

Рентгеновские двойные в поляризованном свете

Наблюдательные проявления и их моделирование

Вадим Кравцов



UNIVERSITY
OF TURKU

Университет Турку

Структура доклада

Доклад будет посвящён **результатам трёхлетней работы** в рамках **диссертационного проекта по изучению рентгеновских двойных** и будет состоять из следующих **трёх частей**:

- Часть 1: HMXBs и LMXBs и чем (а, главное, зачем) их едят
- Часть 2: LMXBs – результаты
- Часть 3: HMXBs – результаты

Часть 1: Введение

Пара слов о рентгеновских двойных HMXBs и LMXBs

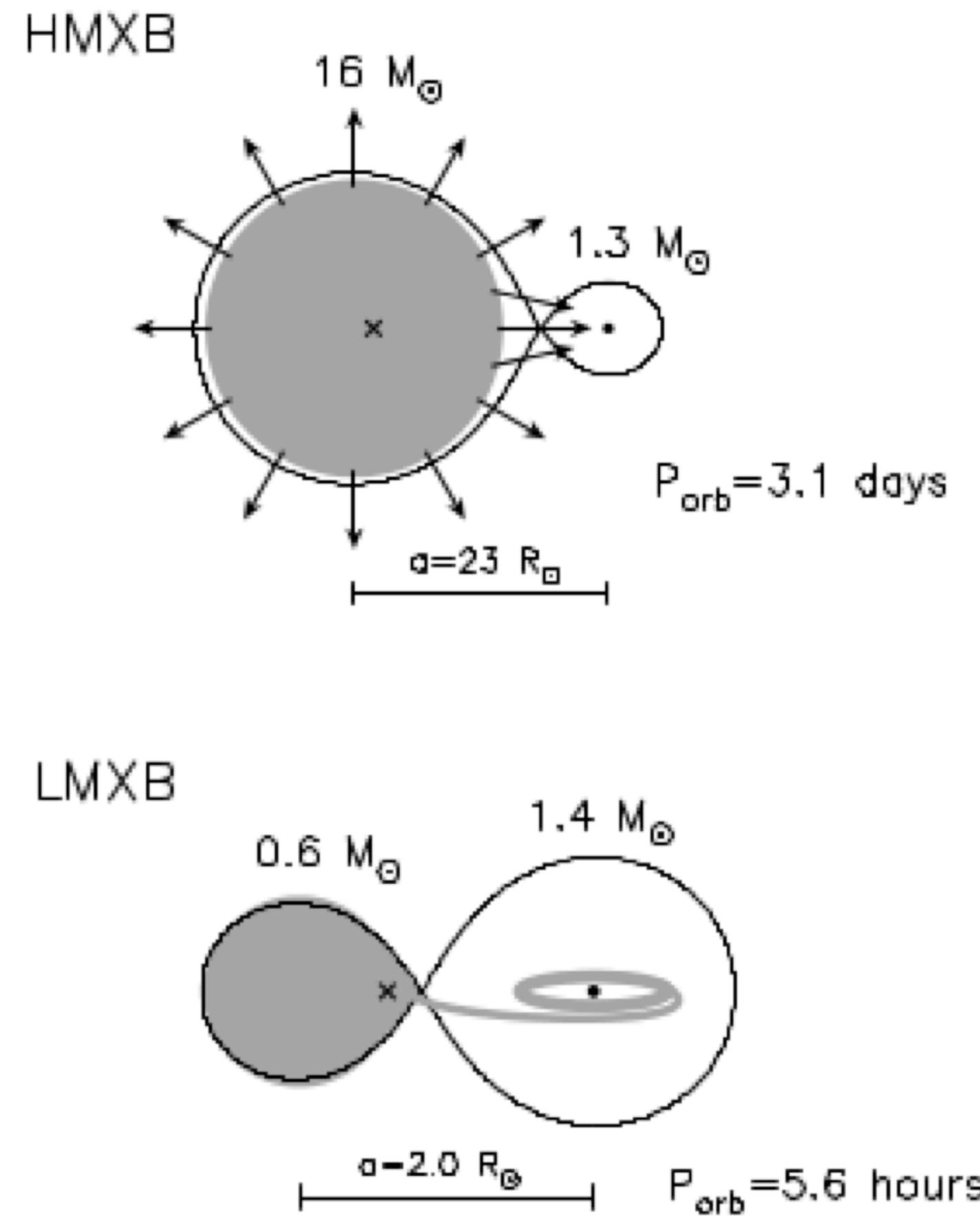
Рентгеновская двойная = **донор + аккретор**

По типу донора обычно делятся на:

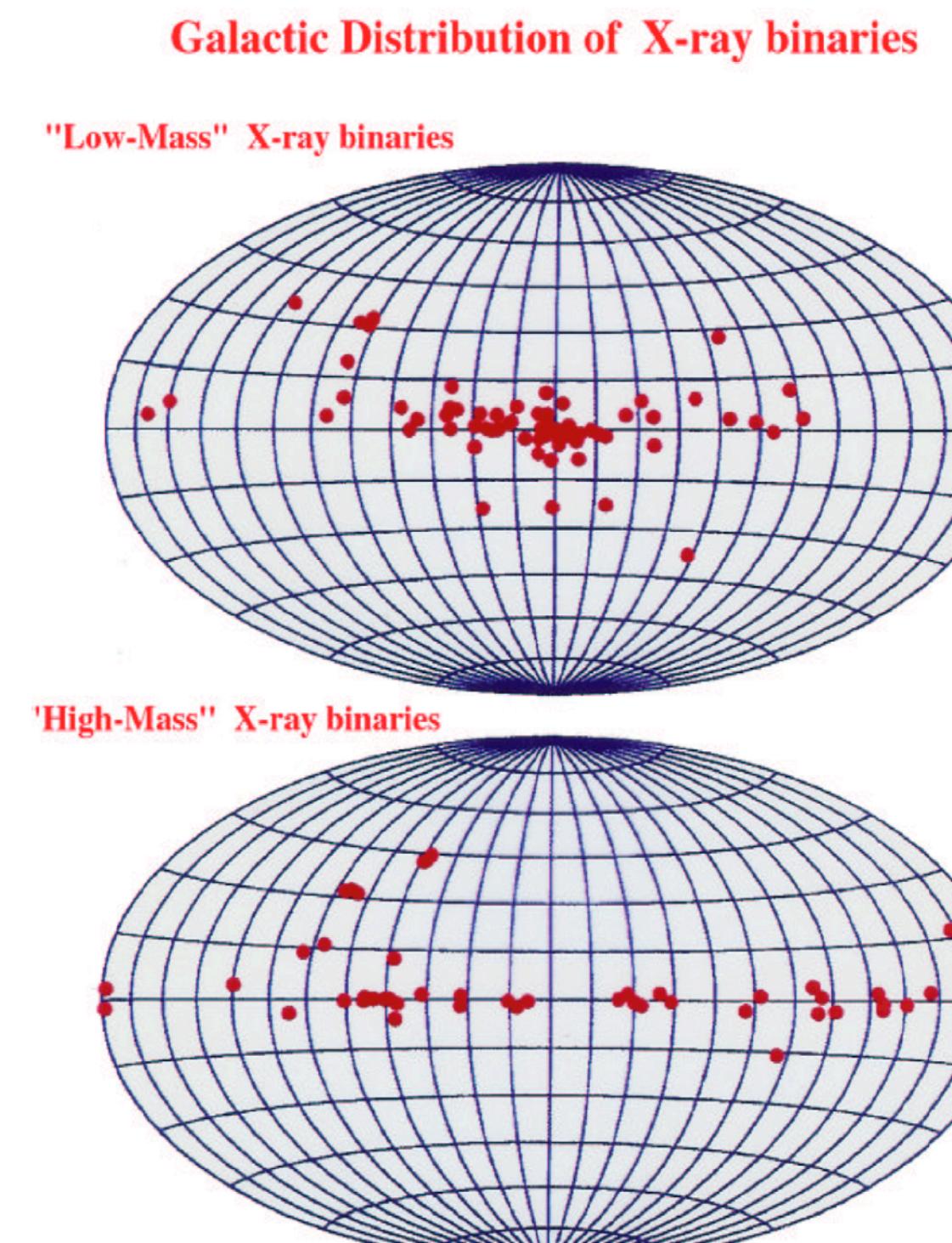
- маломассивные (Low Mass XBs – LMXBs)
- массивные (High Mass XBs – HMXBs)

По типу аккретора делятся на:

- двойные с чёрной дырой
- двойные с нейтронной звездой



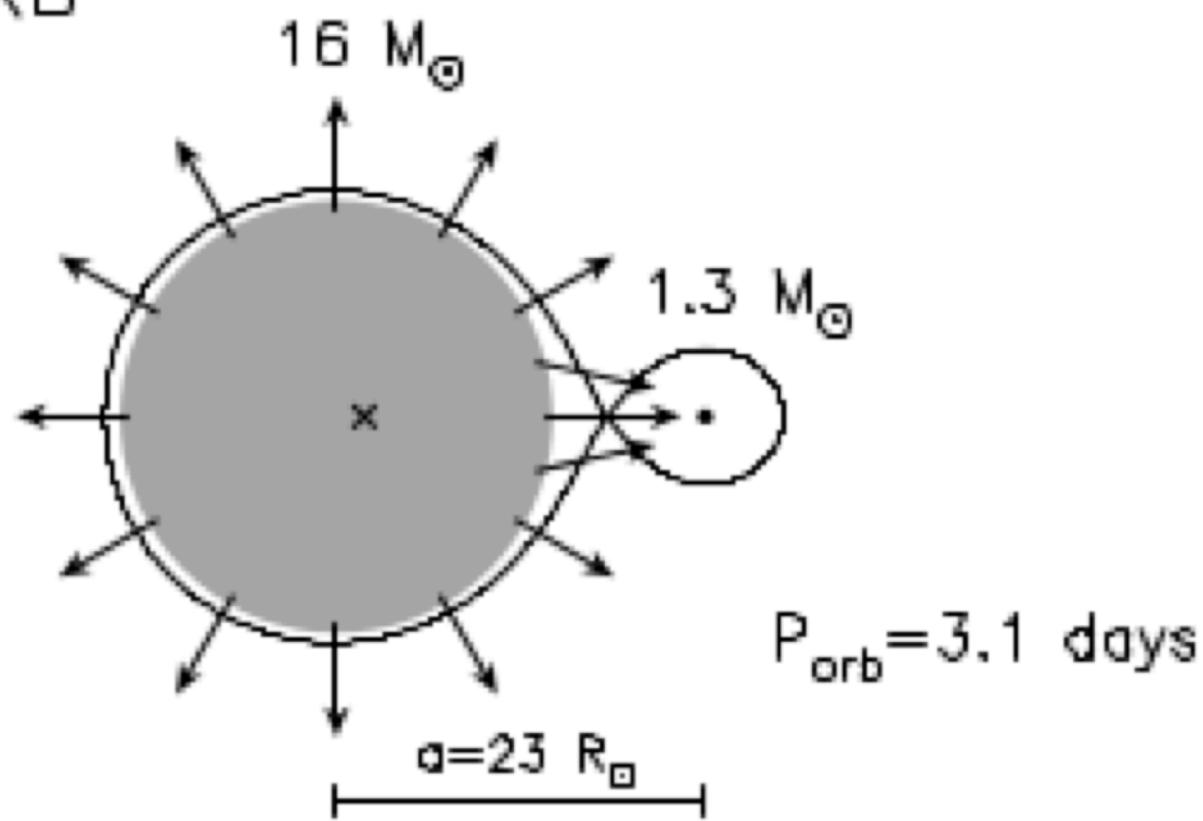
Tauris & vdHeuvel 2006



[http://www-astro.physics.ox.ac.uk/
~podsi/lec_c1_4_c.pdf](http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~podsi/lec_c1_4_c.pdf)

Пара слов о рентгеновских двойных HMXBs и LMXBs

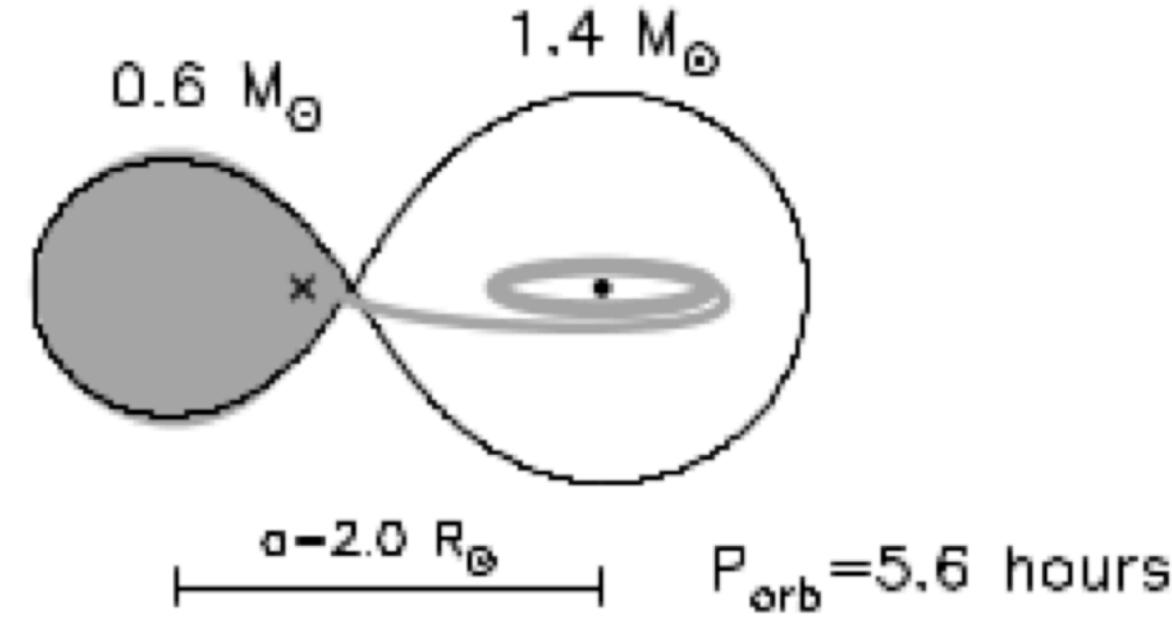
HMXB



HMXBs:

- Яркие в оптике за счёт яркого оптического компаньона
- Сферическая аккреция -> постоянные источники

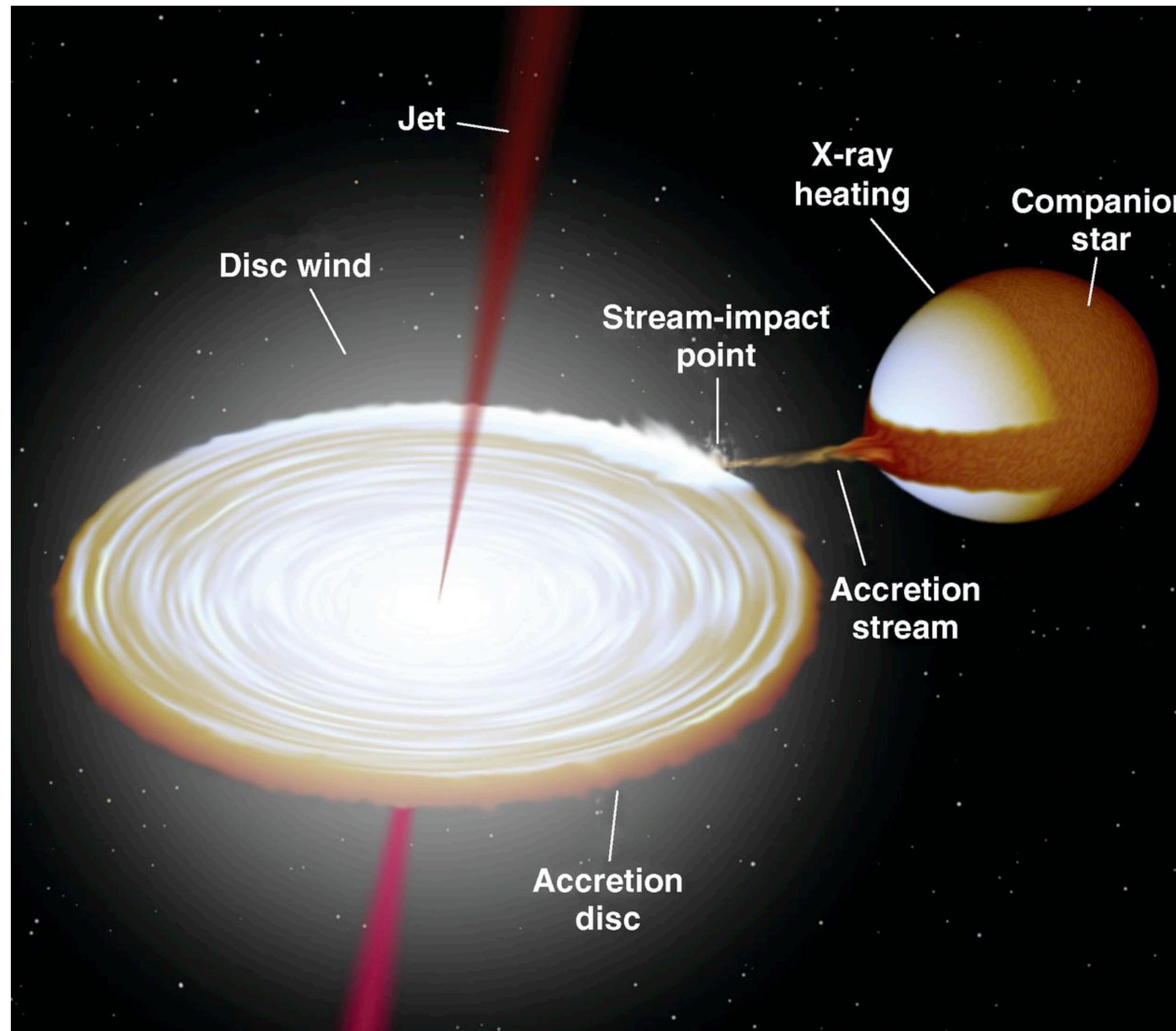
LMXB



LMXBs:

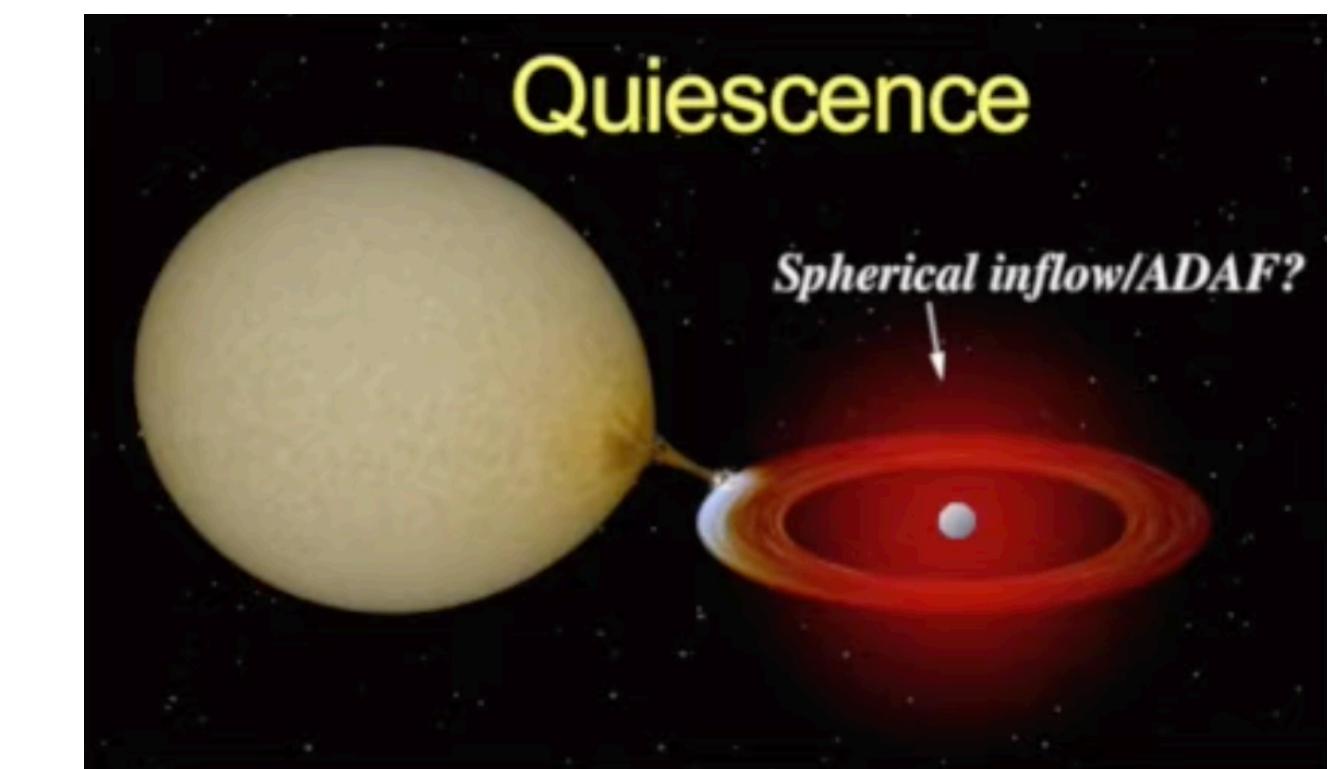
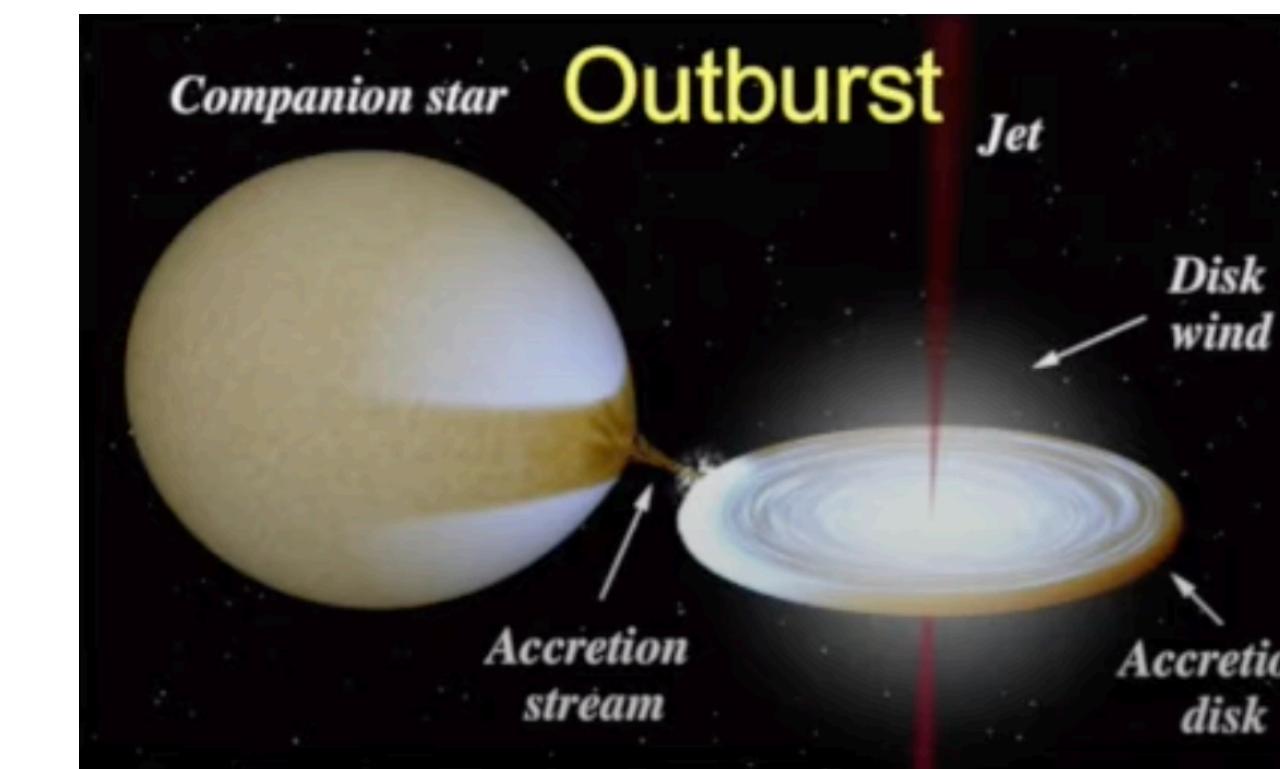
- Большую часть времени не видны в оптике
- Дисковая аккреция -> вспышечная активность: спокойные периоды (**quiescent states**) сменяются вспышками (**outbursts**)

Мотивация исследования



[Image produced with BinSim by Rob Hynes]

Излучение от рентгеновских двойных – сложная комбинация вклада множества различных компонент



Optical and infrared (OIR) emission

jet + wind + irradiated disc +
+ hot accretion flow

optical companion + accretion
disc/flow + hotspot/line + jet

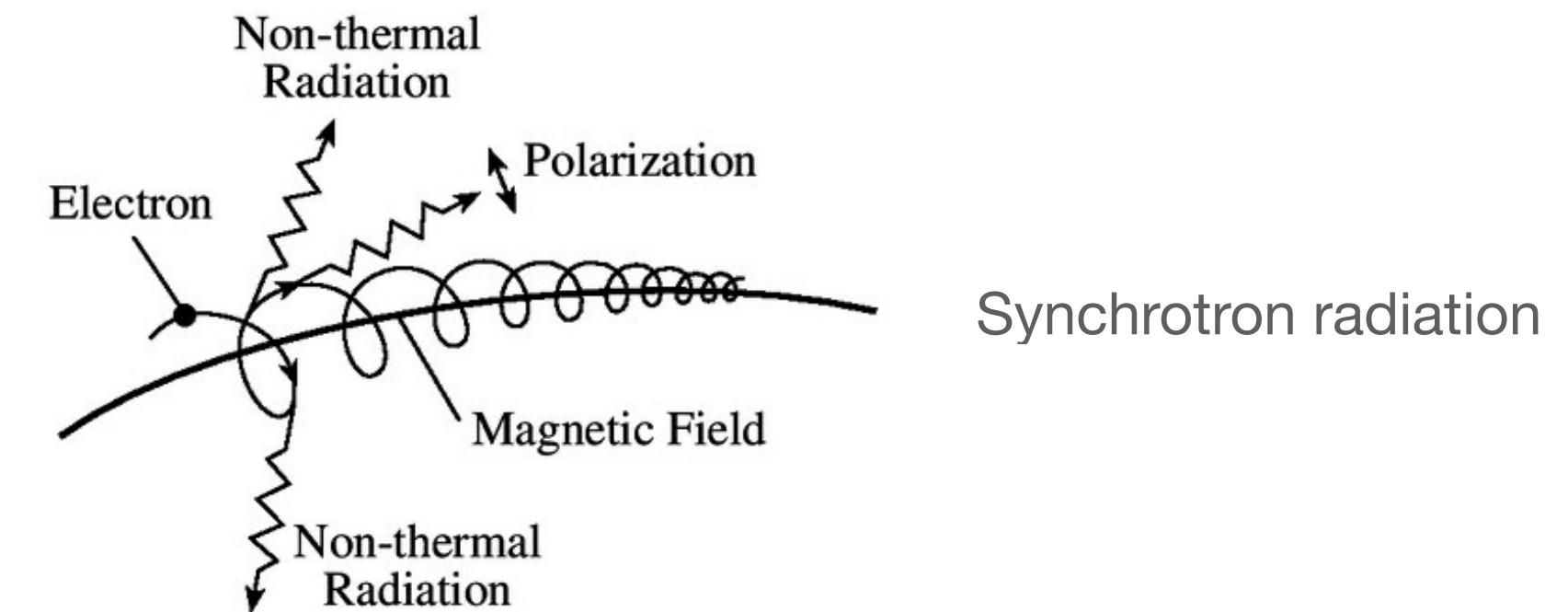
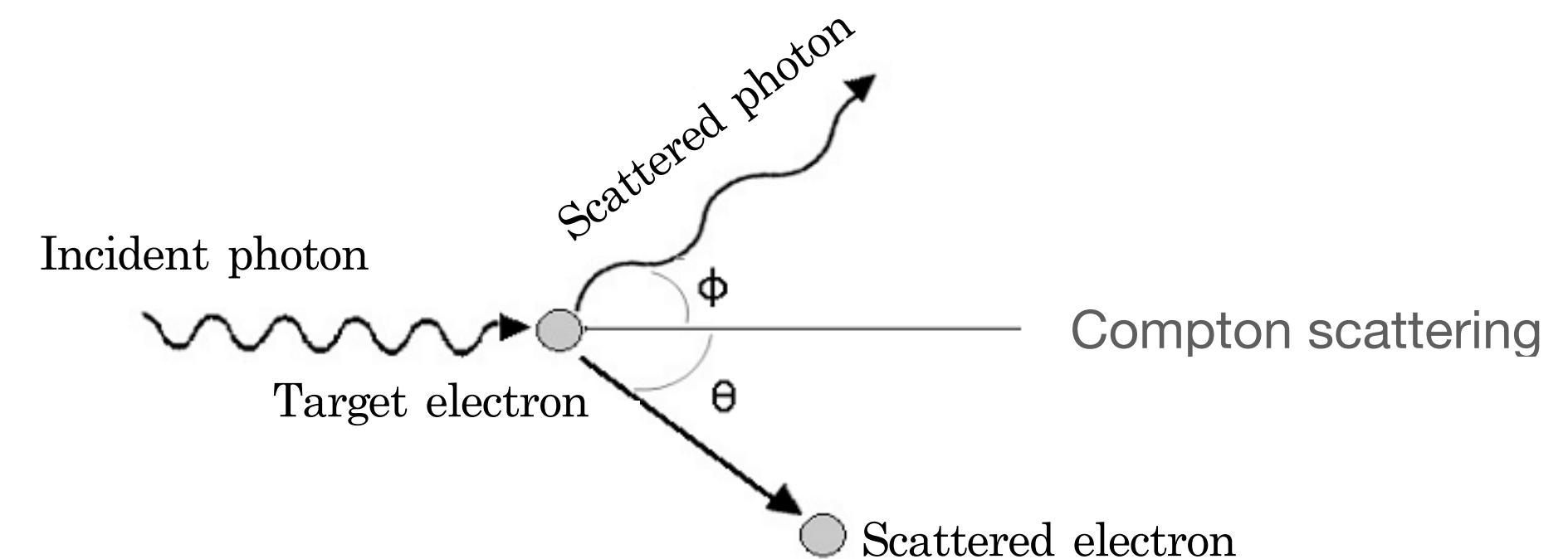
Определение вклада различных компонент в итоговый спектр – путь к пониманию процессов акреции и механизма запуска вспышек

Мотивация исследования

Выбор инструмента

Существует множество методов, с помощью которых можно исследовать вклад различных компонент: *фотометрия, спектроскопия, imaging, timing и поляриметрия*

Почему **поляриметрия?**



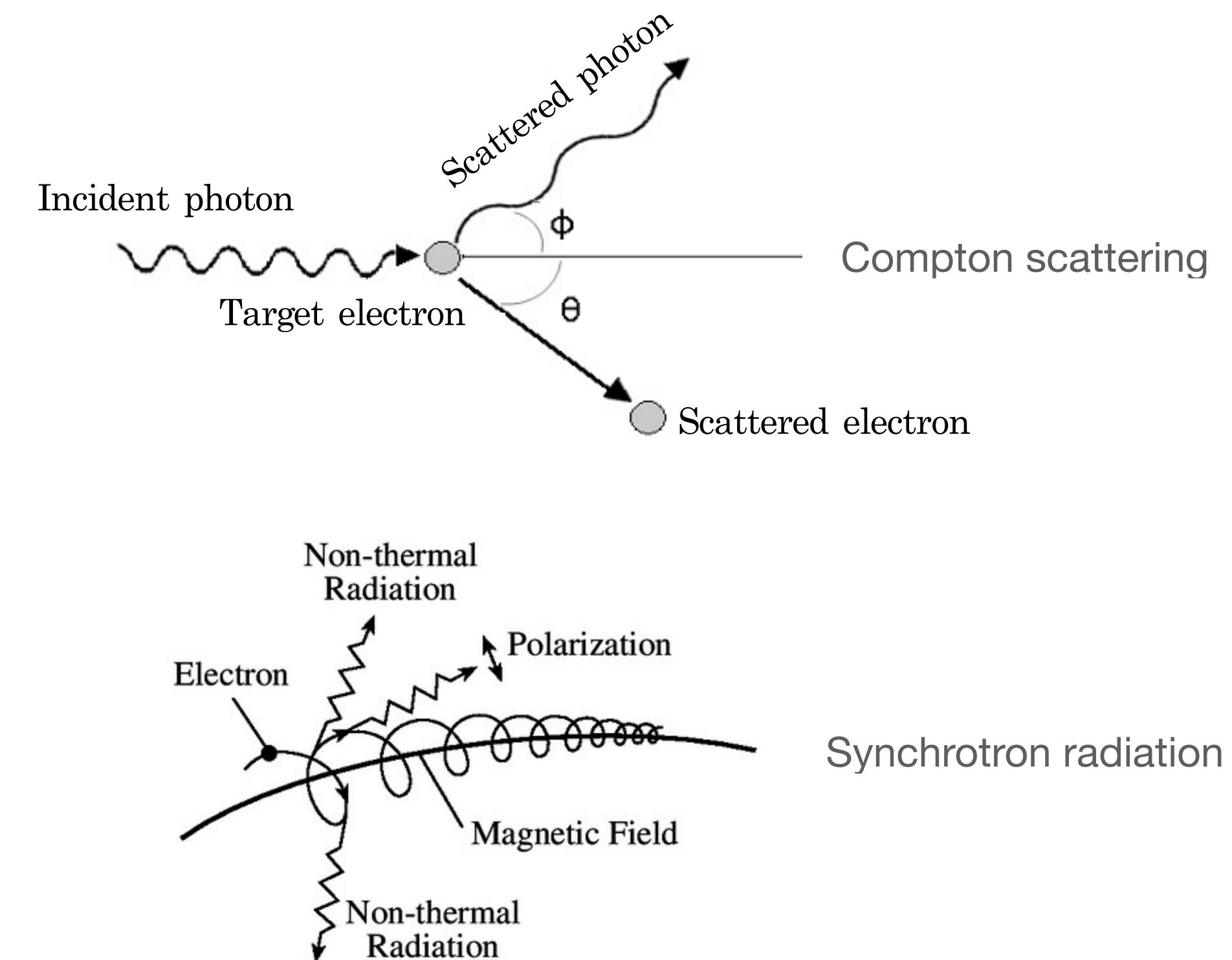
Мотивация исследования

Выбор инструмента

Существует множество методов, с помощью которых можно исследовать вклад различных компонент: **фотометрия, спектроскопия, imaging, timing и поляриметрия**

Почему **поляриметрия**?

- **Поляризованное излучение** образуется в множестве физических процессов, происходящих в недрах рентгеновских двойных, например при **Комptonовском рассеянии** излучения на электронах или в процессе **синхротронного излучения**



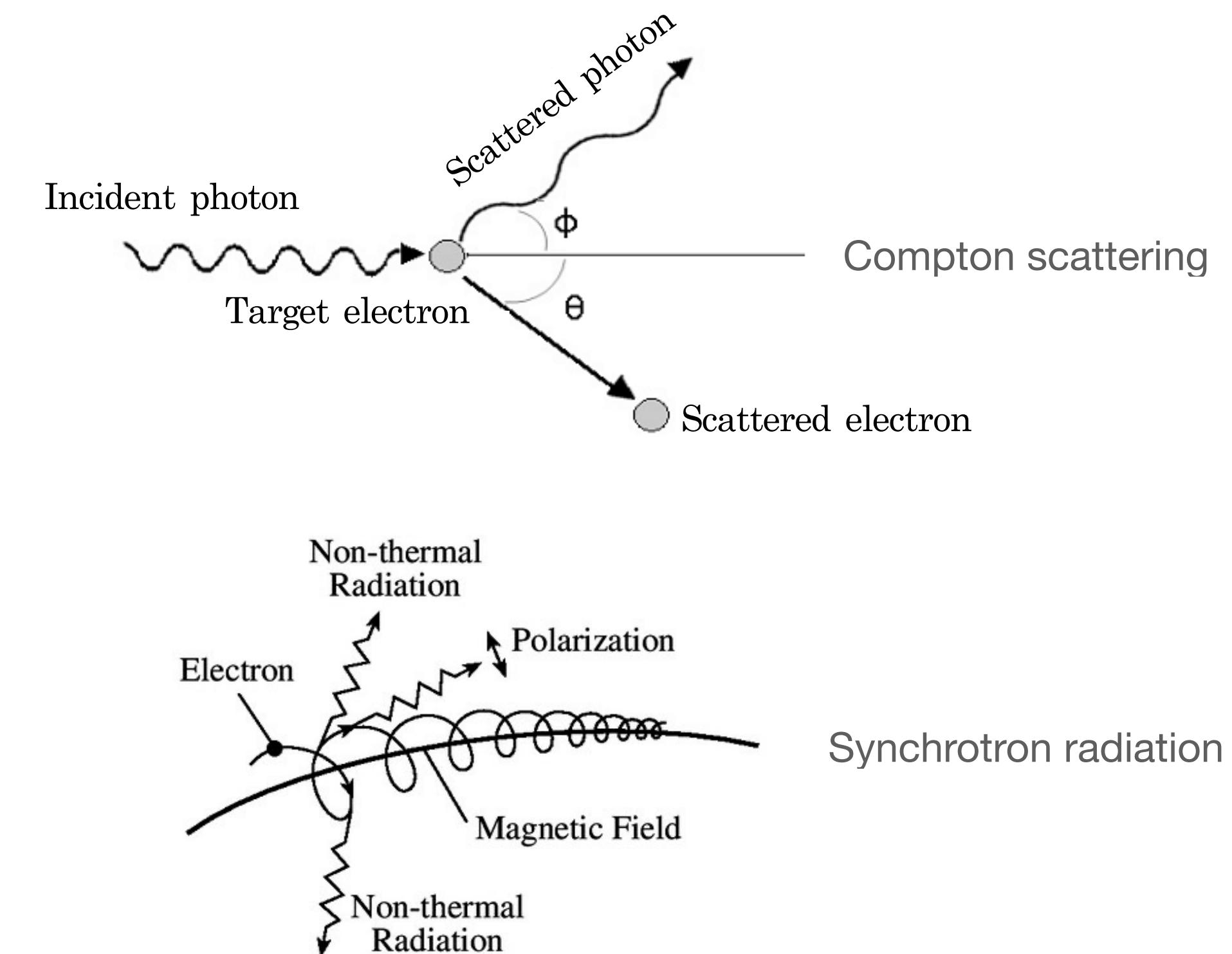
Мотивация исследования

Выбор инструмента

Существует множество методов, с помощью которых можно исследовать вклад различных компонент: **фотометрия, спектроскопия, *imaging*, *timing* и **поляриметрия****

Почему **поляриметрия**?

- **Поляризованное излучение** образуется в множестве физических процессов, происходящих в недрах рентгеновских двойных, например при **Комptonовском рассеянии** излучения на электронах или в процессе **синхротронного излучения**
- Поляризация несёт в себе **информацию о геометрии излучающей/рассеивающей среды**



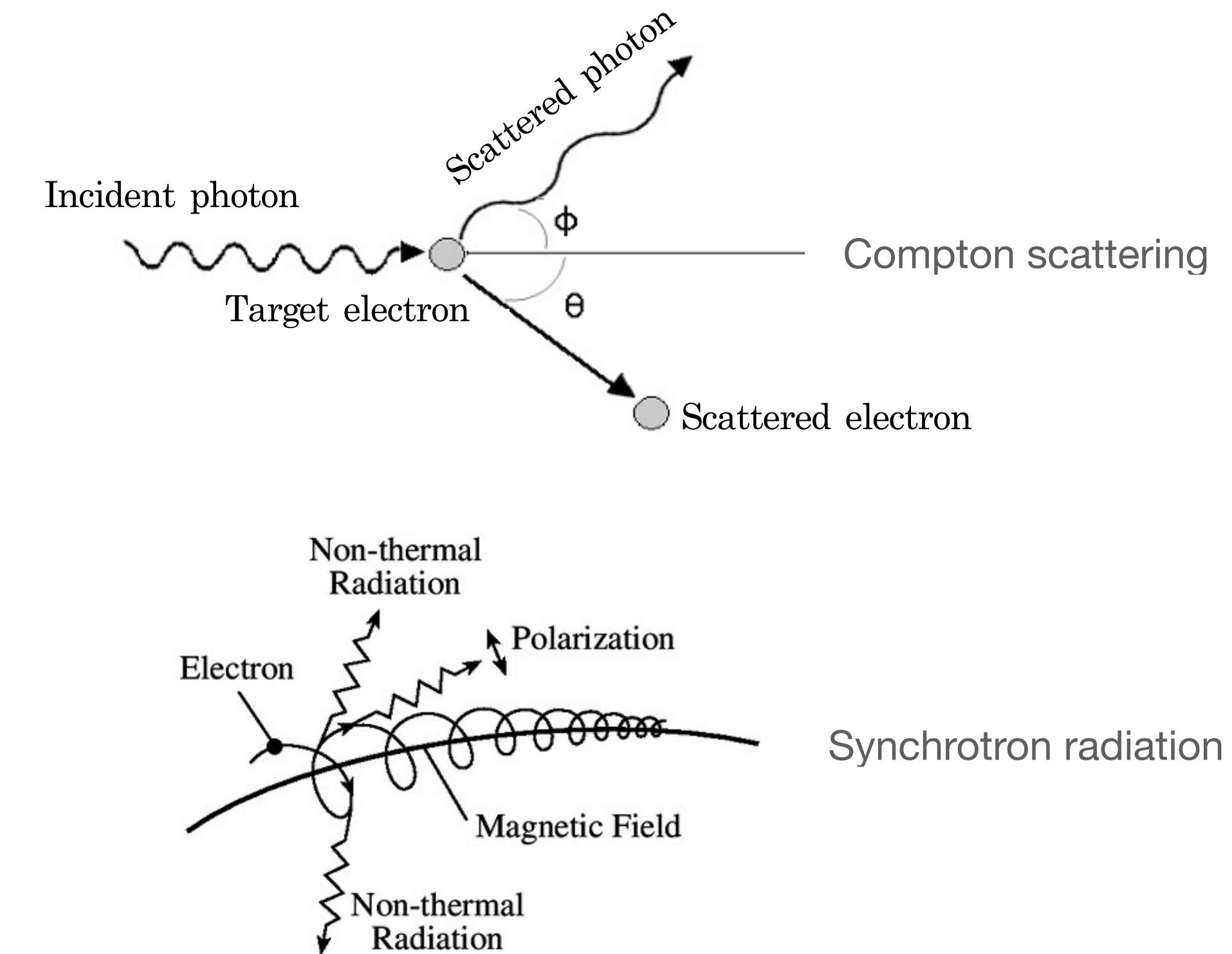
Мотивация исследования

Выбор инструмента

Существует множество методов, с помощью которых можно исследовать вклад различных компонент: **фотометрия, спектроскопия, imaging, timing и поляриметрия**

Почему **поляриметрия**?

- **Поляризованное излучение** образуется в множестве физических процессов, происходящих в недрах рентгеновских двойных, например при **Комptonовском рассеянии** излучения на электронах или в процессе **синхротронного излучения**
- Поляризация несёт в себе **информацию о геометрии излучающей/рассеивающей среды**
- Свойства поляризованного излучения (величина, волновая зависимость, переменность) **различны в различных процессах**



Наблюдательные возможности

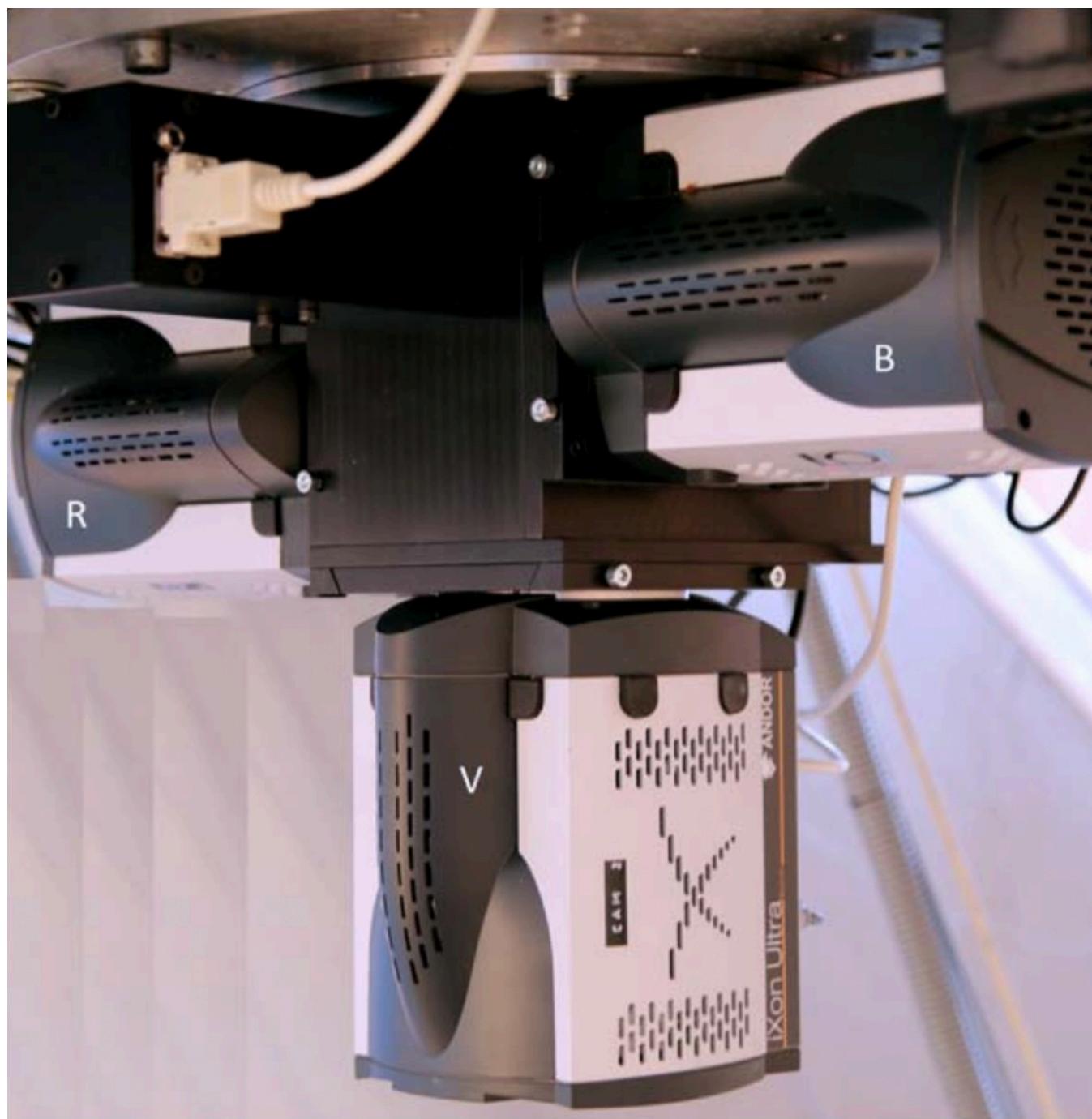
Телескопы и инструменты которые мы использовали

Nordic Optical Telescope (NOT)



La Palma, Canary Islands, Spain

DIPol-UF polarimeter, mounted on NOT



Simultaneous Three-color (*BVR*) polarimeter

Почему DIPol-UF/2?

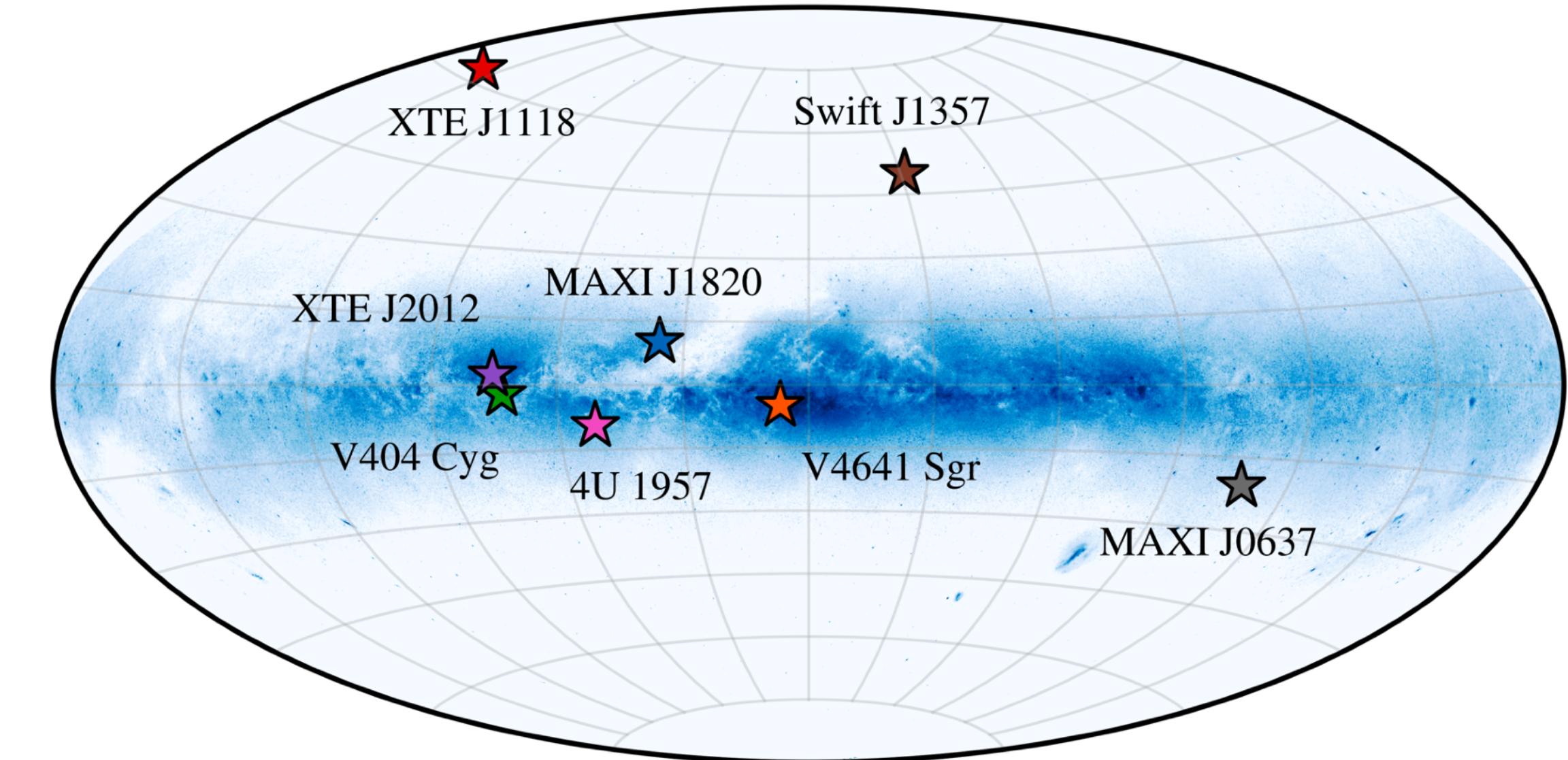
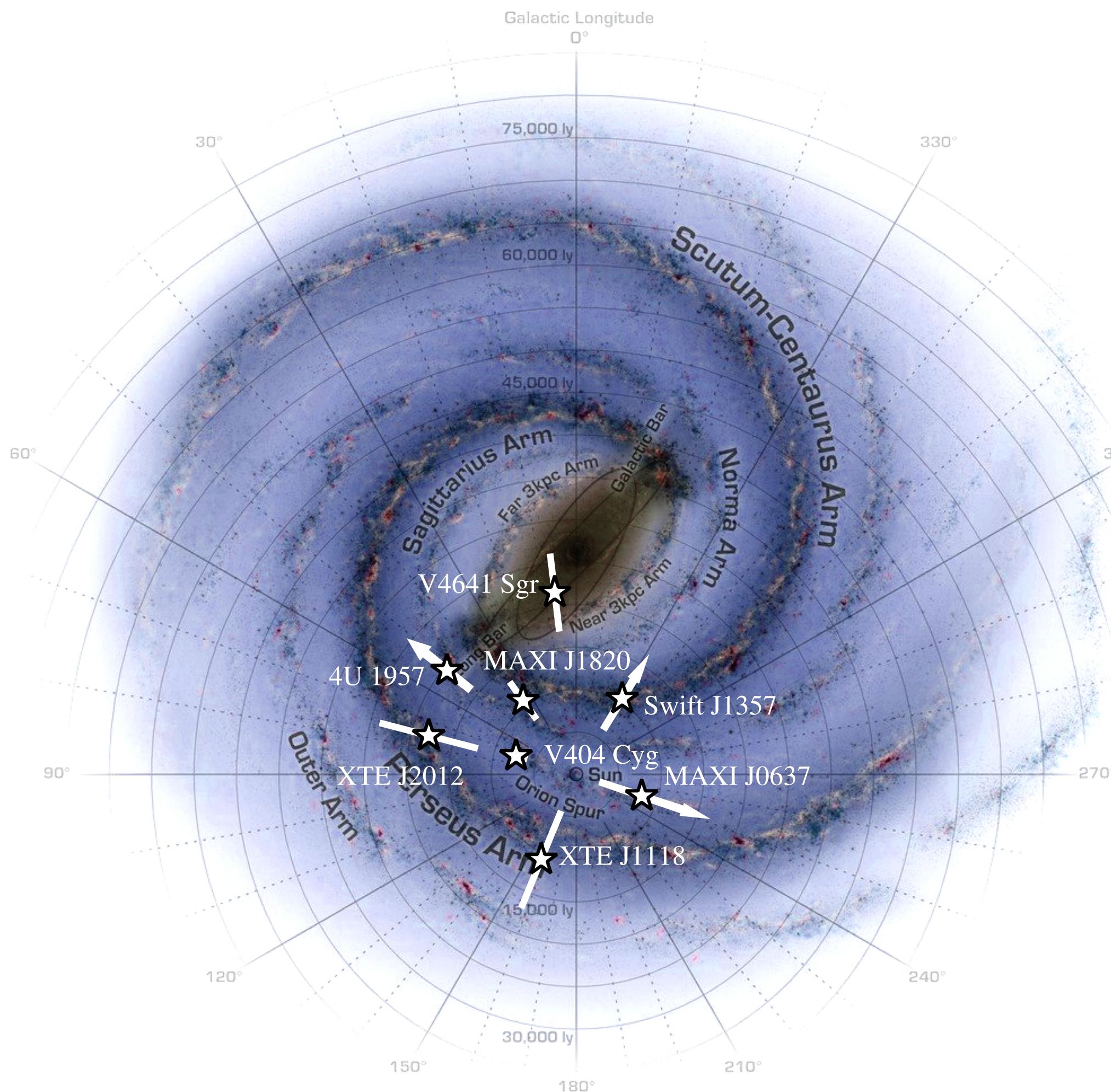
- Точность до 10^{-5} ($\Delta P \sim 0.001\%$)
- Одновременная поляриметрия в трёх полосах (*BVR*)
- Вклад поляризации неба оптически устранён.

Piirola et al., 2020

Часть 2: LMXBs – результаты

Наша выборка BHXBs

Распределение в галактике и основные параметры



Object	Companion	V mag	i deg	P_{orb}
XTE J1118+480	K7 V – M1 V	19.6 ± 0.2^1	68 ± 2	$4.07841(5)$ h
Swift J1357.2–0933	M5 V	17.27 ± 0.02^1	> 70	2.8 ± 0.3 h
4U 1957+115	...	$\approx 19.0^3$	$20 – 70$	9.33 ± 0.01 h
V404 Cyg	K3 III	$\approx 18.7^2$	67 ± 3	6.473 ± 0.001 d
V4641 Sgr	B9 III	$\approx 13.5^2$	72 ± 4	2.817 ± 0.001 d
XTE J2012+381	-	21.3 ± 0.1^4
MAXI J1820+070	K4 V	-	73 ± 8	16.87 ± 0.07 h
MAXI J0637–430	...	$\approx 16.5^2$

Наша выборка из 8 LMXBs

Наблюдения

BHXRБ	State	Observing nights
XTE J1118+480	Q	1 (NOT)
Swift J1357.2–0933	RH*	1 (NOT)
4U 1957+115	S	1 (NOT)
V4641 Sgr	RH*, Q	11 (5 – NOT, 6 – T60)
V404 Cyg	RH, Q	2 (NOT)
MAXI J1820+070	RH*, S, DH, Q	10 (T60)
MAXI J0637–430	S	3 (T60)

States: Q – quiescence, RH – rising hard, S – soft, DH – decaying hard

*Failed outburst

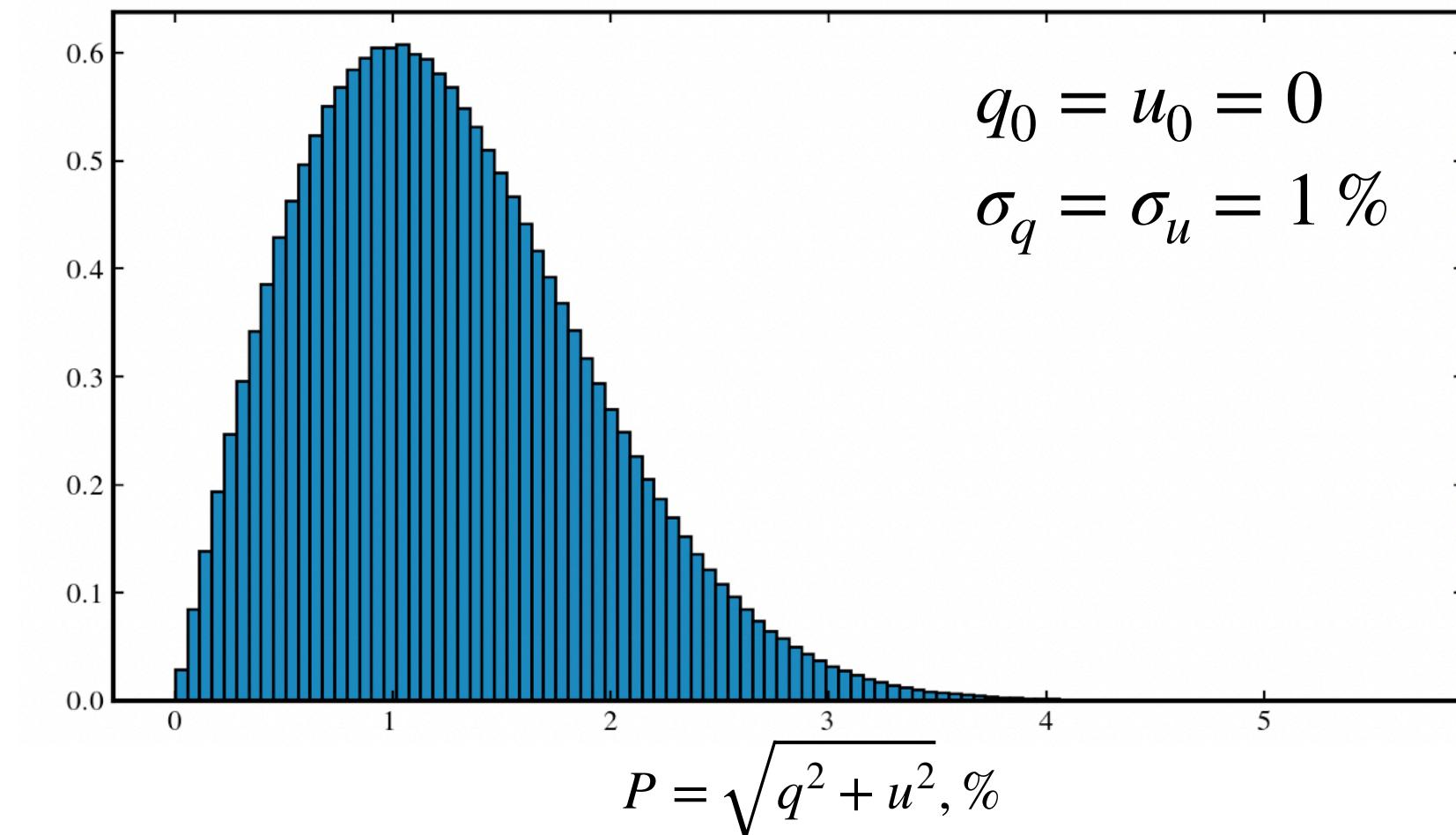
$$\begin{aligned} q_{\text{obs}} &= q_{\text{int}} + q_{\text{is}} \\ u_{\text{obs}} &= u_{\text{int}} + u_{\text{is}} \end{aligned} \Rightarrow \boxed{\begin{aligned} q_{\text{int}} &= q_{\text{obs}} - q_{\text{is}} \\ u_{\text{int}} &= u_{\text{obs}} - u_{\text{is}} \end{aligned}}$$

$$P_{\text{int}} = \sqrt{q_{\text{int}}^2 + u_{\text{int}}^2} \quad \theta_{\text{int}} = \frac{1}{2} \arctan u_{\text{int}} / q_{\text{int}}$$

When $P/\sigma < 5$, the polarization degree is biased towards higher values!

$$P_0 = \sqrt{P^2 - 2\sigma^2}, \text{ Simmons \& Stewart (1985)}$$

unbiased maximum-likelihood estimator



Результаты: Swift J1357.2–0933, 4U 1957+115 and XTE J1118+480

Наблюдаемая и собственная поляризация

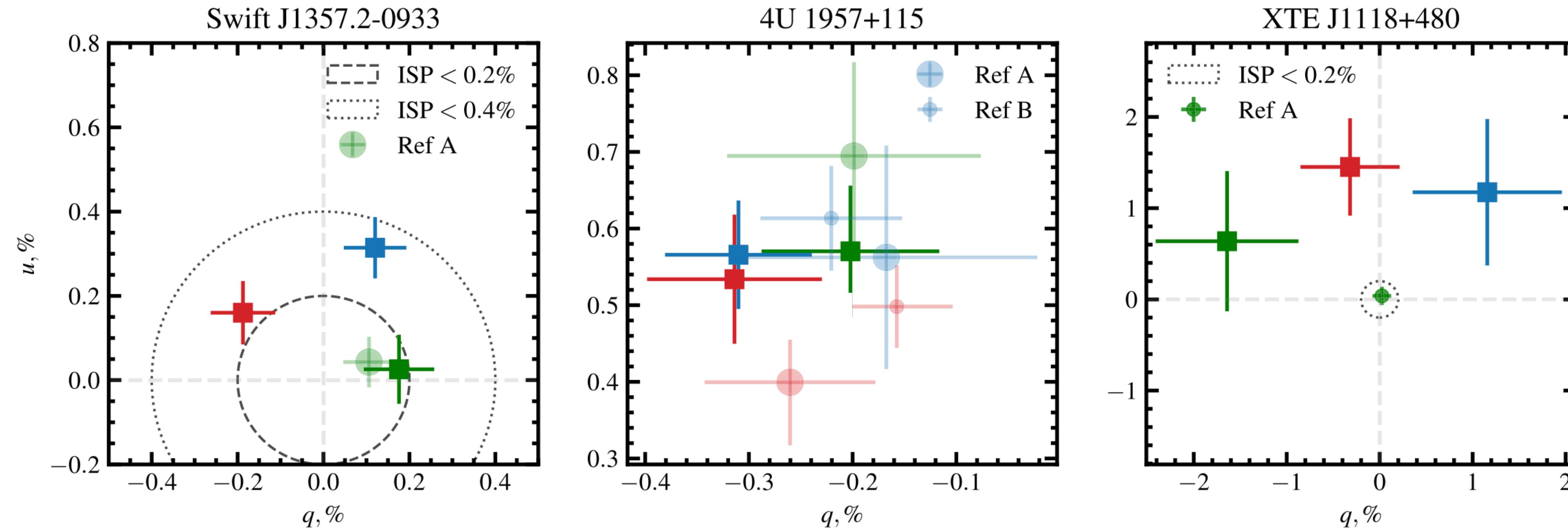


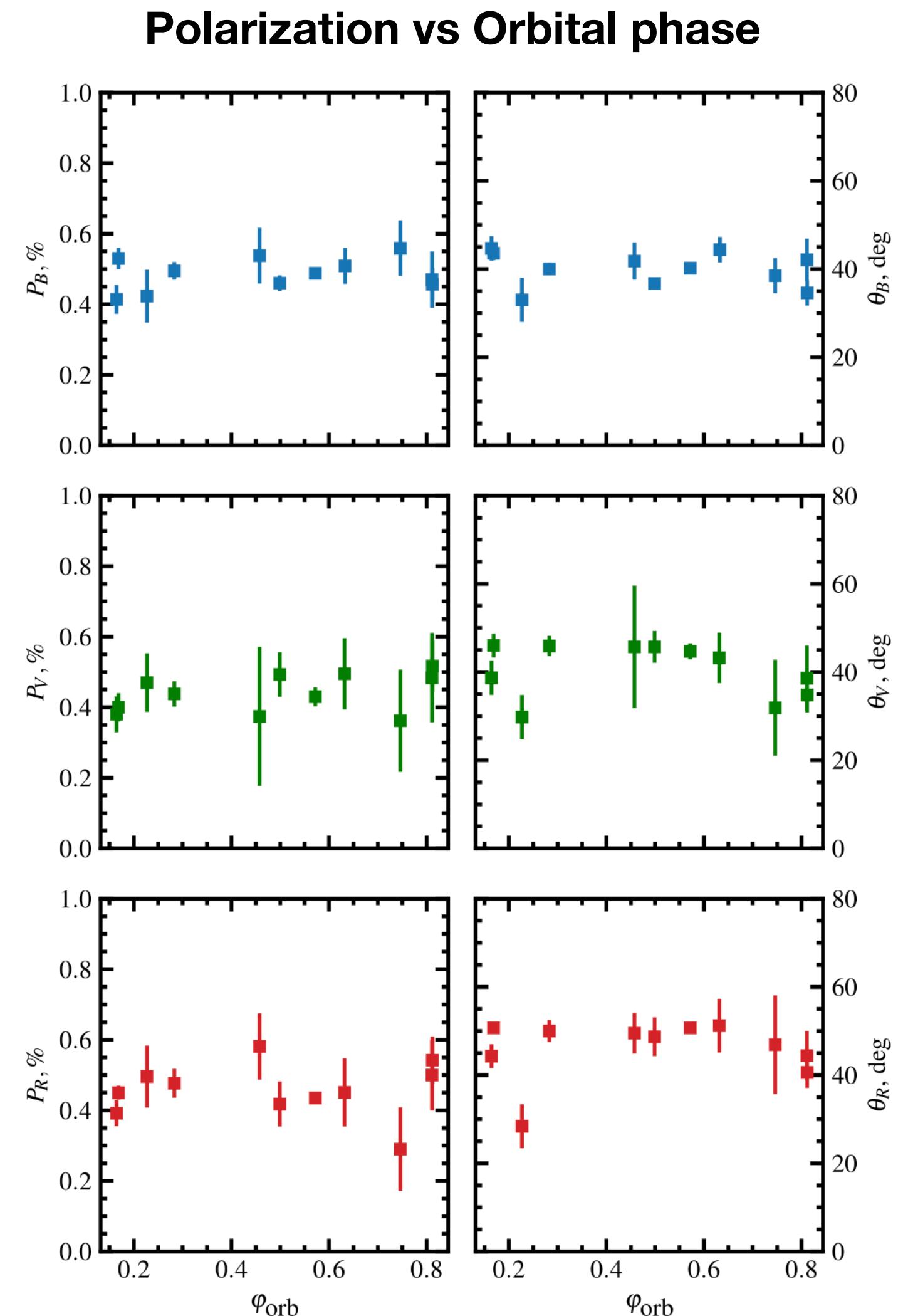
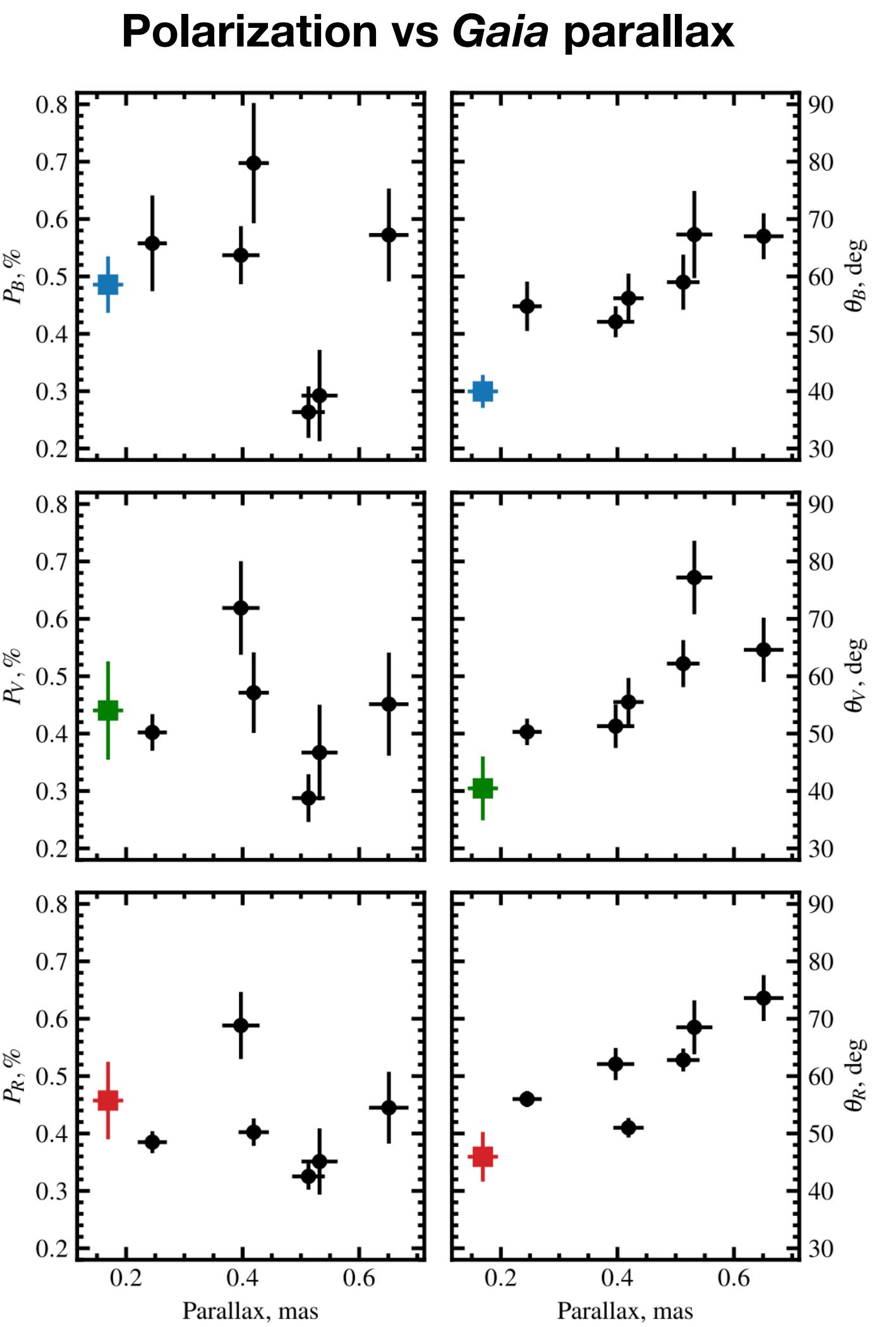
Figure 1. Normalized observed Stokes parameters (q, u) for Swift J1357.2–0933, 4U 1957+115, and XTE J1118+480 (from left to the right). The blue, green, and red squares with 1σ errors correspond to the B , V , and R optical polarimetric measurements of the targets and the circles correspond to nearby stars.

Результаты: V4641 Sgr

We measured the polarization of **six** nearby field stars with similar *Gaia* parallaxes.

The observed polarization of **V4641 Sgr** is consistent with the polarization pattern of nearby stars and shows **no dependence on orbital phase**.

From these two facts we can conclude, that the **polarization of V4641 Sgr has an interstellar origin**.



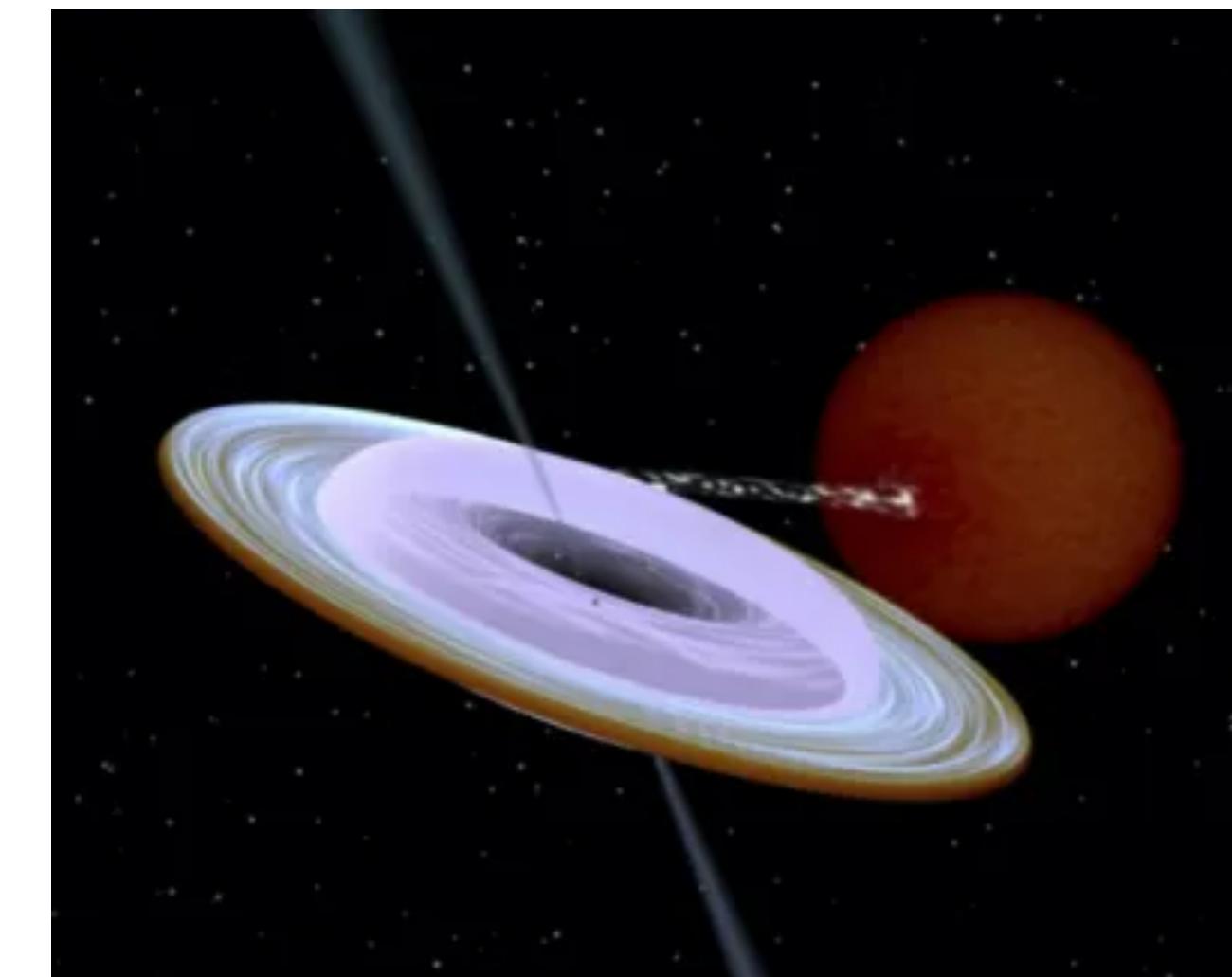
Результаты: MAXI J1820+070, V404 Cyg and MAXI J0637–430

MAXI J1820+070 показывает сложное поведение собственной поляризации:

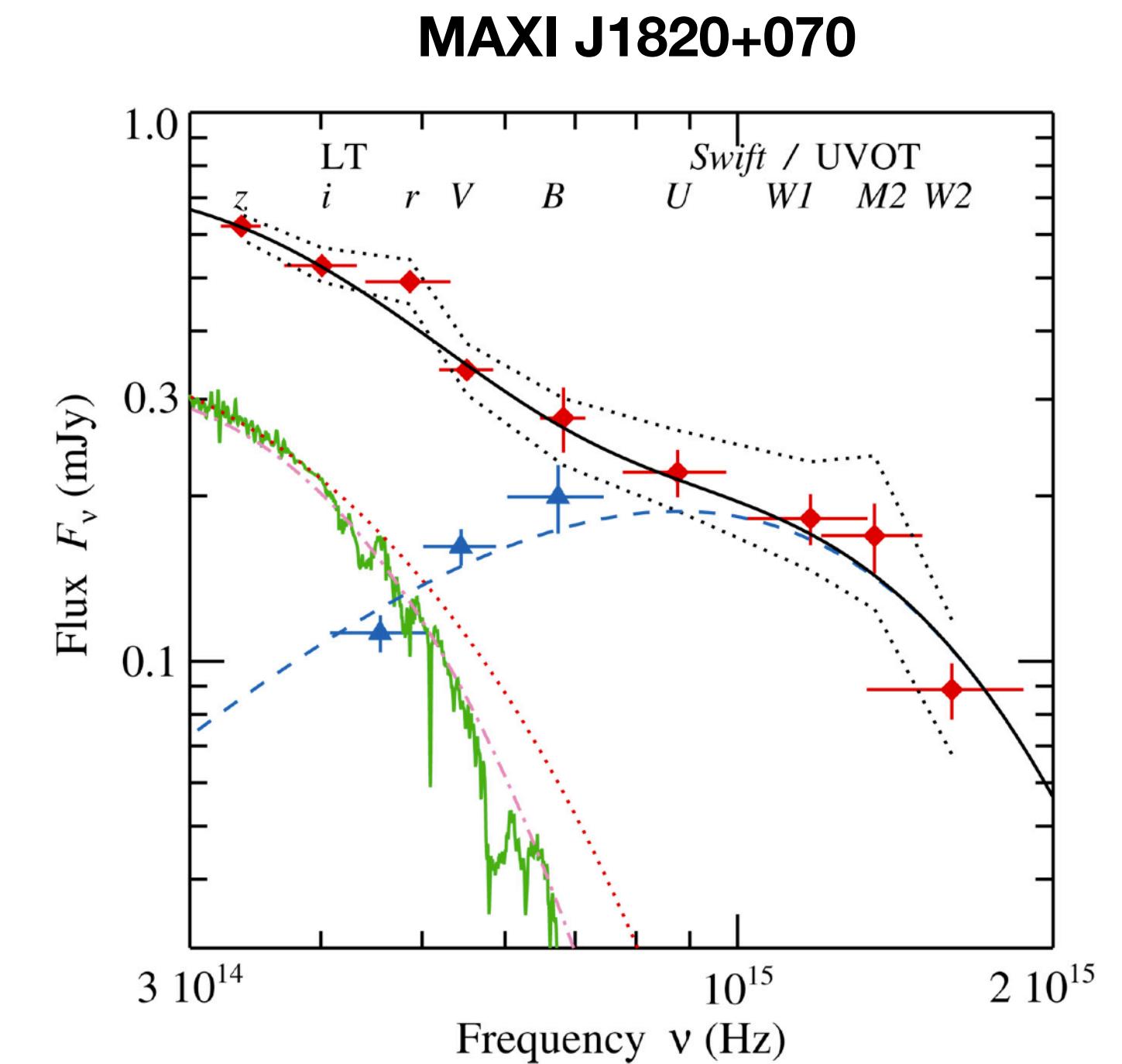
- $P_{\text{int}} \sim 0.5 \%$ с красным спектром ***rising hard state***
- $P_{\text{int}} \sim 0.1 \%$ в ***soft state***
- Отсутствие поляризации ***decaying hard state***
- **Значительная (до $P_{\text{int}} \sim 5 \%$) собственная поляризация с синим спектром в *quiescent state*** (Poutanen et al., 2022, Science)

V404 Cyg показывает малую ($P_{\text{int}} < 0.5 \%$) собственную поляризацию в ***quiescent state***

Поляризация MAXI J0637–430 равна нулю (верхний 3σ предел $P_{\text{int}} < 1.1 \%$)



Jet-Spin misalignment in MAXI J1820+070



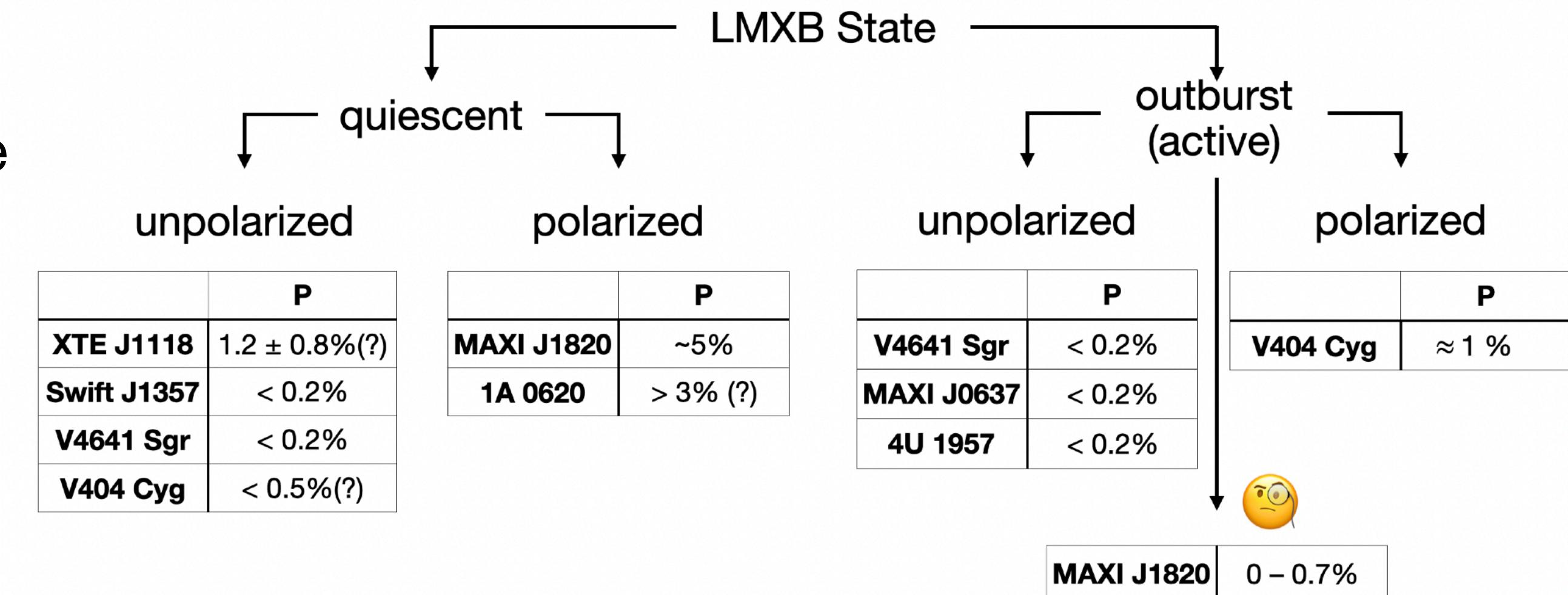
Оценки собственной поляризации для звёзд выборки

Итоги мониторинга LMXBs

- Большинство объектов **не показало свидетельств** наличия значимой собственной поляризации
- Отсутствие собственной поляризации в оптическом диапазоне **накладывает ограничения** на потенциальный вклад non-stellar (jet, hot flow, accretion disc) компонент в общий спектр
- Нужен более систематический и ещё более точный обзор поляризации LMXBs, особенно в quiescent state

Source	State	P_B per cent	P_V per cent	P_R per cent
XTE J1118+480	Q	1.2 ± 0.8	1.4 ± 0.8	1.3 ± 0.5
Swift J1357.2–0933	RH ^a	≤ 0.5	≤ 0.4	≤ 0.4
4U 1957+115	S	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.3
V4641 Sgr	RH ^a	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
	Q	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
V404 Cyg	RH	0.8 ± 0.3	1.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1
	Q	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
MAXI J1820+070	RH1	0.28 ± 0.01	0.36 ± 0.01	0.30 ± 0.01
	RH2	0.34 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.53 ± 0.02
	S	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	DH	0.06 ± 0.04	0.13 ± 0.06	0.09 ± 0.04
	RH ^a	≤ 0.3	≤ 0.4	≤ 0.3
	Q	3.2 ± 0.2	1.9 ± 0.2	0.9 ± 0.1
MAXI J0637–430	S	≤ 0.2	—	—

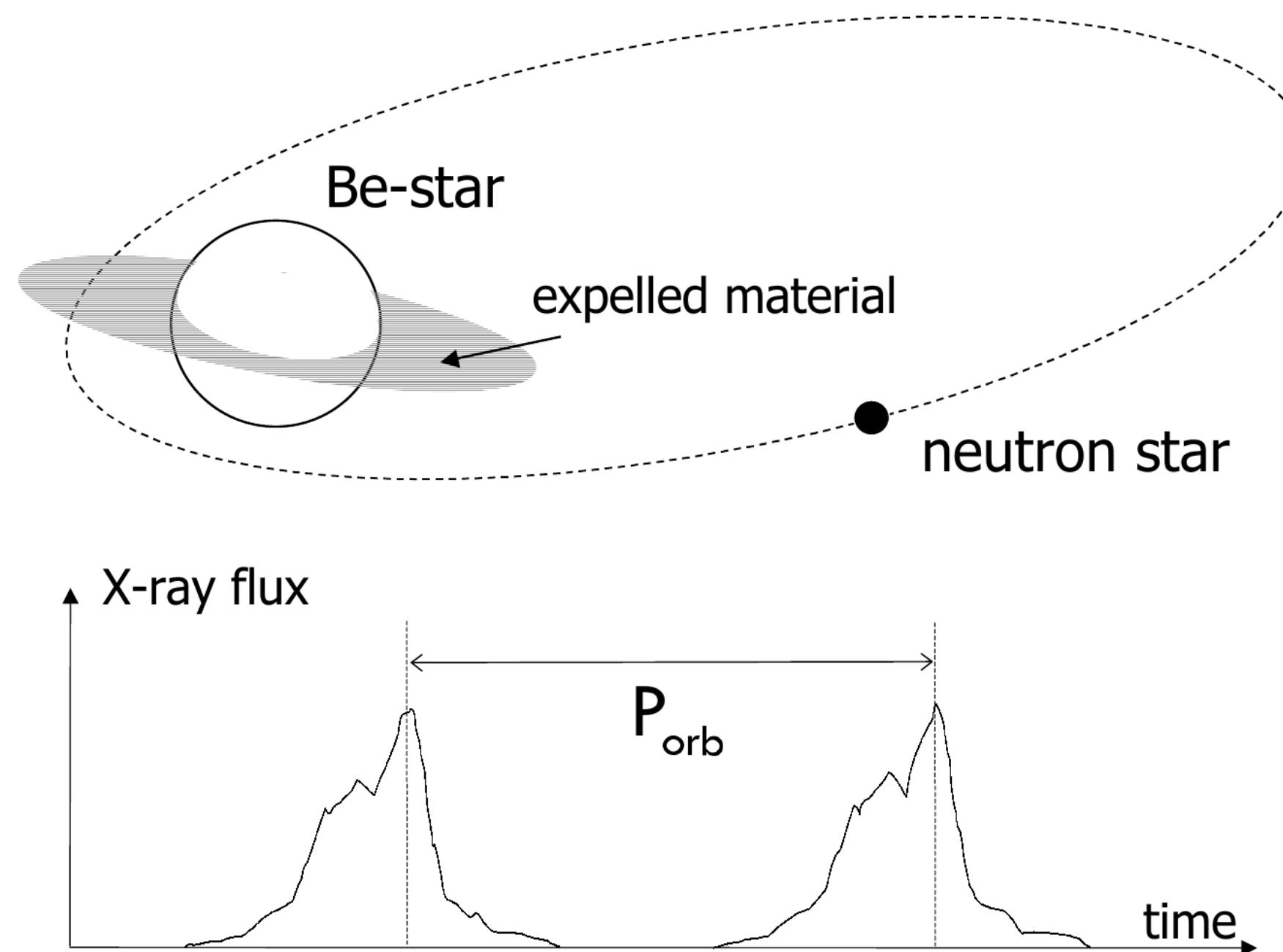
Notes. ^aFailed outburst. States: Q – quiescence, RH – rising hard, S – soft, DH – decaying hard



Часть 3: НМХВс – результаты

LS I +61 303

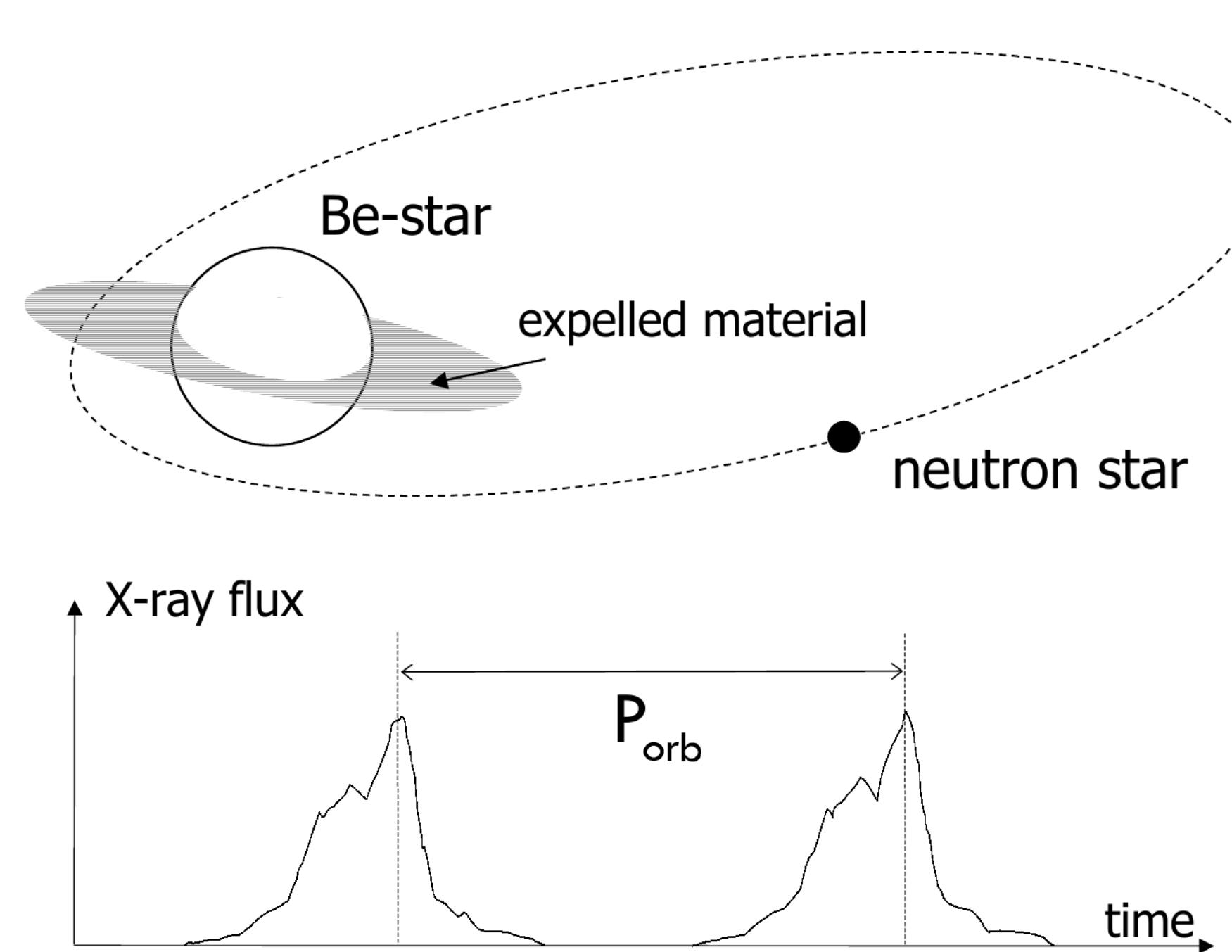
Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой



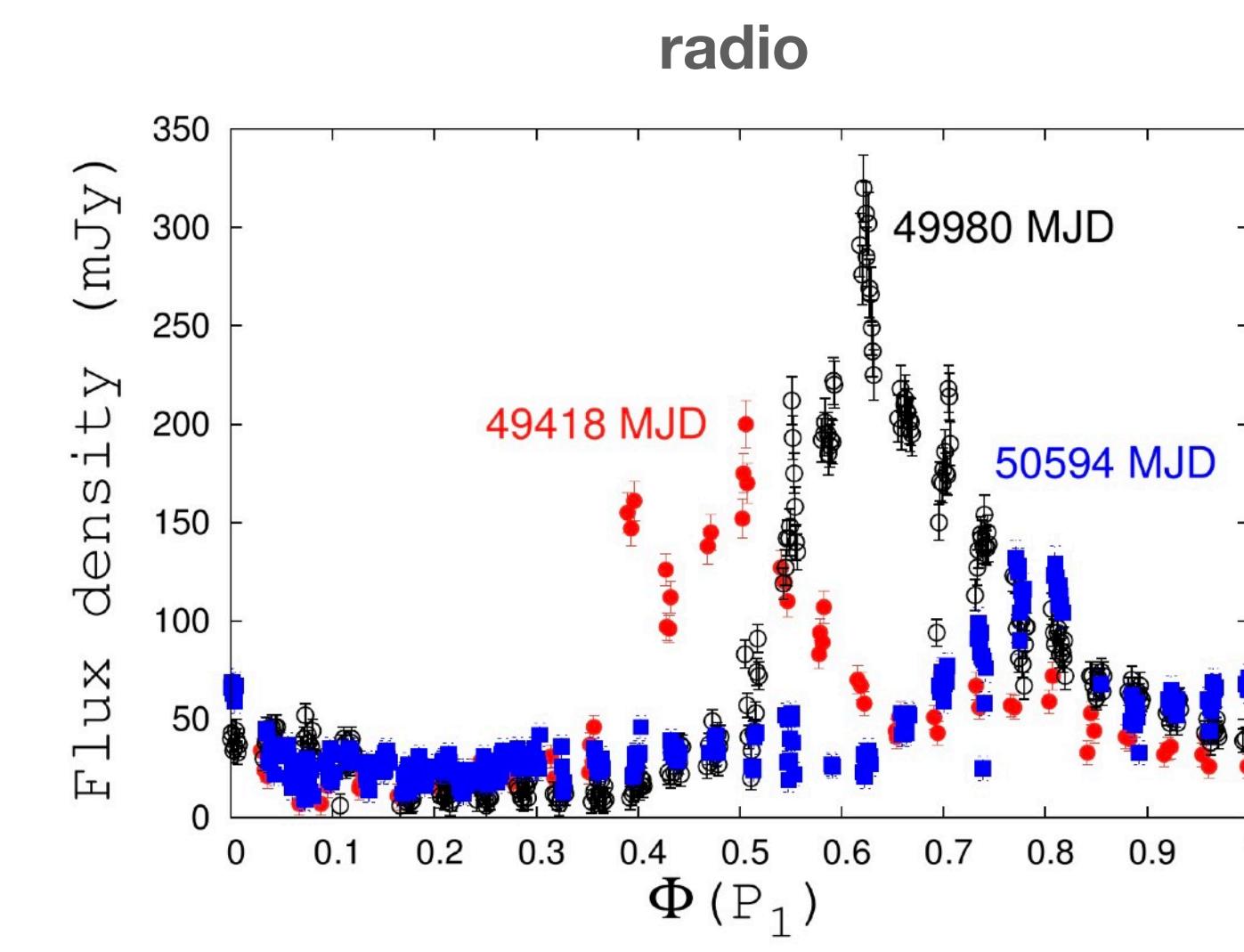
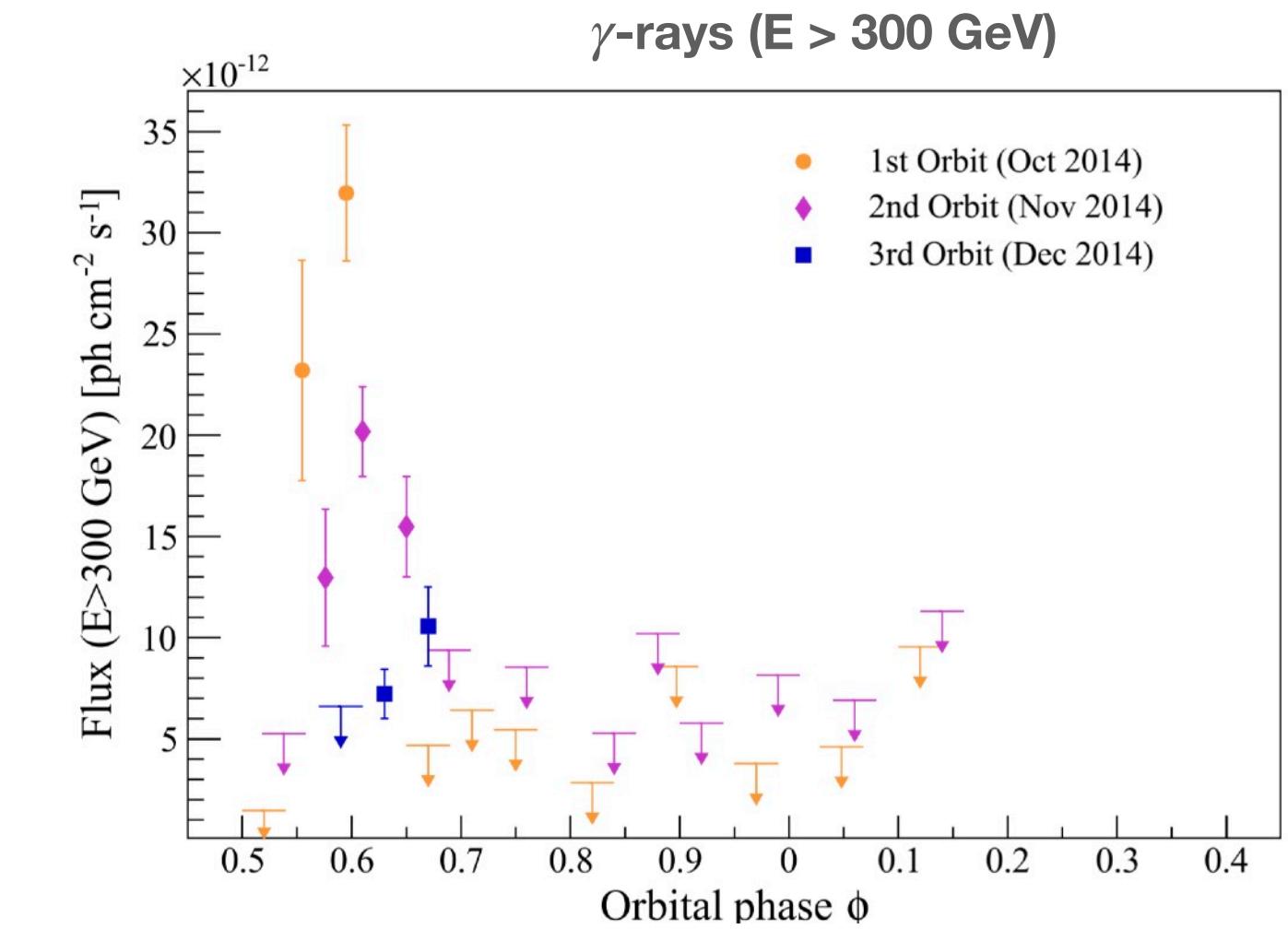
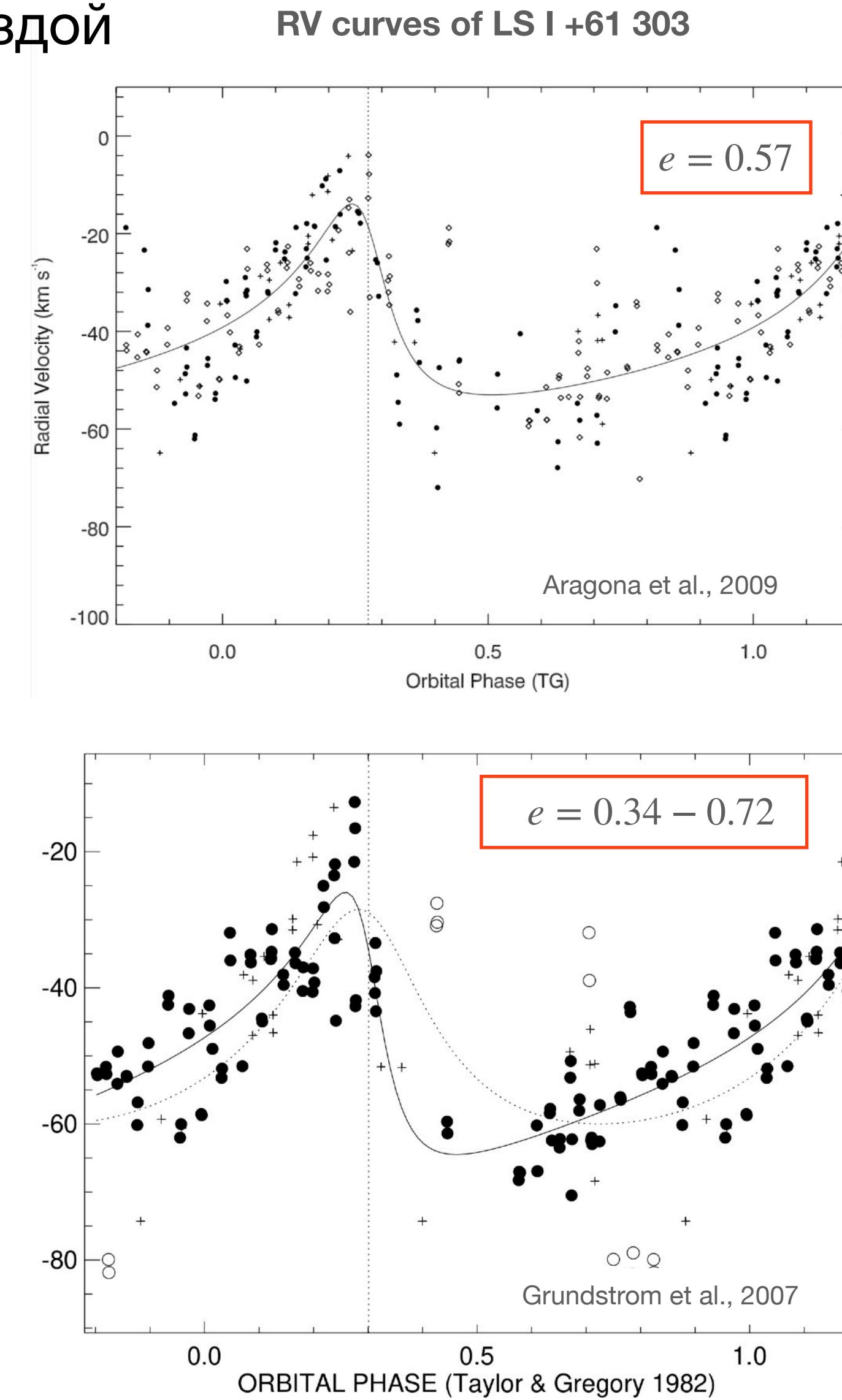
- $P_{\text{orb}} = 26.496^d$
- $e = (0.3 - 0.8)?$
- $i = (10^\circ - 60^\circ)$
- Фаза перигастра $\phi_p = 0.275?$

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой



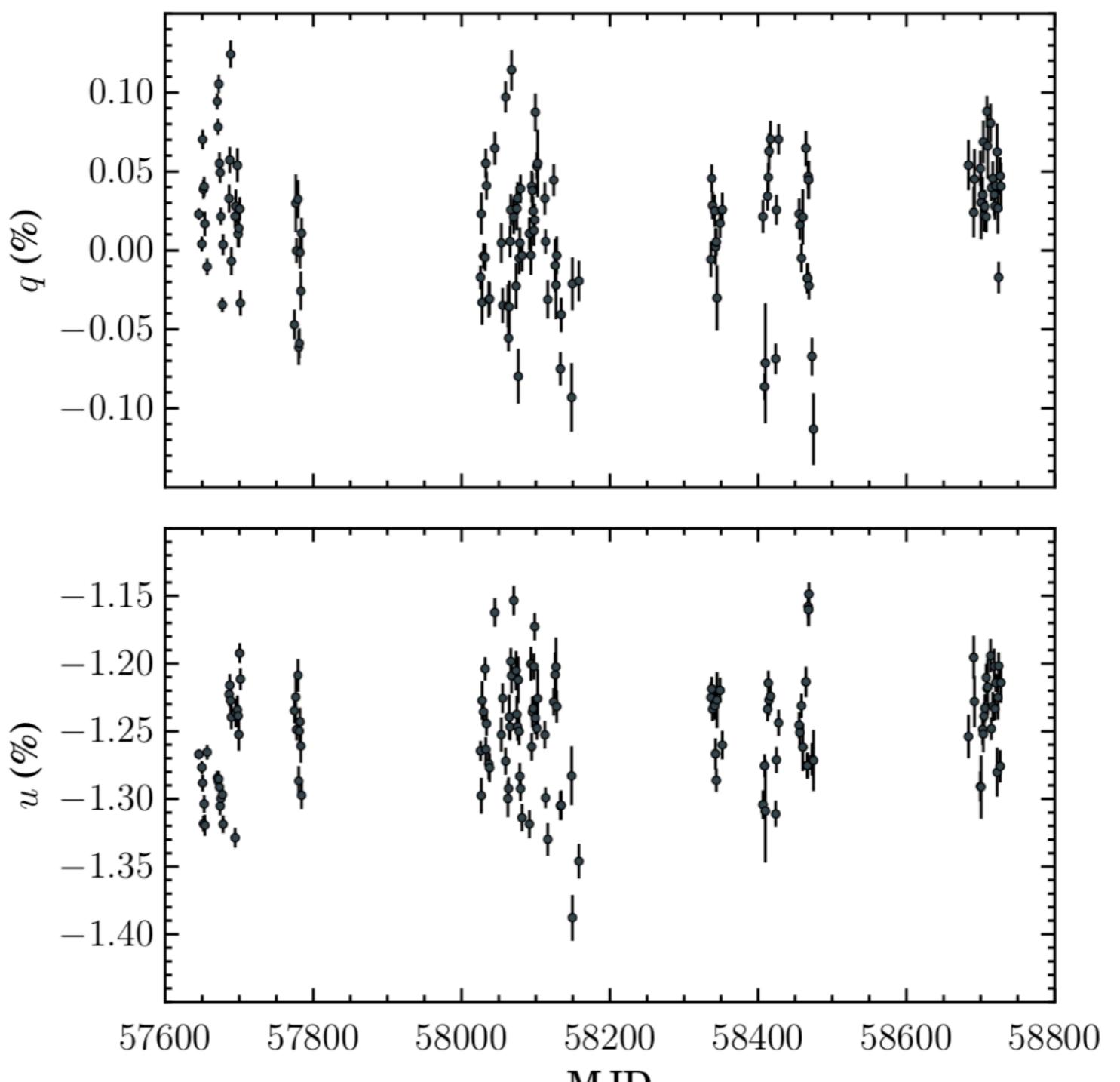
- $P_{\text{orb}} = 26.496^d$
- $e = (0.3 - 0.8)?$
- $i = (10^\circ - 60^\circ)$
- Фаза перигастра $\phi_p = 0.275?$



LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой

140 ночных наблюдений на T60

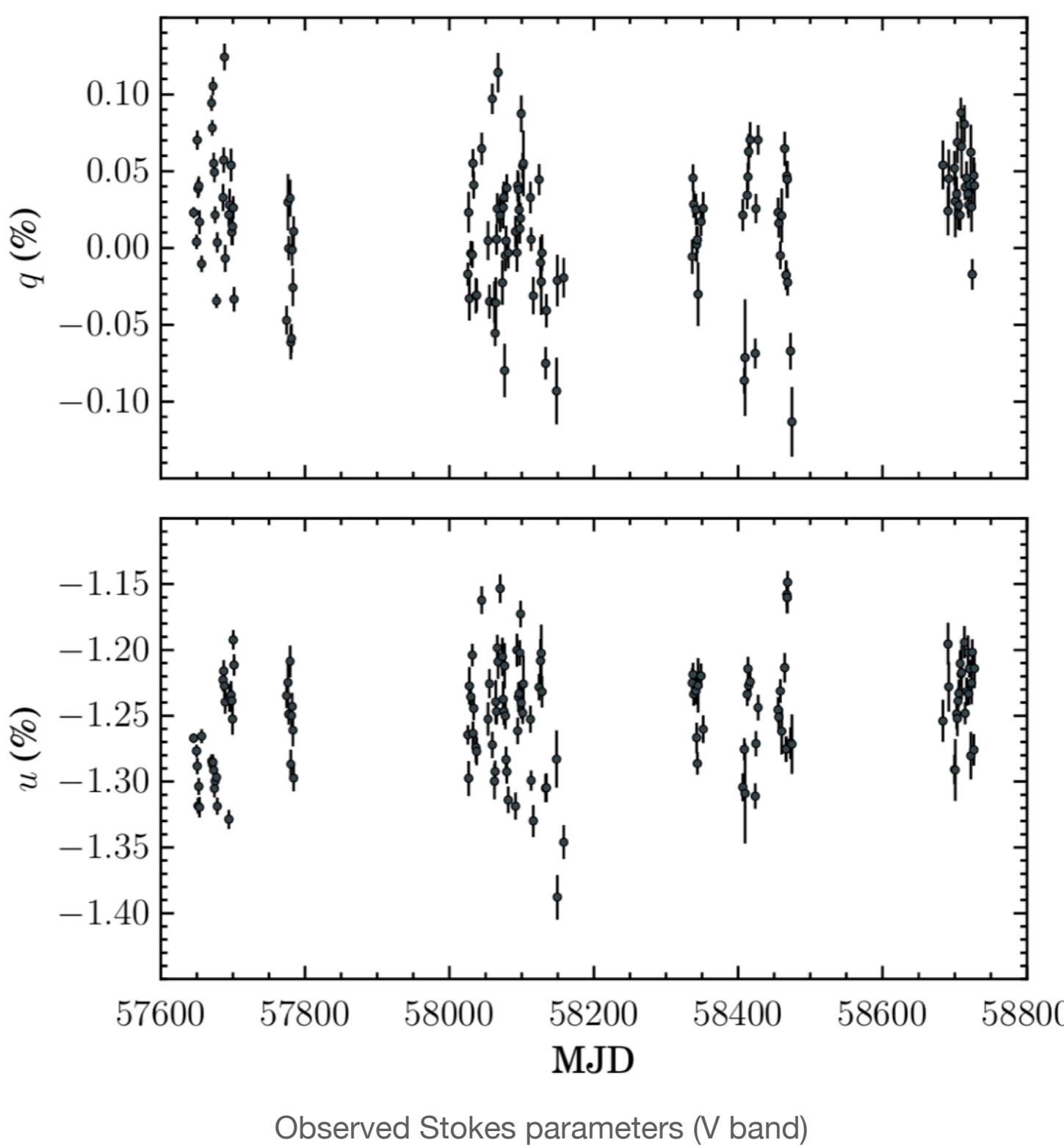


Observed Stokes parameters (V band)

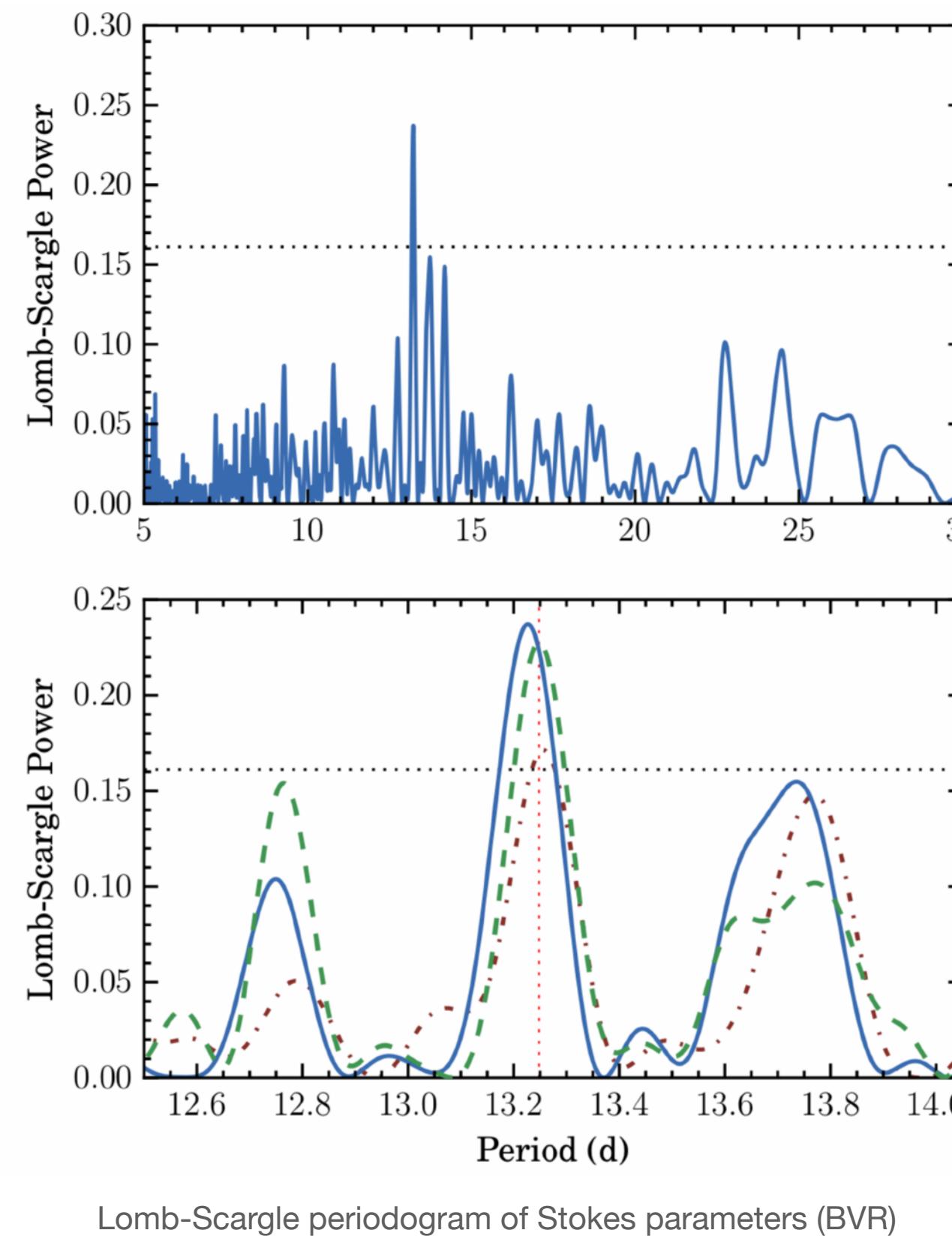
LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой

140 ночных наблюдений на Т60



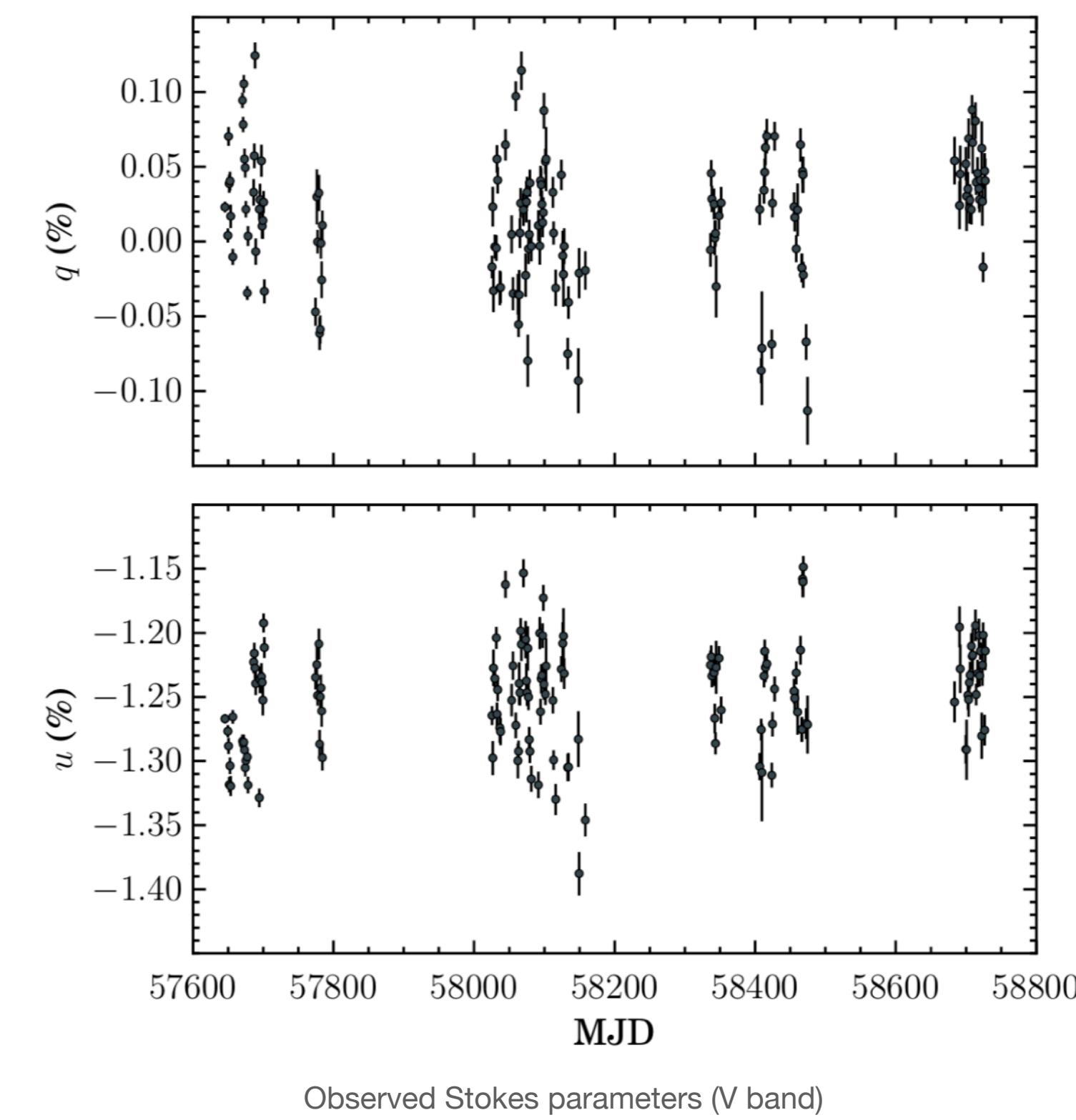
Обнаружение переменности



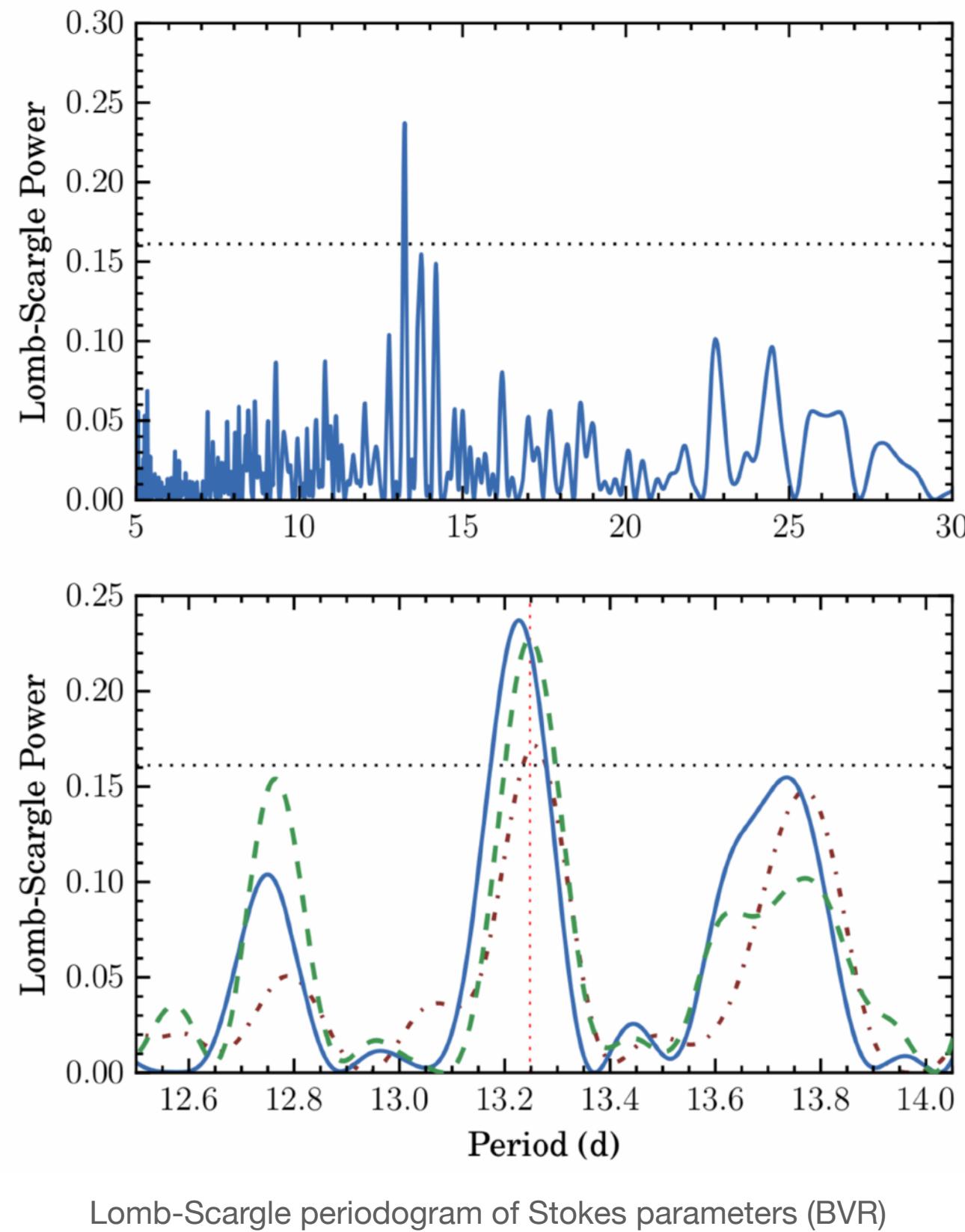
LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой

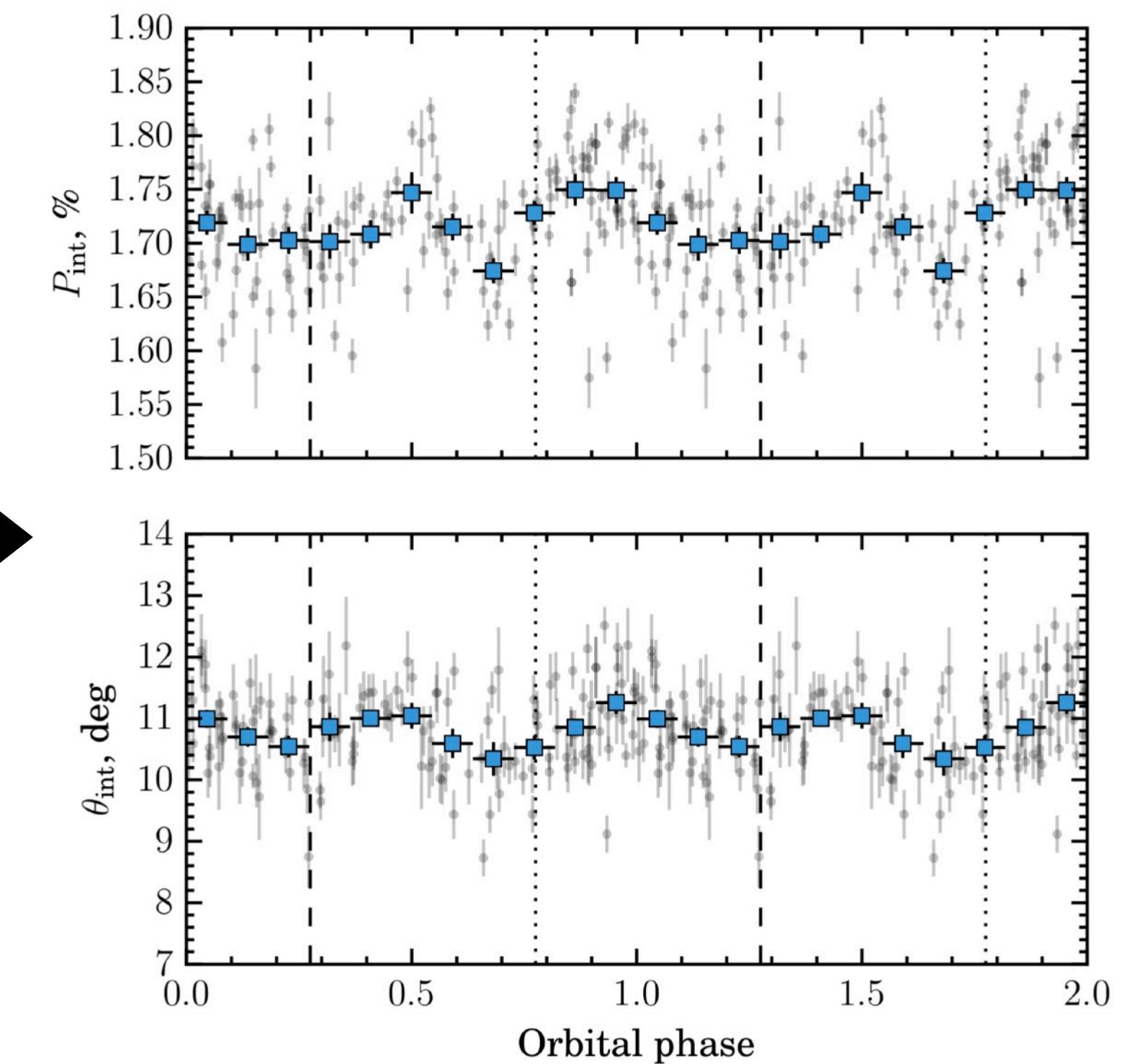
140 ночей наблюдений на Т60



Обнаружение переменности



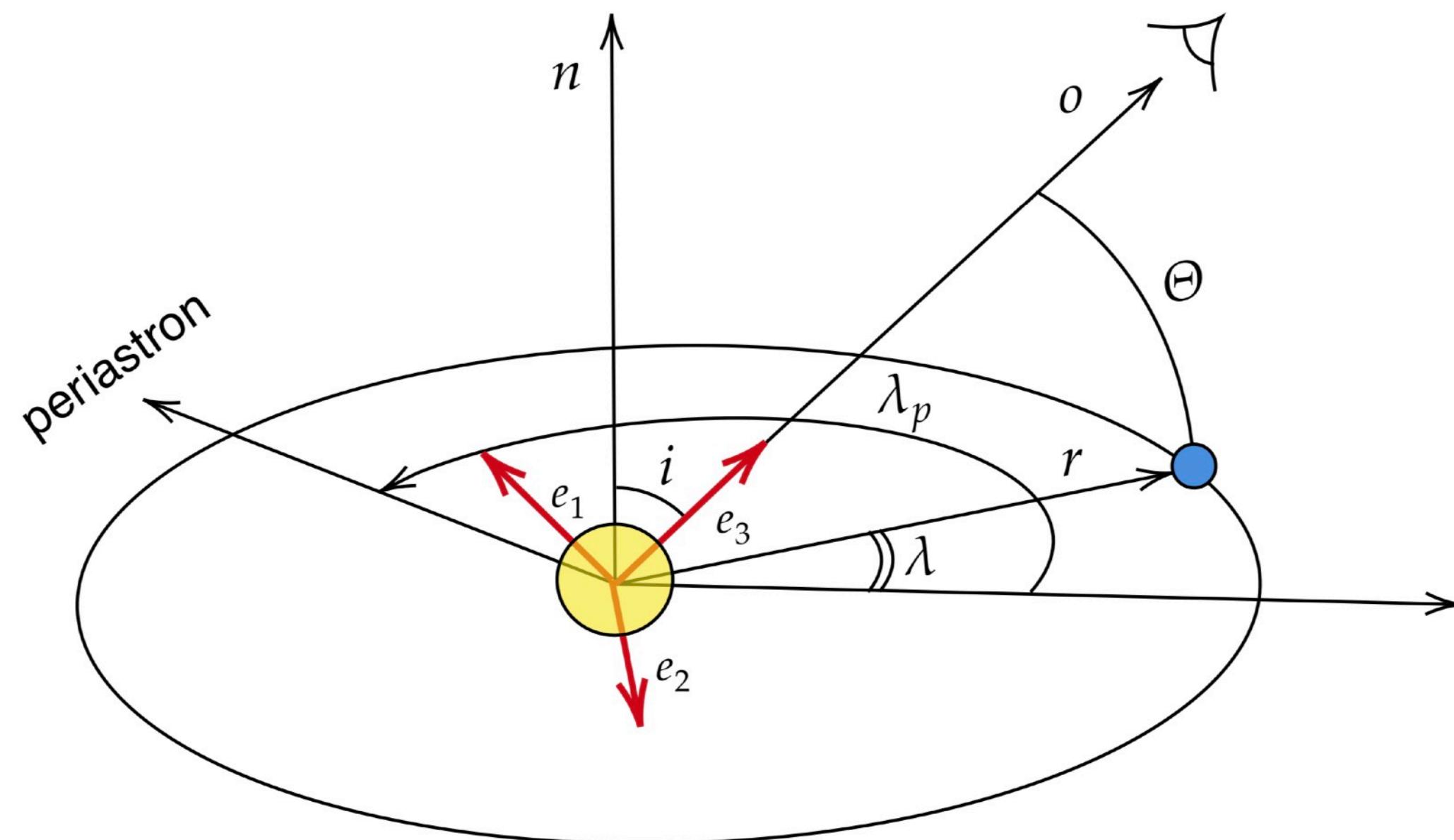
Орбитальная кривая поляризации



Orbital variability of the intrinsic polarization degree and polarization angle of LS I +61 303 in V band.

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой

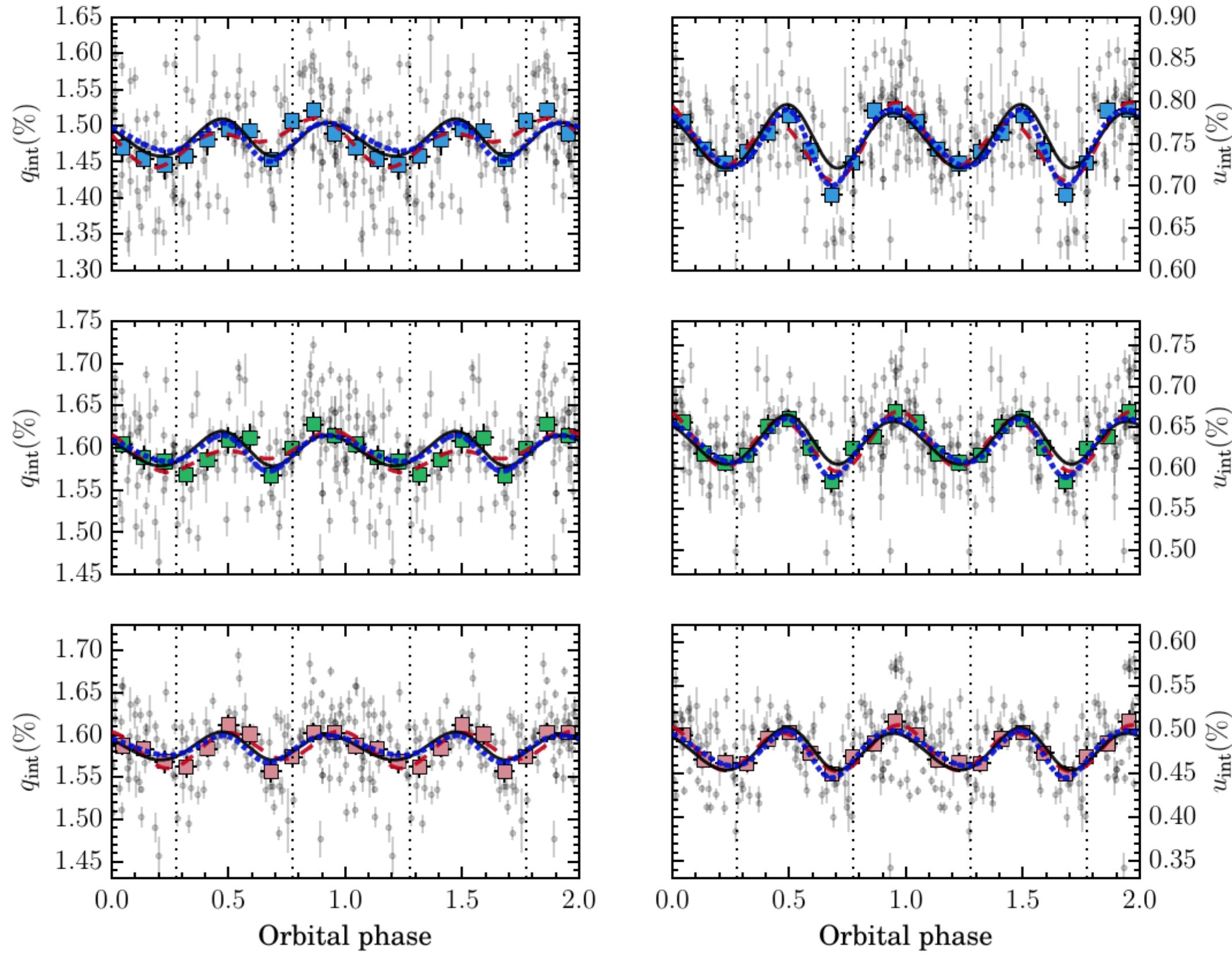


- Для описания наблюдений мы предложили простейшую геометрическую модель Томсоновского рассеяния облаком электронов, которое вращается вокруг центрального источника излучения.
- Свободные параметры модели: эксцентриситет e , наклонение орбиты i , долгота λ_p и фаза ϕ_p периастра, позиционный угол Ω орбиты на небе и несколько нормировочных параметров

$$q = \frac{3f_0}{16} [\sin^2 i - (1+\cos^2 i) \cos 2\lambda] [1+e \cos(\lambda - \lambda_p)]^2,$$
$$u = \frac{3f_0}{8} [-\cos i \sin 2\lambda] [1+e \cos(\lambda - \lambda_p)]^2.$$

LS I +61 303

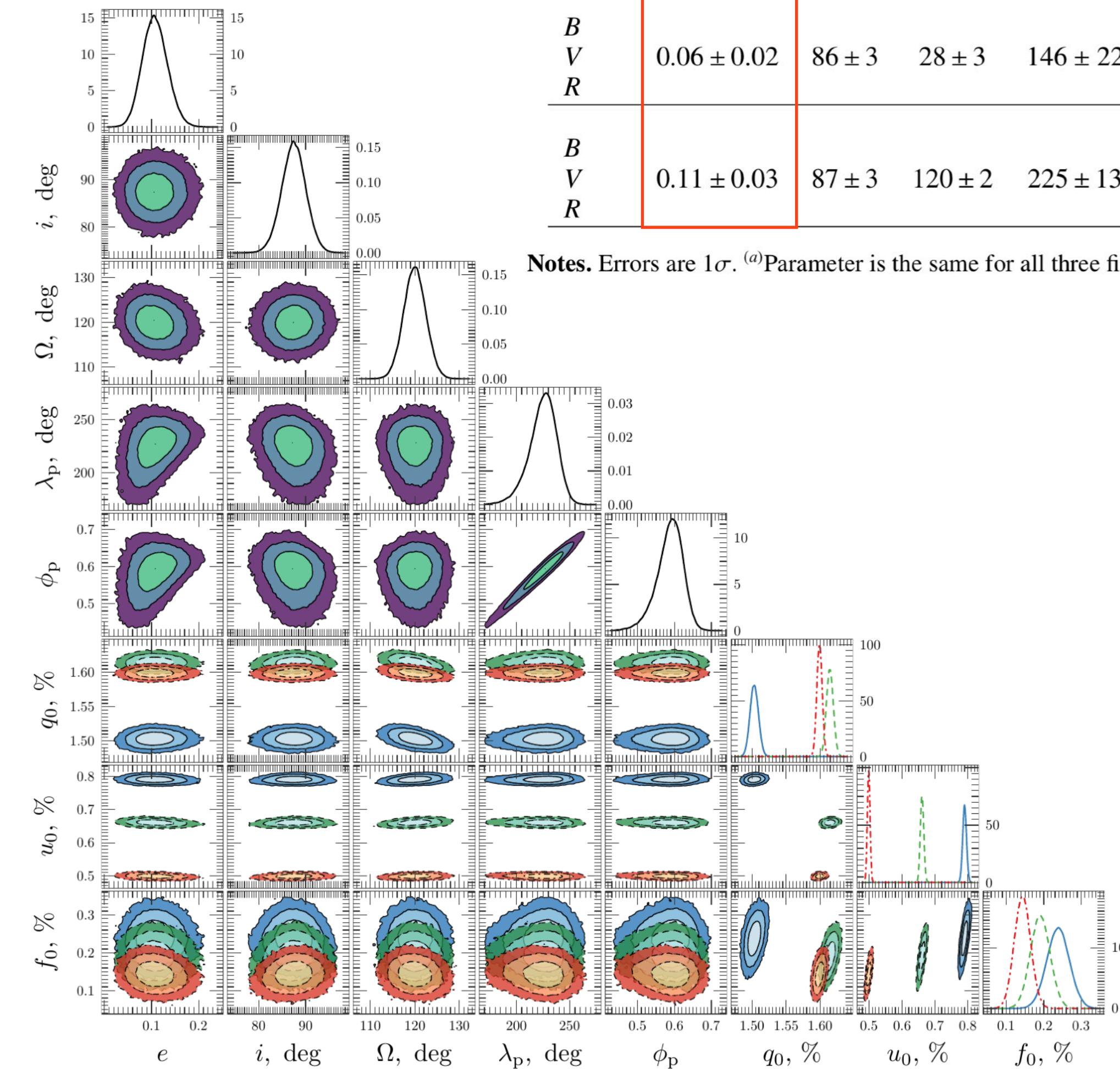
Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой



Наши оценки орбитальных параметров

Filter	$e^{(a)}$	$i^{(a)}$ (deg)	$\Omega^{(a)}$ (deg)	$\lambda_p^{(a)}$ (deg)	$\phi_p^{(a)}$
B	0.06 ± 0.02	86 ± 3	28 ± 3	146 ± 22	0.62 ± 0.07
V					
R	0.11 ± 0.03	87 ± 3	120 ± 2	225 ± 13	0.59 ± 0.04

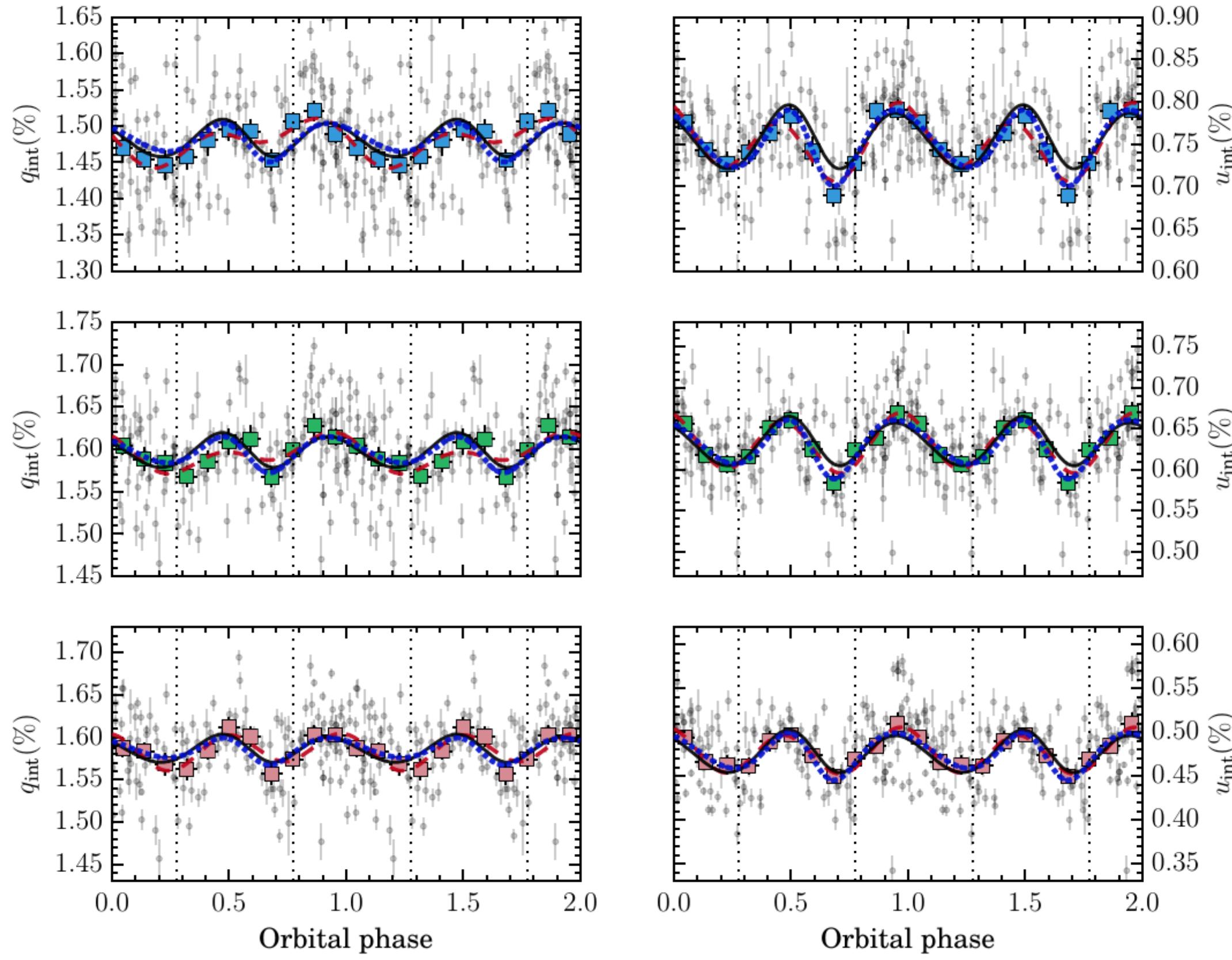
Notes. Errors are 1σ . ^(a)Parameter is the same for all three filters.



Posterior distribution for parameters of model.

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой



Variability of intrinsic Stokes parameters q and u (left and right columns) in BVR bands (from top to bottom) fitted with the model.

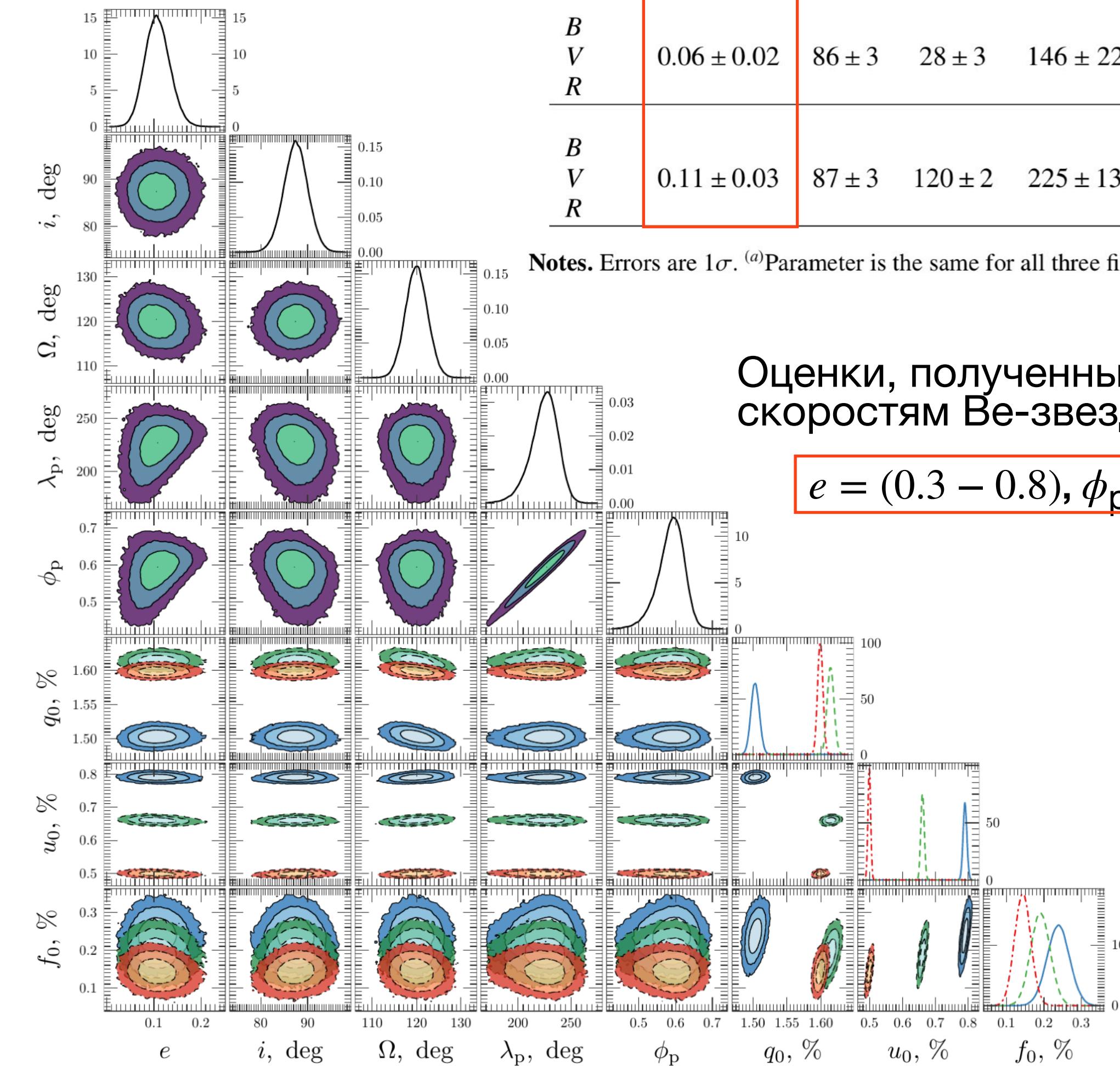
Наши оценки орбитальных параметров

Filter	$e^{(a)}$	$i^{(a)}$ (deg)	$\Omega^{(a)}$ (deg)	$\lambda_p^{(a)}$ (deg)	$\phi_p^{(a)}$
B V R	0.06 ± 0.02	86 ± 3	28 ± 3	146 ± 22	0.62 ± 0.07
B V R	0.11 ± 0.03	87 ± 3	120 ± 2	225 ± 13	0.59 ± 0.04

Notes. Errors are 1σ . ^(a)Parameter is the same for all three filters.

Оценки, полученные по лучевым скоростям Ве-звезды

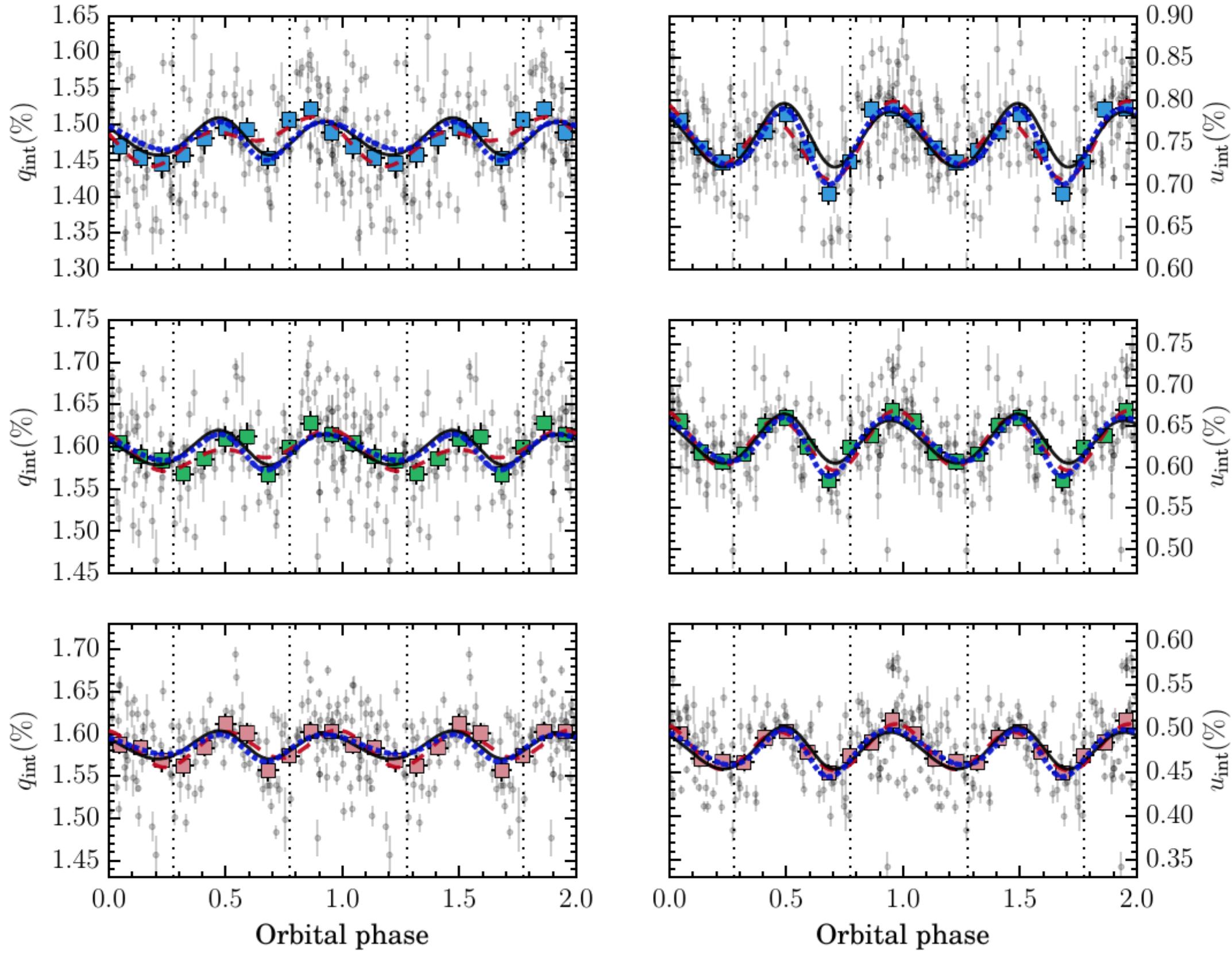
$$e = (0.3 - 0.8), \phi_p = 0.275$$



Posterior distribution for parameters of model.

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Ве-звездой



Variability of intrinsic Stokes parameters q and u (left and right columns) in BVR bands (from top to bottom) fitted with the model.

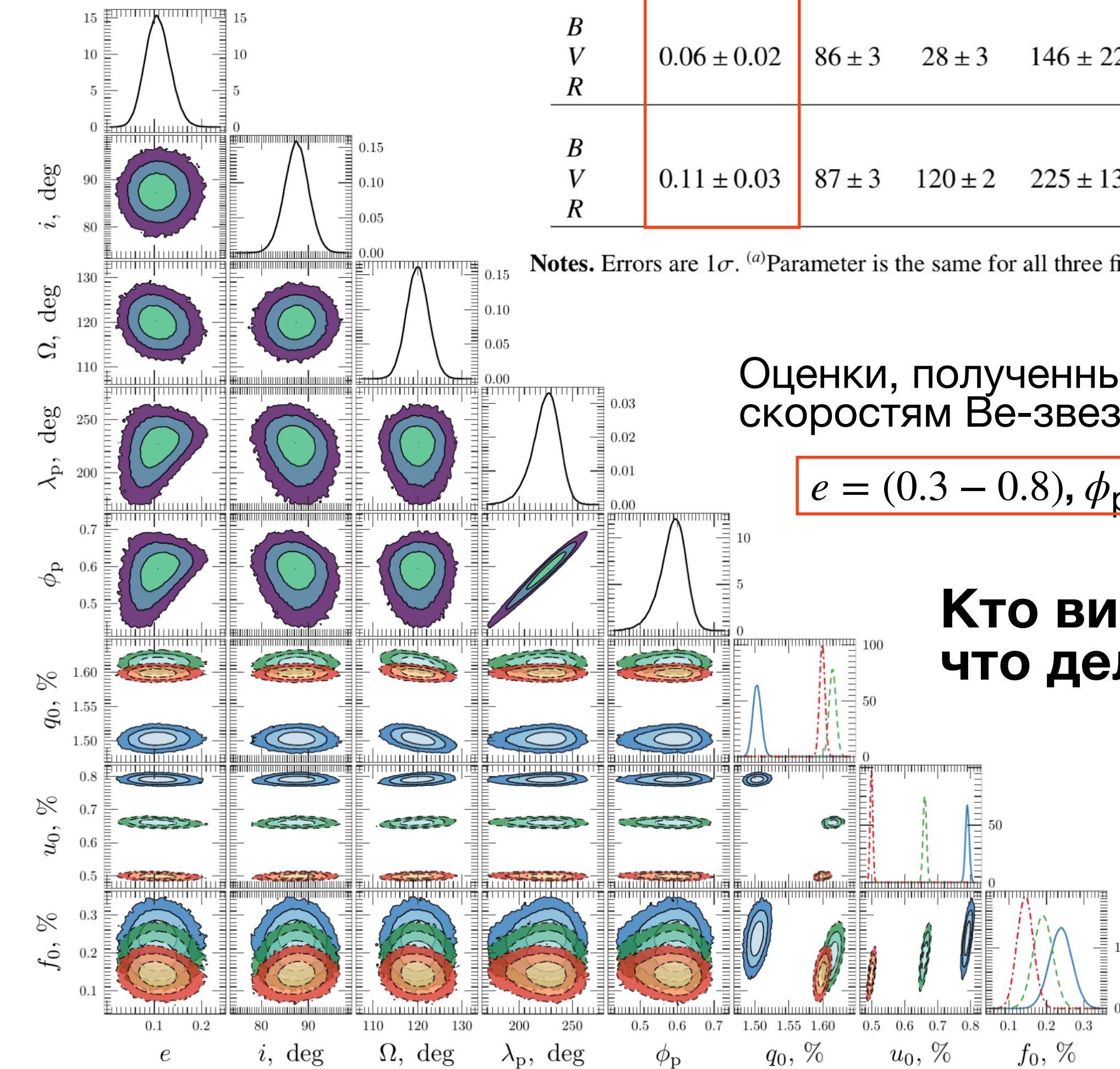
Наши оценки орбитальных параметров

Filter	$e^{(a)}$	$i^{(a)}$ (deg)	$\Omega^{(a)}$ (deg)	$\lambda_p^{(a)}$ (deg)	$\phi_p^{(a)}$
B	0.06 ± 0.02	86 ± 3	28 ± 3	146 ± 22	0.62 ± 0.07
V	0.11 ± 0.03	87 ± 3	120 ± 2	225 ± 13	0.59 ± 0.04
R					$\Omega = \theta_{\text{int}} \pm 10^\circ$
					Free Ω

Notes. Errors are 1σ . ^(a)Parameter is the same for all three filters.

Оценки, полученные по лучевым скоростям Ве-звезды

$$e = (0.3 - 0.8), \phi_p = 0.275$$



Кто виноват и
что делать? 🤔

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Be-звездой

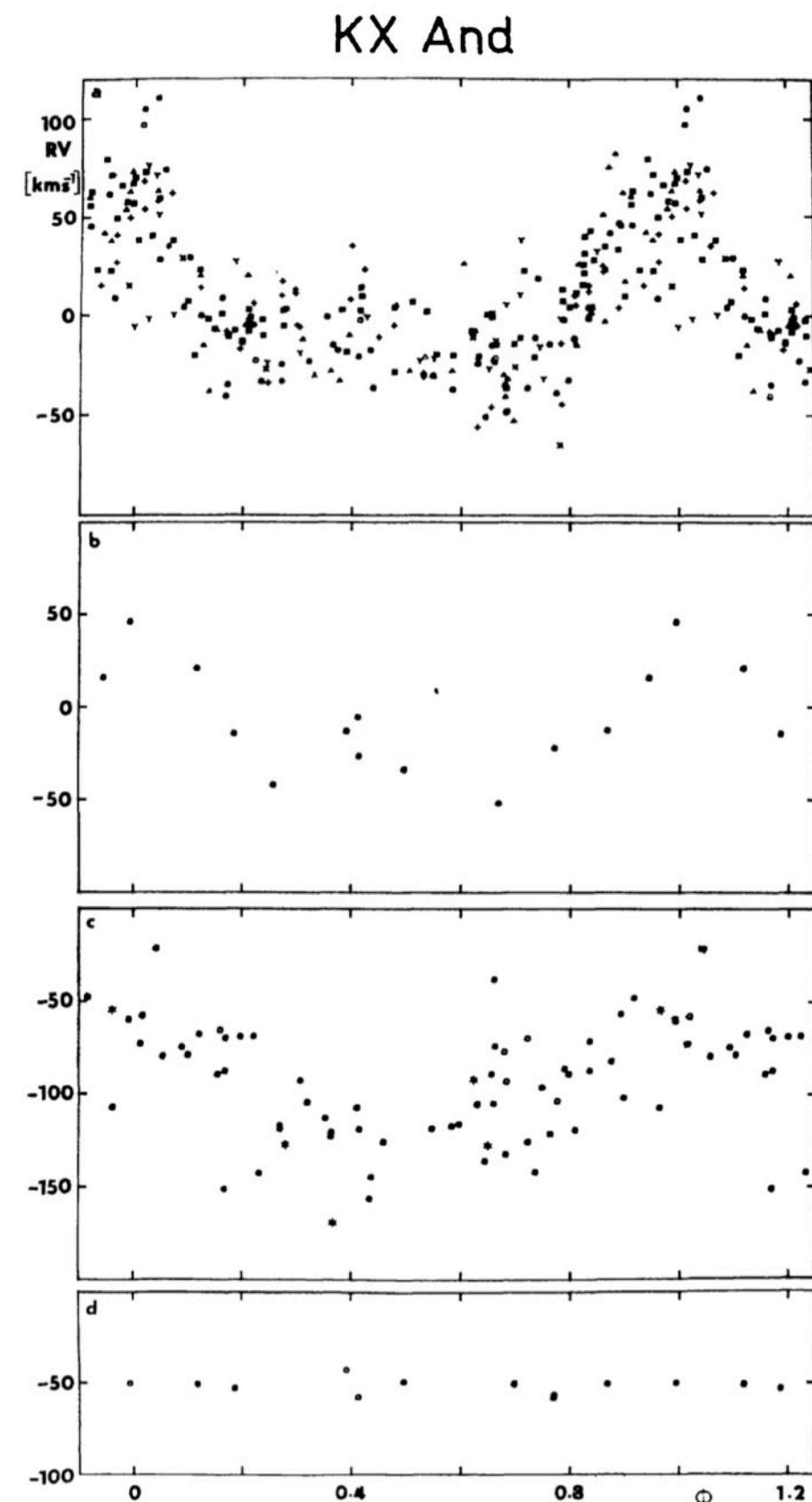


Fig. 1. Radial velocity curves of a) the optical metallic shell lines: \circ ... Ondřejov, $+$... Struve (1944), Y ... Merrill (1930, 1949), \square ... Halliday (1950), \times ... Beals (1951), \triangle ... Doazan and Peton (1970).

b) the UV subordinate shell lines of Fe II, Ni II, Ti II, Ca II, Mn II, Mg II and Al II in the region of SWP IUE camera.

c) the He I lines: \circ ... He I 4471 Å, $*$... He I 6678 Å.

d) the Fe II (UV 1, 2, 3) resonance lines.

Orbital solutions of the RV curves of Be star in KX And based on the different spectral lines (more details in Stelf et al. 1990).

Element	a	b	c	d	e	f	g
Period [day]	38.919 $\pm .001$	38.934 $\pm .009$	38.918 $\pm .038$	39.051 $\pm .119$	38.957 $\pm .005$	38.974 $\pm .008$	38.947 $\pm .006$
e	0.496 ± 0.028	0.639 ± 0.034	0.22 ± 0.12	0.66 ± 0.15	0.570 ± 0.026	0.591 ± 0.038	0.515 ± 0.025
Ω [degree]	11.6 ± 3.9	17.4 ± 4.0	89 ± 29	359 ± 18	176.9 ± 3.7	6.3 ± 5.3	309.1 ± 3.6

LS I +61 303

Массивная рентгеновская двойная с Be-звездой

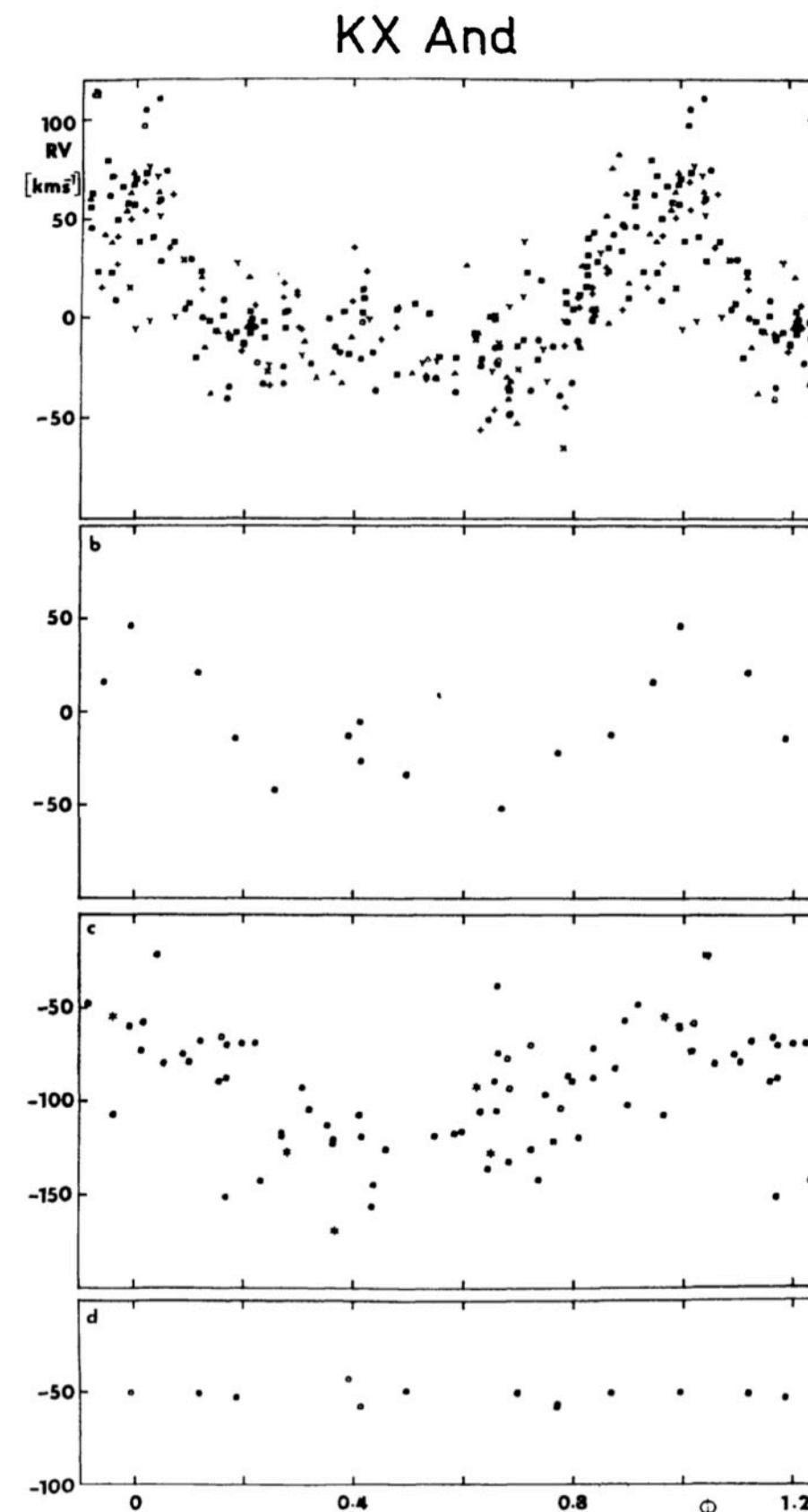
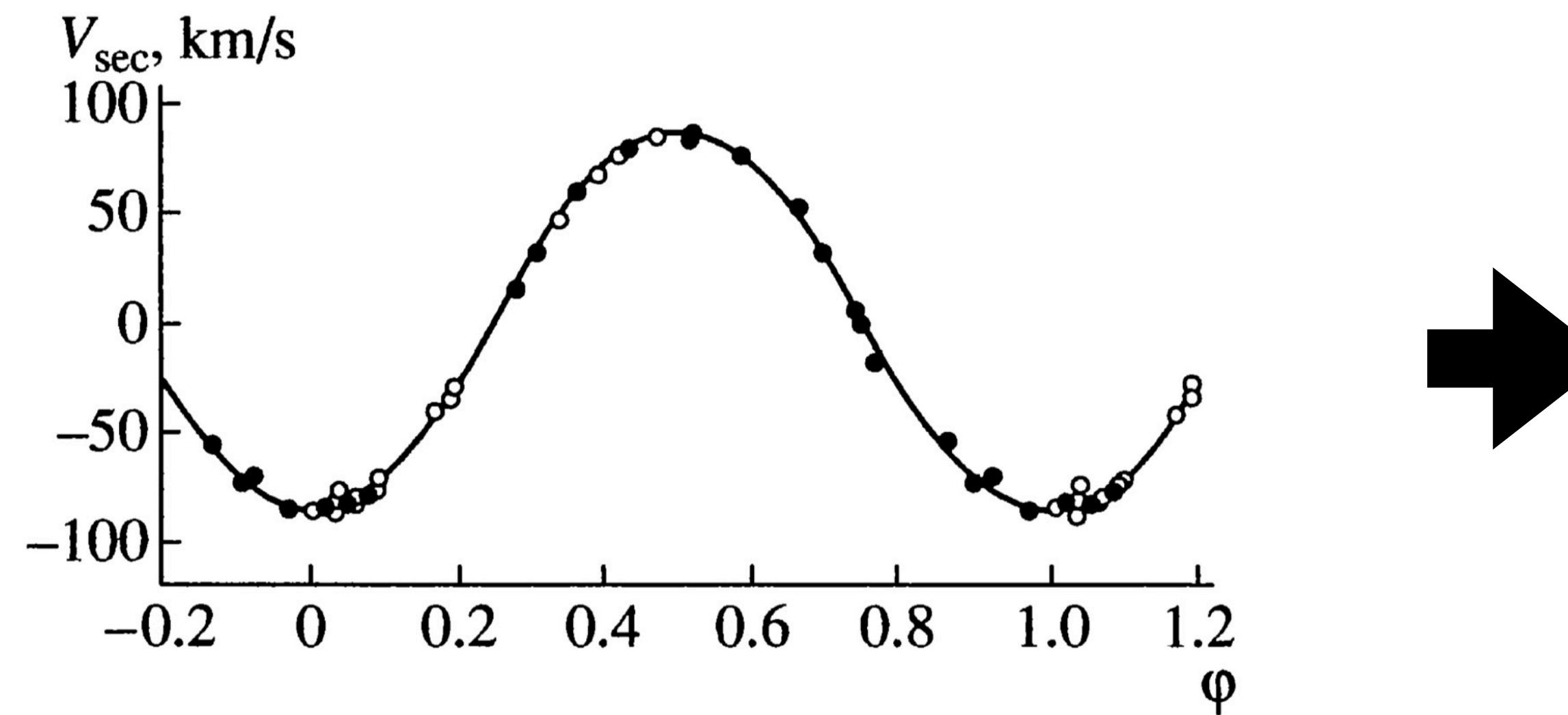


Fig. 1. Radial velocity curves of a) the optical metallic shell lines: \circ ... Ondřejov, $+$... Struve (1944), Y ... Merrill (1930, 1949), \square ... Halliday (1950), \times ... Beals (1951), \triangle ... Doazan and Peton (1970).
 b) the UV subordinate shell lines of Fe II, Ni II, Ti II, Ca II, Mn II, Mg II and Al II in the region of SWP IUE camera.
 c) the He I lines: \circ ... He I 4471 Å, $*$... He I 6678 Å.
 d) the Fe II (UV 1, 2, 3) resonance lines.

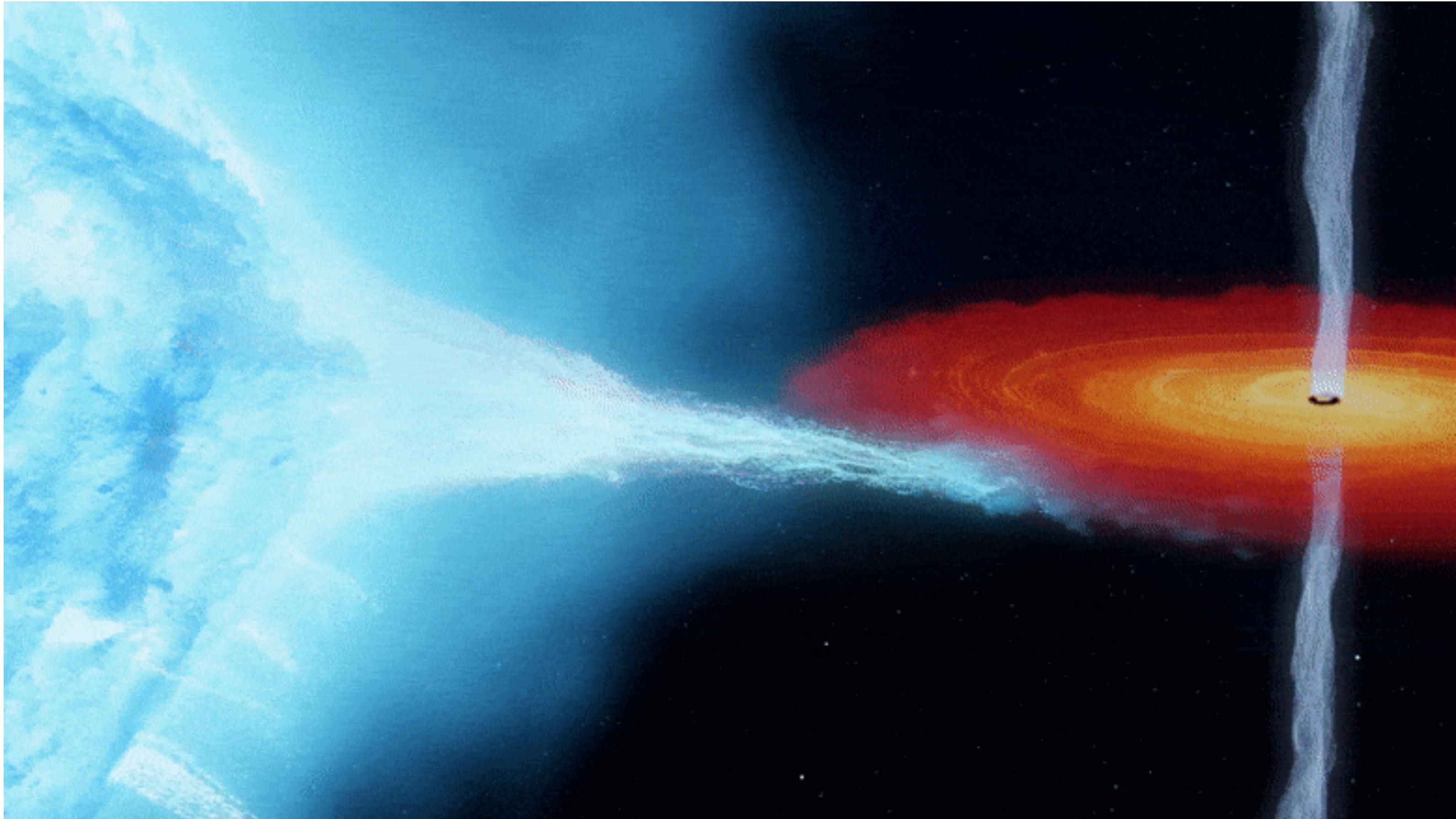
Orbital solutions of the RV curves of Be star in KX And based on the different spectral lines (more details in Stelf et al. 1990).

Element	a	b	c	d	e	f	g
Period [day]	38.919 $\pm .001$	38.934 $\pm .009$	38.918 $\pm .038$	39.051 $\pm .119$	38.957 $\pm .005$	38.974 $\pm .008$	38.947 $\pm .006$
e	0.496 ± 0.028	0.639 ± 0.034	0.22 ± 0.12	0.66 ± 0.15	0.570 ± 0.026	0.591 ± 0.038	0.515 ± 0.025
Ω [degree]	11.6 ± 3.9	17.4 ± 4.0	89 ± 29	359 ± 18	176.9 ± 3.7	6.3 ± 5.3	309.1 ± 3.6



RV curve of the secondary star in KX And binary (Tarasov et al. 1998).

Black hole binary Cyg X-1



Основные параметры:

$$P_{\text{orb}} = 5.6 \text{ days}$$

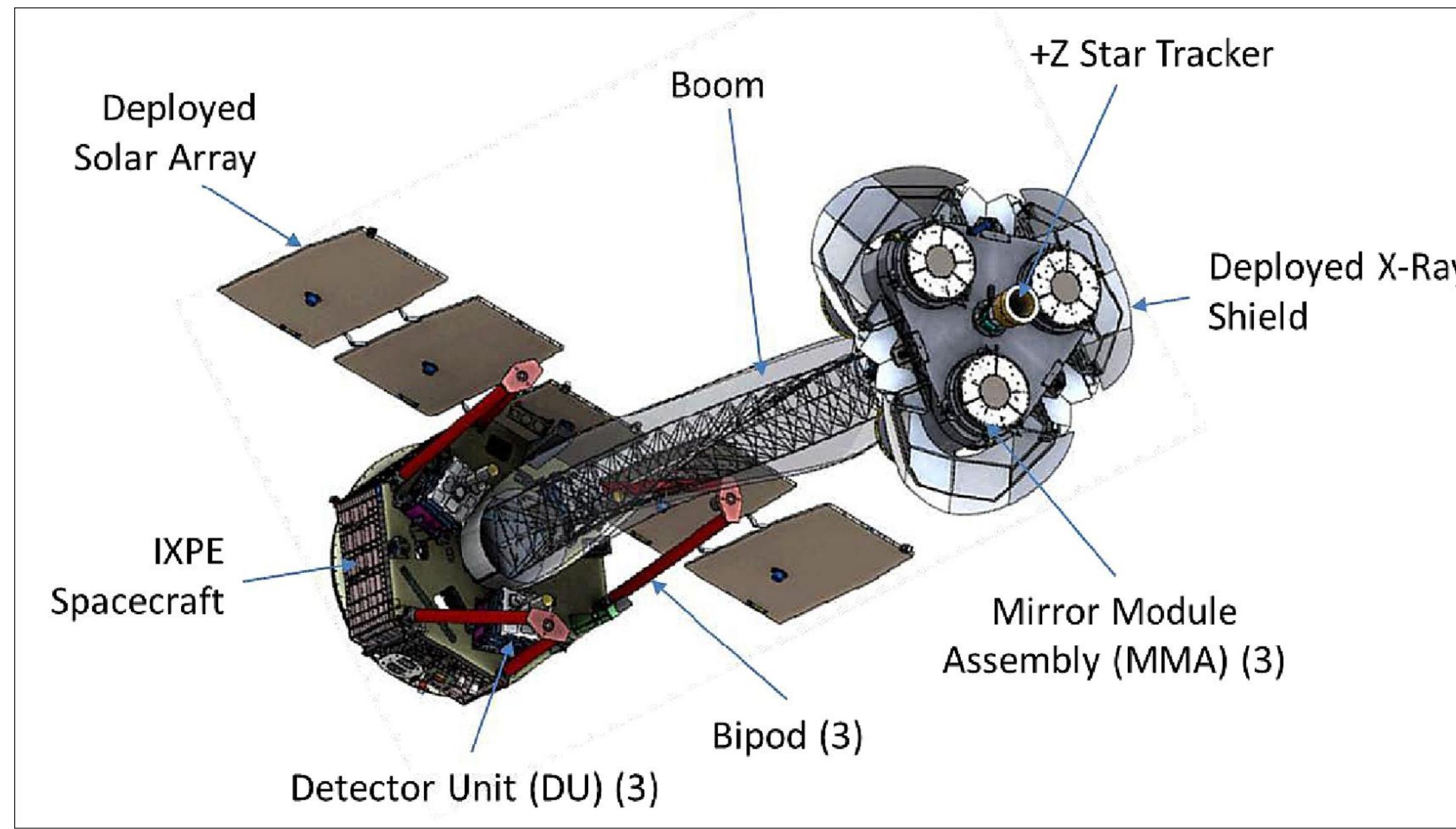
$$M_{\text{BH}} \sim 21 M_{\odot}$$

$$M_{\text{C}} \sim 40 M_{\odot}$$

$$i \sim 150^\circ$$

Наблюдательные данные

IXPE – Imaging X-ray Polarimetry Explorer



Основной результат наблюдений в мае 2022 года:
обнаружение большой рентгеновской поляризации,
направленной вдоль радио-джета.

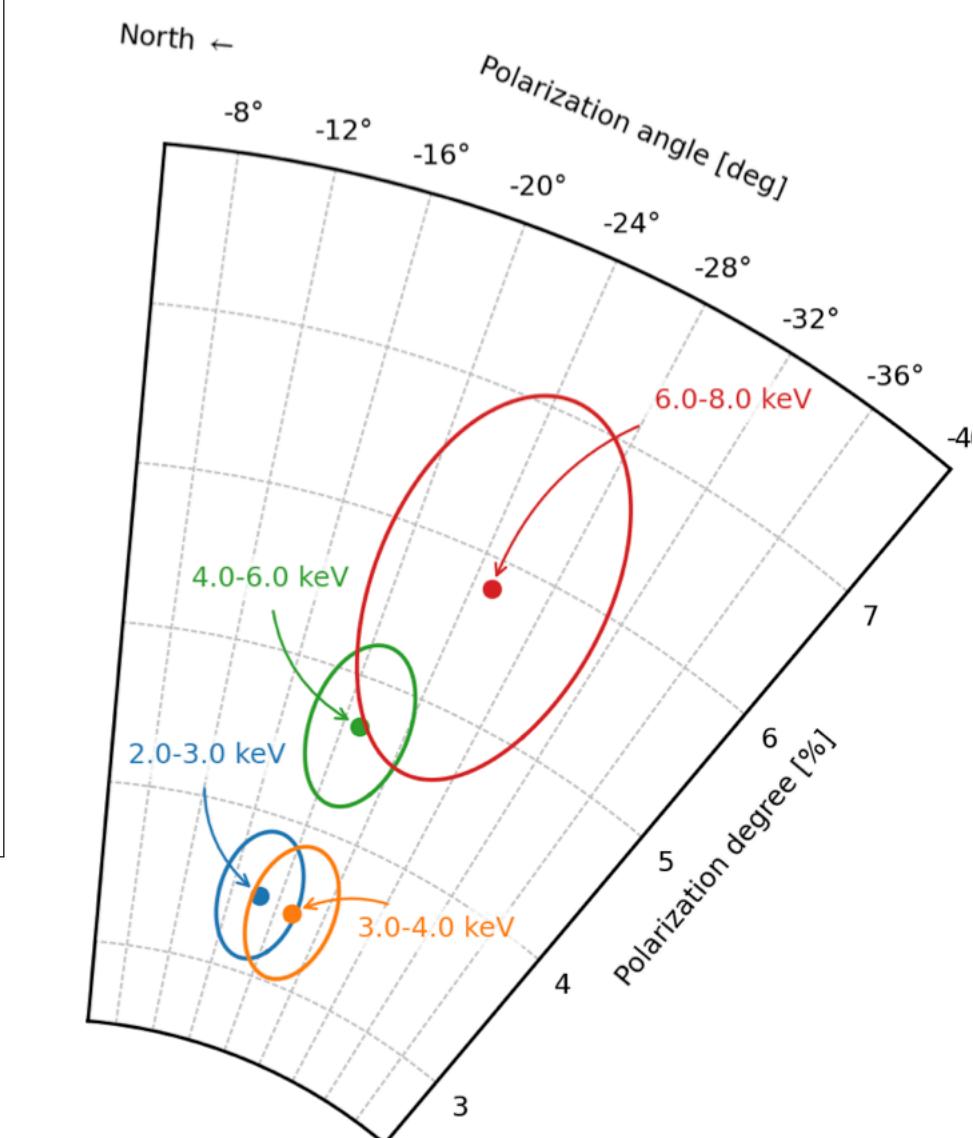
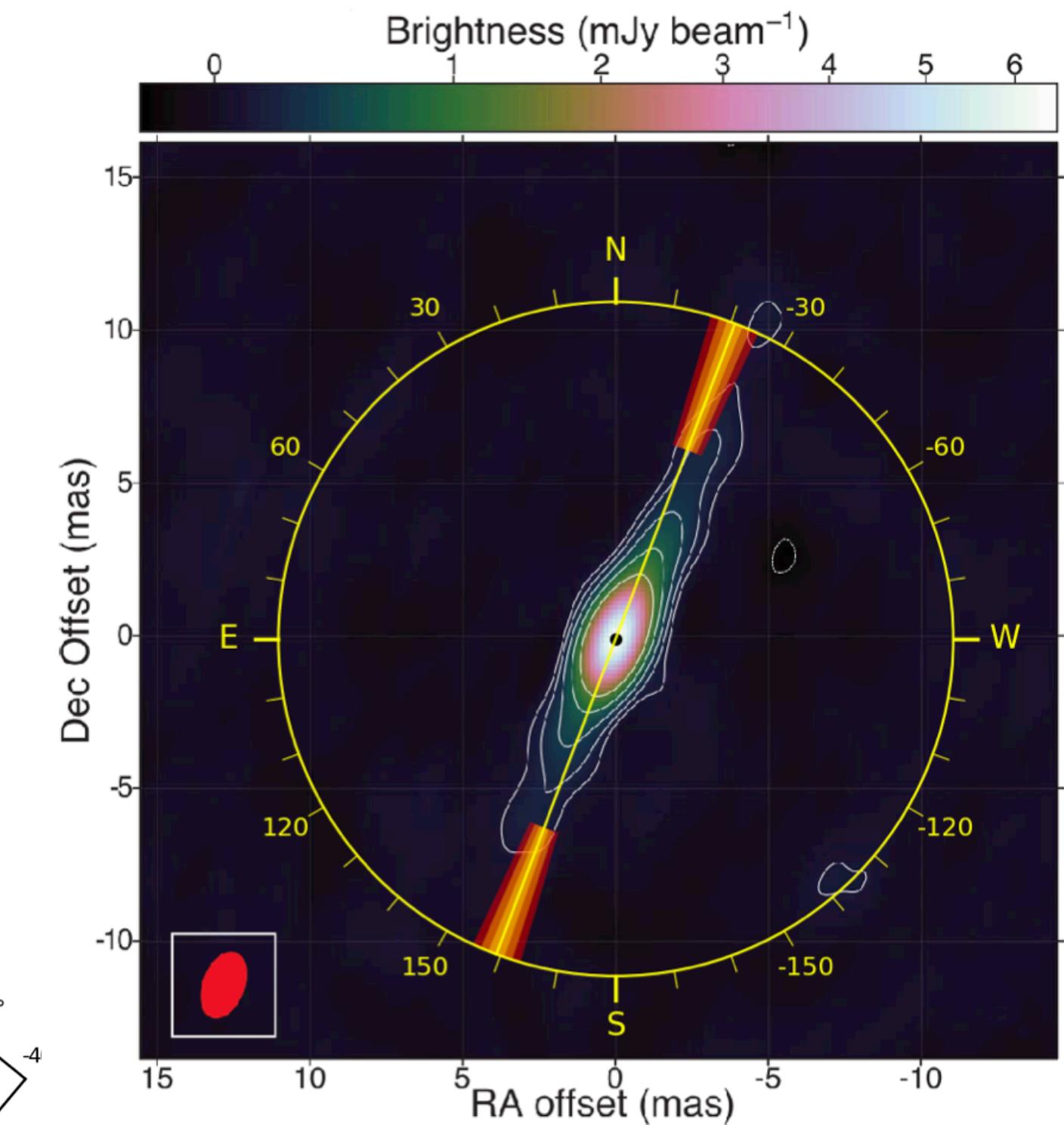


Figure 1: Energy-dependent X-ray polarization of Cyg X-1. IXPE detects the linear polarization of the 2–8 keV X-ray emission from the XRB Cyg X-1 with high statistical significance. The figure shows the polarization degree (PD) and polarization angle (PA) in four energy bands. The ellipses denote the statistical significance of 68.3%.

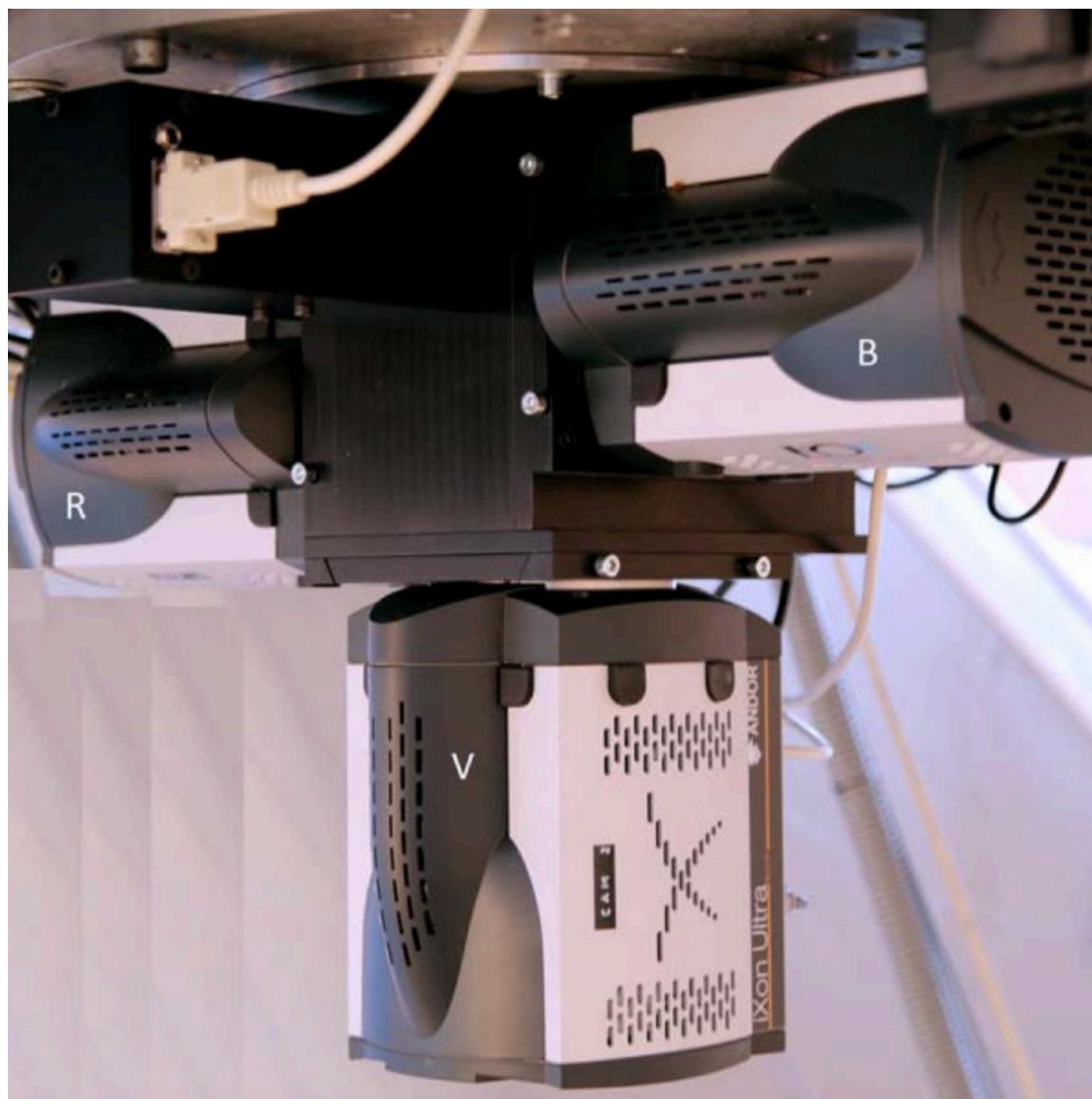


Krawczynski et al., 2022, in press

arXiv: 2206.09972

Наблюдательные данные

DIPol-UF polarimeter, mounted on NOT

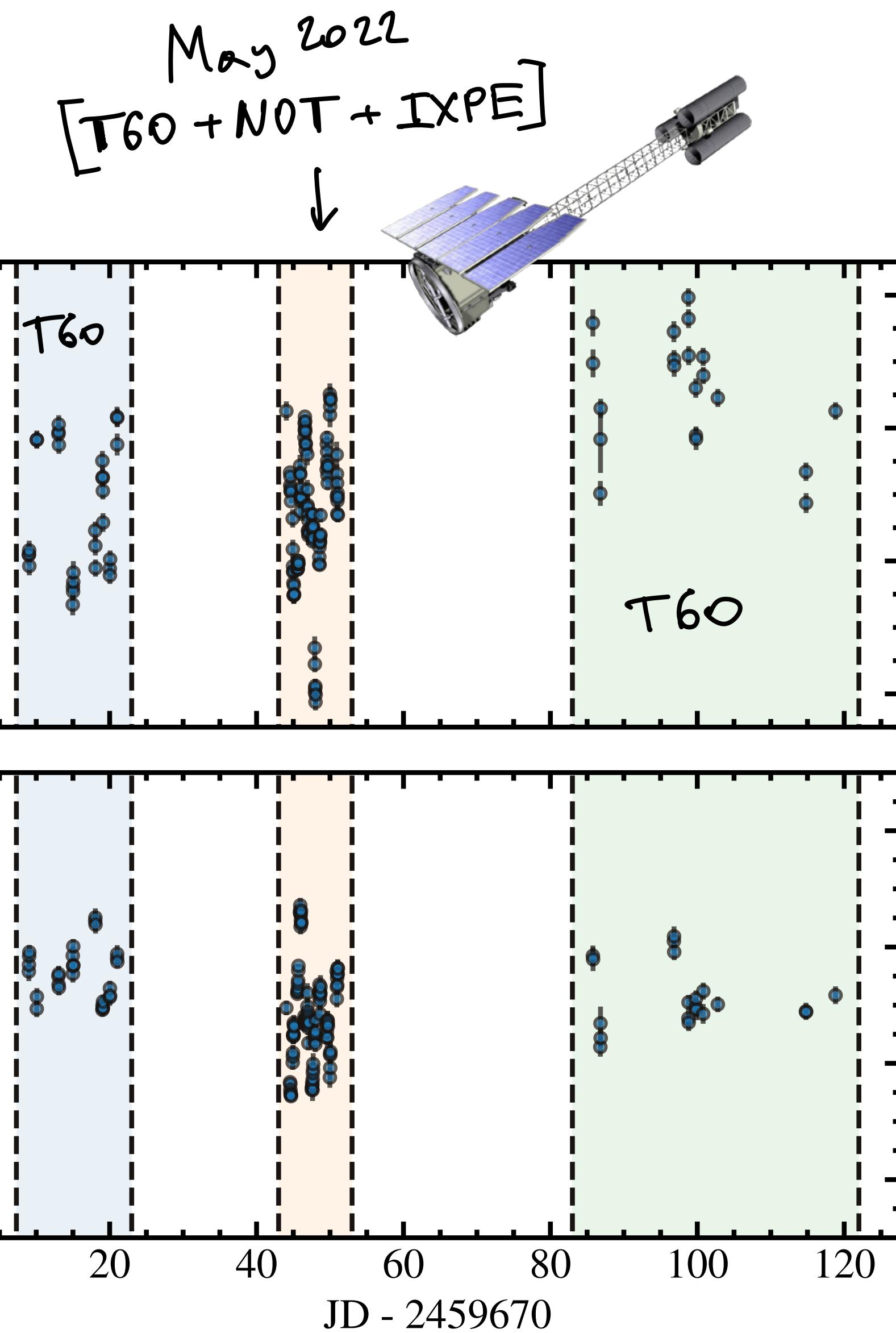


Simultaneous Three-color (*BVR*) polarimeter

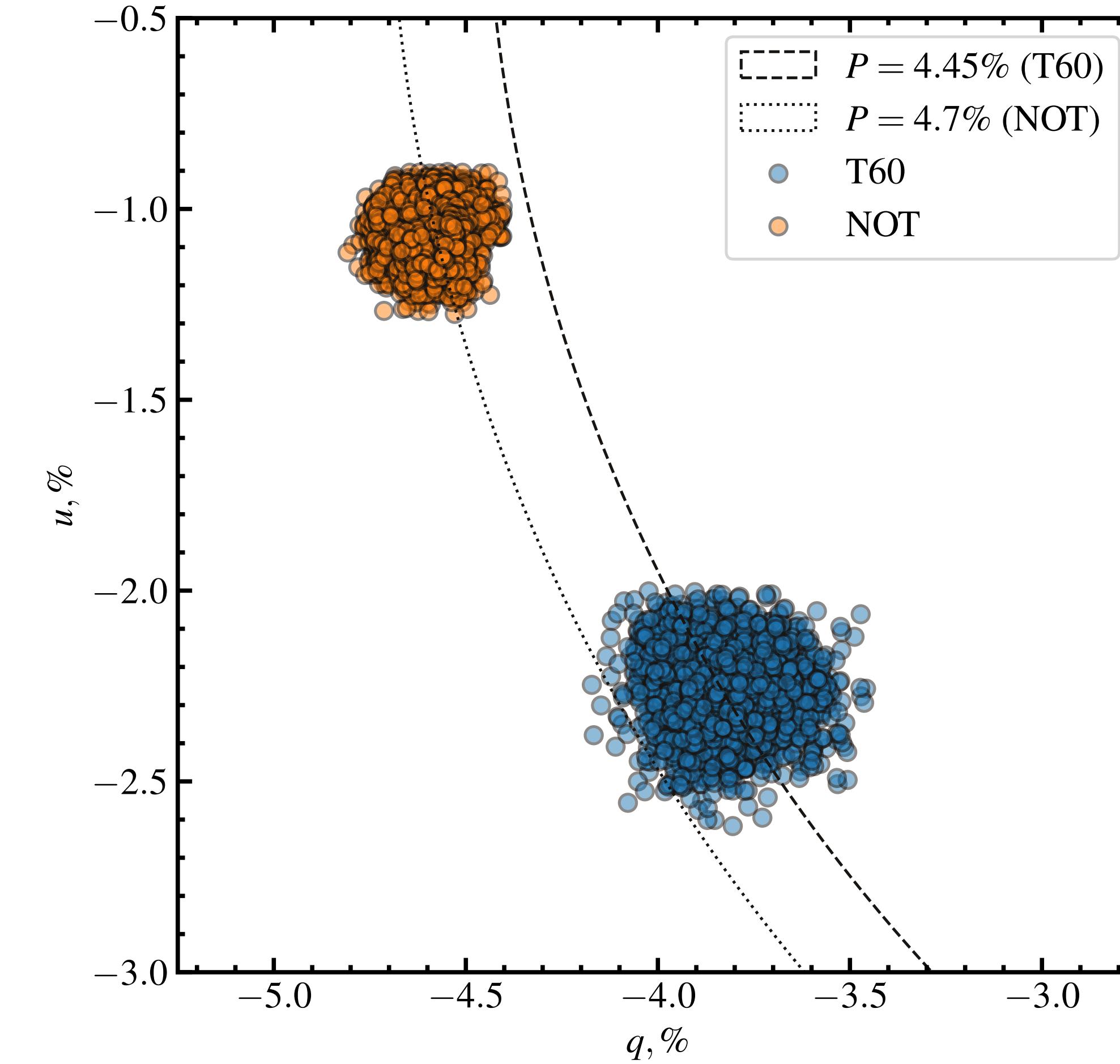
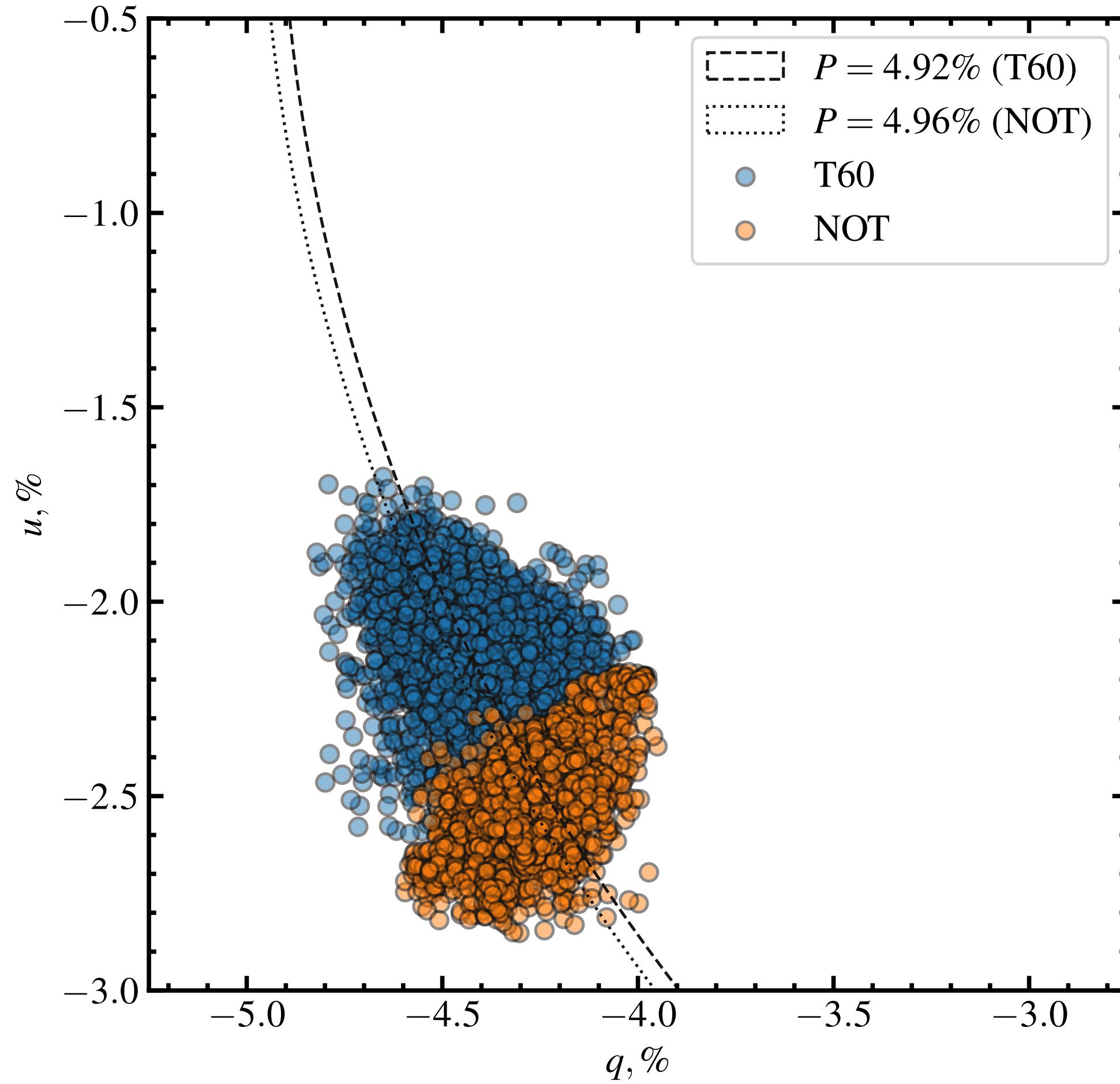
Nordic Optical Telescope (NOT)



La Palma, Canary Islands, Spain



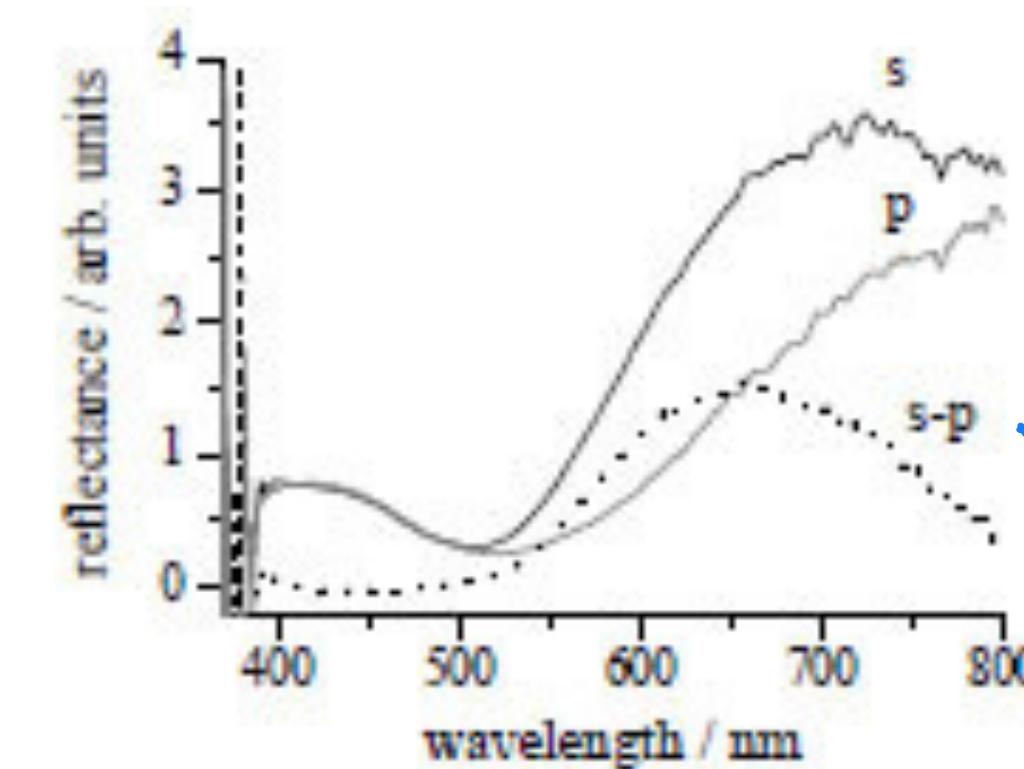
Инструментальная* поляризация



Инструментальная* поляризация



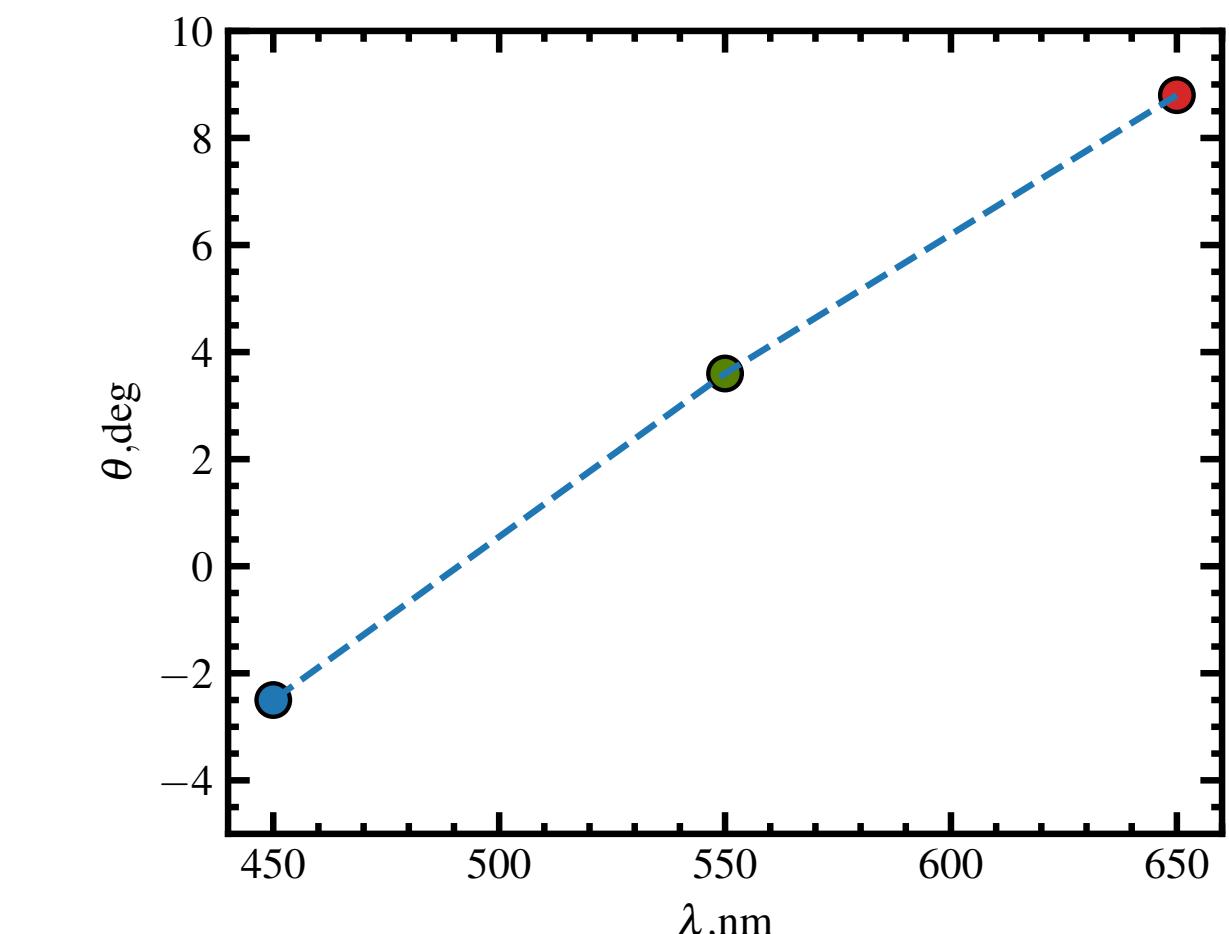
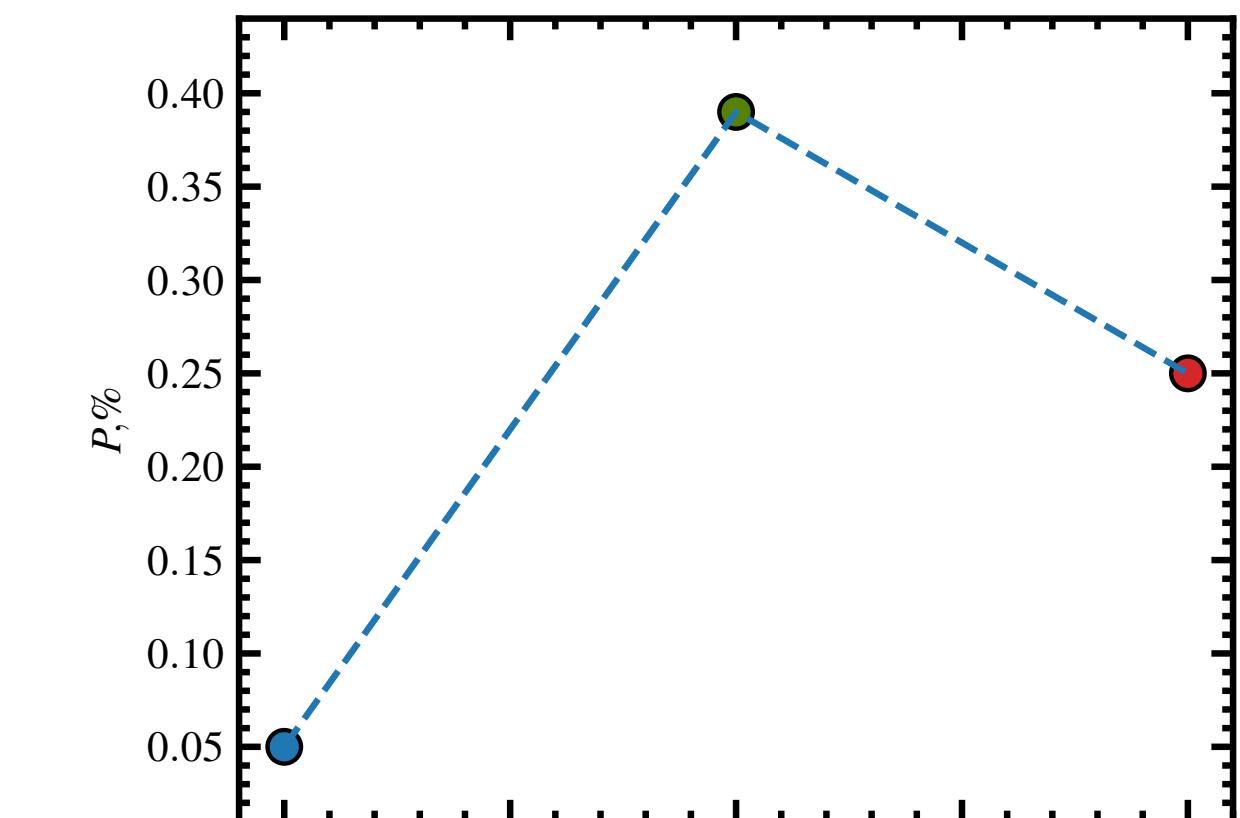
$$(q, u)_{inst}^{tot} = (q, u)_{inst} + (q, u)_{moth}$$



Polarized optical emission constrained geometry of Cyg X-1

Yoshioka et al., 2007

High precision *BVR* polarimetry
of the moth

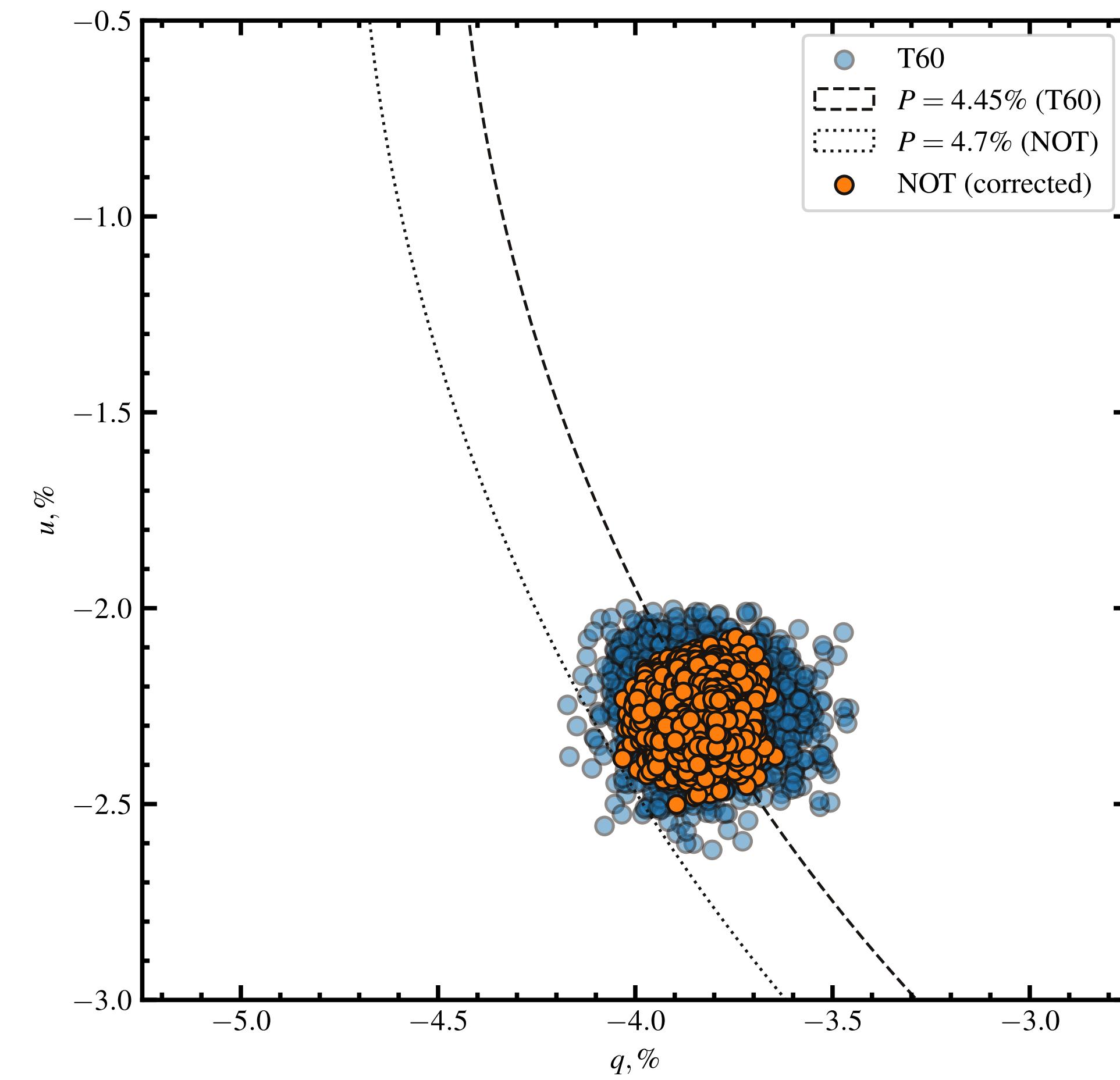
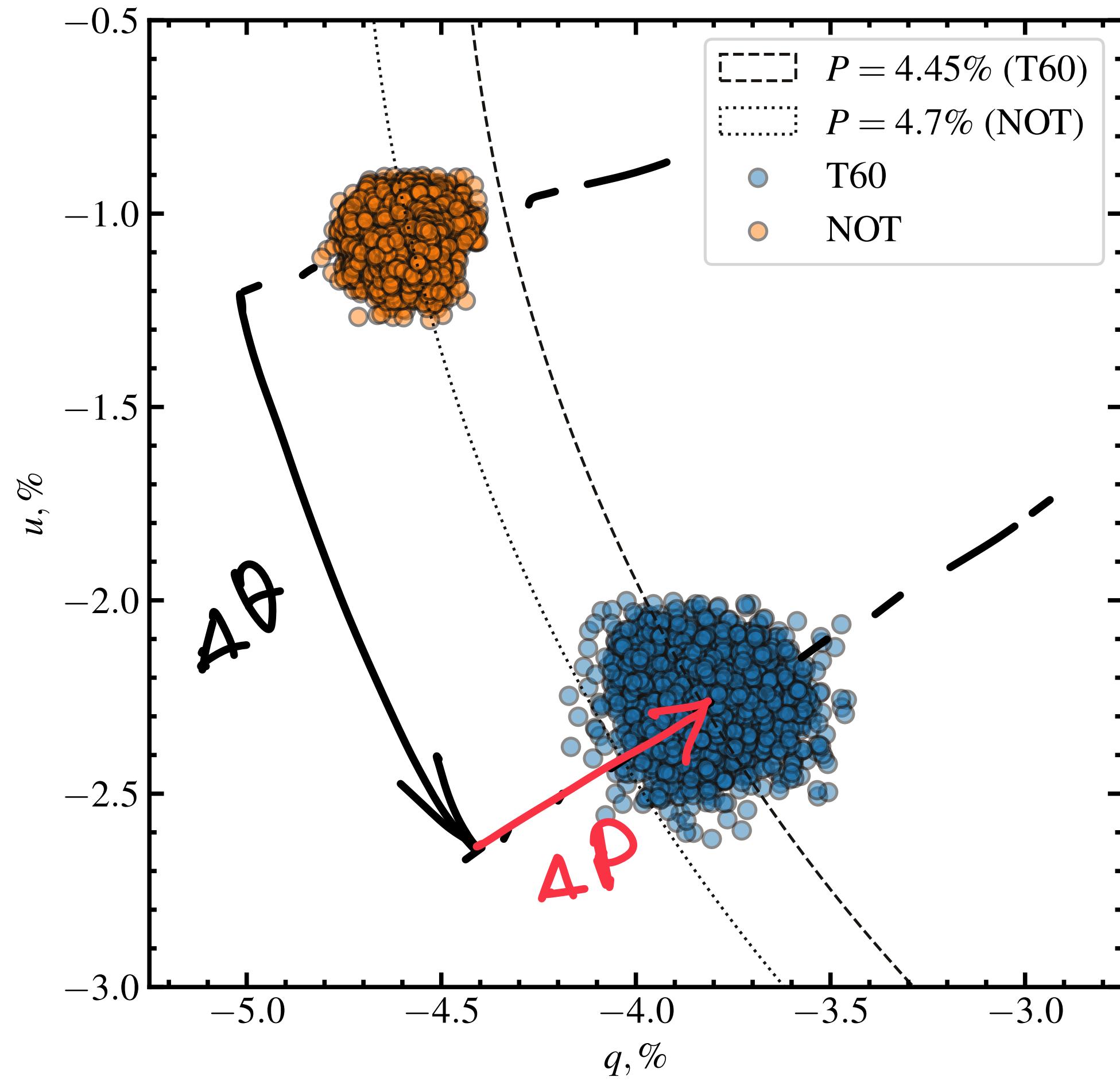


Kravtsov et al., Nature Biology (in prep)

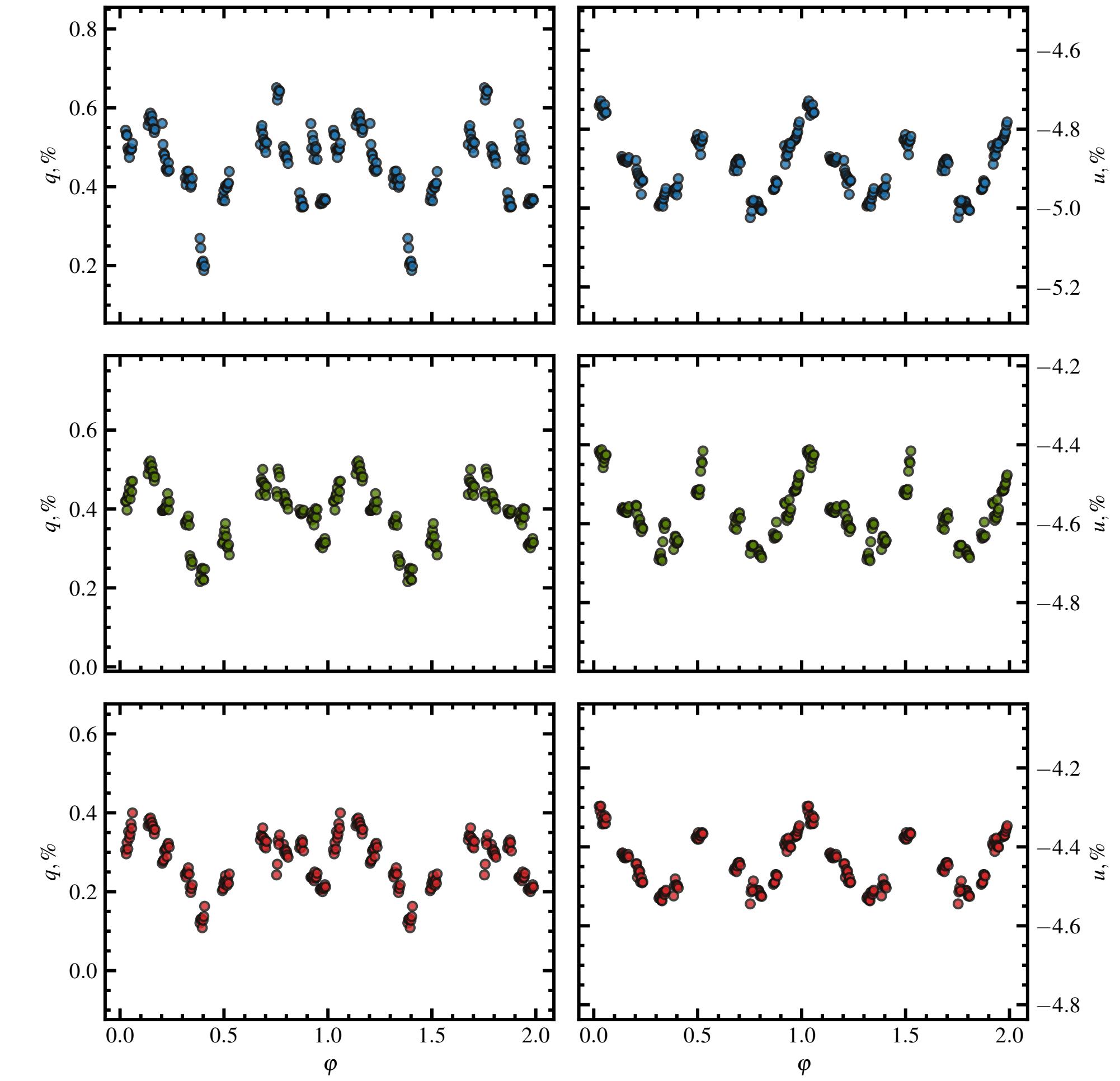
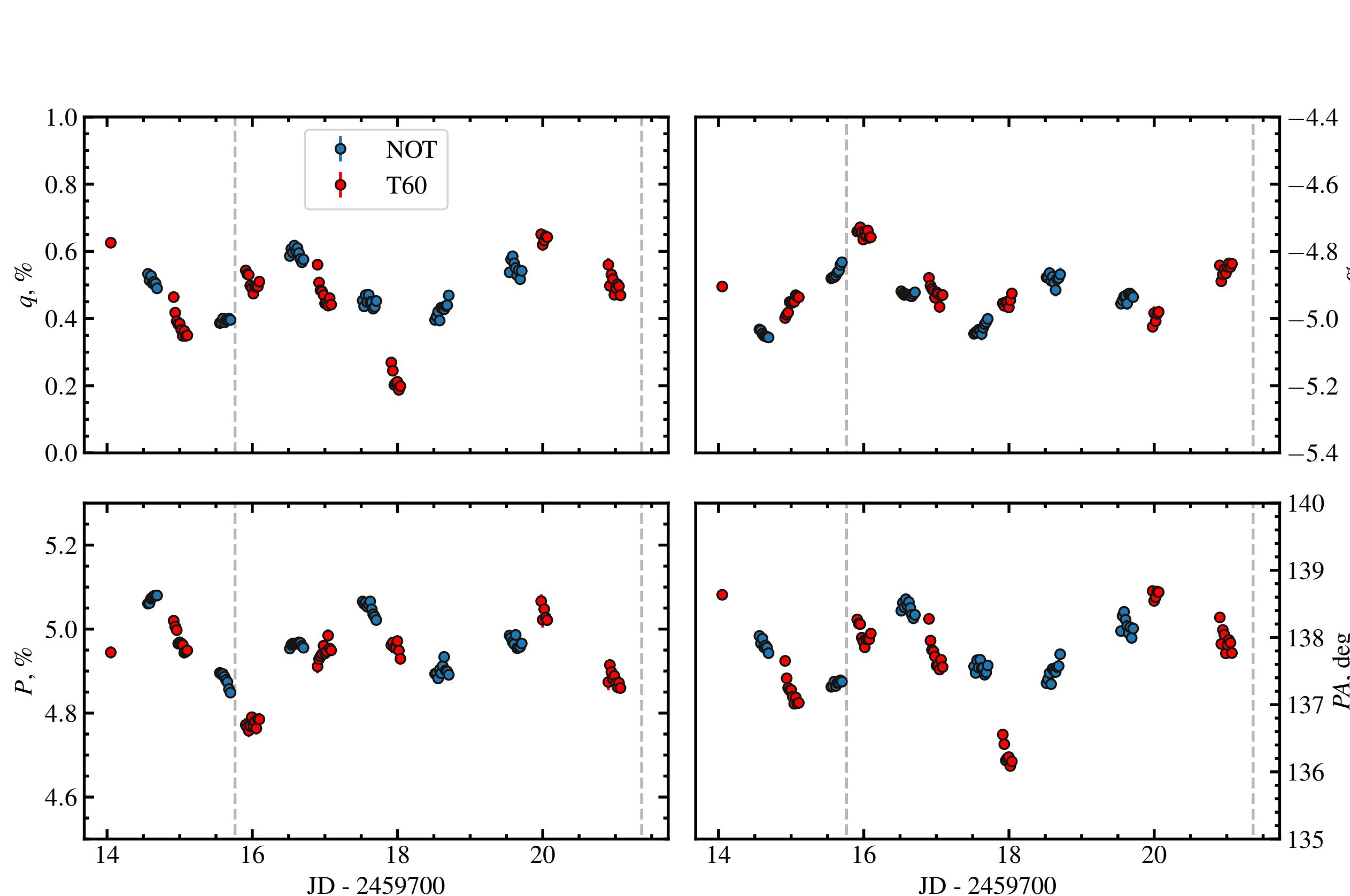
experimentally
determined reflectance
of the moth

Kravtsov et al., 2022, in prep.

Инструментальная* поляризация

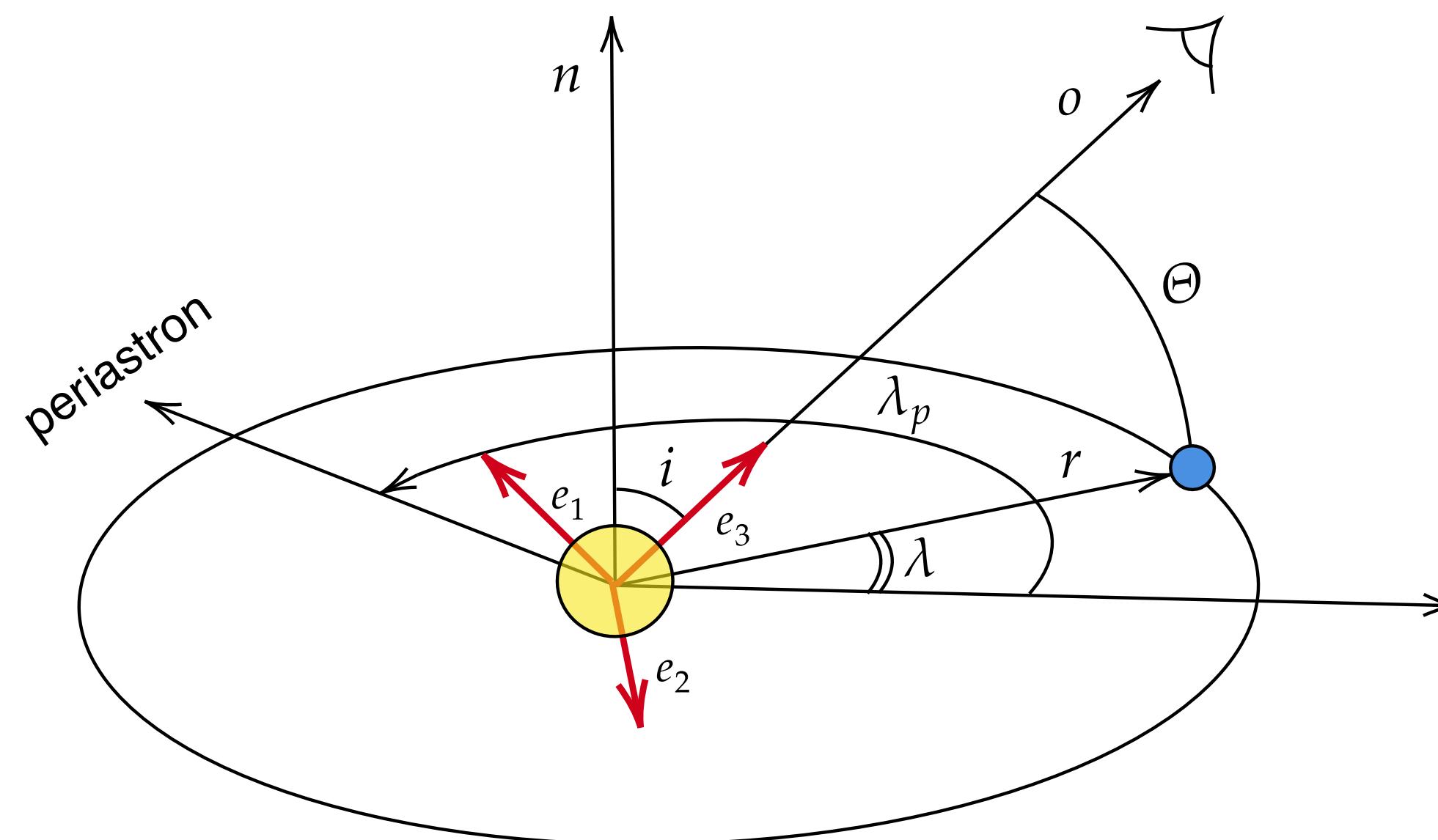


Откалиброванные данные



Моделирование

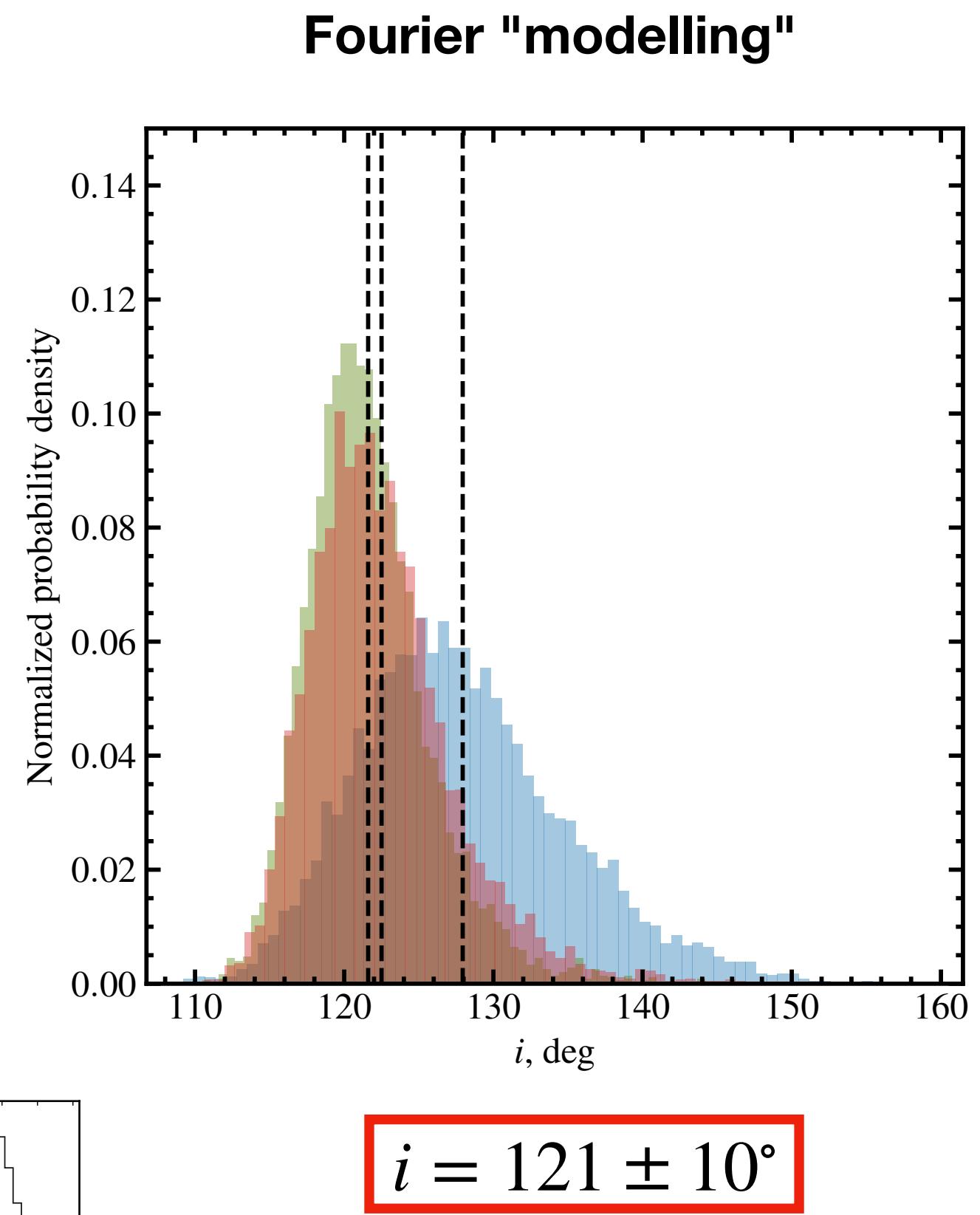
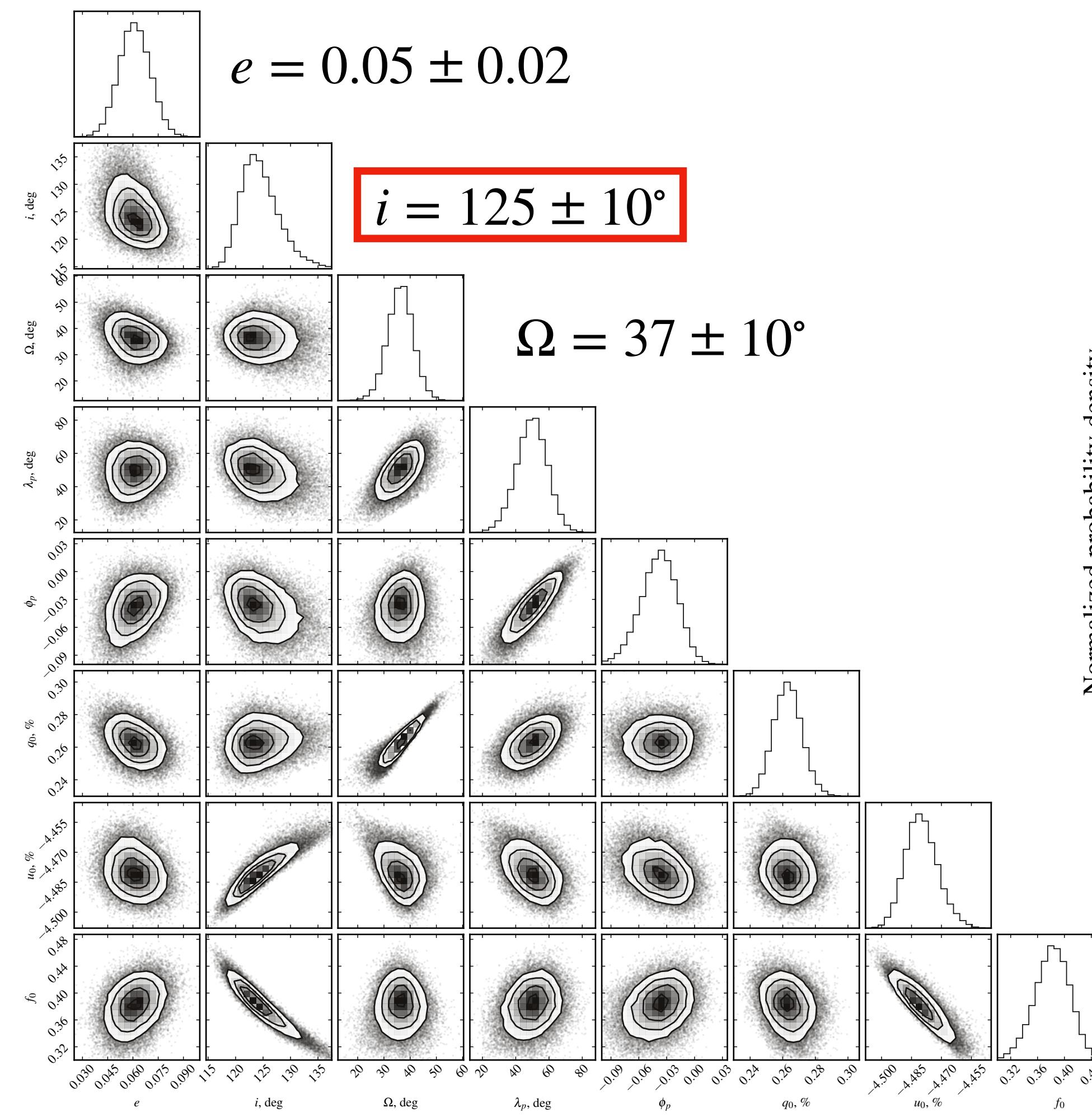
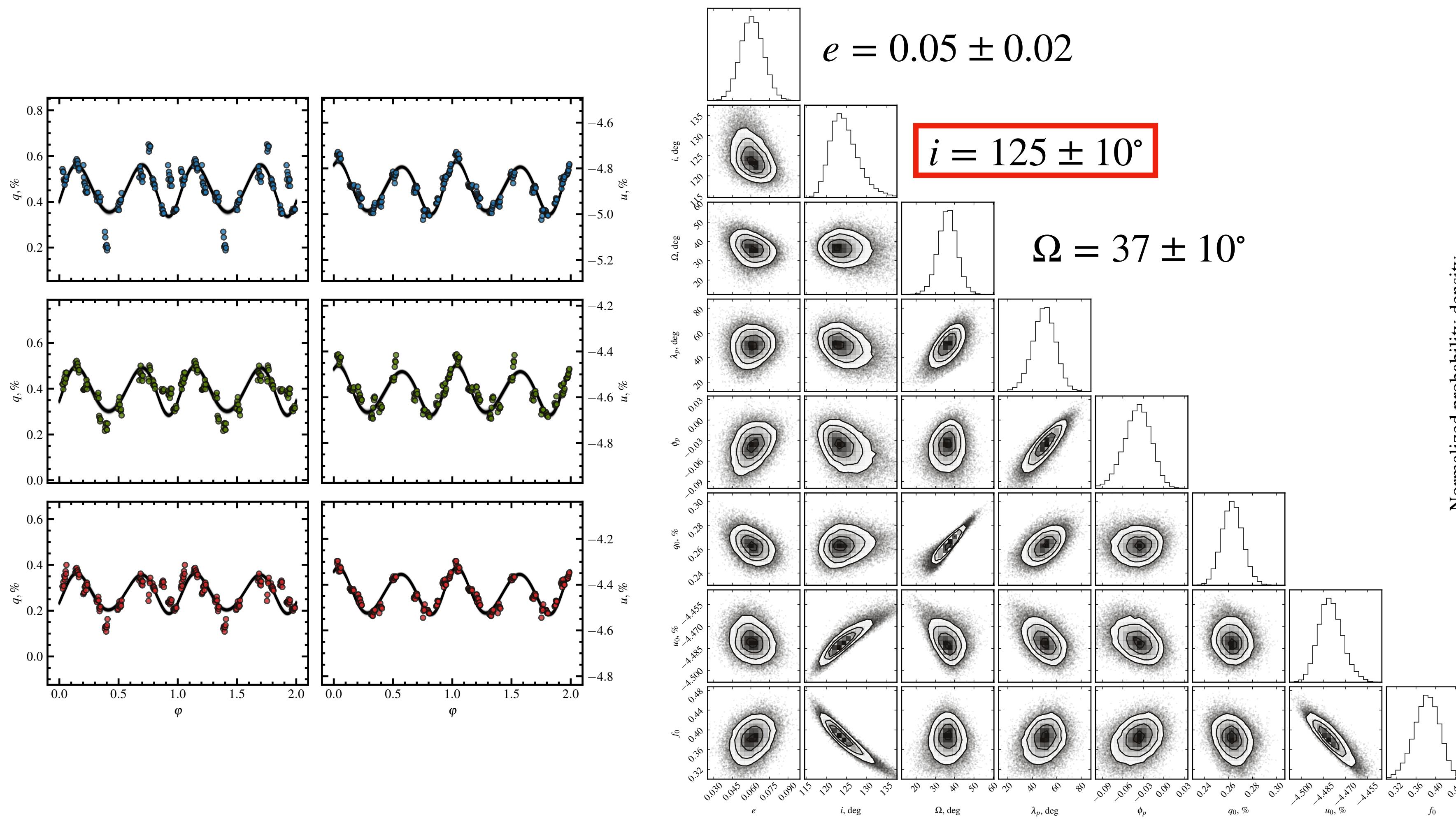
Та же модель, что и в случае с LS I +61 303



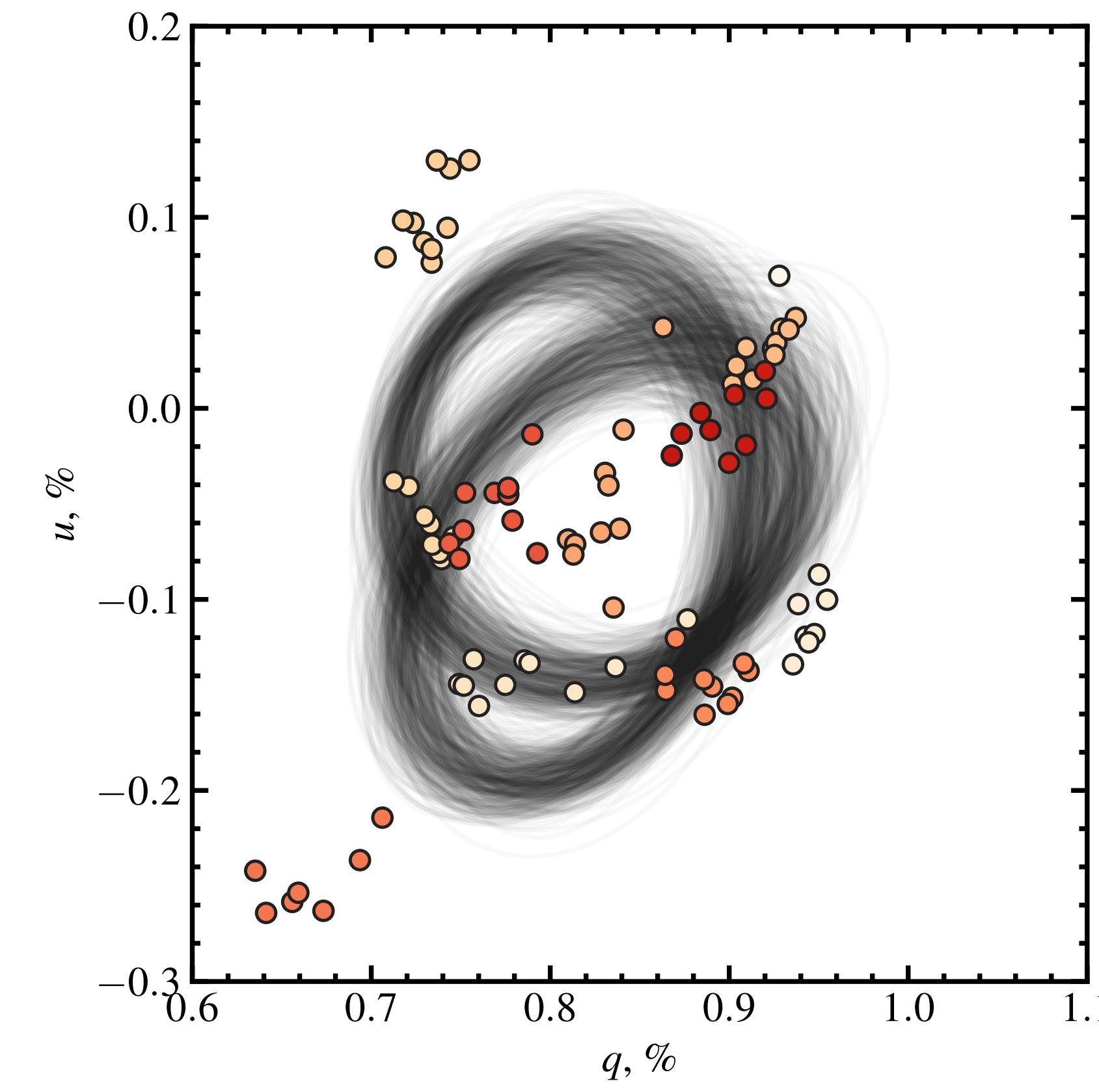
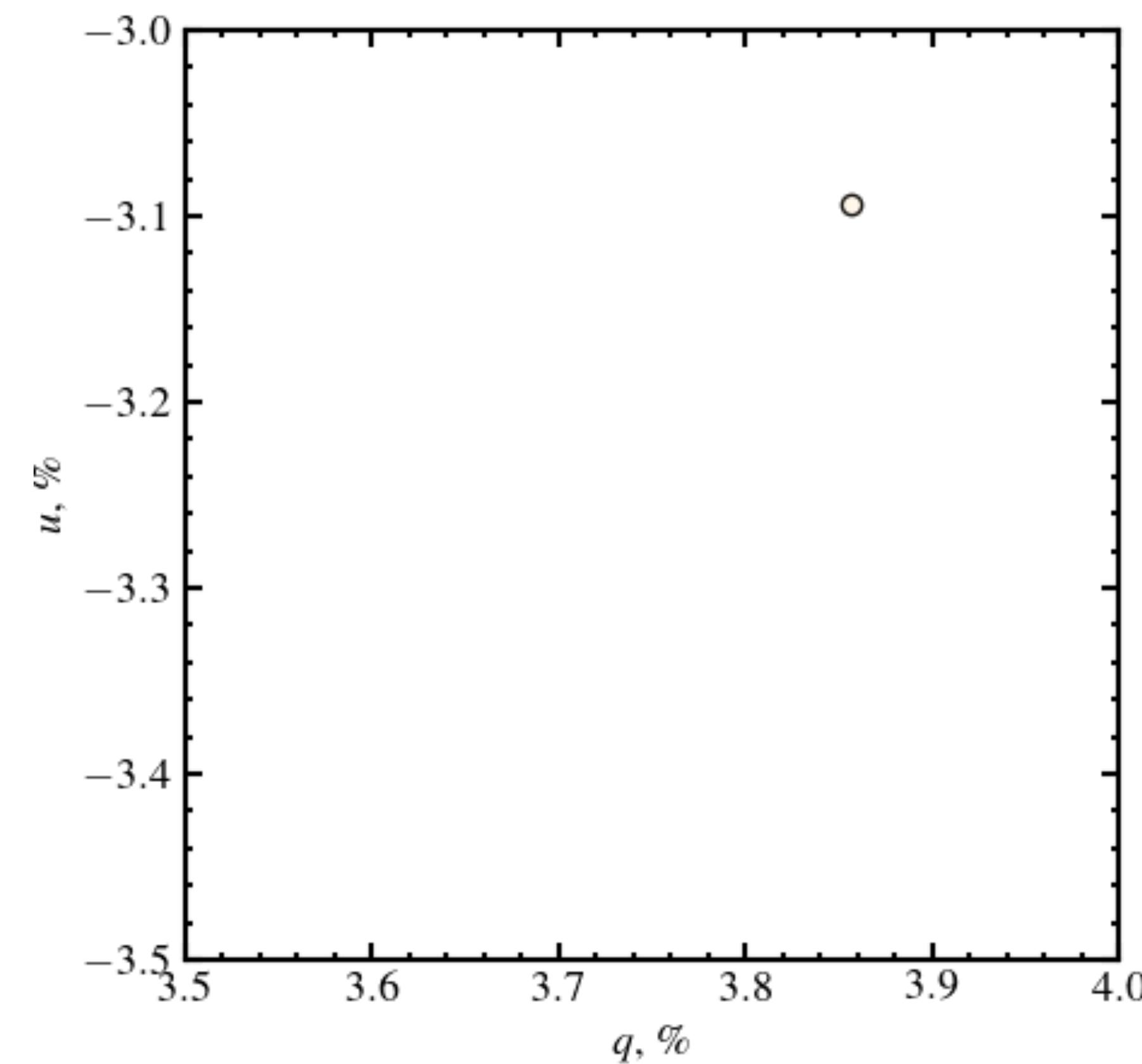
$$q = \frac{3f_0}{16} \left[\sin^2 i - (1 + \cos^2 i) \cos 2\lambda \right] \left[1 + e \cos(\lambda - \lambda_p) \right]^2,$$
$$u = \frac{3f_0}{8} [-\cos i \sin 2\lambda] \left[1 + e \cos(\lambda - \lambda_p) \right]^2.$$

Моделирование

Та же модель, что и в случае с LS I +61 303



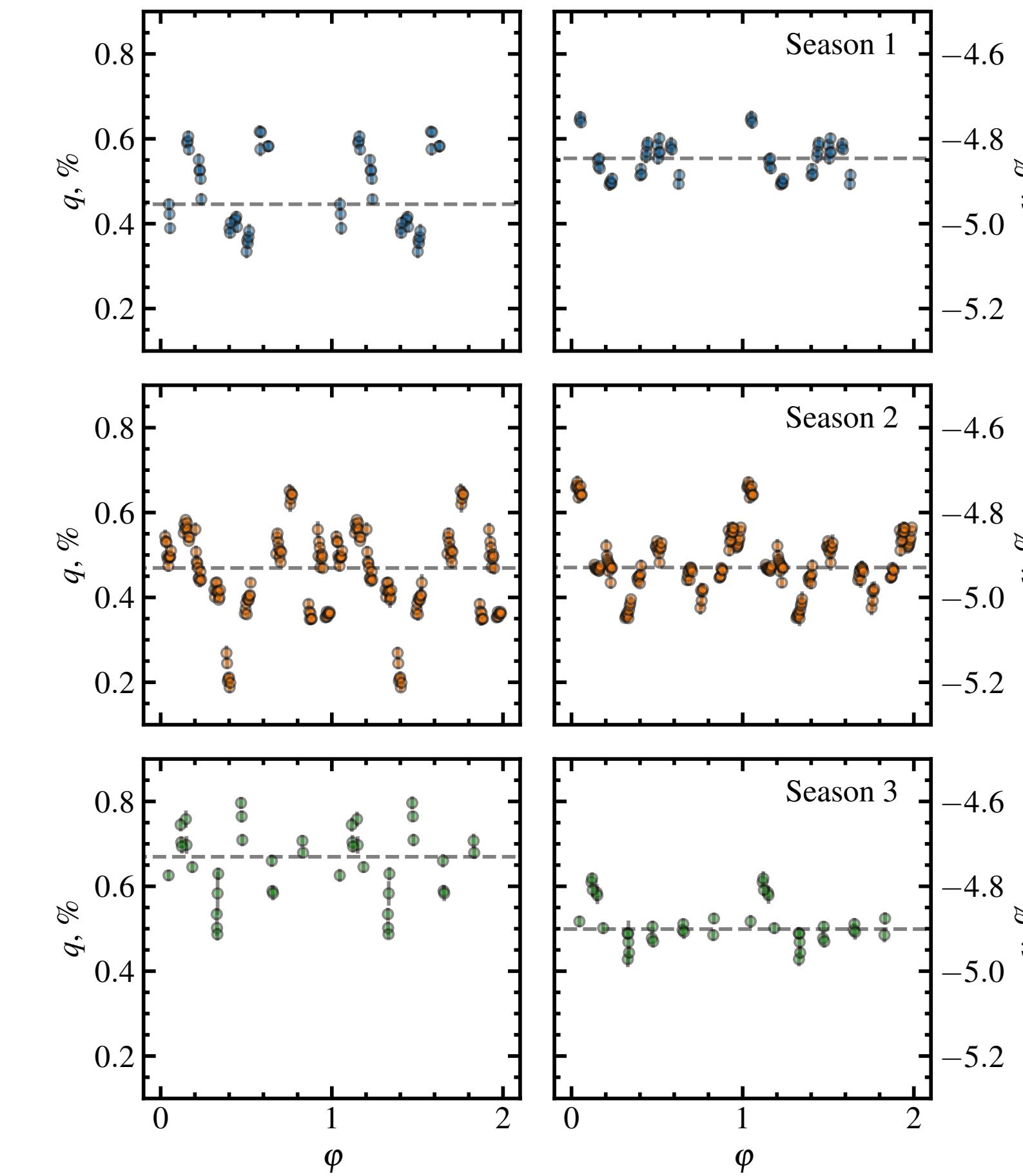
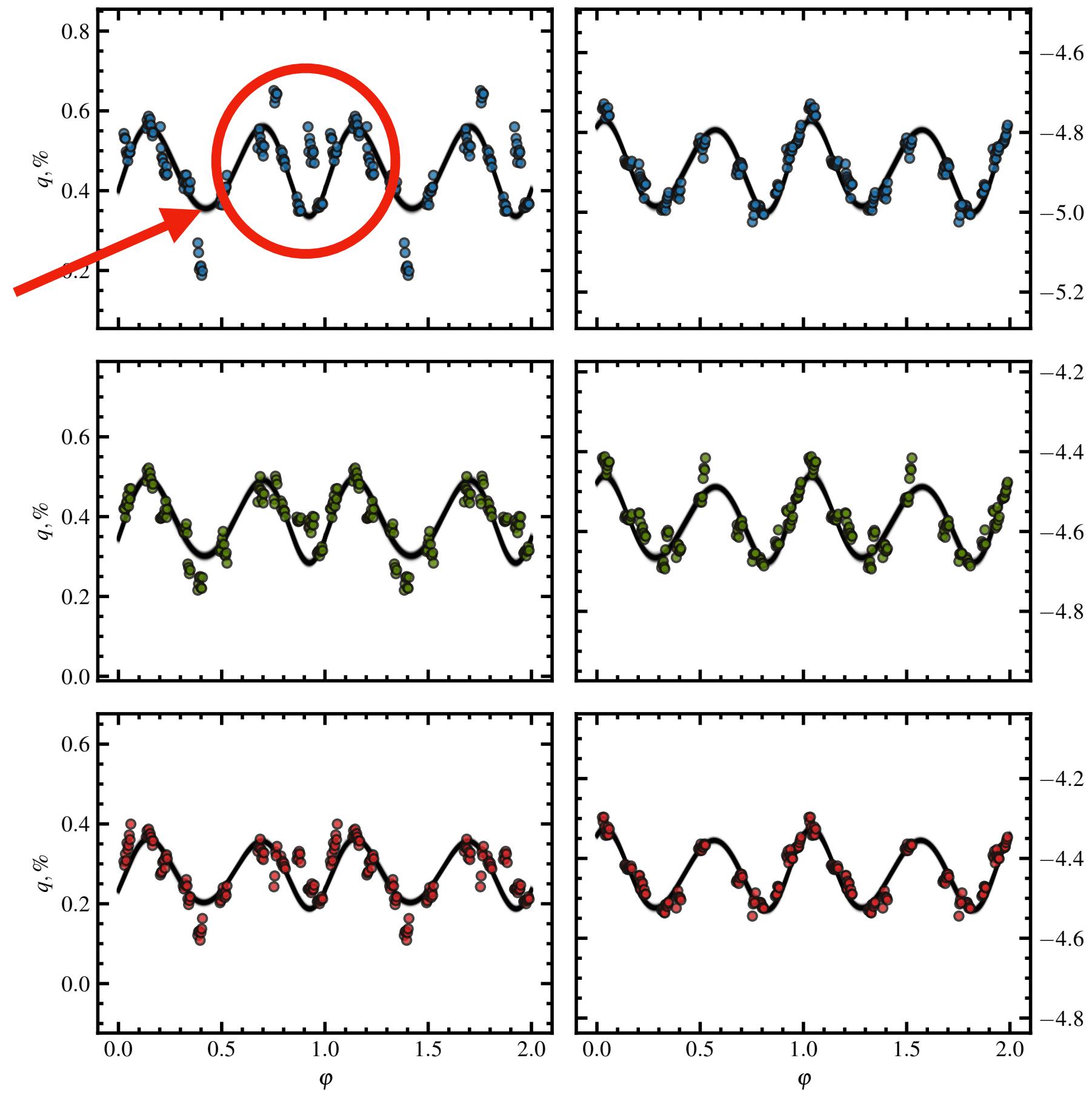
Моделирование



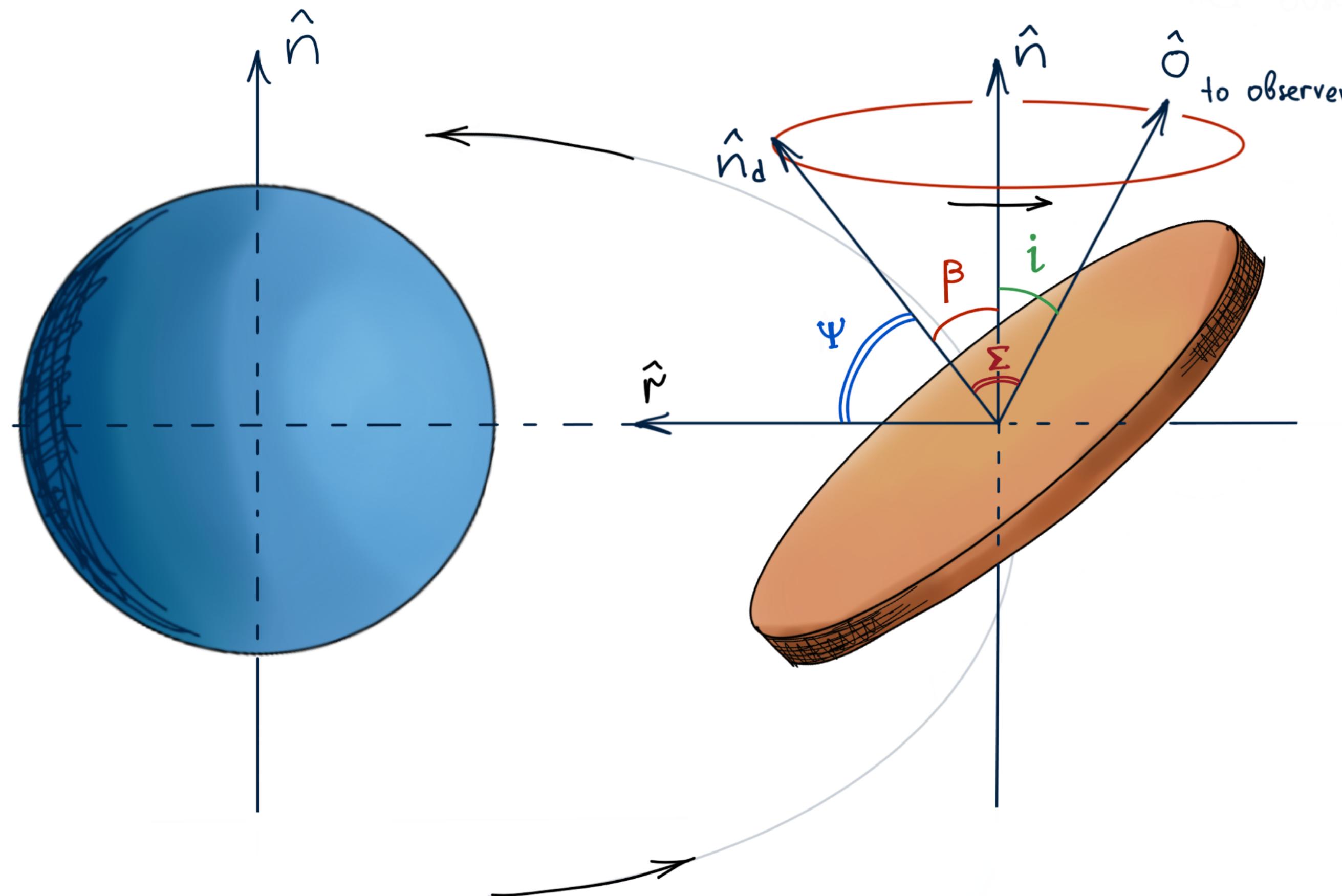
Моделирование

Проблемы простейшей модели

Фазовые сдвиги?



Модель прецессирующего диска



area of the disk visible from the star

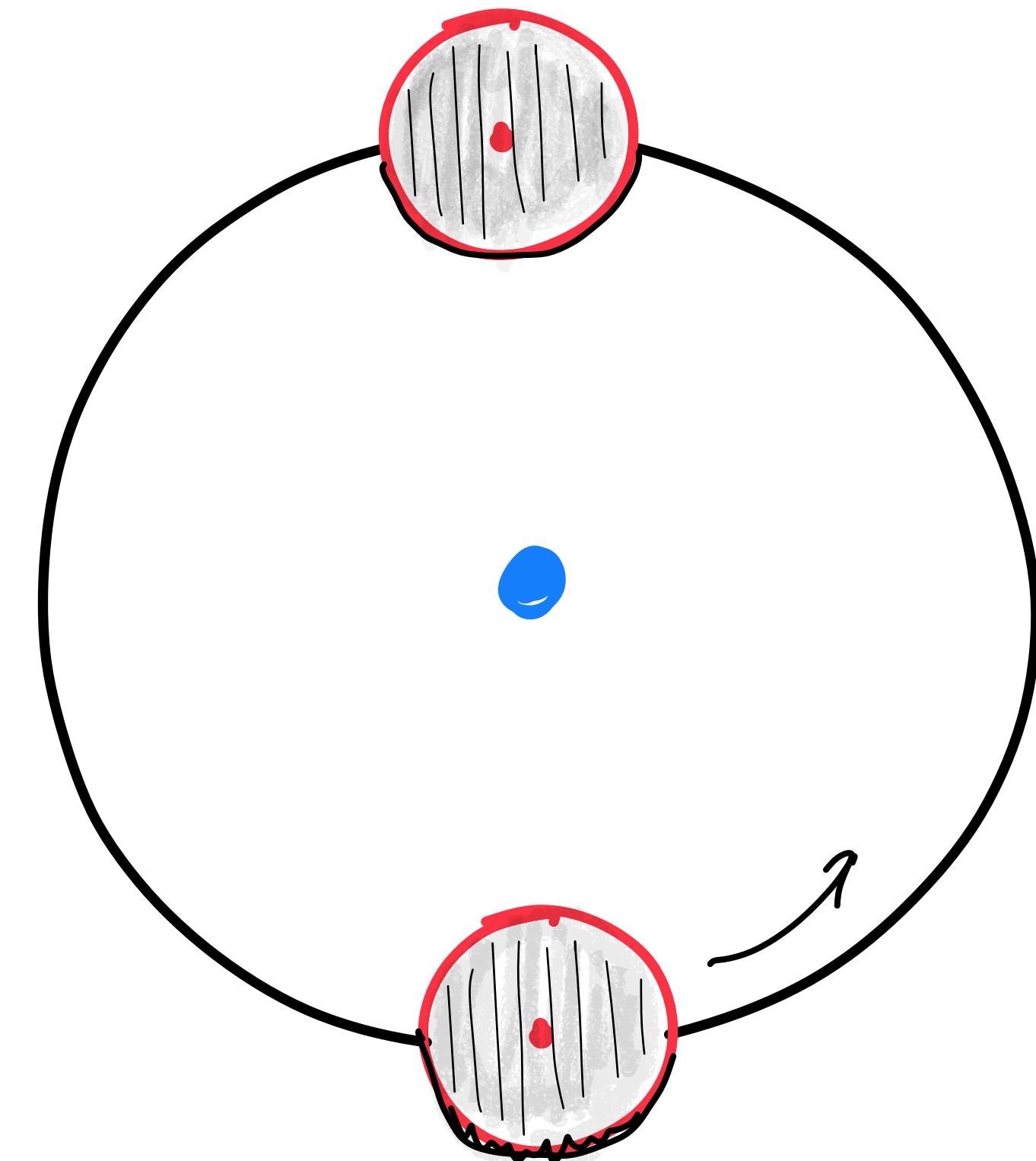
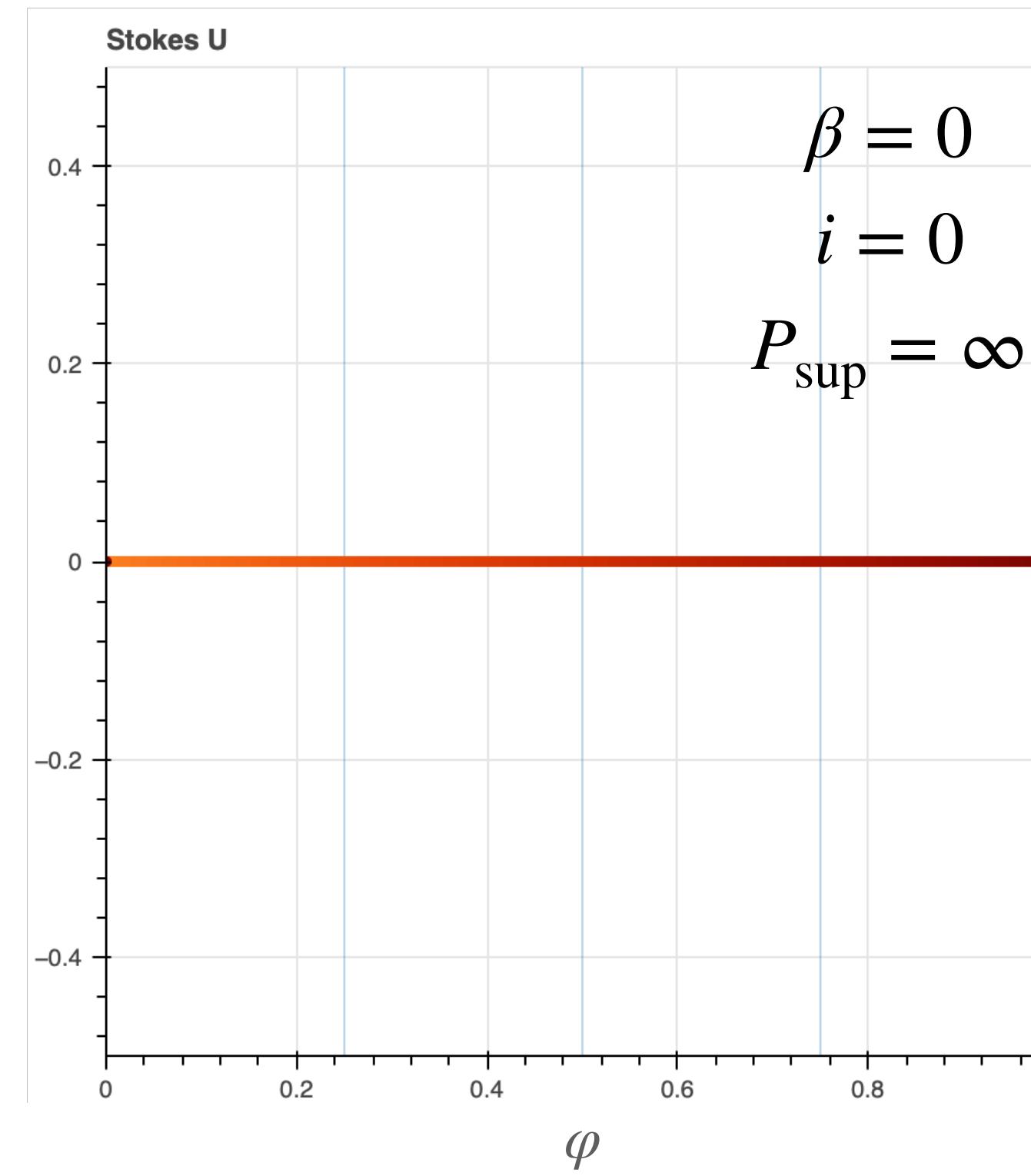
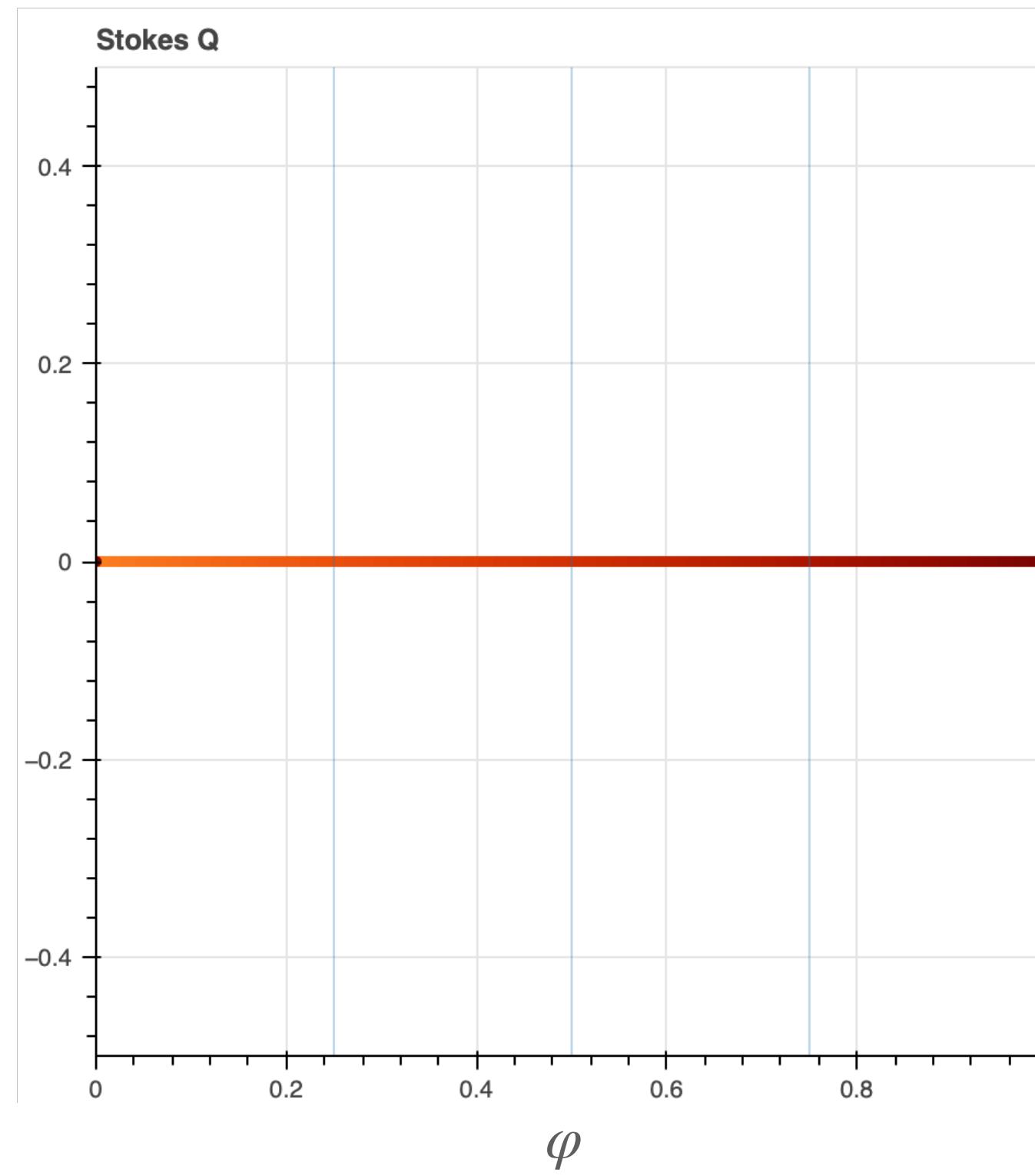
precession angle

$$\begin{cases} q = q(\cos \Psi, \beta, i, e, \dots) \\ u = u(\cos \Psi, \beta, i, e, \dots) \end{cases}$$

$$\Psi = \Psi(\phi_{\text{sing}})$$

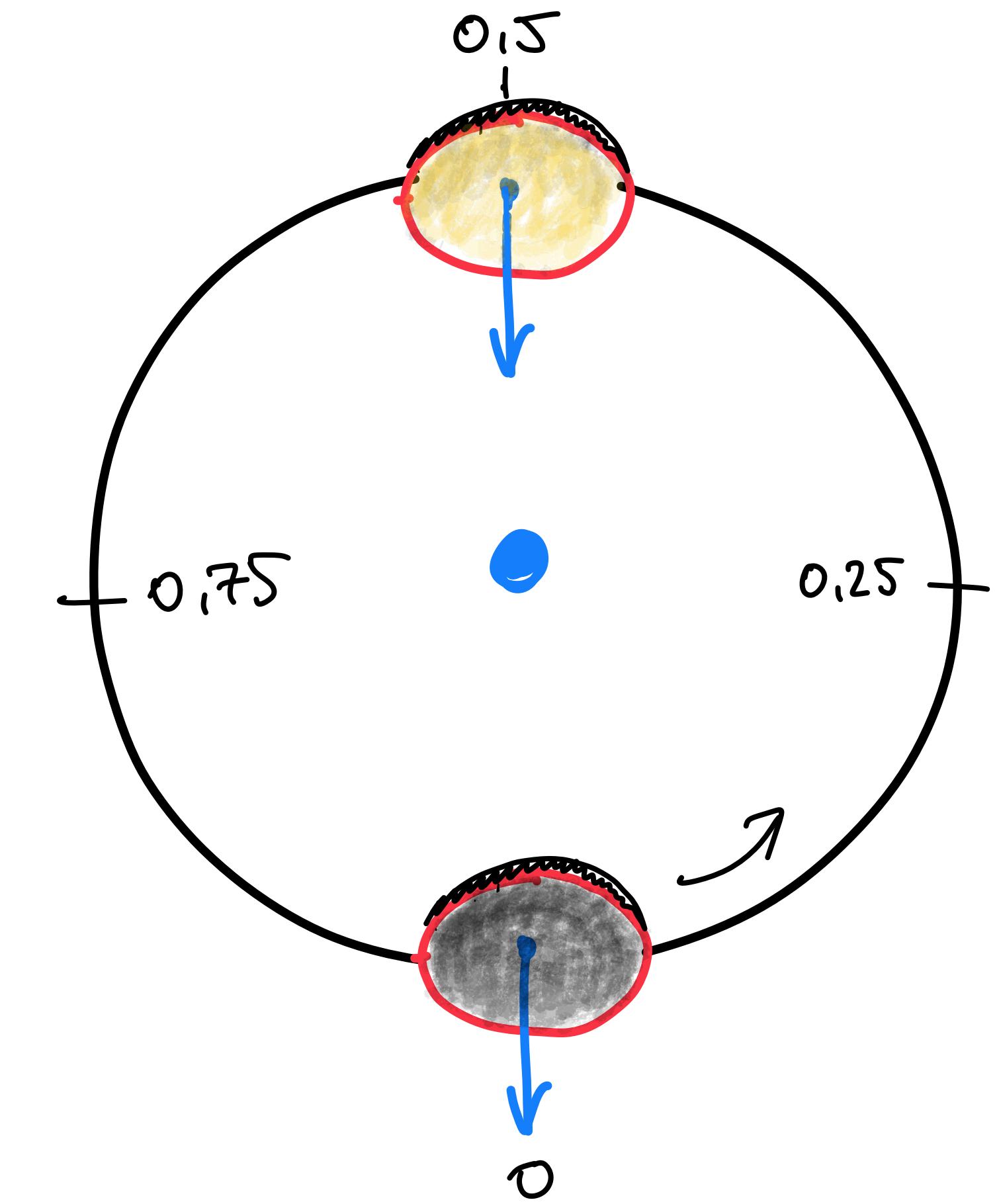
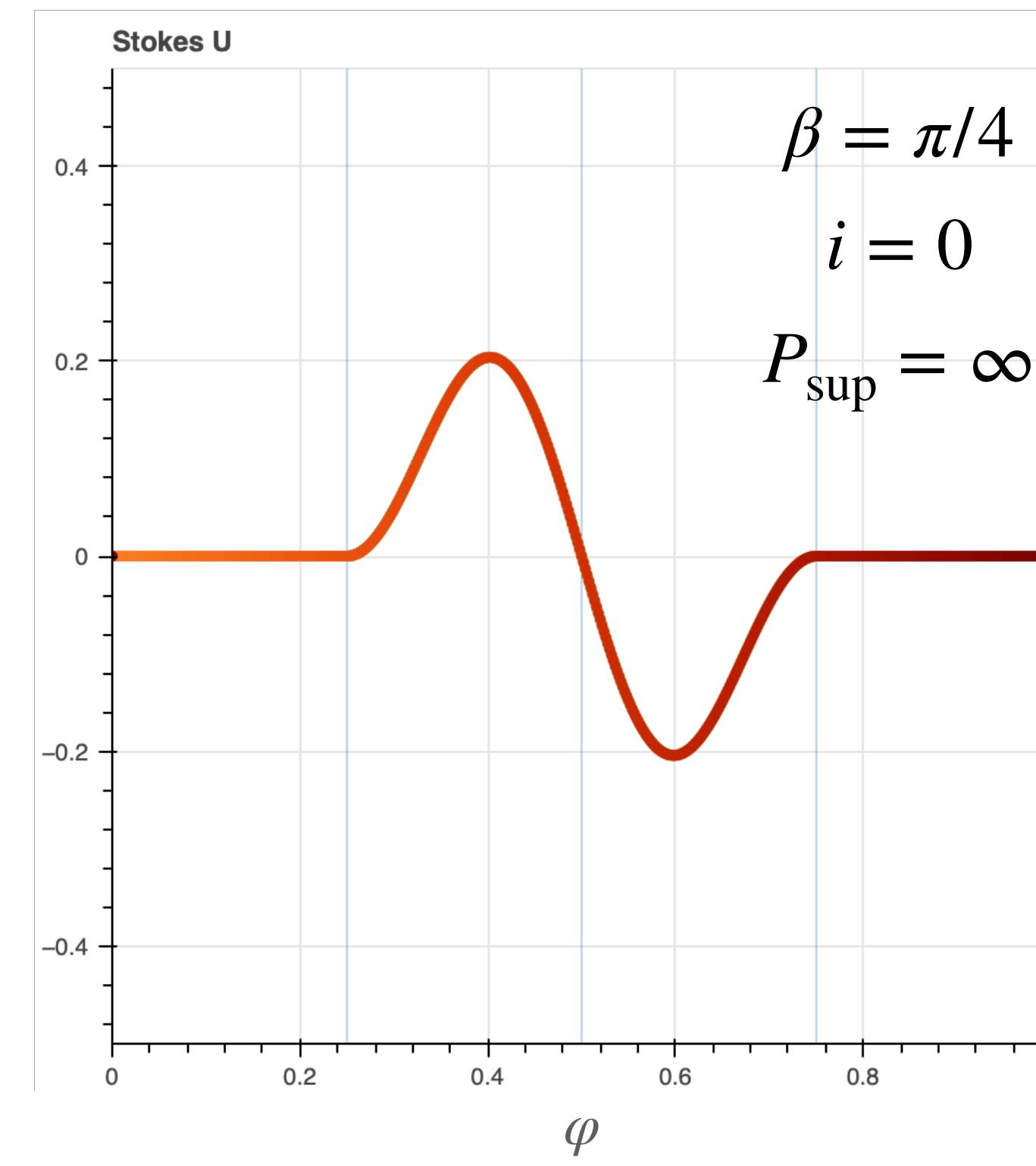
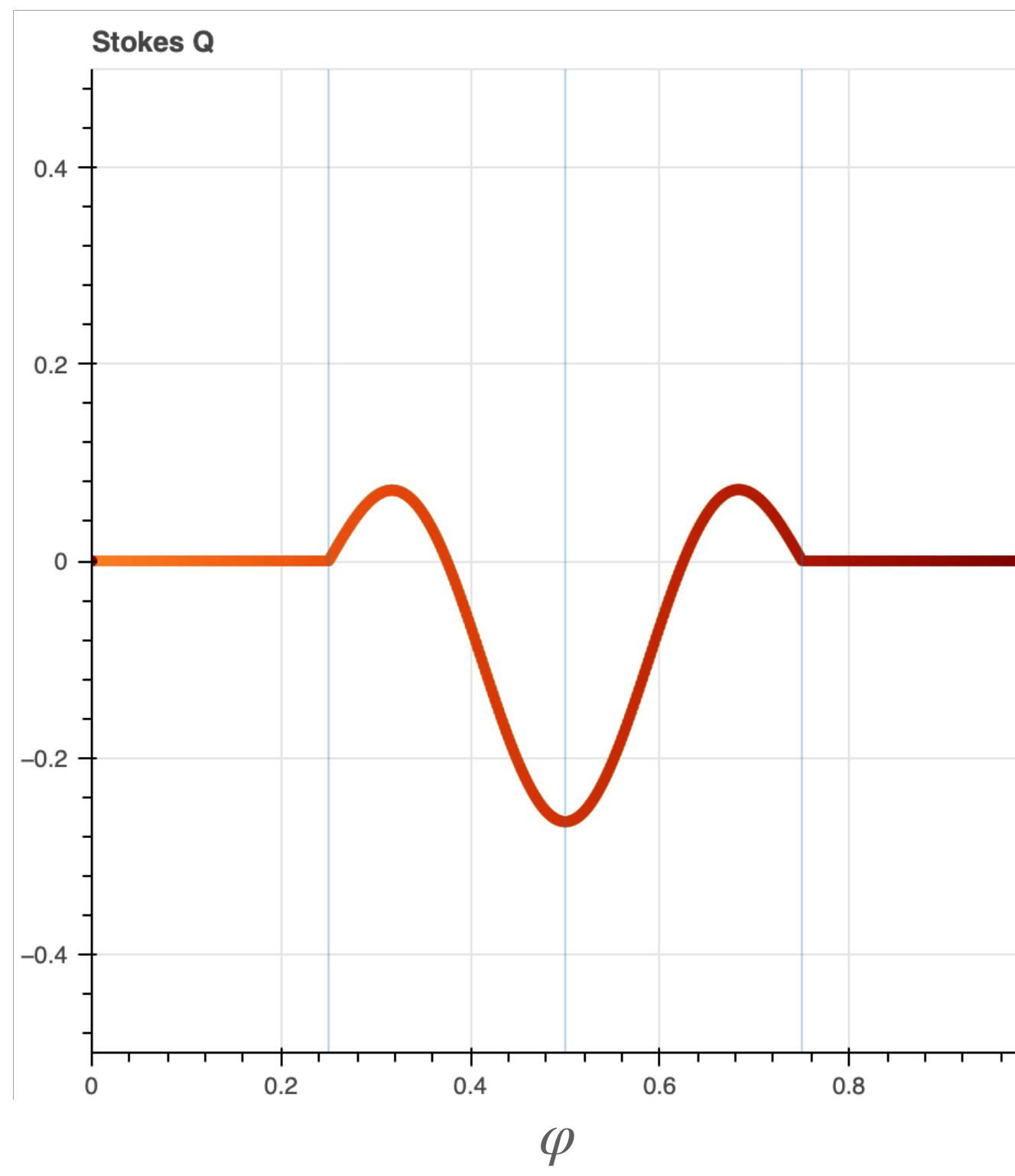
Модель прецессирующего диска

Простейшие случаи



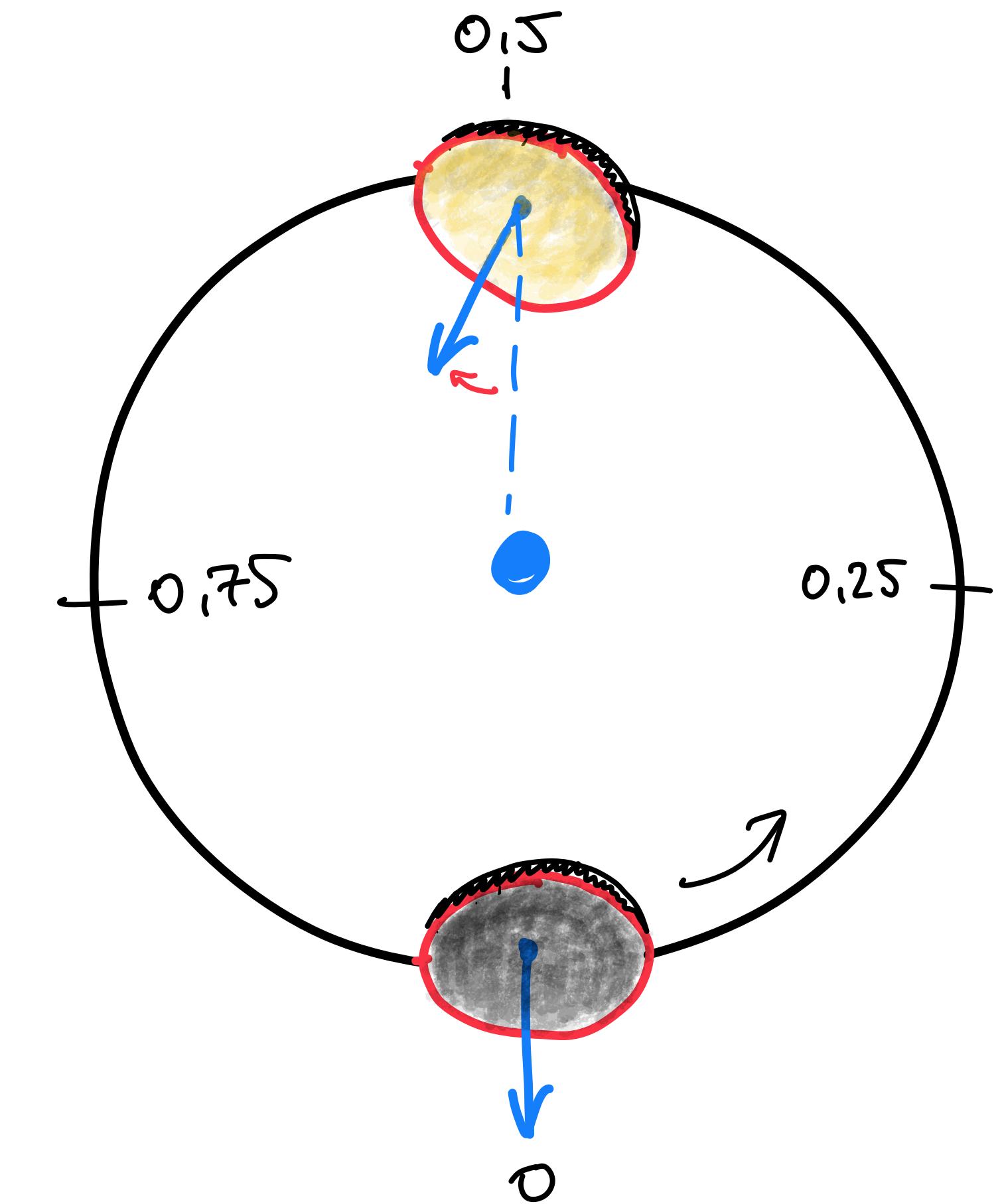
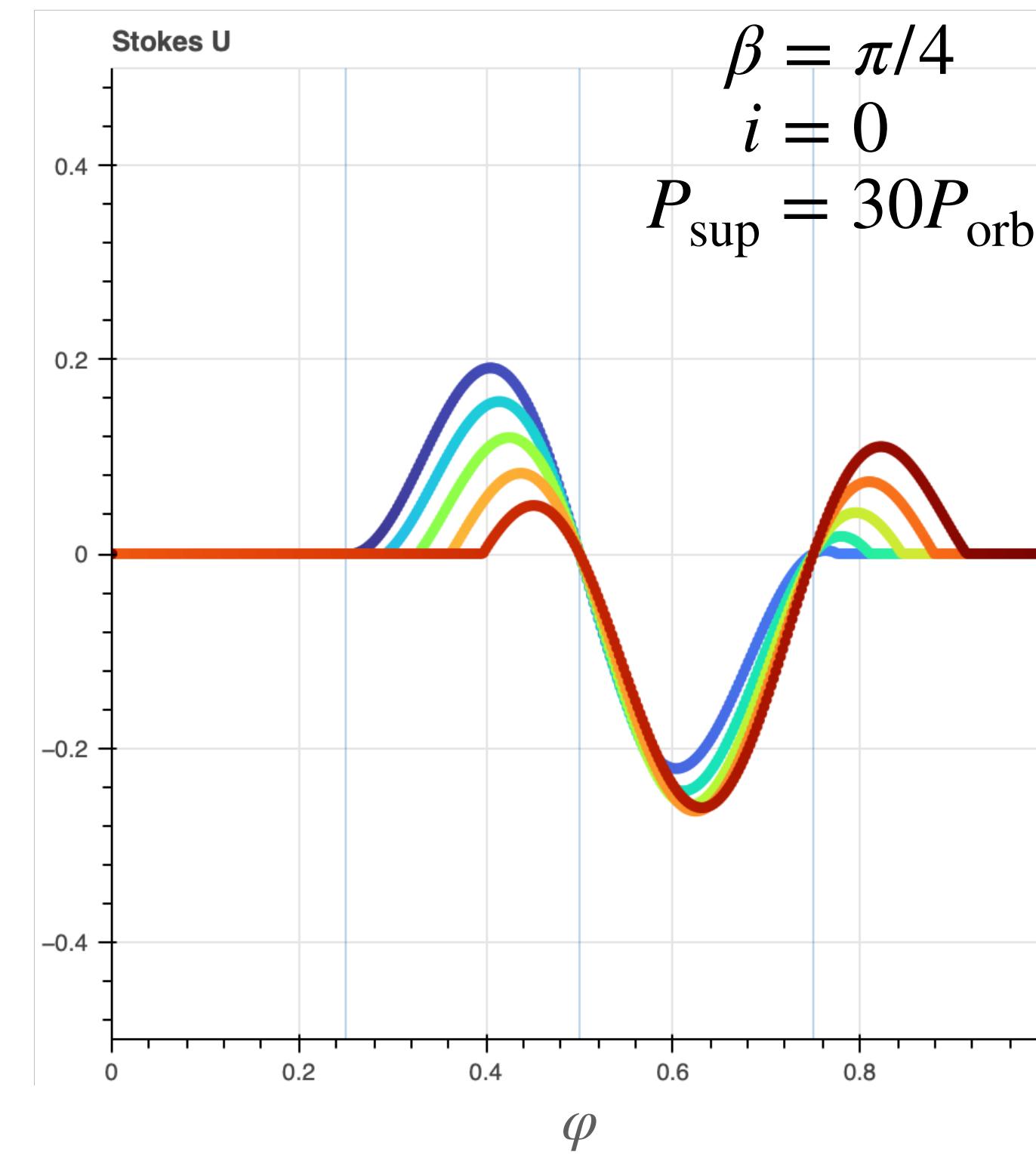
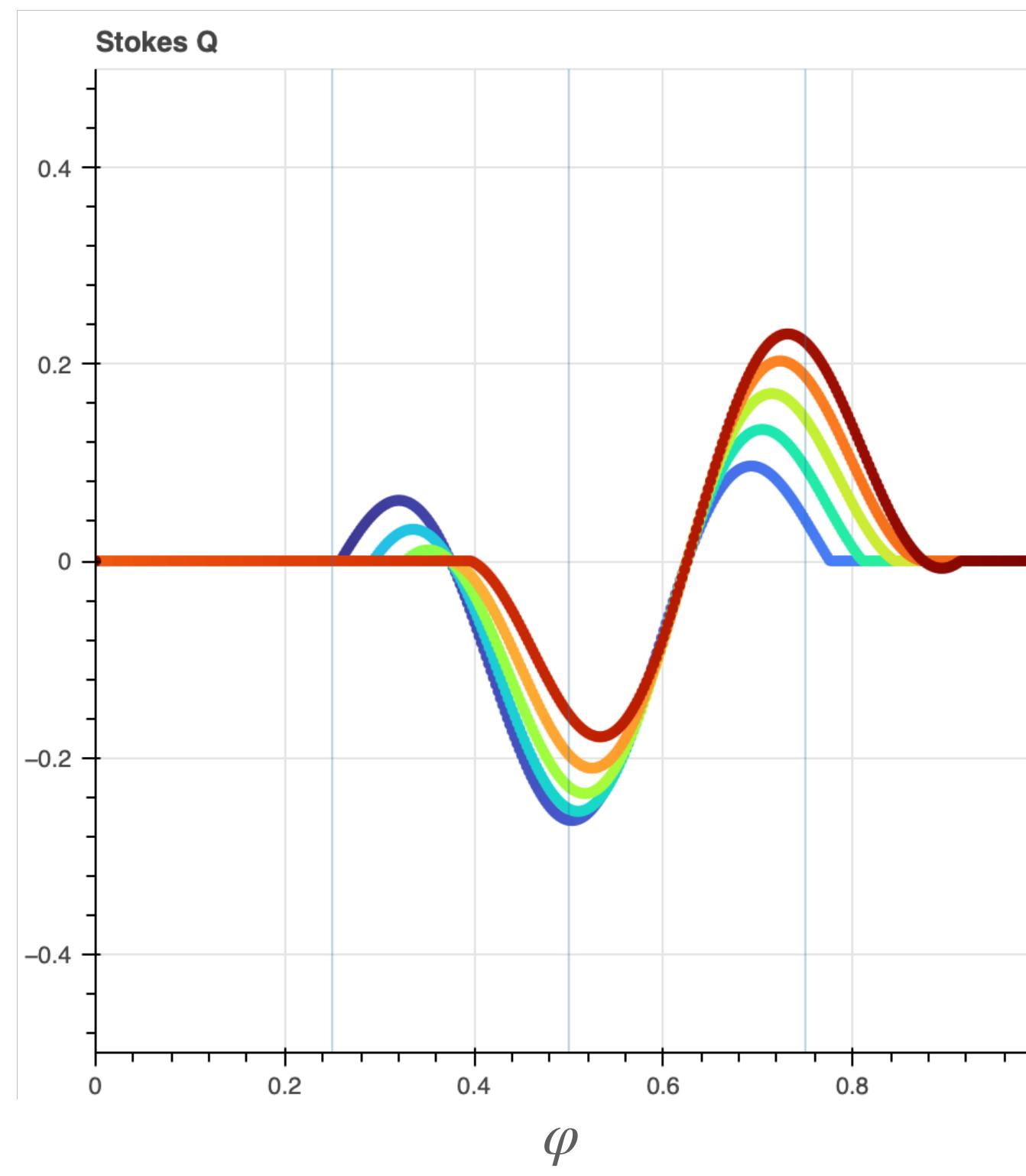
Модель прецессирующего диска

Простейшие случаи



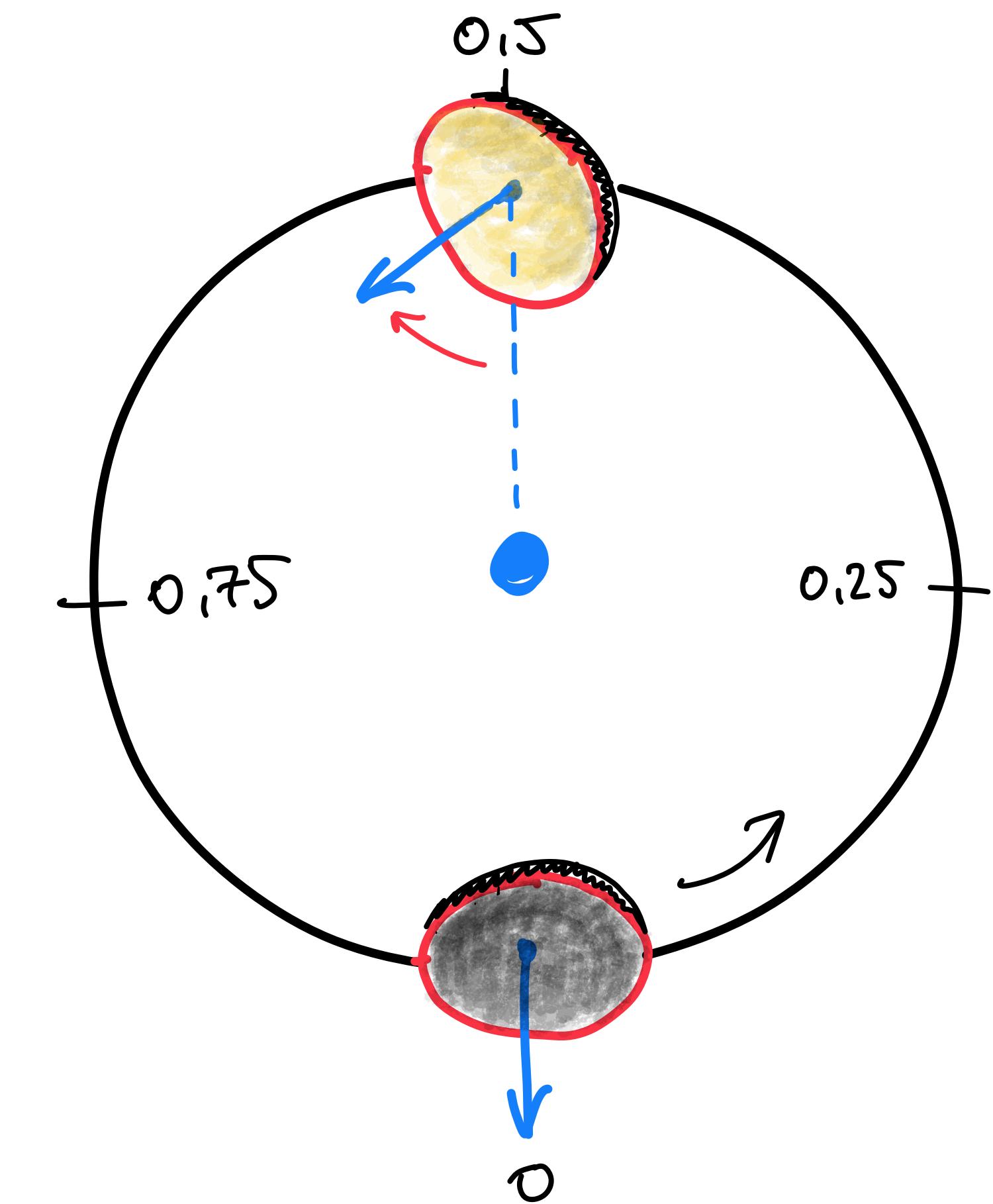
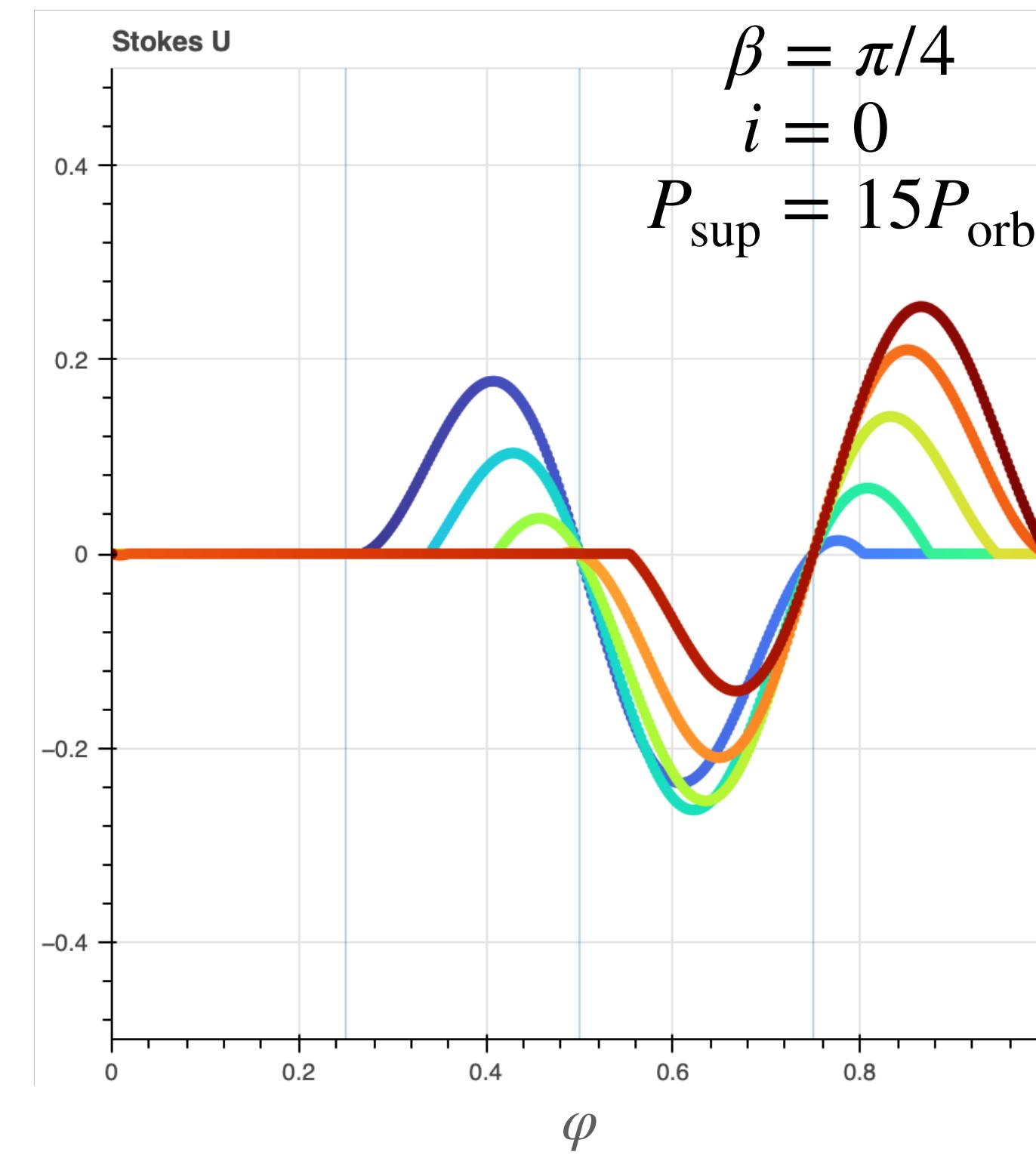
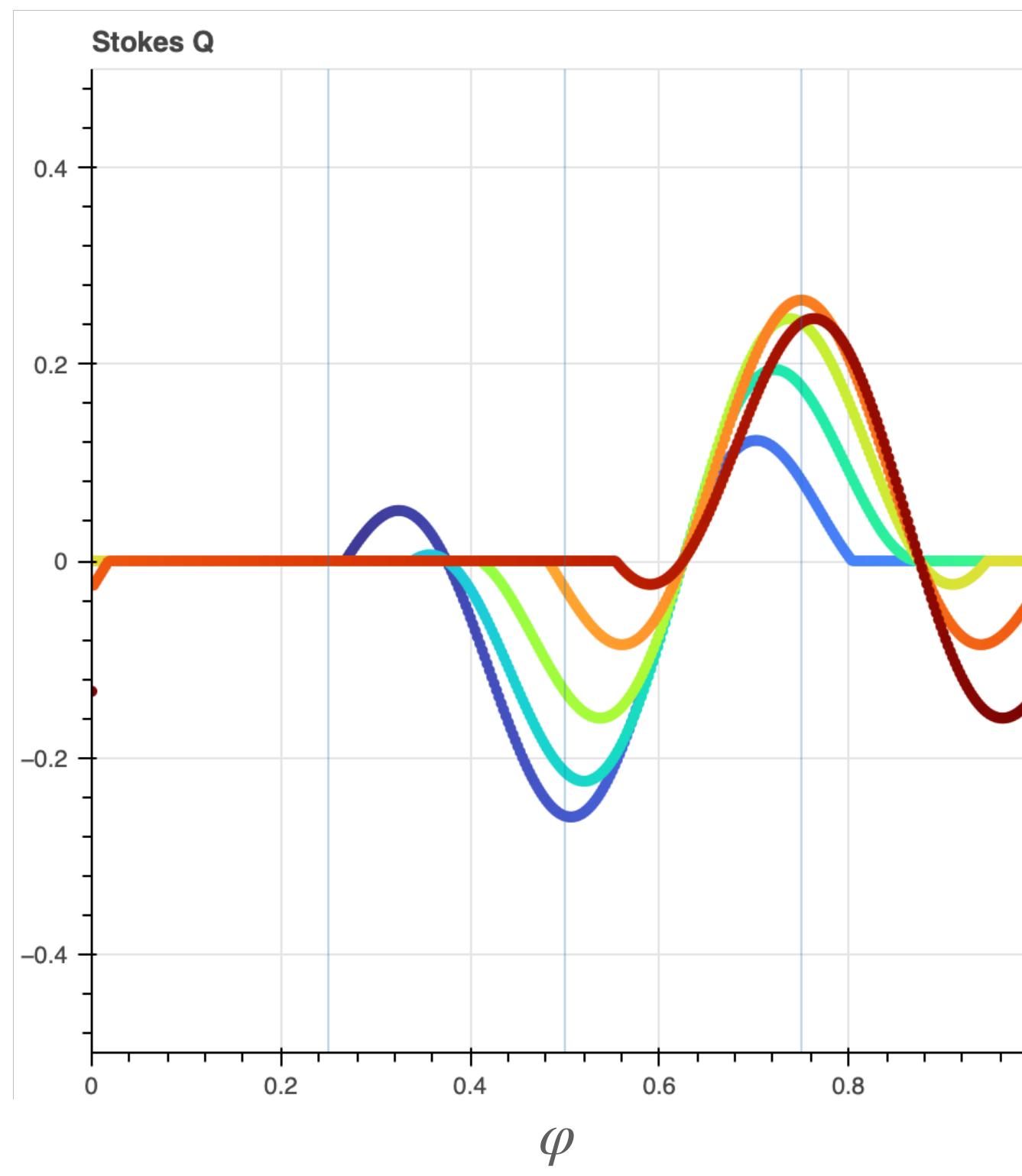
Модель прецессирующего диска

Простейшие случаи



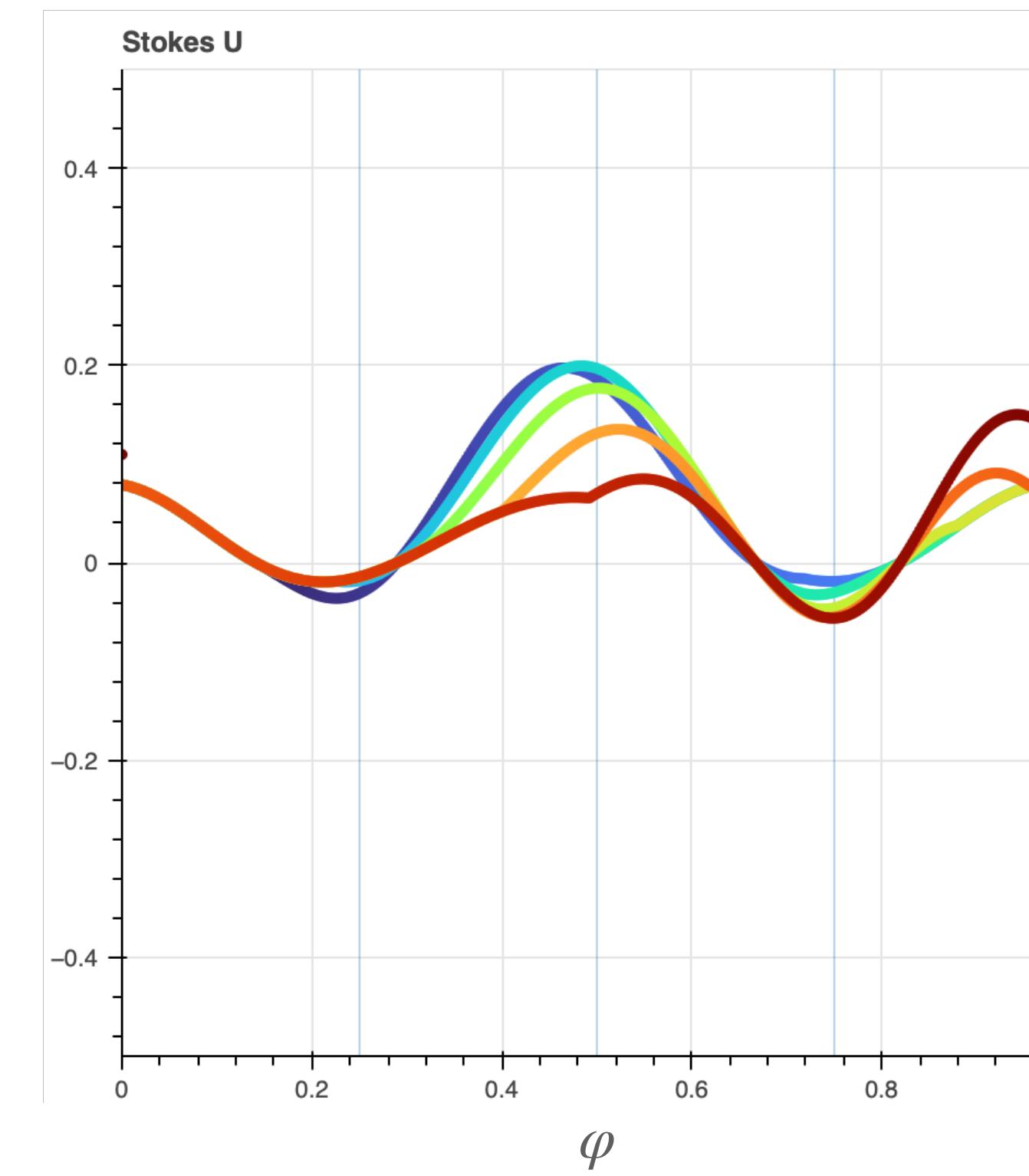
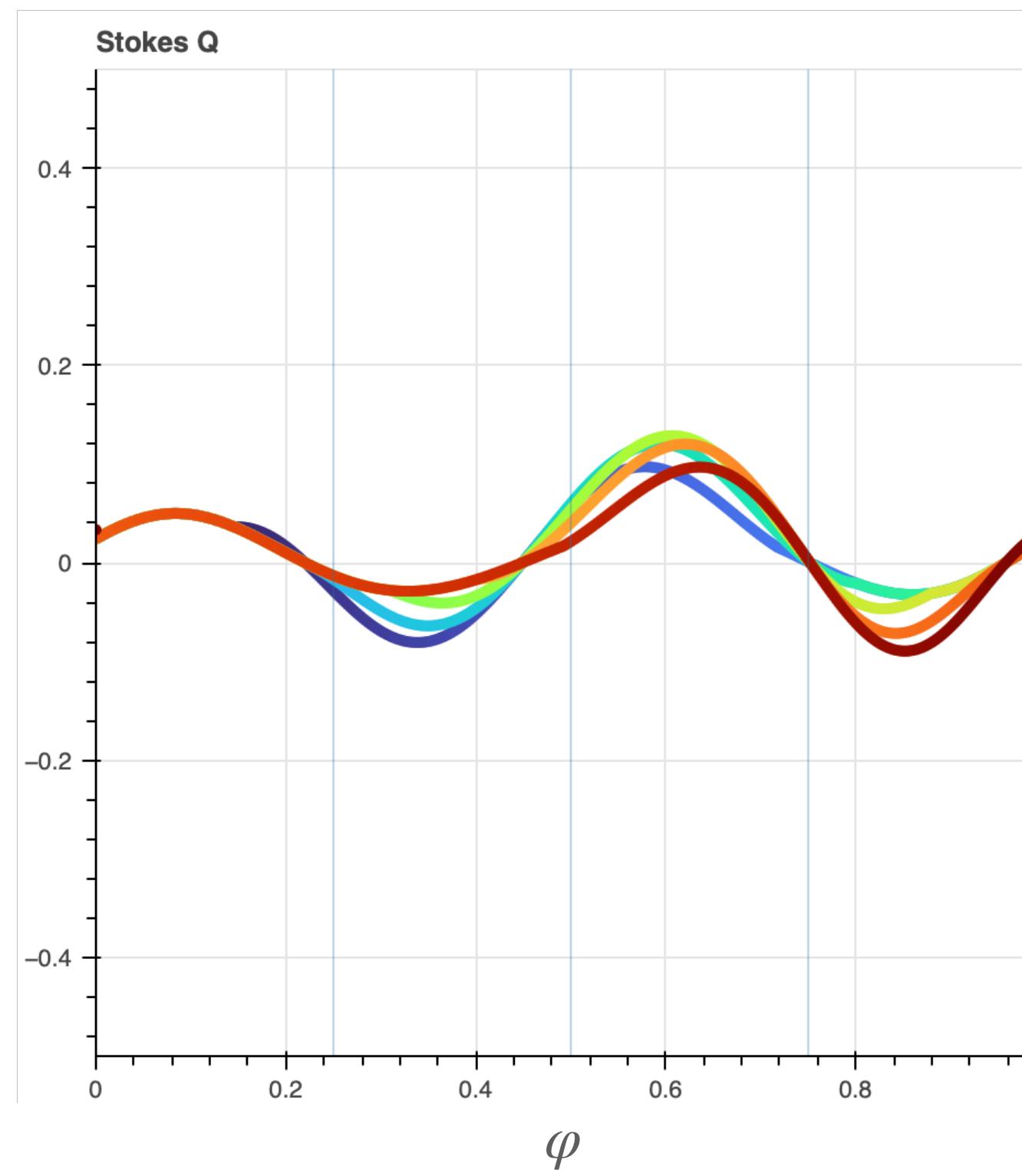
Модель прецессирующего диска

Простейшие случаи



Модель прецессирующего диска

Простейшие случаи



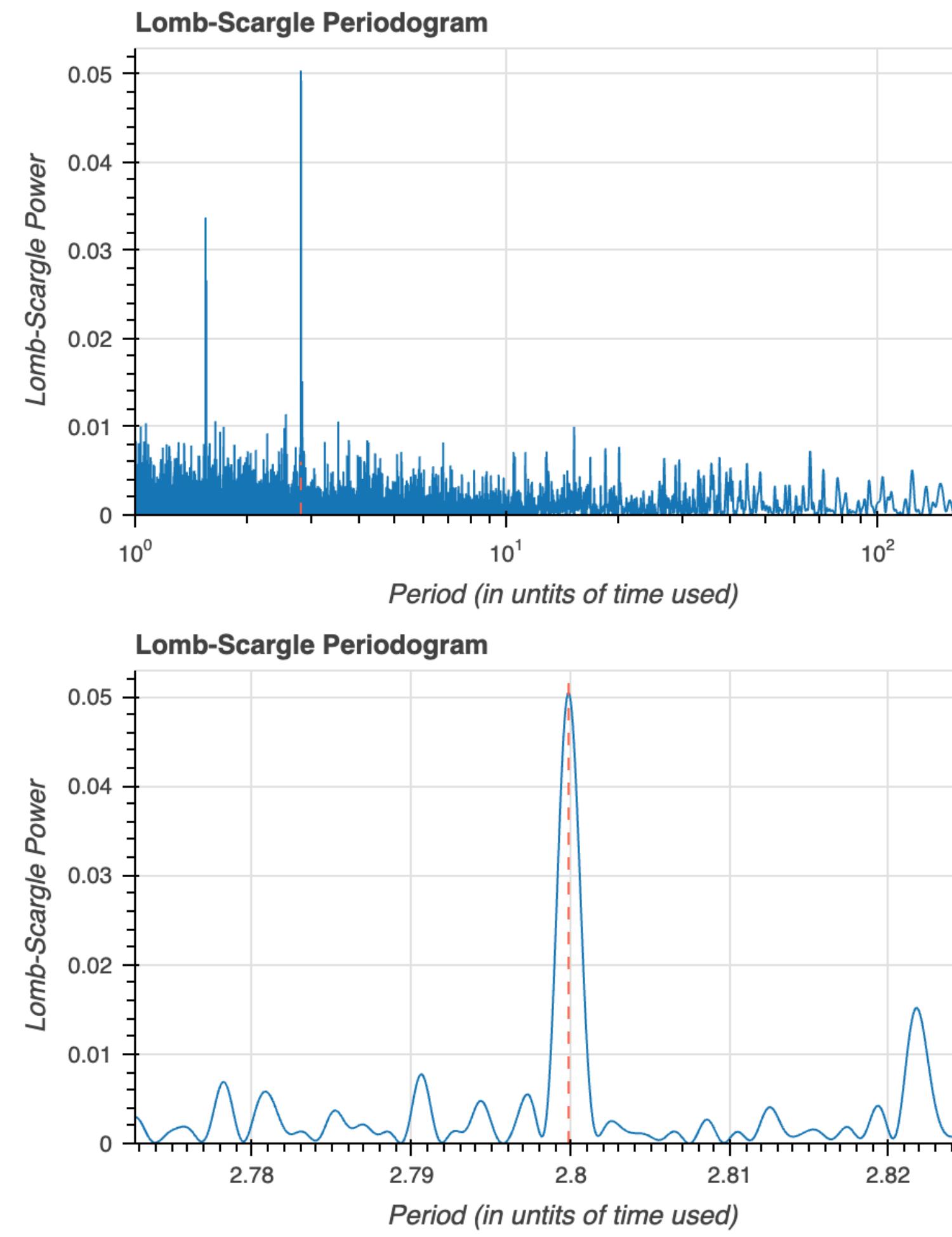
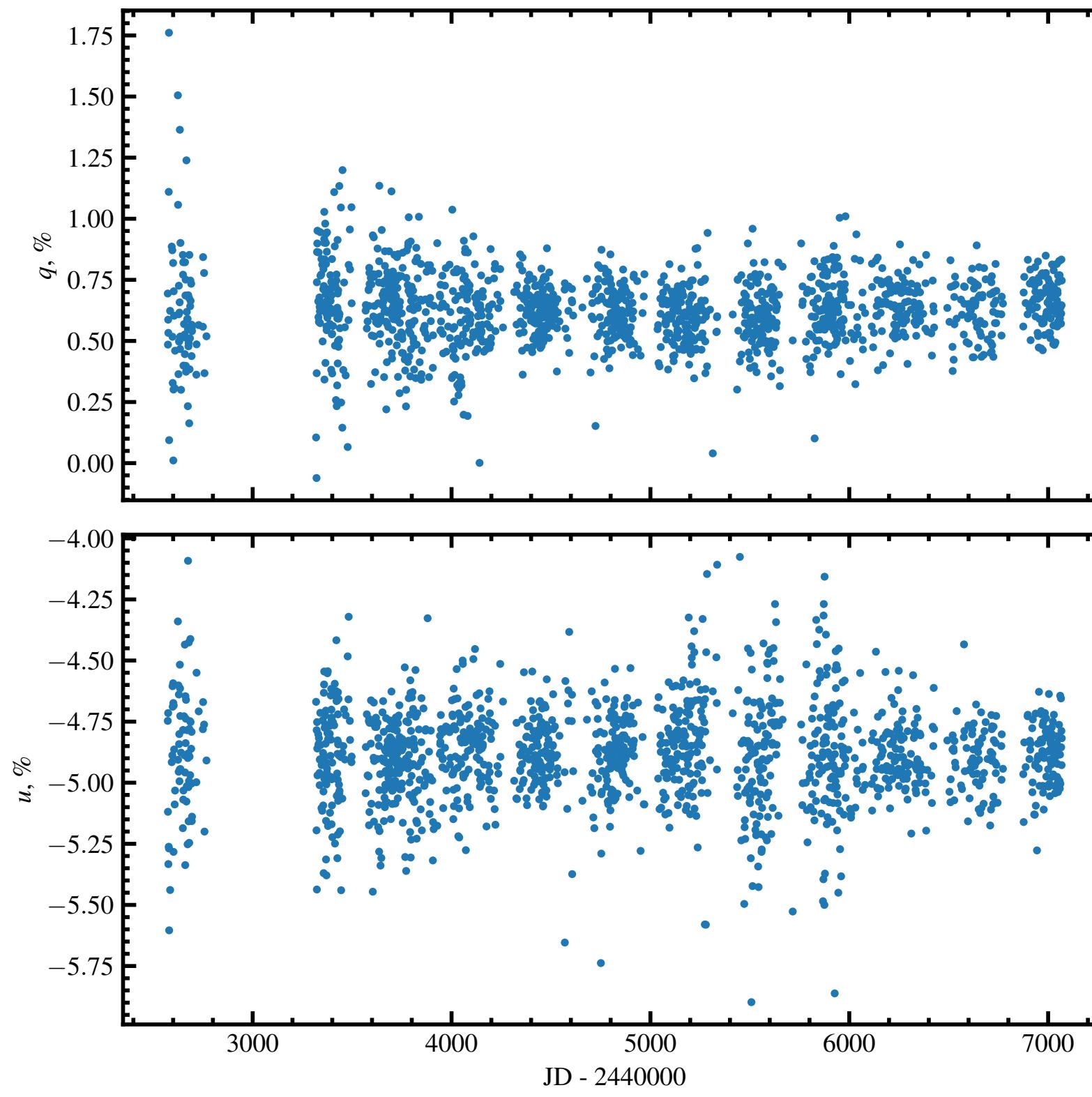
Parameters of Cyg X-1

$$\begin{aligned} e &= 0.05 \quad i = 120^\circ \\ \beta &= 30^\circ \quad \Omega = 37^\circ \\ P_{\text{sup}} &= 13P_{\text{orb}} \end{aligned}$$

Contribution of the disk – 80%.
Contribution of the cloud - 20%.

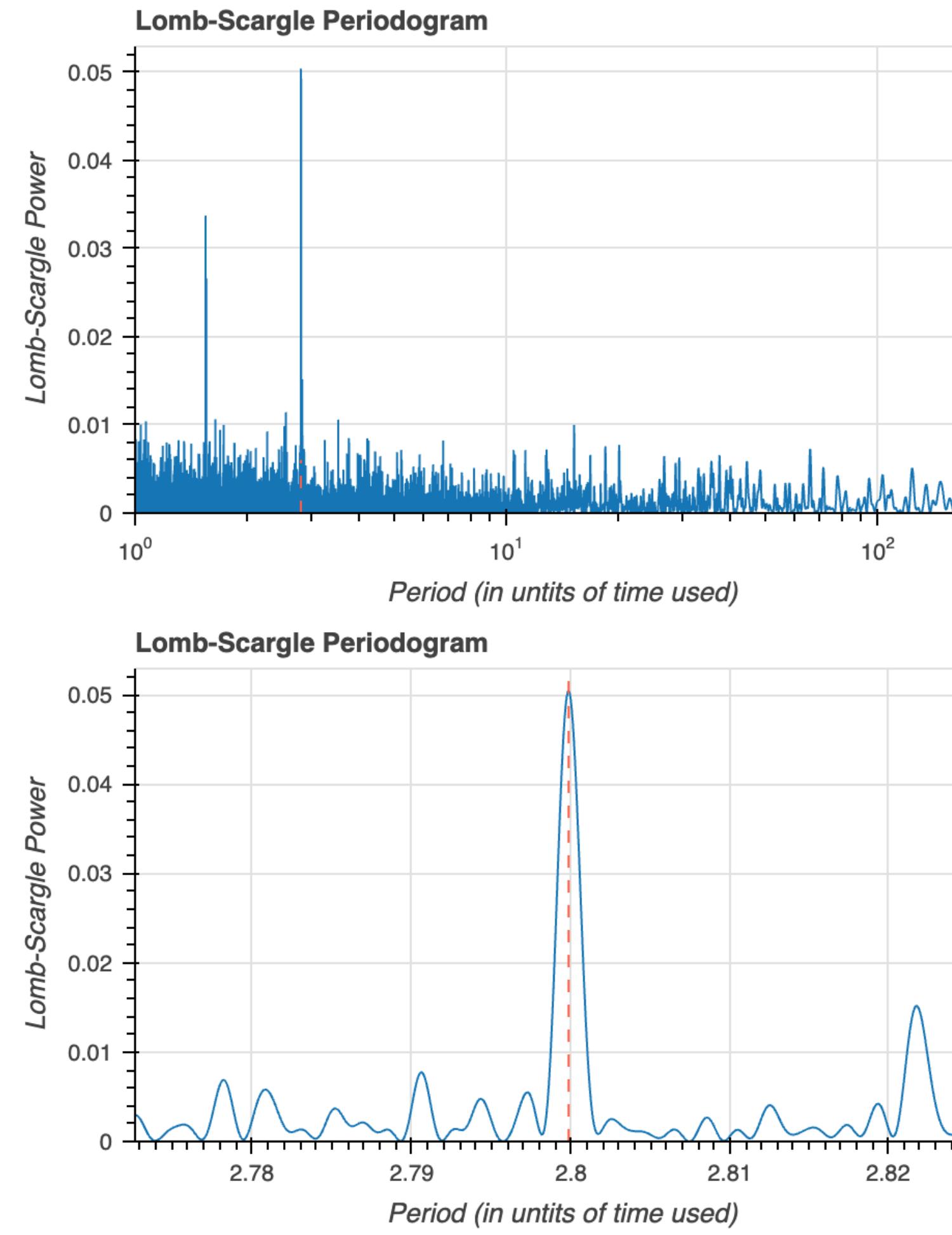
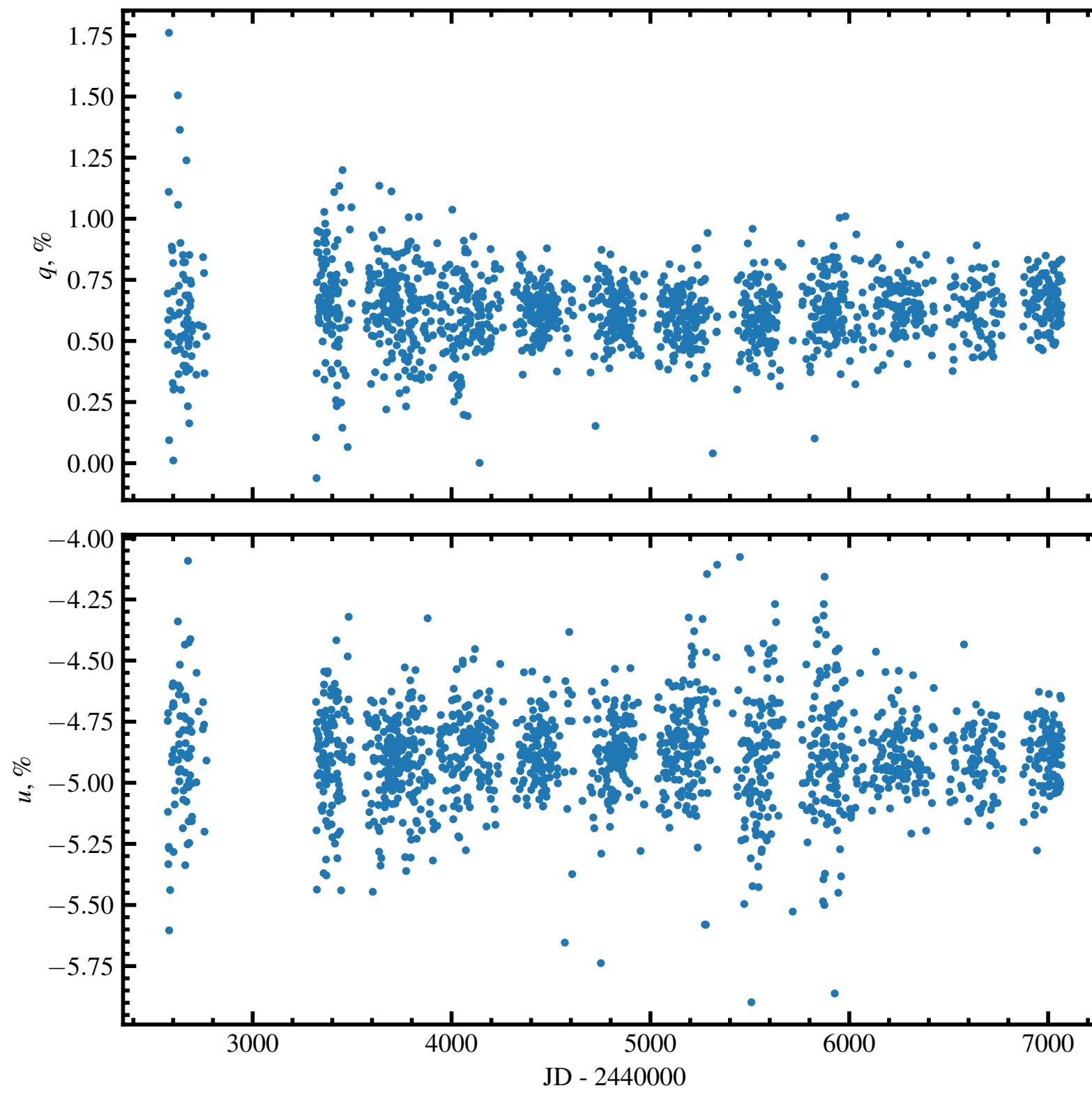
Kemp's historical data

1500 наблюдений с 1975 по 1987

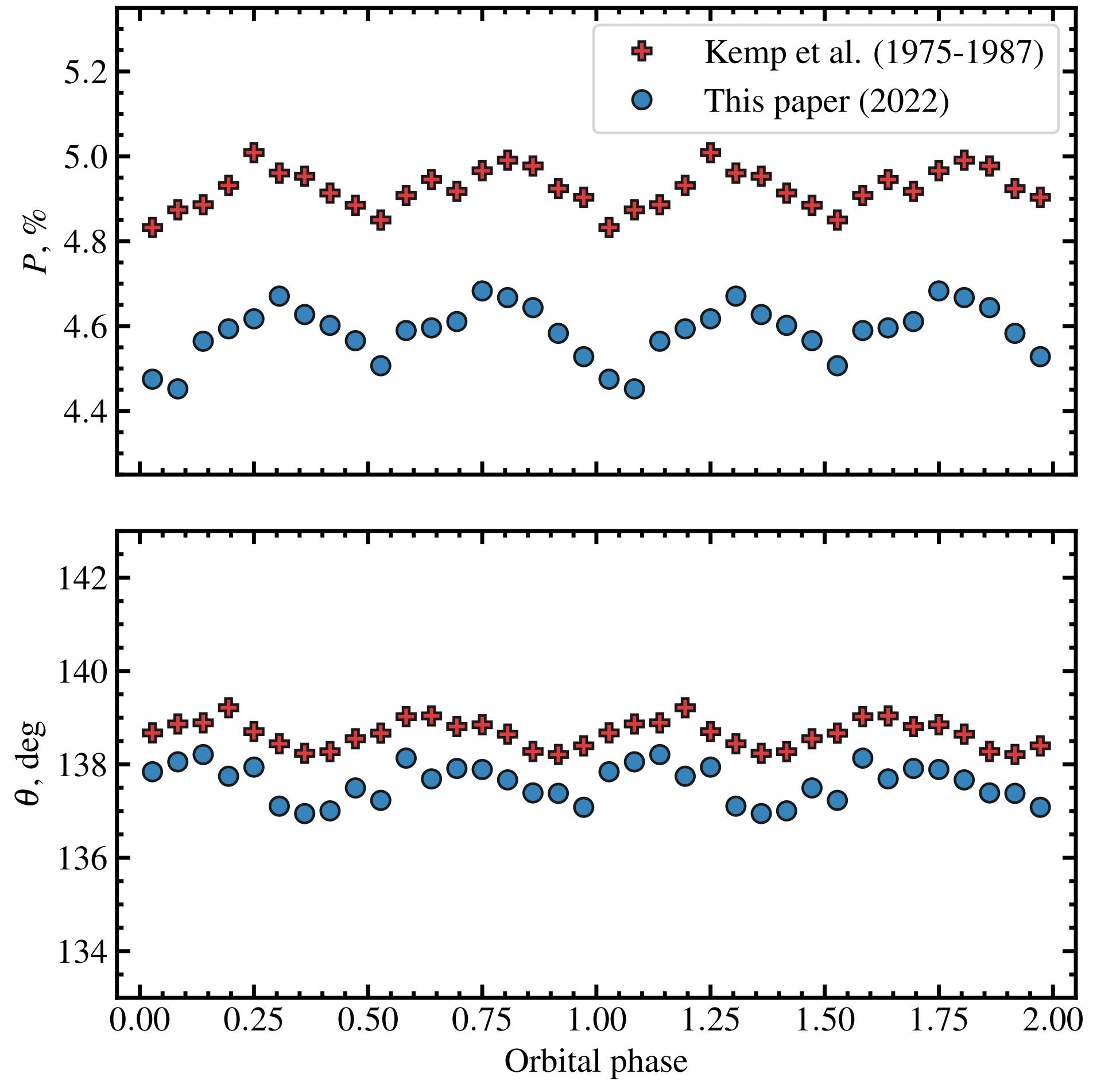


Kemp's historical data

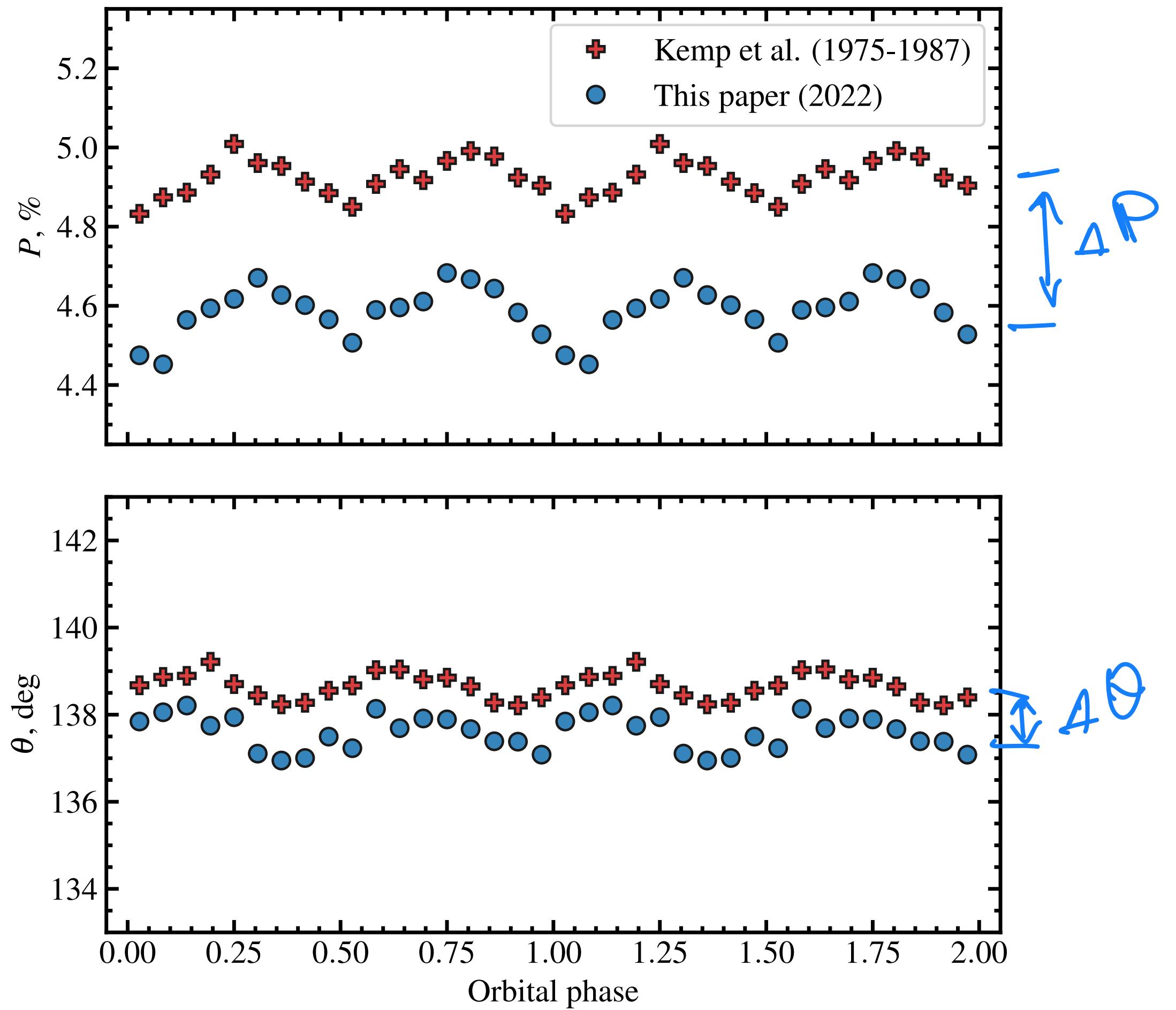
1500 наблюдений с 1975 по 1987



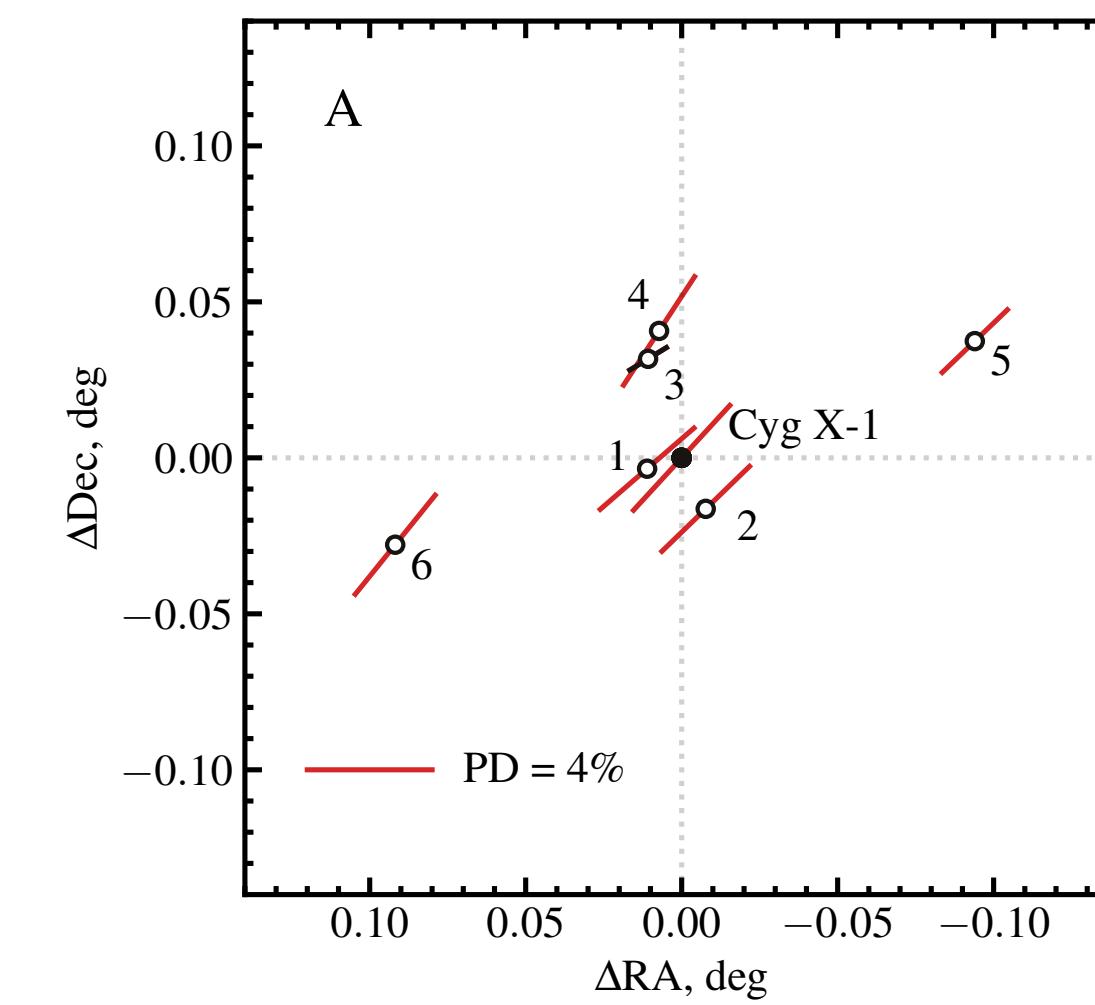
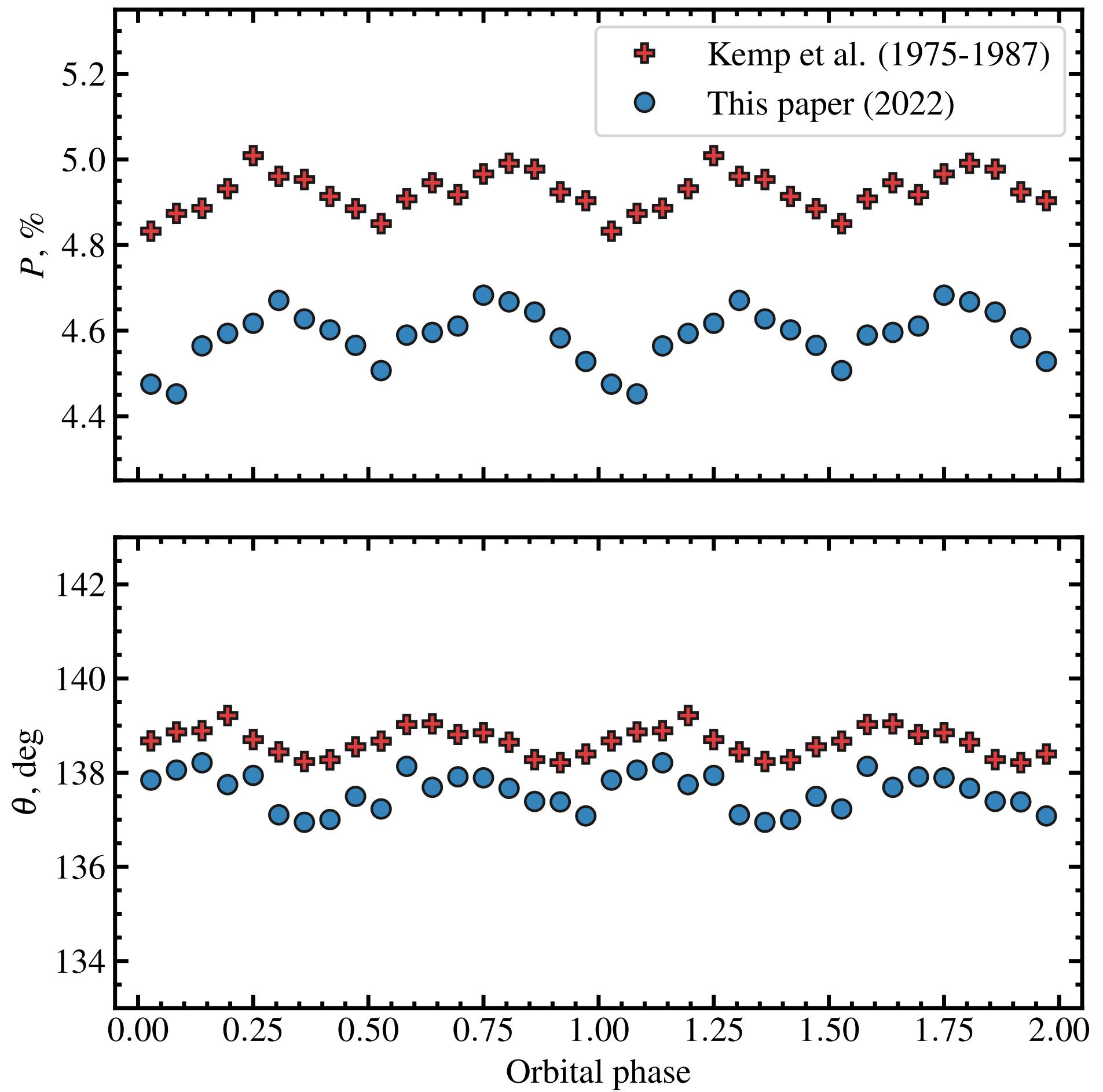
Kemp's historical data



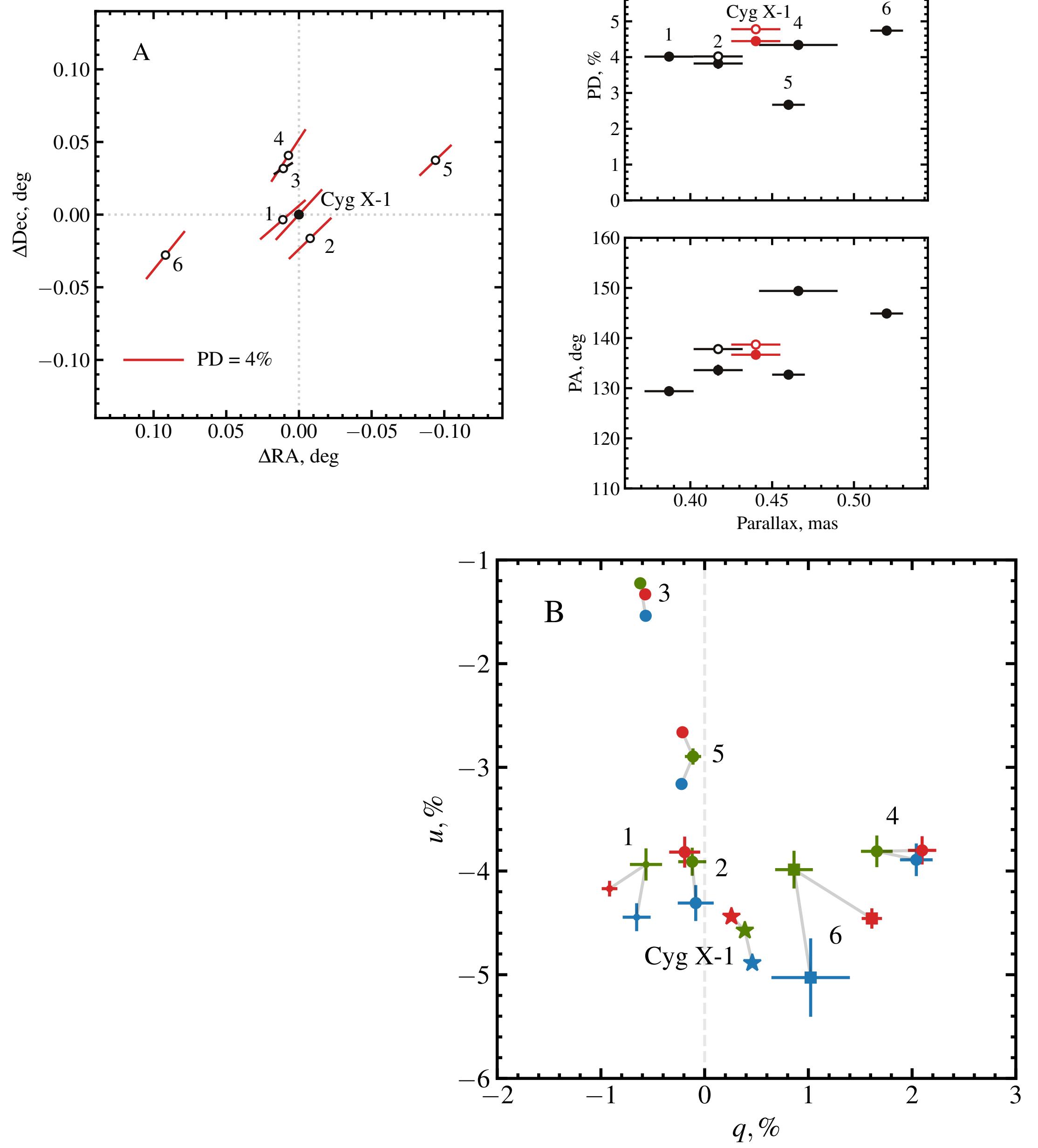
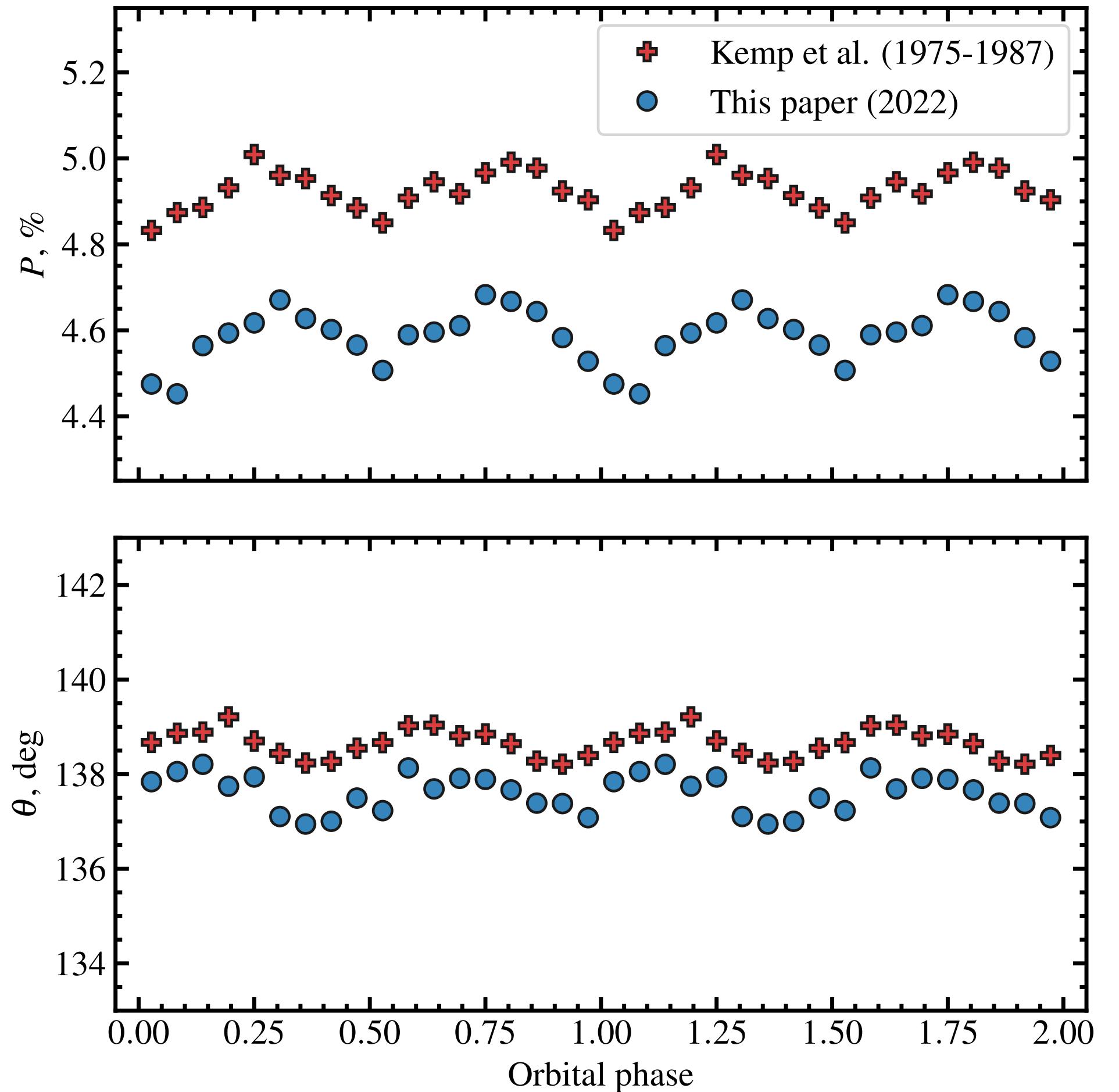
Kemp's historical data



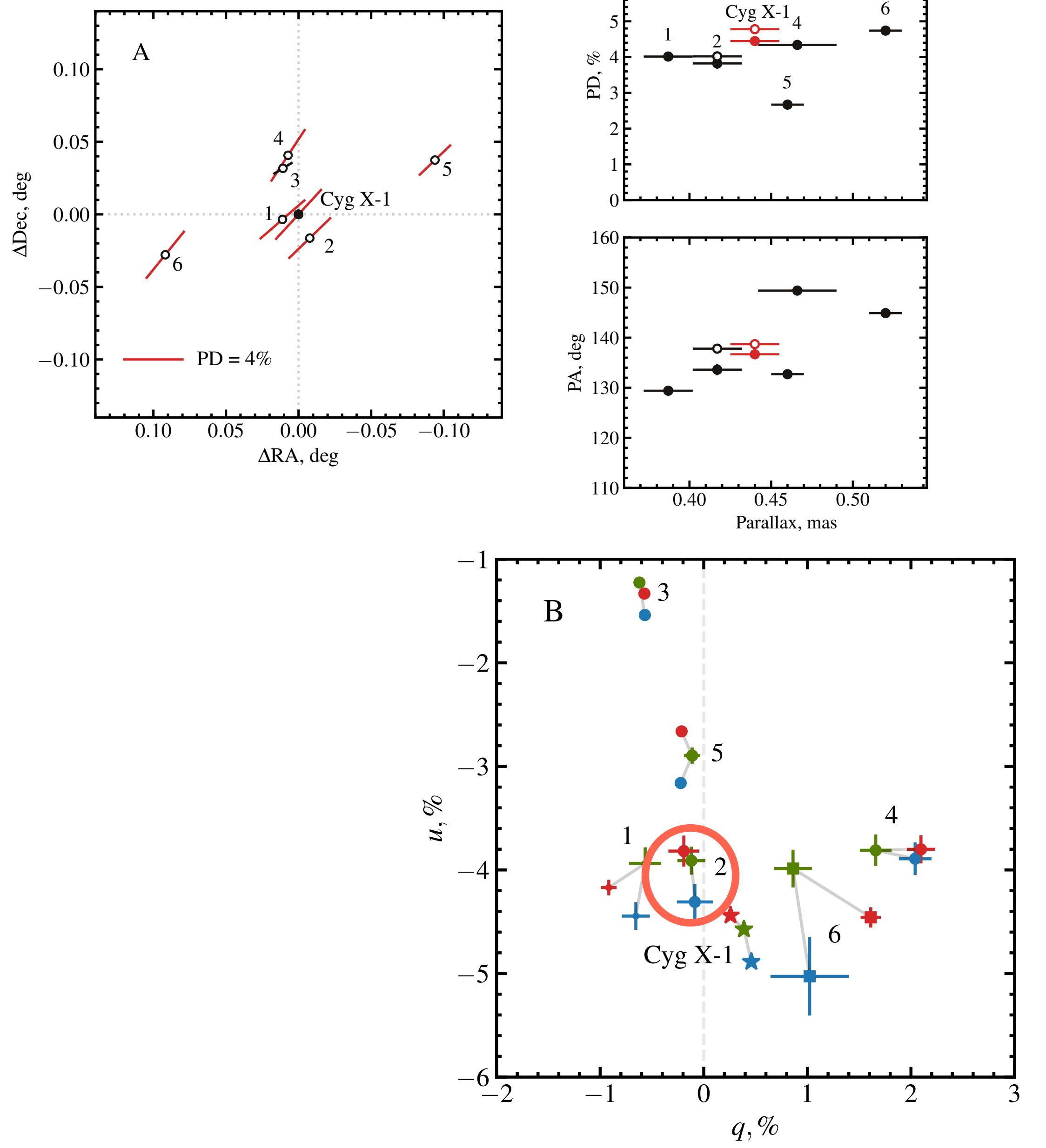
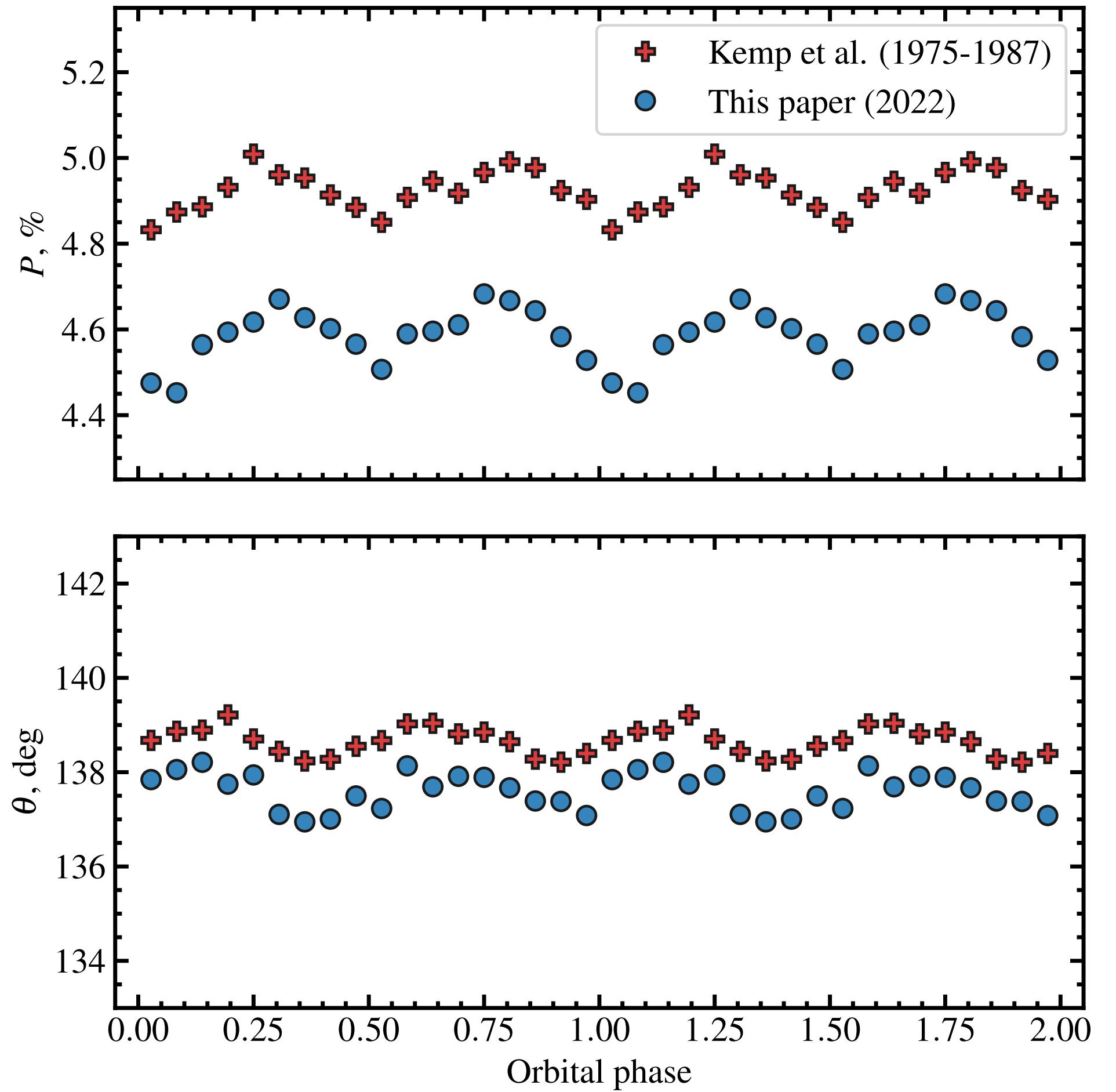
Kemp's historical data



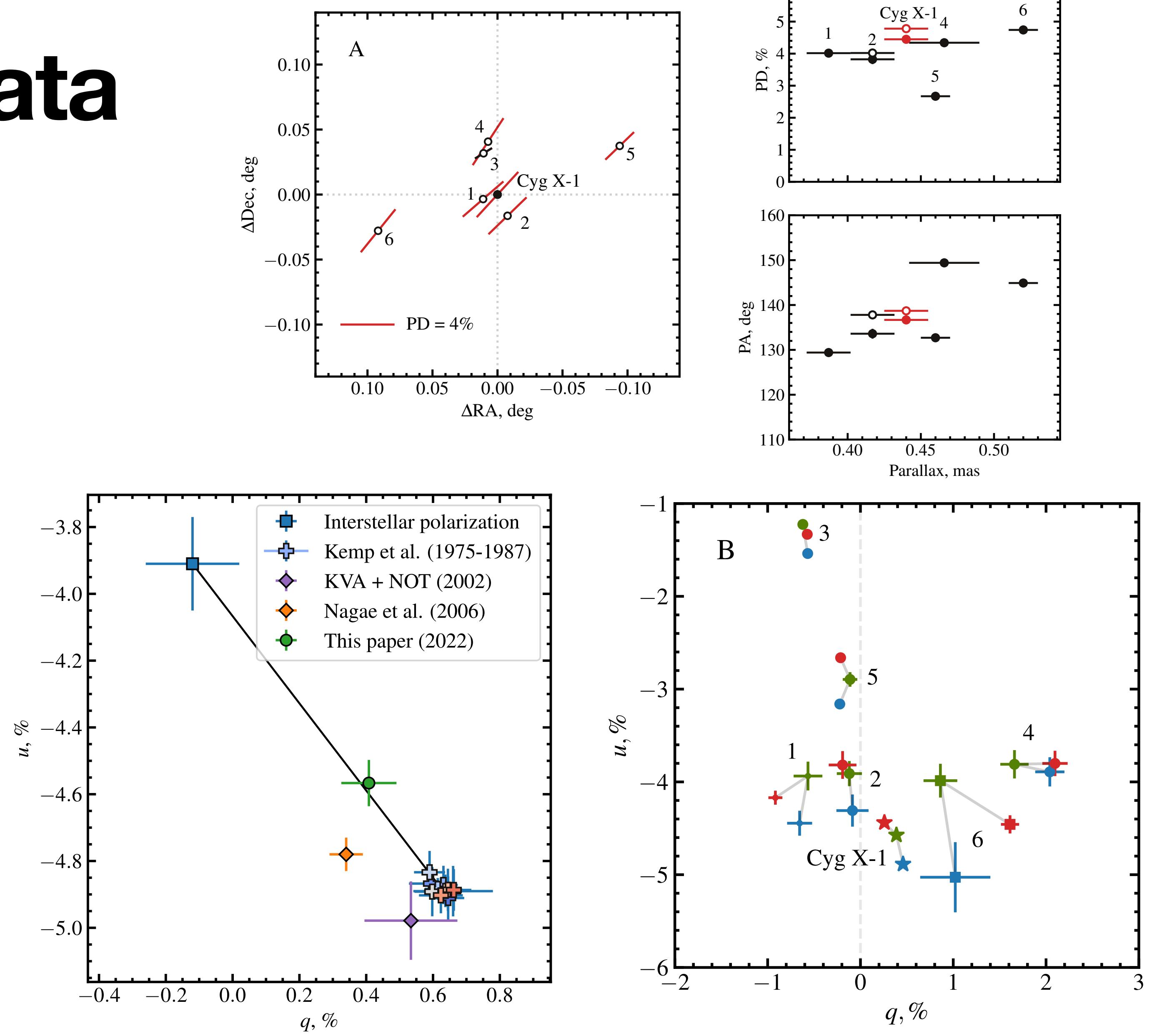
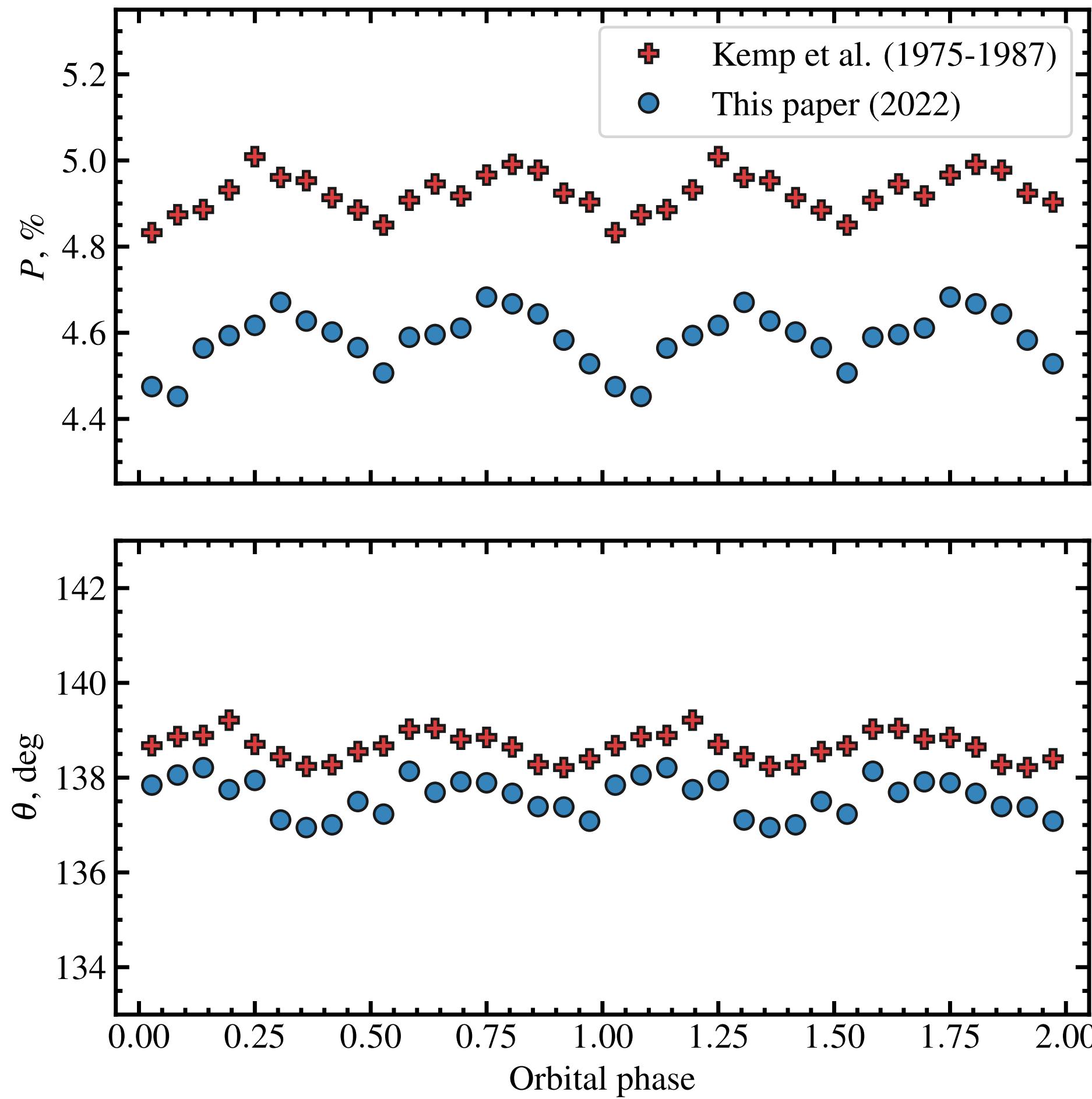
Kemp's historical data



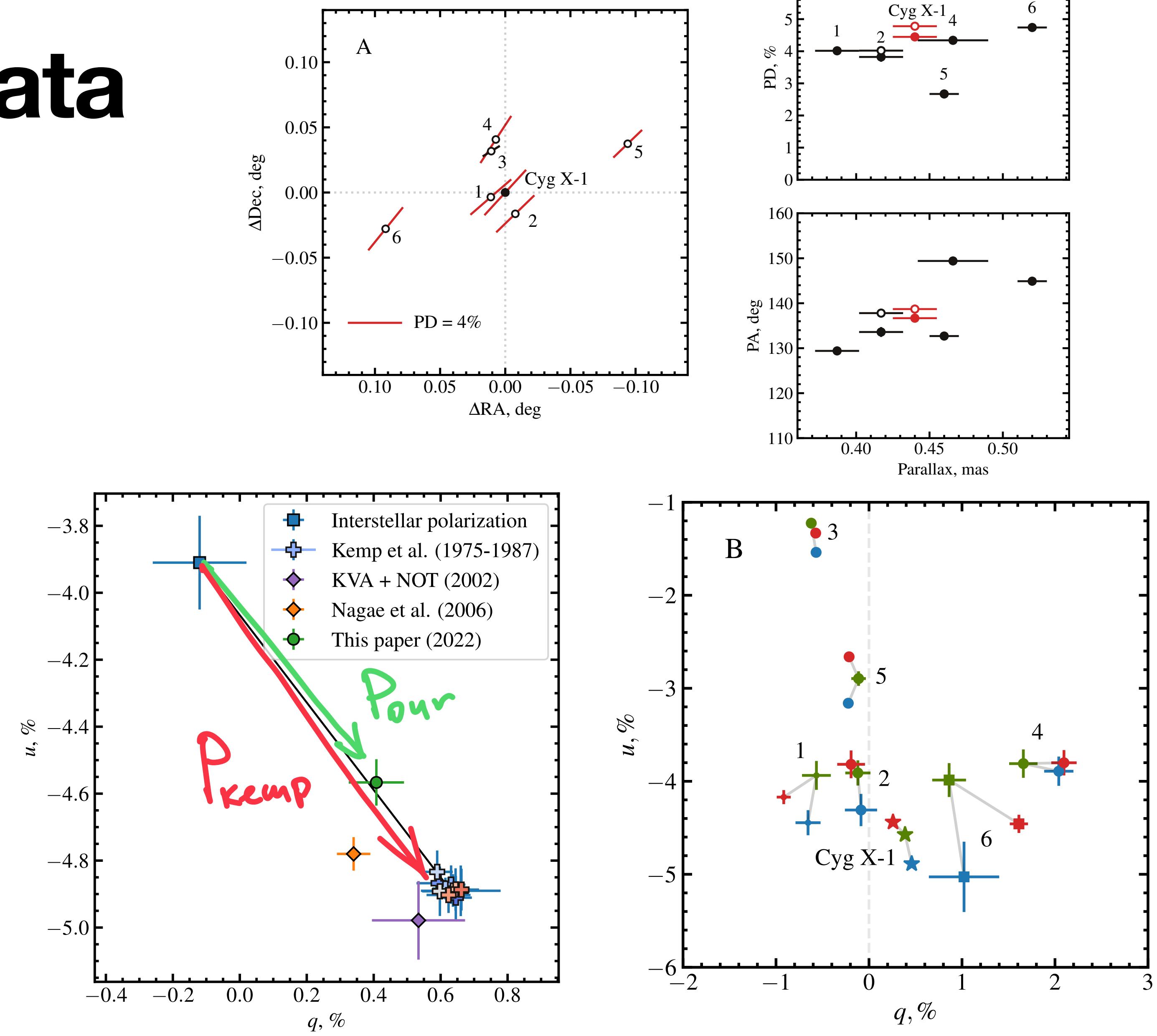
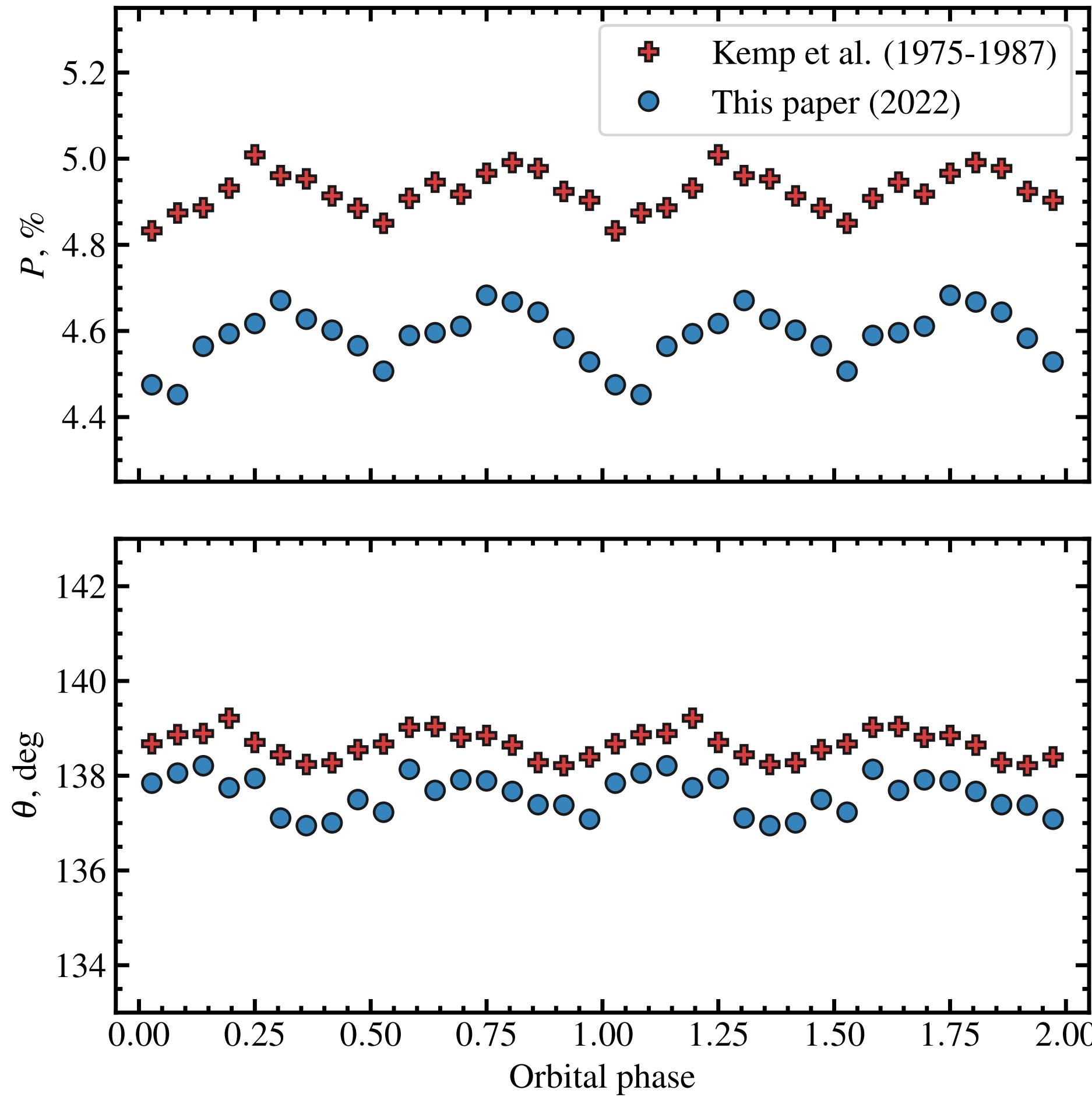
Kemp's historical data



Kemp's historical data



Kemp's historical data



ИТОГИ

LMXBs:

- Был проведён поляриметрический обзор выборки LMXBs (**Kravtsov et al., 2022, MNRAS**)
- Было обнаружено **отсутствие** значимой собственной поляризации у большинства объектов, что накладывает ограничение на природу оптической компоненты излучения в таких системах
- У объекта MAXI J1820+070 был обнаружен jet-spin misalignment (**Poutanen et al., 2022, Science**)

HMXBs:

- **Обнаружена** переменная поляризация у объекта LS I +61 303 (**Kravtsov et al., 2020, A&A**)
- С помощью моделирования орбитальной переменности были **наложены ограничения** на орбитальные параметры
- У объекта Cyg X-1 была **обнаружена большая рентгеновская поляризация**, совпадающая по направлению с радио-джетом и вектором оптической поляризации (**Krawczynski et al., 2022, in press**)
- С помощью одновременных высокоточных поляризационных измерений в разных полушариях удалось покрыть всю орбиту Cyg X-1, что может помочь оценить орбитальные параметры и понять природу суперорбитальных модуляций (**Kravtsov et al., 2022, in prep**)

Спасибо за внимание!



sites.google.com/view/vakrav