

САО РАН, 7-11 октября 2019, “Современная звездная астрономия”

**УЛЬТРАЯРКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ  
ИСТОЧНИКИ В МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ  
СКОПЛЕНИЯХ В ГАЛАКТИКЕ NGC 3256**

УСКОВ Г.С. (ИКИ РАН)

ФАБРИКА С.Н. (САО РАН, КФУ)

ВАЛЕЕВ А.Ф. (САО РАН)

ВИНОКУРОВ А.С. (САО РАН)

# ULX (Ultraluminous X-ray Source)

- Рентгеновские светимости  $10^{39}$ – $10^{41}$  эрг/с.  
(H. Feng and R. Soria, *New Astronomy Reviews* **55**, 166 (2011))
- Черная дыра звездных масс ( $L > L_{\text{edd}}$ )  
Для диска Шакуры-Сюняева
- Черная дыра промежуточных масс ( $10^3$ – $10^5 M_{\text{sun}}$ )  
Могут формироваться в молодых звездных скоплениях  
Не могут покинуть звездные скопления

Monthly Notices

of the  
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **432**, 506–519 (2013)  
Advance Access publication 2013 April 17

doi:10.1093/mnras/stt487



## On the association of the ultraluminous X-ray sources in the Antennae galaxies with young stellar clusters<sup>★</sup>

Juri Poutanen,<sup>1†</sup> Sergei Fabrika,<sup>2</sup> Azamat F. Valeev,<sup>2</sup> Olga Sholukhova<sup>2</sup>  
and Jochen Greiner<sup>3</sup>

# Задачи

Основная:

- Определить возрасты звёздных скоплений по оптическим спектрам и цветам

Дополнительная:

- Определить рентгеновские характеристики ULXs: переменность, светимость и жесткость

# NGC 3256



# Обработка данных телескопа Chandra

OBSID	Year	Exp. (ks)
835	2000	27.8
3569	2003	27.2
16026	2014	15.4

## Комбинирование снимков

- 1.5–10 кэВ merge\_obs

## Расчет потоков от источников

- Модель  $A(E) = k E^{-\Gamma} \times e^{-N_H \sigma(E)}$
- $N_H = 9.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ;  $\Gamma = 2.0$
- $R=1.5 \text{ PSF}$
- 0.5 – 7.0 кэВ srcflux

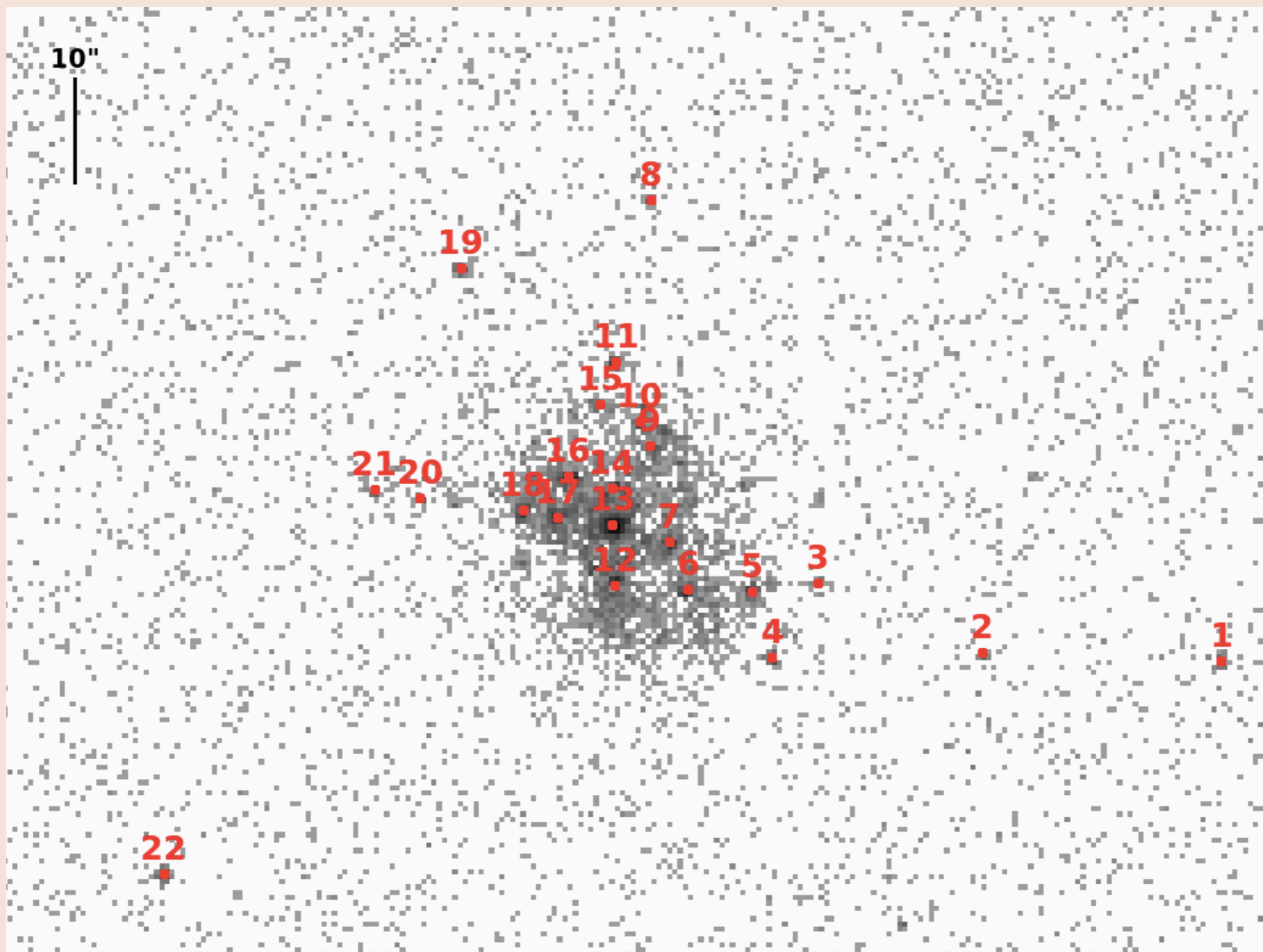
## Детектирование источников

- 1.5–10 кэВ
- $p < 10^{-6}$
- $\text{scales} = 2^{0.5i} \text{ arcsec}$ ,  $i=1..8$
- 26 источников wavdetect

## Фильтрация ULX

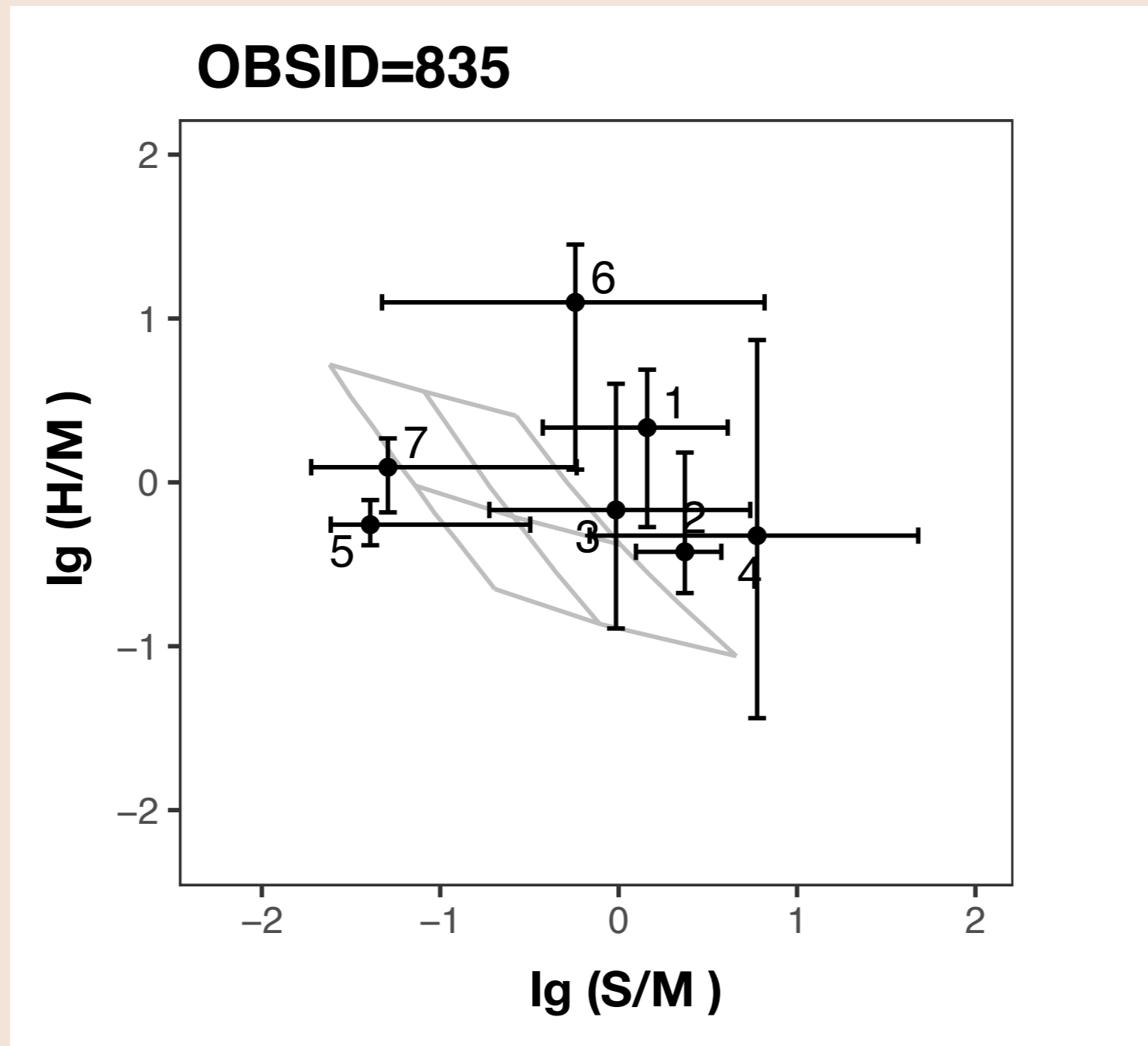
- $D=37.6 \text{ МПк}$  (English et al., 2003)
- 22 источника

# 22 ULX на рентгеновском изображении



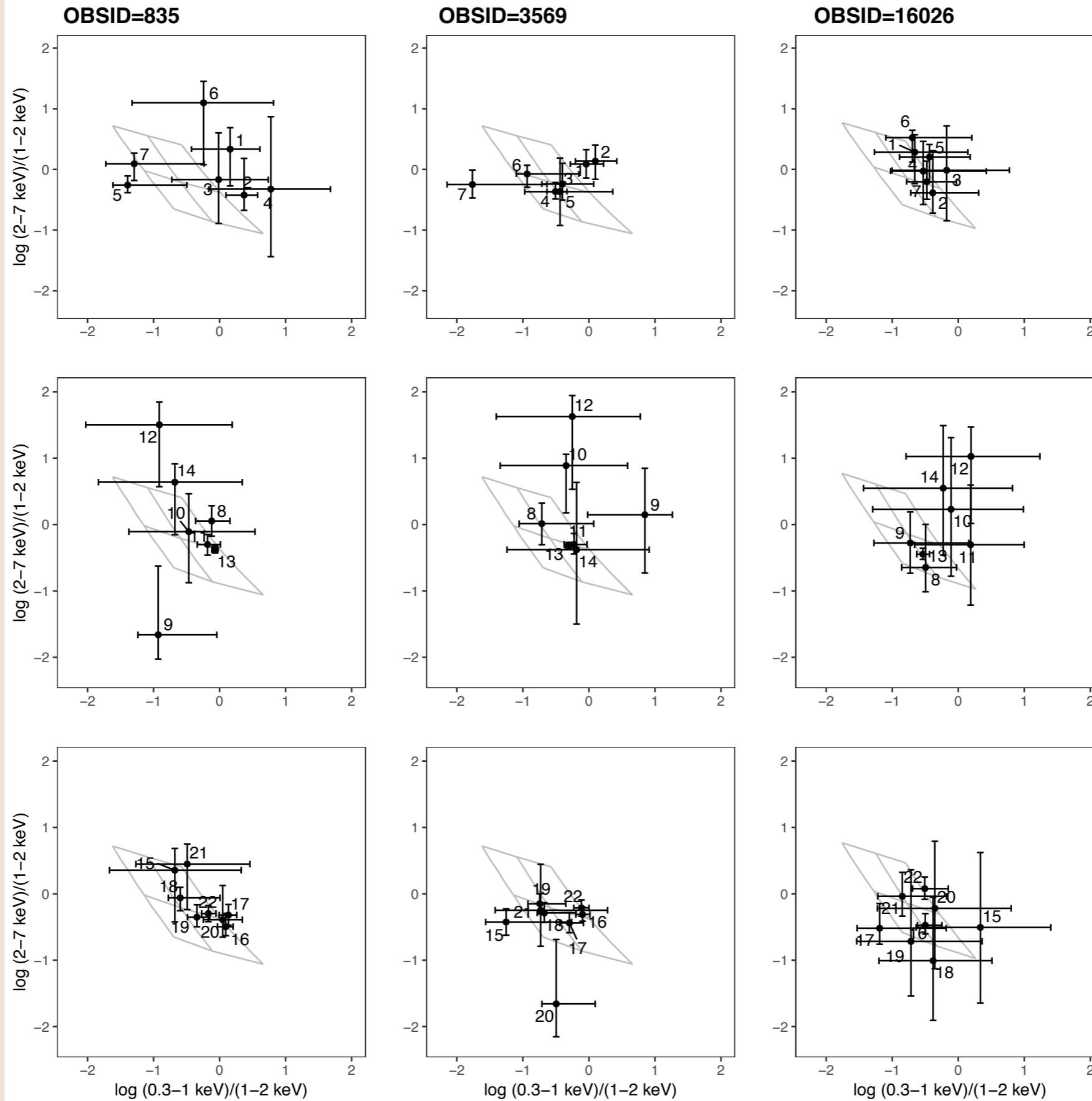
Chandra/ACIS-S, 1.5-10keV, NGC 3256

# Диаграмма жесткости ULXs



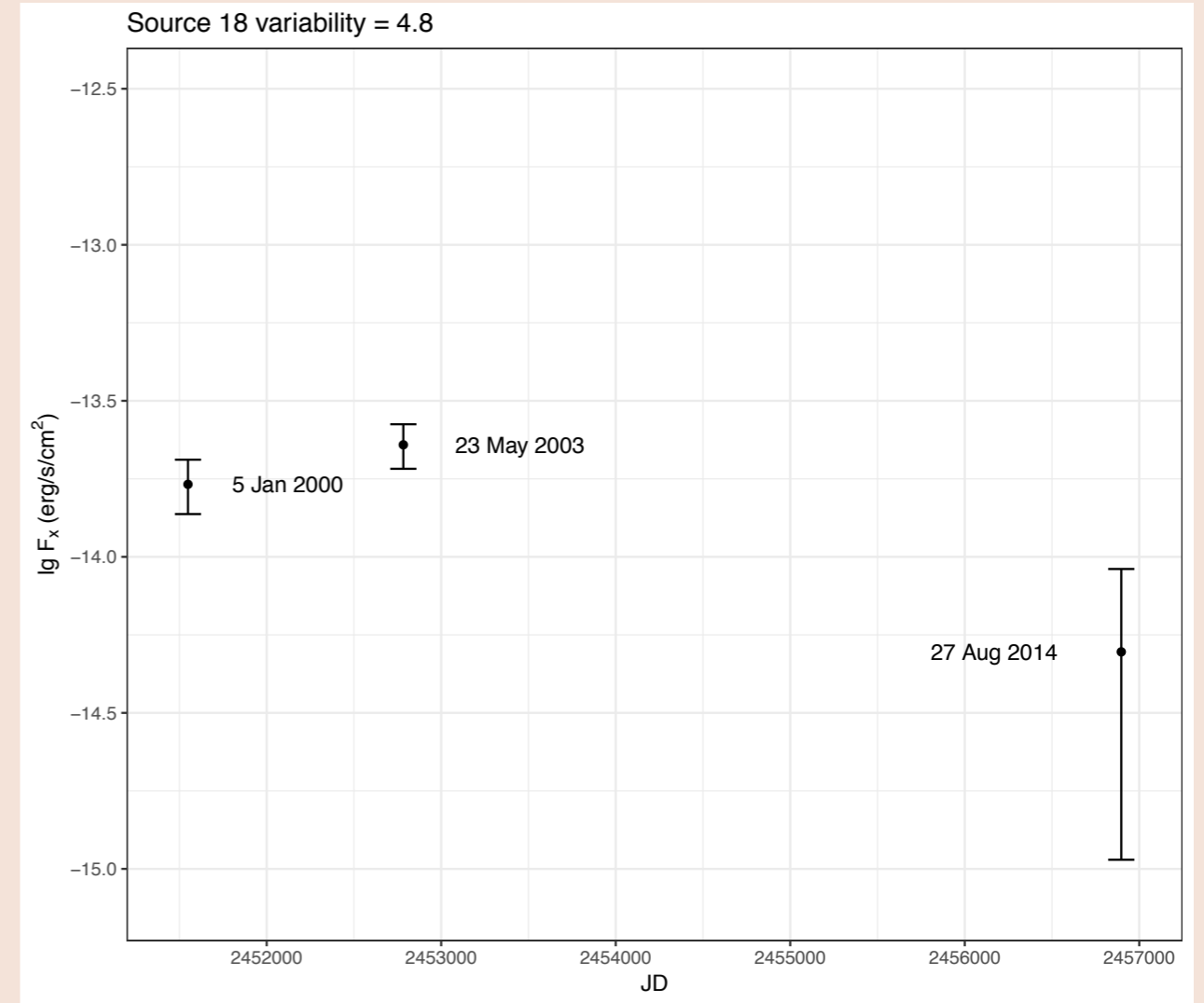
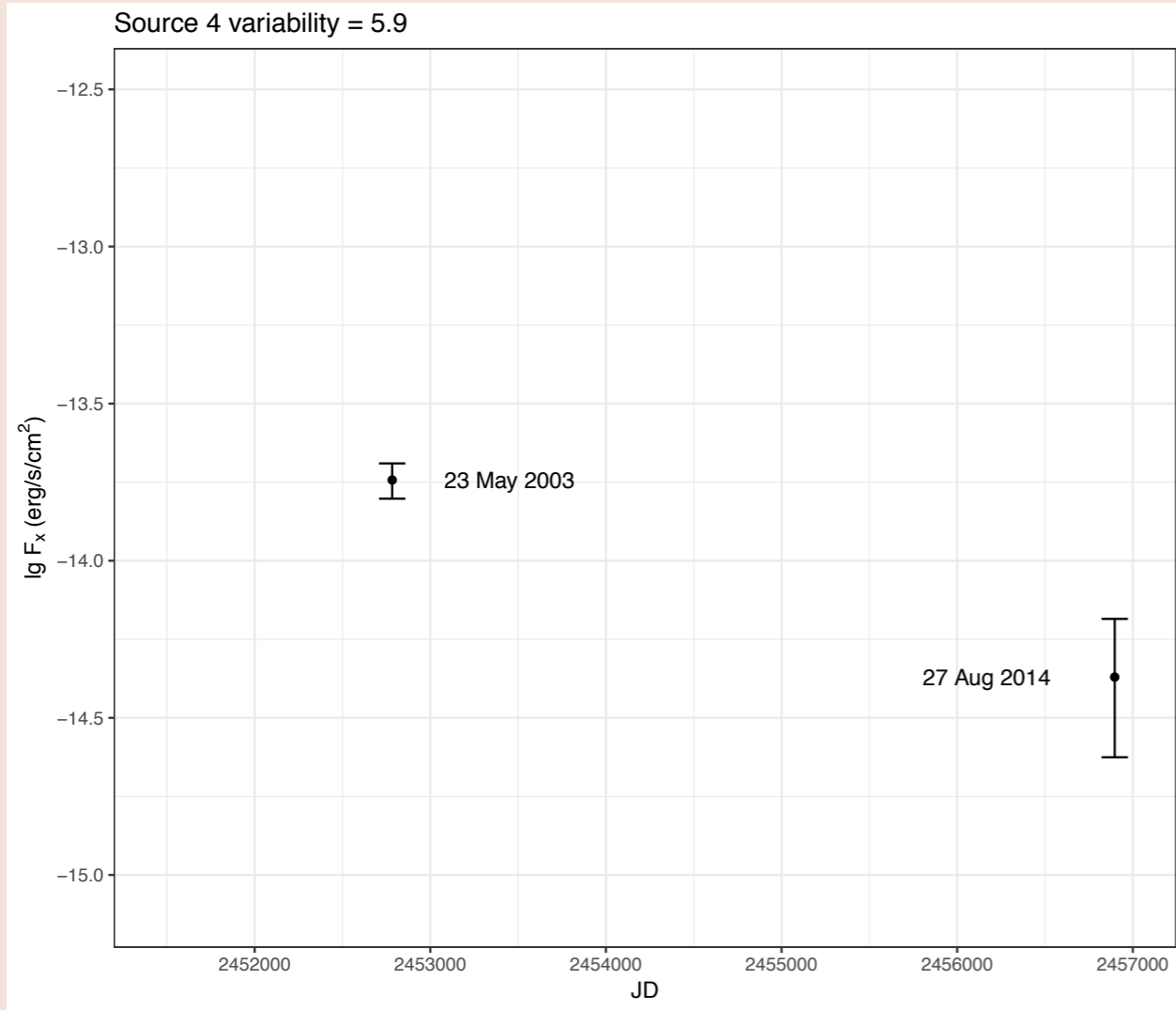
$S = (0.3 - 1) \text{ кэВ}; M = (1 - 2) \text{ кэВ}; H = (2 - 7) \text{ кэВ}$

# Диаграмма жесткости ULXs

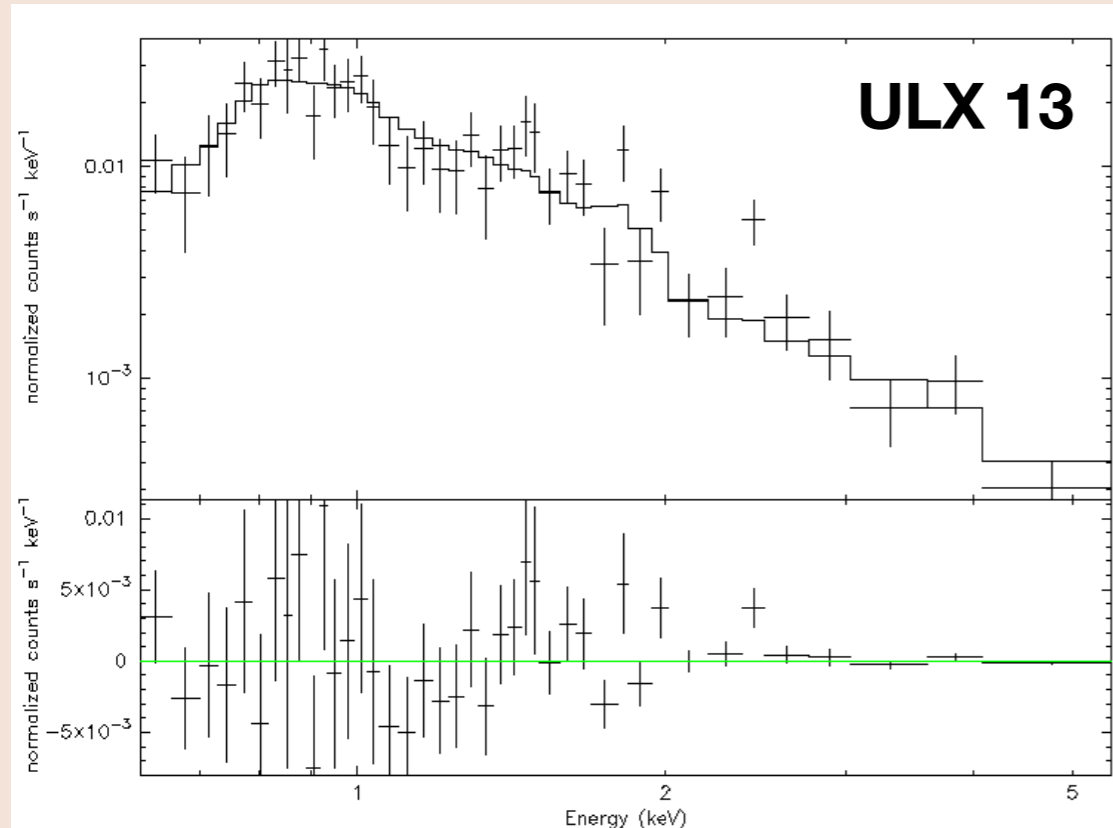
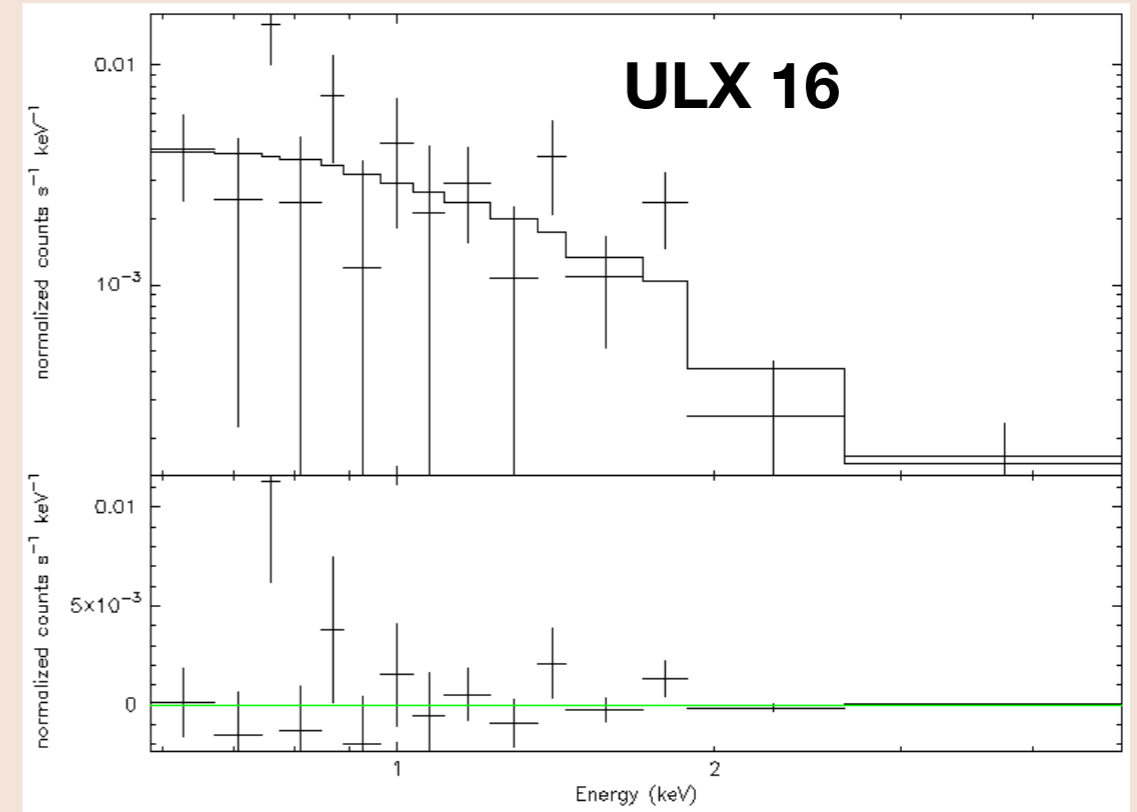
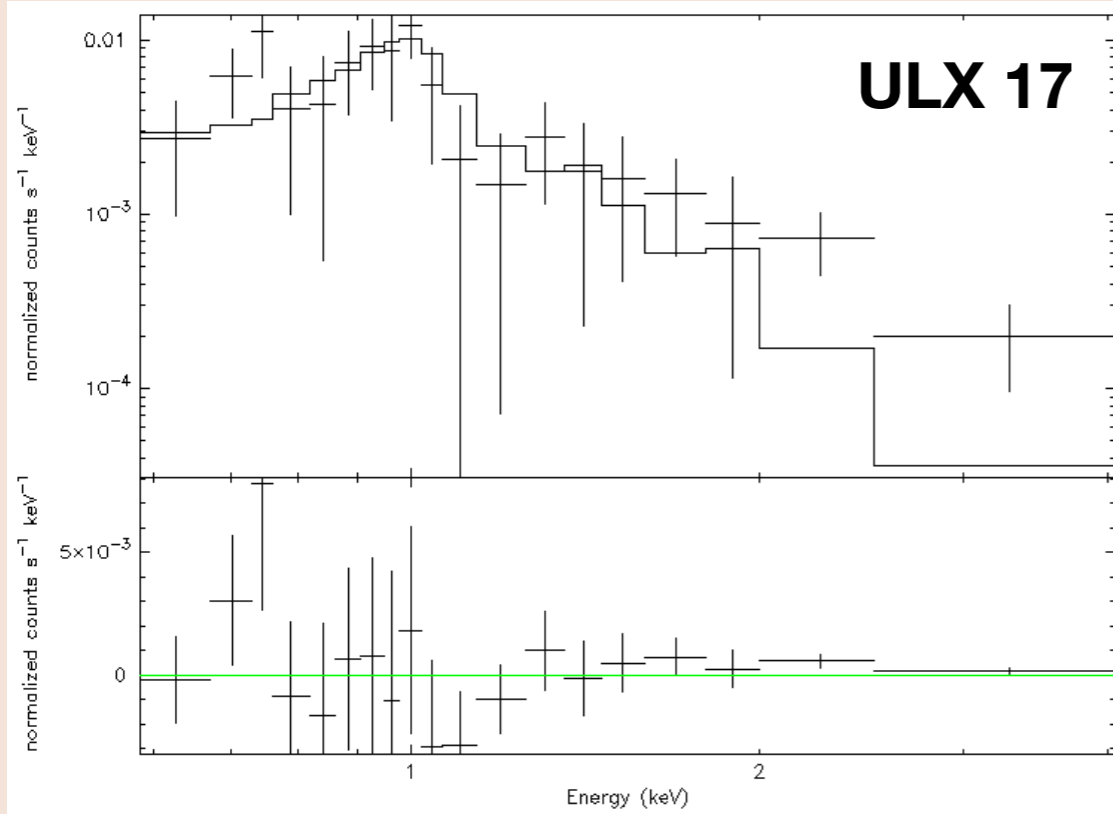




# Переменность ULX

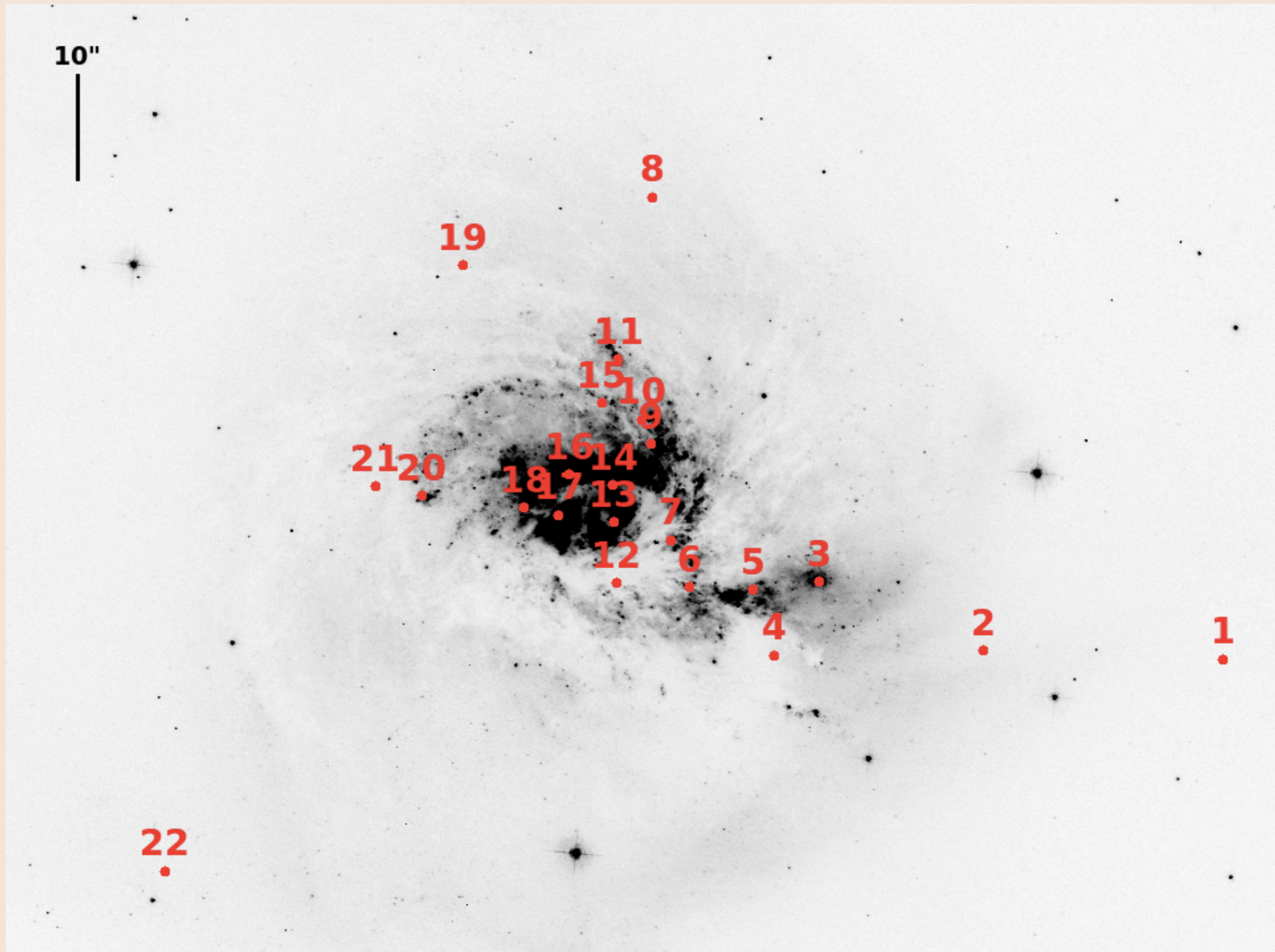


# Рентгеновские спектры ULX



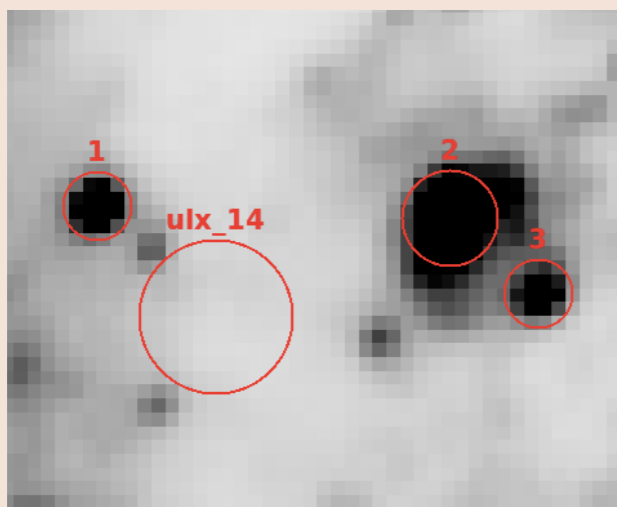
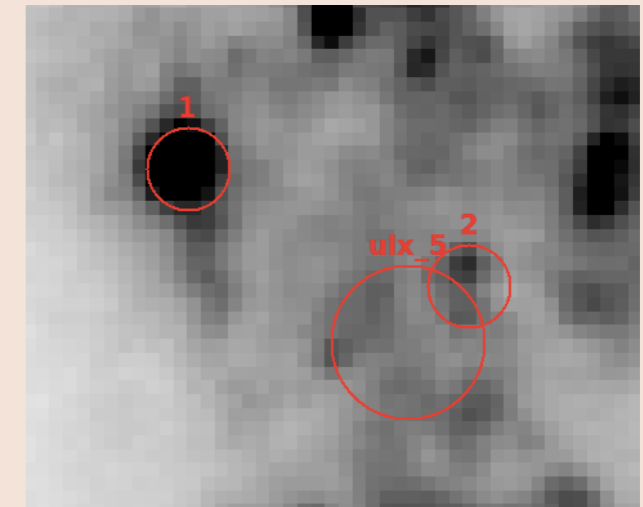
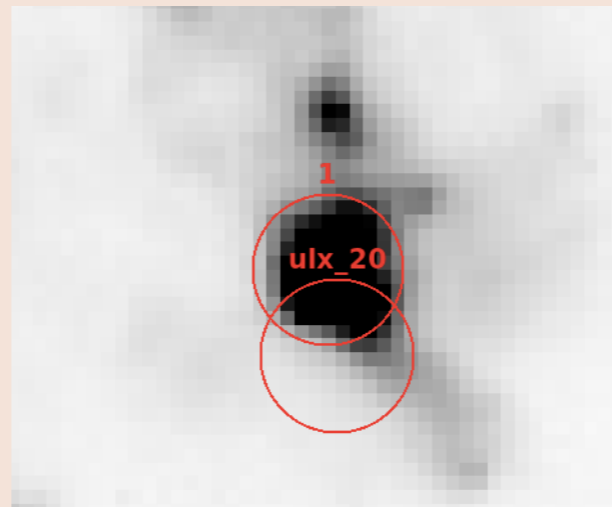
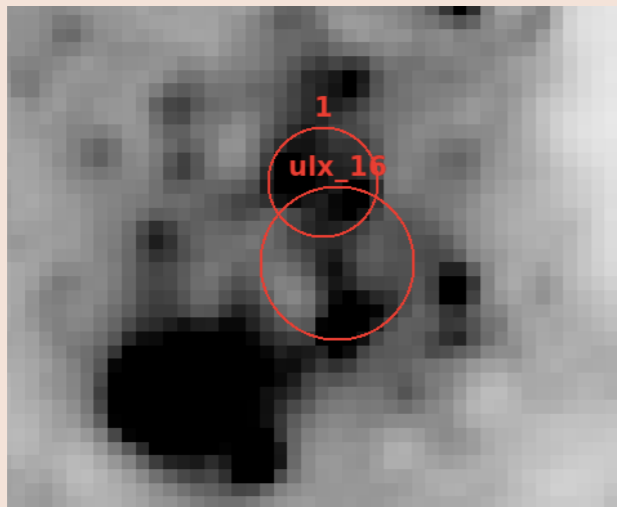
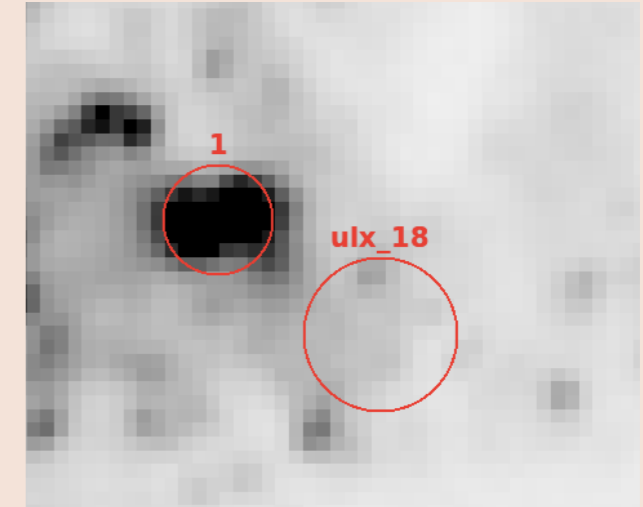
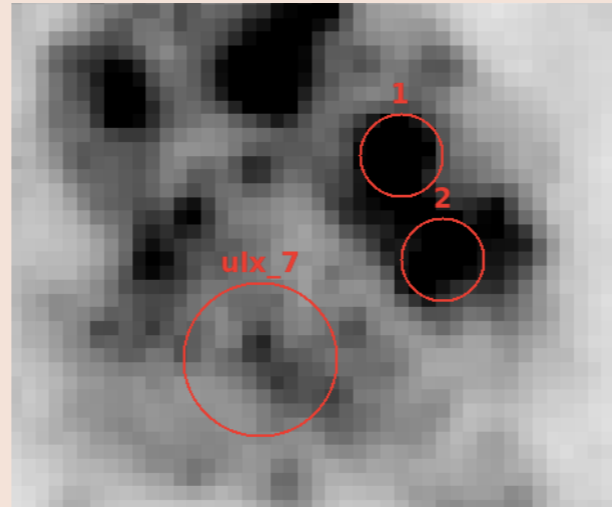
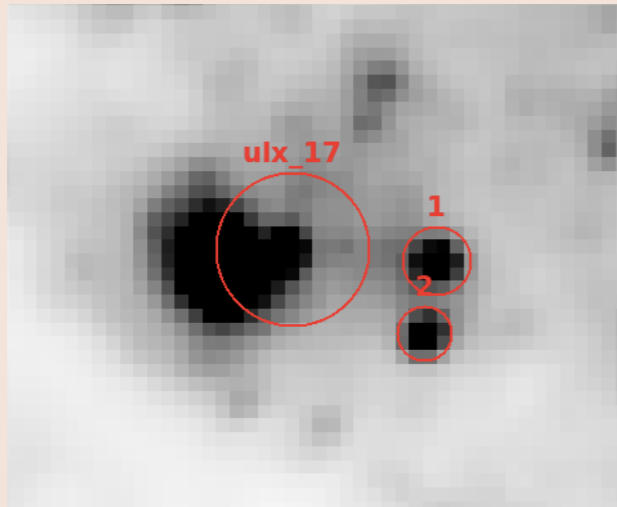
Source ID	PO			PO+RS				RS		
	$\Gamma$	$N_H$	$\chi^2_\nu(dof)$	$\Gamma$	$N_H$	kT (keV)	$\chi^2_\nu(dof)$	$N_H$	kT (keV)	$\chi^2_\nu(dof)$
13	2.2–2.9	0.17–0.35	1.490 (38)	1.7–2.5	0.16–0.42	0.6–0.9	1.095 (36)			
16	1.4–3.3	0–0.34	1.086 (12)							
17								0–0.7	0.8–1.3	0.941 (16)

# 22 ULX на оптическом изображении



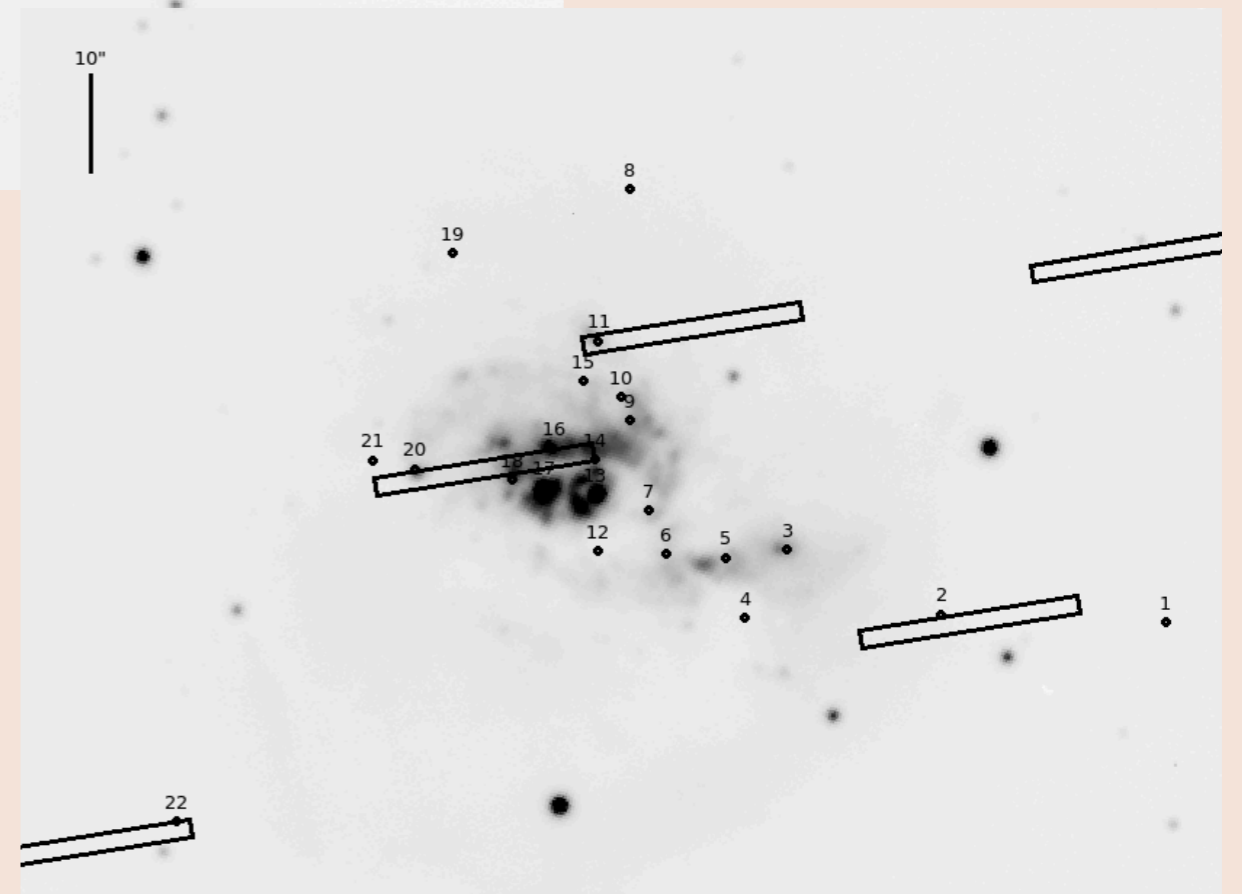
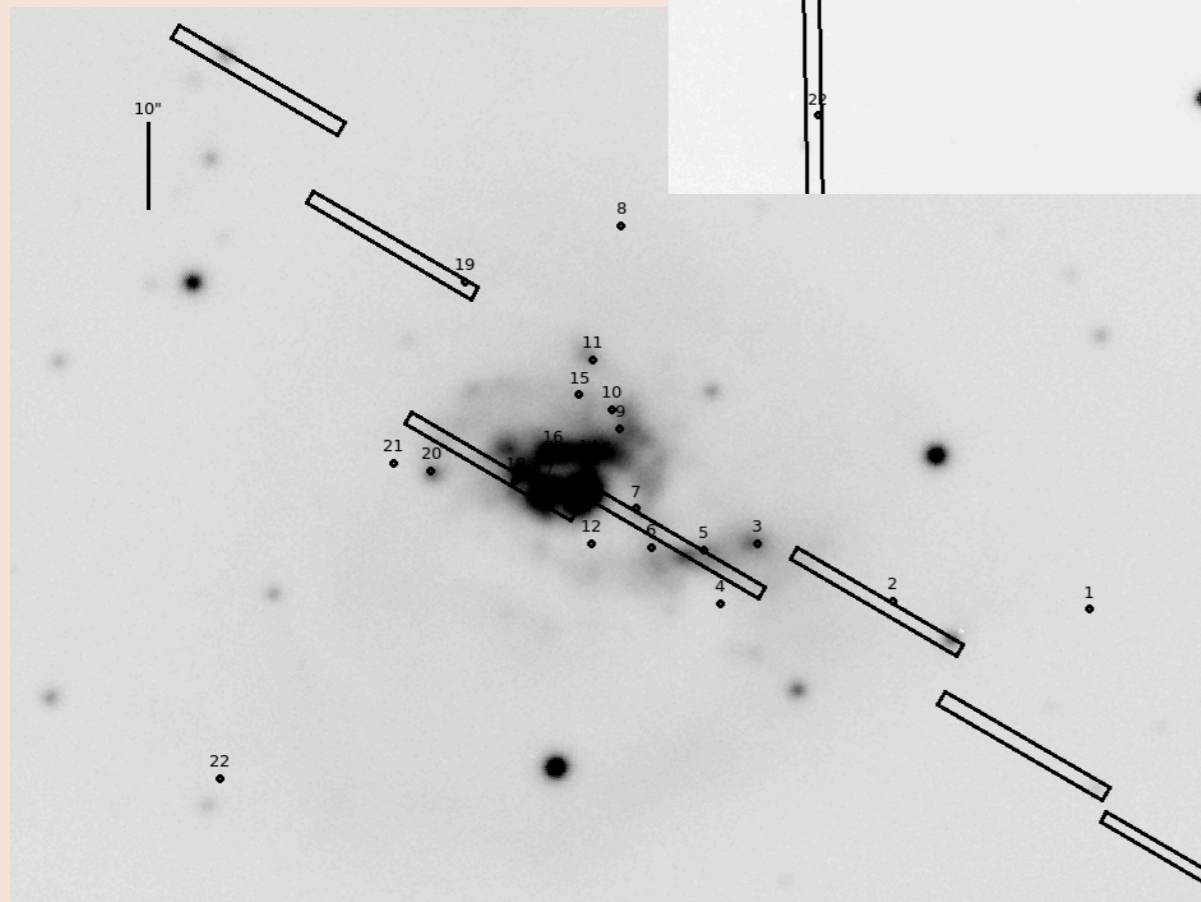
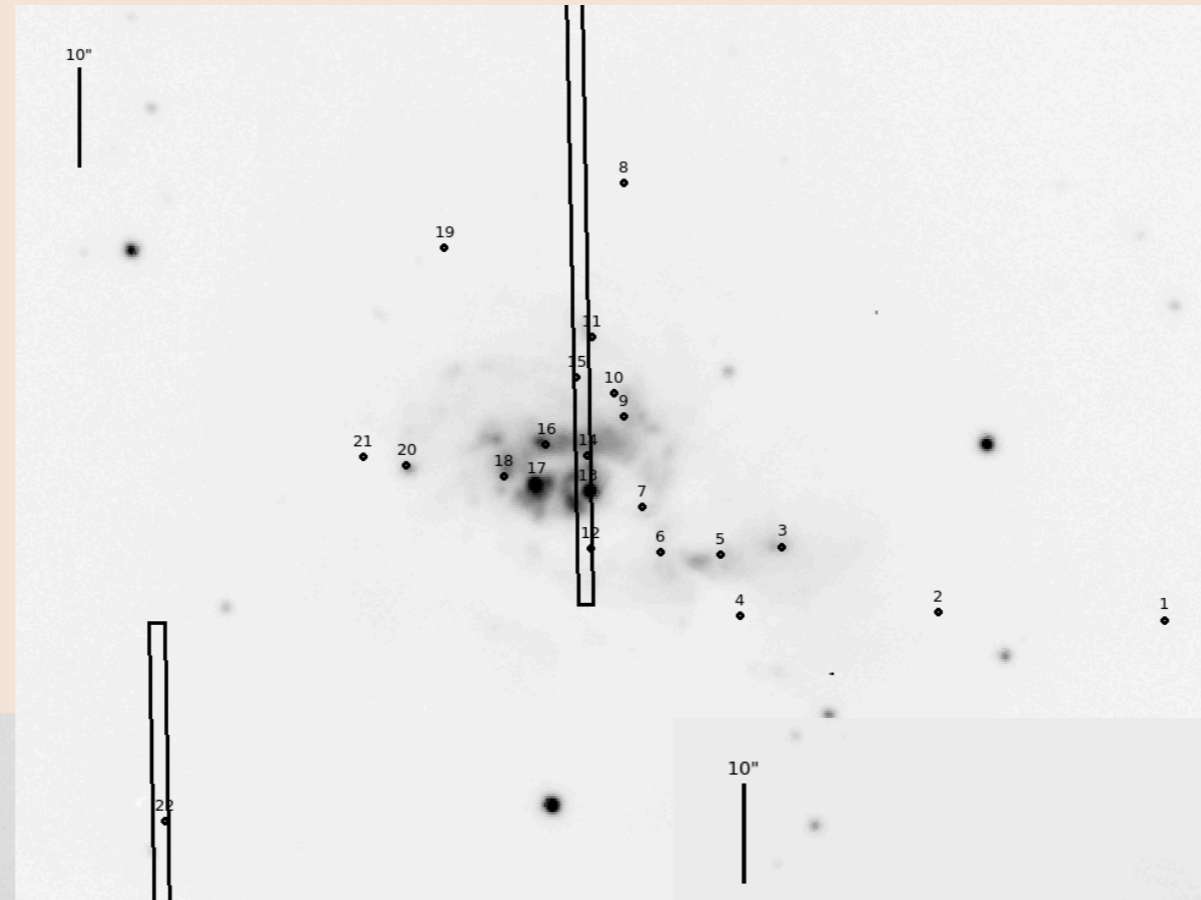
HST/ACS WFC, NGC 3256

# Отмеченные скопления на HST



HST/ACS WFC, NGC 3256

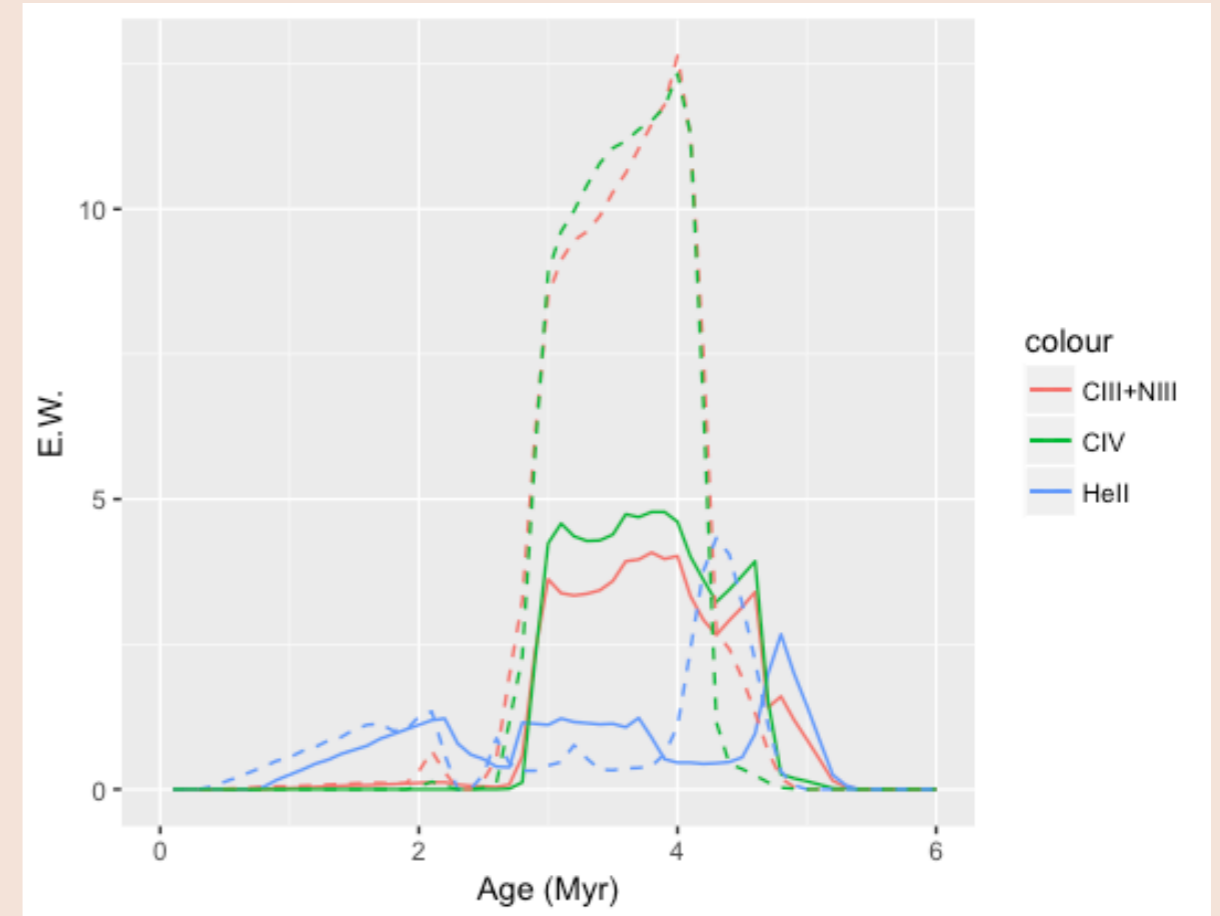
# Конфигурация щелей FORS2



FORS2 VLT ESO, NGC 3256

# Возрасты скоплений

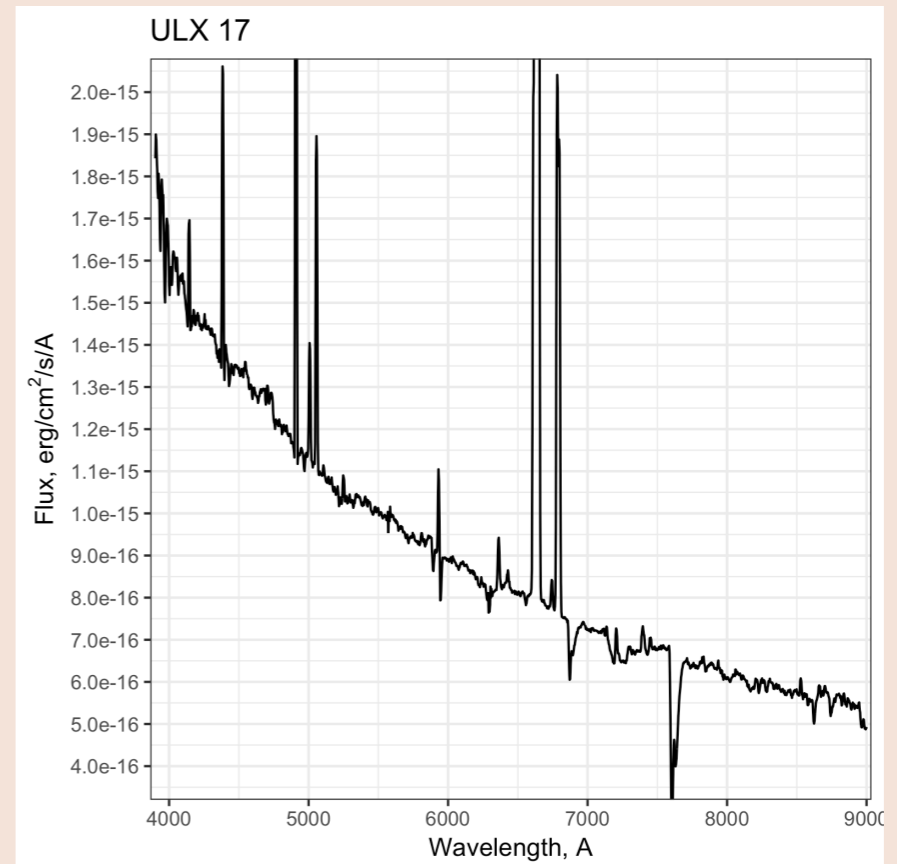
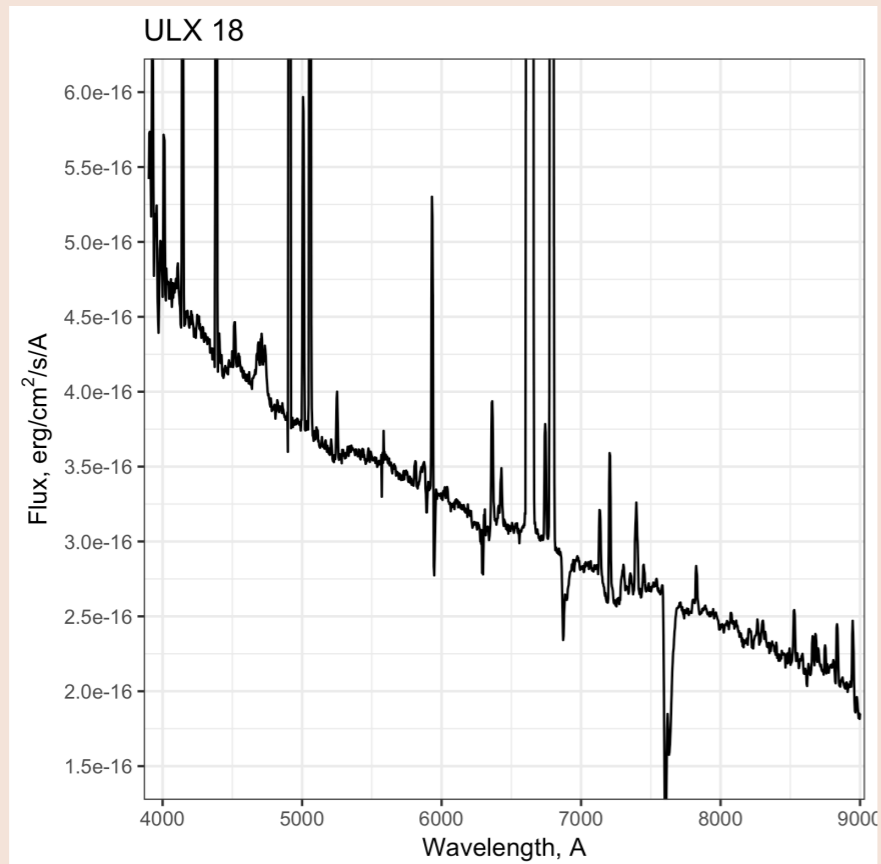
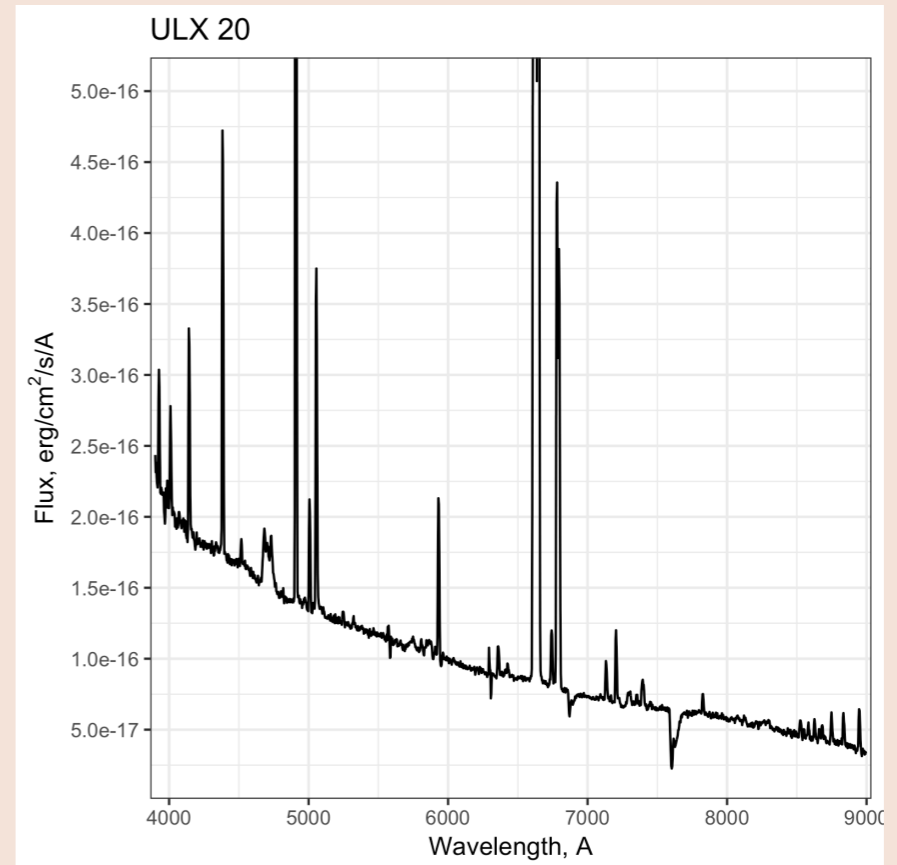
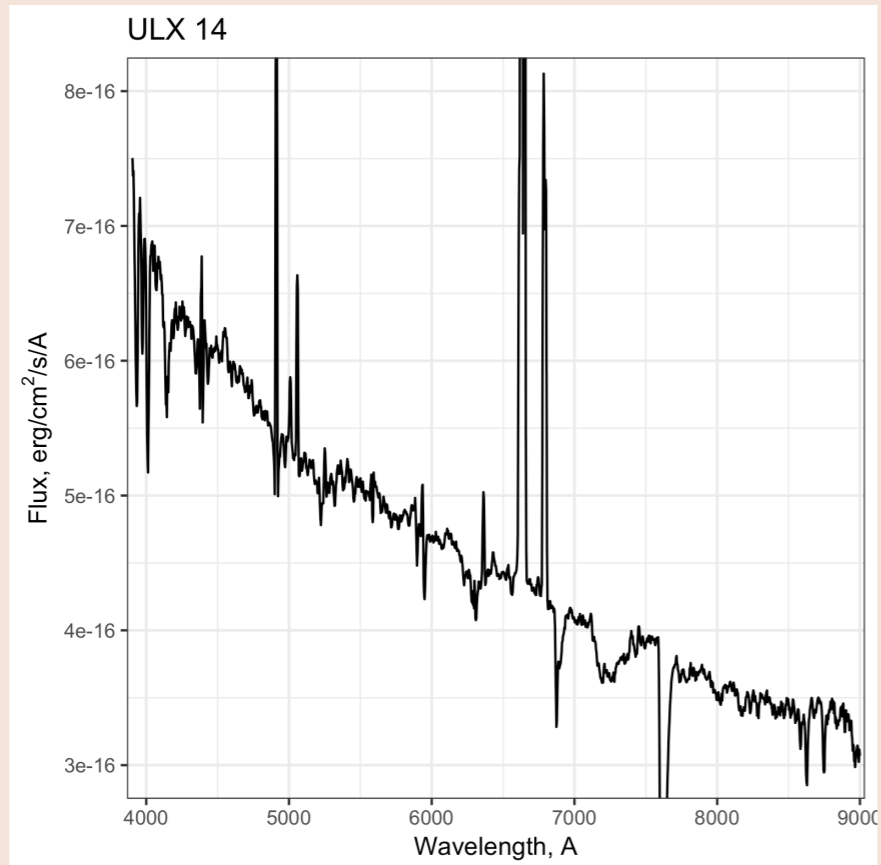
- Starburst99 – модели скоплений
- Возраст по E.W. WR Lines
- Возраст по цветам



Зависимости E.W. WR-линий от возраста скоплений, полученные с помощью Starburst99

- $10^6 M_{\text{Sun}}$
- $\text{IMF}=1.3, 2.3$  (Kroupa)
- Geneva 1994 эволюционные треки звезд
- $1Z_{\text{Sun}}$  (0.02) и  $2Z_{\text{Sun}}$  (0.04)

# Оптические спектры скоплений



# Возраст скопления = возраст ULX

Src	CIII+NIII+HeII (Myr)	CIV 5808 (Myr)	Photometry (Myr)
5			1–6
7			2–6
13	3–5		
14		2.5–4.5	1–6
16			1–6
17	2.5–5	2.5–4.5	1–5
18	2.5–4.5	2.5–4.5	1–5
20	2.5–4.5	2.5–4.5	1–6



# Заключение

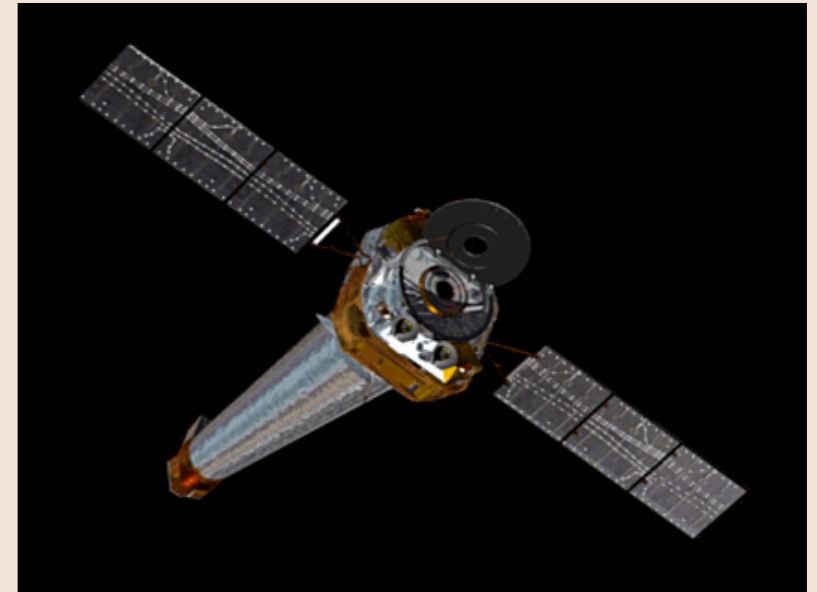
- Были задетектированы 22 ULXs
- Получены жесткости ULXs
- 13 из 22 ULXs показывают переменность
- Аппроксимированы рентгеновские спектры
- Определены возрасты звездных скоплений по оптическим спектрам и по фотометрии с HST
- Возраст ULXs < 6 млн. лет

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

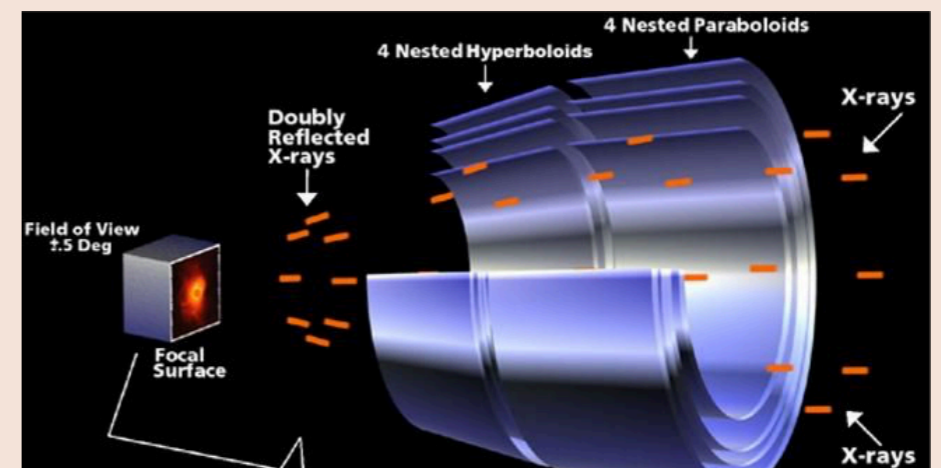
**ДОП. СЛАЙДЫ**

# Космическая обсерватория Chandra

- Детектор ACIS-S
- 0.3–10 keV
- FOV 8.3'x8.3'
- PSF 0.5" (on-axis)



- Система Вольтера-I



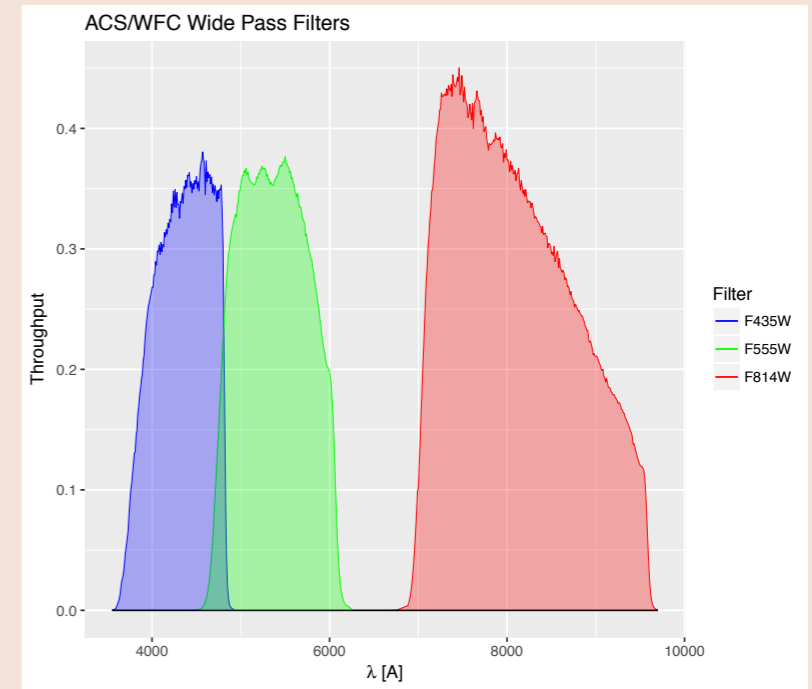
# Оптические наблюдения

## Hubble Space Telescope (HST)

- Детектор ACS
- FOV 3.3'x3.3'
- 0.05"/pix
- F435W, F555W, F814W

## ESO VLT/FORS2 MOS

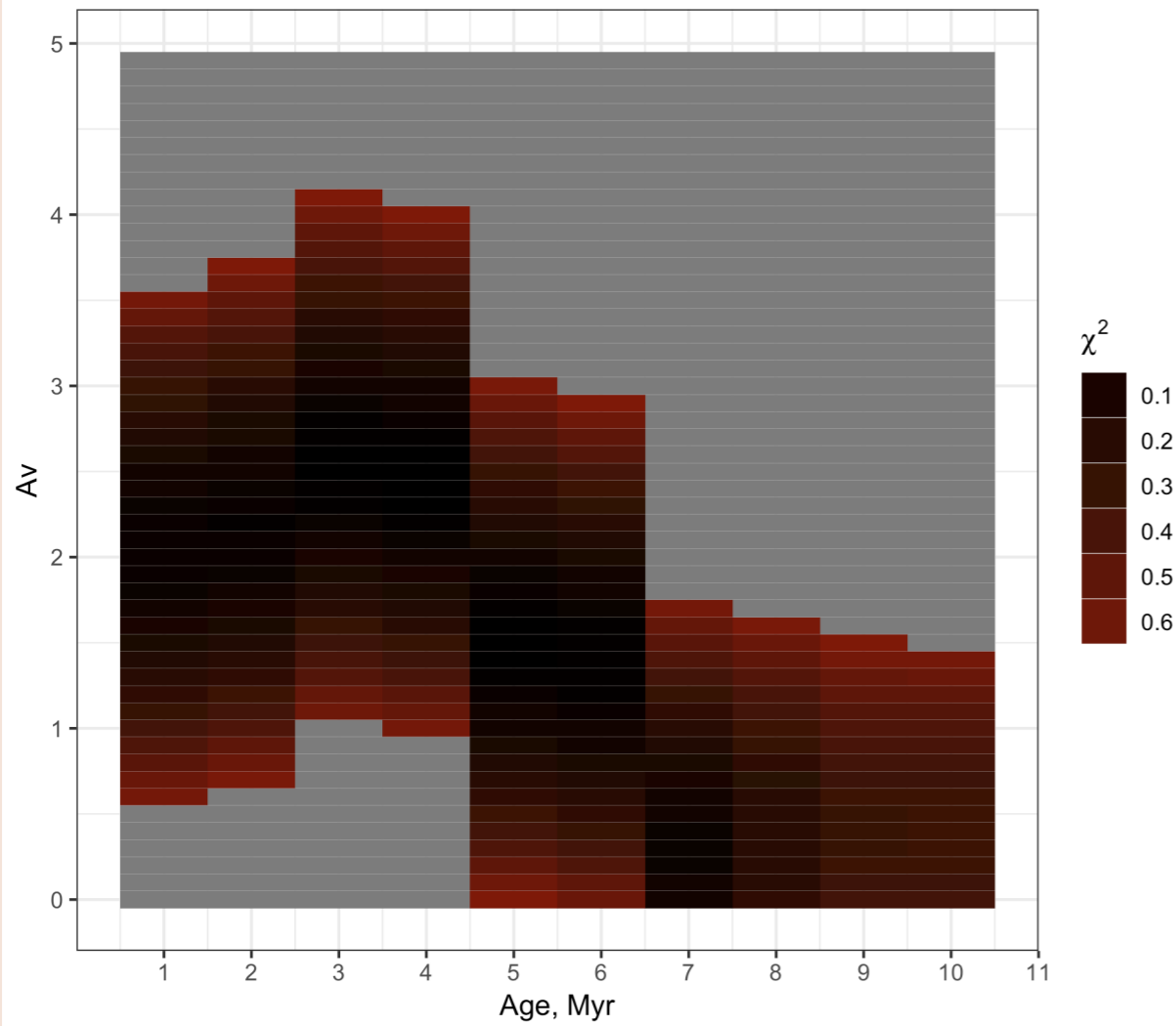
- FOV 6.83'x6.83'
- 3650 Å – 9220 Å
- R = 440 (5900 Å)
- 0.25"/pix



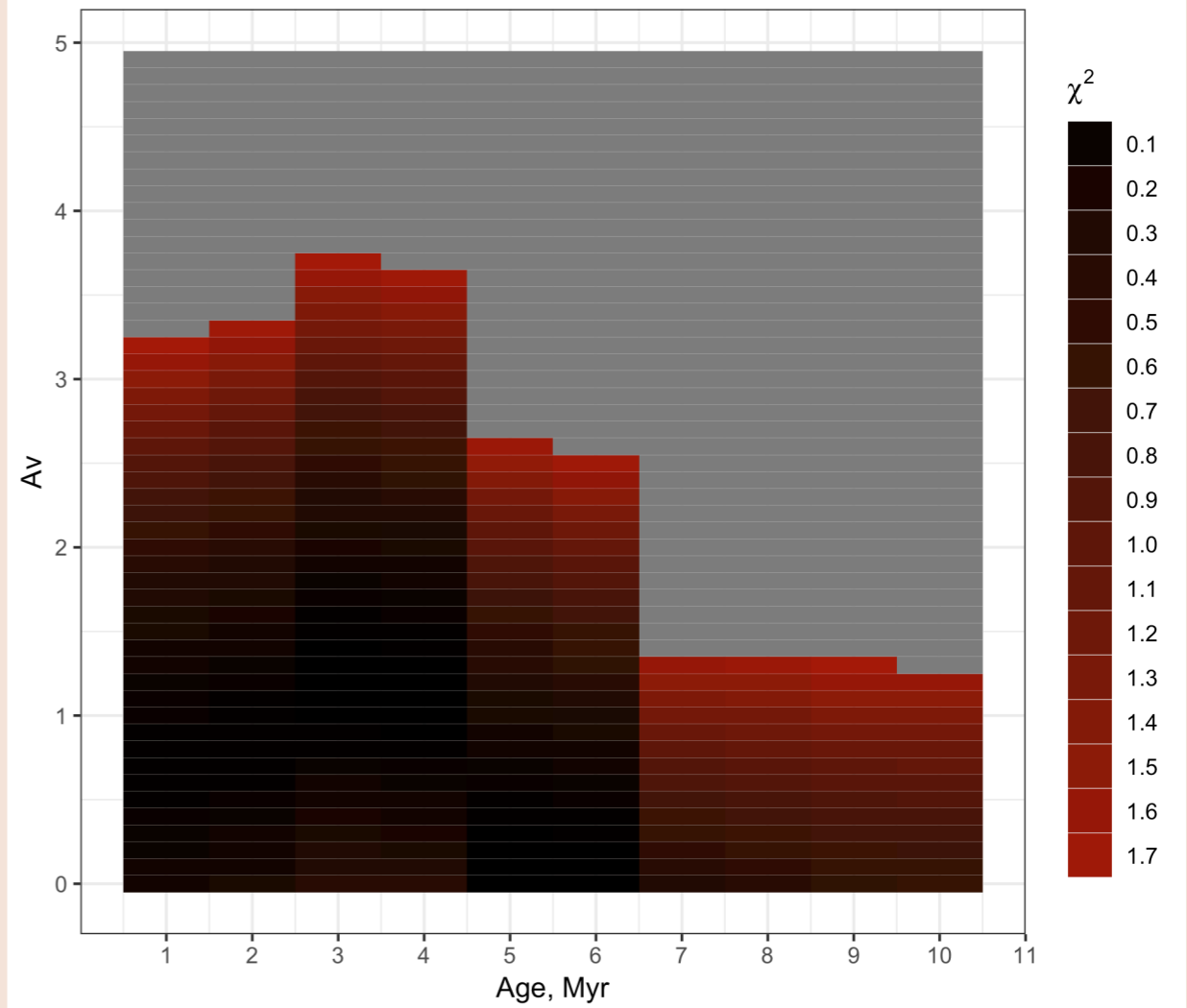
Кривые пропускания фильтров F435W, F555W, F814W

# Возрасты скоплений

c7\_1  
Minimum chi: Age = 4 Myr; Av = 2.5



c14\_2  
Minimum chi: Age = 4 Myr; Av = 1.1



# Обработка данных телескопа Chandra

OBSID	Year	Exp. (ks)
835	2000	27.8
3569	2003	27.2
16026	2014	15.4



**Астрометрическая привязка < 0.3"**

$$\begin{pmatrix} \alpha' \\ \delta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$$

wcs\_match



**Комбинирование снимков**

- 1.5–10 кэВ

merge\_obs



**Детектирование источников**

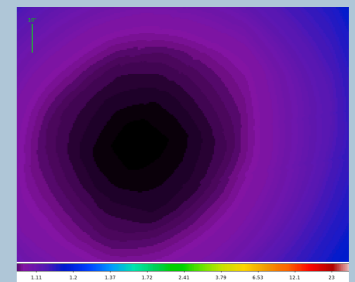
- 1.5–10 кэВ
- $p < 10^{-6}$
- scales =  $2^{0.5i}$  arcsec,  $i=1..8$
- 26 источников wavdetect



**Weighted PSF map**

- 2.0 кэВ, esf=0.9

$$PSFmap = \frac{\sum_{i=1}^3 ExpMap_i \times PSFmap_i}{\sum_{i=1}^3 ExpMap_i}$$



mkpsfmap, dmimgcalc

# Обработка данных телескопа Chandra

OBSID	Year	Exp. (ks)
835	2000	27.8
3569	2003	27.2
16026	2014	15.4



**Астрометрическая привязка < 0.3"**  
$$\begin{pmatrix} \alpha' \\ \delta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$$
  
[wcs\\_match](#)



**Комбинирование снимков**  
• 1.5–10 кэВ  
[merge\\_obs](#)



## Детектирование источников

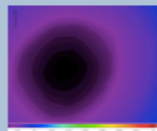
- 1.5–10 кэВ
- $p < 10^{-6}$
- scales =  $2^{0.5i}$  arcsec,  $i=1..8$
- 26 источников [wavdetect](#)



## Weighted PSF map

- 2.0 кэВ, [ecf=0.9](#)

$$PSF_{map} = \frac{\sum_{i=1}^n ExpMap_i \times PSF_{map_i}}{\sum_{i=1}^n ExpMap_i}$$



[mkpsfmap](#), [dmimgcalc](#)

## Расчет потоков от источников

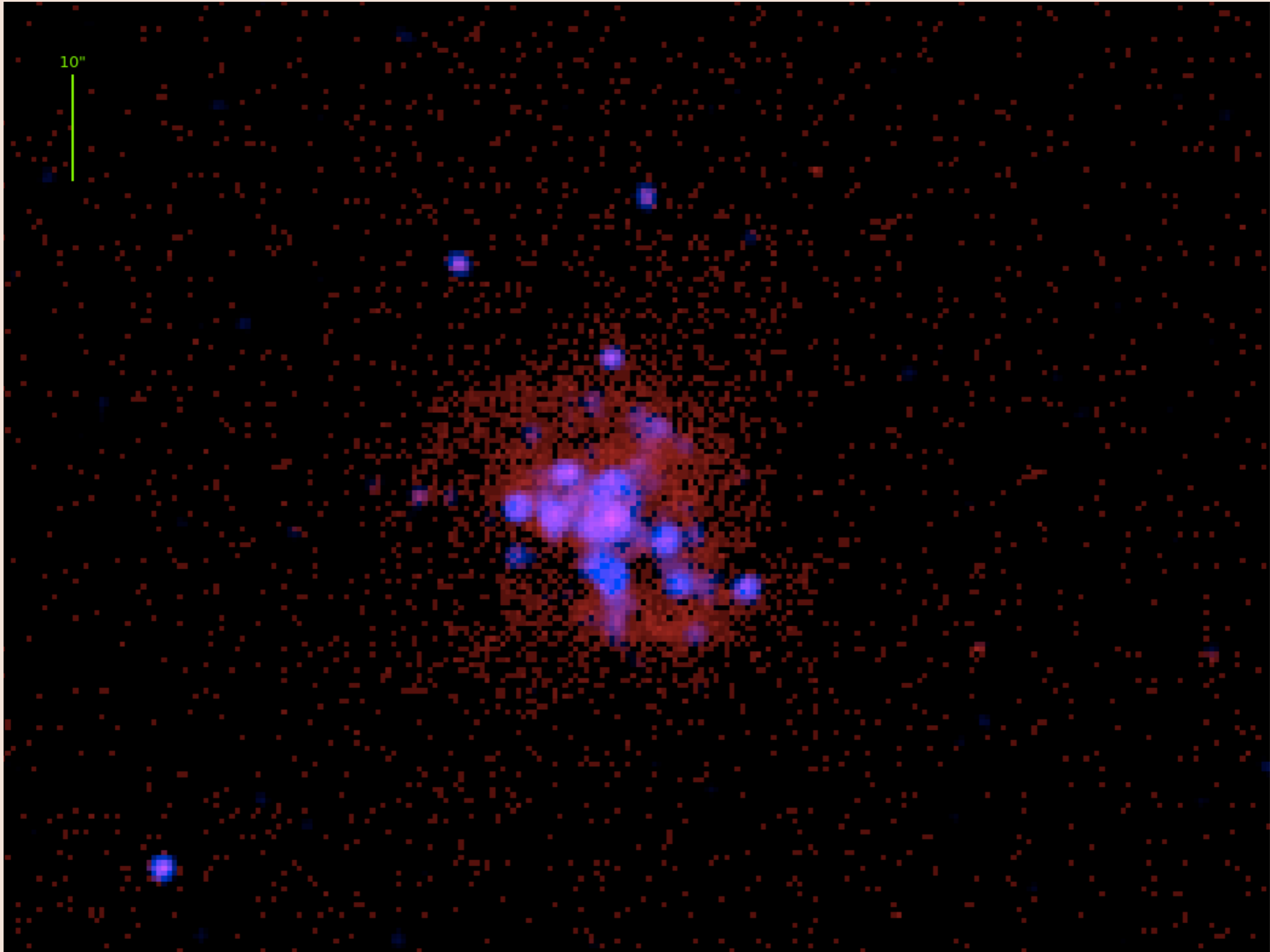
- Модель  $A(E) = k E^{-\Gamma} \times e^{-N_H \sigma(E)}$
- $N_H = 9.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ;  $\Gamma = 2.0$
- R=1.5 PSF
- 0.5 – 7.0 кэВ [srcflux](#)



## Фильтрация ULX

- D=37.6 МПк (English et al., 2003)
- 22 источника
- $L_x = F_x^{upper} 4\pi D^2 > 10^{39} \text{ erg/s}$





Star Formation Law

Continuous Star Formation

Fixed Mass

Star Formation Rate   $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

Total Stellar Mass   $\times 10^6 M_{\odot}$

Number of IMF Intervals

IMF Exponents

Mass Boundaries for IMF   $M_{\odot}$

Supernova Cut-Off Mass   $M_{\odot}$

Black Hole Cut-Off Mass   $M_{\odot}$

Metallicity and Tracks

Padova Orig.

Padova AGB

Geneva Std.

Geneva High

Geneva v00

Geneva v40

Wind Model

Initial Time   $\times 10^6 \text{ yr}$

Time Scale

Time Step (if linear)   $\times 10^6 \text{ yr}$

Number of Steps (if logarithmic)

Last Grid Point   $\times 10^6 \text{ yr}$

Mass Interpolation

Selected Tracks

All Tracks

$I_{\min}$    $I_{\max}$

Atmospheres and Spectra

Time Step to Print Spectra   $\times 10^6 \text{ yr}$

Atmosphere for the Low-Resolution Spectrum

Metallicity of the Optical High-Resolution Spectrum