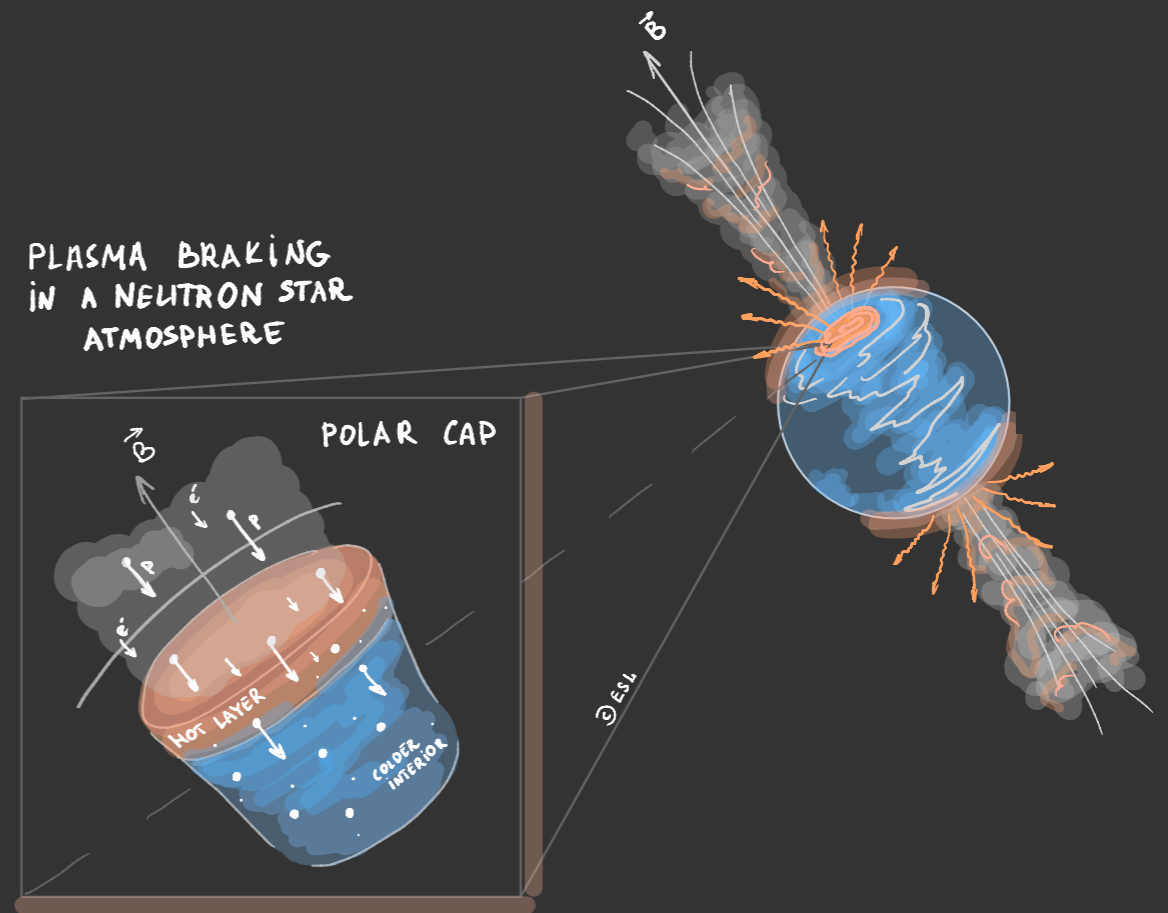


# Рентгеновское излучение магнитных полюсов нейтронных звезд при низких темпах аккреции

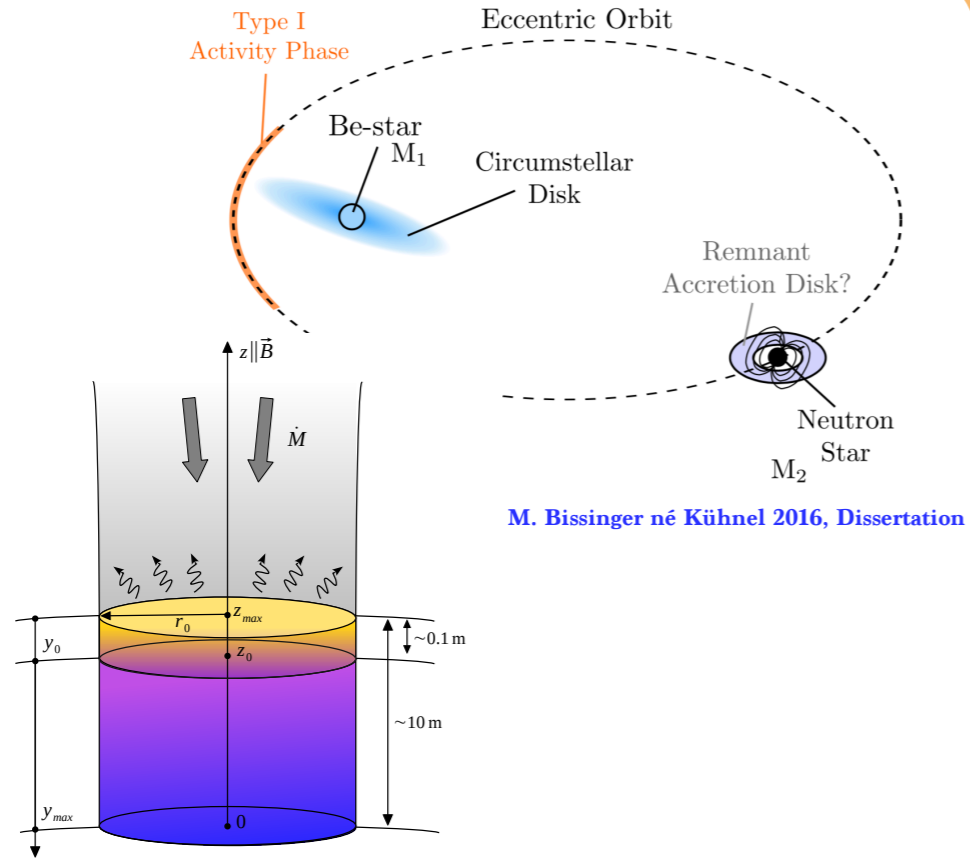
Екатерина Соколова-Лапа

Joern Wilms  
Mikhail Gornostaev  
Sebastian Falkner  
Konstantin Postnov  
Ralf Ballhausen  
Philipp Thalhammer  
Lucia Haerer  
Nikolai Shakura  
Javier A. Garcia  
Katja Pottschmidt  
and others



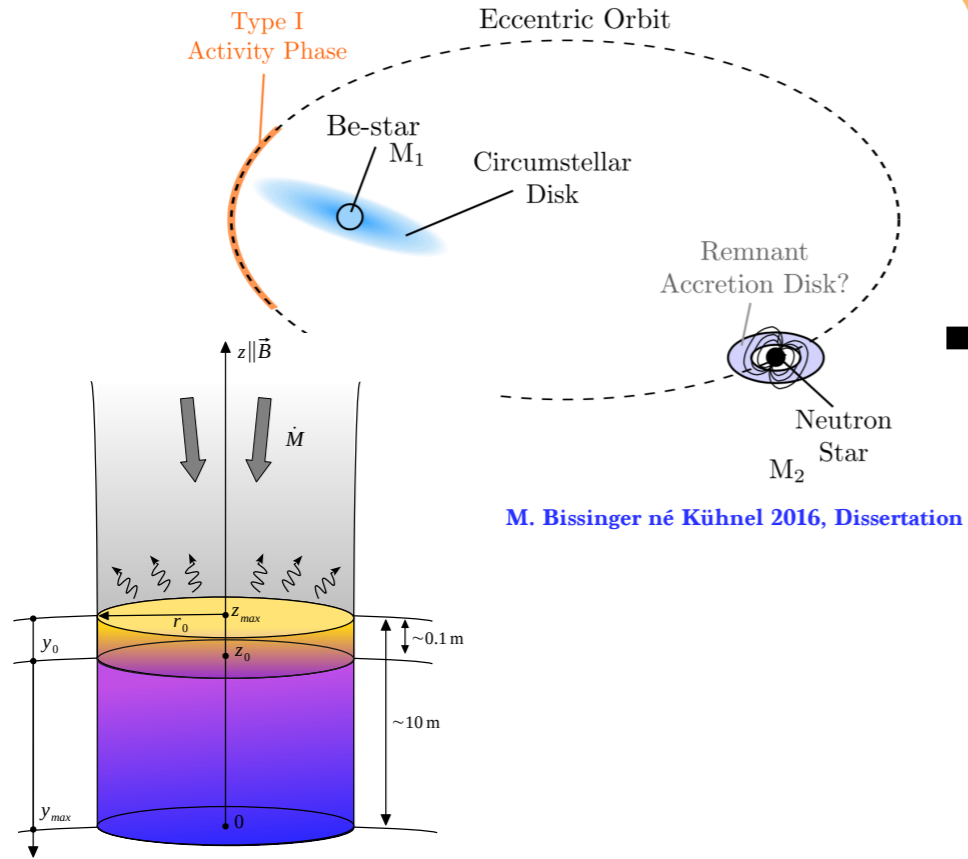
# Остановка аккреционного потока в атмосфере нейтронной звезды

Плазма падает при  $v \approx v_{ff}$  на полюса

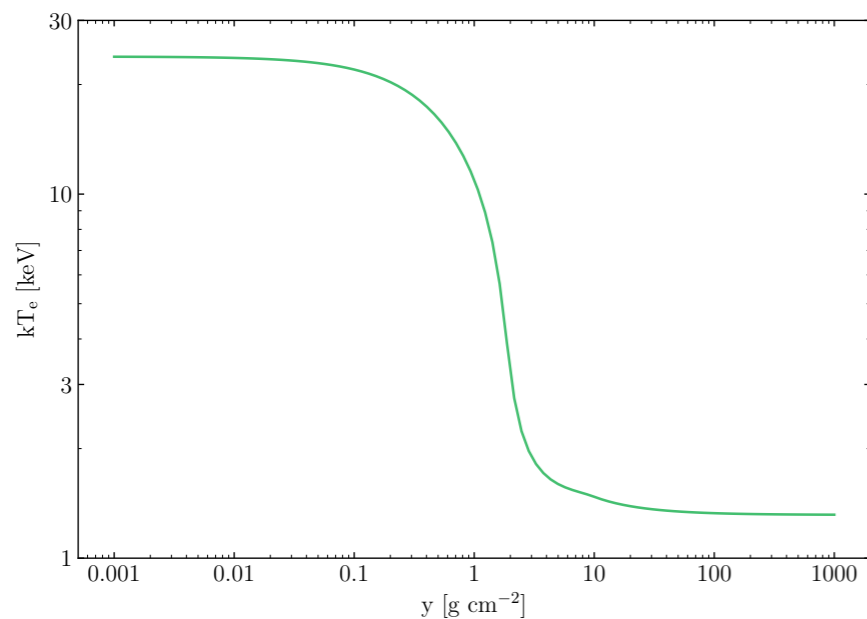
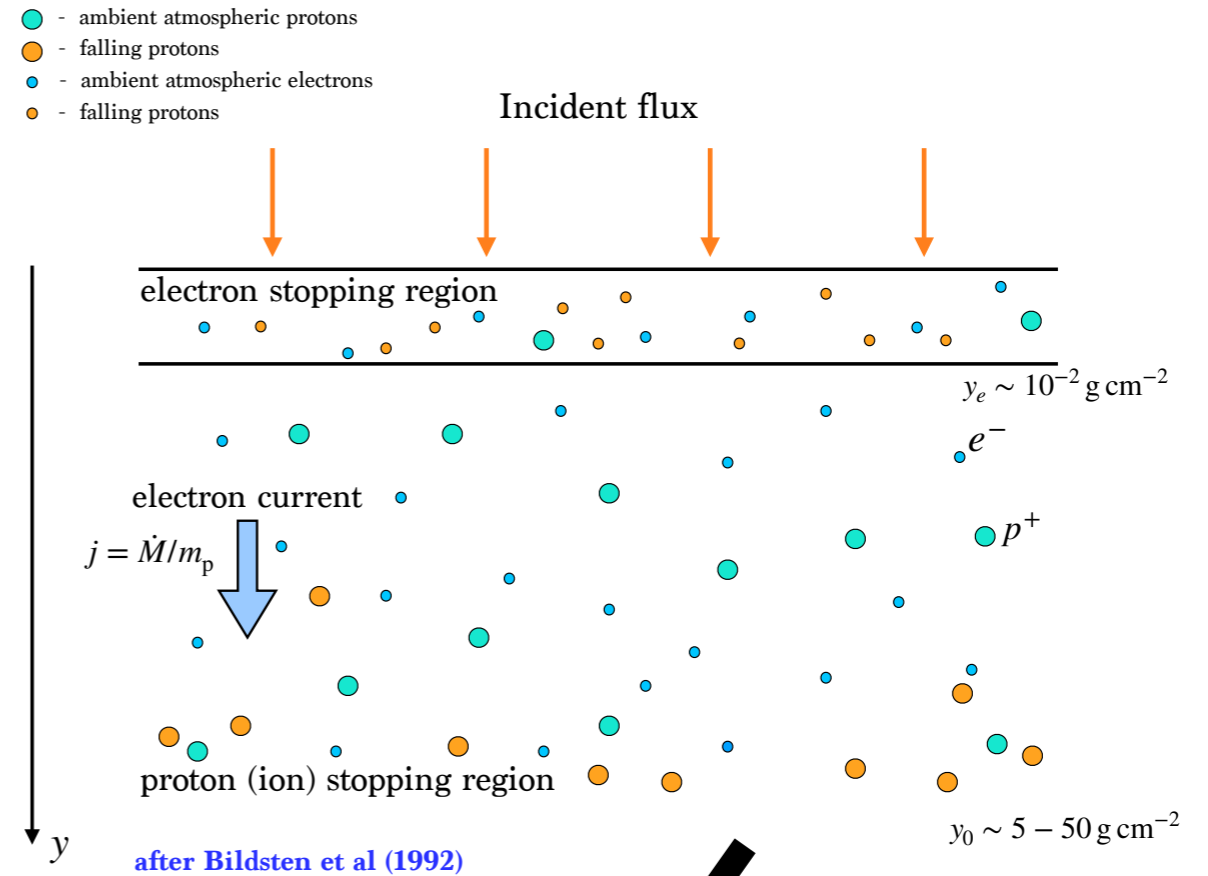


# Остановка аккреционного потока в атмосфере нейтронной звезды

## Плазма падает при $v \approx v_{ff}$ на полюса



## Кулоновское торможение в атмосфере



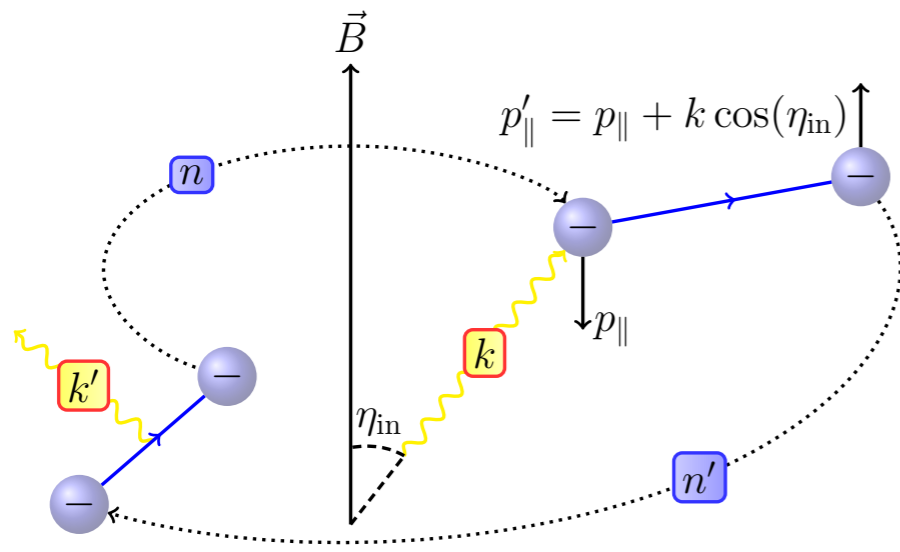
- Неоднородная структура атмосферы: горячий приповерхностный слой (электронная температура), переходная часть атмосферы с высоким градиентом температур и более холодные изотермические нижние слои
- Атмосфера в состоянии гидростатического равновесия (Bildsten et al. 1992)

Режим хорошо изучен, см:

Zel'dovich & Shakura (1969),  
Alme & Wilson (1973),  
Turolla et al. (1994),  
Deufel et al. (2001),  
Suleimanov et al. (2018), и др

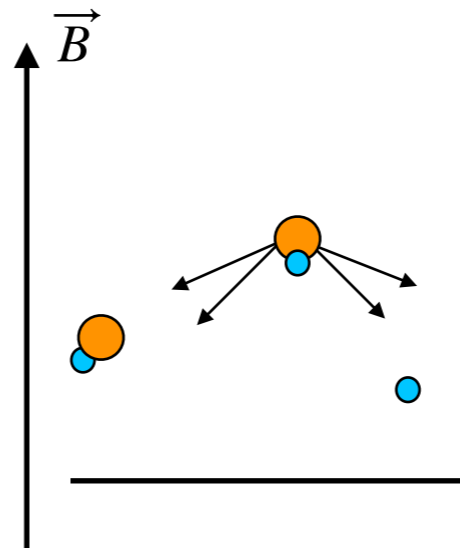
(для немагнитной плазмы)

## Уровни Ландау



(F.-W. Schwarm, priv. comm )

## Столкновительные возбуждения

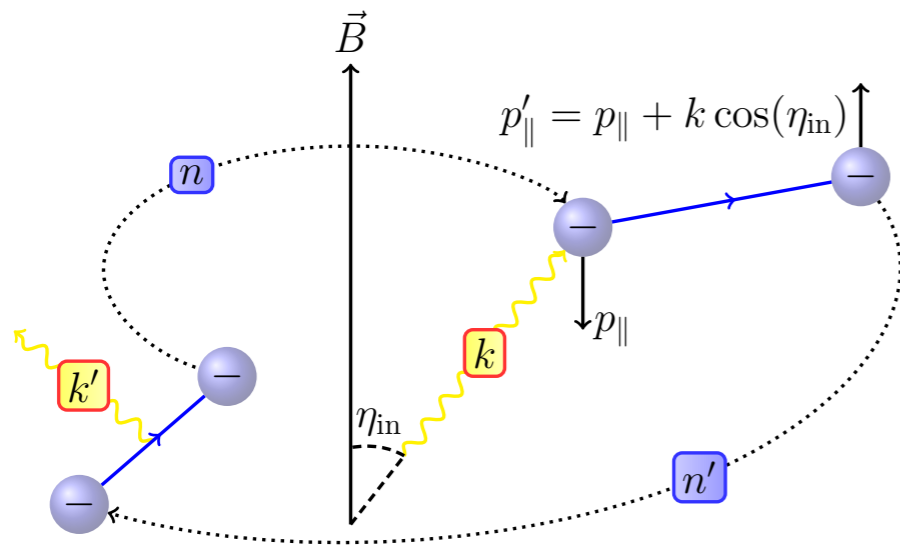


Возможность возбуждения электрона на более высокий энергетический уровень, с последующим радиативным распадом

(Miller et al. 1987 ( $0 \rightarrow 1$ ),  
Miller et al. 1989 ( $0 \rightarrow 2$ );  
Nelson et al. 1993, 1995 ( $0 \rightarrow n$ ))

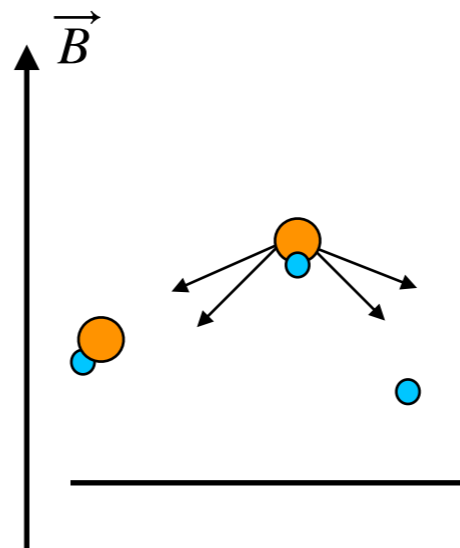


## Уровни Ландау



(F.-W. Schwarm, priv. comm )

## Столкновительные возбуждения



Возможность возбуждения электрона на более высокий энергетический уровень, с последующим радиативным распадом

(Miller et al. 1987 (0 → 1),  
Miller et al. 1989 (0 → 2);  
Nelson et al. 1993, 1995 (0 → n))

## Максимальный уровень Ландау который может быть возбужден при торможении протонов

$$n_{\max} = \frac{mv^2}{2E_{\text{cyc}}}$$

$$v \approx v_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{NS}}}{R_{\text{NS}}}}$$

$$\frac{E_{0 \rightarrow n}}{E_0} \approx 1 - \frac{1}{\ln(2n_{\max})}$$

(Nelson et al. 1993 )

for  $M_{\text{NS}} = 1.4 M_{\odot}$  and  $R = 10 \text{ km}$ :

$$E_{\text{cyc}} = 50 \text{ keV}$$

$$E_{\text{cyc}} = 60 \text{ keV}$$

$$E_{\text{cyc}} = 120 \text{ keV}$$

$$n_{\max} = 2$$

$$n_{\max} = 1$$

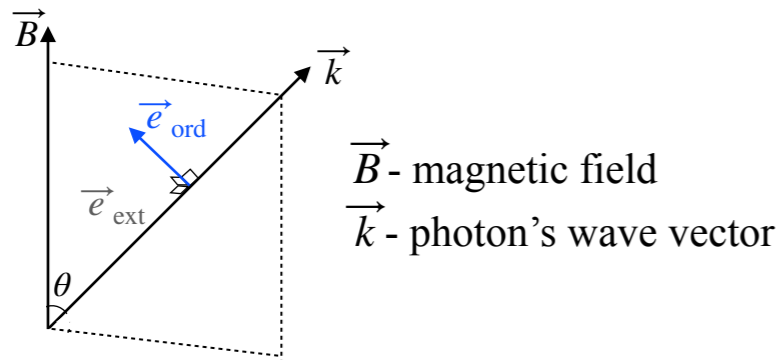
$$n_{\max} = 0$$

$$\frac{E_{0 \rightarrow 2}}{E_0} \approx 0.28$$

?

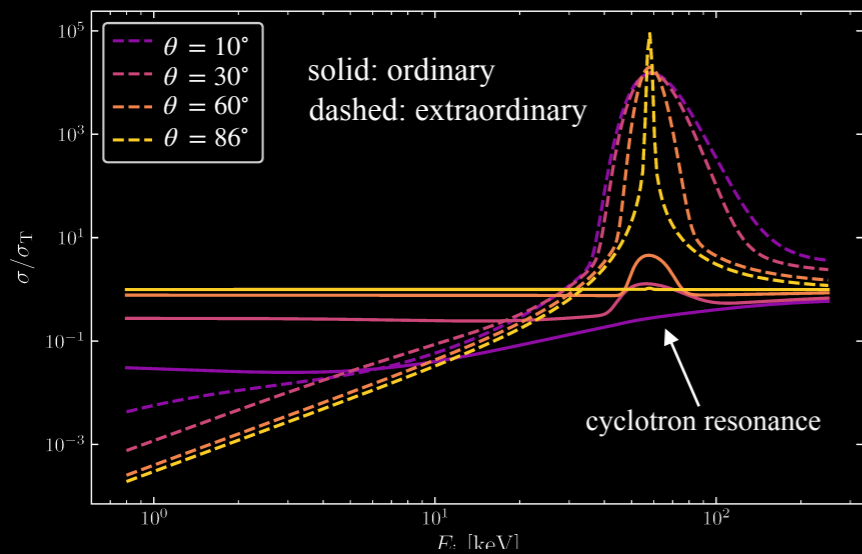
-

# Комptonовское рассеяние в магнитоактивной плазме. Поляризация вакуума

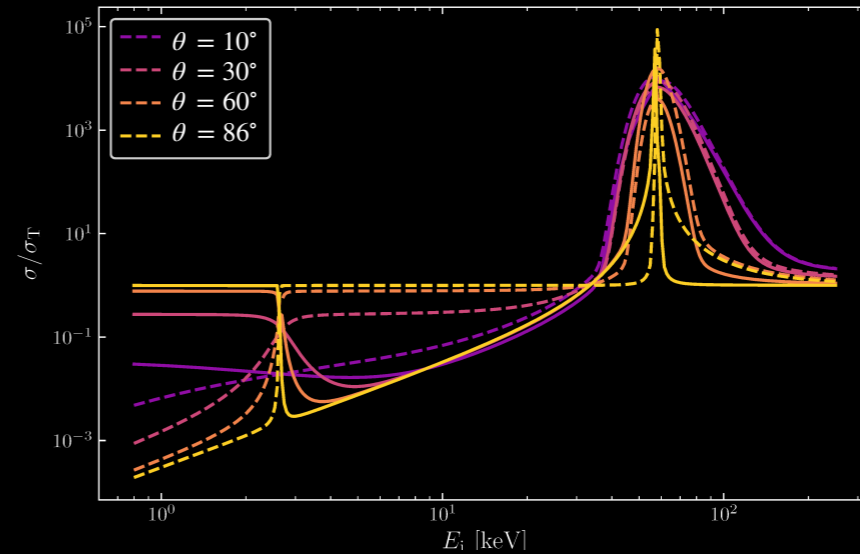


- две поляризационные моды фотонов
- намагниченная плазма + поляризованный вакуум - двулучепреломляющая среда
- фото-электронные взаимодействия различны для разных мод

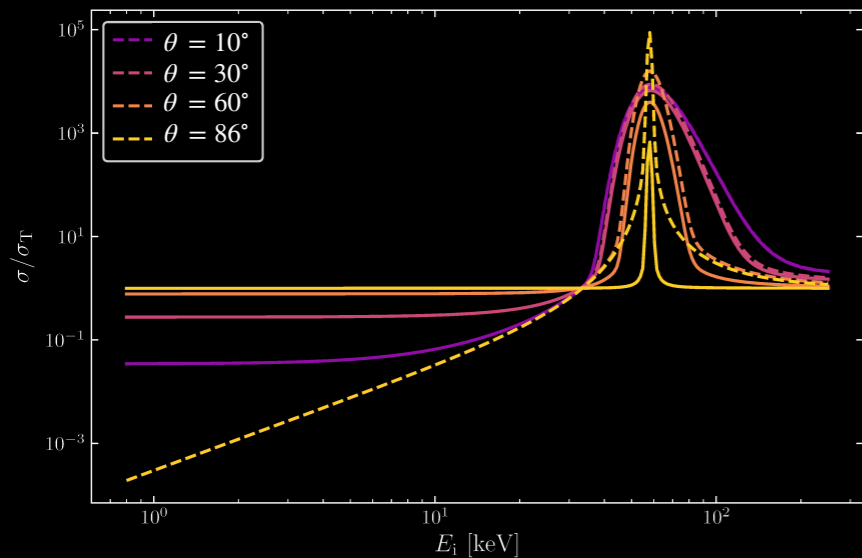
## Сечения для Комptonовского рассеяния



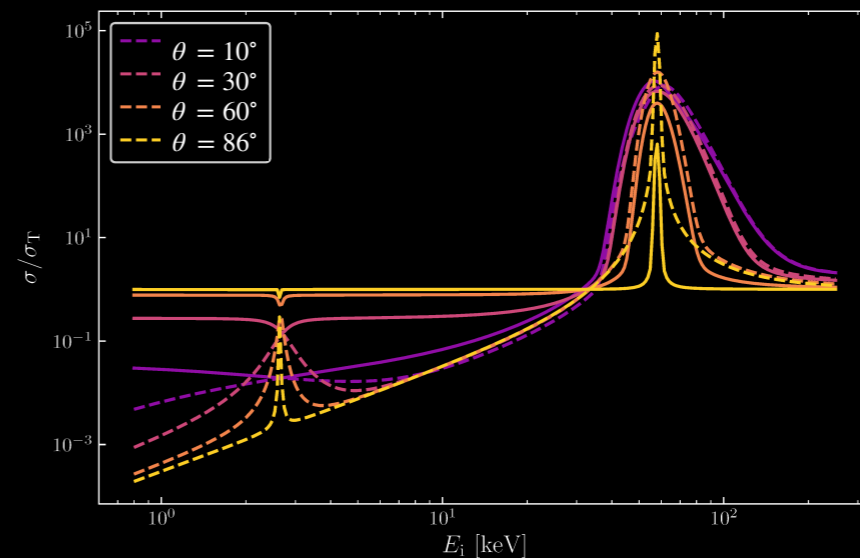
magnetized plasma

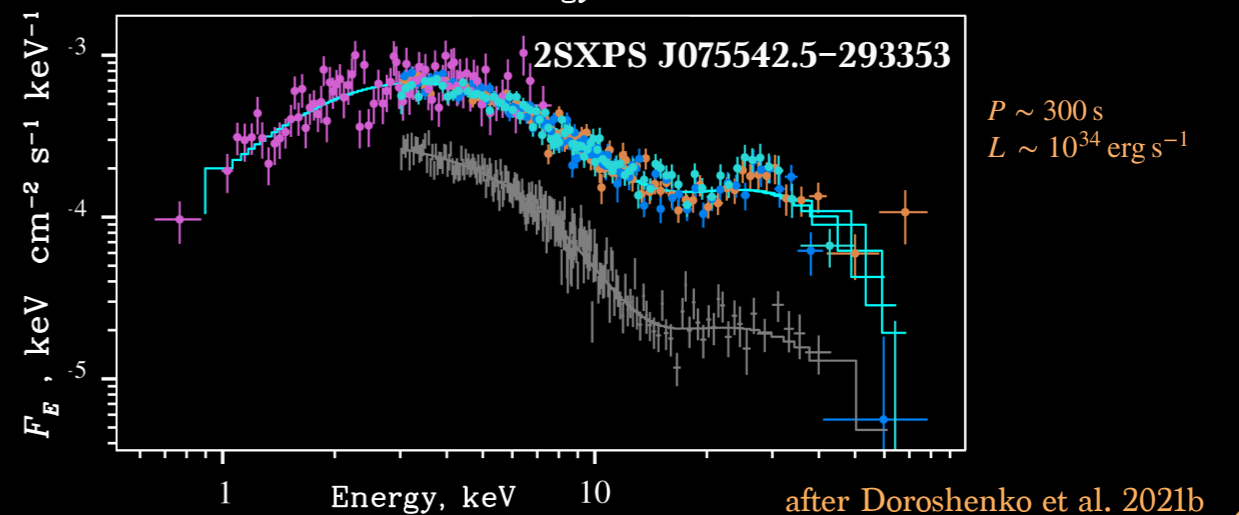
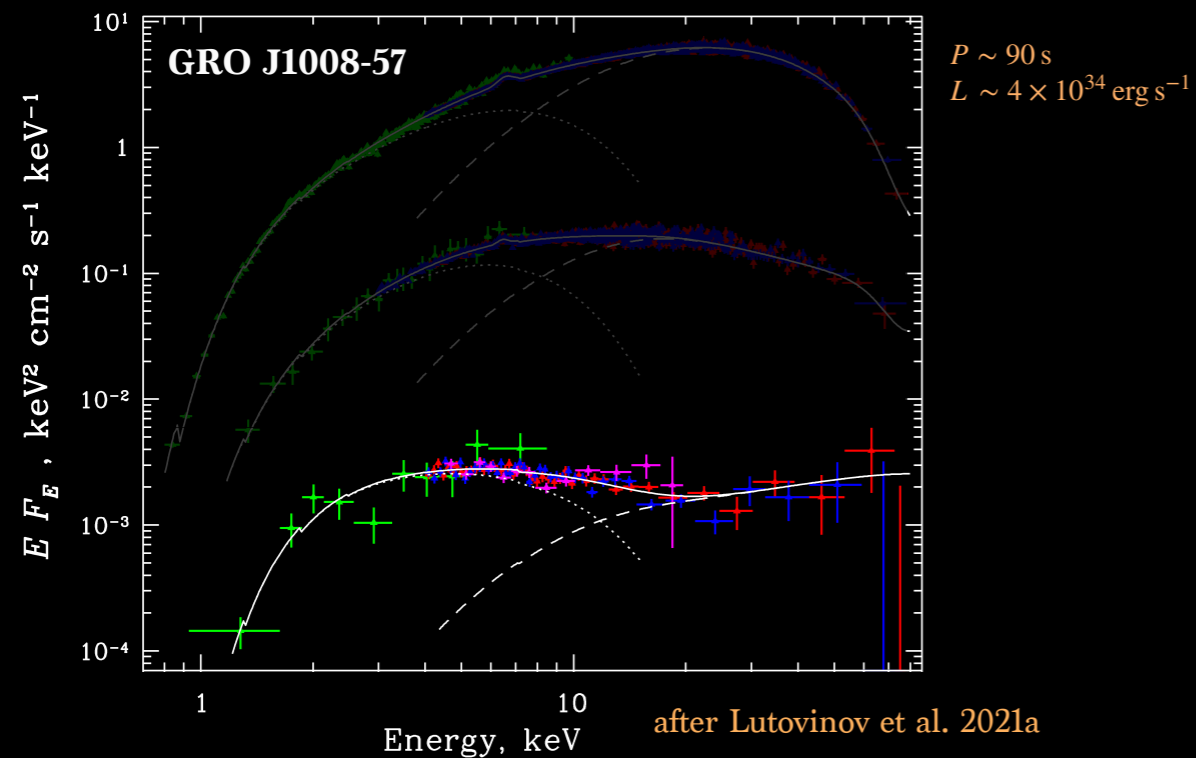
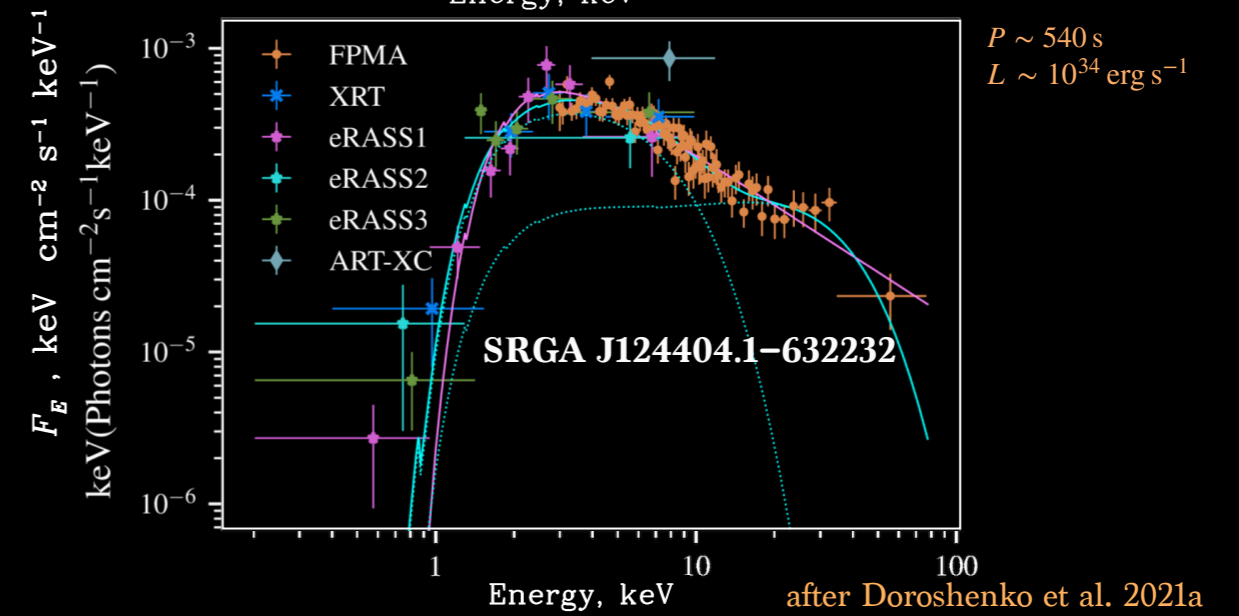
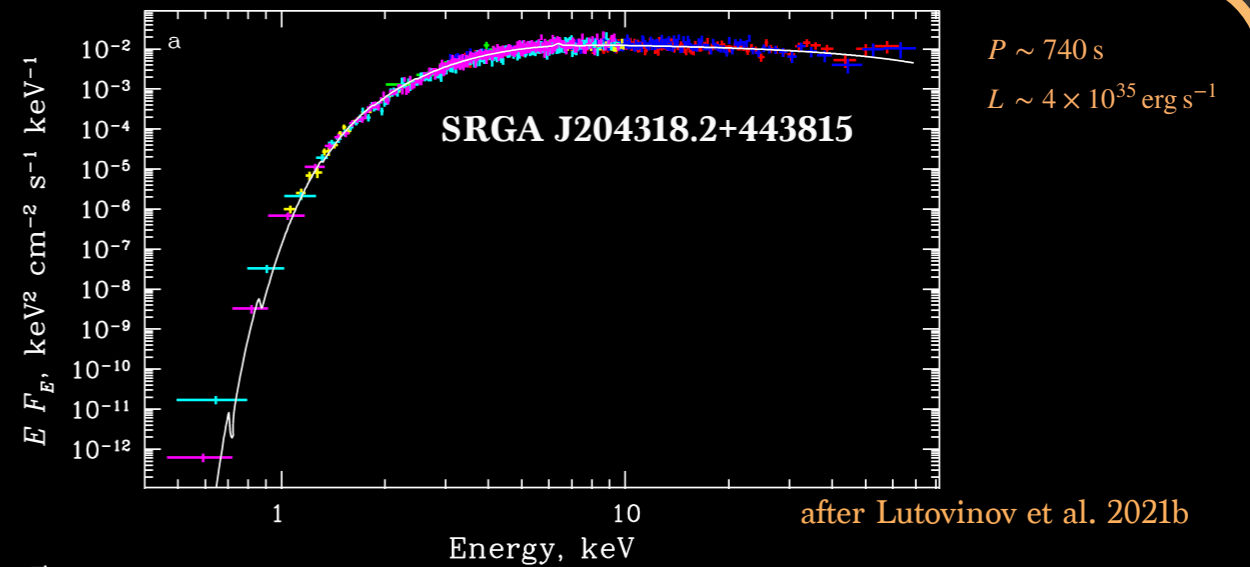
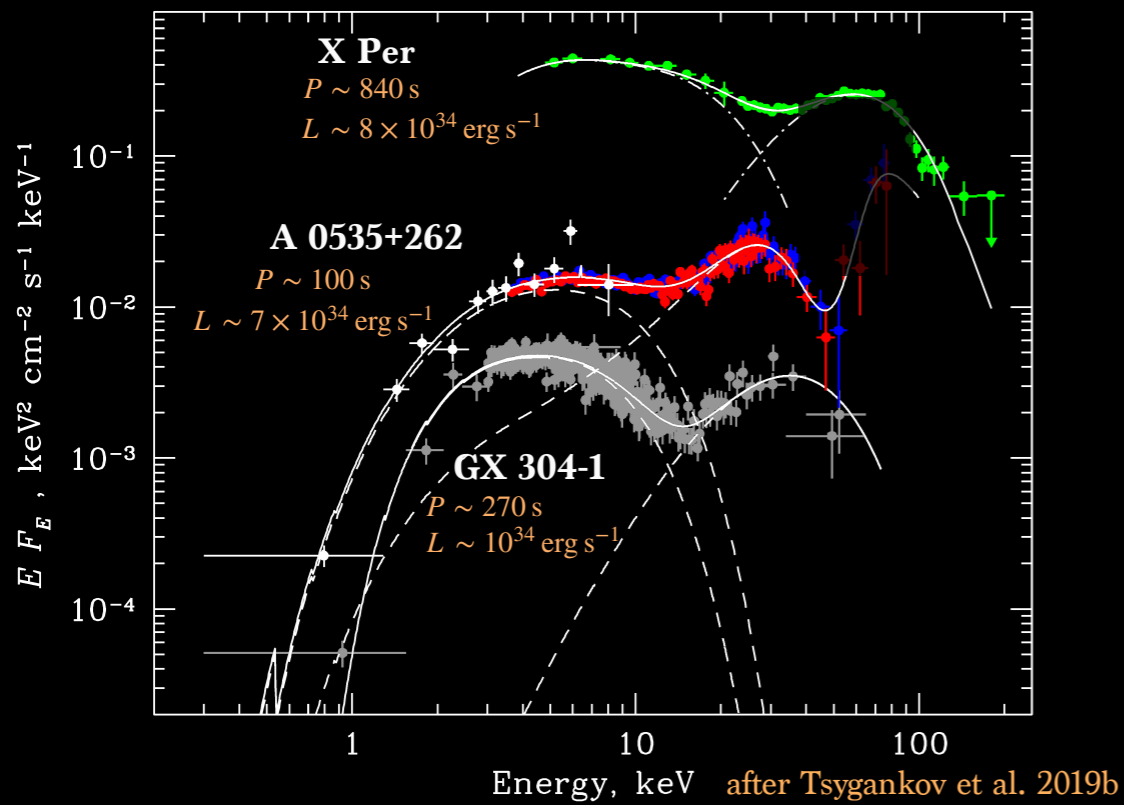


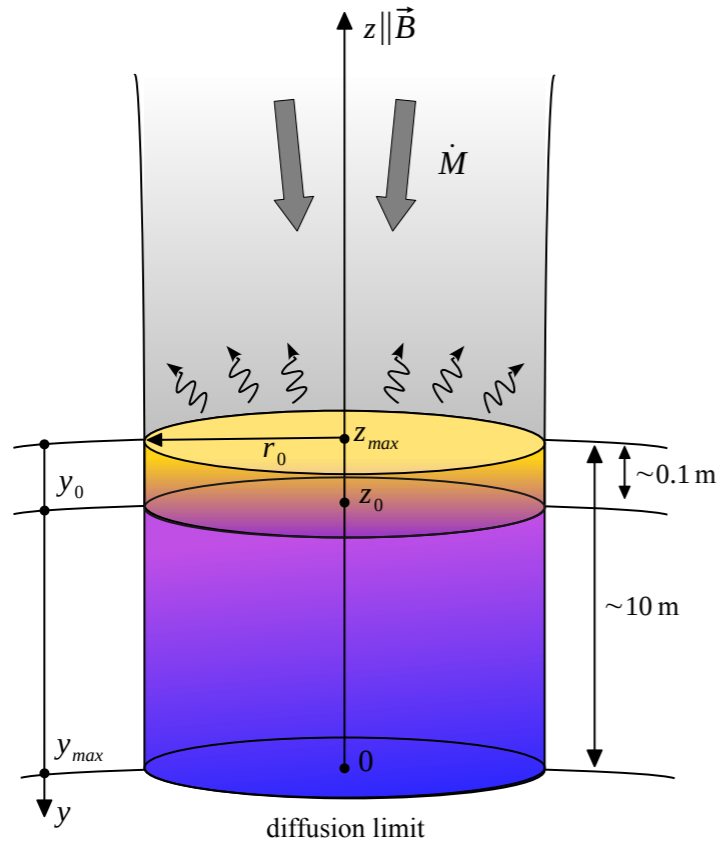
magnetized plasma + vacuum



polarized vacuum







Расчет переноса излучения (**Finrad** code) на полученной структуре атмосферы (**Zel'dovich & Shakura 1969**) → библиотека спектров для различных параметров ( $\dot{M}$ ,  $r_0$ ,  $E_{\text{cyc}}$ ,  $f_{\text{cyc}}$ ) → **polcap** table model (XSPEC / ISIS)

**Parameters:**

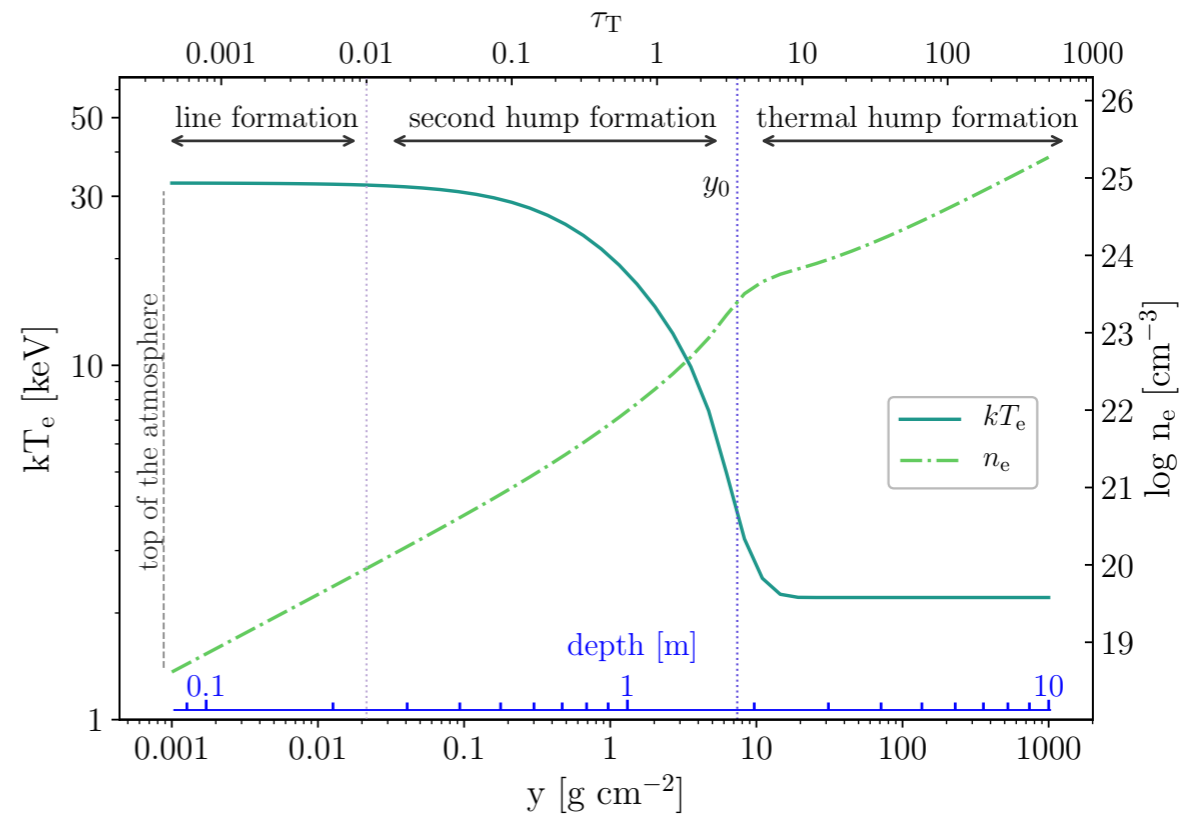
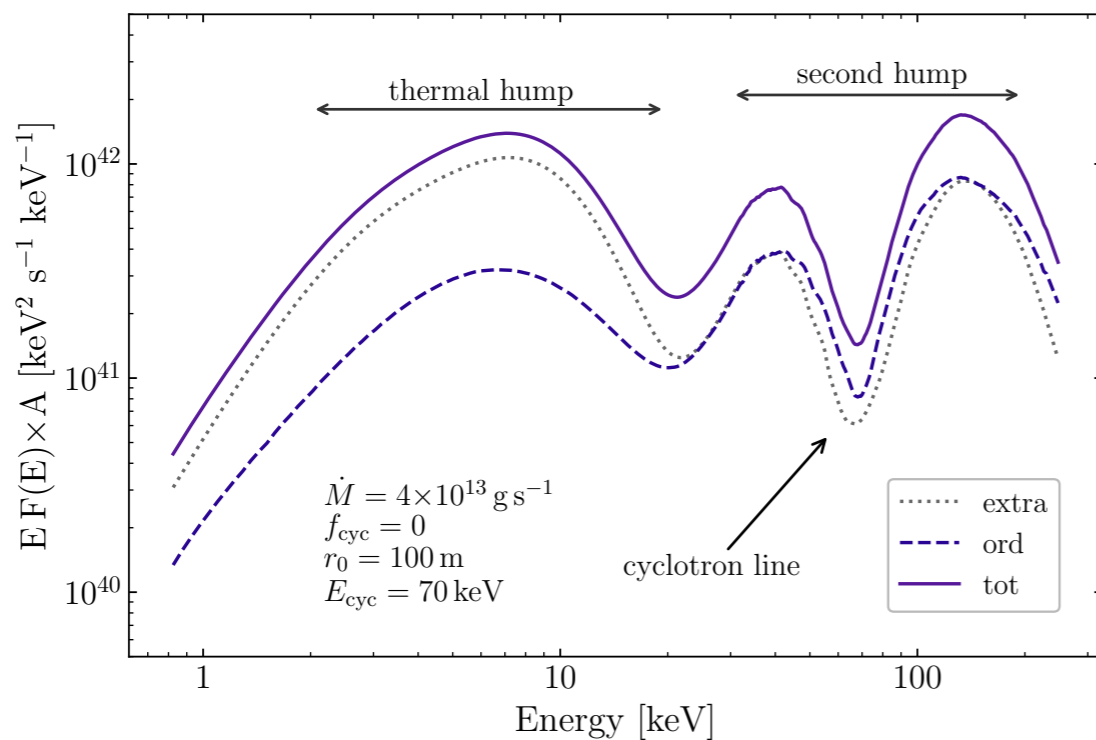
$$M_{\text{NS}} = 1.4 M_{\odot}, R = 12 \text{ km}$$

$\dot{M}$  - mass accretion rate

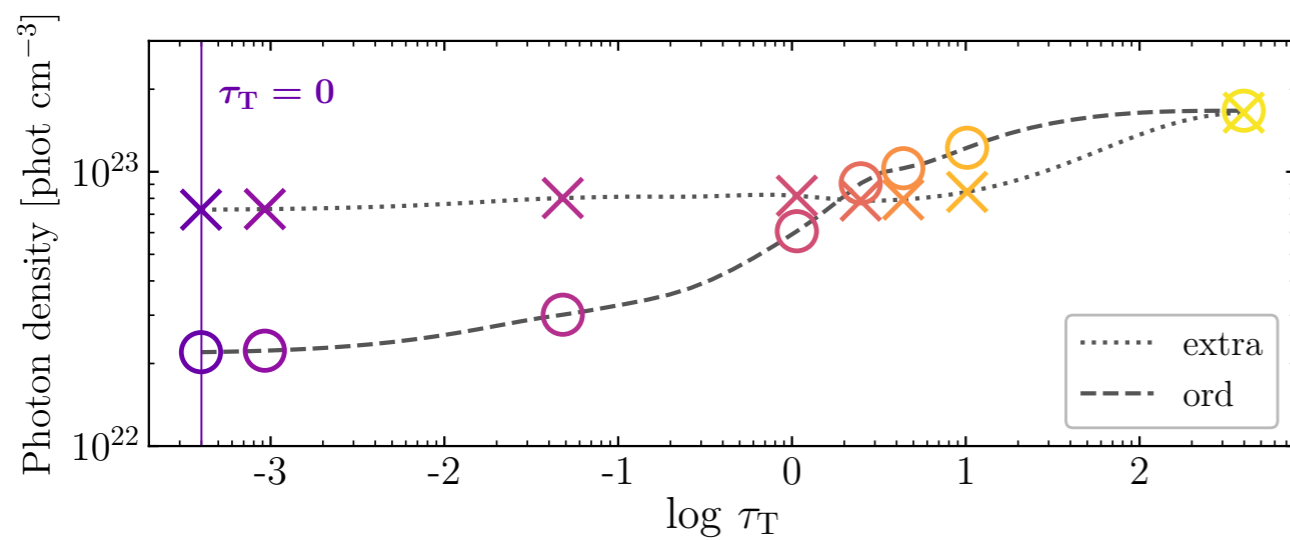
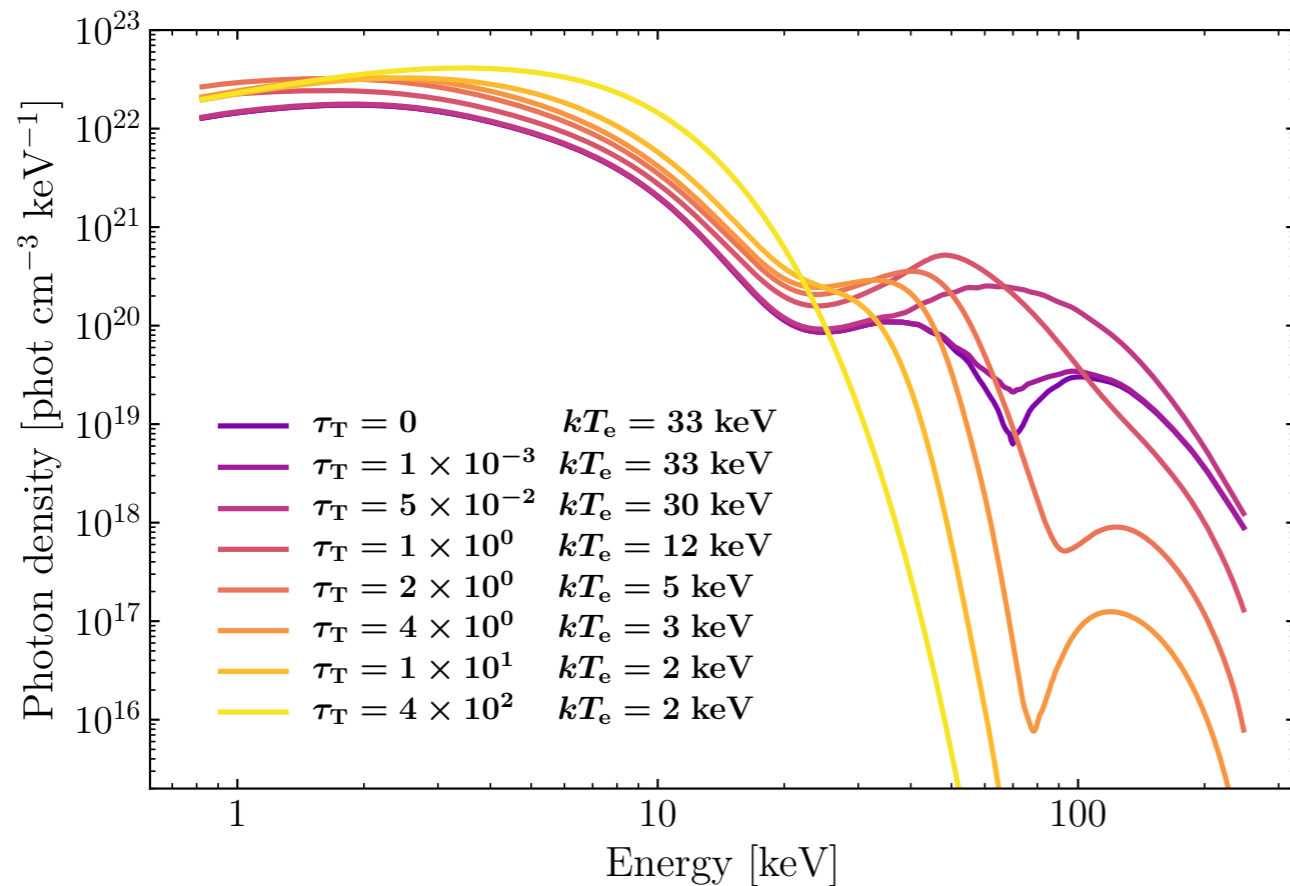
$r_0$  - polar cap radius

$E_{\text{cyc}}$  - surface **B**-field value (in terms of the cyclotron energy)

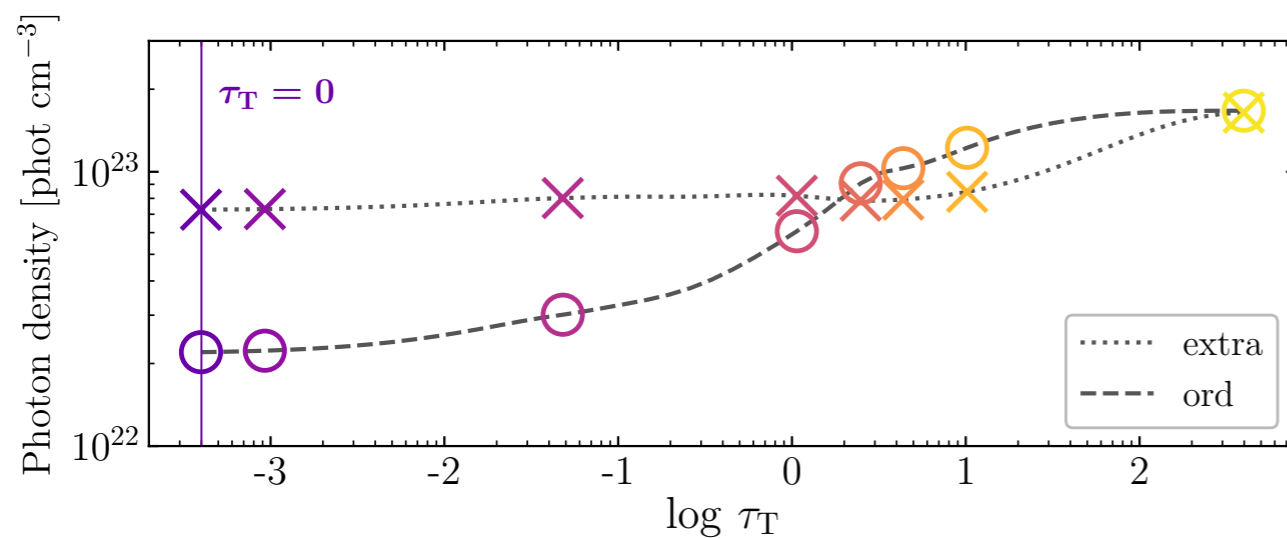
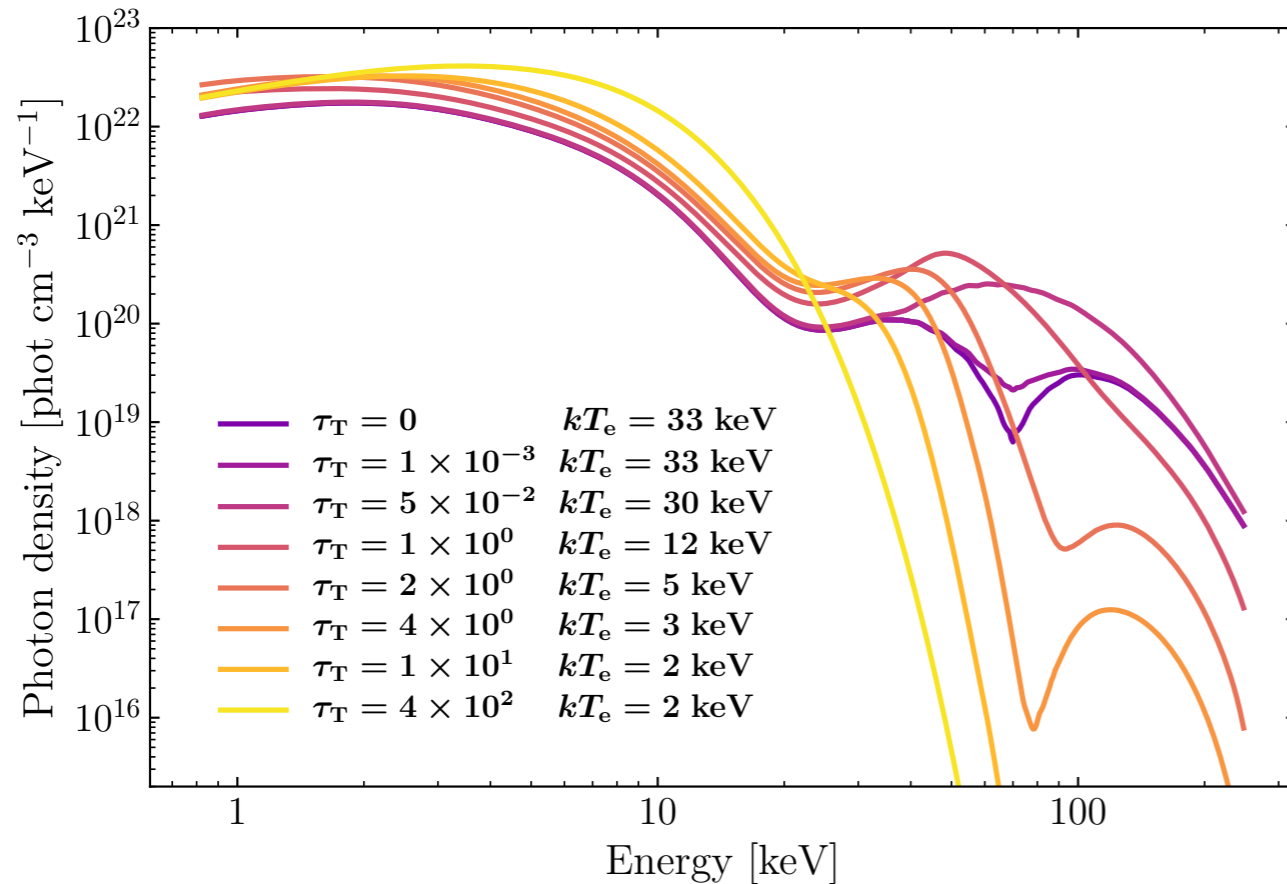
$f_{\text{cyc}}$  - fraction of accretion energy going to the collisional excitations



## Плотность поля излучения в атмосфере

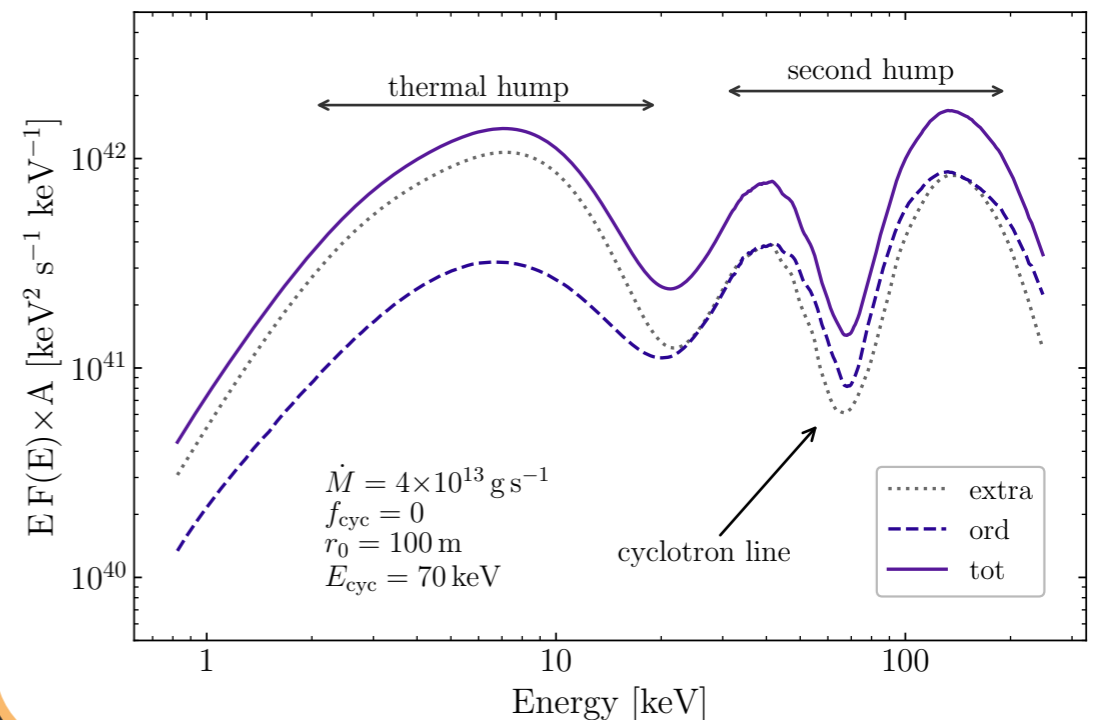


## Плотность поля излучения в атмосфере

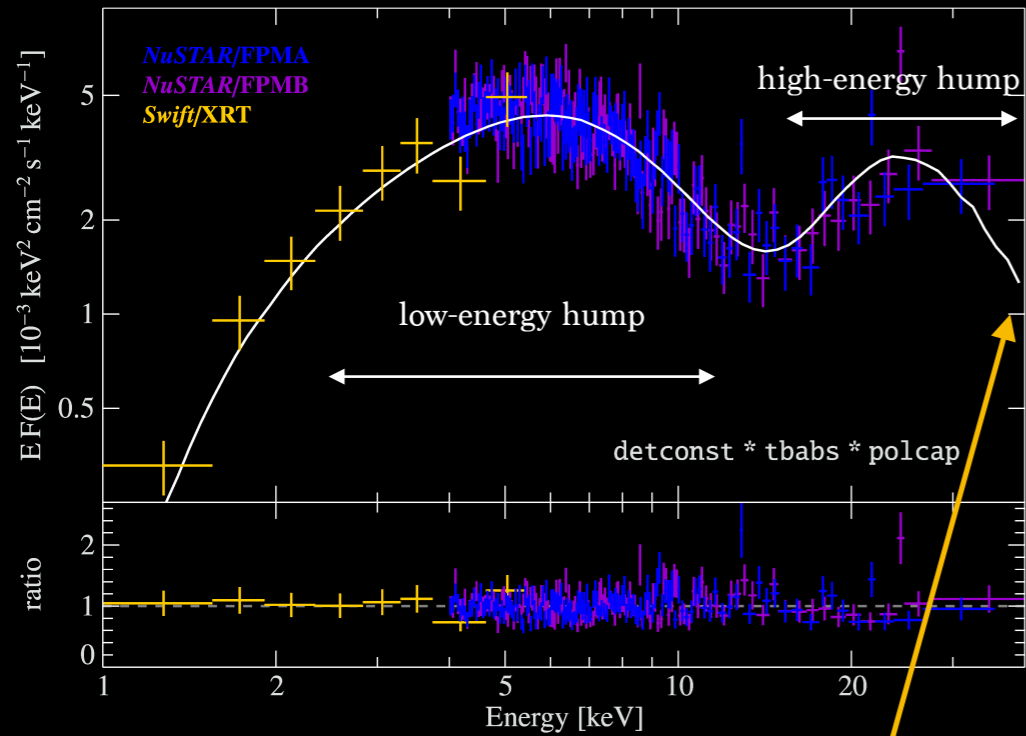


## Результаты

- The physical origin of the two-humped X-ray spectral shape is the strong polarization and temperature dependency of the Compton scattering cross section.
- The lower energy, thermal hump is mainly formed by the extraordinary photons that originate in the deep layers of the atmosphere.
- The harder, second hump is due to resonant magnetic Comptonization in an atmospheric layer with a strong temperature gradient, and is modified by the cyclotron line in the upmost hot layer.
- A fraction of the accretion energy is used to excite atmospheric electrons into higher Landau levels, which affects the relative luminosity of the two spectral components.



## Фитирование

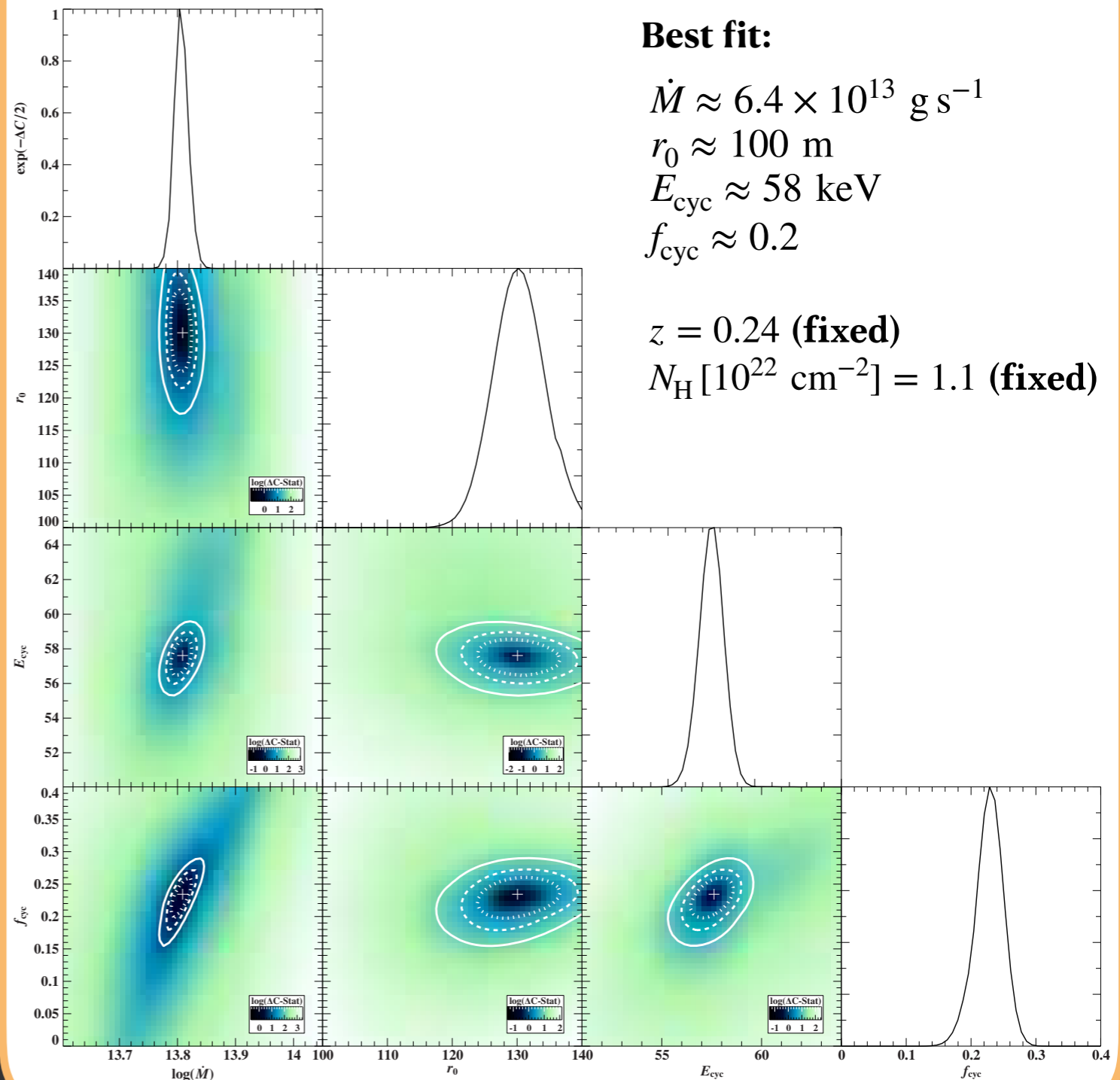


cyclotron line

$$F_{\text{obs}} = \frac{2\pi r_0^2}{4\pi D^2} F_{\text{NS}}$$

See related publication [Sokolova-Lapa et al. \(2021\)](#) for more details

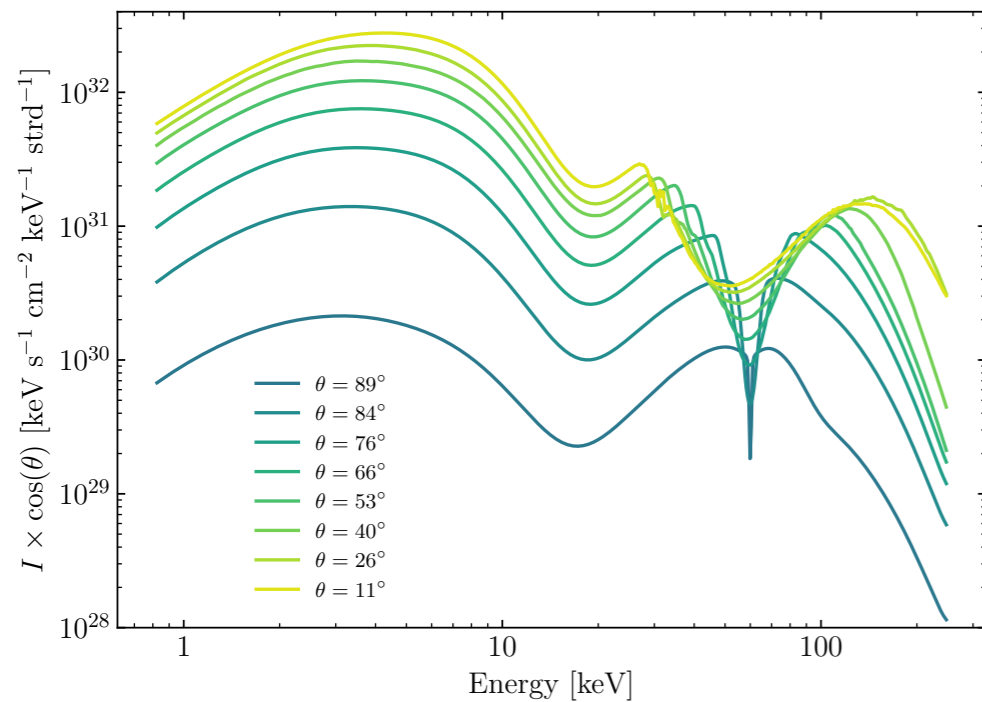
## Исследование параметров





## Дифференциальный поток

- Дифференциальный поток уменьшается с увеличением угла  $\theta$  к магнитному полю (потемнение к краю).
- Циклотронная линия уширяется с уменьшением  $\theta$  из-за теплового движения электронов вдоль магнитного поля.
- Энергия циклотронной линии уменьшается с  $\theta$ .

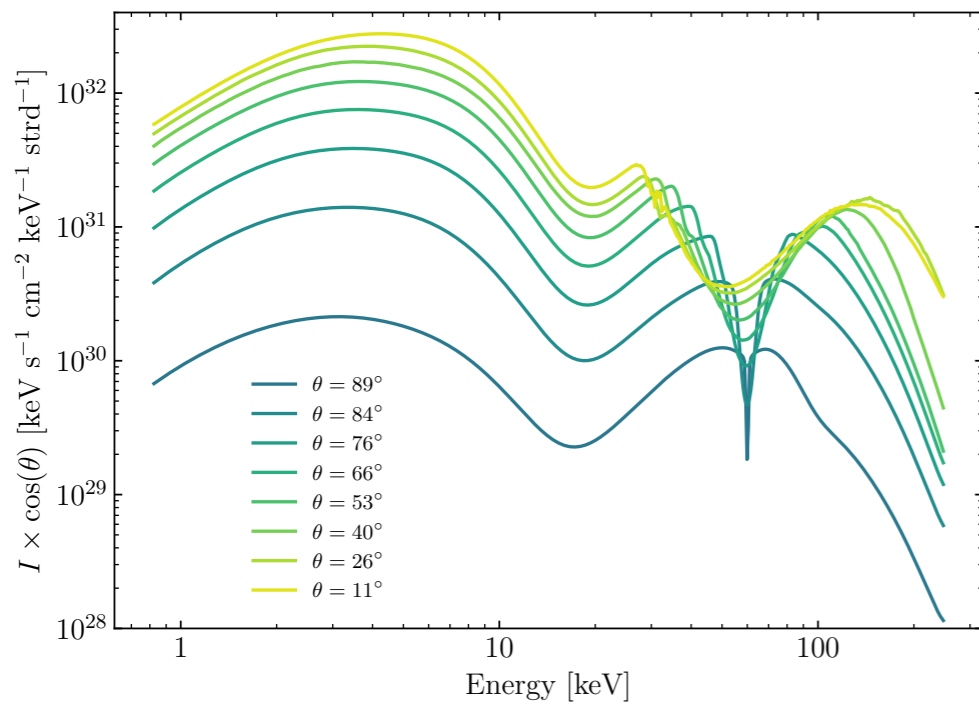




# Излучение, выходящее из атмосферы: угловая зависимость

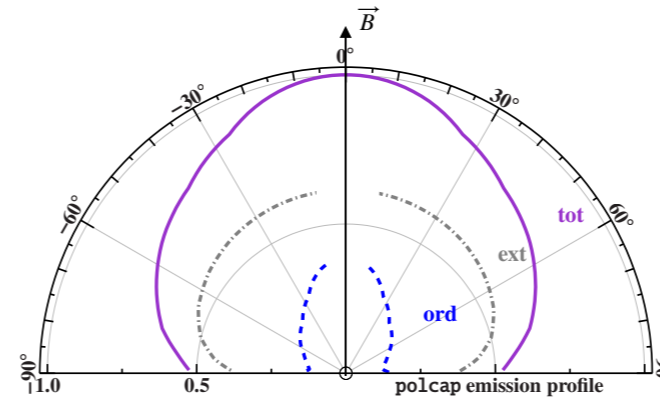
## Дифференциальный поток

- Дифференциальный поток уменьшается с увеличением угла  $\theta$  к магнитному полю (потемнение к краю).
- Циклотронная линия уширяется с уменьшением  $\theta$  из-за теплового движения электронов вдоль магнитного поля.
- Энергия циклотронной линии уменьшается с  $\theta$ .



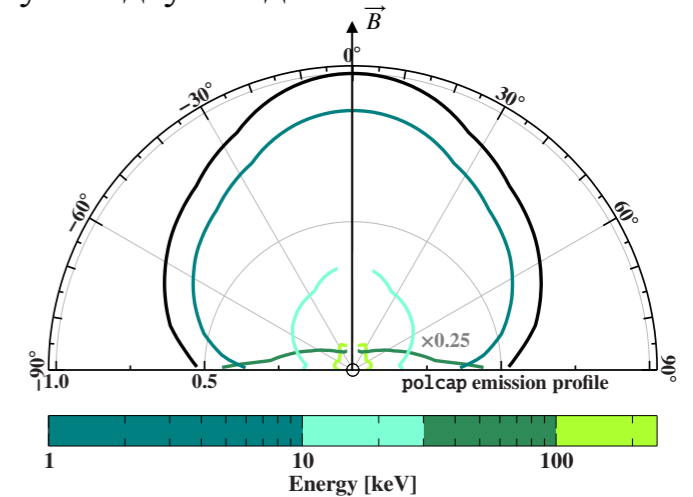
## Зависимость интенсивности от угла

Проинтегрированный по энергиям профиль эмиссии:

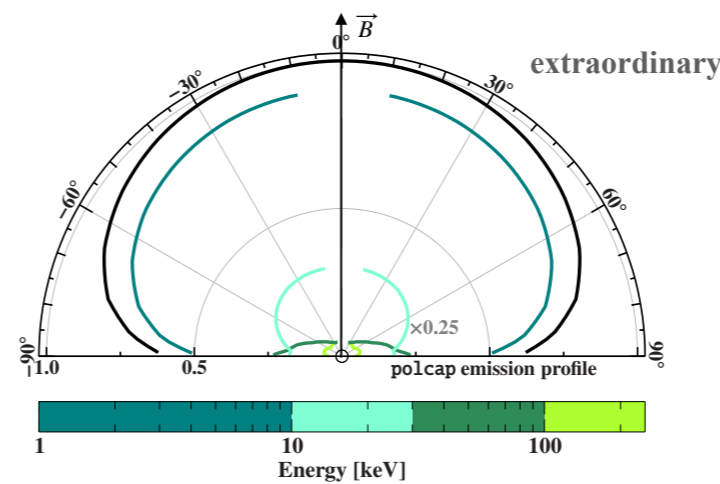


The gaps near  $\theta = 0^\circ$  correspond to the region of angles that is not included to our radiative transfer

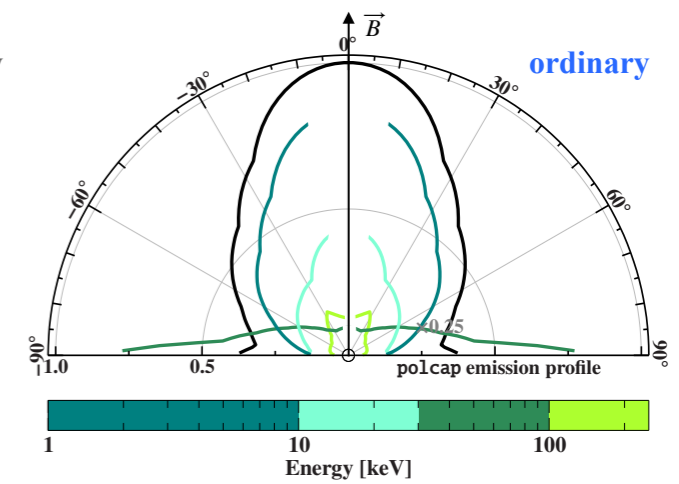
Профиль эмиссии на разных энергиях, сумма двух мод:



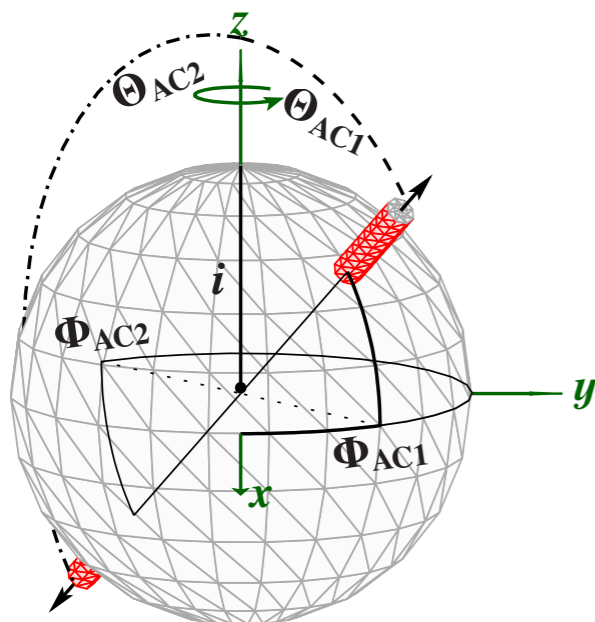
Необыкновенная мода:



Обыкновенная мода:



## Проекция на плоскость наблюдателя

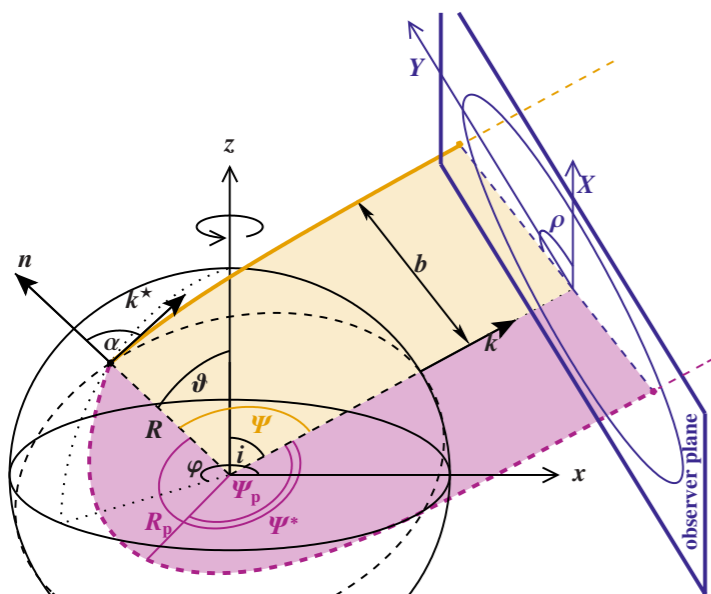


S. Falkner 2018, Thesis

Для моделирования спектра и профиля импульса, полученных удаленным наблюдателем, необходимо определить “геометрию” нейтронной звезды:

- $i$  - наклонение оси вращения НЗ к лучу зрения
- $[\Theta_j]$  - магнитные углы полюсов (полярный угол от оси вращения)
- $[\Phi_j]$  - соответственные азимутальные угла полюсов

Релятивистская проекция излучающих областей нейтронной звезды на плоскость удаленного наблюдателя для каждой фазы вращения посчитана с помощью кода `lbscripts` ([Falkner 2018, Dissertation](#) - link).



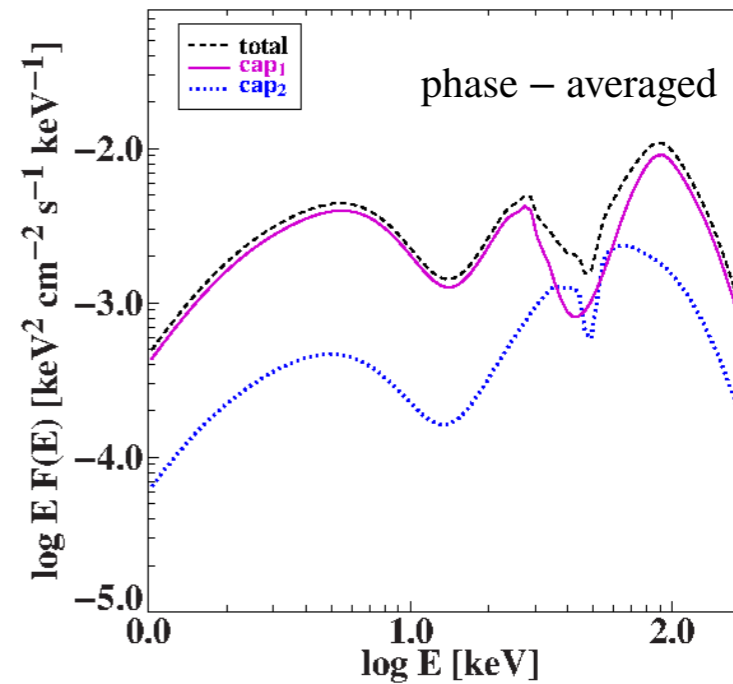
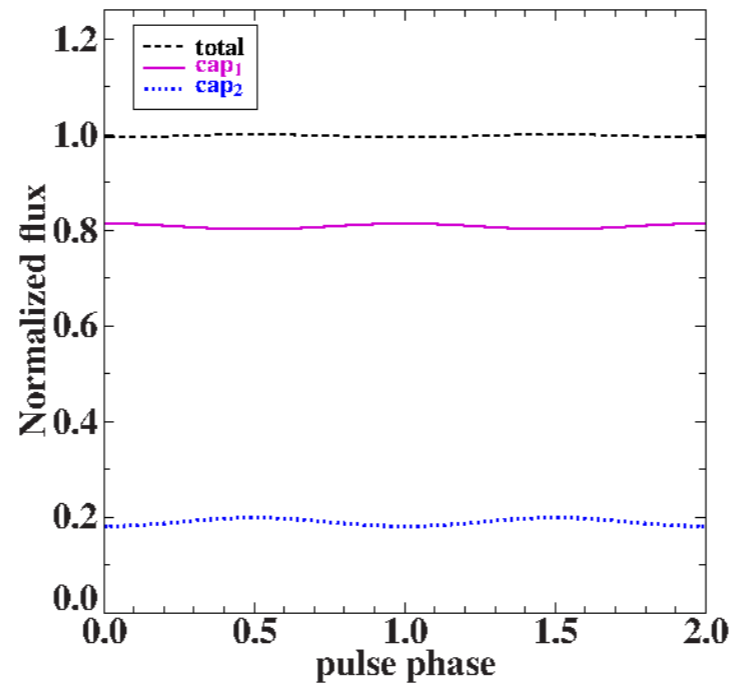
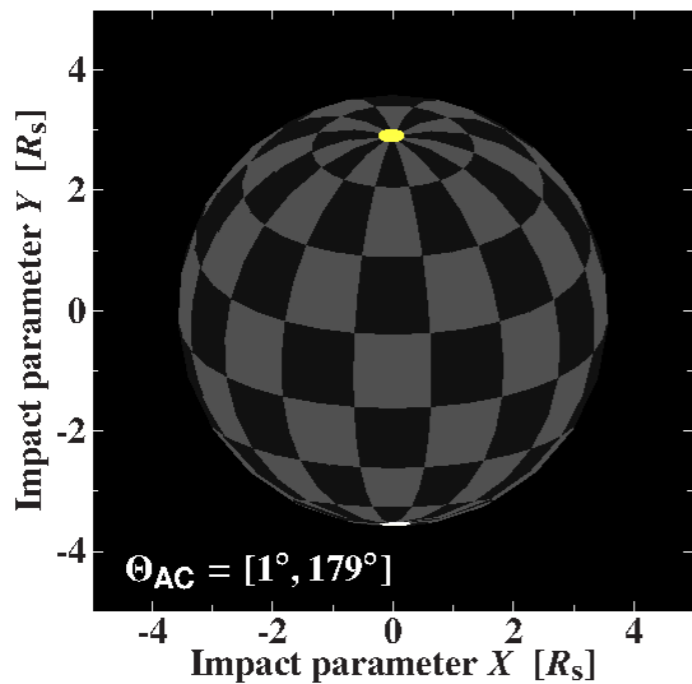
Falkner et al, in prep.

Траектория фотона в гравитационном поле НЗ (Шварцшильдовская метрика):

$$\begin{aligned} \psi_b(R) &= \int_R^\infty \frac{d\psi}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dr} dr \\ &= \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} \left[ \frac{1}{b^2} - \frac{1}{r^2} \left( 1 - \frac{R_s}{r} \right) \right]^{-1/2} \end{aligned}$$

## Изменение магнитного угла. Симметричные полюса

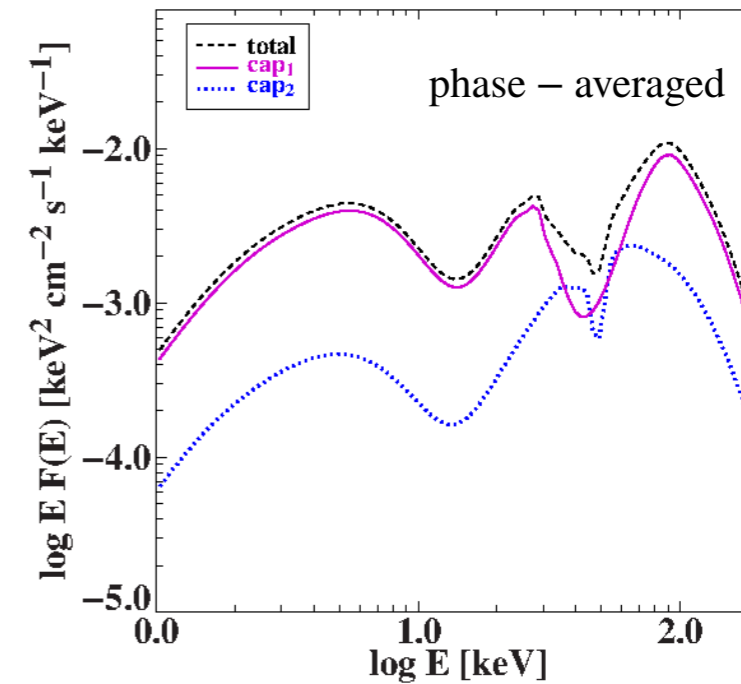
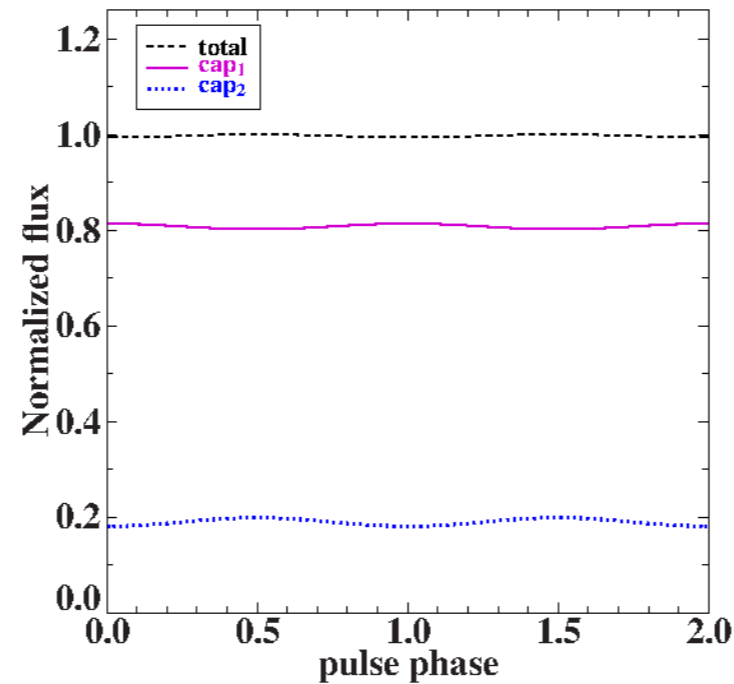
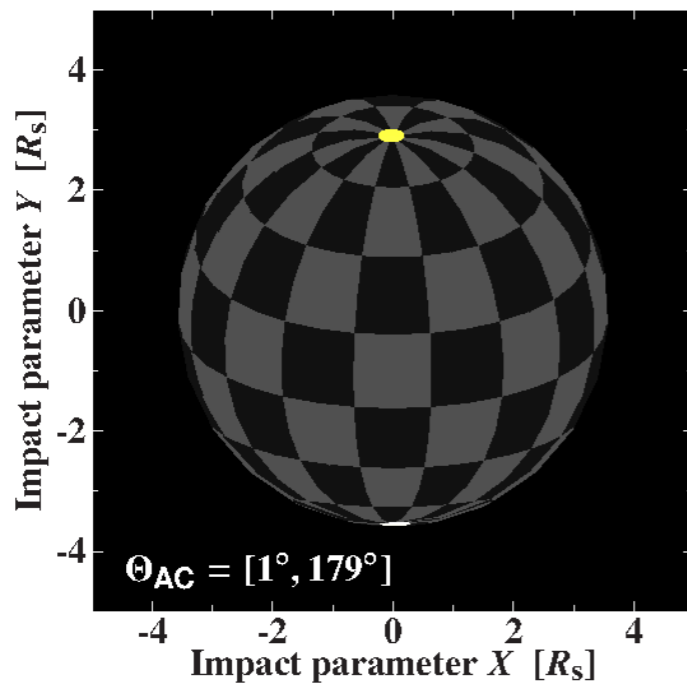
$i = 70^\circ = \text{const}$



Если формат не поддерживает gif, пожалуйста [пройдите по ссылке](#)

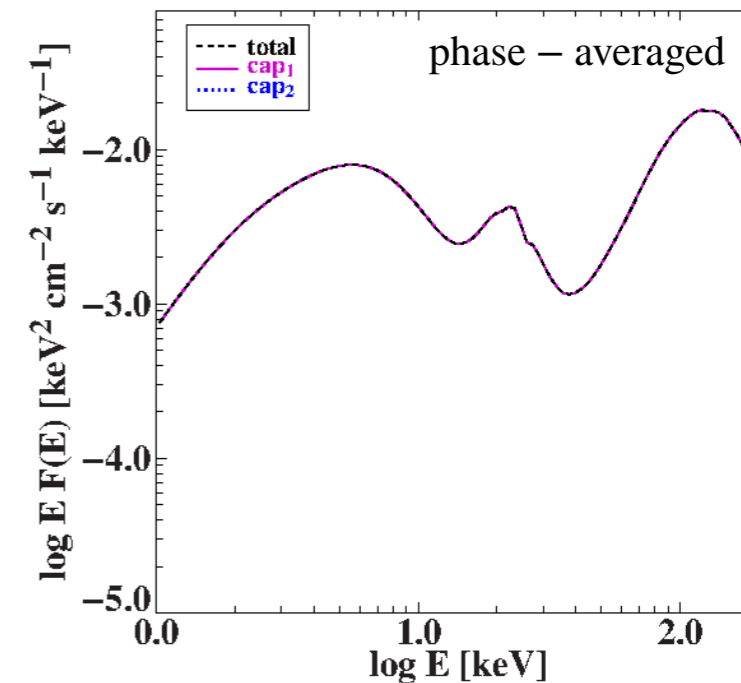
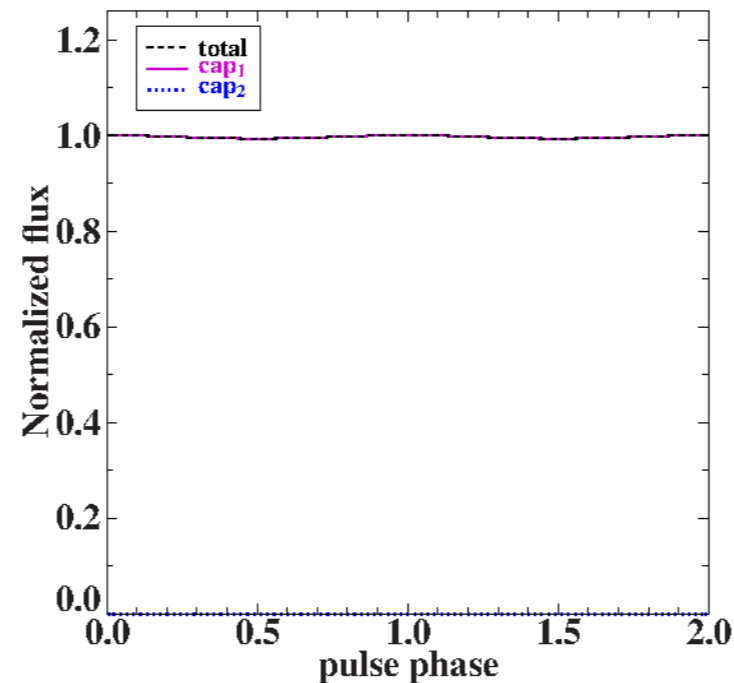
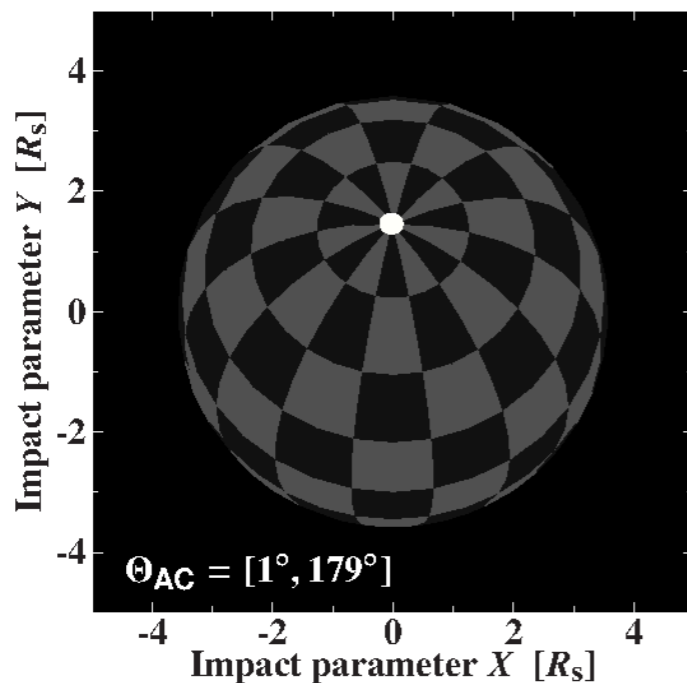
## Изменение магнитного угла. Симметричные полюса

$i = 70^\circ = \text{const}$



Если формат не поддерживает gif, пожалуйста пройдите по [ссылке](#)

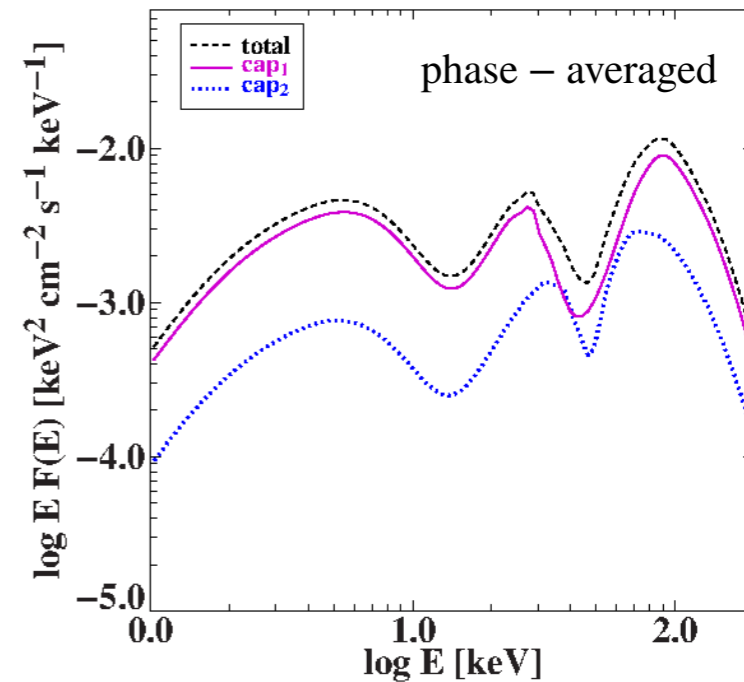
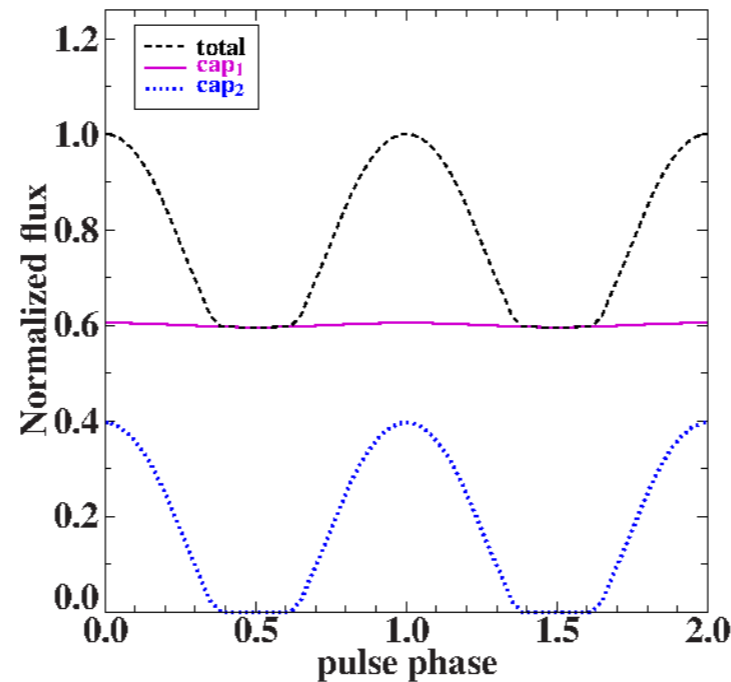
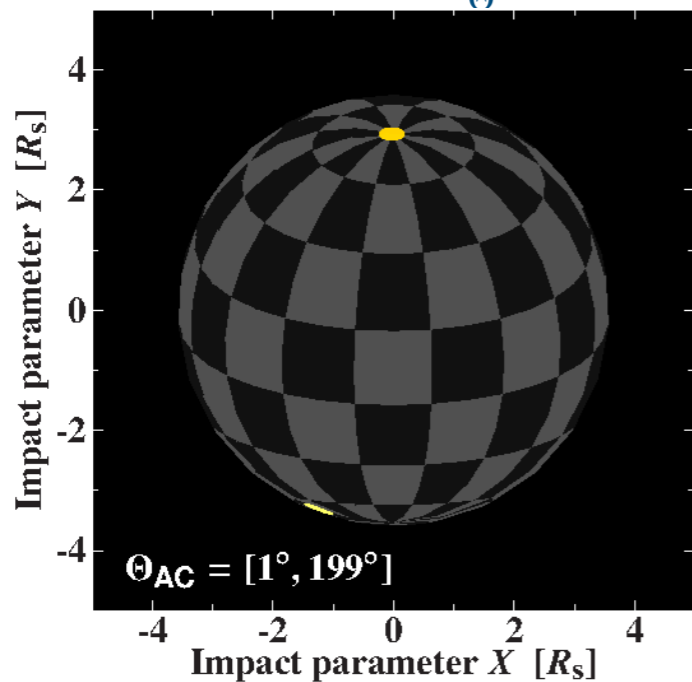
$i = 30^\circ = \text{const}$



## Изменение магнитного угла. Асимметрия полюсов

$i = 70^\circ = \text{const}$

$\Delta_\Theta = 20^\circ = \text{const}$

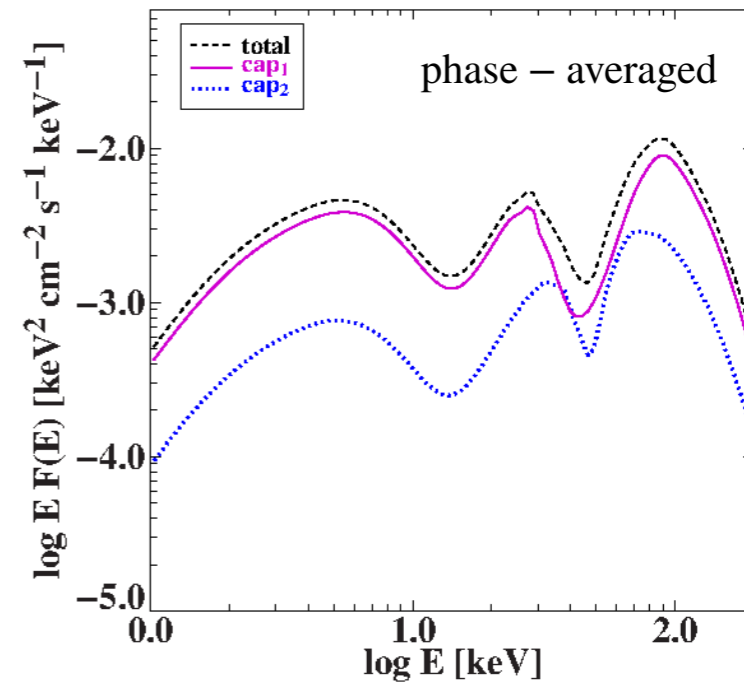
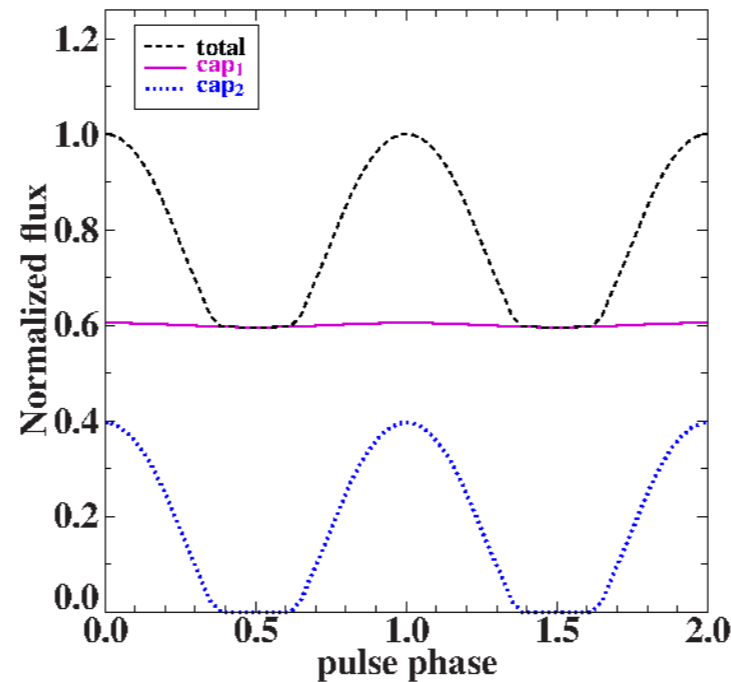
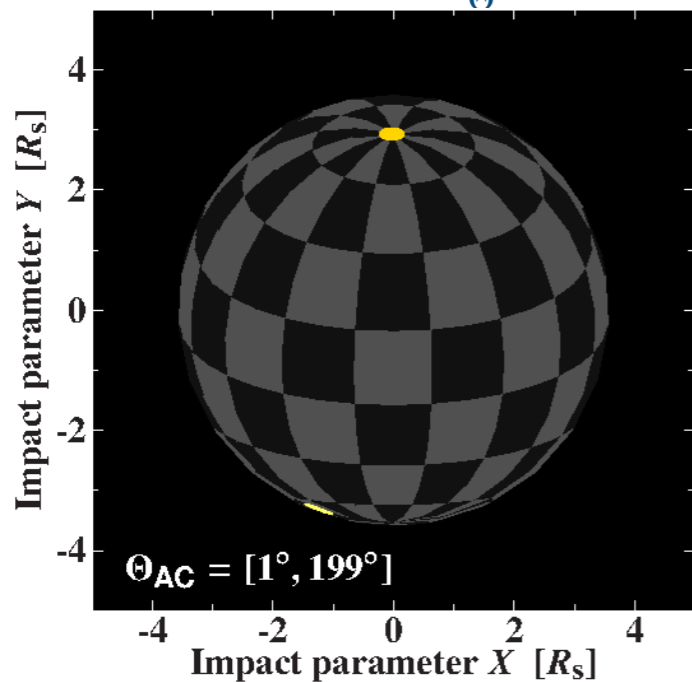


Если формат не поддерживает gif, пожалуйста [пройдите по ссылке](#)

## Изменение магнитного угла. Асимметрия полюсов

$i = 70^\circ = \text{const}$

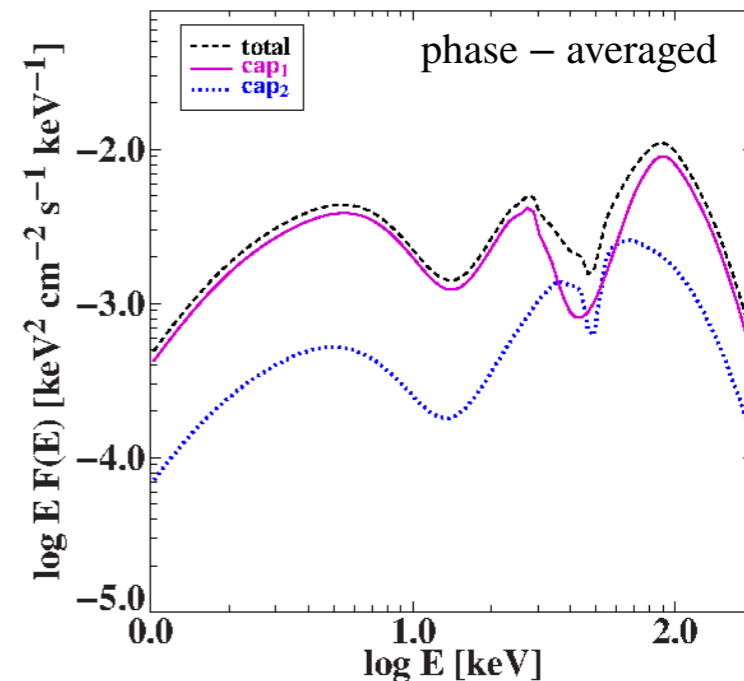
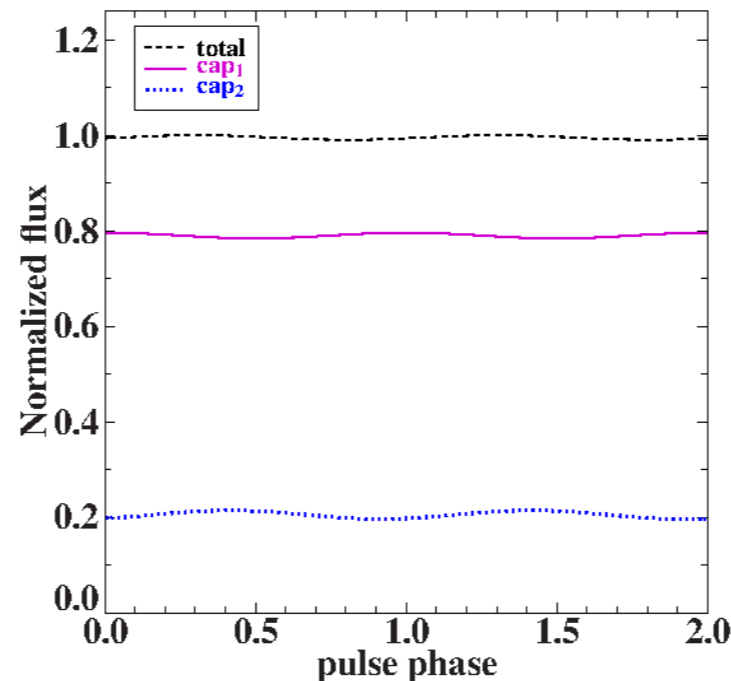
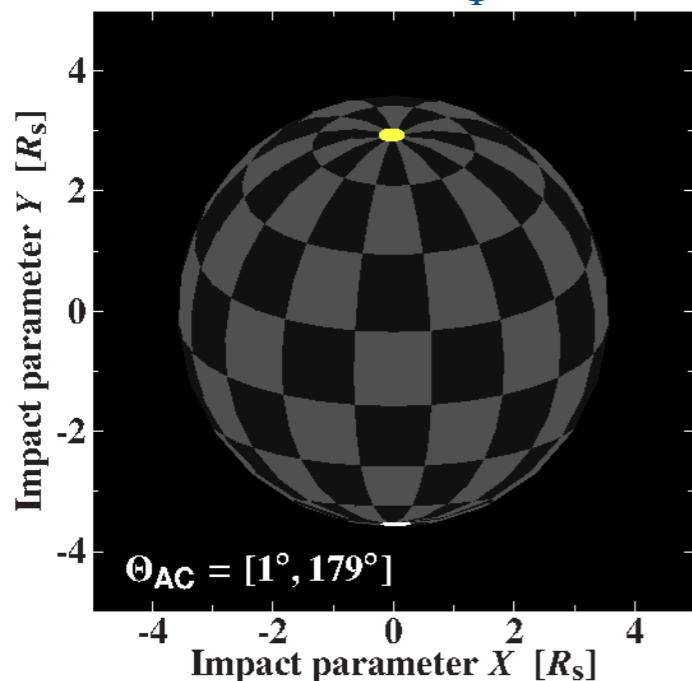
$\Delta_\Theta = 20^\circ = \text{const}$



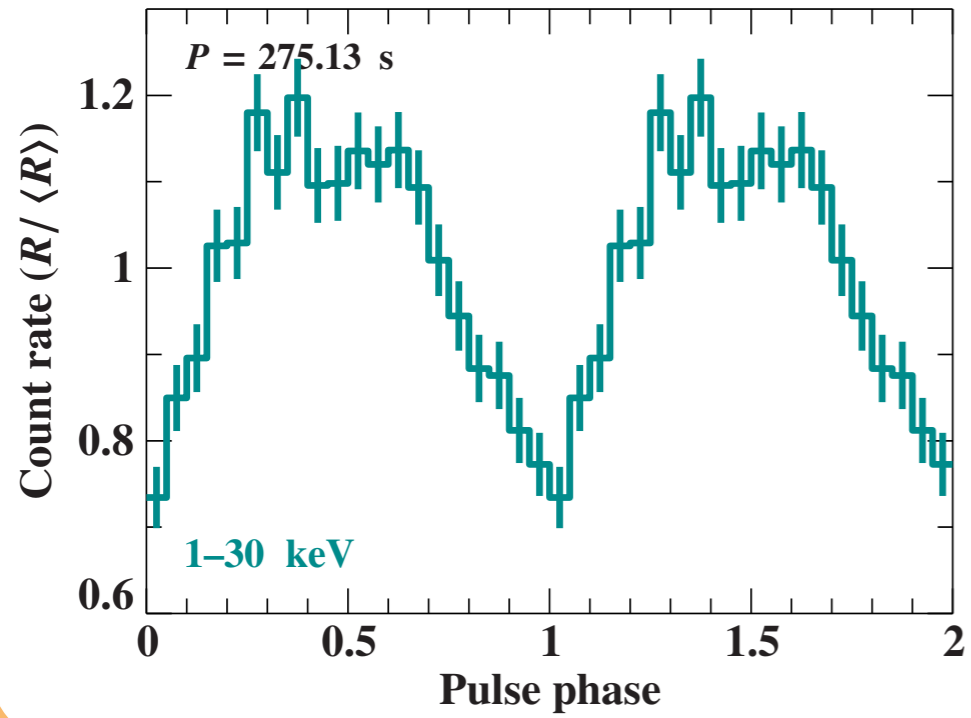
Если формат не поддерживает gif, пожалуйста пройдите по [ссылке](#)

$i = 70^\circ = \text{const}$

$\Delta_\Phi = 30^\circ = \text{const}$

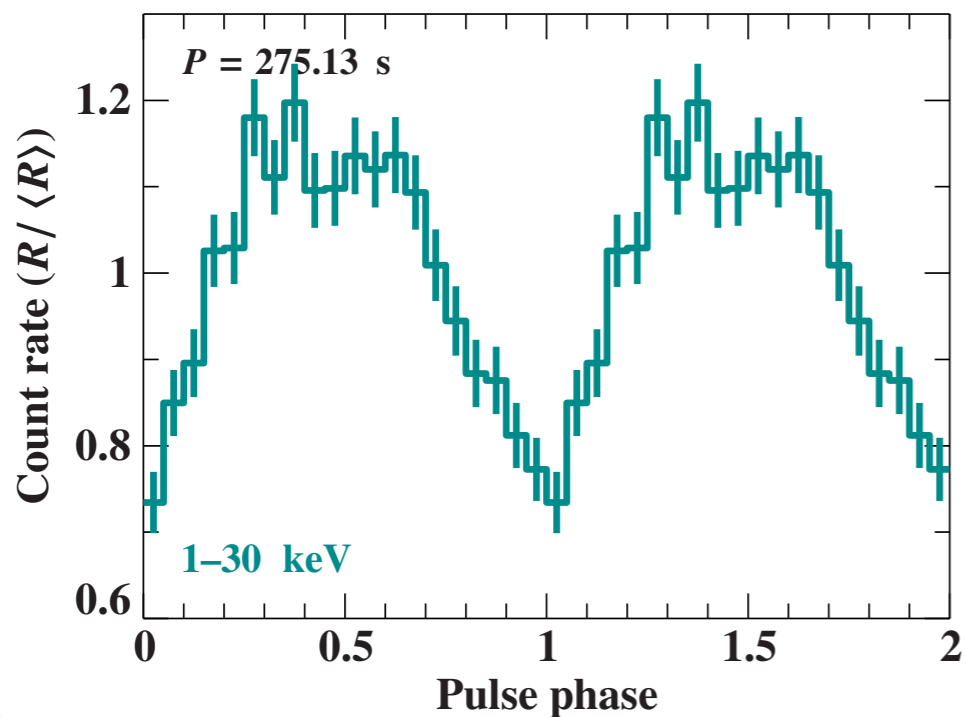


## Наблюдения

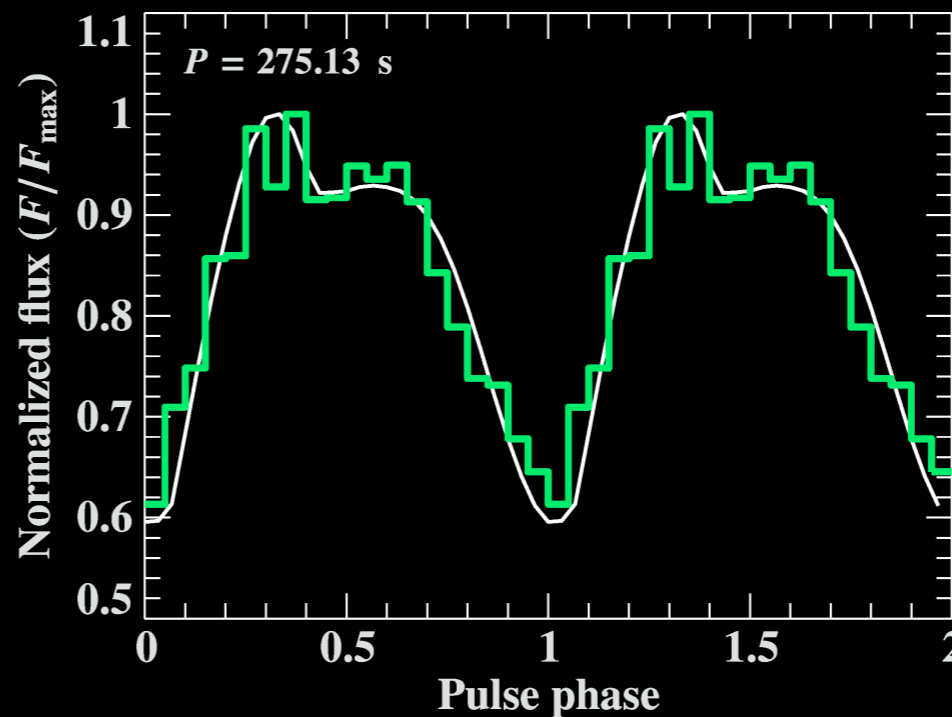


# Профиль импульса GX 304-1

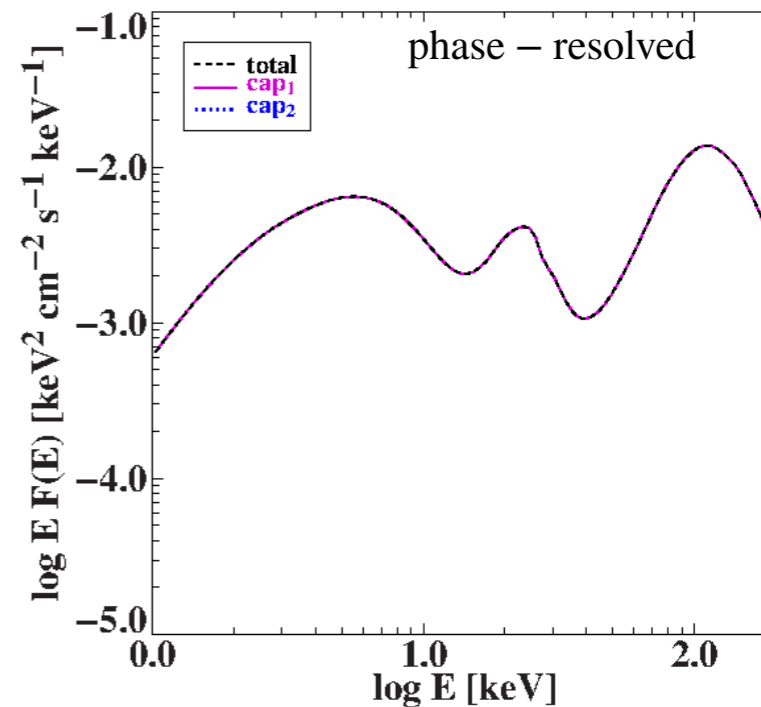
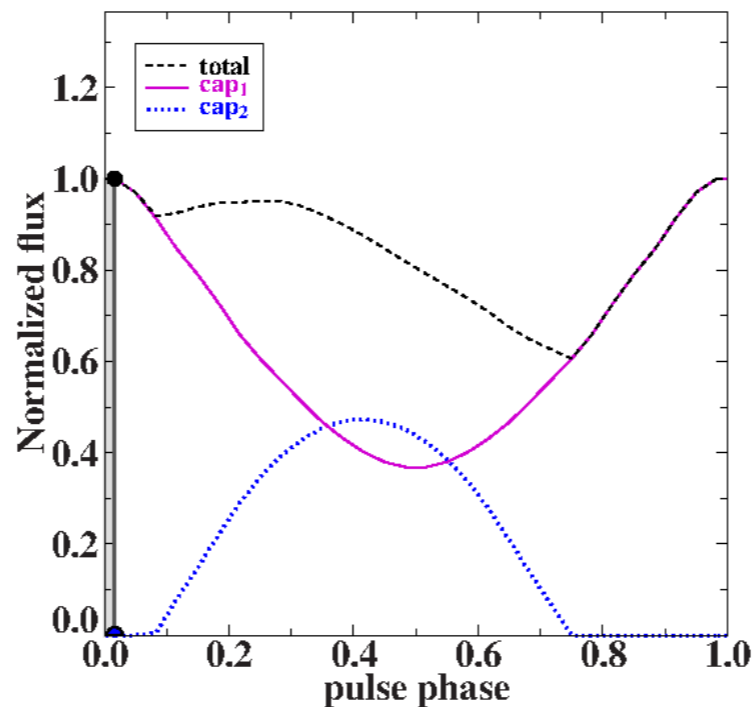
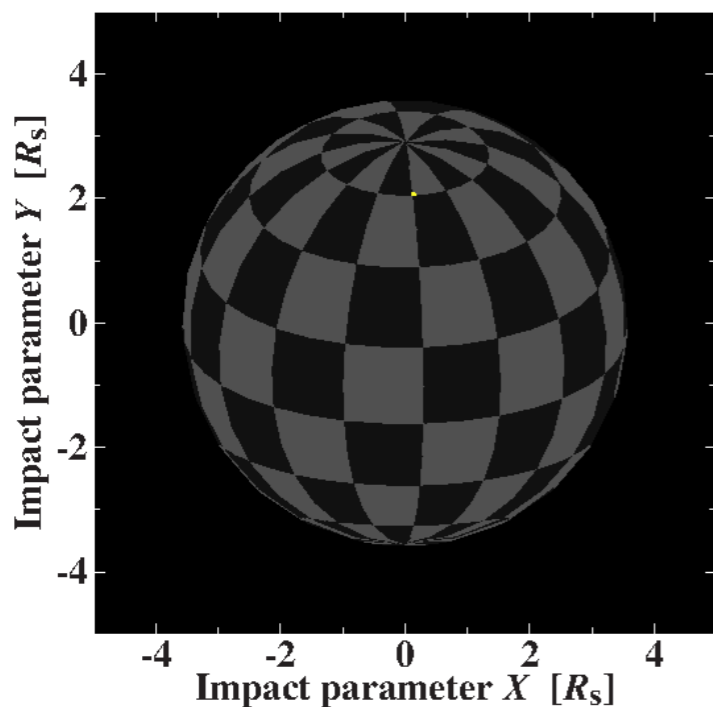
## Наблюдения



## Моделирование



$i = 69^\circ$   
 $\Theta_{\text{ac}} = [25^\circ, 153^\circ]$   
 $\Phi_{\text{ac}} = [0^\circ, 211^\circ]$



Если формат не поддерживает gif, пожалуйста пройдите по [ссылке](#)



`polcap`: моделирует излучение с магнитных полюсов нейтронной звезды при низких темпах аккреции (**soon to be available**)

Формирование двух-компонентного рентгеновского спектра (1-50 кэВ) происходит в результате **сильной поляризационной и температурной зависимости магнитных сечений Комптоновского рассеяния**.

Жесткий компонент спектра (красное крыло циклотронной линии) формируется в результате **частичного перераспределения при резонансном комптоновском рассеянии при сильном температурном градиенте**.

На основании **угловой зависимости** выходящего излучения и расчета траекторий фотонов в сильном гравитационном поле моделируют **профили импульса**.

Модель `polcap` развивается в направлении **одновременного фитирования спектра и профиля импульса**.