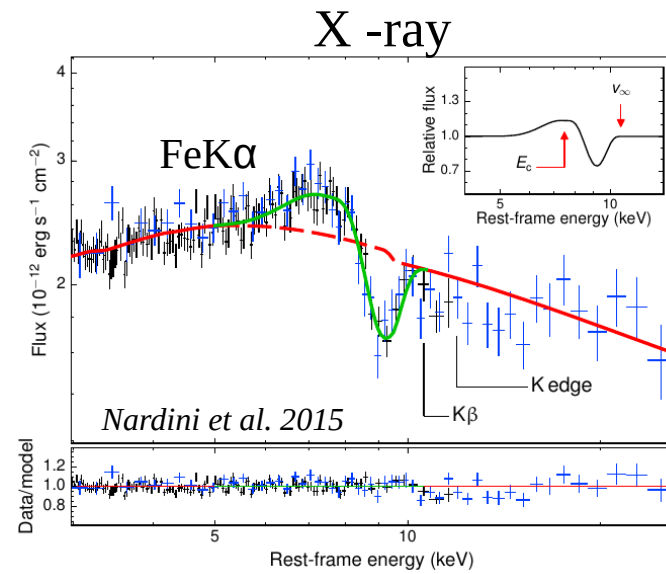
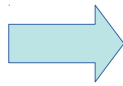


# 3. Значај истицања гаса за еволуцију галаксије

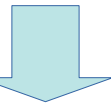
- Емпиријски пронађене корелације између масе црне рупе и одређених особина галаксије домаћина (маса и луминозност балца, дисперзија брзина звезда). Сматра се да постоји одређене спрега између црне рупе и галаксије домаћина (*AGN feedback*) која доводи до заједничке еволуције (Kormendy & Ho 2013).
- *Outflow* на великим скалама је могући канал за *AGN feedback* (Di Matteo et al. 2005; Fabian et al. 2012; Harrison et al. 2018).
- **Негативни *AGN feedback***: истицање гаса растерује међузвездану материју у регионима где се формирају звезде и тако смањује стопу формирања нових звезда.
- **Позитивни *AGN feedback***: истицање гаса повећава стопу формирања нових звезда, тако што компресује међузвездану материју.

# 4. Како се истицање гаса види у спектрима АГЈ?

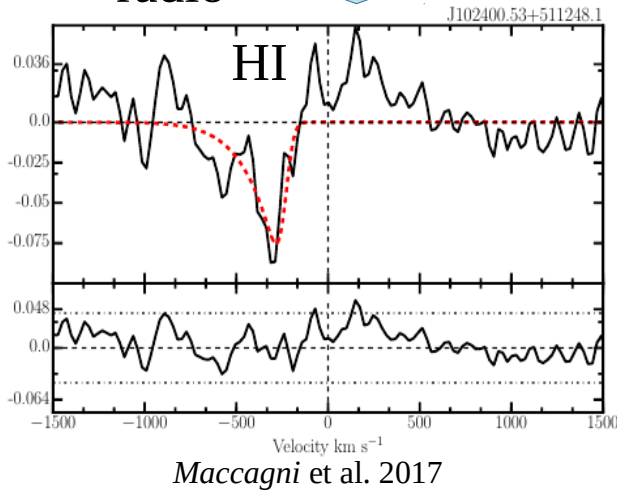
- ултра-брзи outflow на малим скалама



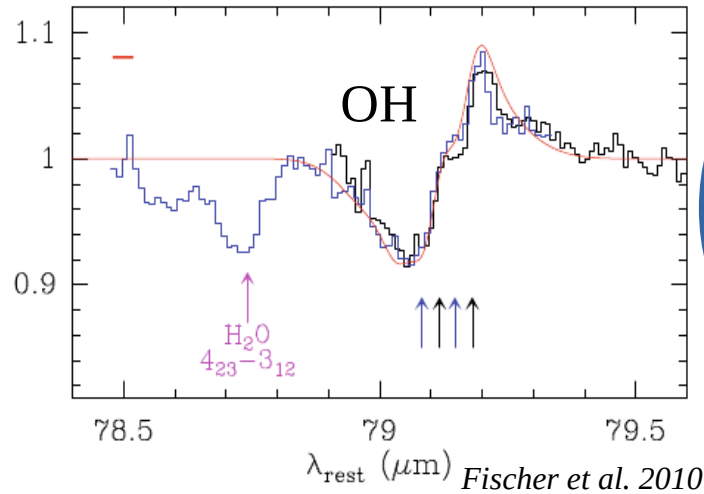
- outflow на великим скалама



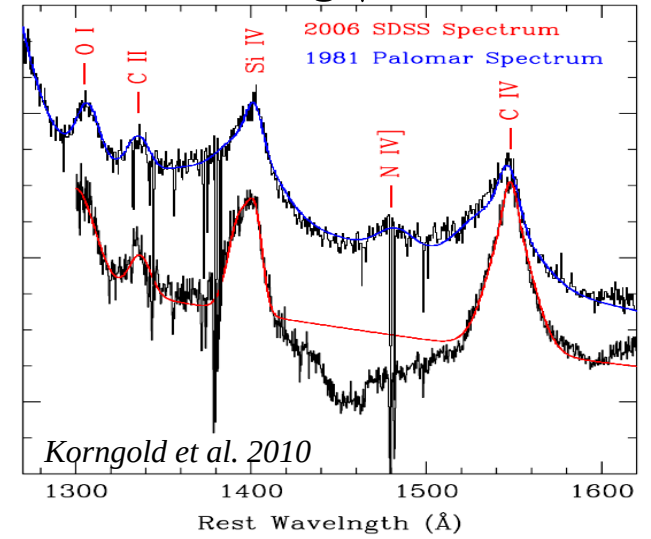
radio



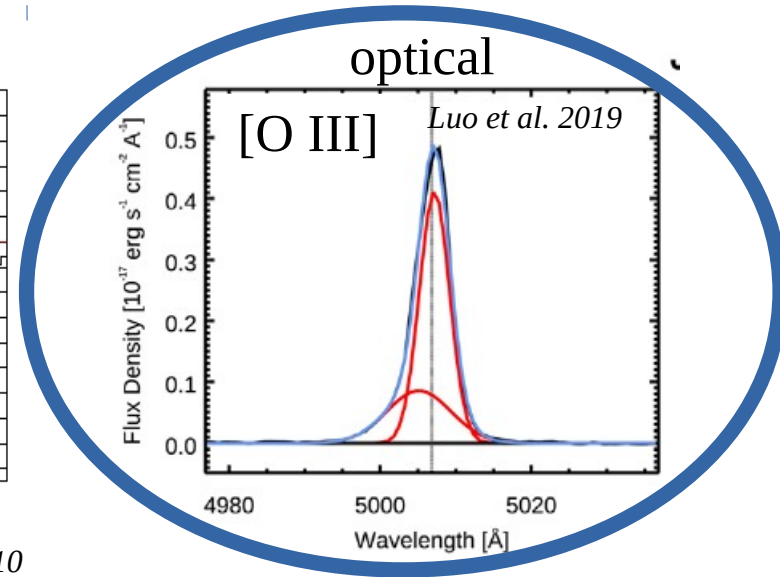
IR



UV



optical

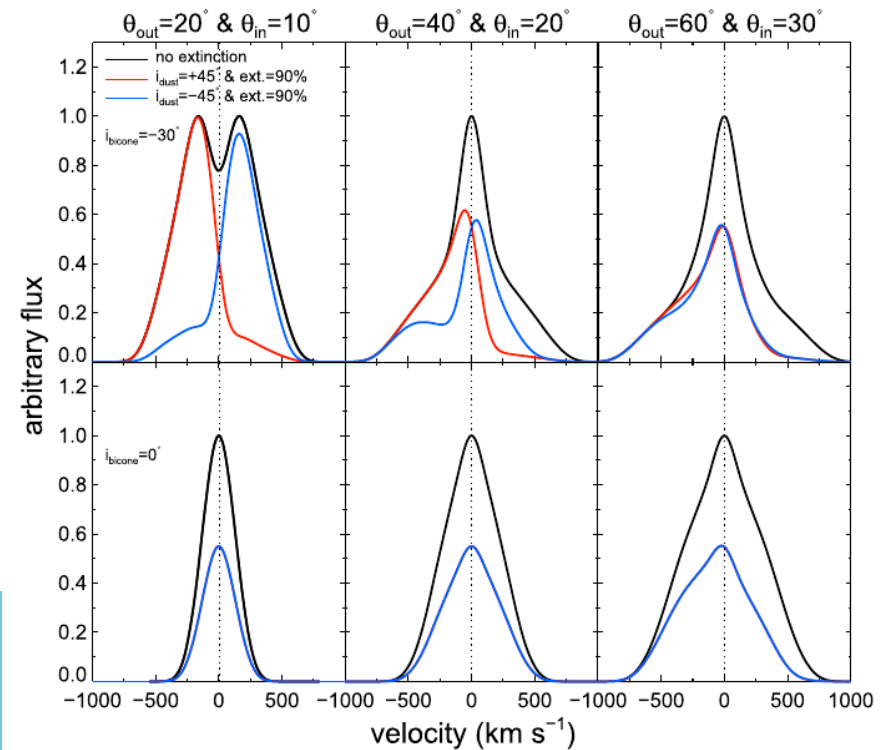
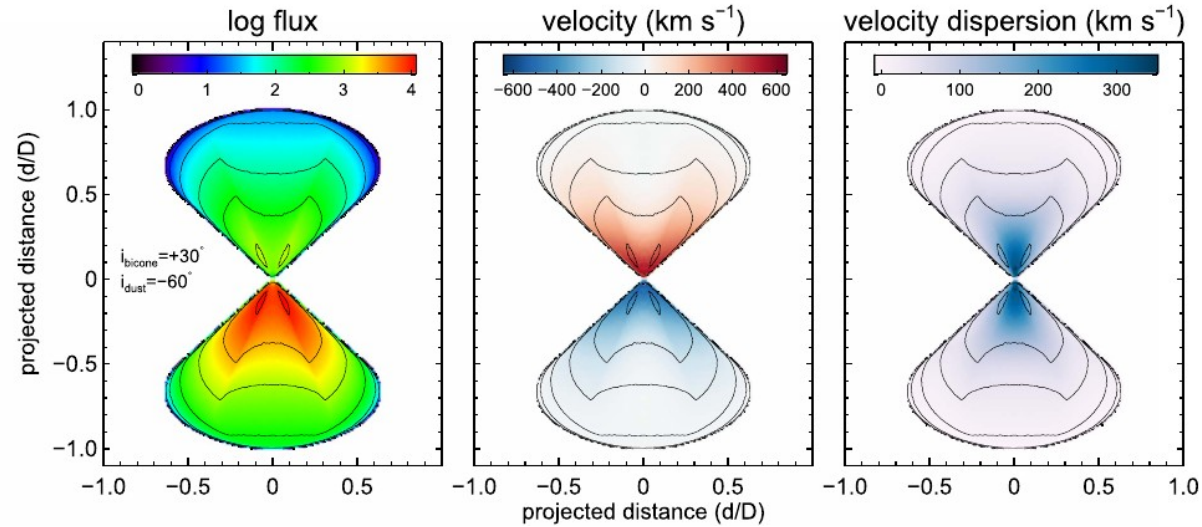
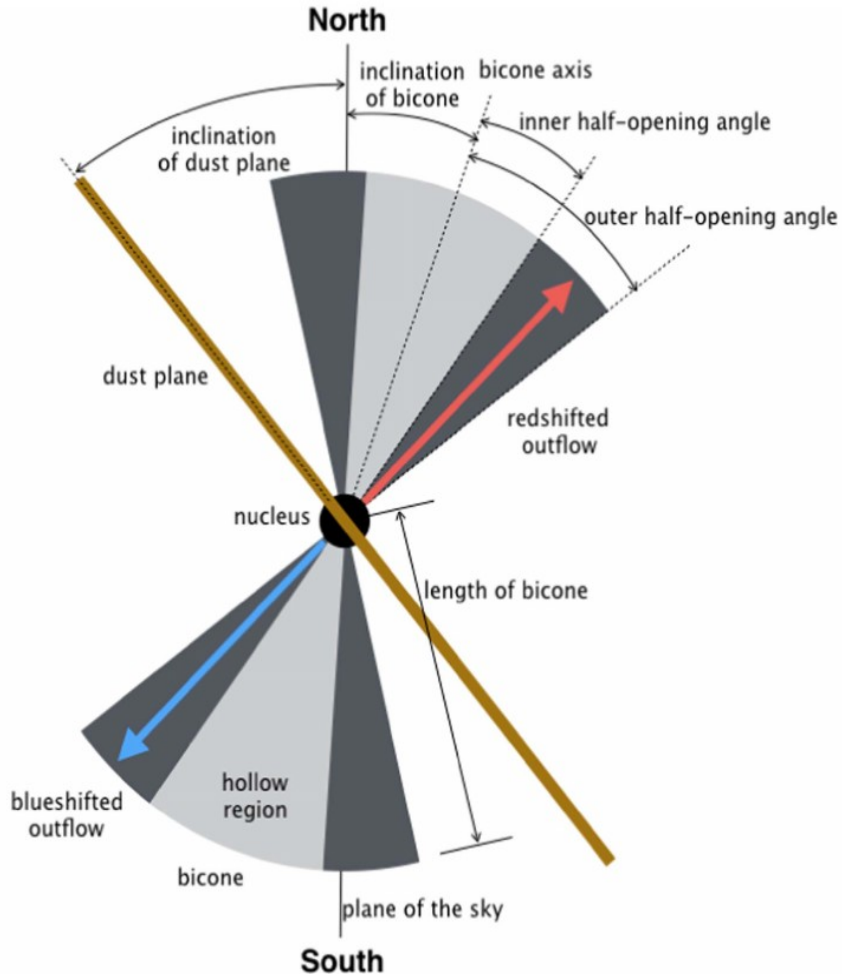




# Шта кажу теоријски модели?

## Biconical outflow model: Bae & Woo, 2016

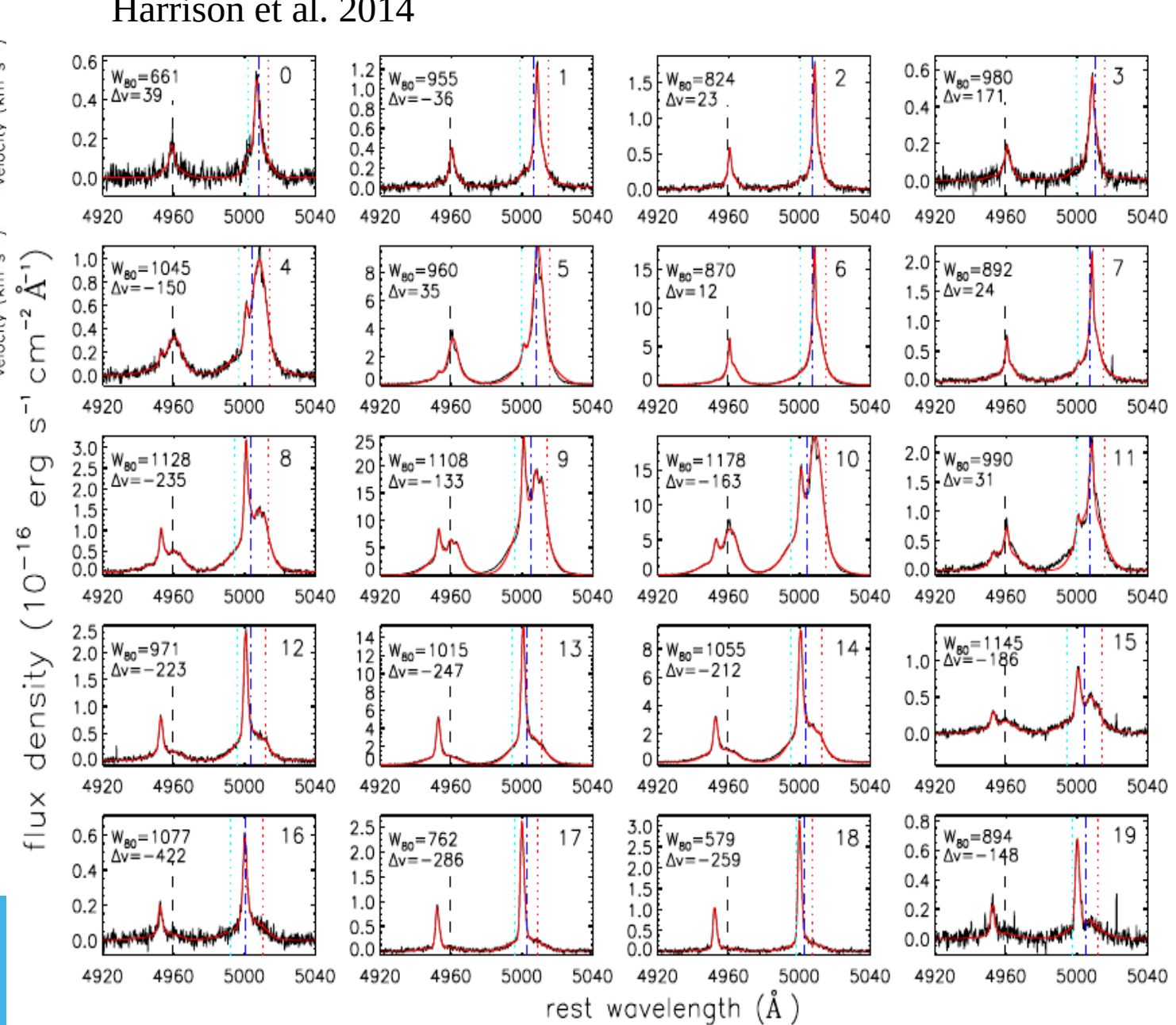
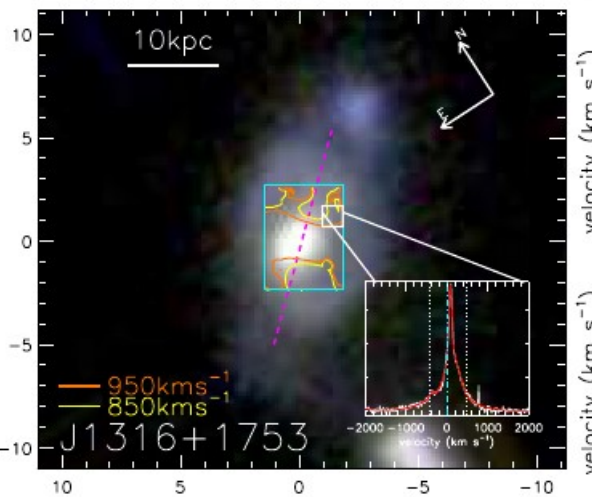
- описују геометрију outflow-а са:
  - угао конуса,
  - брзина гаса у outflow-у
  - количина екстинкције услед присуства прашине.



# Просторно разлучена спектроскопија

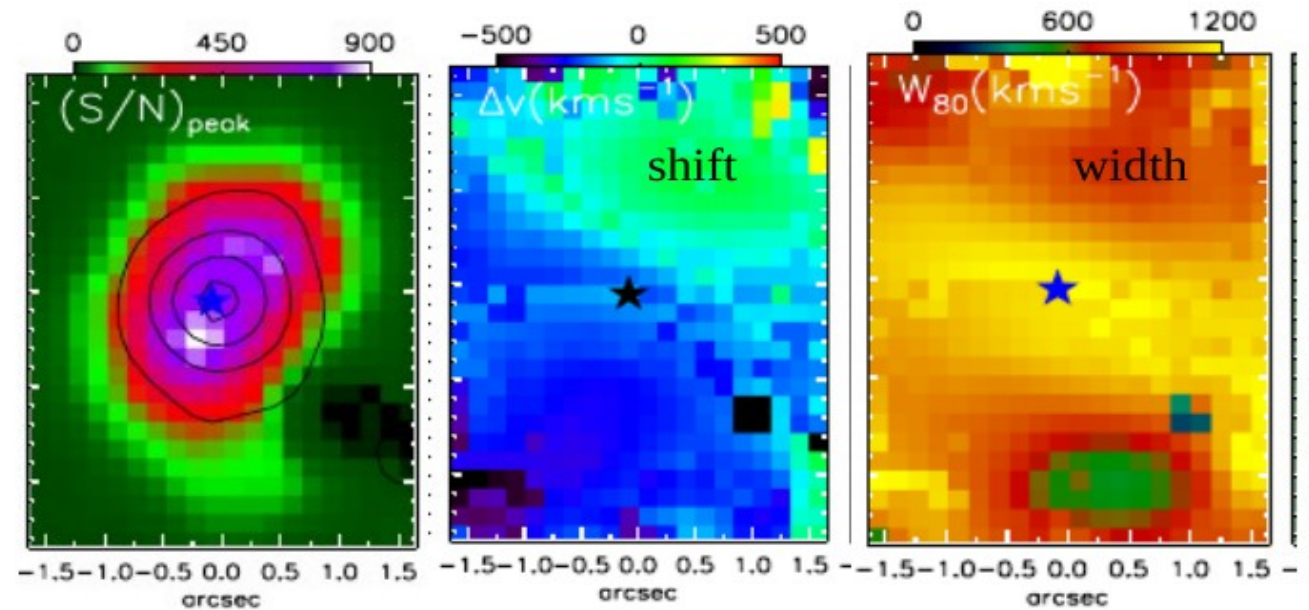
објект J1316+1753

Harrison et al. 2014

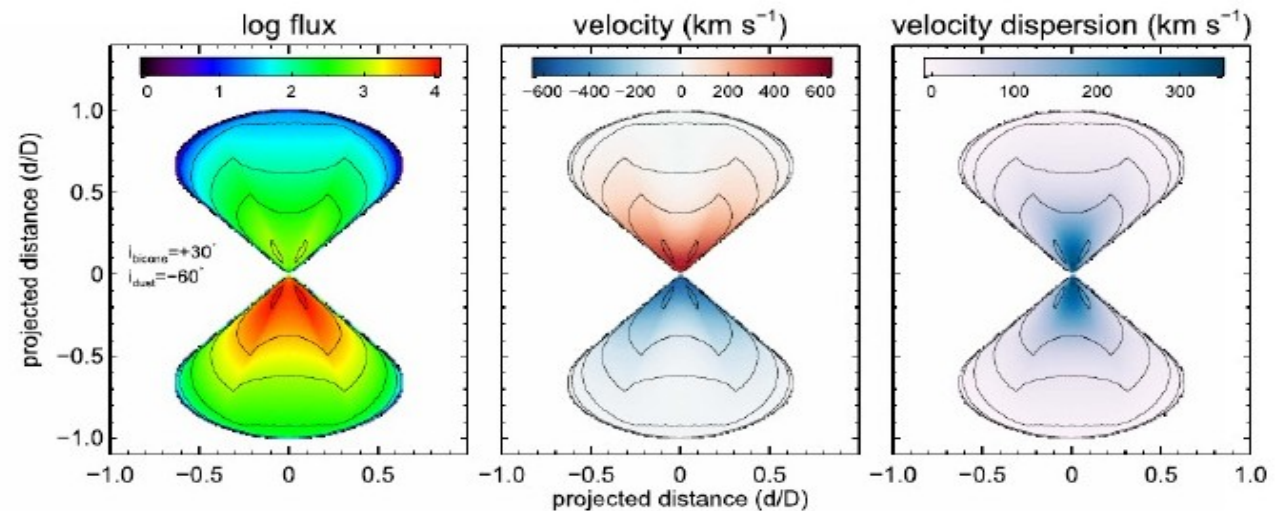


# Просторно разлучена спектроскопија

Harrison et al. 2014  
објекат J1316+1753



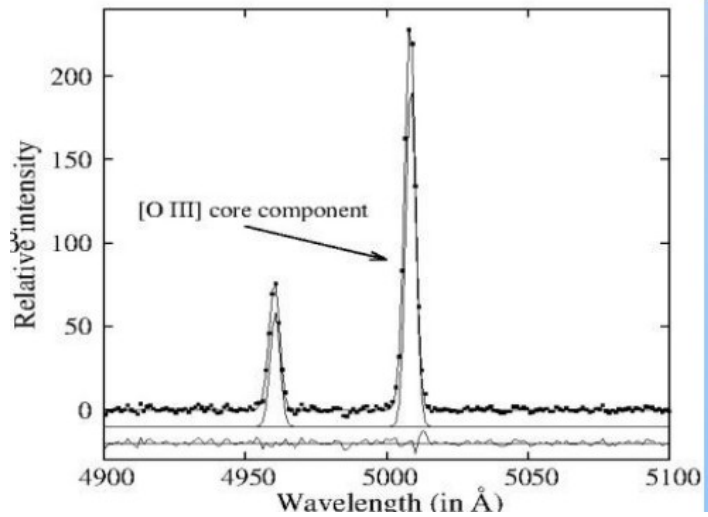
Bae & Woo, 2016  
Biconical outflow model



# Просторно неразлучена спектроскопија

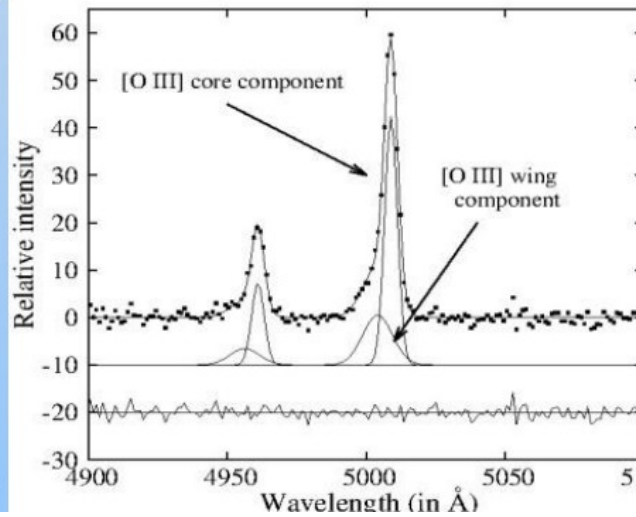
- једноставнији облици [O III] линија, добро се описују са једним или два гаусијана.

један гаусијан



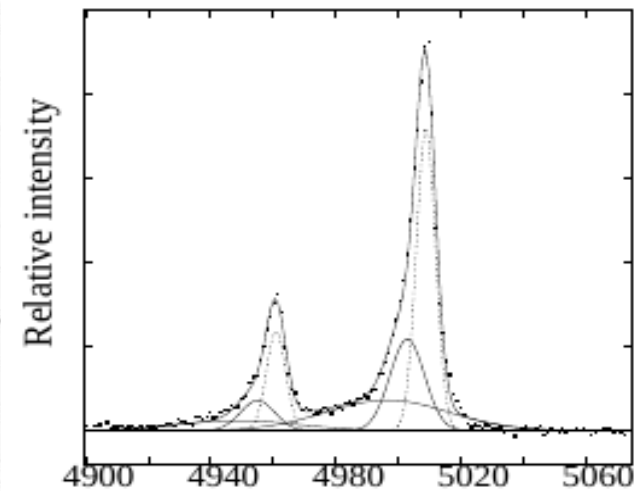
10 % АГЈ тип 1  
50 % АГЈ тип 2

два гаусијана



90 % АГЈ тип 1  
50 % АГЈ тип 2

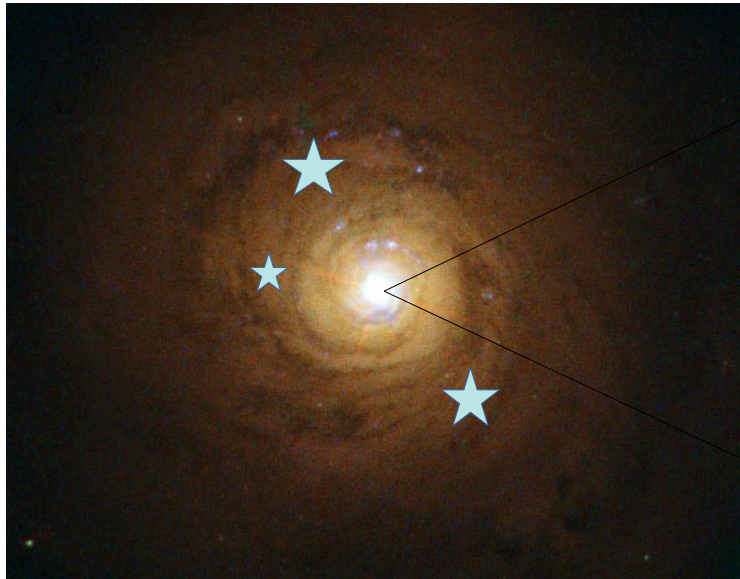
КОМПЛЕКСНИ ОБЛИЦИ



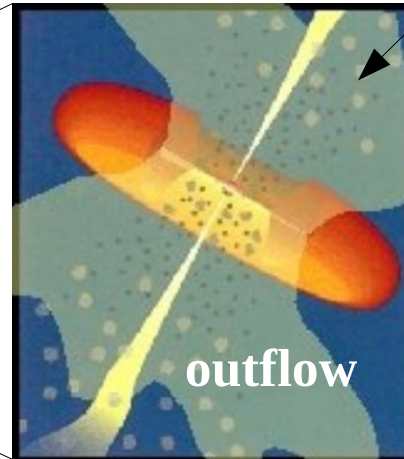
врло ретко

# 5. Утицај кинематике outflow-а на профиле линија: *отворена питања*

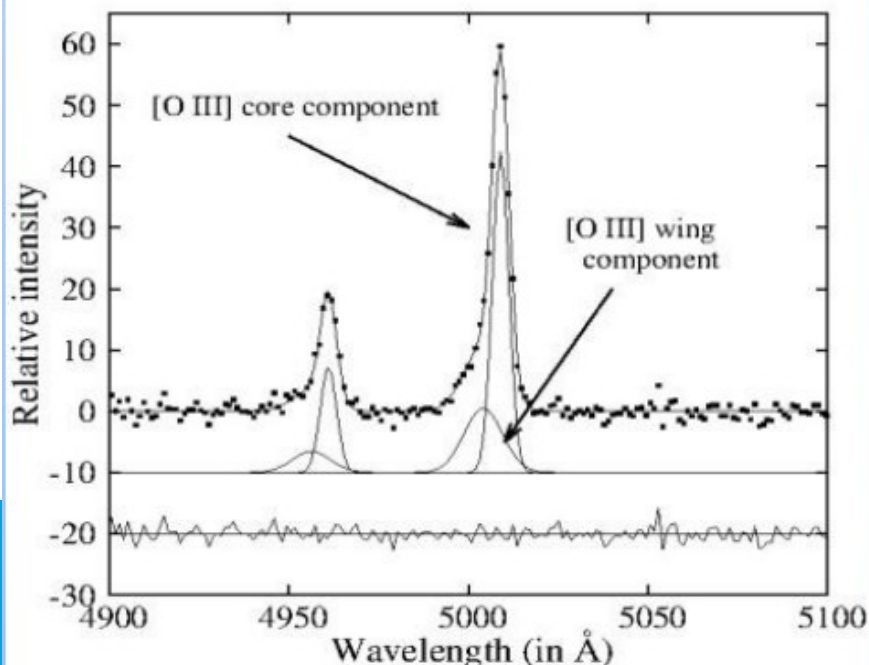
À credit: ESA / Hubble / NASA / Davide de Martin.



усколинијски регион



Профили емисионих линија:  
гравитациона  
+  
негравитациона  
(outflow)  
компонента

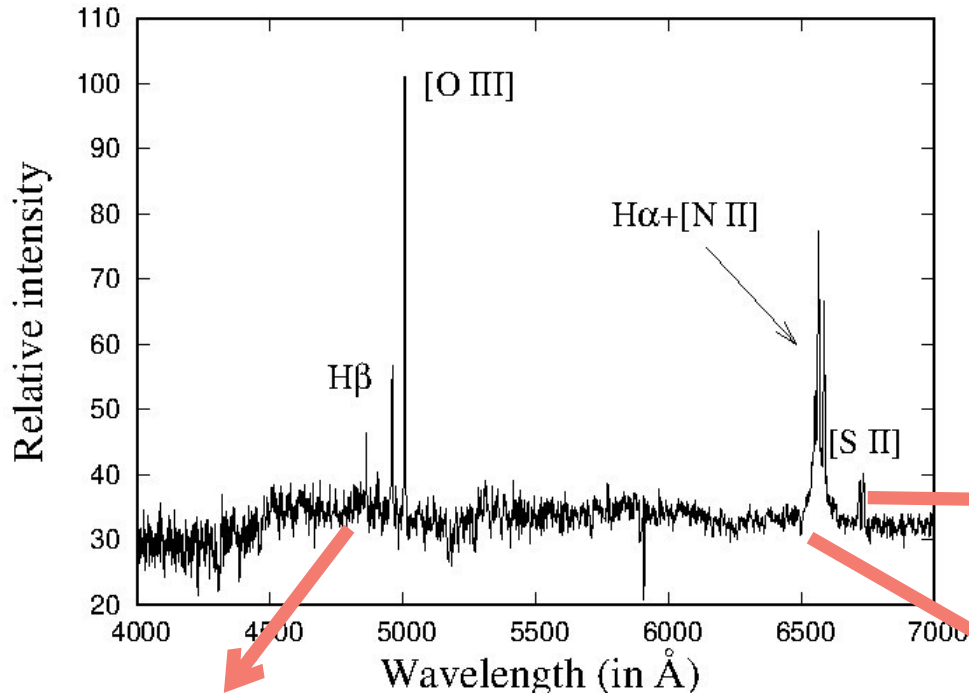


Како разлучити outflow компоненту од гравитационе компоненте у профилима уских линија? Да ли је исто за све линије?

Karouzos et al. 2016, Kang et Woo 2018, Sexton et al. 2021, Davies et al. 2020, etc.

# 5. Утицај кинематике outflow-а на профиле линија: *отворена питања*

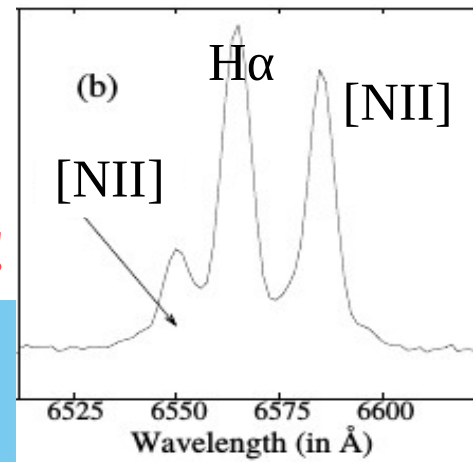
Утицај кинематике outflow-а на друге емисионе линије сем [O III] у АГЈ спектру?



**исувише слабе!**

**исувише слабе!**

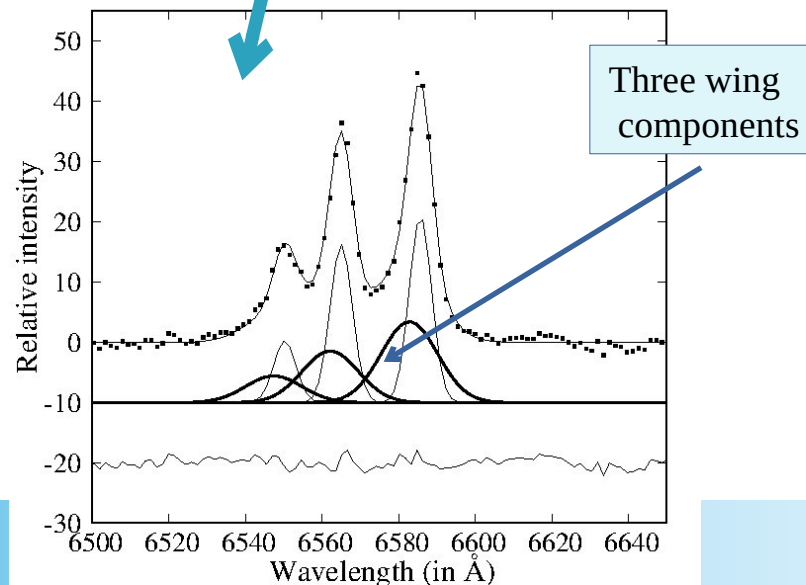
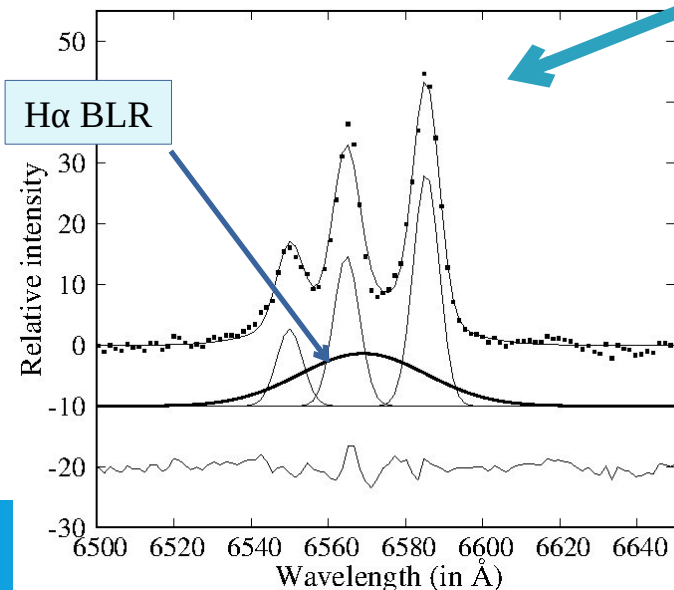
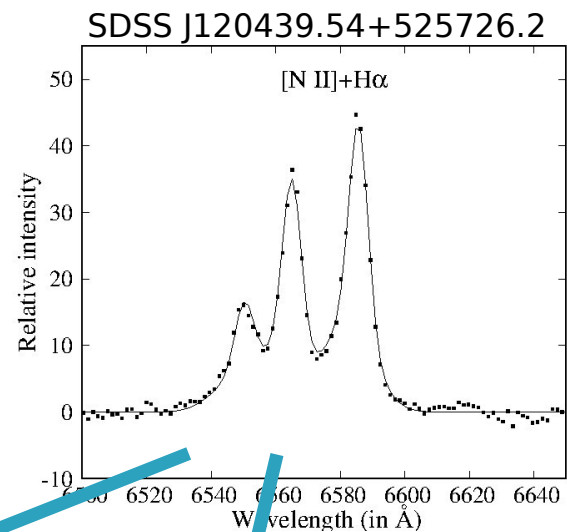
**КОМПЛИКОВАНА  
ДЕКОМПОЗИЦИЈА!**



# 5. Утицај кинематике outflow-а на профиле линија: *отворена питања*

## Декомпозиција $H\alpha + [NII]$ ?

- преклопљене  $H\alpha + [NII]$  могу бити:
  - (a) широка  $H\alpha$  из широколинијског региона, АГЈ 1.9
  - (b) сума три outflow компоненте
  - (c) све то скупа



# Циљ

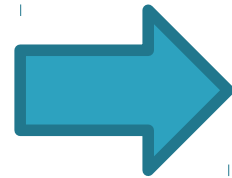
- Пратити кинематику outflow-а у спектрима АГЈ типа 2 анализирајући профиле више емисионих линија ([O III] , H $\alpha$ , [N II] , H $\beta$ , [S II]).
- Истражити утицај гравитационе наспрам не-гравитационе (outflow) кинематике на профилима различитих емисионих линија.
- Направити процедуру за декомпозицију H $\alpha$ + [N II]



# 6. Узорак и анализа

▶ SDSS DR14:

1. SNR > 20
2. EWs of lines > 5Å



577 АГЈ тип 2

60 %

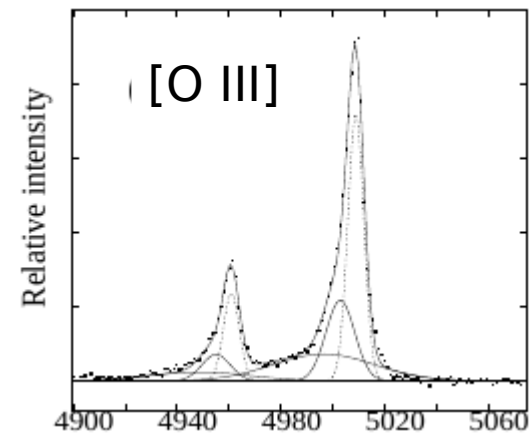
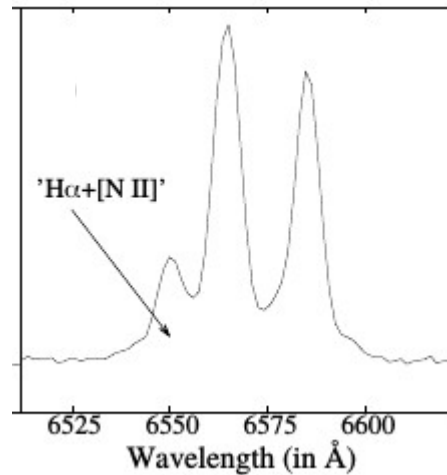
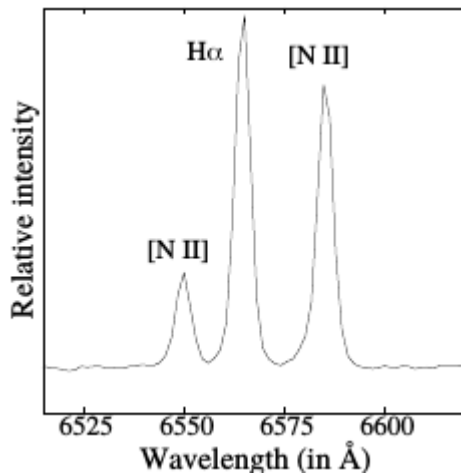
38 %

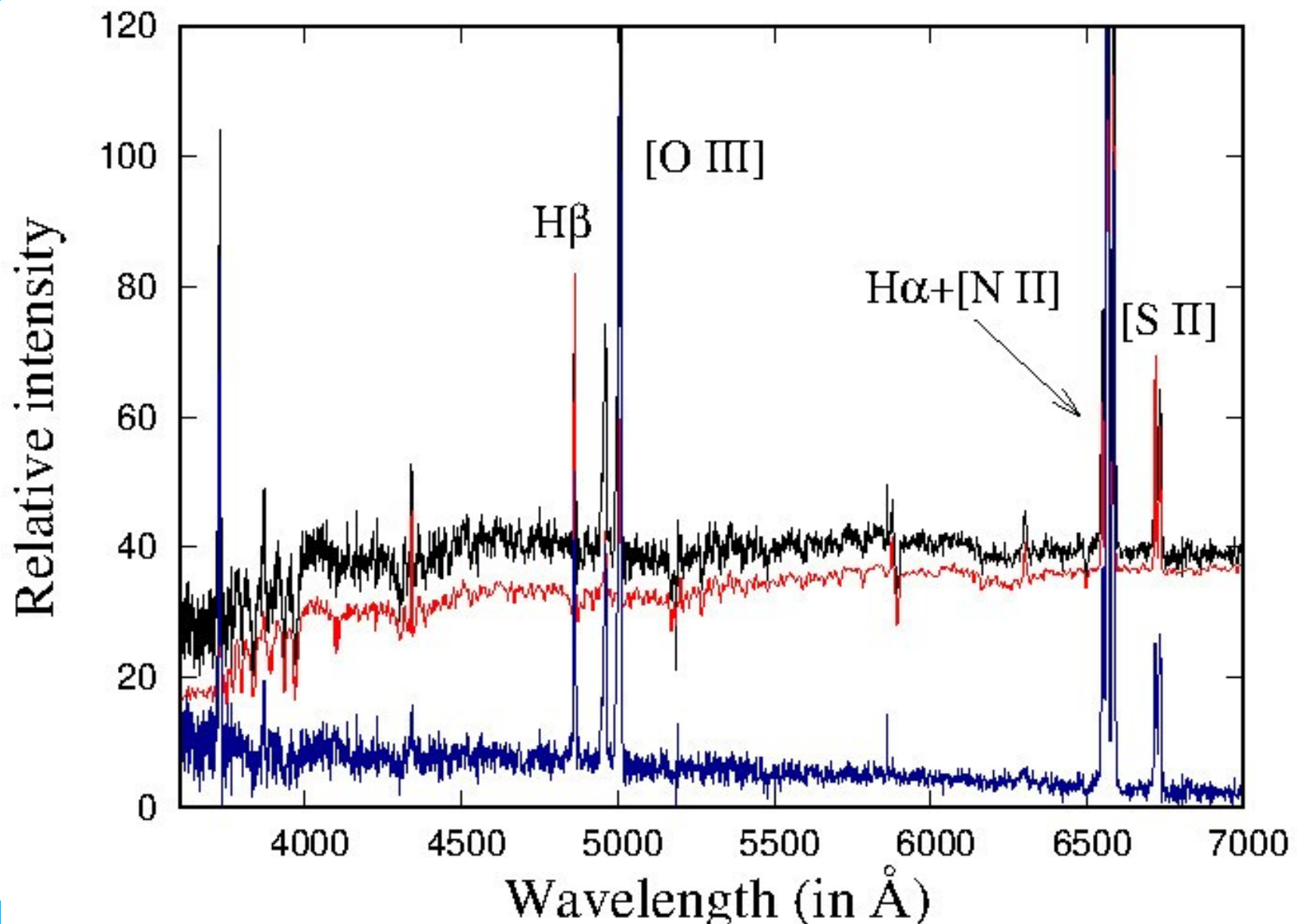
2 %

непреклопљене  
H $\alpha$  и [N II]

Преклопљене  
H $\alpha$  and [N II]

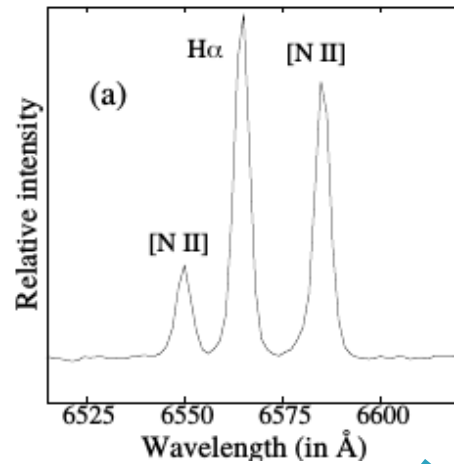
Комплексан профил  
outflow компоненте



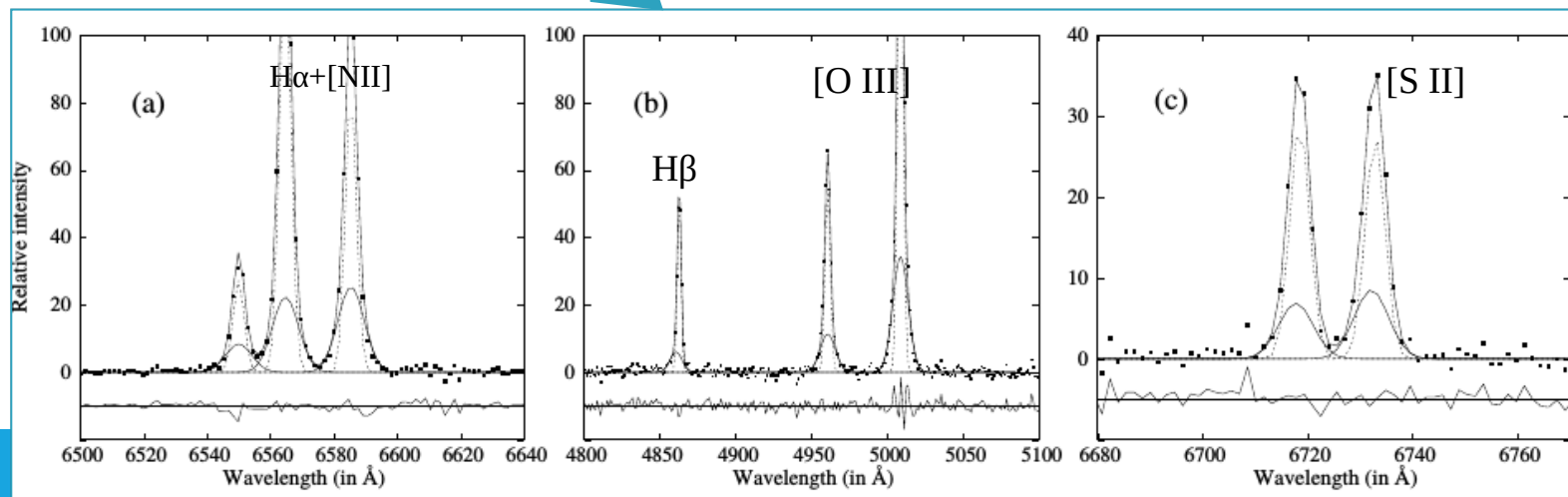
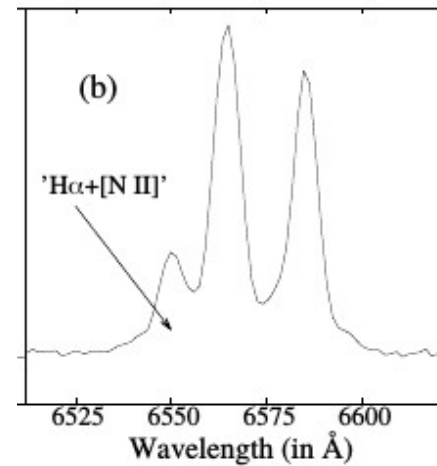


# 6. Узорак и анализа

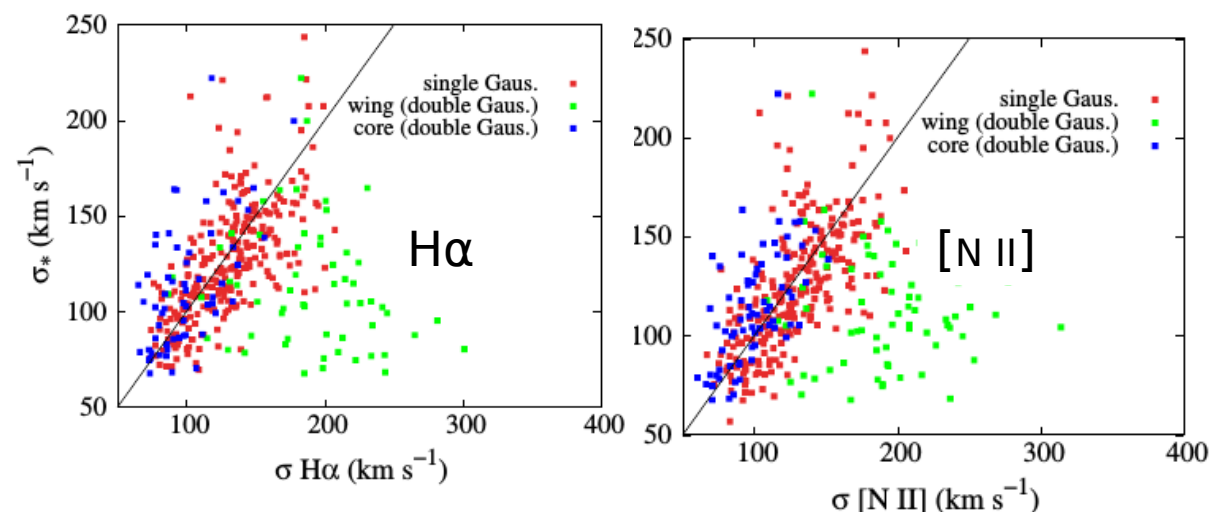
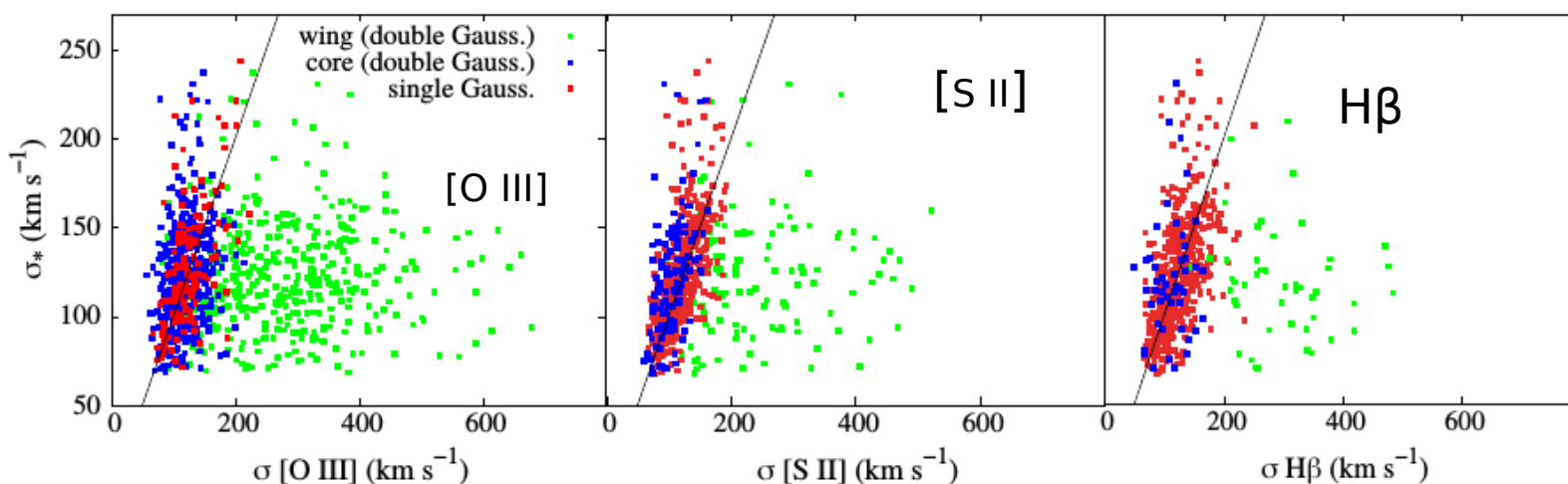
непреклопљене  $H\alpha$  и  $[N II]$ ,  
Сви параметри фита слободни



преклопљене  $H\alpha$  и  $[N II]$ ,  
Развијена процедура за  
декомпозицију



# 7. Резултати: Outflow vs. гравитација

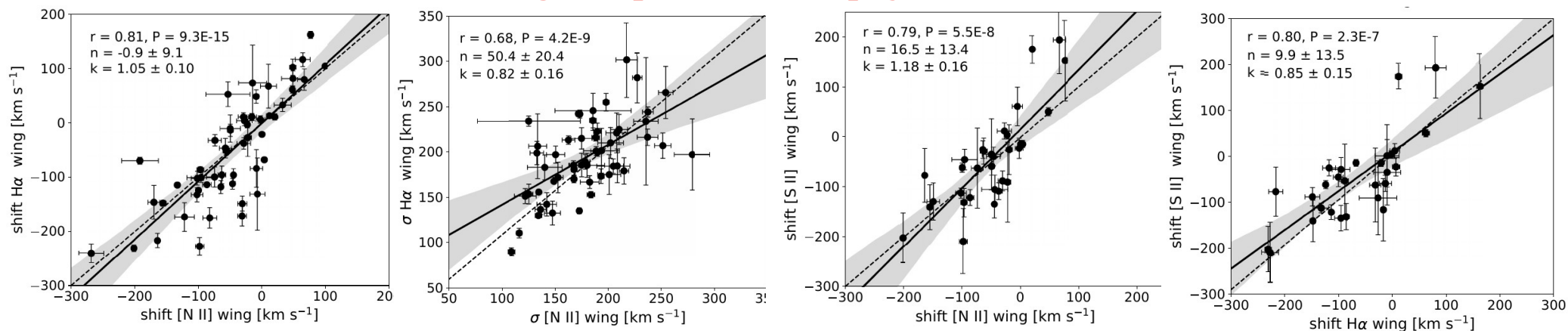


		$\sigma_*$	
		core (double Gauss.)	single Gauss.
$\sigma_{[OIII]}$	r	0.26	0.58
	P	1.7E-7	9.1E-13
$\sigma_{[NII]}$	r	0.58	0.65
	P	1.5E-7	0
$\sigma_{H\alpha}$	r	0.58	0.65
	P	1.1E-6	0
$\sigma_{[SII]}$	r	0.49	0.63
	P	1.2E-9	0
$\sigma_{H\beta}$	r	0.16	0.52
	P	0.29	0

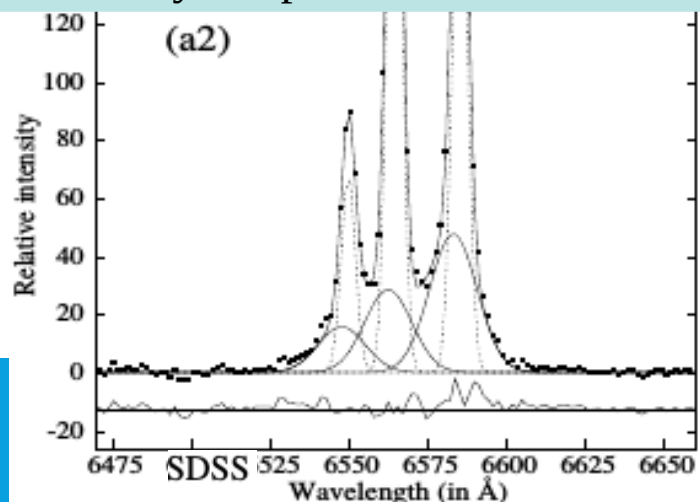
1. Компоненте крила код линија фитованих са два Гаусијана представљају outflow кинематику код свих линија.
2. Компоненте језгра за  $H\alpha$ ,  $[N II]$  и  $[S II]$  представљају гравитациону кинематику, а у случају  $[OIII]$  и  $H\beta$  мешан утицај outflow и гравитационе кинематике.
3. Све линије које су фитоване само са једним Гаусијаном представљају гравитациону кинематику

# 8. Резултати: процедура за dekompoziciju H $\alpha$ + [N II]

- Прво смо анализирали подзорак са непреклопљеним H $\alpha$  и [NII] и нашли неколико јаких корелација, које су нам омогућиле да смањимо број степени слободе у фитовању и саставимо процедуру од неколико корака за dekompoziciju преклопљених H $\alpha$  + [NII]
- **Циљ процедуре да спречи погрешну интерпретацију суме три крила H $\alpha$  и [NII] дублета као једну широку H $\alpha$  из широколинијског региона, и обрнуто.**

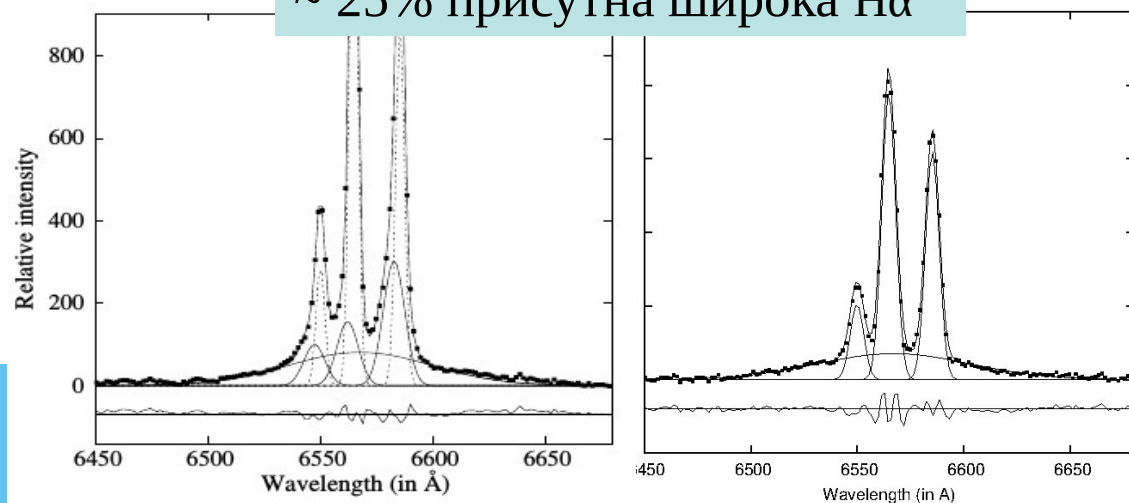


~ 75% сума три outflow компоненте



J111848.44+280738.3

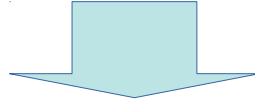
~ 25% присутна широка H $\alpha$



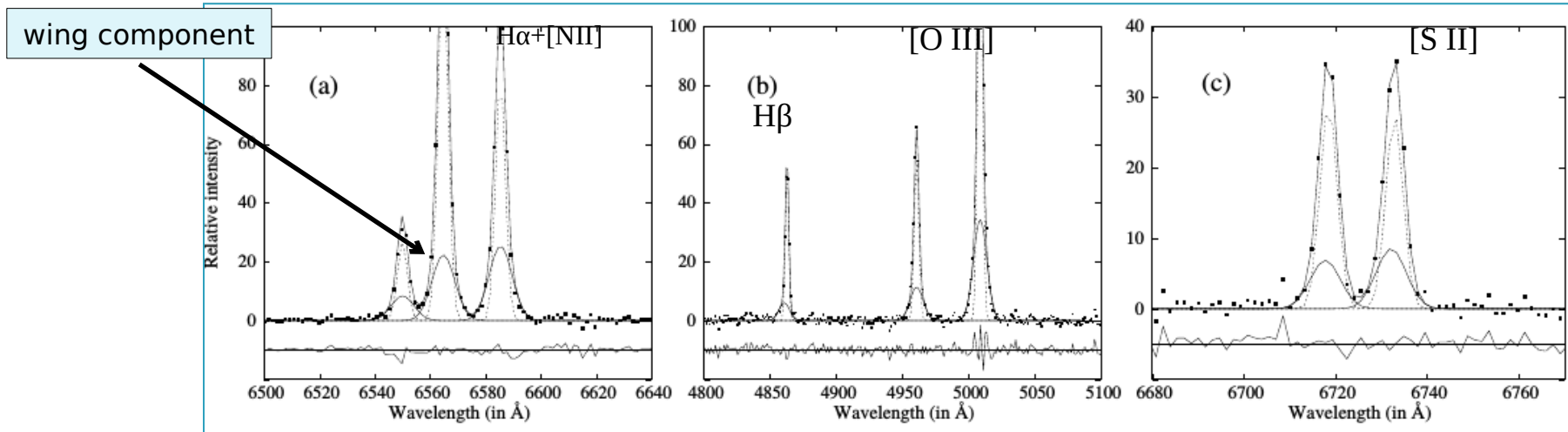
SDSS J032525.36-060837.8

# 9. Резултати: потпис outflow-а кроз АГЈ спектар

Постоје значајне корелације између помераја outflow (wing) компоненти свих линија, као и између њихових ширина, са изузетком  $H\beta$ .



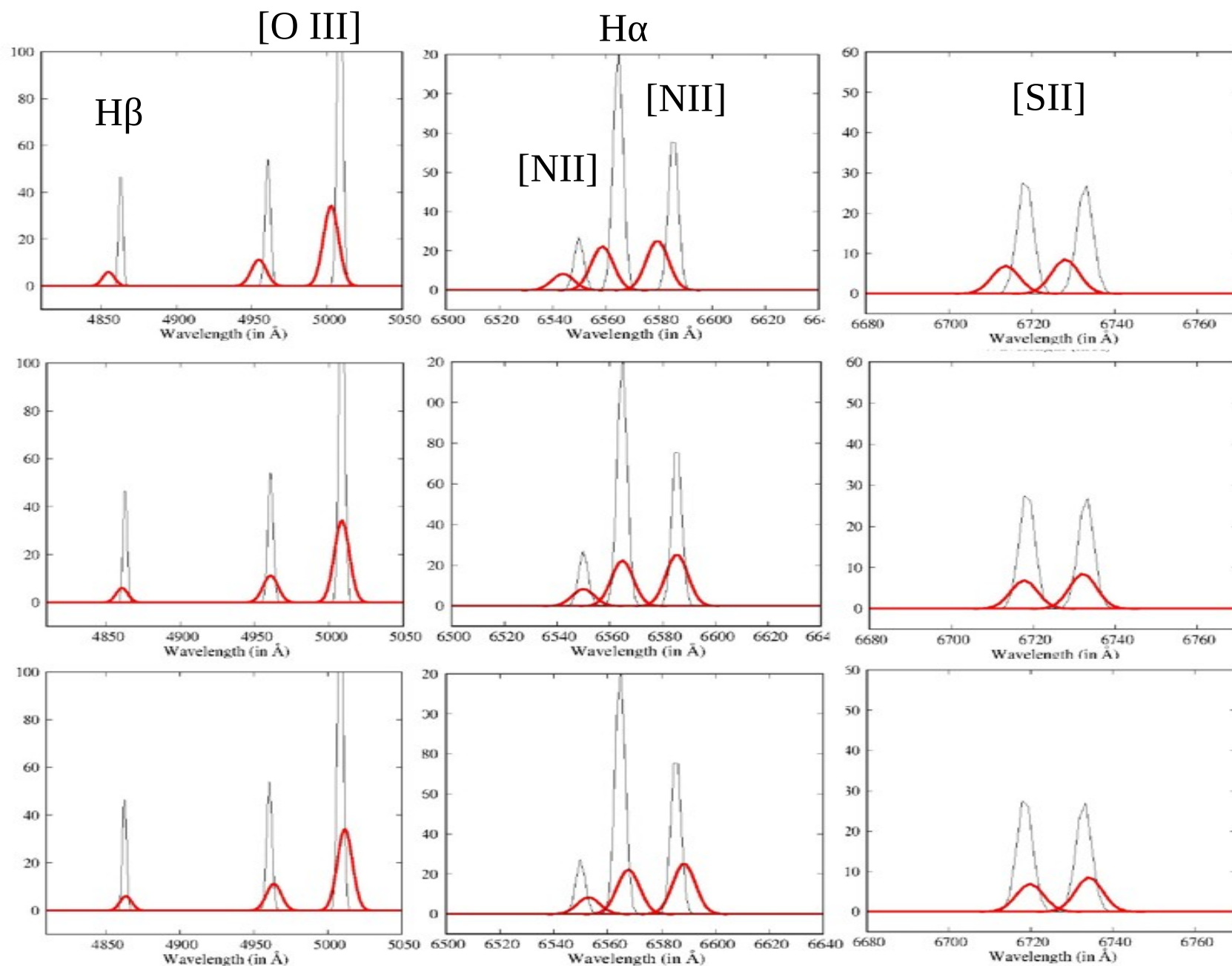
**Outflow кинематика системски делује на све анализиране линије у спектру ( $H\beta$ , [O III],  $H\alpha$ , [NII], [S II]).**



**Table 2.** The correlations between the widths and shifts of the wing components (w) of different lines in total sample ('unblended' + 'blended'). The Pearson coefficient of correlation (r) and P-values are given in bold-face for correlations with  $P < 1E-4$ .

		width $H\alpha$ w	shift $H\alpha$ w	width [S II] w	width $H\beta$ w	shift $H\beta$ w	shift [O III] w	width [O III] w
width $H\alpha$ w	r	1	0.15	<b>0.53</b>	0.34	0.19	0.016	<b>0.58</b>
	P	–	0.02	<b>5.9E-11</b>	0.02	0.20	0.81	<b>0</b>
shift $H\alpha$ w	r	0.15	1	0.11	0.39	<b>0.65</b>	<b>0.64</b>	0.07
	P	0.02	–	0.21	0.007	<b>7.5E-7</b>	<b>0</b>	0.28
width [S II] w	r	<b>0.53</b>	0.11	1	0.10	-0.05	0.15	<b>0.41</b>
	P	<b>5.9E-11</b>	0.21	–	0.58	0.78	0.07	<b>3.2E-7</b>
width $H\beta$ w	r	0.34	0.39	0.10	1	0.29	0.27	0.25
	P	0.02	0.007	0.58	–	0.04	0.05	0.07
shift $H\beta$ w	r	0.19	<b>0.65</b>	-0.05	0.29	1	<b>0.59</b>	0.08
	P	0.20	<b>7.5E-7</b>	0.78	0.04	–	<b>4.4E-6</b>	0.58
shift [O III] w	r	0.016	<b>0.64</b>	0.15	0.27	<b>0.59</b>	1	-0.05
	P	0.81	<b>0</b>	0.07	0.05	<b>4.4E-6</b>	–	0.28
width [O III] w	r	<b>0.58</b>	0.07	<b>0.41</b>	0.25	0.08	-0.05	1
	P	<b>0</b>	0.28	<b>3.2E-7</b>	0.07	0.58	0.28	–

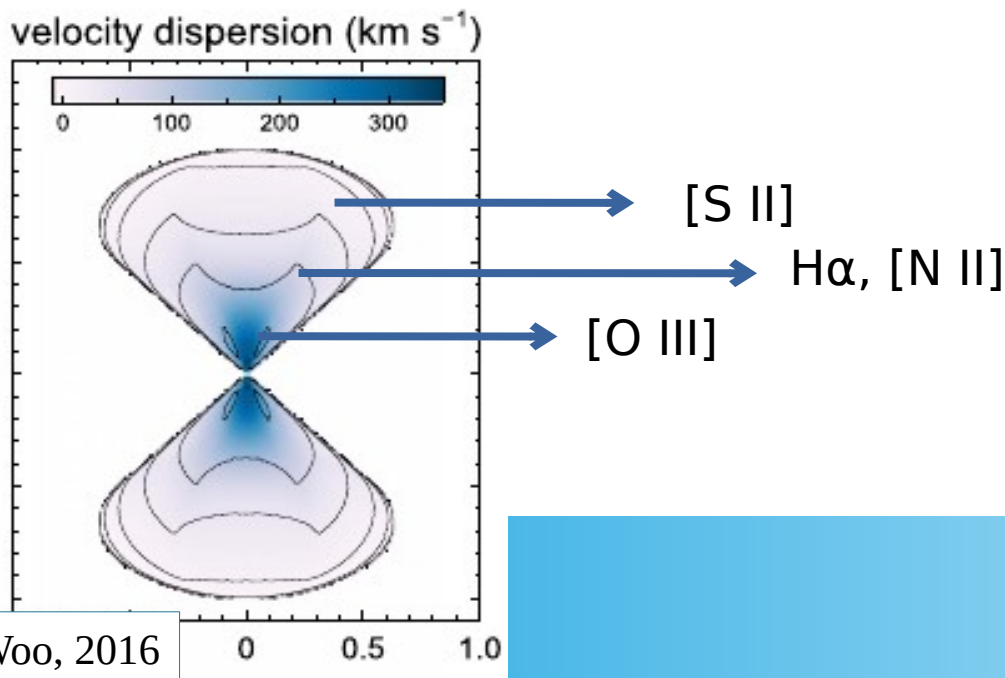
# 9. Результати: потпис outflow-а крoз АГJ спектр



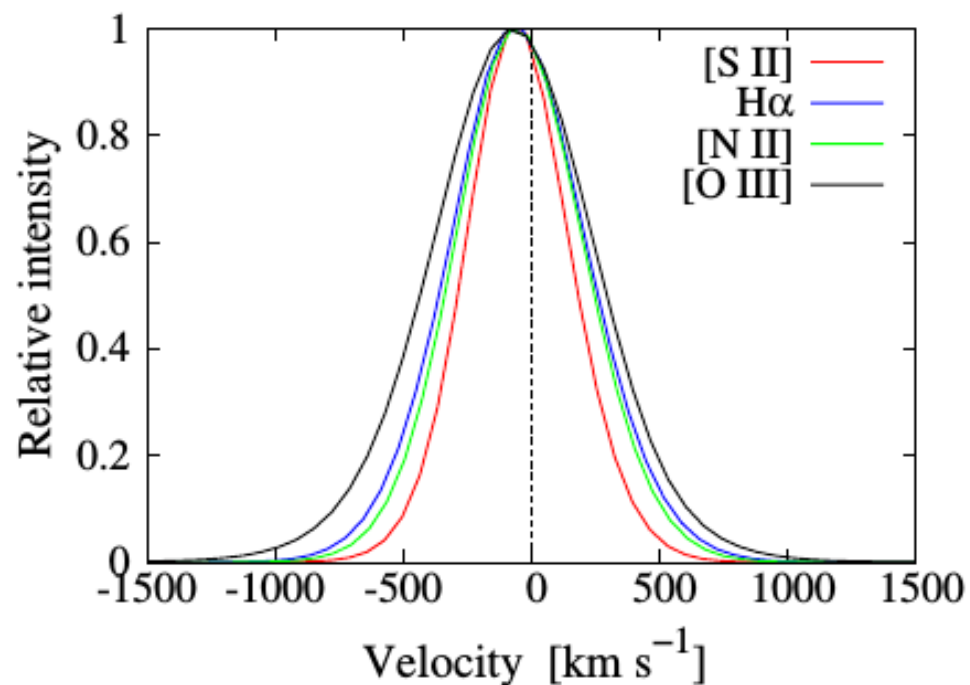
# 9. Резултати: потпис outflow-a кроз АГЈ спектар

- Кинематика outflow-a се рефлектује различитом јачином на профиле различитих линија.

Biconical model (Bae & Woo, 2016) предвиђа да брзина outflow-a највише утиче на ширину outflow компоненти. Разлика у ширинама средњих профила outflow компоненти различитих линија указује да оне потичу из различитих делова outflow-a.



средњи профили outflow компоненти

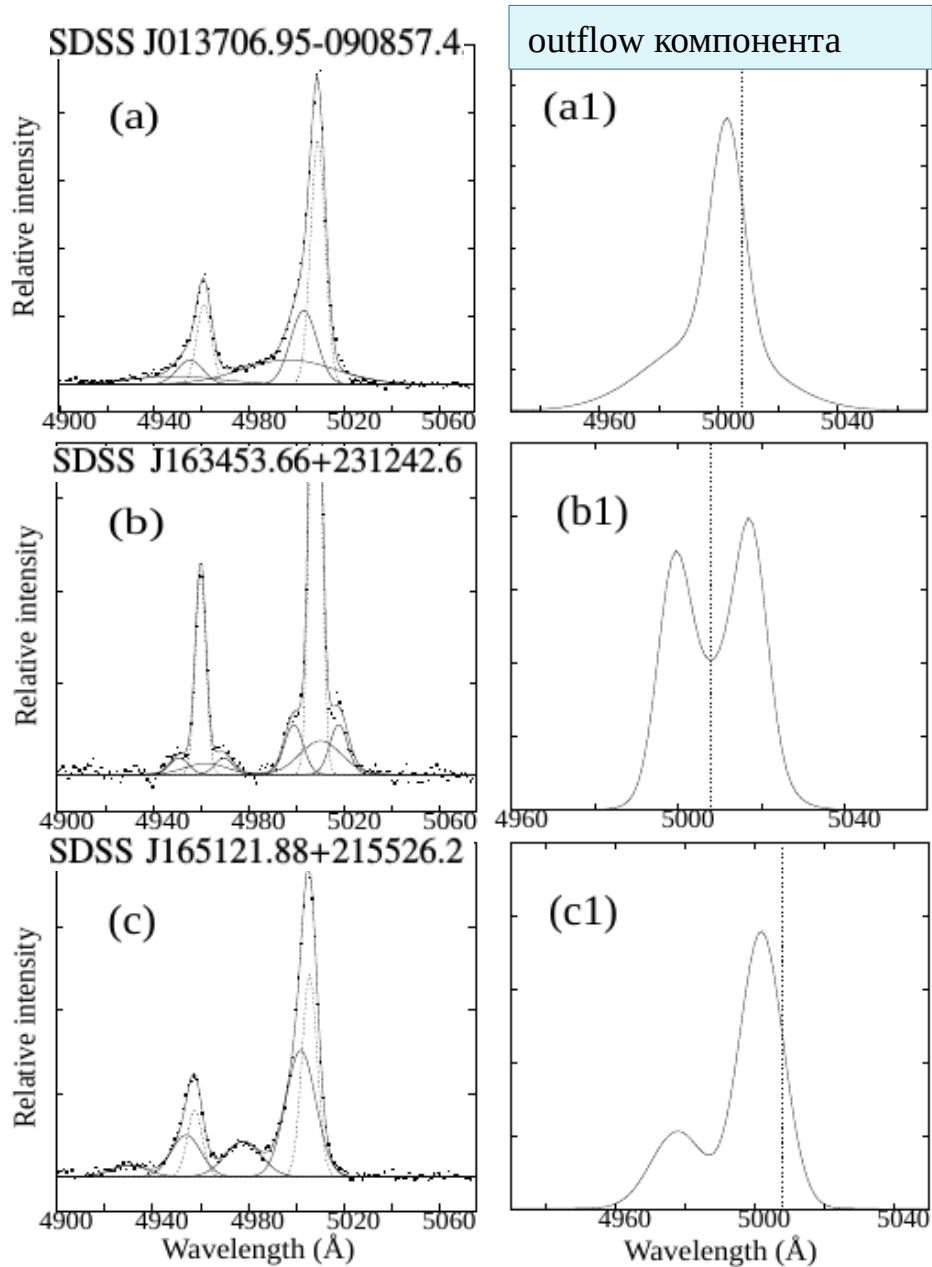


	$n_c$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$E_i$ (eV)
[O III]	$7 \times 10^5$	48.7
[N II]	$8.7 \times 10^4$	14.5
[S II]	$\sim 10^3$	10.4

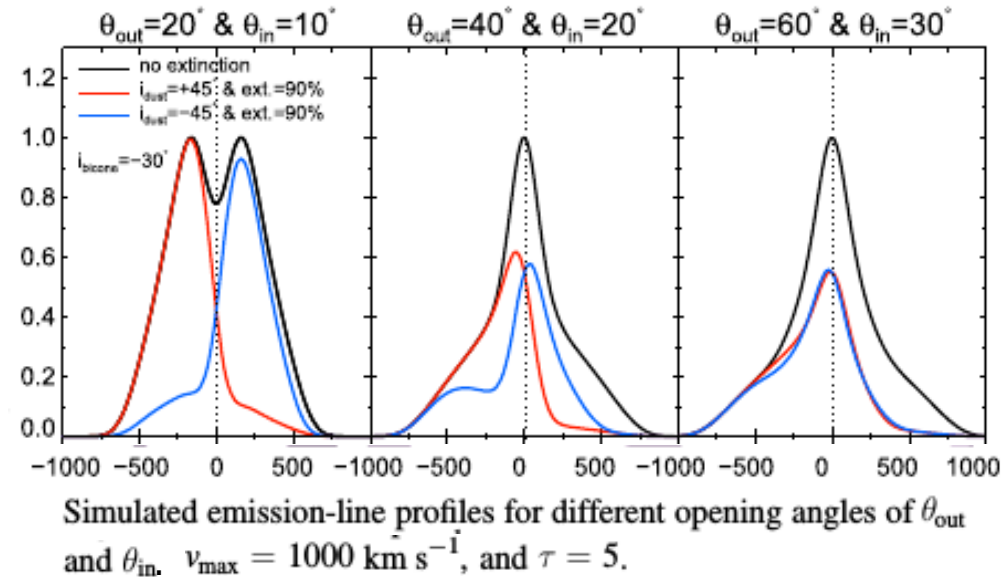


# 10. Резултати: комплексни облици outflow компоненти

☐ 2% нашег узорка



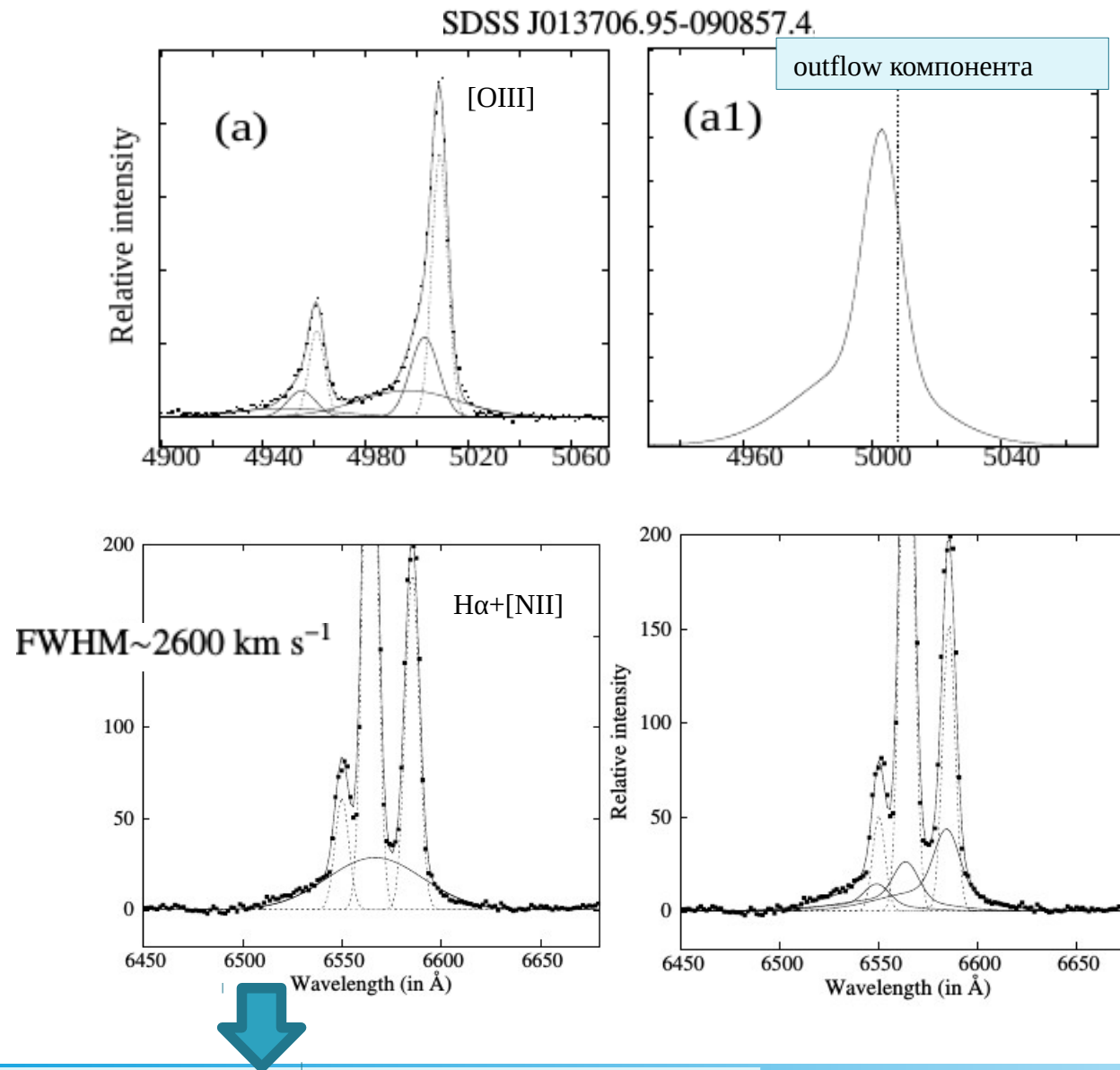
Biconical outflow model (Bae & Woo, 2016)



Зашто само 2%?

- ниска резолуција SDSS спектара? ( $R=1850 - 2200$ )
- микротурбуленција? (нпр. услед Rayleigh-Taylor или Kelvin-Helmholtz нестабилности, ВИДИ Kraemer et al. 2007)

# 10. Резултати: комплексни облици outflow компоненти



Greene & Ho 2007, Oh et al. 2015, Liu et al. 2019

# 11. Закључци

- Компоненте крила свих анализираних линија осликавају кинематику outflow-а. Компоненте језгра  $H\alpha$ ,  $[N II]$  и  $[S II]$  осликавају доминантно гравитациону кинематику, док у случају  $[OIII]$  и  $H\beta$ , компоненте језгра садрже допринос и од гравитационо везаног гаса и од outflow-а.
- Кинематика outflow-а системски утиче на све разматране линије у АГЈ спектрима ( $H\beta$ ,  $[O III]$ ,  $H\alpha$ ,  $[NII]$ ,  $[S II]$ ). Међутим, осликава се различитом јачином на њиховим профилима, у виду различитих ширина компоненти крила.
- Разлике у ширинама компоненти крила говоре о различитом месту настанка тих линија у структури outflow-а, тј. о стратификацији outflow емисионог региона.
- Физички исправна декомпозиција преклопљених линија  $H\alpha+[NII]$  је важна не само за истраживање доприноса outflow-а у овим линијама, већ и за исправну процену  $M_{BH}$  коришћењем широке  $H\alpha$  линије.

***ХВАЛА НА ПАЖЊИ!***