



# Вращение плоскости поляризации в барстере GX 13+1 и другие поляризационные свойства слабозамагниченных нейтронных звёзд

Анна Бобрикова, Юрий Поутанен

Университет Турку

Коллаборация Рентгеновского поляриметра IXPE

# План семинара

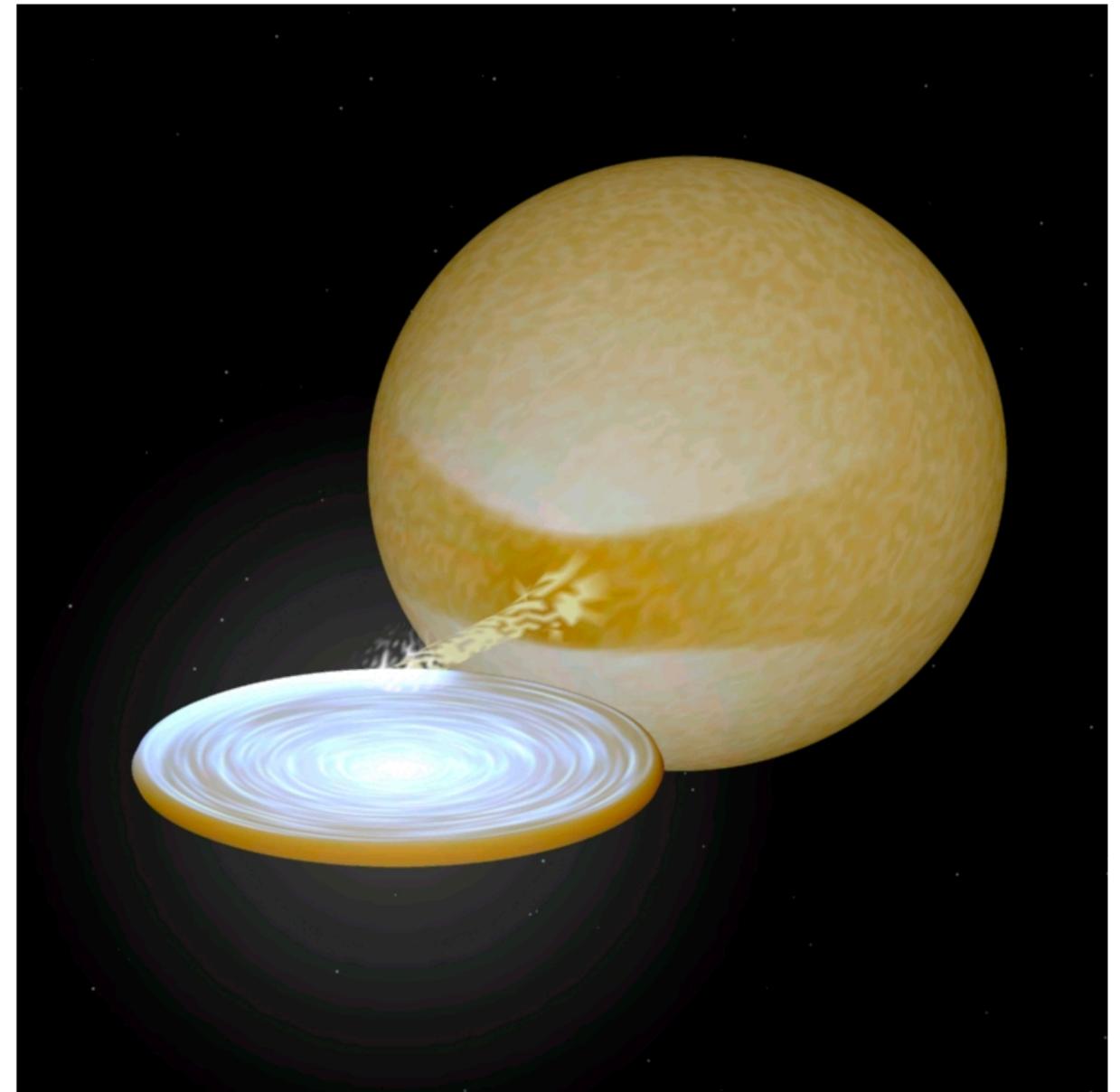
- Введение
  - Слабозамагниченные нейтронные звёзды
  - Рентгеновская поляриметрия
  - Телескоп IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer)
- Ожидаемые поляризационные свойства излучения слабозамагниченных нейтронных звёзд
- Краткий обзор наиболее интересных результатов наблюдений и их корреляции с теоретическими ожиданиями
- Вращение плоскости поляризации в GX 13+1

# Введение

# Введение

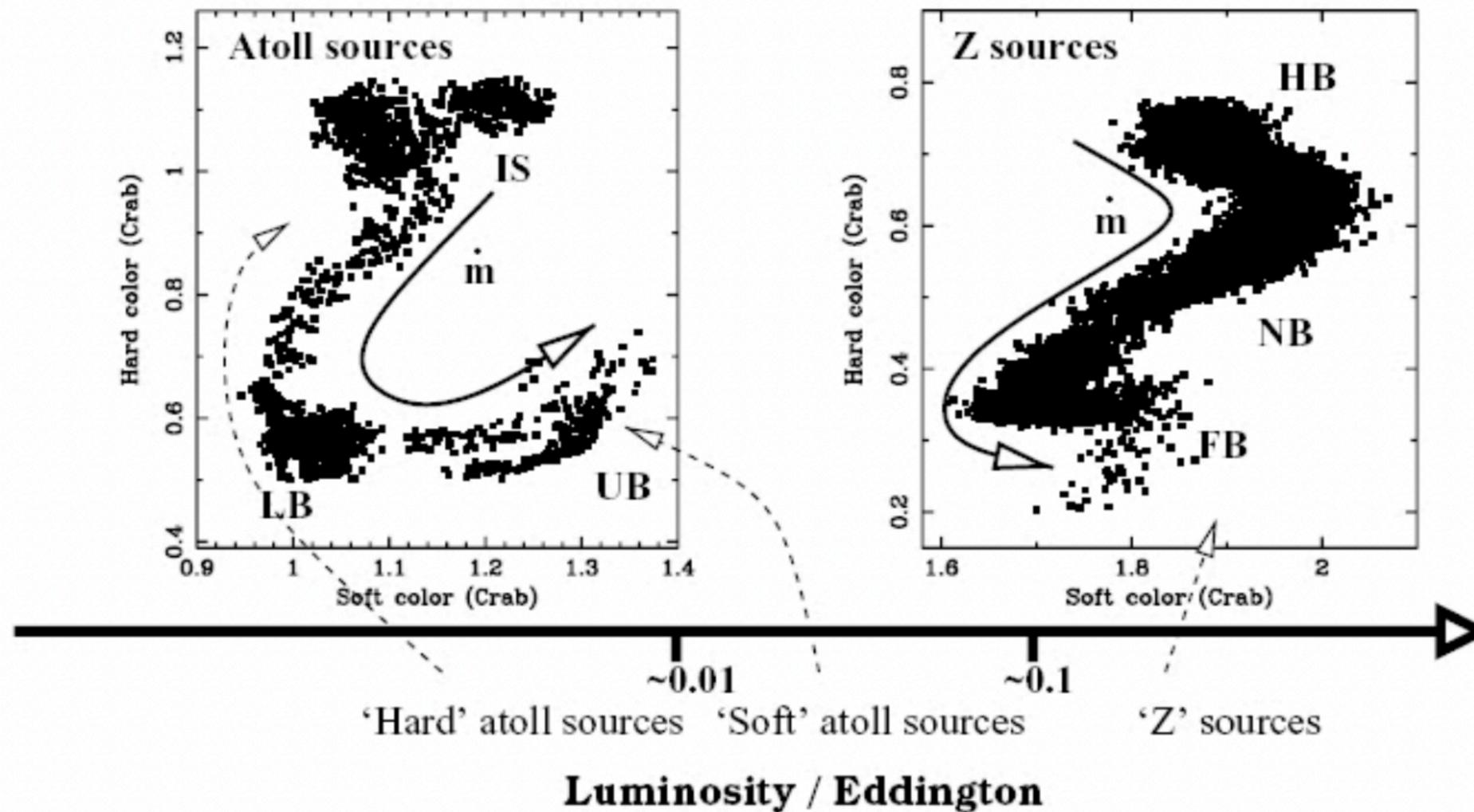
## Слабозамагниченные нейтронные звёзды (WMNSs)

- Расположены в маломассивных рентгеновских двойных системах
- Аккрецируют материю компаньона через полость Роша
- Материя образует аккреционный диск вокруг нейтронной звезды и в отсутствии сильного магнитного поля падает на экватор нейтронной звезды
- “Слабое” магнитное поле ( $\sim 10^8$  Гаусс)



# Введение

## Слабозамагниченные нейтронные звёзды (WMNSs)



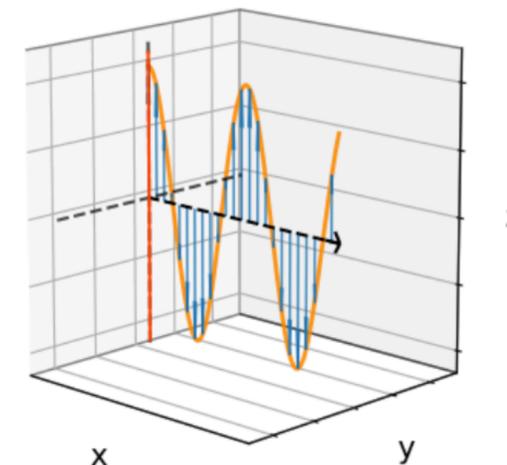
- Часто наблюдаем квазипериодические осцилляции
- Наблюдаются в мягком и жёстком состояниях
- Классификация: Атоллы и Z-источники
- Вопрос: в чём причина поведения, отражённого на диаграммах?

# Введение

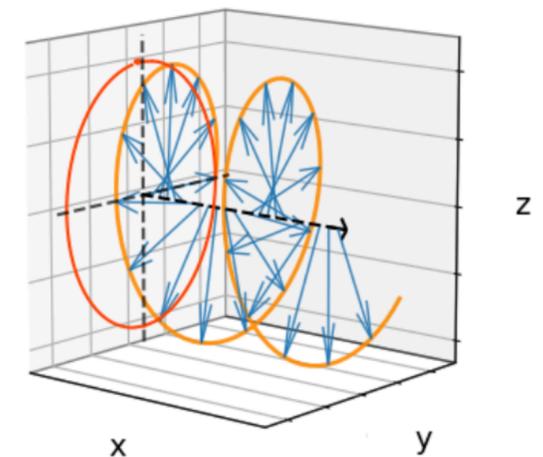
## Рентгеновская поляризация

- Поляризация характеризует направление колебаний вектора напряженности электрического поля
- Естественный свет не поляризован (впрочем, каждый отдельный фотон имеет поляризацию...)
- Рентгеновское излучение получает поляризацию при:
  - рассеянии
  - отражении
  - отклонении в магнитном поле (синхротронное излучение)
- Измерение поляризации позволяет получить уникальную информацию о геометрии источника и о процессах, происходящих с излучением на пути от источника к наблюдателю
- Поляризационные свойства характеризуются двумя величинами: степенью поляризации (PD) и углом поляризации (PA).

Linear Polarisation



Circular polarisation



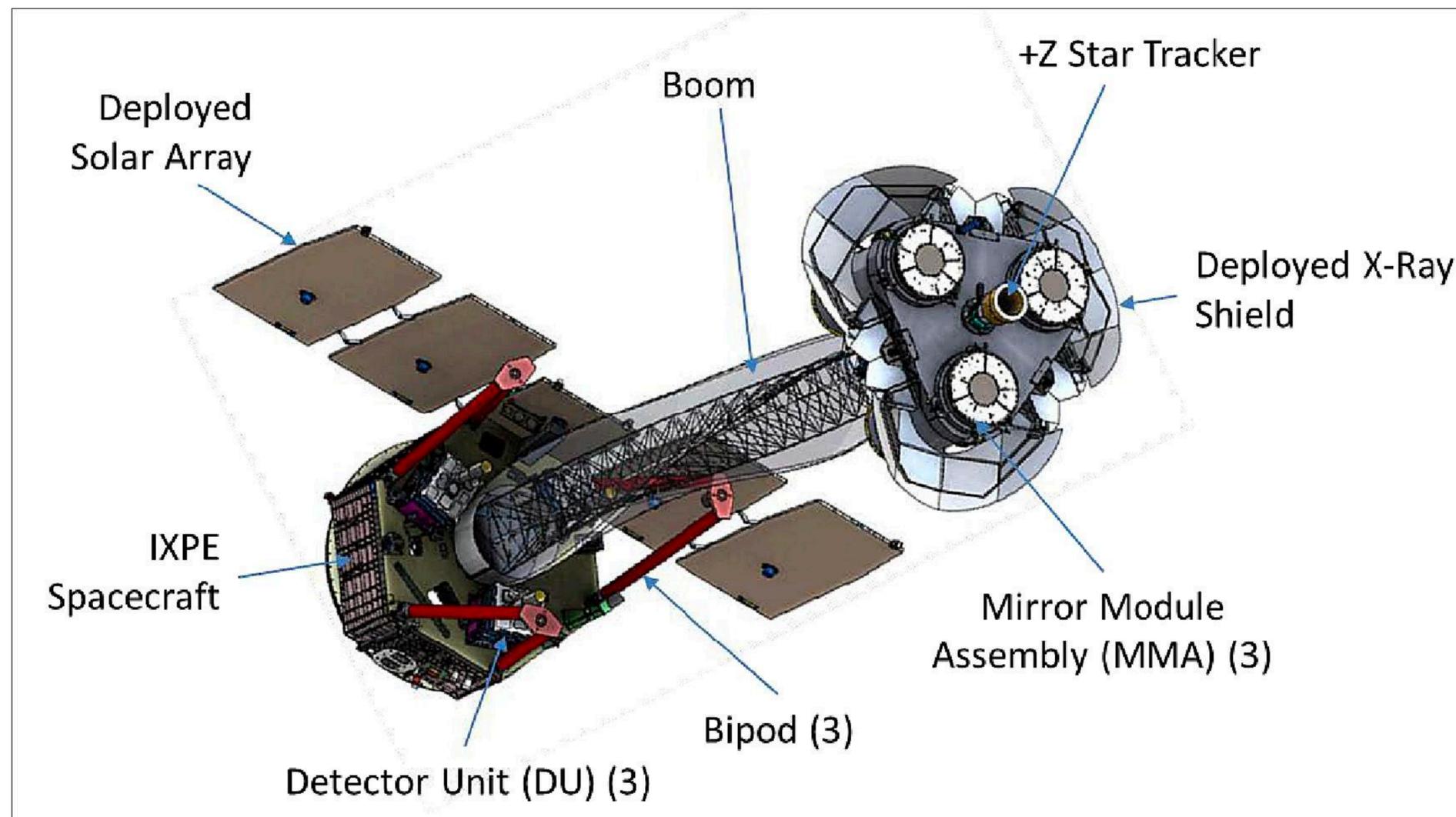
# Введение

## Рентгеновская поляриметрия

- 1894 - открытие рентгеновского излучения
- 1904 - подтверждение поляризации в рентгеновском излучении
- 1962 - первые внесистемные источники рентгеновского излучения
- 1968 - первые измерения поляризации рентгеновских источников (Sco X-1 и Крабовидная туманность) с ракеты (sounding rocket)
- 1974-1975 - первые спутниковые измерения поляризации рентгеновских источников (Ariel-5 and OSO-8)
- 1987 - Спектр-РГ (запуск отложен, проект возобновлён и выведен на орбиту в 2019 без поляриметра)
- ...2021 - IXPE

# Введение

## Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)



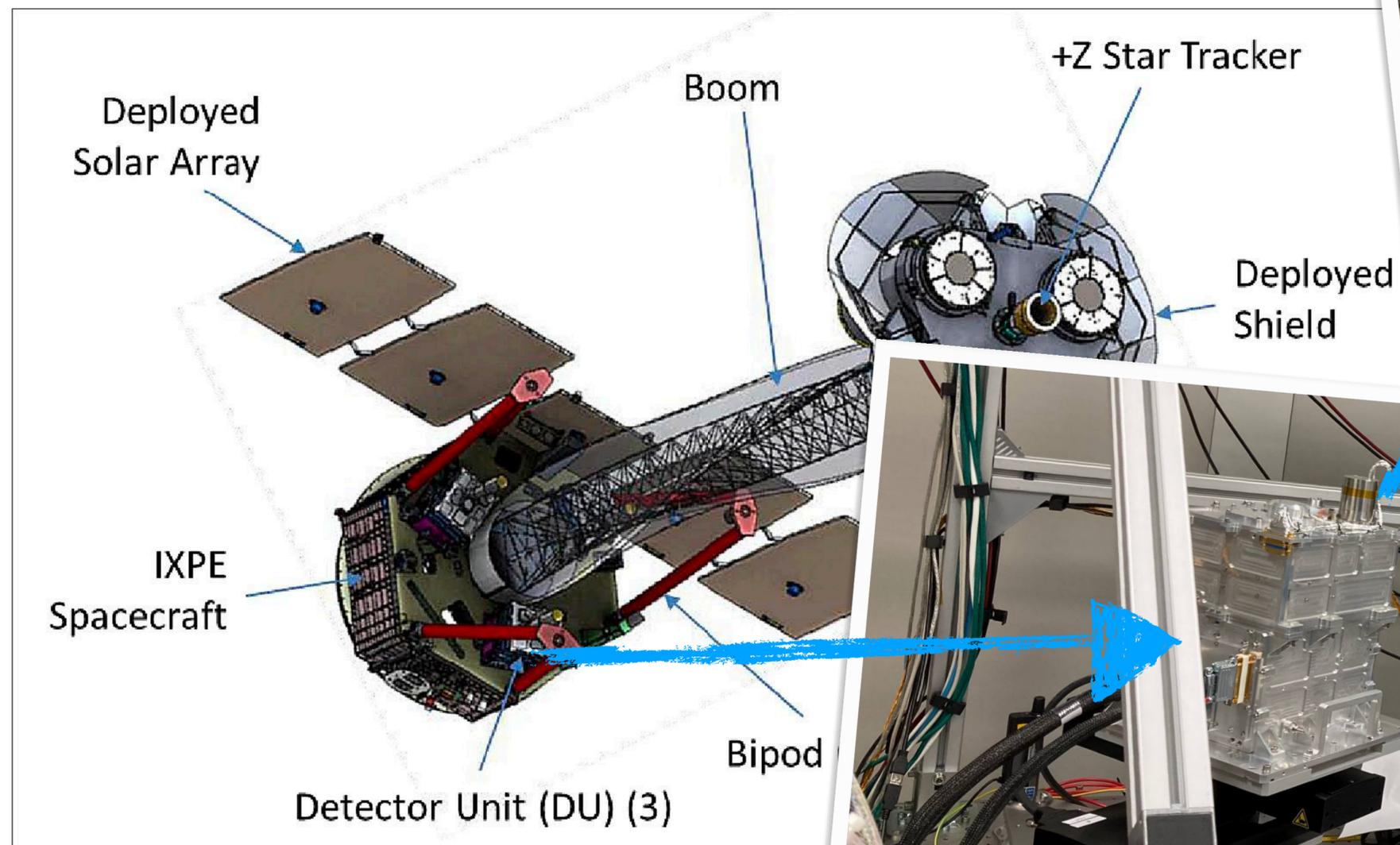
2 года на орбите, запущен  
9 декабря 2021

В настоящий момент  
находится в стадии  
General Observer Program  
Cycle 1

Осенью (скорее всего)  
будет сбор заявок на  
Cycle 2!

# Введение

## Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)



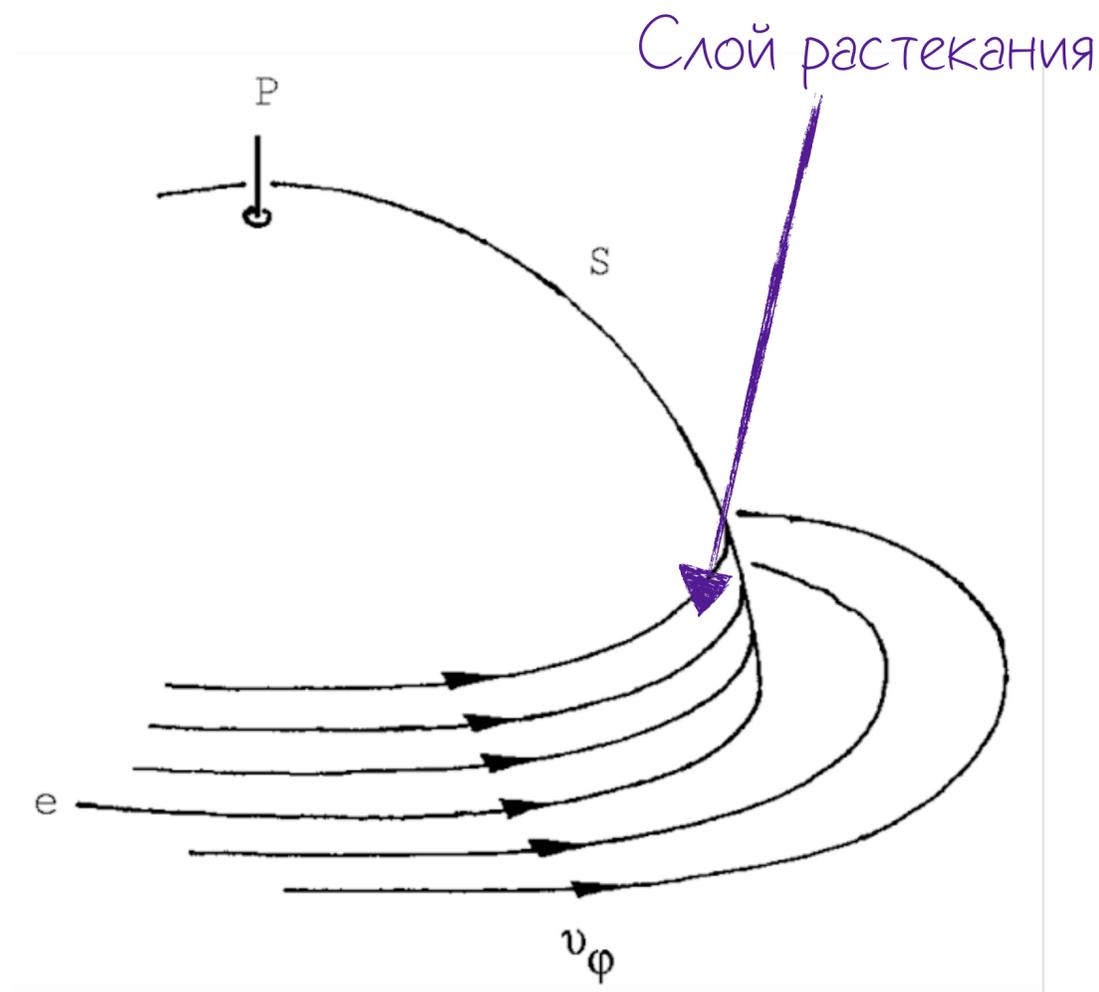
General Observer Program  
Cycle 1

Осенью (скорее всего)  
будет сбор заявок на  
Cycle 2!

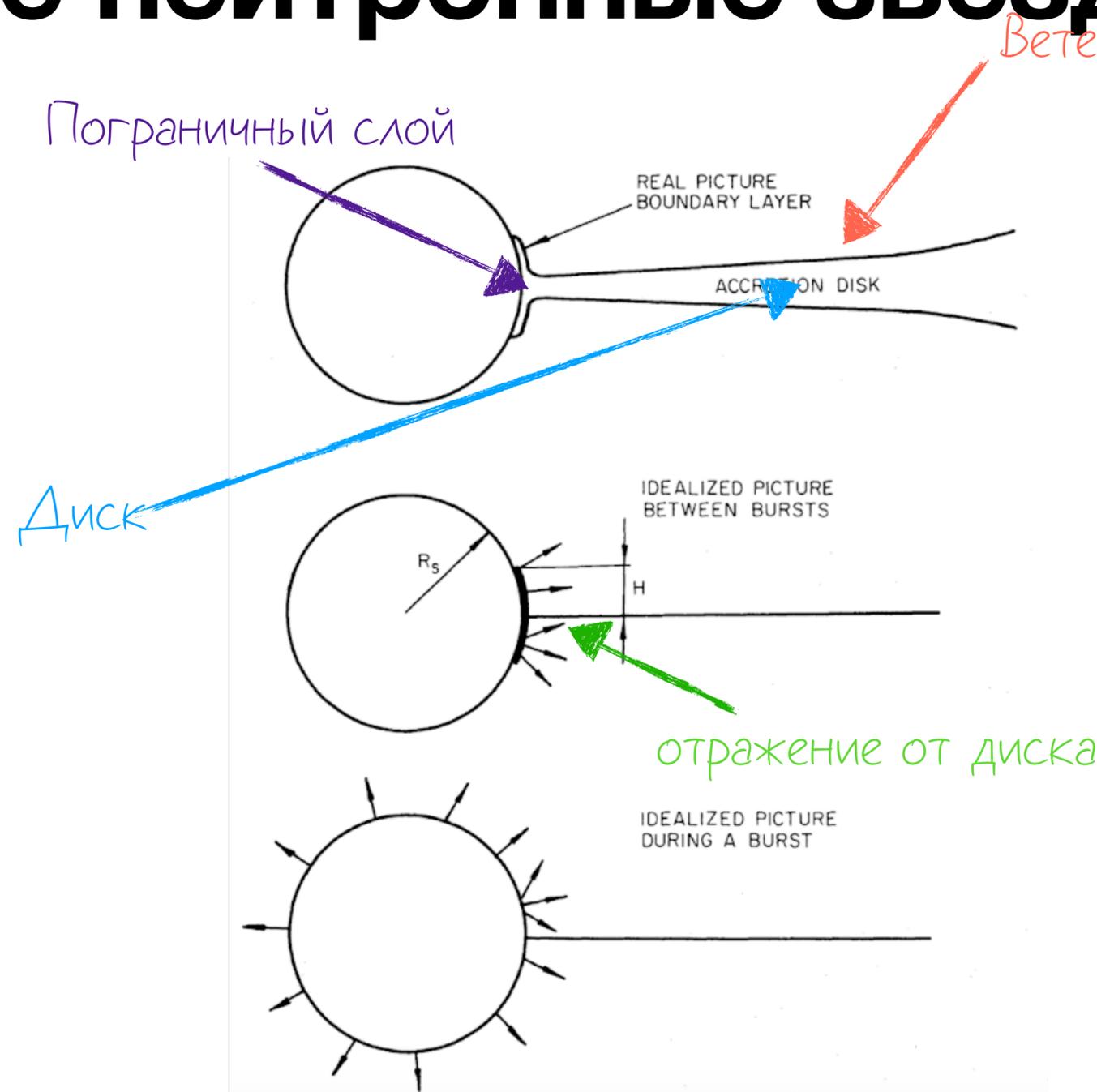
# Теоретические предсказания поляризационных свойств излучения WMNS

# Слабозамгниченные нейтронные звёзды

## Источники излучения



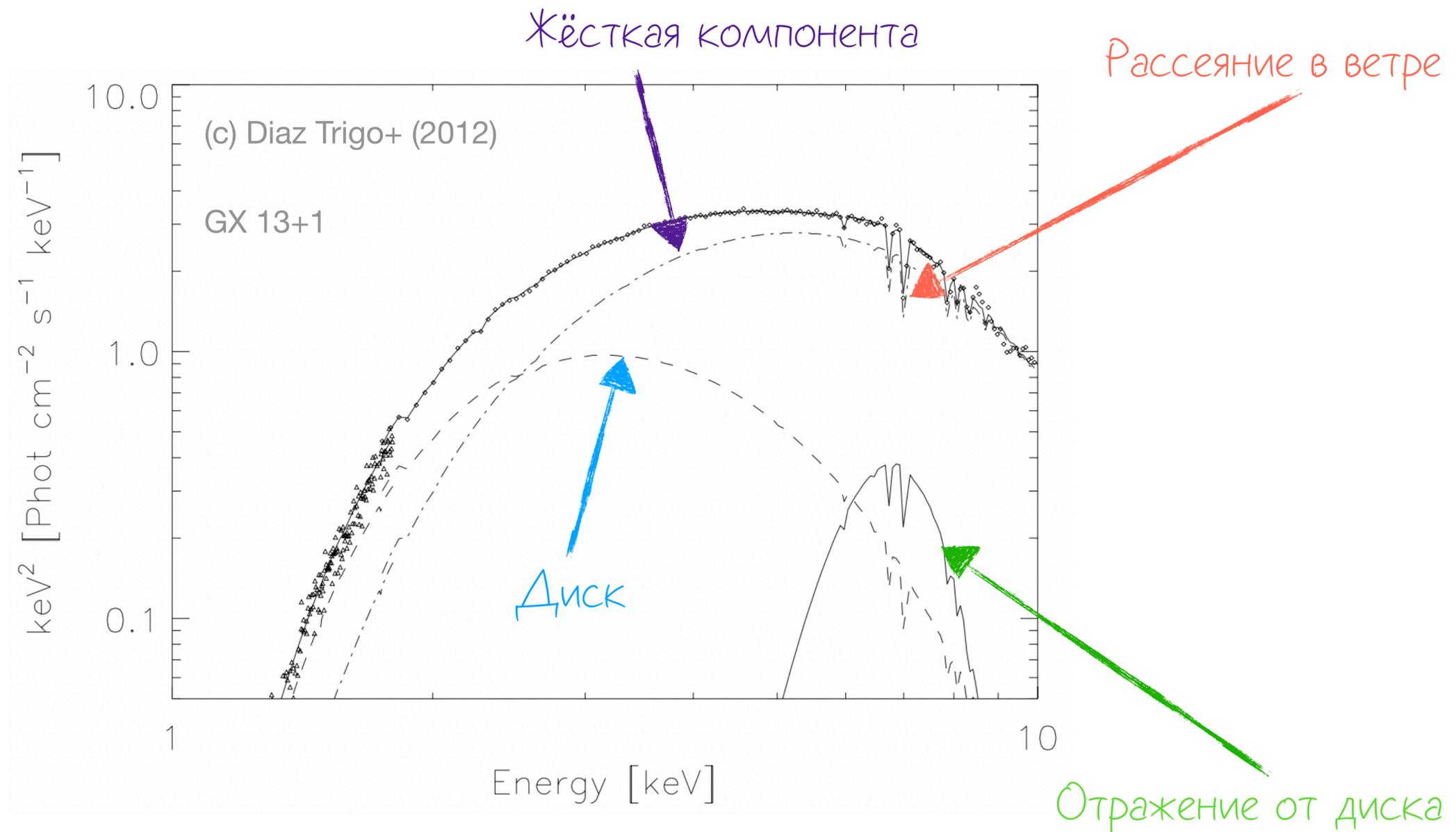
Inogamov & Sunyaev 1999



Lapidis & Sunyaev 1985

# Слабозамгниченные нейтронные звёзды

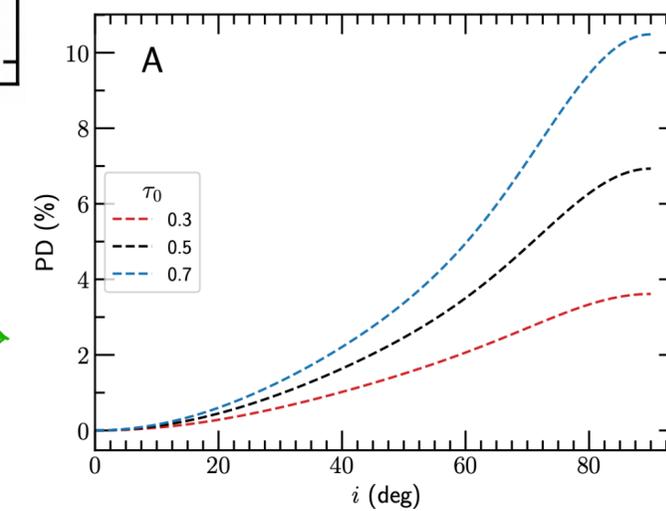
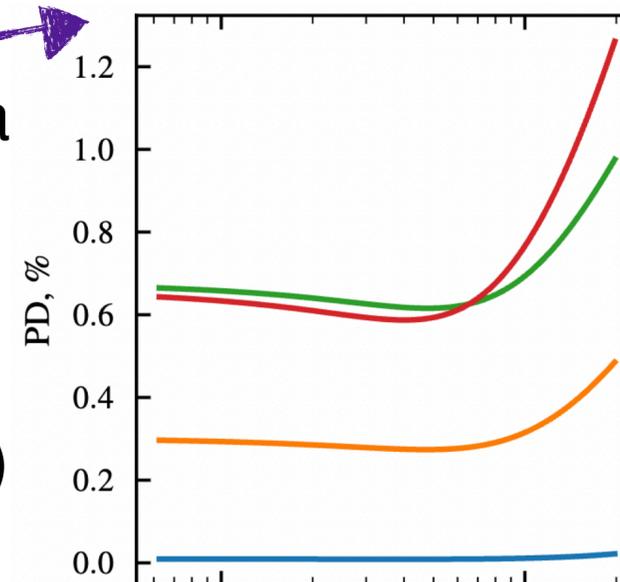
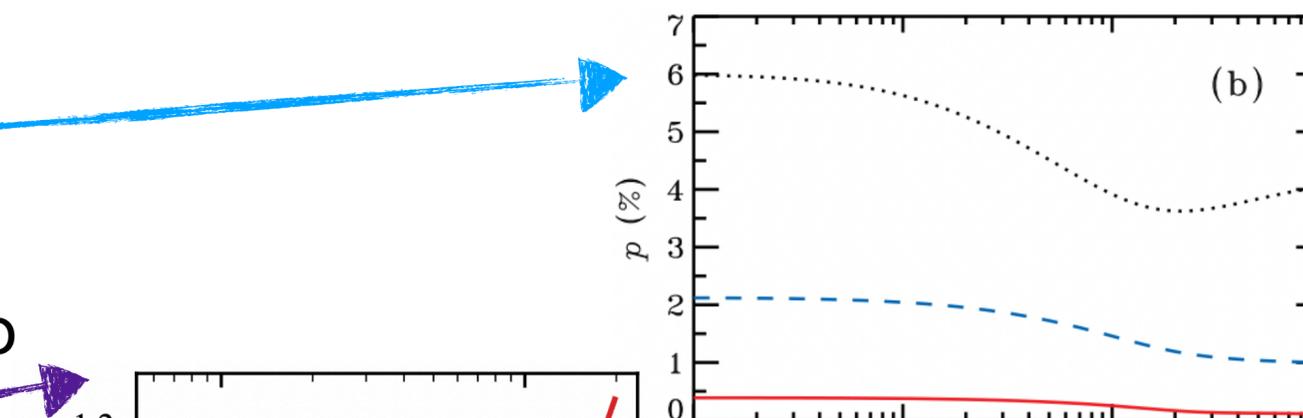
## Компоненты спектра



# Слабозамагниченные нейтронные звёзды

## Ожидаемая поляризация излучения различных частей системы

- Диск: на наиболее высоких отклонениях — до 6% (Loktev et al., 2022), параллельна плоскости диска
- Слой растекания: до 6% в оптически тонком слое, до 1.5% в оптически толстом слое (Vobrikova et al., in prep), может быть параллельна или перпендикулярна плоскости диска
- Пограничный слой: как в диске, но горячее
- Отражение от диска: до 6% (Lapidus & Sunyaev, 1985)
- Рассеяние в ветре: до 33% (Sunyaev & Titarchuk, 1985), до 10% (Nitindala et al., in prep), в любом направлении



# Наиболее интересные результаты наблюдений слабомагнитных нейтронных звёзд с IXPE

# Наблюдения WMNS с IXPE

- GS 1826—238 (Capitanio et al. 2022)
- Cyg X-2 (Farinelli et al. 2023)
- GX 9+9 (Ursini et al. 2023)
- XTE J1701—462 (Cocchi et al. 2023)
- GX 5—1 (Fabiani et al. 2024)
- 4U 1820—303 (Di Marco et al. 2023)
- Sco X-1 (La Monaca et al. 2024)
- Cir X-1 (Rankin et al. 2024)
- 4U 1624—49 (Saade et al. 2024)
- GX 13+1 (Bobrikova et al. 2024)

# Наблюдения WMNS с IXPE

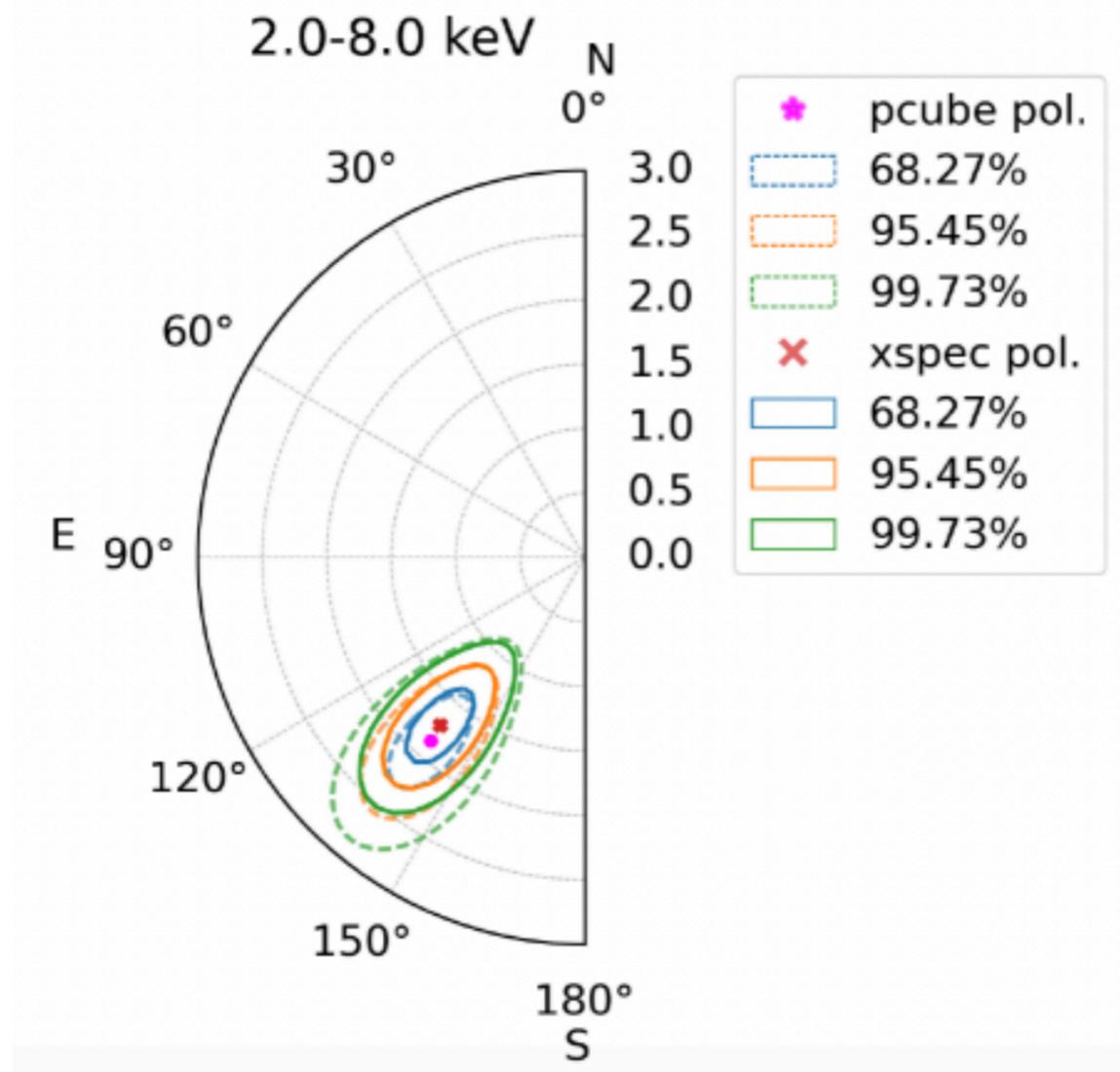
- GS 1826—238 (Capitanio et al. 2022)
- Cyg X-2 (Farinelli et al. 2023)
- GX 9+9 (Ursini et al. 2023)
- XTE J1701—462 (Cocchi et al. 2023)
- GX 5—1 (Fabiani et al. 2024)
- 4U 1820—303 (Di Marco et al. 2023)
- Sco X-1 (La Monaca et al. 2024)
- Cir X-1 (Rankin et al. 2024)
- 4U 1624—49 (Saade et al. 2024)
- **GX 13+1 (Bobrikova et al. 2024)**

# Результаты

- GS 1826—238: не задетектирована поляризация
- **Суг X-2: OSO-8 был прав!**
- GX 9+9: поляризация растёт с энергией
- XTE J1701—462: ...или не растёт. Но меняется с состоянием!
- **GX 5—1: точно-точно меняется!**
- 4U 1820—303: иногда степень поляризации бывает в двузначных числах!
- **Sco X-1: OSO-8 не был прав...**
- **Cir X-1: всё как-то повёрнуто...**
- 4U 1624—49: в провале кривой блеска поляризация может быть выше
- **GX 13+1: всё как-то вращается**

# Суд X-2 (Farinelli et al. 2023)

OSO-8 был прав!



IXPE (2022):

PD =  $1.8\% \pm 0.3\%$ , PA =  $140^\circ \pm 4^\circ$ ,  
PD<sub>hard</sub> =  $4.0\% \pm 2.0\%$

OSO-8 (1975–1977):

PD =  $5\% \pm 1.8\%$ , PA =  $138^\circ \pm 10^\circ$

Radio jet:  $141^\circ$

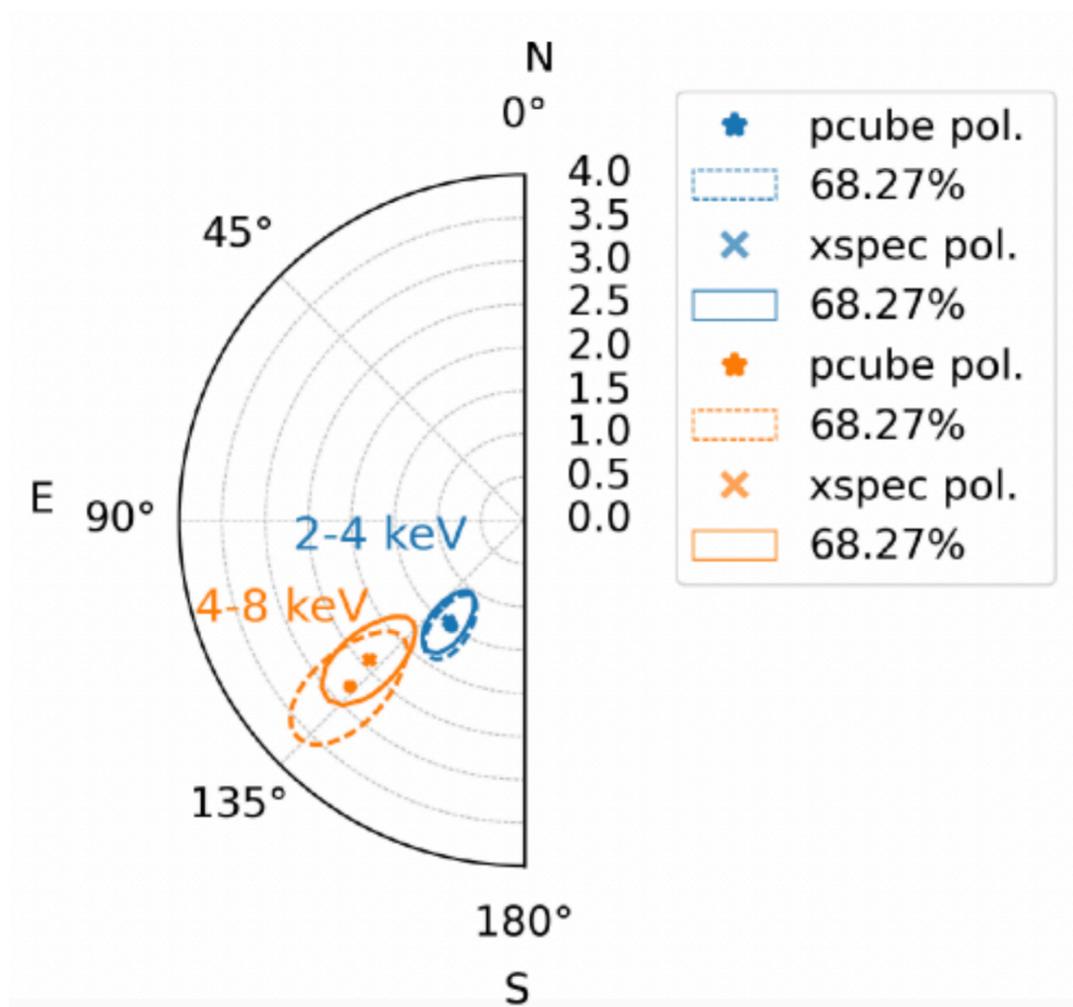
Вывод: поляризация идёт от слоя растекания (SL)

Вопрос: как SL может дать 4%?..

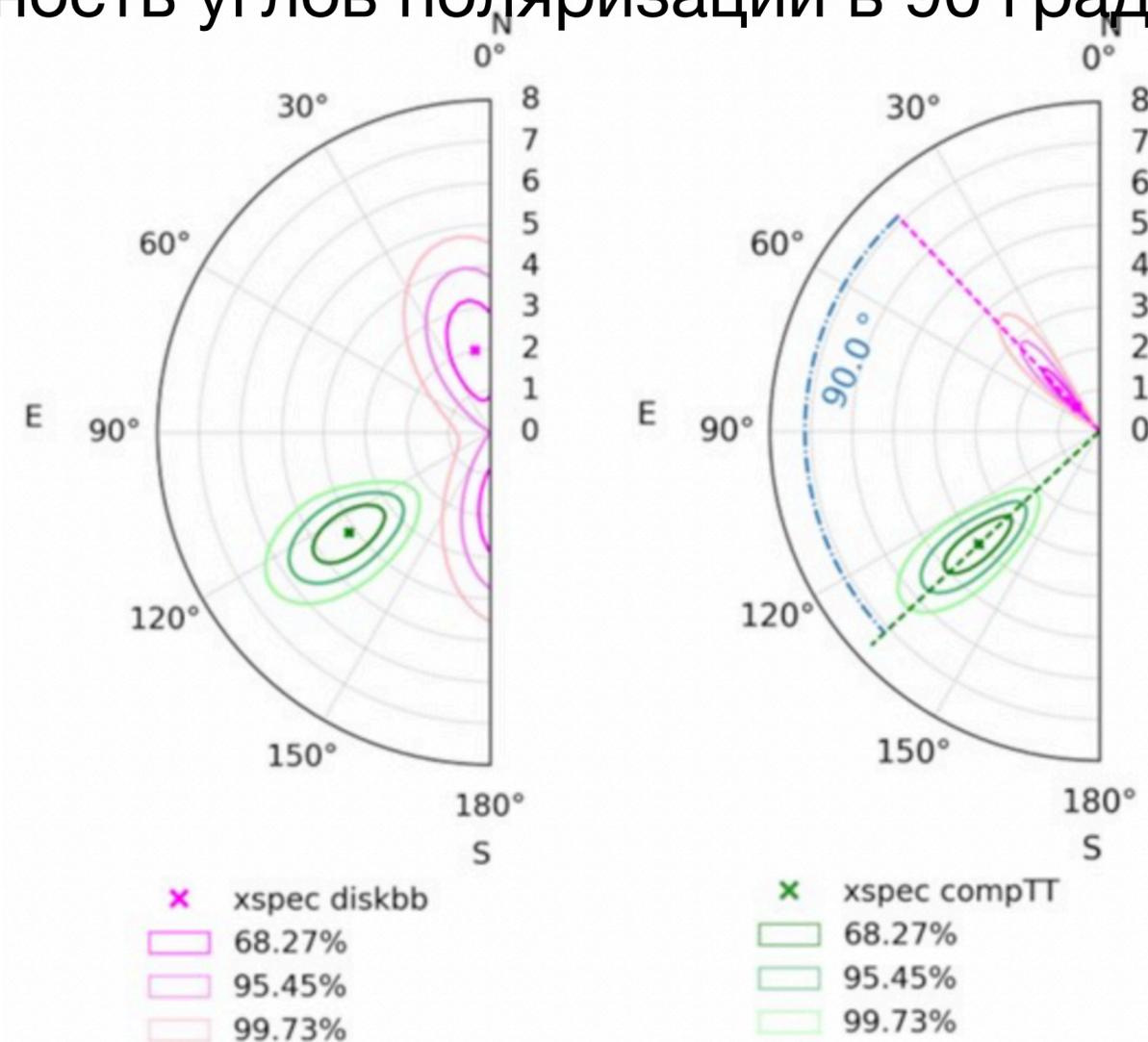
# Суд X-2 (Farinelli et al. 2023)

## OSO-8 был прав!.. Что ещё можно узнать из данных?

### Эволюция с энергией



Улучшает ли фит дополнительное ограничение на разность углов поляризации в 90 градусов?



Да!

# Sco X-1 (La Monaca et al. 2024)

Отличие в 54 градуса от предыдущих наблюдений и джета

IXPE (2023):

PD = 1%, PA = 10°

OSO—8 (1975–1977):

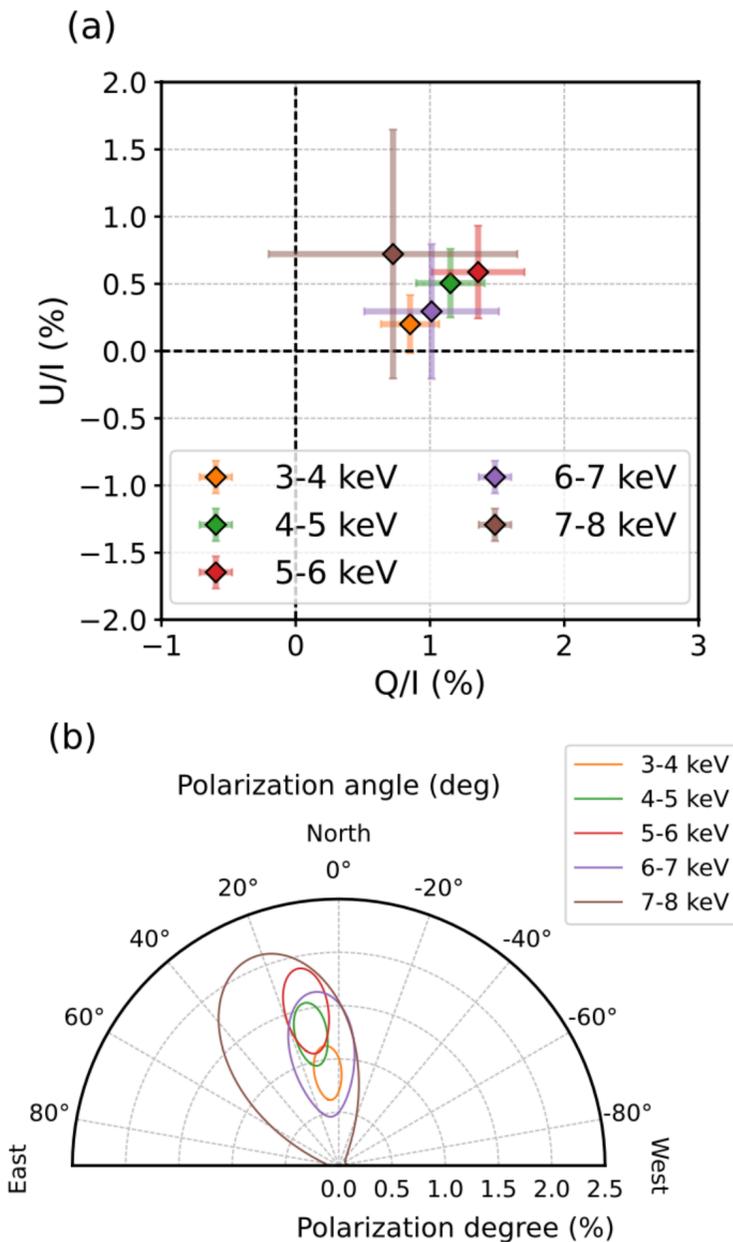
PD = 1%, PA = 57°

PolarLight (2022):

PD = 4%, PA = 53°

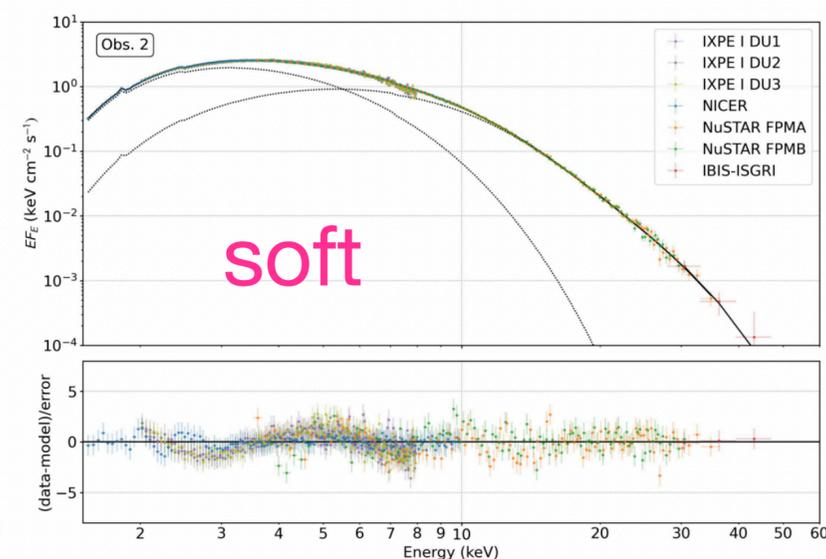
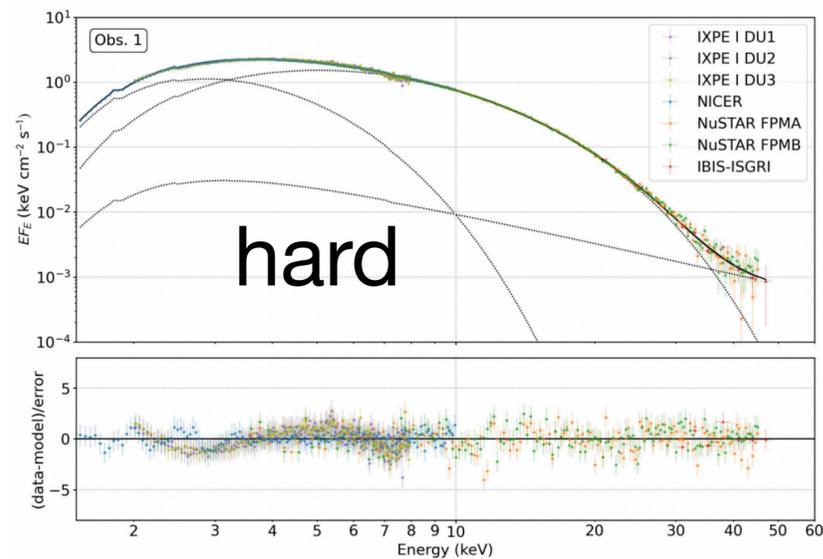
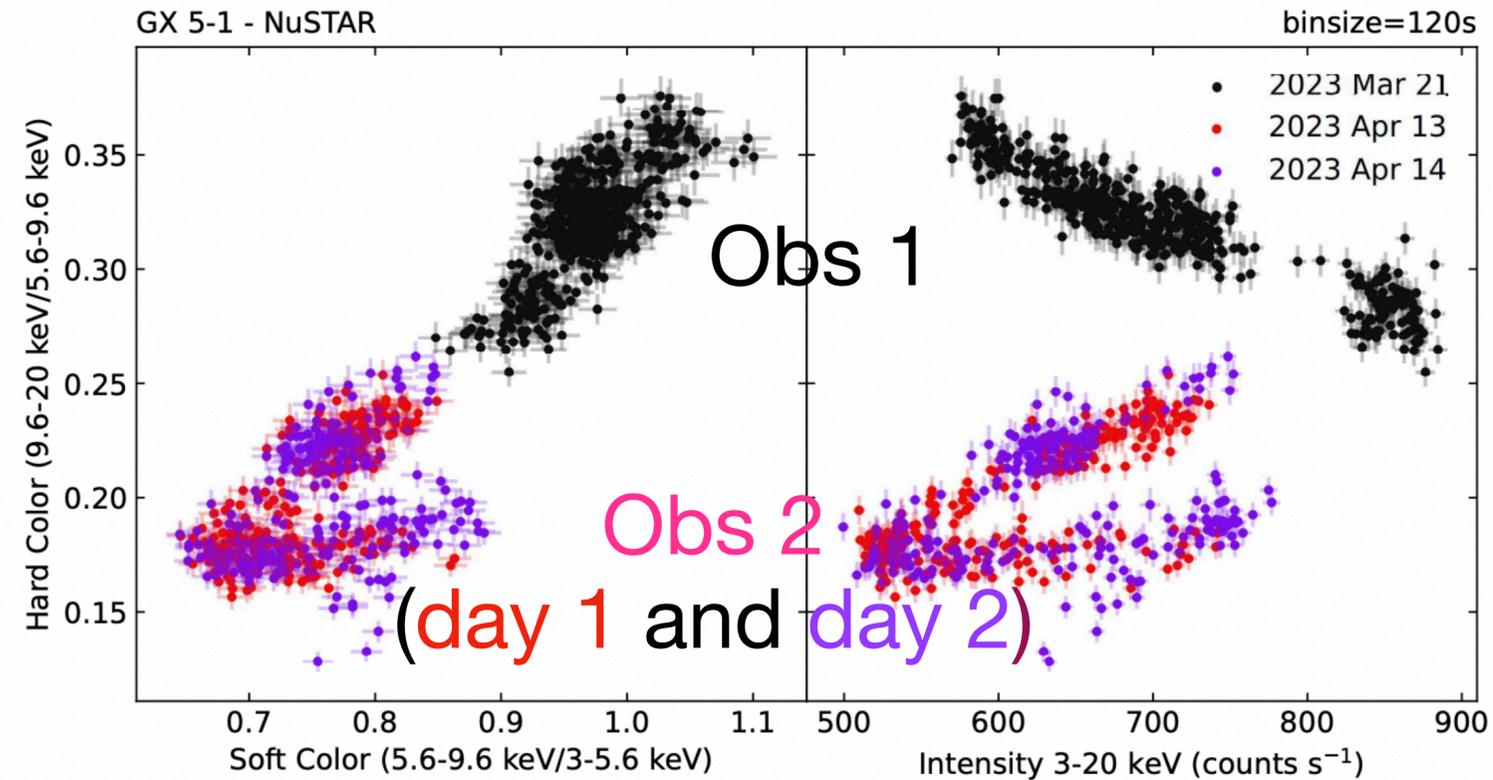
Radio jet: 54°

Вопрос: в чём причина поворота?



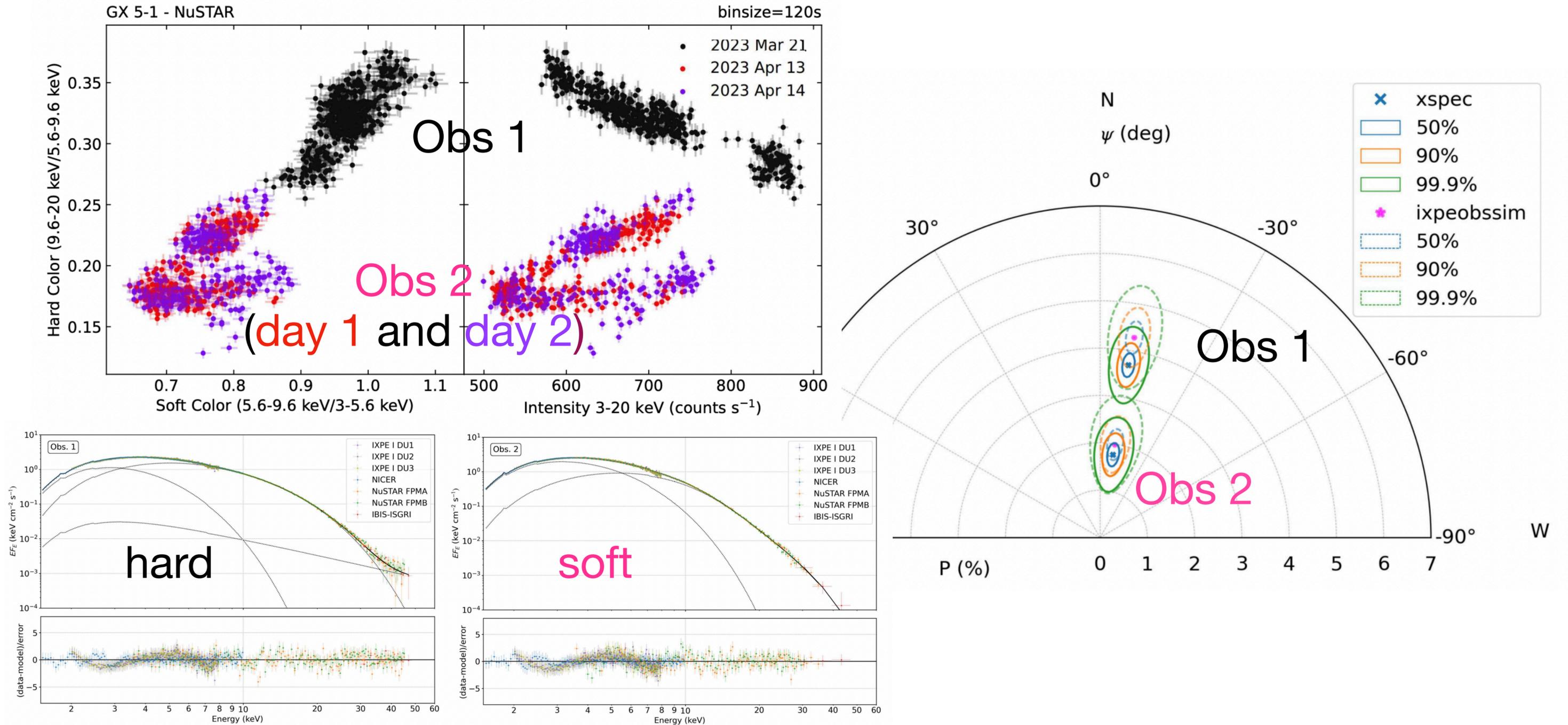
# GX 5-1 (Fabiani et al. 2024)

Два наблюдения в разных состояниях. РА зависит от энергии



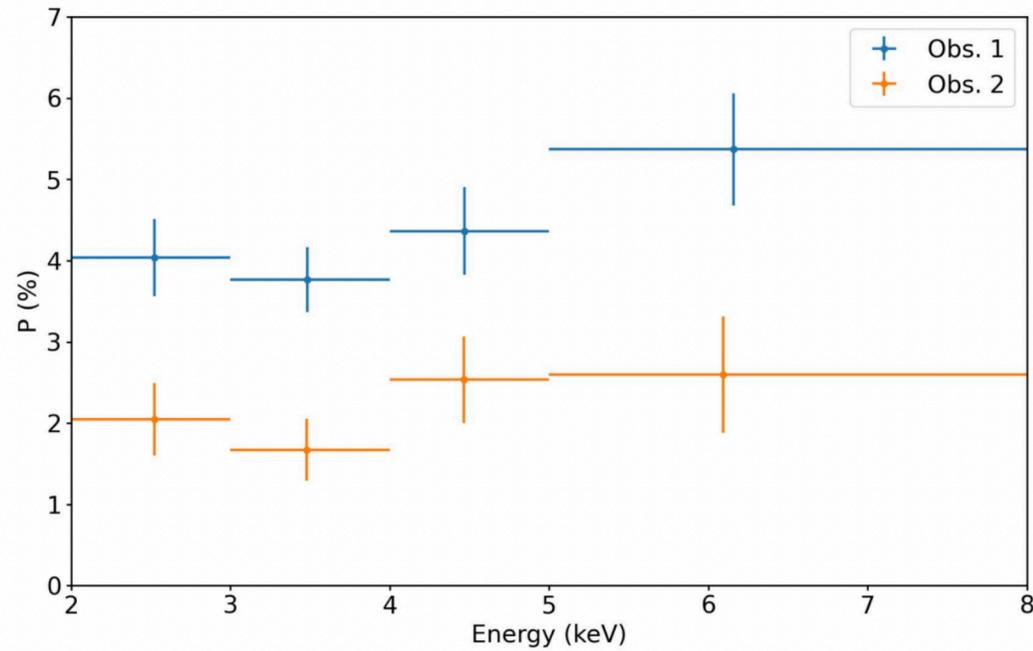
# GX 5-1 (Fabiani et al. 2024)

Два наблюдения в разных состояниях. РА зависит от энергии

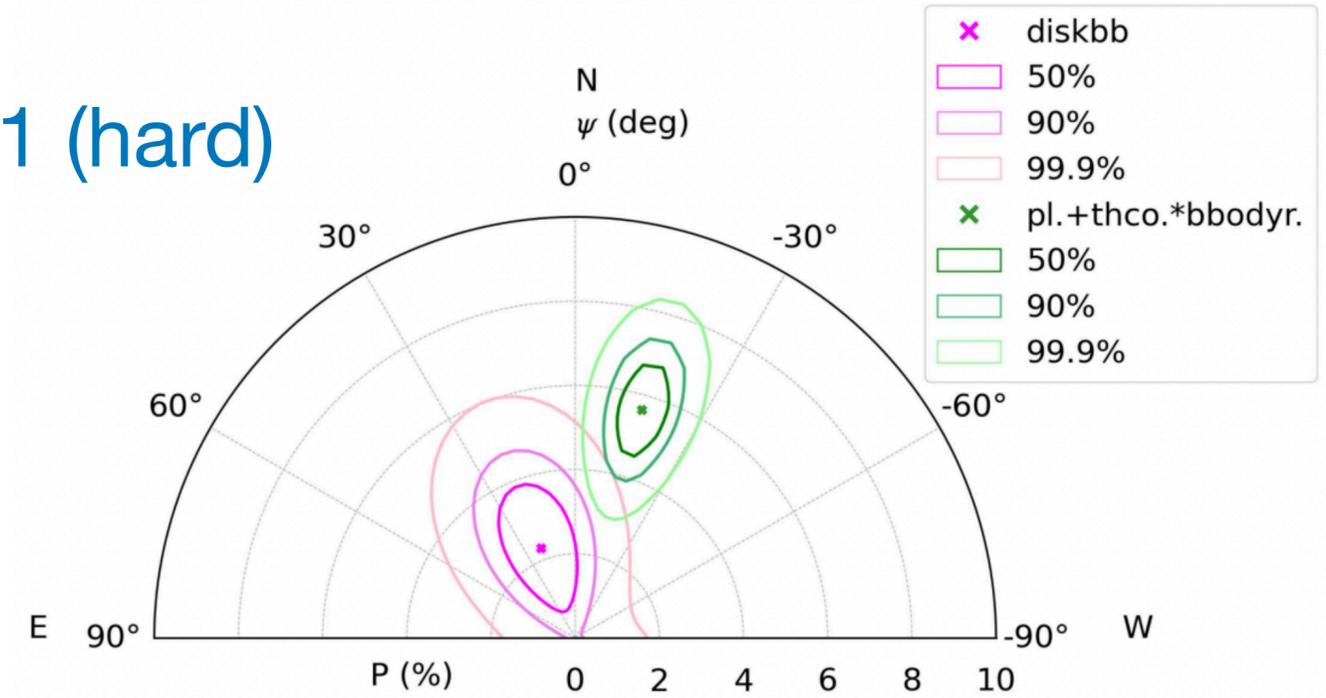


# GX 5-1 (Fabiani et al. 2024)

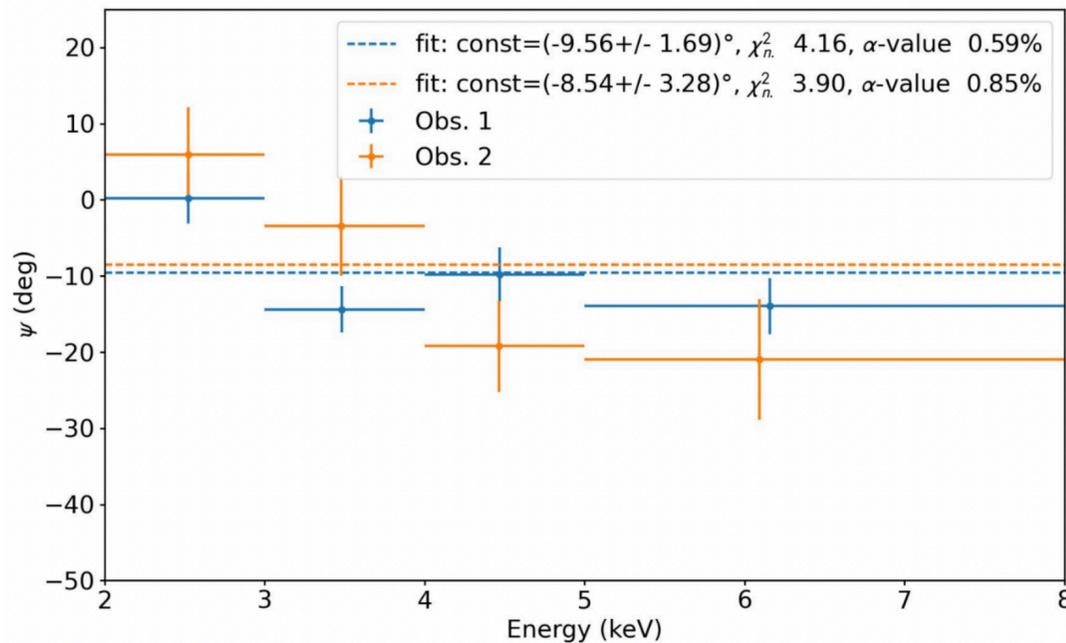
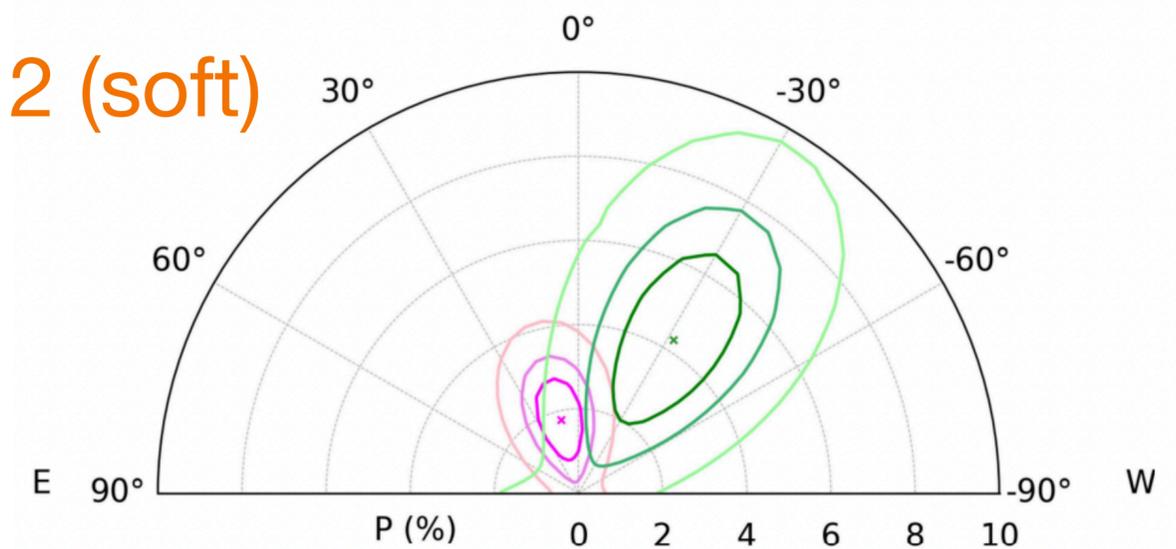
Два наблюдения в разных состояниях. PA зависит от энергии



Obs 1 (hard)



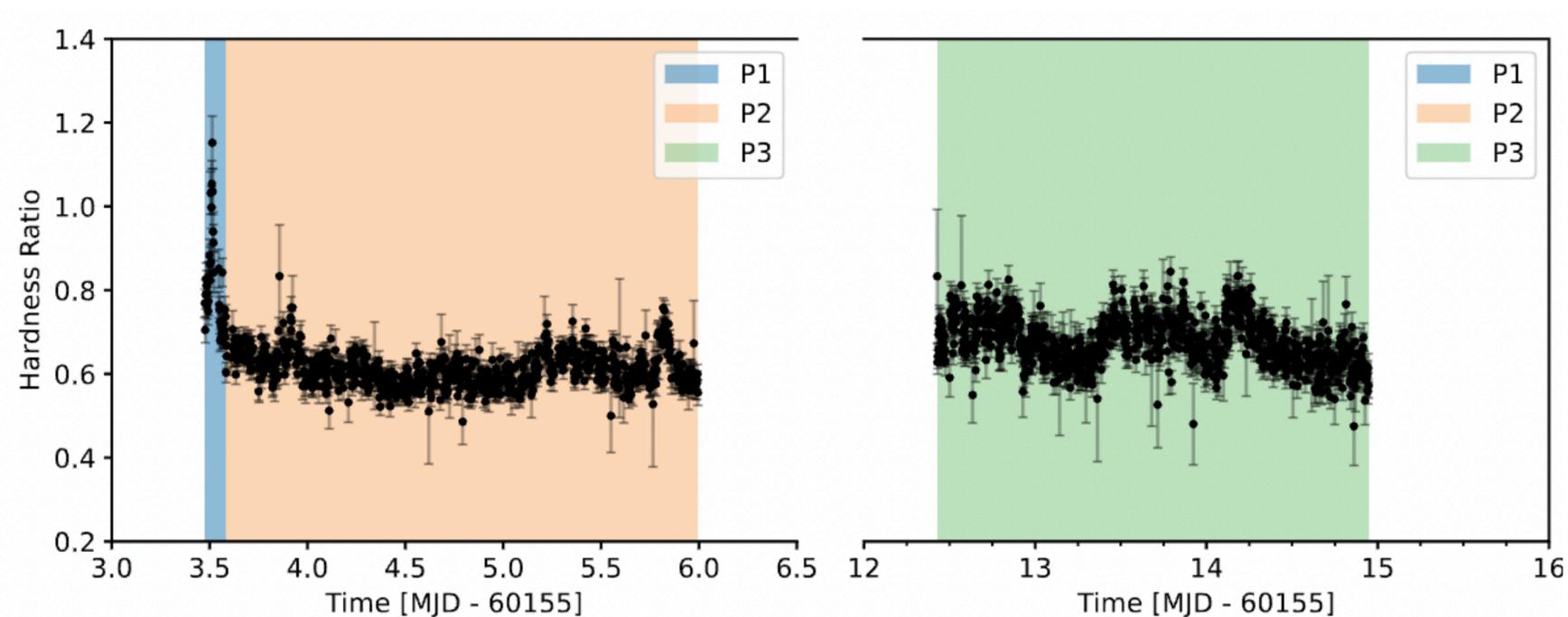
Obs 2 (soft)



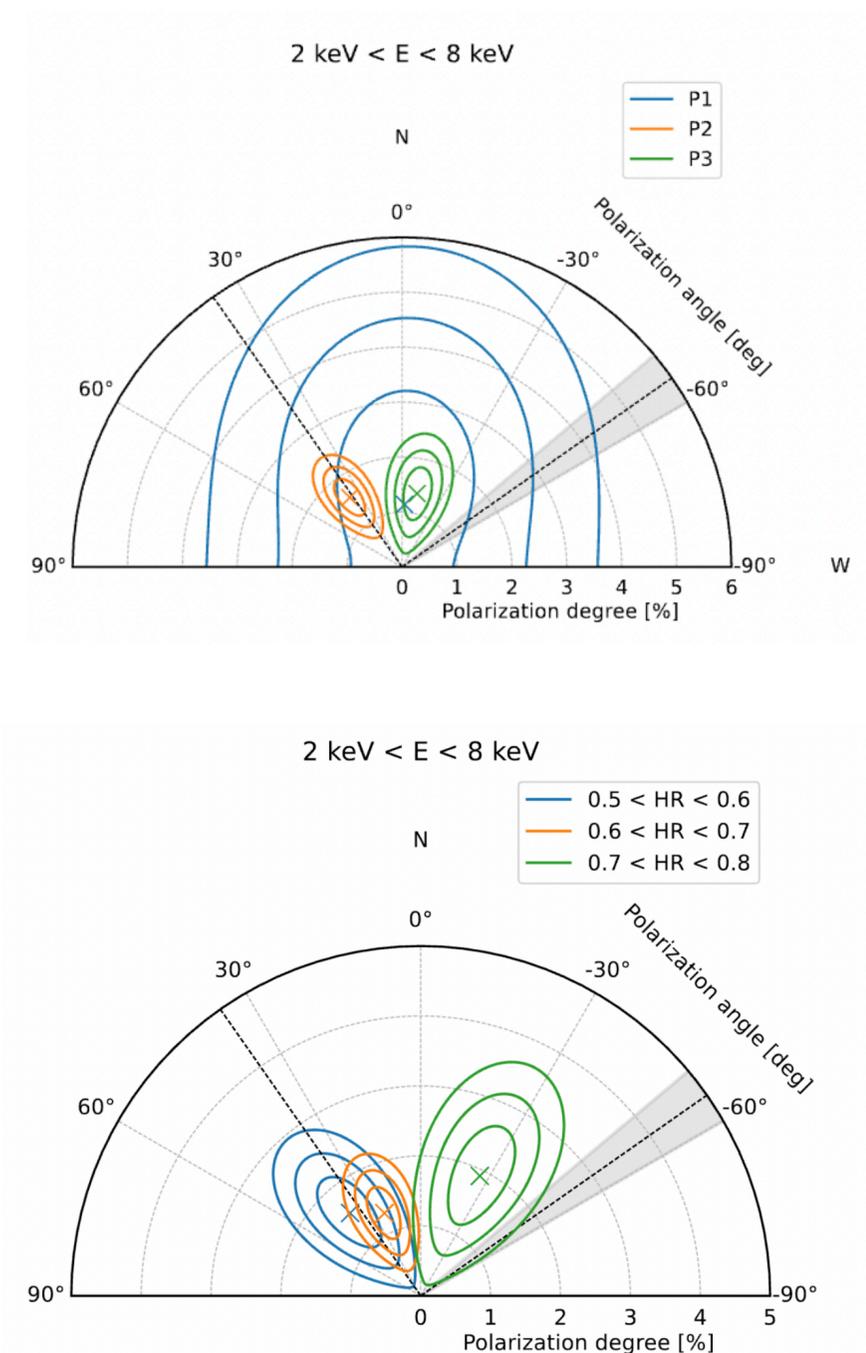
# Cir X-1 (Rankin et al. 2024)

Поворот плоскости поляризации со временем и с жесткостью: наклонённая звезда?

- Cir X-1 - очень молодая система (~10 тысяч лет!)



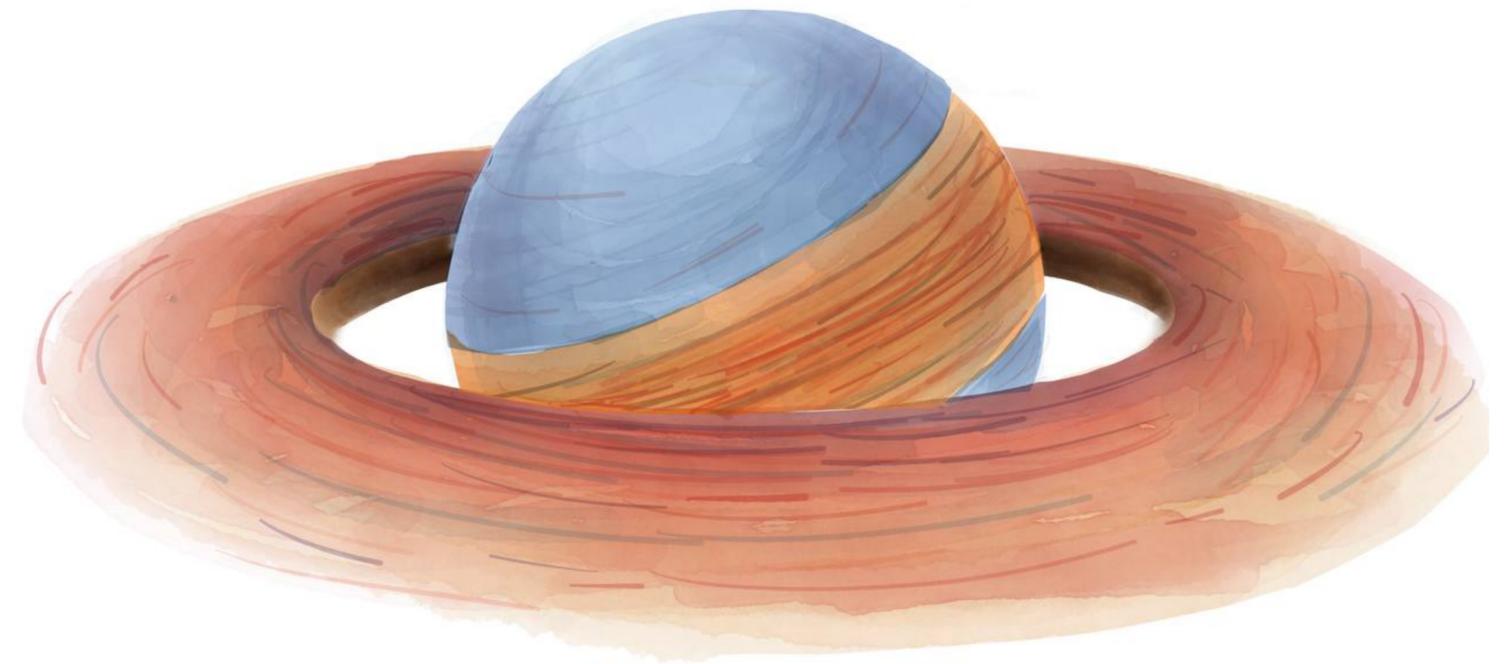
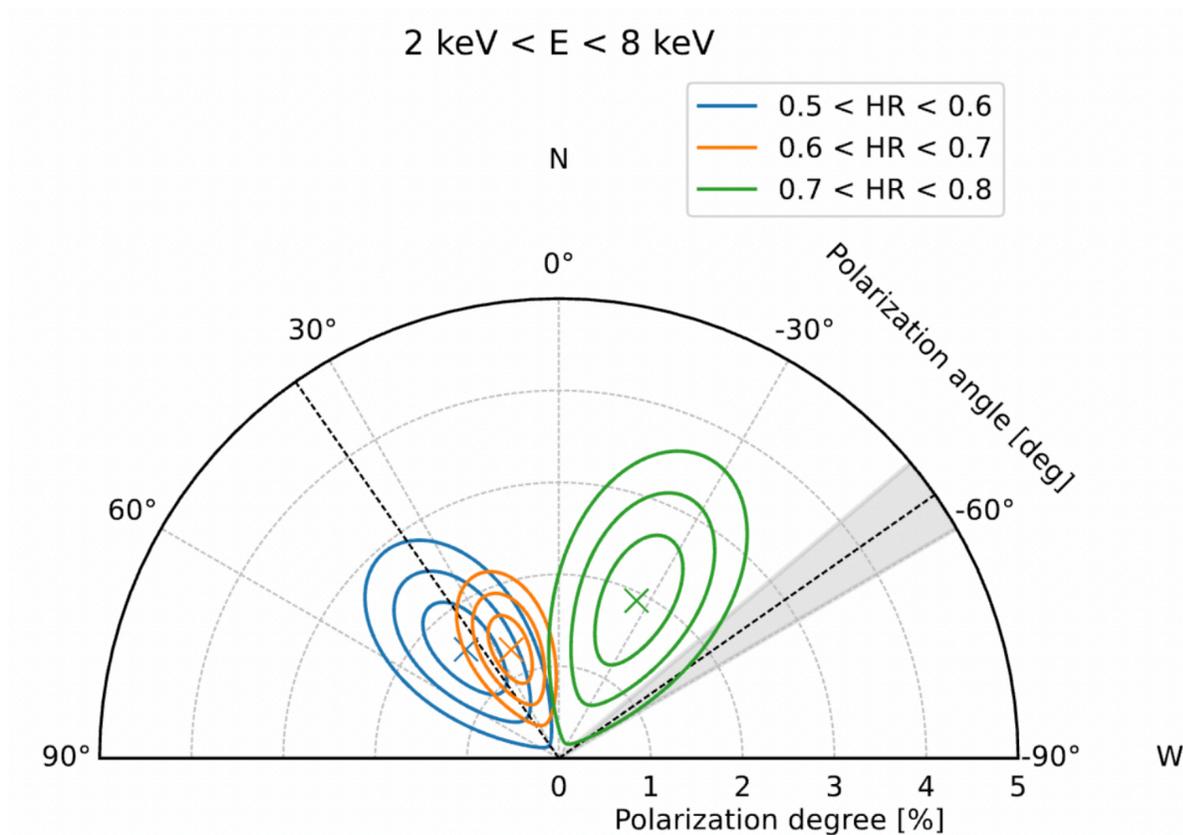
- Вопрос: как угол поляризации может изменяться *не* на 90 градусов?



# Cir X-1 (Rankin et al. 2024)

Поворот плоскости поляризации со временем и с жесткостью: наклонённая звезда?

- Cir X-1 — очень молодая система (~10 тысяч лет!)



# GX 13+1

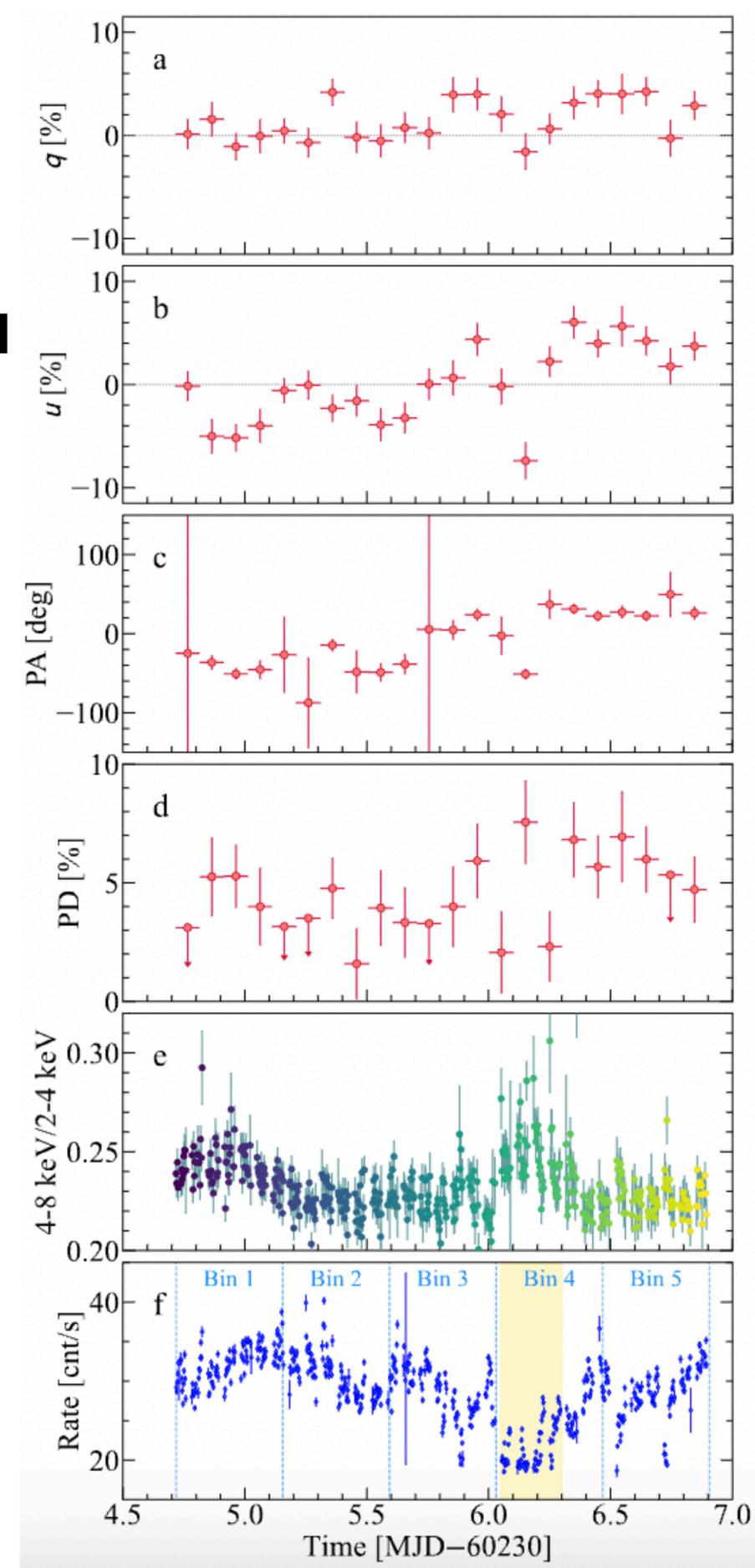
## Система, не поддающаяся классификации

- Яркий (0.5 Эддингтоновской светимости) и постоянный источник, барстер I типа
- Компаньон — гигант на поздней стадии эволюции
- Орбитальный период 24 дня (маломассивная двойная!)
- Высокое наклонение, расстояние 7 кПк
- QPO на 57-69 Гц
- Постоянное излучение в радиодиапазоне, высокий темп аккреции
- По поведению на HID и CCD похож на атолл
- В спектре доминирует диск, присутствуют жесткая компонента, отражение от диска и 7 линий рассеяния в ветре

# GX 13+1

## Первый взгляд на данные: в поисках корреляции

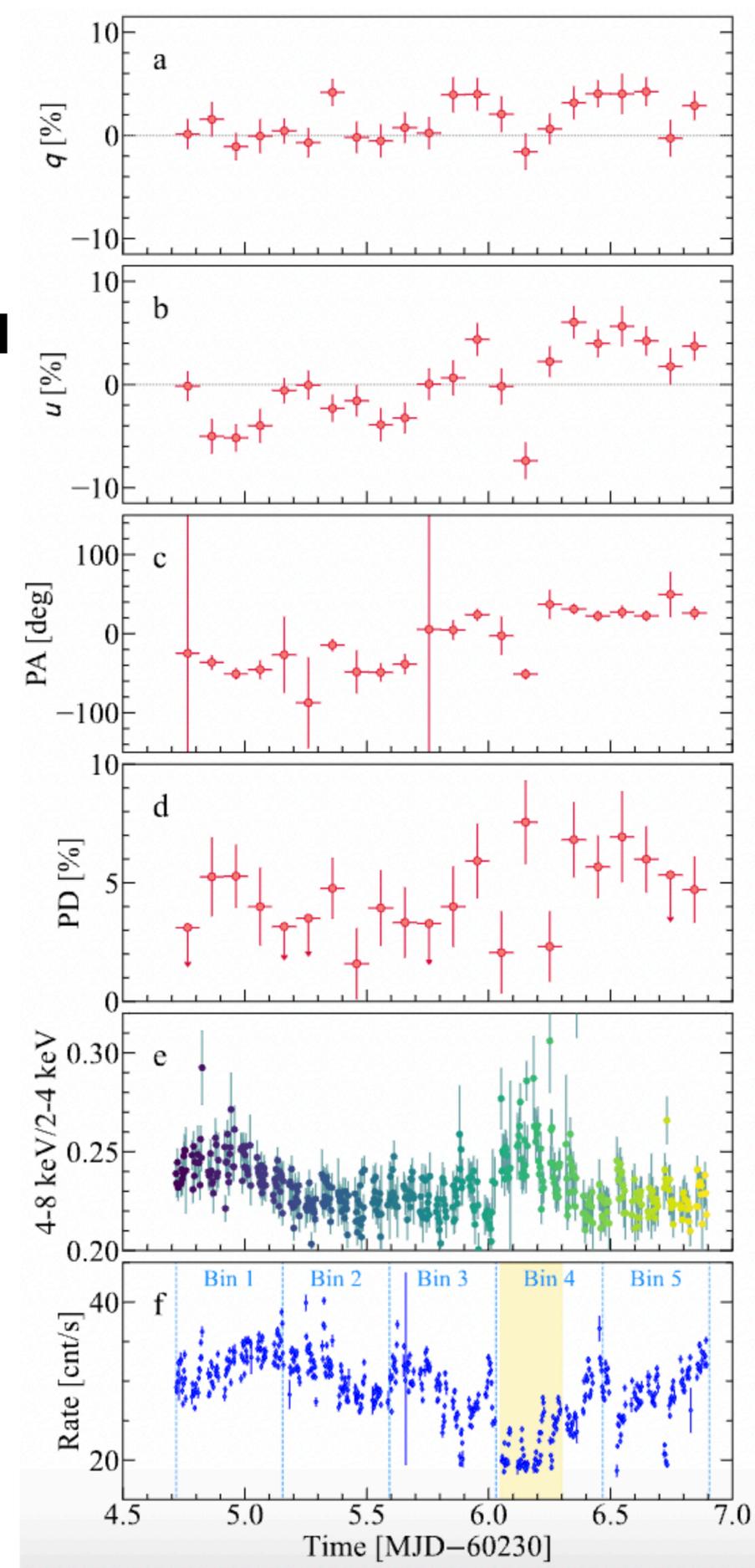
- Ненулевые  $q$  и  $u$  параметры
- Постепенный рост угла поляризации
- Существенные изменения в степени поляризации
- Необычная кривая блеска:
  - не тот провал!
  - сильная переменность



# GX 13+1

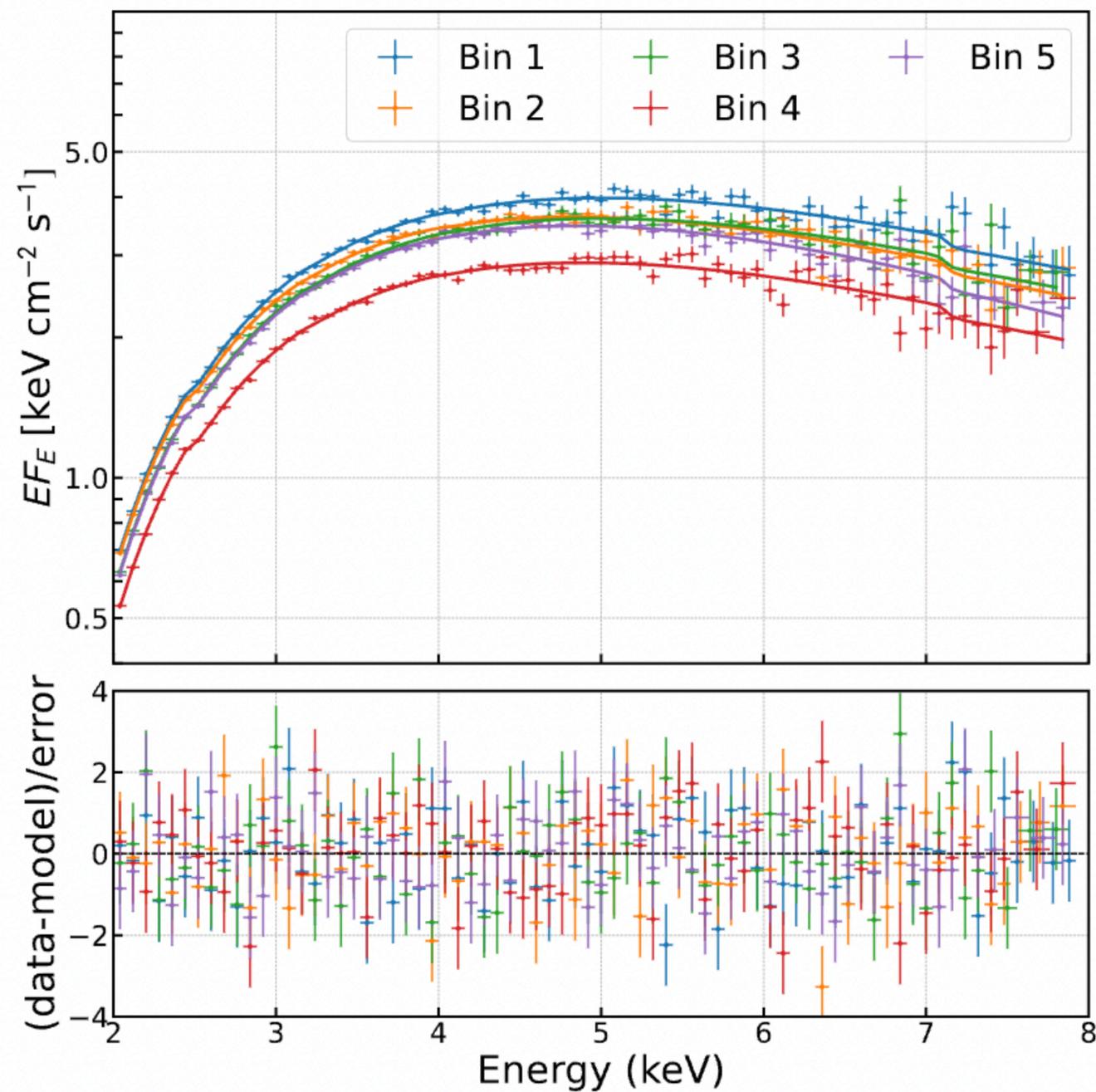
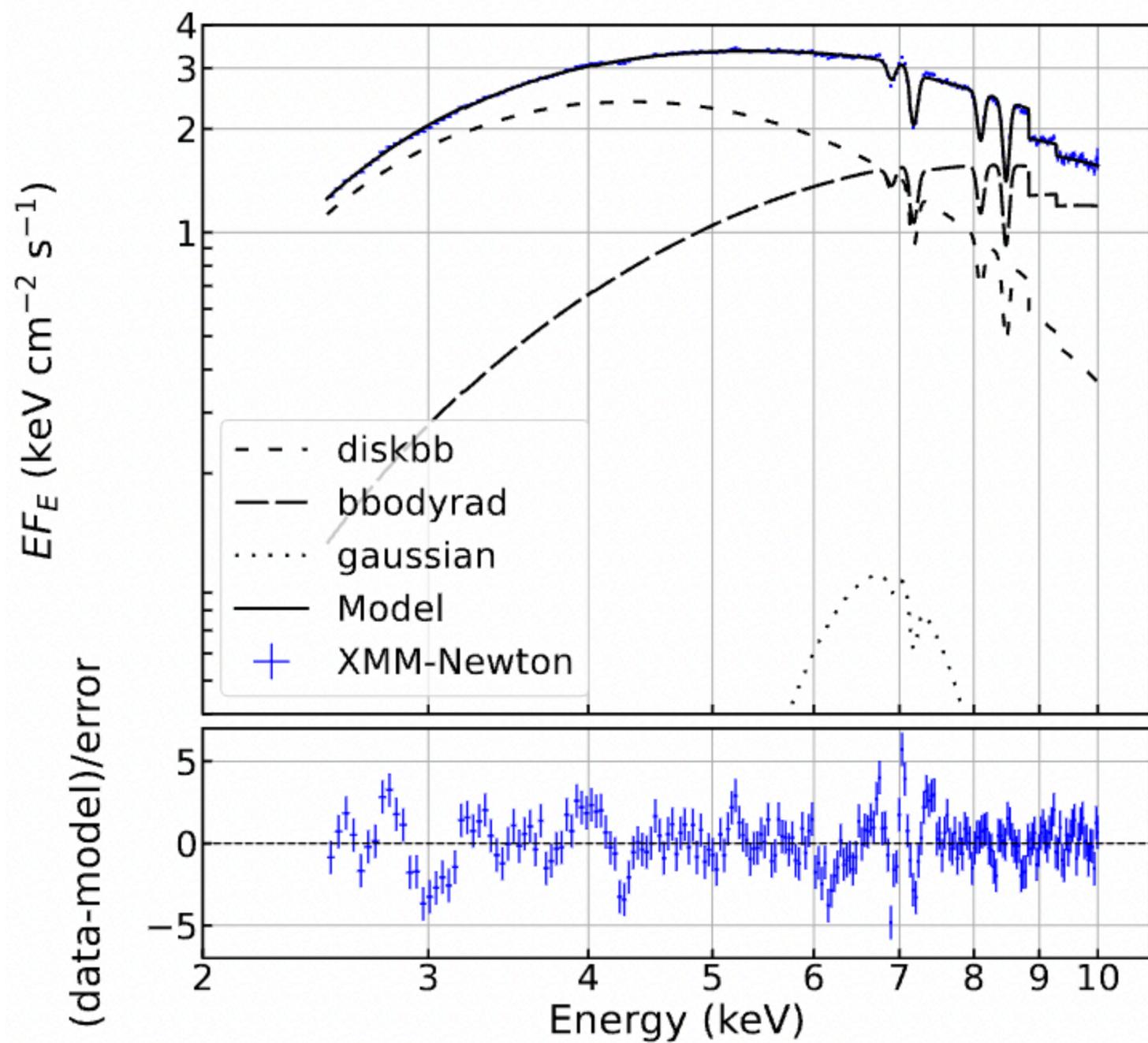
## Первый взгляд на данные: в поисках корреляции

- Нет смысла анализировать наблюдение целиком
- Проводим разделение:
  - По поведению кривой блеска (отдельно провал)
  - По времени (5 равных интервалов времени)
  - По count rate



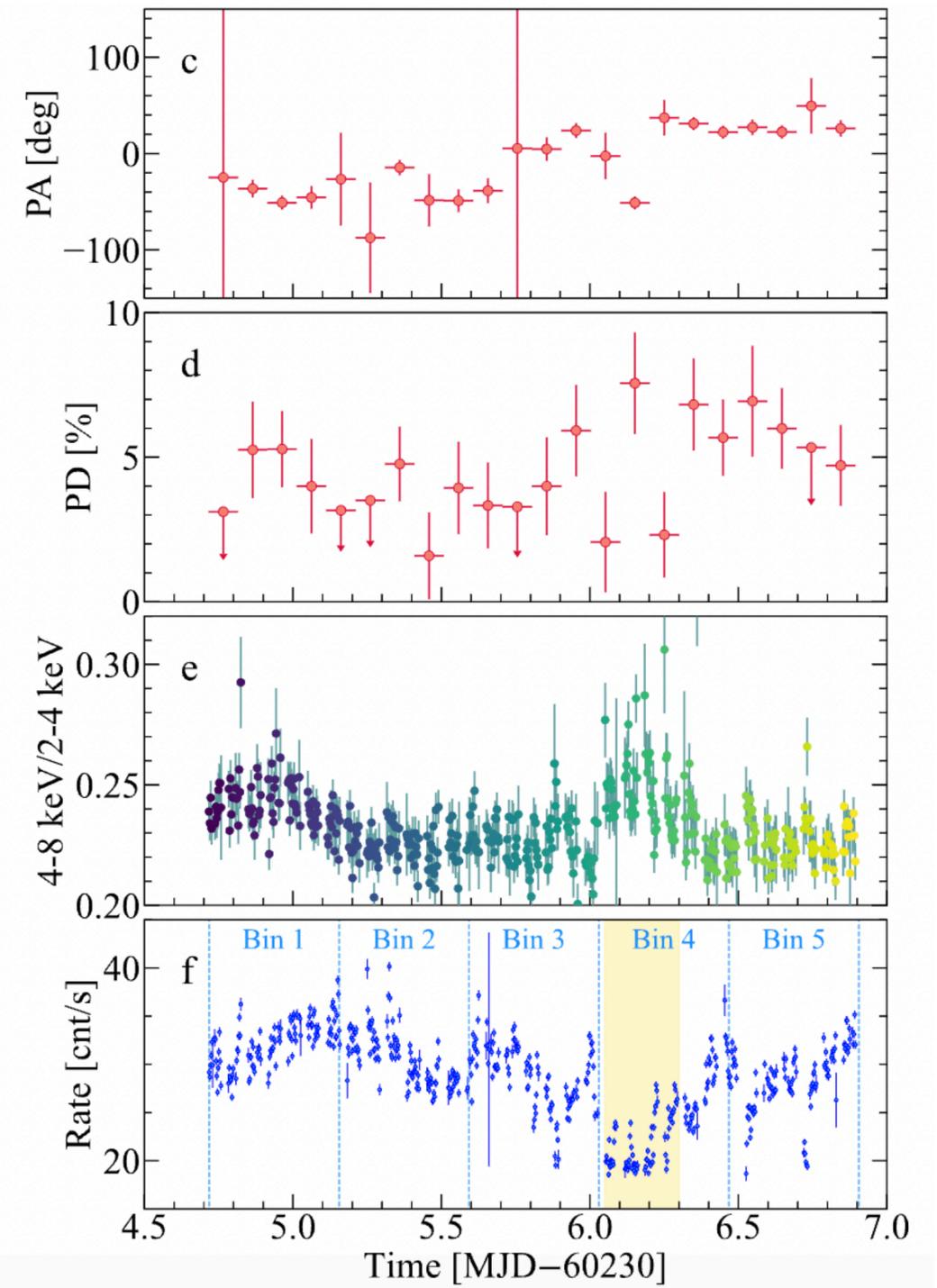
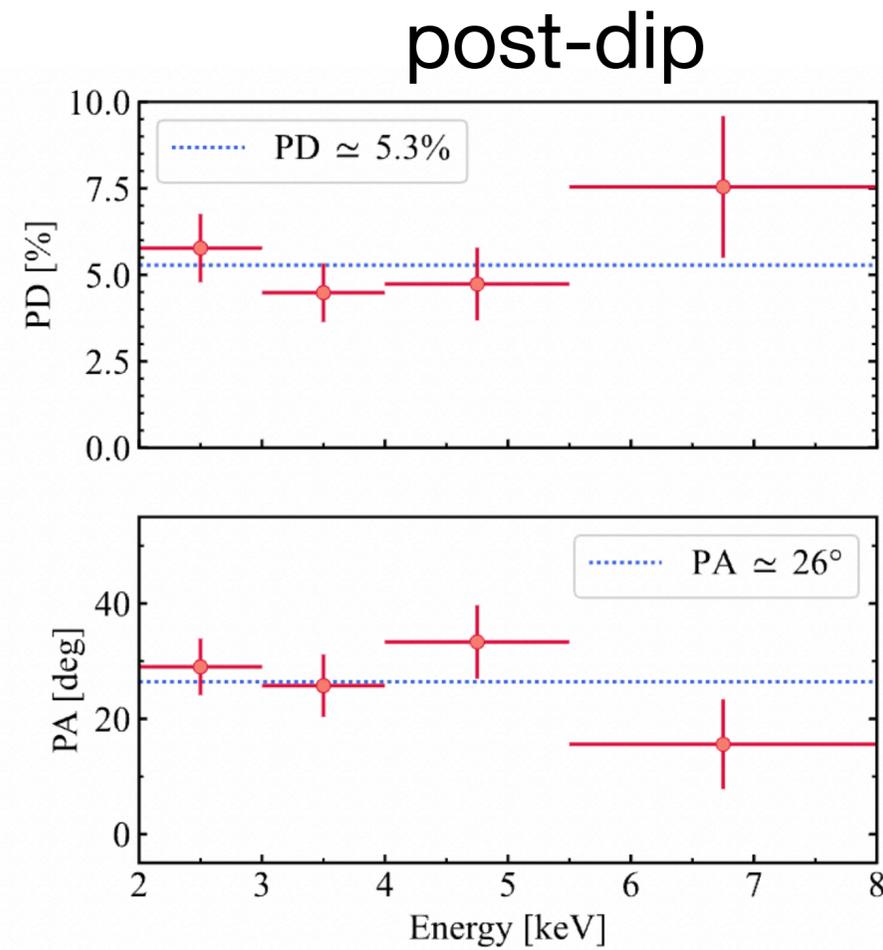
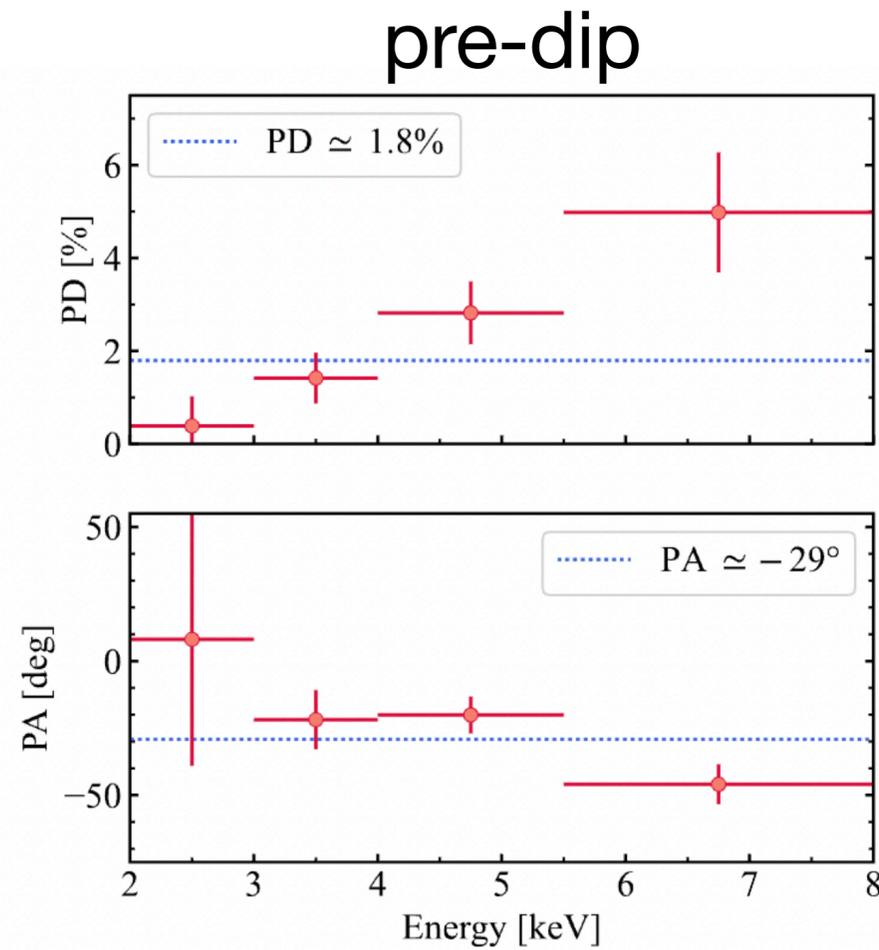
# GX 13+1

## Первый взгляд на данные: спектроскопия



# GX 13+1

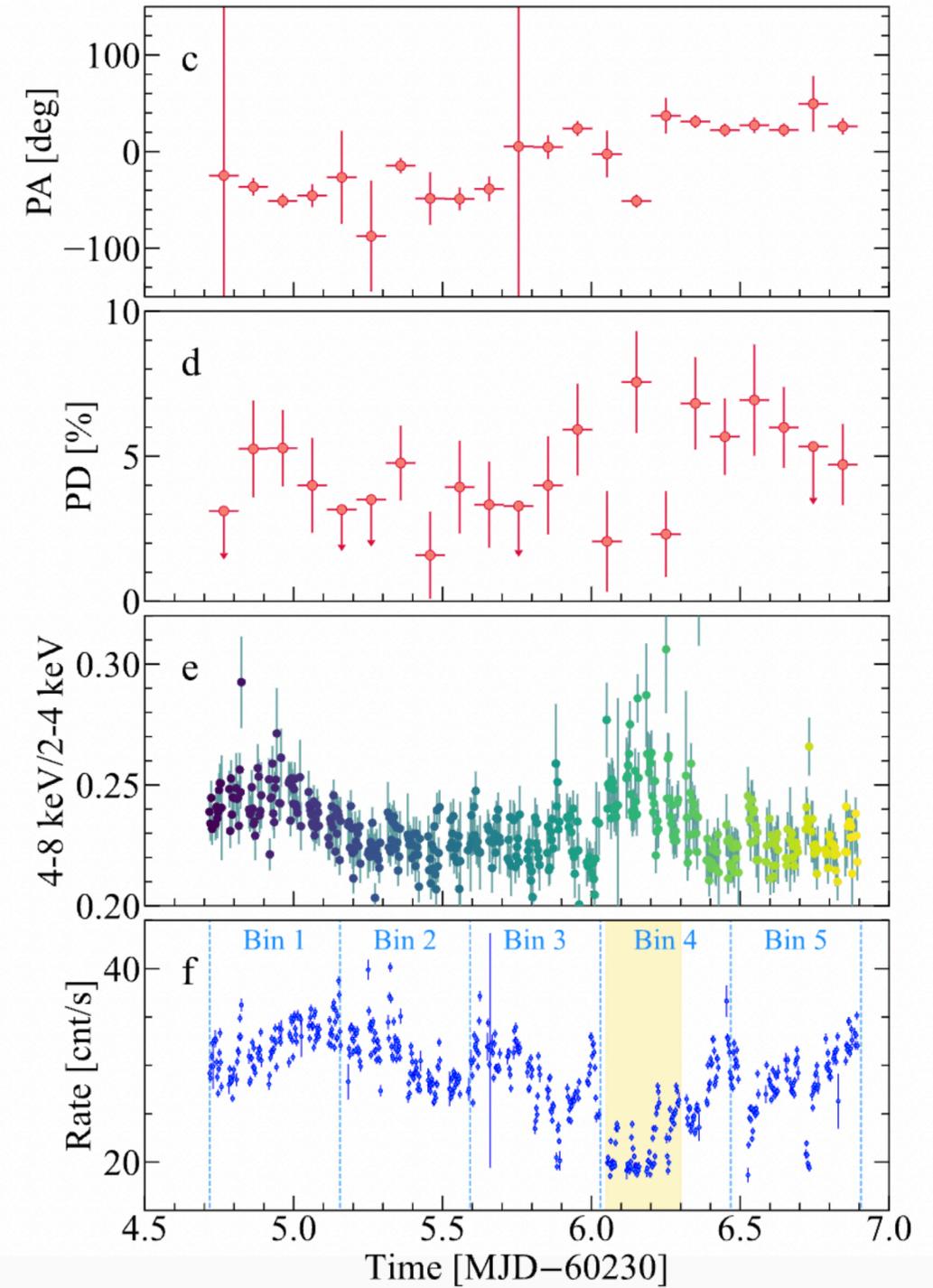
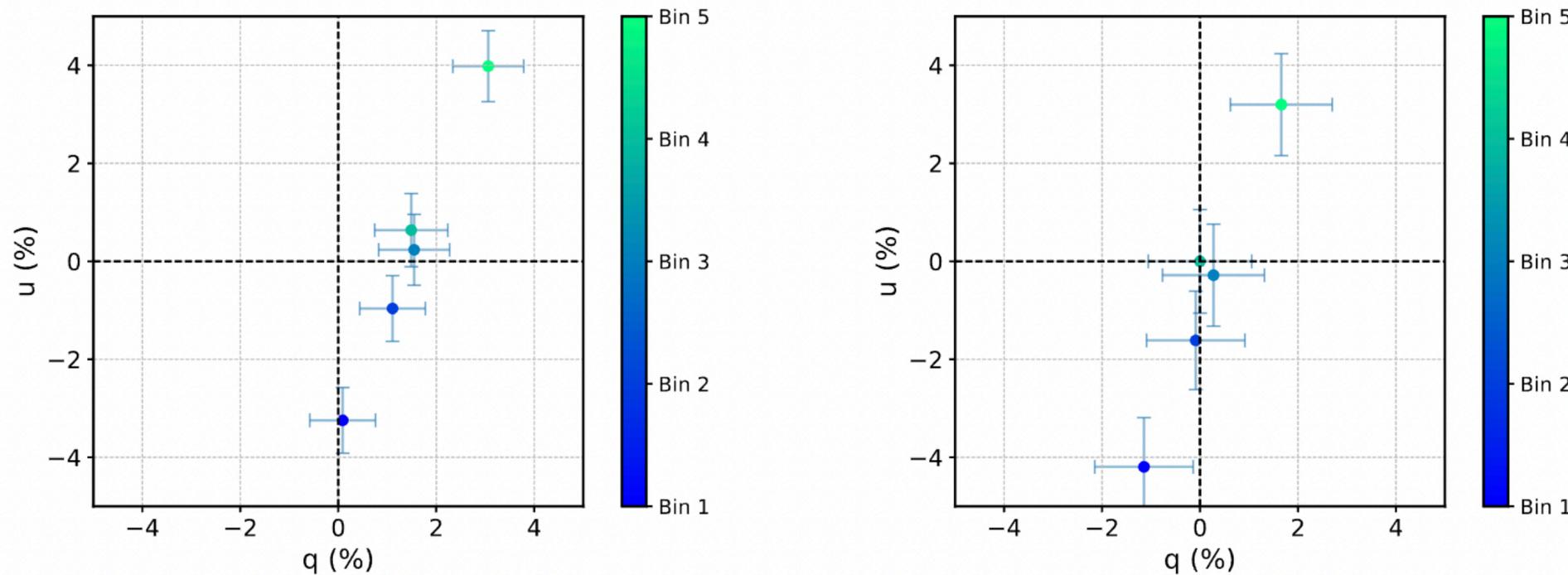
## Изменения в поведении с энергией и со временем



# GX 13+1

## Поворот плоскости поляризации со временем

- Постоянная компонента поляризации?
- Две компоненты отклонены на 30-40 градусов?

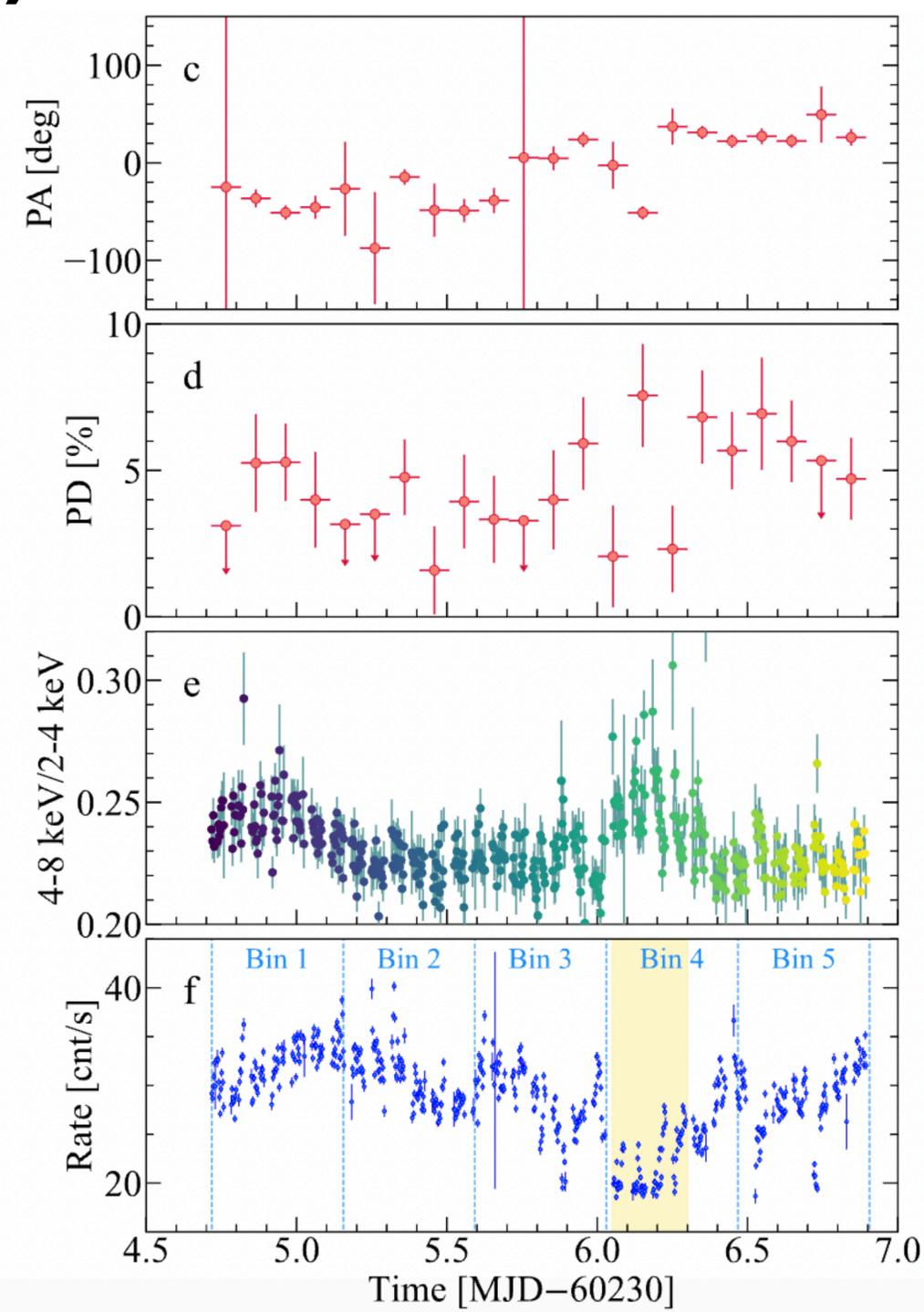


PCUBE	PD (%)	3.2±0.7	1.5±0.7	1.6±0.7	1.6±0.7	5.0±0.7
	PA (deg)	-44 ± 6	-21 ± 13	4±13	12±13	26±4

# GX 13+1

## Ничего не понятно (но очень интересно!)

- Существенные изменения в поведении поляриметрических характеристик со временем и с энергией
- Возможно присутствие постоянной компоненты поляризации
- Отклонение оси вращения нейтронной звезды от оси вращения двойной системы на 30-40 градусов?
- Вопросы: почему меняется поляризация, если спектр остаётся постоянным? Откуда идёт постоянная поляризация? Важен ли ветер?
- Новое наблюдение GX 13+1 с IXPE идёт **прямо сейчас**



# Заключение

# Заключение

## IXPE и слабозамагниченные нейтронные звёзды

- IXPE пронаблюдал 10 слабозамагниченных нейтронных звёзд. 7 статей опубликованы, ещё 3 находятся в процессе рецензирования
- Практически во всех источниках задетектирована поляризация
- В атоллах PD растёт с энергией. В Z-источниках PD почти константа. *В GX 13+1...*
- В Z-источниках PD в жёстком состоянии выше, чем в мягком
- Иногда мы наблюдаем смещение плоскости поляризации со временем
- Мы рады заключить, что в настоящий момент вопросов у нас больше, чем ответов
- Миссия была рассчитана на 2 года, и эти 2 года прошли. Сейчас каждый может подать заявку и получить время на IXPE. У нас же появилось время анализировать результаты, искать зависимости и объяснения для увиденного.

# Вращение плоскости поляризации в барстере GX 13+1 и другие поляризационные свойства слабозамагниченных нейтронных звёзд

Анна Бобрикова, Юрий Поутанен

Университет Турку

Коллаборация Рентгеновского поляриметра IXPE