

Спектрополяриметрические наблюдения активных ядер галактик на БТА-6м

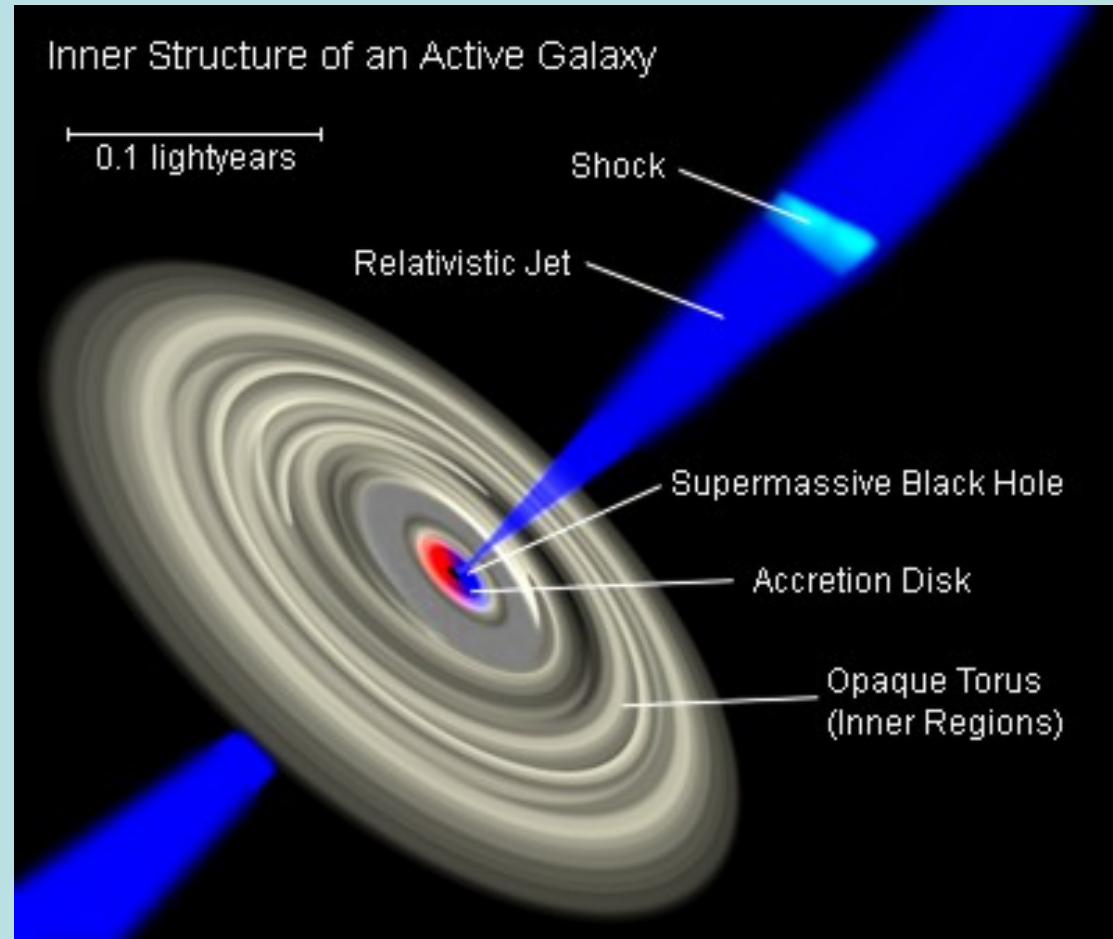
С.Д. Булига¹, В.Л. Афанасьев², Н.В. Борисов², Ю.Н. Гнедин¹, М.Ю.
Пиотрович¹, Т.М. Нацвлишвили¹.

¹) Учреждение Российской академии наук Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия.

²) Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия.

Возможные механизмы поляризации излучения в активных ядрах галактик

- синхротронное излучение в джетах;
- рассеяние на пыли в газопылевом торе;
- перенос излучения в аккреционном диске и деполяризация фарадеевским вращением в магнитном поле;
- поляризация излучения в поле вращающейся чёрной дыры.



Наблюдательные задачи в оптическом диапазоне

- Исследование переменности поляризации (джеты, неоднородность BLR, неустойчивости в аккреционном диске)
- Исследование зависимости величины поляризации и позиционного угла плоскости поляризации от длины волны (оценки магнитного поля в аккреционном диске)

Наблюдения на БТА. Постановка задачи

- Физические условия в аккреционных дисках вблизи сверхмассивной чёрной дыры не позволяют применять методы прямого измерения магнитных полей
- Величину магнитного поля в замагниченном аккреционном диске можно оценить на основе учёта фарадеевского вращения на длине свободного пробега, что приводит к зависимости степени поляризации в континууме от длины волны (Гнедин и Силантьев, 1997)
- Измерение поляризации в видимом спектральном диапазоне в континууме QSO или Sy1, у которых эффектами рассеяния в газовой-пылевом торе можно пренебречь
- Сравнение полученных оценок напряжённости магнитного поля вблизи горизонта событий с различными моделями

Наблюдения на БТА. Метод.



Универсальный спектрограф SCORPIO

в режиме спектрополяриметрии

Светоприёмник – матрица ПЗС EFV42-40 формата 2048x2048 пикселей с размером пиксела 13.5x13.5 мкм

Диспергирующий элемент – объёмная голографическая фазовая решётка VPH550g, работающая в диапазоне 3500-7200Å

Анализатор поляризации – поворачиваемая на фиксированные углы α (0° или 45°) пластина Савара,

$$U = \frac{I_0(\lambda)R(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_0(\lambda)R(\lambda) + I_e(\lambda)} = P \cos(\varphi - \varphi_0), \alpha = 0^\circ$$

$$Q = \frac{I_0(\lambda) - I_e(\lambda)R(\lambda)}{I_0(\lambda) + I_e(\lambda)R(\lambda)} = P \cos(\varphi - \varphi_0), \alpha = 45^\circ$$

$$P = \sqrt{U^2 + Q^2}, \varphi = \arctan(U/Q) + const$$

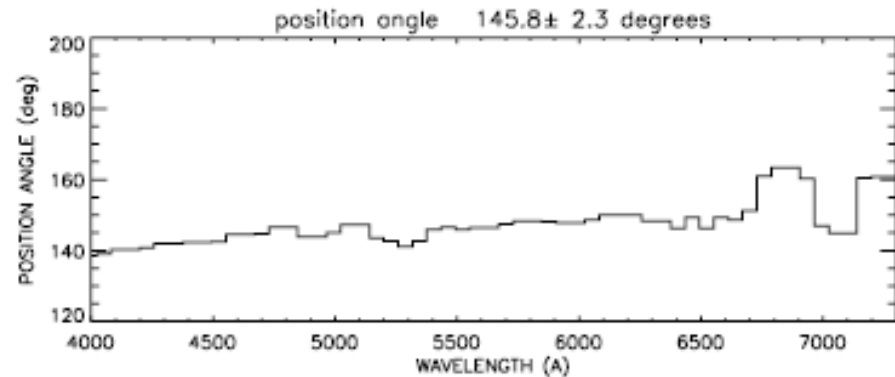
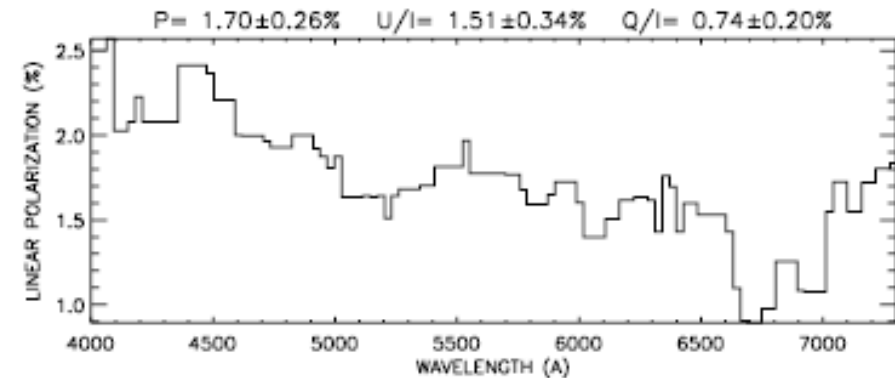
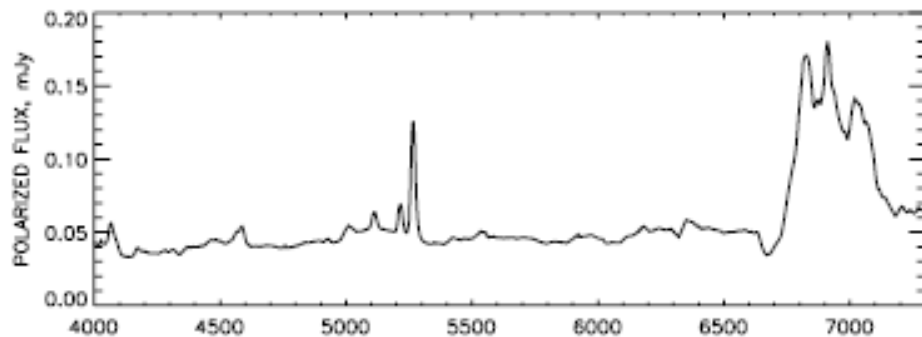
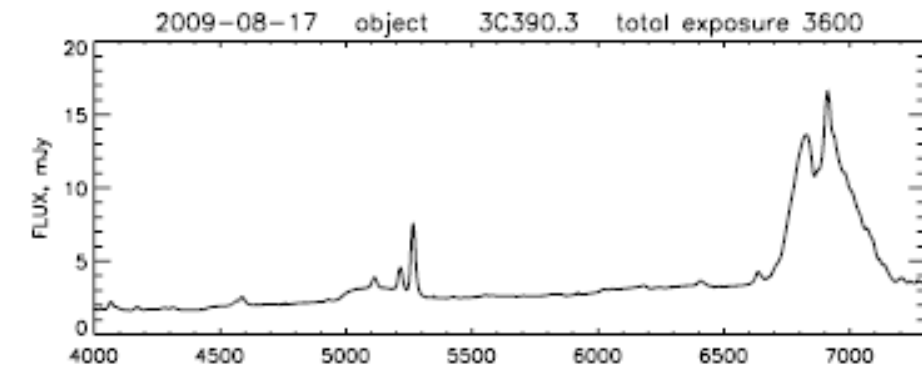
Калибровки: плоское поле, спектр сравнения, стандарты поляризации

Наблюдения на БТА. Выборка объектов

- Близкие QSO или звездообразные Sy1 с $z < 0.5$
- Объекты с большой галактической широтой
- Слабое радиоизлучение и отсутствие мощных джетов
- Надёжные оценки масс центральных чёрных дыр
- Измеренные светимости аккреционных дисков и ширин водородных линий

Наблюдения на БТА выборки AGN проводились осенью 2008 и 2009 гг. по наблюдательной программе «Спектрополяриметрия активных ядер галактик» (заявитель Т.М. Нацвлишвили) в течение 6 ночей

Результаты наблюдений на БТА-6м



Поляризационные измерения 3C390.3

Таблица 1: Результаты наблюдений.

Объект	m_v	z	Тип	Дата	T_{exp}, s	$P_v(\%)$	$PA(^\circ)$	n
PG 0007+106	15.2	0.089	Sy1	30.11.08	3000	1.02 ± 0.38	83	0.15 ± 0.25
PG 0026+129	15.3	0.142	QSO	30.11.08	3000	1.07 ± 0.28	99	-0.45 ± 0.33
PG 0049+171	16.1	0.064	Sy1.5	24.09.09	2160	1.42 ± 0.31	247	-0.28 ± 0.18
PG 0157+001	15.7	0.163	Sy1.5	01.12.08	3000	0.78 ± 0.28	17	-0.52 ± 0.28
PG 0804+761	14.7	0.100	QSO	02.12.08	3000	1.00 ± 0.38	83	0.24 ± 0.38
PG 0844+349	14.5	0.064	Sy1	29.11.08	3000	0.85 ± 0.10	243	-1.17 ± 0.17
PG 0953+414	15.3	0.234	QSO	03.12.08	3000	0.39 ± 0.12	317	0.11 ± 0.13
PG 1022+519	15.8	0.045	Sy1	30.11.08	3000	0.83 ± 0.30	259	-2.37 ± 0.45
PG 1116+215	14.4	0.177	QSO	29.11.08	3000	0.57 ± 0.12	193	-1.26 ± 0.13
PG 2112+059	15.9	0.466	QSO	29.11.08	3000	1.04 ± 0.21	258	0.45 ± 0.17
				18.08.09	3600	1.08 ± 0.20	243	0.35 ± 0.10
PG 2130+099	14.7	0.063	Sy1	30.11.08	3000	0.62 ± 0.15	53	-0.05 ± 0.32
PG 2209+184	15.9	0.070	Sy1	24.09.08	3600	0.83 ± 0.29	200	-0.75 ± 0.21
PG 2214+139	15.1	0.066	Sy1	28.11.08	3000	1.58 ± 0.18	323	-0.69 ± 0.15
PG 2233+134	16.3	0.326	QSO	29.11.08	3000	0.67 ± 0.23	253	0.28 ± 0.28
3C 390.3	15.2	0.056	Sy1	29.11.08	3000	2.09 ± 0.22	140	-0.57 ± 0.22
				17.08.09	3600	1.58 ± 0.18	146	-0.64 ± 0.07
				24.09.09	3600	1.80 ± 0.24	144	-0.58 ± 0.06

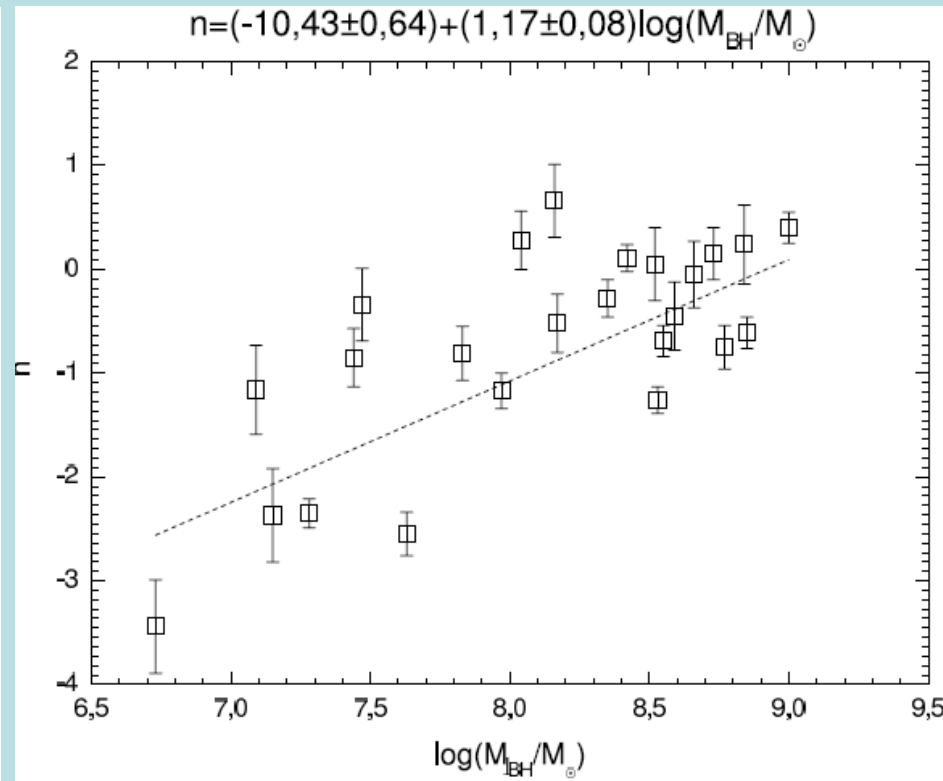
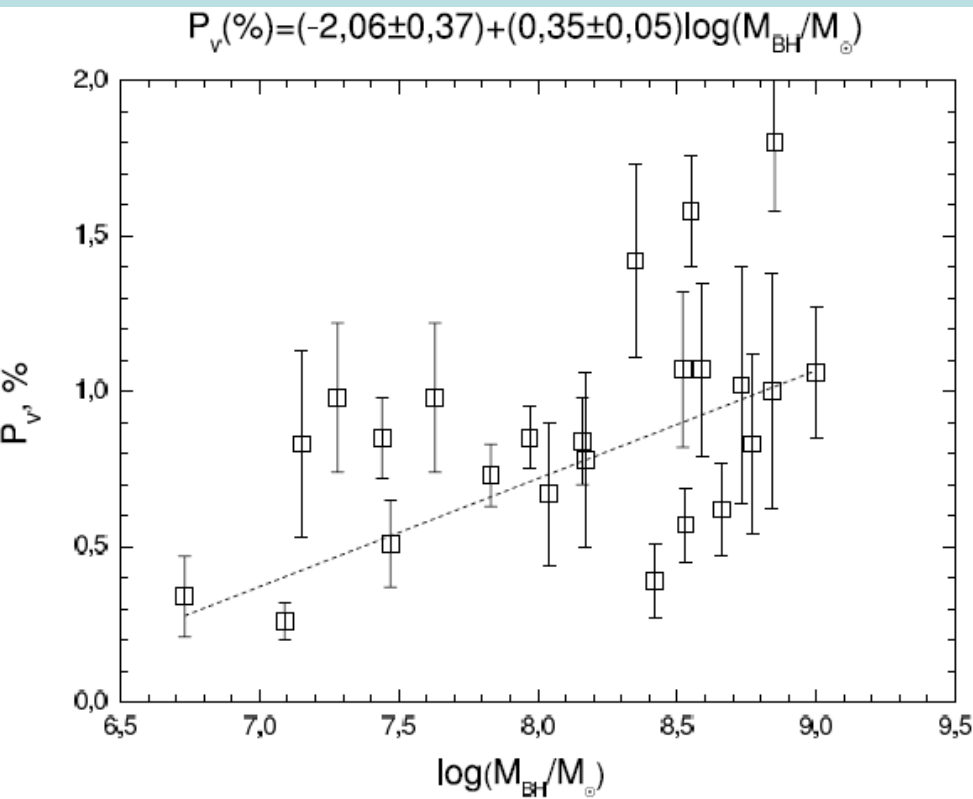
Таблица 2: Массы центральных черных дыр и поляризация в континууме

Объект	Тип	$\log \lambda L_\lambda$ [erg/s] (opt.)	$\log \frac{M_{BH}}{M_\odot}$	Ссылка	P_V [%]	n	Ссылка
PG 0007+106	Sy1	44.82	$8.73^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.02 ± 0.38	0.15 ± 0.25	1
PG 0026+129	QSO	45.02	$8.59^{+0.07}_{-0.12}$	7	1.07 ± 0.28	-0.45 ± 0.33	1
PG 0049+171	Sy1.5	44.00	$8.35^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.42 ± 0.31	-0.28 ± 0.18	1
PG 0157+001	Sy1.5	44.98	$8.17^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.78 ± 0.28	-0.52 ± 0.28	1
PG 0804+761	QSO	44.94	$8.84^{+0.05}_{-0.06}$	7	1.00 ± 0.38	0.24 ± 0.38	1
PG 0844+349	Sy1	44.35	$7.97^{+0.15}_{-0.23}$	7	0.85 ± 0.10	-1.17 ± 0.17	1
PG 0953+414	QSO	45.40	$8.42^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.39 ± 0.12	0.11 ± 0.13	1
PG 1022+519	Sy1	43.70	$7.15^{+0.09}_{-0.11}$	6	0.83 ± 0.30	-2.37 ± 0.45	1
PG 1116+215	QSO	45.40	$8.53^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.57 ± 0.12	-1.26 ± 0.13	1
PG 2112+059	QSO	46.18	$9.00^{+0.09}_{-0.11}$	6	1.06 ± 0.21	0.40 ± 0.15	1
PG 2130+099	Sy1	44.46	$8.66^{+0.05}_{-0.06}$	7	0.62 ± 0.15	-0.05 ± 0.32	1
PG 2209+184	Sy1	44.47	$8.77^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.83 ± 0.29	-0.75 ± 0.21	1
PG 2214+139	Sy1	44.66	$8.55^{+0.09}_{-0.12}$	6	1.58 ± 0.18	-0.69 ± 0.15	1
PG 2233+134	QSO	45.33	$8.04^{+0.08}_{-0.10}$	6	0.67 ± 0.23	0.28 ± 0.28	1
3C 390.3	Sy1	43.99	$8.85^{+0.09}_{-0.11}$	6	1.80 ± 0.22	-0.61 ± 0.15	1
I Zw 1	Sy1	44.80	$7.44^{+0.09}_{-0.12}$	6	0.85 ± 0.13	-0.85 ± 0.28	2
Mrk 509	Sy1	44.28	$8.16^{+0.04}_{-0.04}$	7	0.84 ± 0.14	0.66 ± 0.35	2
Mrk 573	Sy1	44.40	$7.28^{+0.08}_{-0.10}$	8	0.98 ± 0.24	-2.35 ± 0.14	3
Mrk 841	Sy1.5	44.29	$8.52^{+0.08}_{-0.10}$	6	1.07 ± 0.25	0.05 ± 0.35	2
NGC 3227	Sy1.5	42.38	$7.63^{+1.1}_{-1.9}$	7	0.98 ± 0.24	-2.55 ± 0.21	4,9
NGC 3783	Sy1	43.26	$7.47^{+0.07}_{-0.09}$	7	0.51 ± 0.14	-0.34 ± 0.35	2
NGC 4593	Sy1	43.09	$6.73^{+0.03}_{-0.09}$	7	0.34 ± 0.13	-3.44 ± 0.45	2,9
NGC 5548	Sy1	43.51	$7.83^{+0.02}_{-0.02}$	7	0.73 ± 0.10	-0.81 ± 0.26	5,9
NGC 7469	Sy1	43.72	$7.09^{+0.05}_{-0.05}$	7	0.26 ± 0.06	-1.16 ± 0.43	2

(1) Данная статья; (2) Смит и др., 2002; (3) Нагао и др., 2004; (4) Аксон и др., 2008;

(5) Гудрич и Миллер, 1994; (6) Вестергаард и Петерсон, 2006; (7) Петерсон и др., 2004;

(8) Сатяпал и др., 2005; (9) Ву и Хан, 2001.



Зависимость линейной поляризации и индекса n степенной зависимости от масс чёрных дыр.

Согласно работе Силантьев и др. (2009) интегральная поляризация от диска описывается сравнительно простыми выражениями:

$$p(\mu, B) = \frac{p(\mu)}{\left[(1+C)^4 + 2(1+C)^2(a^2 + b^2) + (a^2 - b^2)^2 \right]^{\frac{1}{4}}}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} 2\chi = \frac{2(1+C)a}{(p(\mu)/p(\mu, B))^2 + (1+C)^2 + b^2 - a^2}. \quad (2)$$

$p(\mu)$ - степень поляризации выходящего излучения из диска в отсутствии магнитного поля, $\mu = \cos i$ - косинус угла наклона аккреционного диска, $B = B_{\parallel} + B_{\perp}$ - магнитное поле внутри диска, поле B_{\parallel} - направлено параллельно нормали N к диску, а $B_{\perp} = \sqrt{B_p^2 + B_{\varphi}^2}$ - величина магнитного поля, направленного перпендикулярно к нормали N . Параметры a и b описывают фарадеевскую деполяризацию излучения:

$$a = 0.8\lambda^2 B_{\parallel} \mu \equiv \delta_{\parallel} \mu, \quad b = 0.8\lambda^2 B_{\perp} \sqrt{1 - \mu^2} \equiv \delta_{\perp} \sqrt{1 - \mu^2}$$

Физически параметр $\delta = 0.8\lambda^2 B$ равен углу поворота плоскости поляризации на томсоновской оптической длине $\tau = 2$, если магнитное поле направлено вдоль луча зрения n . Позиционный угол $\chi = 0$ соответствует колебаниям электрического вектора волны в плоскости перпендикулярной плоскости (nN) , т.е. параллельно плоскости диска.

Параметр C возникает в турбулентной замагниченной плазме (Силантьев, 2005) и характеризует новый эффект – дополнительную экстинкцию параметров Стокса Q и U вследствие некогерентного фарадеевского вращения плоскостей поляризации на мелкомасштабных турбулентных вихрях:

$$C \approx 0.64\tau\lambda^4 \langle B'^2 \rangle f_B / 3, \quad (3)$$

где τ - томсоновская оптическая толщина турбулентного вихря, $\langle B'^2 \rangle$ - среднее значение флуктуаций магнитного поля, $f_B \approx 1$ - параметр, интегрально описывающий корреляцию значений B' в двух близких точках атмосферы.

Зависимость степени поляризации от длины волны
электромагнитного излучения:

$$P_l \sim \frac{P_l(0, \mu)}{B_{z,\perp} \lambda^2} \sim \lambda^{\left(\frac{s}{p}-2\right)}$$

$\mu = \cos i$, i - угол наклона аккреционного диска.

B_z - проекция глобального магнитного поля аккреционного
диска вдоль нормали к поверхности диска

B_{\perp} - магнитное поле внутри диска

p - радиальная зависимость температуры аккреционного диска

s - степенной показатель радиальной зависимости величины
магнитного поля в аккреционном диске

Спектральное распределение излучения стандартного
аккреционного диска:

$$F_{\nu} \sim \nu^{3-\frac{2}{p}}$$

Объект	p	s	$B(R_\lambda)[\text{rc}]$	$B_H[\text{Гс}]$	k
PG 0007+106	1/2	1	2.43	1.48×10^3	10^{-2}
PG 0026+129	3/4	5/4	1	270	10^{-5}
PG 0049+171	3/4	5/4	13	720	3.5×10^{-4}
PG 0157+001	3/4	5/4	98	5.9×10^3	0.08
PG 0804+761	3/4	3/2	3.4	400	10^{-3}
PG 0844+349	3/4	1	37	2.8×10^3	2×10^{-3}
PG 0953+414	3/4	1	300	3×10^4	0.5
PG 1116+215	3/4	3/4	100	2.2×10^3	2.5×10^{-3}
PG 2112+059	3/4	2	14.4	7.8×10^3	0.1
PG 2130+099	1/2	1	27	7×10^4	1
PG 2209+184	1/2	3/4	16	1.6×10^3	4×10^{-2}
PG 2214+139	1/2	5/4	2.8	1.8×10^4	1
PG 2233+134	3/4	3/2	0.37	1.3×10^3	1.4×10^{-4}
3C 390.3	3/4	1	6.4	64	4×10^{-4}

Физические параметры аккреционного диска, полученные из данных спектрополяриметрических наблюдений на БТА-6м (SCORPIO) и спектрополяриметрических данных, опубликованных в литературе в рамках модели “magnetic coupling”.

Объект	p	s	$B(R_\lambda)[\text{Гс}]$	$B_H[\text{Гс}]$	k
I Zw 1	1/2	1	11	4×10^3	4×10^{-4}
Mrk 509	1/2	3/4	4.8	2.8×10^4	1.0
Mrk 841	1/2	1	3.0	1.7×10^3	2×10^{-2}
NGC 3227	3/4	1	15.7	10^3	3×10^{-3}
NGC 3783	3/4	1.5	41	5.2×10^4	1.0
NGC 5548	3/4	1	7.6	650	10^{-3}
NGC 7469	3/4	1	100	10^3	10^{-2}

Величины магнитных полей и параметры аккреционного диска для некоторых центральных чёрных дыр в рамках модели “magnetic coupling”.

Выводы

- В ходе работы были впервые выполнены детальные спектрополяриметрические наблюдения активных галактических ядер и квазаров.
- Полученные зависимости степени поляризации и позиционного угла от длины волны излучения были сопоставлены с результатами теоретических расчетов, выполненных на основе теории многократного рассеяния с учетом поворота плоскости поляризации в процессе электронного рассеяния.
- В результате, в рамках традиционных моделей аккреционного диска определены величины магнитных полей вблизи горизонта событий сверхмассивной черной дыры.

Спасибо за внимание!

