

ITMO UNIVERSITY

Saint-Petersburg, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОИСК СПОСОБОВ УСТРАНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОЛЯРИМЕТРА БТА

Кукушкин Д.Е.(1,2), Сазоненко Д.А. (1,2), Бахолдин А.В.(1), Валявин Г.Г.(2)

1: Университет ИТМО, Россия

2: Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз,  
Россия

E-mail: [dekukushkin@corp.ifmo.ru](mailto:dekukushkin@corp.ifmo.ru)

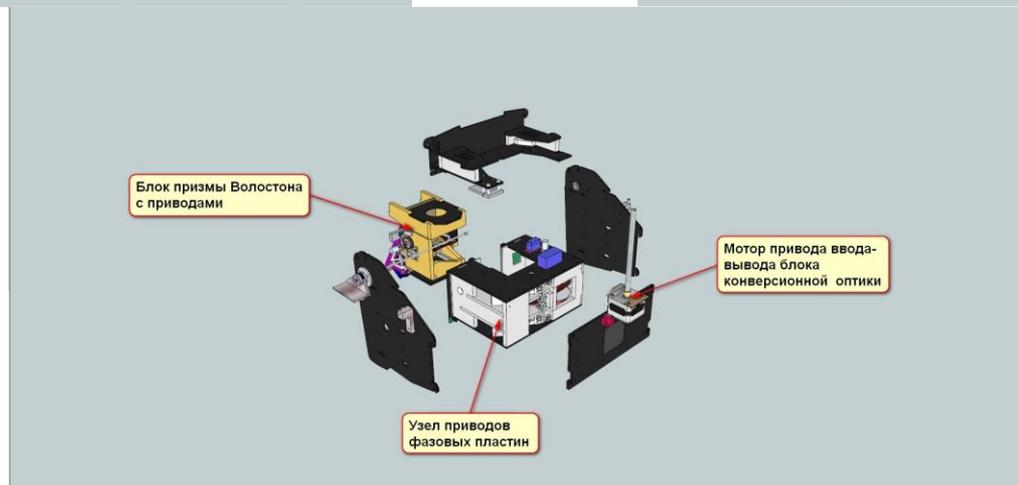
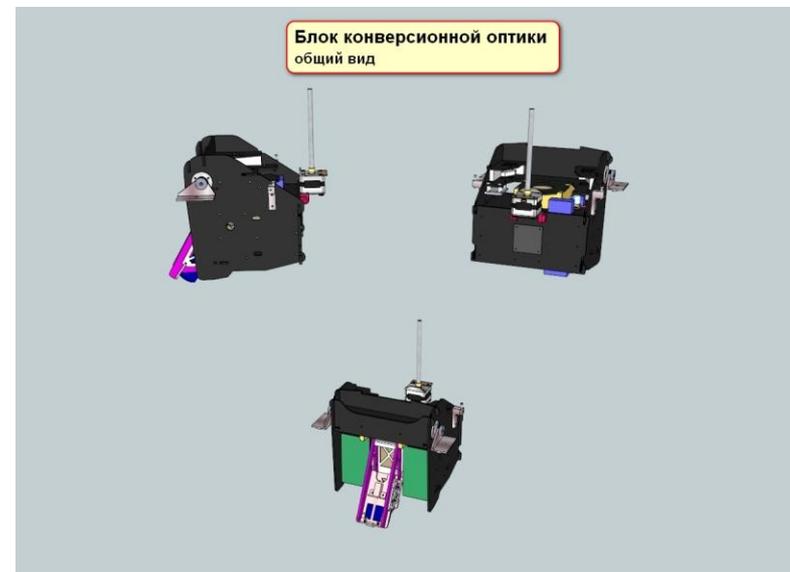
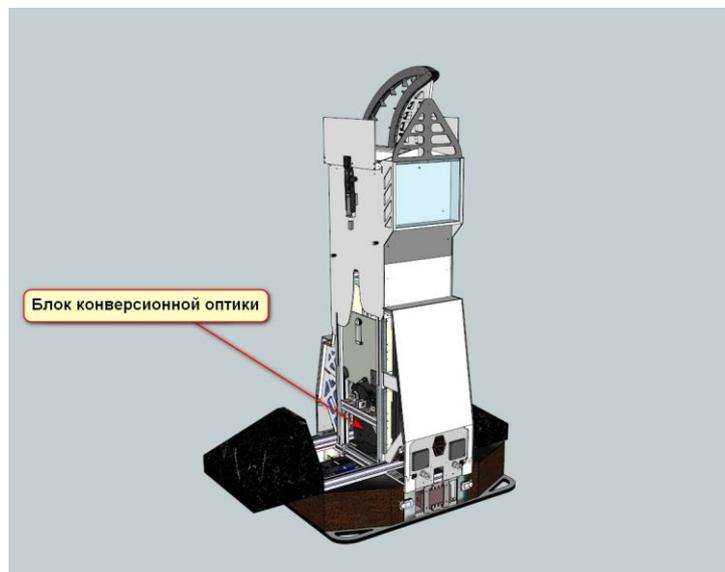
## 2. Цели и задачи проекта

**Цель работы:** исследование свойств и оценка инструментальной поляризации поляриметра БТА для дальнейшего её учета при работе в составе эшелле-спектрографа высокого спектрального разрешения

### Основные источники инструментальной поляризации:

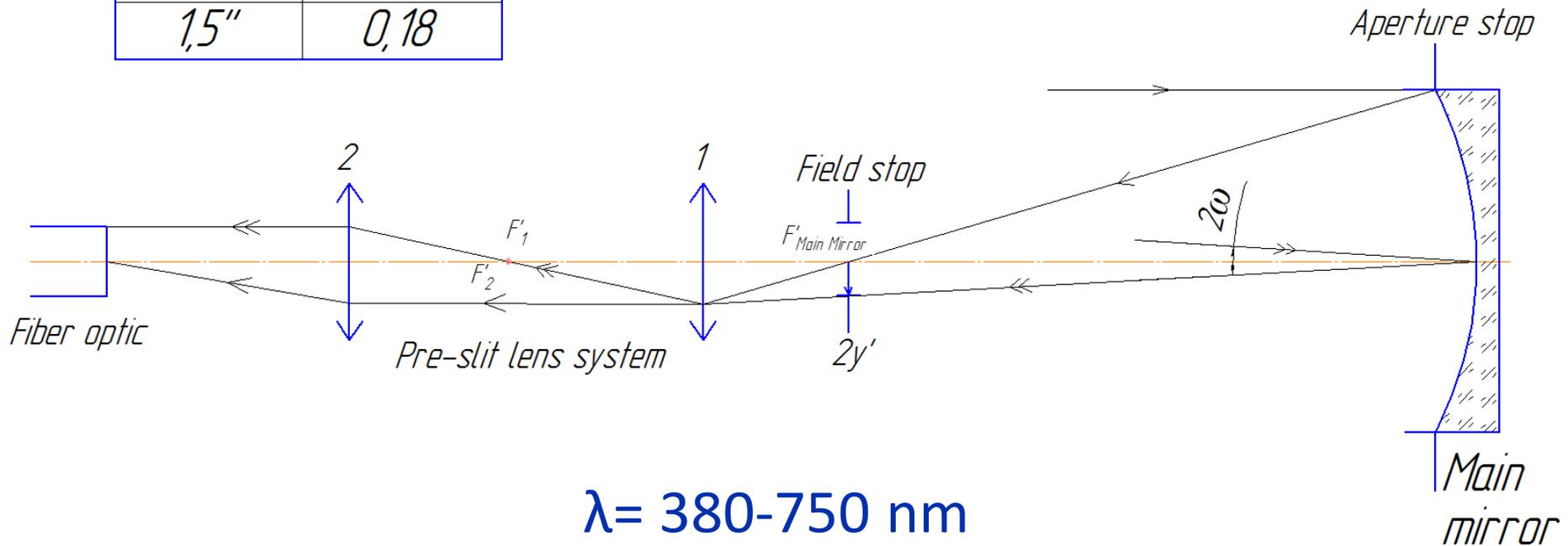
- ✓ Дефекты в покрытии главного зеркала БТА
- ✓ Эффекты двулучепреломления в стекле
- ✓ Остаточный хроматизм фазосдвигающих пластин
- ✓ Хроматизм призмы Волластона

### 3. Общий вид навесной части спектрографа

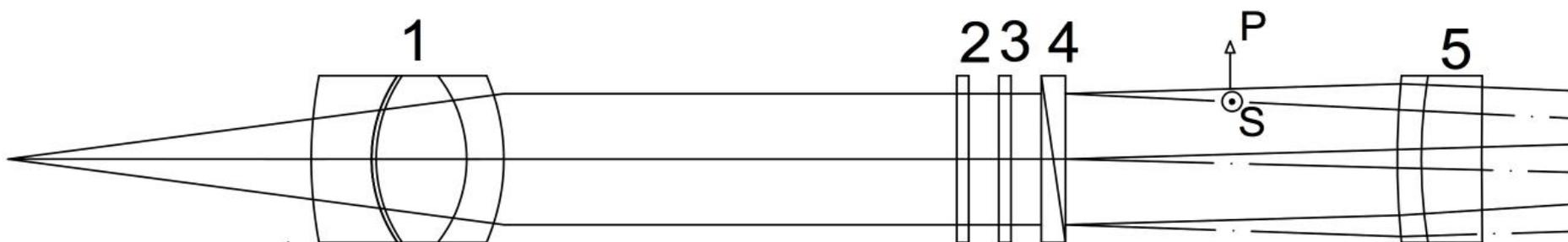


## 4. Оптическая схема поляризметрического модуля спектрографа

$2\omega$	$2y, \text{mm}$
8"	0,94
2"	0,23
1,5"	0,18



## 5. Поляриметрический модуль спектрографа



Оптическая схема поляризационного модуля.

1, 5 – объективы, 2 - полуволновая поляризационная пластинка, 3 – четвертьволновая поляризационная пластинка, 4 – поляризатор – призма Волластона.  $A' = 0,018$ ;  $A = 0,125$ ;  $\beta = -6,8^\times$

## 6. Описание поляриметрического модуля

Для описания состояния поляризации входящего излучения используется вектор Стокса. Вектор Стокса входящего излучения  $\mathbf{S} = [I, Q, U, V]$  и выходящего излучения  $\mathbf{S}' = [I', Q', U', V']$

$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}$ , где  $\mathbf{M}$  – матрица Мюллера

Матрица Мюллера поляризационного узла в общем виде определяется как:

$$\mathbf{M} = R(-\varphi_5) \cdot M_w \cdot R(\varphi_5) \cdot R(-\varphi_4) \cdot M_{\lambda/4} \cdot R(\varphi_4) \cdot R(-\varphi_3) \cdot M_{\lambda/2} \cdot R(\varphi_3) \cdot R(-\varphi_2) \cdot M_2 \cdot R(\varphi_2) \cdot R(-\varphi_1) \cdot M_1 \cdot R(\varphi_1) \quad (1)$$

Где  $M_1$  – матрица Мюллера главного зеркала,  $M_2$  – матрица линзовой части поляриметра,  $M_{\lambda/2}, M_{\lambda/4}$  – матрицы Мюллера полуволновой и четвертьволновой фазовых пластинок соответственно,  $M_w$  – матрица поляризатора (призмы Волластона),  $R(\varphi)$  – матрица поворота

## 7. Матрица Мюллера главного зеркала БТА

$J_{ps} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}$  – матрица Джонса отражающей поверхности

$$r_p = \frac{(N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} - N^2 \cos \theta}{(N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} + N^2 \cos \theta} \quad r_s = \frac{\cos \theta - (N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\cos \theta + (N^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}$$

где  $\theta$  – угол падения,  $\mathbf{N}$  – комплексный показатель преломления покрытия  
 $\mathbf{N} = \mathbf{n} - i\mathbf{k}$

$J = R(\varphi) \cdot J_{ps} \cdot R(-\varphi)$  – матрица Джонса для общей системы координат

$M = A(J \times J^*)A^{-1}$  – преобразование матрицы Джонса в матрицу Мюллера

$$\mathbf{N} = 0,82 - 5,99i \ (\lambda=546,7 \text{ нм}); \ \theta = 3,57633^\circ; \ \varphi_1=172,875, \ \varphi_2=175,236, \ \varphi_3=177,614$$

## 8. Матрица Мюллера главного зеркала БТА

После нахождения элементов матрицы  $r_p$  и  $r_s$  получаем:

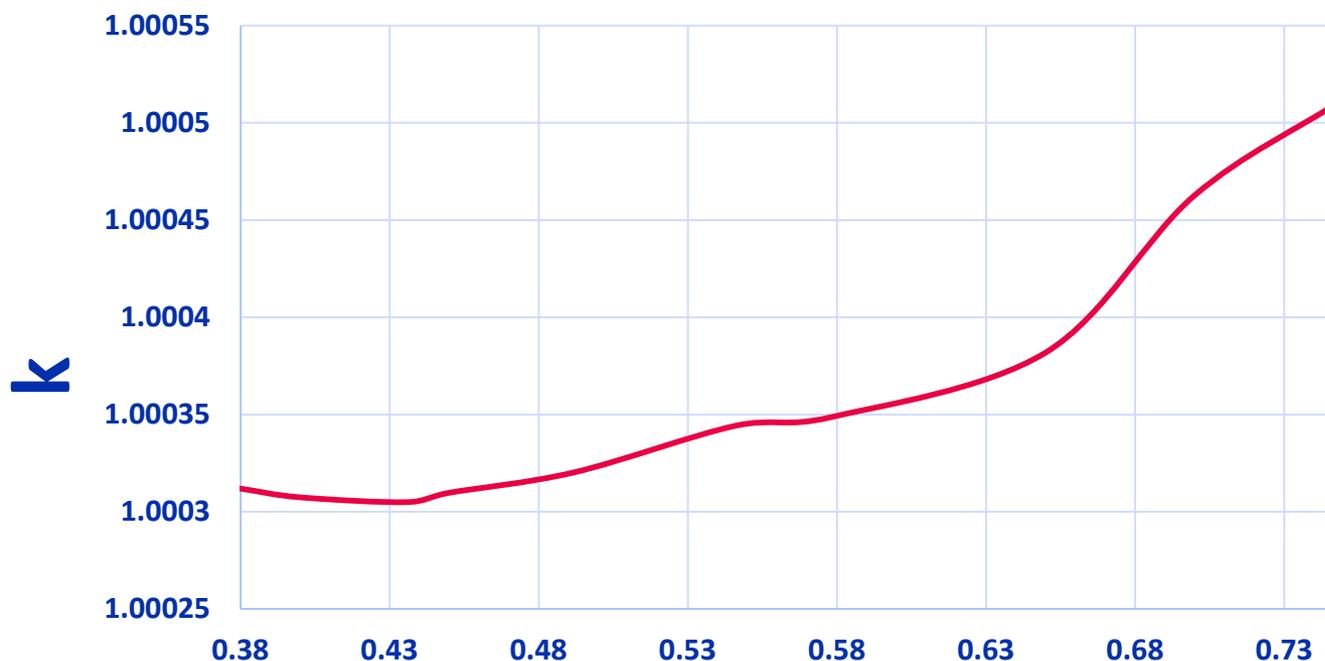
$$J_{ps} = \begin{bmatrix} -0,907 + 0,306i & 0 \\ 0 & -0,907 + 0,305i \end{bmatrix}$$

После определения угла поворота осей координат и нахождения усредненной матрицы Джонса находим матрицу Мюллера главного зеркала БТА

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0,91631 & -1,57688 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ -1,57688 \cdot 10^{-4} & 0,91631 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,72944 & 0,55456 \\ 0 & 0 & -0,55456 & 0,72944 \end{bmatrix}$$

( $\lambda=546,7$  нм);

## 9. Оценка коэффициента деполяризации



### Длина волны, мкм

Коэффициент деполяризации главного зеркала БТА покрытого алюминием в диапазоне длин волн 380 – 750 нм

$$k = \frac{2(m_{22} - m_{12})}{m_{11} + m_{21} + m_{12} + m_{22}}$$

## 10. Матрица Мюллера согласующей оптики поляриметрического модуля спектрографа

Матрица Мюллера, описывающая двулучепреломление в стекле, выглядит следующим образом:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\beta) + \sin^2(2\beta)\cos(\Delta) & \cos(2\beta)\sin(2\beta)(1 - \cos(\Delta)) & -\sin(2\beta)\sin(\Delta) \\ 0 & \cos(2\beta)\sin(2\beta)(1 - \cos(\Delta)) & \sin^2(2\beta) + \cos^2(2\beta)\cos(\Delta) & \cos(2\beta)\sin(\Delta) \\ 0 & \sin(2\beta)\sin(\Delta) & -\cos(2\beta)\sin(\Delta) & \cos(\Delta) \end{bmatrix}$$

где  $\beta$  — угол между падающим пучком и быстрой осью двулучепреломления в стекле,  $\Delta$  — сдвиг фазы, вносимый двулучепреломлением.

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,979 & 0,202 \\ 0 & 0 & -0,202 & 0,979 \end{bmatrix}$$

# 11. Оценка инструментальной поляризации вносимой ГЗ и конверсионной оптикой

Вектор Стокса падающего излучения  $\mathbf{S} = [1, 0, 0, 0]$

Для того чтобы найти вектор Стокса выходящего излучения  $\mathbf{S}'$  воспользуемся следующим выражением

$$\mathbf{S}' = R(-\varphi_2) \cdot M_2 \cdot R(\varphi_2) \cdot R(-\varphi_1) \cdot M_1 \cdot R(\varphi_1) \cdot \mathbf{S}, \quad (\varphi_2 = 0, \lambda = 546,7 \text{ нм})$$

В результате получаем:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} 0.916 \\ -1.577 \cdot 10^{-4} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\rho = \frac{[(Q'_1)^2 + (U'_2)^2 + (V'_3)^2]^{1/2}}{(I'_0)^2} = 1,721 \cdot 10^{-4}$$

$$\varphi = 0.5 \arctan \left( \frac{U'_2}{Q'_1} \right) = -4,93001 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.5 \arcsin \left[ \frac{V'_3}{[(Q'_1)^2 + (U'_2)^2 + (V'_3)^2]^{1/2}} \right] = 0$$

Учитывая влияние главного зеркала телескопа и линзовой части поляриметра можно оценить потери интенсивности света в обоих каналах после поляризатора:

$$S_1' = R(-\varphi_5) \cdot M_w \cdot R(\varphi_5) \cdot R(-\varphi_2) \cdot M_2 \cdot R(\varphi_2) \cdot R(-\varphi_1) \cdot M_1 \cdot R(\varphi_1) \cdot S,$$

где  $\varphi_5 = 45^\circ$ .

$$S_1' = \begin{bmatrix} 0.458 \\ -0.458 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

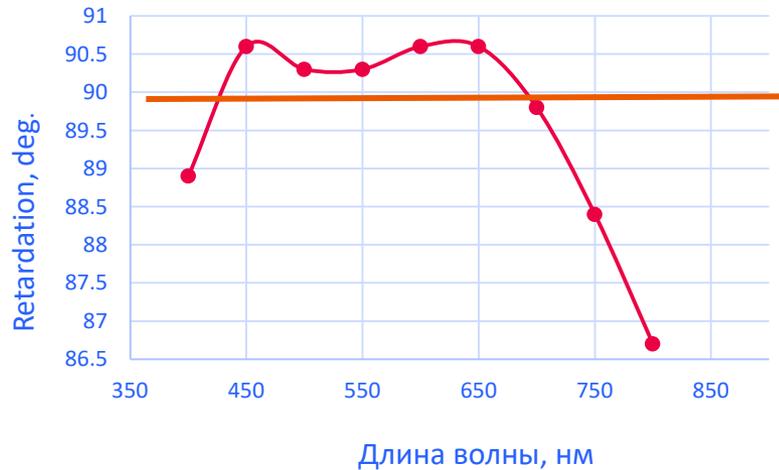
$$\lambda = 546,7 \text{ нм}$$

потеря интенсивности света  $\Delta I = 7,4 - 12,28\%$   
(без учета остальных источников потерь света)

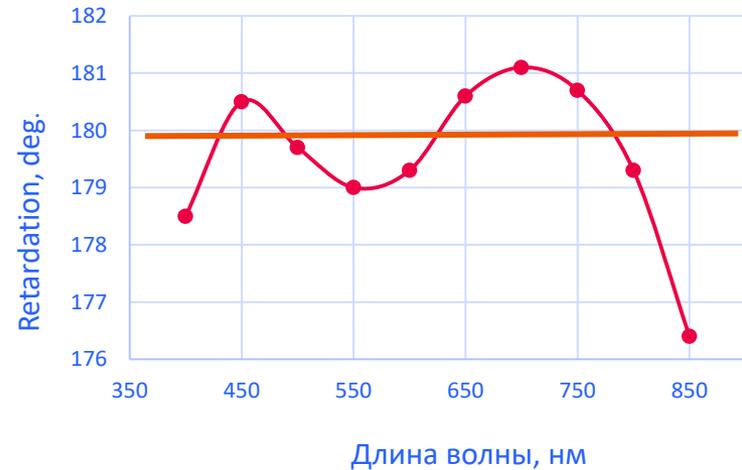


## 12. Ошибки фазосдвигающих пластин

Ошибки вносимые  $\lambda/2$  пластинкой



Ошибки вносимые  $\lambda/4$  пластинкой



$$M_{\Pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\sigma & \sin\sigma \\ 0 & 0 & -\sin\sigma & \cos\sigma \end{bmatrix}$$

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ 0 & -\sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\sigma$  – сдвиг фазы,  $\varphi$  – угол ориентации быстрой оси, в градусах

$$M_{\text{ф.п.}} = R(-\varphi) \times M_{\Pi} \times R(\varphi).$$

## 12. Ошибки фазосдвигающих пластин

Полуволновая пластинка  $\varphi = 22,5^\circ$ ,  
 $\sigma = 178,5^\circ$ ; четвертьволновая пластинка  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\sigma = 88,9^\circ$   $\lambda=400$  нм.

$$M(\lambda/2)_{400} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,713 \times 10^{-4} & 1 & -0,019 \\ 0 & 1 & 1,713 \times 10^{-4} & 0,019 \\ 0 & 0,019 & -0,019 & -1 \end{bmatrix} \quad M(\lambda/4)_{400} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,019 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,019 \end{bmatrix}$$

Матрица Мюллера поляризационного узла заданных положениях элементов:

$$M_{pol} = R(-45^\circ) \cdot M_w \cdot R(45^\circ) \cdot R(-45^\circ) \cdot M_{\lambda/4} \cdot R(45^\circ) \cdot R(-22,5^\circ) \cdot M_{\lambda/2} \cdot R(22,5^\circ)$$

$$M_{pol(400)} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 8,565 \times 10^{-5} & 9,5 \times 10^{-3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 8,565 \times 10^{-5} & 9,5 \times 10^{-3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 13. Способы минимизации инструментальной поляризации

- ✓ Учет ошибок вносимых ГЗ БТА, конверсионной оптикой и фазосдвигающими пластинами
- ✓ Калибровка поляриметра с учетом деполяризации вносимой атмосферой и ошибок, связанных с неодновременностью регистрации обыкновенного и необыкновенного лучей ПЗС матрицей
- ✓ Для повышения точности измерений количество измерений удваивается в сравнении с минимально необходимым.

## 14. Заключение

- ✓ Произведена предварительная оценка влияния инструментальной поляризации на результаты измерения поляризационного модуля

Ошибка, вносимая главным зеркалом БТА и согласующей оптикой

$$F(Q) = 1.577 \cdot 10^{-4};$$

Фазовые пластинки вносят соизмеримую ошибку:

$$F(V) = 0,0002 - 0,0004; F(Q, U) = 0,0002 - 0,0012$$

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00043, программа «Экзопланеты»).



ITMO UNIVERSITY

**Спасибо за внимание!**

[dekukushkin@corp.ifmo.ru](mailto:dekukushkin@corp.ifmo.ru)

Saint-Petersburg, 2018