UNIVERSITY OF AMSTERDAM

UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Mapping the ionised gas in active galactic nuclei with spectral-timing and spectroscopy

Juráňová, A.

Publication date
2024

Link to publication

Citation for published version (APA):
Juráňová, A. (2024). *Mapping the ionised gas in active galactic nuclei with spectral-timing and spectroscopy*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam].

General rights
It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations
If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: https://uba.uva.nl/en/contact, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

UvA-DARE is a service provided by the library of the University of Amsterdam (https://dare.uva.nl)

Download date:21 Jan 2026

Chapter

Appendix of Chapter 4

I.1 X-ray line equivalent widths

In Fig. I.1, we show the predictions for line emission for the baseline model grid (see Sect. 4.3.2), displayed as a function of hydrogen particle density of the gas and the ionising photon flux. The contour plots are presented for the well-detected X-ray lines in the Mrk 110 RGS spectrum and the two brightest UV lines, Ly α and C IV, for comparison. For a detailed discussion of the predictions for the UV and optical lines, we refer the reader to Korista et al. (1997), where the aspects of the modelled emission are examined for a range of physical conditions. The plot also shows the limits (introduced in Sect. 4.3.2) placed on the cloud minimal and maximal ionisation and the maximal outer radius of the broad line region, which is applied to the line-luminosity fitting.

I.2 Reconstruction of the Mrk 110 SED vs. intrinsic extinction

In Fig. I.2, we give the SED shapes recovered using different amounts of extinction corrections applied to the continuum data points from the STIS and COS observations. In none of the models does the disc black-body contribute noticeably to the X-ray soft excess, which is dominated by the Comptonisation component with a fixed normalisation and the electron temperature. Assuming the black-hole mass of $2 \times 10^7\, M_\odot$, the Eddington ratio $L_{\rm bol}/L_{\rm Edd}$ corresponding to the displayed SEDs ranges from 0.28 for $E(B-V) = 0.01$ to 0.77 for the most luminous case, with $E(B-V) = 0.07$. For the baseline SED, $L_{\rm bol}/L_{\rm Edd} \approx 0.31$.

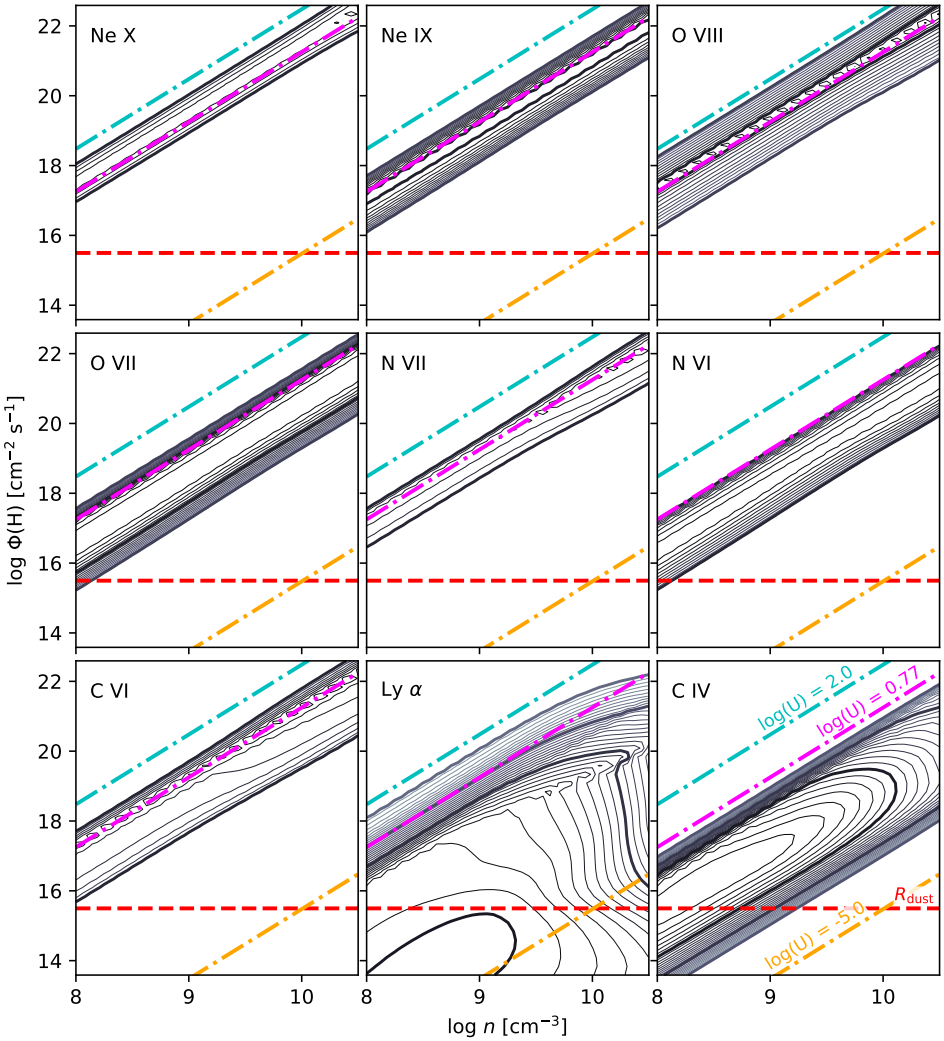

Figure I.1: Predicted line emission of the X-ray lines well-detected in Mrk 110, C IV, and Ly α, plotted as a function of the hydrogen-ionising photon flux and the gas density. The contours present the logarithmic line equivalent widths, referenced to the incident continuum at 1216 Å and unity covering fraction. The contours plotted as thick solid lines correspond to 1 dex steps, starting with the smallest visualised value of 1 Å. The thin lines, separated with steps of 0.1 dex, provide further details of the inwards increase in the emission within the typically rather narrow portions of the parameter space. The coloured lines are defined in the bottom-right box and are explained in Sect. 4.3.2.

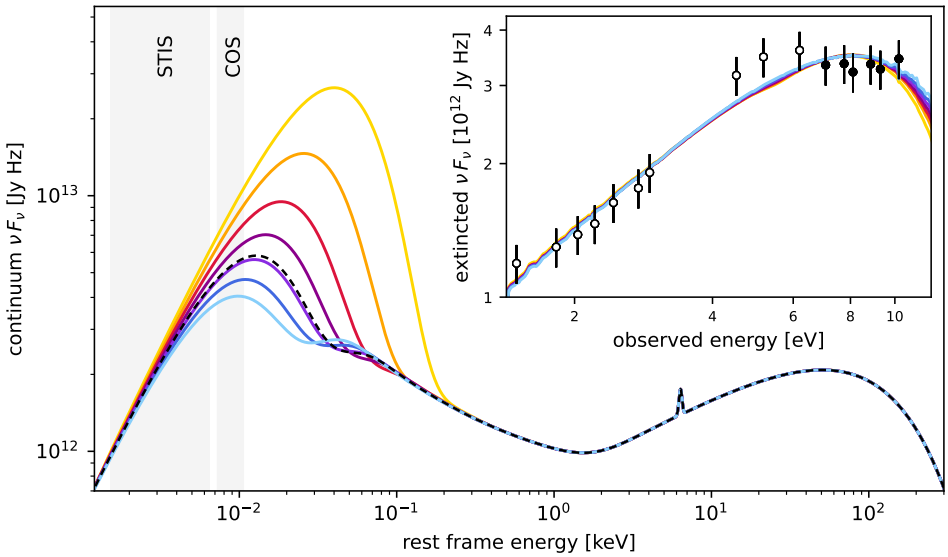

Figure I.2: Extinction-dependent estimates of the Mrk 110 SED. Inset: UV and optical continuum points extracted from the HST COS (full symbols) and STIS (empty symbols) Galactic extinction-corrected spectra, fitted with the SED model discussed in Sect. 4.3.3.2. Each of the solid lines represents a model with different $E(B-V)$ of extinction intrinsic to the host object, ranging from 0.01 (light blue) to 0.07 (yellow). Main panel: BLR-ionising radiation SEDs resulting from these fits, varying by the temperature and normalisation of the disc black body component. Energy bands covered by the COS and STIS data points are highlighted. The black dashed line represents the baseline SED with the disc black body temperature of $kT = 10$ eV and $E(B-V) = 0.032 \pm 0.001$.

I

Chapter II

Appendix of Chapter 5

Table II.1: Emission line components properties derived from the 2015 COS spectrum of I Zw 1.

Feature	λ_0 (Å)	Flux 10^{14}erg cm^{-2} s^{-1}	$v_{\rm cen}$ km s^{-1}	FWHM$_{\rm b}$ km s^{-1}	$\gamma^{(a)}$
P V	1117.98	0.6 ± 0.1	-2390 ± 40	800 ± 100	1.0
P V	1117.98	6.7 ± 0.2	-630 ± 20	2100 ± 100	0.53 ± 0.05
P V	1128.01	10.3 ± 0.1	-630 ± 20	2370 ± 80	0.50 ± 0.03
C III*	1175.74	3.84 ± 0.08	-500 ± 20	1430 ± 40	0.67 ± 0.04
Si II	1190.42	2.9 ± 0.2	-500 ± 20	1090 ± 50	1.0
Si II	1193.29	0.9 ± 0.1	-250 ± 10	460 ± 50	1.0
Si II	1194.50	0.9 ± 0.1	-250 ± 10	460 ± 50	1.0
Si II	1197.39	0.5 ± 0.2	-250 ± 10	460 ± 50	1.0
unknown	1273.40$^{(b)}$	4.8 ± 0.9	$\cdots$	1300 ± 200	1.0
Si III	1206.50	11 ± 2	-200 ± 100	1050 ± 60	1.0
Ly α	1215.67	32 ± 3	-390 ± 20	680 ± 50	1.0
Ly α	1215.67	76 ± 6	-600 ± 100	2400 ± 200	0.7 ± 0.1
Ly α	1215.67	49 ± 7	-150 ± 20	1700 ± 100	0.27 ± 0.02
Ly α	1215.67	123 ± 8	200 ± 100	9200 ± 400	0.9 ± 0.1
N V	1238.82	9.5 ± 0.9	-1100 ± 20	2300 ± 400	1.0
N V	1242.80	9.5 ± 0.9	-1100 ± 20	2300 ± 400	1.0
N V$^{(c)}$	1240.80	49 ± 7	-400 ± 40	4200 ± 100	0.31 ± 0.03
S II	1250.58	2.0 ± 0.2	-270 ± 20	1400 ± 300	0.4 ± 0.1
S II	1253.81	2.3 ± 0.4	-260 ± 20	1400 ± 300	0.4 ± 0.1
Si II	1260.42	4.3 ± 0.3	-330 ± 20	940 ± 70	0.9 ± 0.1
Si II*	1264.73	4.7 ± 0.3	-300 ± 20	910 ± 60	0.85 ± 0.07
unknown	1372.85$^{(b)}$	1.6 ± 0.1	$\cdots$	930 ± 70	1.0
unknown	1378.25$^{(b)}$	1.9 ± 0.4	$\cdots$	800 ± 100	1.0
O I	1302.17	3.7 ± 0.4	-149 ± 8	500 ± 30	1.0

Table II.1: continued.

Feature	λ_0 (Å)	Flux 10^{14}erg cm^{-2} s^{-1}	$v_{\rm cen}$ km s^{-1}	FWHM$_{\rm b}$ km s^{-1}	$\gamma^{(a)}$
Si II + O I	1304.86	3.2 ± 0.2	-203 ± 9	400 ± 20	1.0
O I	1306.03	2.3 ± 0.2	-149 ± 8	370 ± 20	1.0
O I	1309.28	2.34 ± 0.08	-190 ± 10	690 ± 30	1.0
C II + C II	1335.12	2.2 ± 0.2	-294 ± 8	620 ± 30	1.0
C II + C II	1335.12	4.6 ± 0.2	-670 ± 20	1330 ± 30	1.0
P III*	1344.33	1.48 ± 0.05	-190 ± 30	910 ± 60	0.60 ± 0.09
Si IV + O IV]	1402.77	7 ± 1	-590 ± 70	2100 ± 300	1.0
Si IV + O IV]	1393.76	9 ± 2	-510 ± 40	2630 ± 60	0.37 ± 0.05
Si IV + O IV]	1402.77	13 ± 2	-600 ± 30	3200 ± 700	0.33 ± 0.09
Si II	1526.71	2.5 ± 0.2	-230 ± 30	1070 ± 60	1.0
Si II*	1533.45	4.5 ± 0.9	-230 ± 40	1070 ± 60	1.0
C IV	1548.19	9.5 ± 0.4	-380 ± 20	900 ± 30	1.0
C IV	1550.77	9.5 ± 0.4	-380 ± 20	900 ± 30	1.0
C IV	1548.19	15.7 ± 0.5	-1180 ± 50	2700 ± 100	0.31 ± 0.06
C IV	1550.77	15.7 ± 0.5	-1180 ± 50	2700 ± 100	0.31 ± 0.06
He II	1640.42	5.6 ± 0.4	-2160 ± 70	1200 ± 100	1.8 ± 0.4
He II	1640.42	0.7 ± 0.2	-300 ± 50	600 ± 100	1.0

Notes. $^{(a)}$The asymmetry parameter γ is defined as FWHM$_{\rm r}$ = γ FWHM$_{\rm b}$, where FWHM$_{\rm r}$ and FWHM$_{\rm b}$ are the full-width half maximum values for the red and blue wing of the Gaussian line profile. $^{(b)}$Observed wavelength. $^{(c)}$Blended doublet emission component.

II

Table II.2: Absorption line properties derived from the 2015 COS spectrum of I Zw 1.

Ion	λ_0 (Å)	EW (Å)	$v_{\rm cen}$ (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})
P V	1117.98	0.023 ± 0.007	-1890 ± 8	60 ± 20
P V	1128.01	0.012 ± 0.004	-1890 ± 8	60 ± 20
H I	1215.67	0.129 ± 0.006	-2886 ± 2	88 ± 5
H I	1215.67	0.022 ± 0.004	-2755 ± 4	50 ± 10
H I	1215.67	0.04 ± 0.01	-2240 ± 20	130 ± 60
H I	1215.67	0.11 ± 0.05	-2090 ± 20	130 ± 20
H I	1215.67	0.21 ± 0.07	-1954 ± 9	130 ± 20
H I	1215.67	0.033 ± 0.004	-1875 ± 3	60 ± 8
H I	1215.67	0.033 ± 0.003	-1309 ± 3	61 ± 7
H I	1215.67	0.038 ± 0.002	-382 ± 2	70 ± 2
H I	1215.67	0.034 ± 0.002	-294 ± 2	70 ± 2
H I	1215.67	0.026 ± 0.002	-179 ± 3	70 ± 2
H I	1215.67	0.037 ± 0.002	-81 ± 2	70 ± 2

Table II.2: continued.

Ion	λ_0 (Å)	EW (Å)	$v_{\rm cen}$ (km s^{-1})	FWHM (km s^{-1})
H I	1215.67	0.029 ± 0.003	106 ± 3	65 ± 7
N V	1238.82	0.038 ± 0.008	-2752 ± 4	40 ± 10
N V	1238.82	0.02 ± 0.01	-2160 ± 20	70 ± 30
N V	1238.82	0.13 ± 0.04	-2060 ± 10	110 ± 30
N V	1238.82	0.02 ± 0.01	-1977 ± 3	28 ± 9
N V	1238.82	0.21 ± 0.04	-1922 ± 9	120 ± 20
N V	1238.82	0.02 ± 0.01	-1790 ± 20	70 ± 30
N V	1238.82	0.051 ± 0.004	-283 ± 1	35 ± 3
N V	1238.82	0.044 ± 0.004	-67 ± 2	36 ± 4
N V	1242.80	0.012 ± 0.006	-2160 ± 20	70 ± 30
N V	1242.80	0.08 ± 0.02	-2060 ± 10	110 ± 30
N V	1242.80	0.018 ± 0.009	-1977 ± 3	28 ± 9
N V	1242.80	0.15 ± 0.03	-1922 ± 9	120 ± 20
N V	1242.80	0.010 ± 0.006	-1790 ± 20	70 ± 30
N V	1242.80	0.025 ± 0.002	-283 ± 1	35 ± 3
N V	1242.80	0.022 ± 0.002	-67 ± 2	36 ± 4
Si IV	1393.76	0.011 ± 0.004	-2887 ± 6	30.0
Si IV	1393.76	0.045 ± 0.005	-1907 ± 3	46 ± 6
Si IV	1393.76	0.008 ± 0.003	-1837 ± 6	30.0
Si IV	1393.76	0.005 ± 0.003	-280 ± 10	30.0
Si IV	1402.77	0.006 ± 0.002	-2887 ± 6	30.0
Si IV	1402.77	0.025 ± 0.003	-1907 ± 3	46 ± 6
Si IV	1402.77	0.004 ± 0.002	-1837 ± 6	30.0
Si IV	1402.77	0.003 ± 0.001	-280 ± 10	30.0
C IV	1548.19	0.10 ± 0.01	-2861 ± 4	90 ± 10
C IV	1548.19	0.044 ± 0.008	-2110 ± 10	100.0 ± 20
C IV	1548.19	0.101 ± 0.007	-2010 ± 10	100.0 ± 8
C IV	1548.19	0.20 ± 0.03	-1914 ± 8	90 ± 10
C IV	1548.19	0.016 ± 0.004	-1880 ± 8	40 ± 10
C IV	1548.19	0.046 ± 0.007	-293 ± 5	70 ± 10
C IV	1548.19	0.014 ± 0.004	-63 ± 5	30.0
C IV	1550.77	0.057 ± 0.009	-2861 ± 4	90 ± 10
C IV	1550.77	0.033 ± 0.006	-2110 ± 10	100.0 ± 20
C IV	1550.77	0.076 ± 0.006	-2010 ± 10	100.0 ± 8
C IV	1550.77	0.15 ± 0.02	-1914 ± 8	90 ± 10
C IV	1550.77	0.012 ± 0.003	-1880 ± 8	40 ± 10
C IV	1550.77	0.023 ± 0.003	-293 ± 5	70 ± 10
C IV	1550.77	0.007 ± 0.002	-63 ± 5	30.0

Bibliography

Afanasiev, V. L., Popović, L. Č., & Shapovalova, A. I. 2019, MNRAS, 482, 4985

Akaike, H. 1974, IEEE Transactions on Automatic Control, 19, 716

Alston, W. N., Fabian, A. C., Kara, E., et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 597

Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473

Antonucci, R. R. J. & Miller, J. S. 1985, ApJ, 297, 621

Arav, N., de Kool, M., Korista, K. T., et al. 2001, ApJ, 561, 118

Arav, N., Edmonds, D., Borguet, B., et al. 2012, A&A, 544, A33

Arav, N., Kaastra, J., Kriss, G. A., et al. 2005, ApJ, 620, 665

Arav, N., Kaastra, J., Steenbrugge, K., et al. 2003, ApJ, 590, 174

Arav, N., Korista, K. T., & de Kool, M. 2002, ApJ, 566, 699

Arav, N., Moe, M., Costantini, E., et al. 2008, ApJ, 681, 954

Arav, N., Xu, X., Kriss, G. A., et al. 2020, A&A, 633, A61

Arévalo, P., Papadakis, I., Kuhlbrodt, B., & Brinkmann, W. 2005, A&A, 430, 435

Arévalo, P. & Uttley, P. 2006, MNRAS, 367, 801

Balbus, S. A. & Hawley, J. F. 1991, ApJ, 376, 214

Balbus, S. A. & Hawley, J. F. 1998, Reviews of Modern Physics, 70, 1

Baldwin, J., Ferland, G., Korista, K., & Verner, D. 1995, ApJ, 455, L119

Baldwin, J. A. 1975, ApJ, 201, 26

Baldwin, J. A. 1997, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 113, IAU Colloq. 159: Emission Lines in Active Galaxies: New Methods and Techniques, ed. B. M. Peterson, F.-Z. Cheng, & A. S. Wilson, 80

Barret, D., Albouys, V., Herder, J.-W. d., et al. 2023, Experimental Astronomy, 55, 373

Barret, D. & Cappi, M. 2019, A&A, 628, A5

Barret, D., Lam Trong, T., den Herder, J.-W., et al. 2018, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, ed. J.-W. A. den Herder, S. Nikzad, & K. Nakazawa, 106991G

Barvainis, R. 1987, ApJ, 320, 537

Barvainis, R., Alloin, D., & Antonucci, R. 1989, ApJ, 337, L69

Baskin, A. & Laor, A. 2018, MNRAS, 474, 1970
Baskin, A., Laor, A., & Hamann, F. 2013, MNRAS, 432, 1525
Begelman, M. C., McKee, C. F., & Shields, G. A. 1983, ApJ, 271, 70
Behar, E., Sako, M., & Kahn, S. M. 2001, ApJ, 563, 497
Bendat, J. S. & Piersol, A. G. 1986, Journal of Sound Vibration, 106, 391
Bennert, N., Jungwiert, B., Komossa, S., Haas, M., & Chini, R. 2006, A&A, 459, 55
Bentz, M. C., Horne, K., Barth, A. J., et al. 2010, ApJ, 720, L46
Bentz, M. C., Walsh, J. L., Barth, A. J., et al. 2009, ApJ, 705, 199
Bianchi, S., Guainazzi, M., Matt, G., Fonseca Bonilla, N., & Ponti, G. 2009, A&A, 495, 421
Bianchi, S., Matt, G., Nicastro, F., Porquet, D., & Dubau, J. 2005, MNRAS, 357, 599
Bischoff, K. & Kollatschny, W. 1999, A&A, 345, 49
Blandford, R., Meier, D., & Readhead, A. 2019, ARA&A, 57, 467
Blandford, R. D. & McKee, C. F. 1982, ApJ, 255, 419
Blandford, R. D. & Payne, D. G. 1982, MNRAS, 199, 883
Blustin, A. J., Page, M. J., Fuerst, S. V., Branduardi-Raymont, G., & Ashton, C. E. 2005, A&A, 431, 111
Boller, T., Brandt, W. N., & Fink, H. 1996, A&A, 305, 53
Borguet, B. C. J., Edmonds, D., Arav, N., Benn, C., & Chamberlain, C. 2012a, ApJ, 758, 69
Borguet, B. C. J., Edmonds, D., Arav, N., Dunn, J., & Kriss, G. A. 2012b, ApJ, 751, 107
Boroson, T. A. & Green, R. F. 1992, ApJS, 80, 109
Bottorff, M. C., Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Ferguson, J. W., & Korista, K. T. 2002, ApJ, 581, 932
Bowler, R. A. A., Hewett, P. C., Allen, J. T., & Ferland, G. J. 2014, MNRAS, 445, 359
Brenneman, L. W. & Reynolds, C. S. 2006, ApJ, 652, 1028
Buisson, D. J. K., Lohfink, A. M., Alston, W. N., et al. 2018, MNRAS, 475, 2306
Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., et al. 2005, Space Sci. Rev., 120, 165
Cackett, E. M., Bentz, M. C., & Kara, E. 2021, iScience, 24, 102557
Canizares, C. R., Davis, J. E., Dewey, D., et al. 2005, PASP, 117, 1144
Cappi, M., Done, C., Behar, E., et al. 2013a, arXiv e-prints, arXiv:1306.2330
Cappi, M., Tombesi, F., & Giustini, M. 2013b, Mem. Soc. Astron. Italiana, 84, 691
Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245
Cash, W. 1979, ApJ, 228, 939
Castor, J. I., Abbott, D. C., & Klein, R. I. 1975, ApJ, 195, 157
Chajet, L. S. & Hall, P. B. 2013, MNRAS, 429, 3214
Chang, C. A., Schiano, A. V. R., & Wolfe, A. M. 1987, ApJ, 322, 180
Chartas, G. & Canas, M. H. 2018, ApJ, 867, 103
Chiang, C.-Y. & Fabian, A. C. 2011, MNRAS, 414, 2345

Choi, H., Leighly, K. M., Terndrup, D. M., et al. 2022, ApJ, 937, 74
Cicone, C., Brusa, M., Ramos Almeida, C., et al. 2018, Nature Astronomy, 2, 176
Contopoulos, J. & Lovelace, R. V. E. 1994, ApJ, 429, 139
Costantini, E. 2010, Space Sci. Rev., 157, 265
Costantini, E., Gallo, L. C., Brandt, W. N., Fabian, A. C., & Boller, T. 2007a, MNRAS, 378, 873
Costantini, E., Kaastra, J. S., Arav, N., et al. 2007b, A&A, 461, 121
Costantini, E., Kaastra, J. S., Korista, K., et al. 2010, A&A, 512, A25
Costantini, E., Kriss, G., Kaastra, J. S., et al. 2016, A&A, 595, A106
Crenshaw, D. M. & Kraemer, S. B. 2000, ApJ, 532, L101
Crenshaw, D. M. & Kraemer, S. B. 2012, ApJ, 753, 75
Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Boggess, A., et al. 1999, ApJ, 516, 750
Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Gabel, J. R., et al. 2003a, ApJ, 594, 116
Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., & George, I. M. 2003b, ARA&A, 41, 117
Crummy, J., Fabian, A. C., Gallo, L., & Ross, R. R. 2006, MNRAS, 365, 1067
Czerny, B. & Hryniewicz, K. 2011, A&A, 525, L8
Czerny, B., Li, J., Loska, Z., & Szczerba, R. 2004, MNRAS, 348, L54
Davidson, K. 1977, ApJ, 218, 20
Davidson, K. & Netzer, H. 1979, Reviews of Modern Physics, 51, 715
de Kool, M., Becker, R. H., Arav, N., Gregg, M. D., & White, R. L. 2002, ApJ, 570, 514
de Kool, M. & Begelman, M. C. 1995, ApJ, 455, 448
De Marco, B., Adhikari, T. P., Ponti, G., et al. 2020, A&A, 634, A65
De Marco, B., Ponti, G., Cappi, M., et al. 2013, MNRAS, 431, 2441
den Herder, J. W., Brinkman, A. C., Kahn, S. M., et al. 2001, A&A, 365, L7
Denney, K. D., Peterson, B. M., Pogge, R. W., et al. 2010, ApJ, 721, 715
Di Matteo, T., Springel, V., & Hernquist, L. 2005, Nature, 433, 604
Done, C., Davis, S. W., Jin, C., Blaes, O., & Ward, M. 2012, MNRAS, 420, 1848
Dong, X., Wang, T., Wang, J., et al. 2008, MNRAS, 383, 581
Dovciak, M., Matt, G., Bianchi, S., et al. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1306.2331
Ebrero, J., Kaastra, J. S., Kriss, G. A., de Vries, C. P., & Costantini, E. 2013, MNRAS, 435, 3028
Eckart, A., van der Werf, P. P., Hofmann, R., & Harris, A. I. 1994, ApJ, 424, 627
Eisenstein, D. J., Hogg, D. W., Fukugita, M., et al. 2003, ApJ, 585, 694
Ekberg, J. O. 1993, A&AS, 101, 1
Elvis, M. 2000, ApJ, 545, 63
Elvis, M. 2017, ApJ, 847, 56
Elvis, M., Wilkes, B. J., McDowell, J. C., et al. 1994, ApJS, 95, 1
Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., et al. 2019, ApJ, 875, L1

Everett, J. E. & Murray, N. 2007, ApJ, 656, 93
Fabian, A. C. 2012, ARA&A, 50, 455
Fabian, A. C., Celotti, A., & Erlund, M. C. 2006, MNRAS, 373, L16
Fabian, A. C., Reynolds, C. S., Jiang, J., et al. 2020, MNRAS, 493, 2518
Fabian, A. C., Vasudevan, R. V., & Gandhi, P. 2008, MNRAS, 385, L43
Fabian, A. C., Zoghbi, A., Ross, R. R., et al. 2009, Nature, 459, 540
Fan, X., Bañados, E., & Simcoe, R. A. 2023, ARA&A, 61, 373
Fei, Q., Wang, R., Molina, J., et al. 2023, ApJ, 946, 45
Ferguson, J. W., Korista, K. T., Baldwin, J. A., & Ferland, G. J. 1997, ApJ, 487, 122
Ferland, G. J., Chatzikos, M., Guzmán, F., et al. 2017, Rev. Mexicana Astron. Astrofis., 53, 385
Ferrarese, L. & Merritt, D. 2000, ApJL, 539, L9
Fisher, K. B., Huchra, J. P., Strauss, M. A., et al. 1995, ApJS, 100, 69
Fitzpatrick, E. L. 1999, PASP, 111, 63
Fitzpatrick, E. L. & Massa, D. 2005, AJ, 130, 1127
Foreman-Mackey, D., Agol, E., Ambikasaran, S., & Angus, R. 2017, AJ, 154, 220
France, K., Fleming, B., Brenneman, L., et al. 2023, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 12678, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXIII, ed. O. H. Siegmund & K. Hoadley, 126780F
Fukumura, K., Dadina, M., Matzeu, G., et al. 2022, ApJ, 940, 6
Fukumura, K., Kazanas, D., Contopoulos, I., & Behar, E. 2010, ApJ, 715, 636
Fukumura, K., Tombesi, F., Kazanas, D., et al. 2015, ApJ, 805, 17
Gabel, J. R., Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., et al. 2003, ApJ, 583, 178
Gabel, J. R., Kraemer, S. B., Crenshaw, D. M., et al. 2005, ApJ, 631, 741
Galeev, A. A., Rosner, R., & Vaiana, G. S. 1979, ApJ, 229, 318
Gallo, L. 2018, in Revisiting Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies and their Place in the Universe, 34
Gallo, L. C., Boller, T., Tanaka, Y., et al. 2004, MNRAS, 347, 269
Gallo, L. C., Miller, J. M., & Costantini, E. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2302.10930
Ganguly, R., Eracleous, M., Charlton, J. C., & Churchill, C. W. 1999, AJ, 117, 2594
Ganguly, R., Masiero, J., Charlton, J. C., & Sembach, K. R. 2003, ApJ, 598, 922
García, J. A., Kara, E., Walton, D., et al. 2019, ApJ, 871, 88
Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., et al. 2004, ApJ, 611, 1005
George, I. M. & Fabian, A. C. 1991, MNRAS, 249, 352
George, I. M., Turner, T. J., Netzer, H., et al. 1998, ApJS, 114, 73
Ghisellini, G., Haardt, F., & Matt, G. 2004, A&A, 413, 535
Gianolli, V. E., Kim, D. E., Bianchi, S., et al. 2023, MNRAS, 523, 4468
Gibson, R. R., Jiang, L., Brandt, W. N., et al. 2009, ApJ, 692, 758

Gierliński, M. & Done, C. 2004, MNRAS, 349, L7
Giustini, M. & Proga, D. 2019, A&A, 630, A94
Goad, M. R., Korista, K. T., & Ruff, A. J. 2012, MNRAS, 426, 3086
Goodrich, R. W. 1989, ApJ, 342, 224
Gordon, K. D., Clayton, G. C., Misselt, K. A., Landolt, A. U., & Wolff, M. J. 2003, ApJ, 594, 279
GRAVITY Collaboration, Amorim, A., Bauböck, M., et al. 2020a, A&A, 643, A154
GRAVITY Collaboration, Pfuhl, O., Davies, R., et al. 2020b, A&A, 634, A1
GRAVITY Collaboration, Sturm, E., Dexter, J., et al. 2018, Nature, 563, 657
Green, J. C., Froning, C. S., Osterman, S., et al. 2012, ApJ, 744, 60
Grier, C. J., Peterson, B. M., Horne, K., et al. 2013, ApJ, 764, 47
Griffiths, R.-R., Jiang, J., Buisson, D. J. K., et al. 2021, ApJ, 914, 144
Grupe, D., Komossa, S., Leighly, K. M., & Page, K. L. 2010, ApJS, 187, 64
Grupe, D. & Mathur, S. 2004, ApJ, 606, L41
Grupe, D., Wills, B. J., Leighly, K. M., & Meusinger, H. 2004, AJ, 127, 156
Gu, L., Kaastra, J., Rogantini, D., et al. 2023, A&A, 679, A43
Guainazzi, M., Matt, G., Molendi, S., et al. 1999, A&A, 341, L27
Haardt, F. & Maraschi, L. 1991, ApJ, 380, L51
Haardt, F. & Maraschi, L. 1993, ApJ, 413, 507
Hall, P. B. 2007, AJ, 133, 1271
Hall, P. B., Sadavoy, S. I., Hutsemekers, D., Everett, J. E., & Rafiee, A. 2007, ApJ, 665, 174
Halpern, J. P. 1984, ApJ, 281, 90
Hamann, F. & Sabra, B. 2004, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 311, AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey, ed. G. T. Richards & P. B. Hall, 203
Hamann, F., Simon, L., Rodriguez Hidalgo, P., & Capellupo, D. 2012, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 460, AGN Winds in Charleston, ed. G. Chartas, F. Hamann, & K. M. Leighly, 47
Heckman, T. M., Miley, G. K., van Breugel, W. J. M., & Butcher, H. R. 1981, ApJ, 247, 403
Henri, G. & Pelletier, G. 1991, ApJ, 383, L7
Hewett, P. C. & Foltz, C. B. 2003, AJ, 125, 1784
Higginbottom, N., Proga, D., Knigge, C., et al. 2014, ApJ, 789, 19
Homan, D., Lawrence, A., Ward, M., et al. 2023, MNRAS, 519, 1745
Huang, Y.-K., Hu, C., Zhao, Y.-L., et al. 2019, ApJ, 876, 102
Huppenkothen, D. & Bachetti, M. 2022, MNRAS, 511, 5689
Hutchings, J. B., Crenshaw, D. M., Kaiser, M. E., et al. 1998, ApJ, 492, L115
Hutchings, J. B., Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., et al. 2002, AJ, 124, 2543
Igo, Z., Parker, M. L., Matzeu, G. A., et al. 2020, MNRAS, 493, 1088
Ingram, A. & van der Klis, M. 2013, MNRAS, 434, 1476

Jaffarian, G. W. & Gaskell, C. M. 2020, MNRAS, 493, 930
Jansen, F., Lumb, D., Altieri, B., et al. 2001, A&A, 365, L1
Jha, V. K., Chand, H., Ojha, V., Omar, A., & Rastogi, S. 2022, MNRAS, 510, 4379
Jiang, J., Parker, M. L., Fabian, A. C., et al. 2018, MNRAS, 477, 3711
Juráňová, A., Costantini, E., & Uttley, P. 2022, MNRAS, 510, 4225
Kaastra, J. S. 2017, A&A, 605, A51
Kaastra, J. S., Detmers, R. G., Mehdipour, M., et al. 2012, A&A, 539, A117
Kaastra, J. S., Kriss, G. A., Cappi, M., et al. 2014a, Science, 345, 64
Kaastra, J. S., Mewe, R., & Nieuwenhuijzen, H. 1996, in UV and X-ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas, ed. K. Yamashita & T. Watanabe (Universal Academy Press, Tokyo), 411–414
Kaastra, J. S., Raassen, A. J. J., de Plaa, J., & Gu, L. 2022, SPEX X-ray spectral fitting package
Kaastra, J. S., Raassen, A. J. J., de Plaa, J., & Gu, L. 2023, SPEX X-ray spectral fitting package
Kaastra, J. S., Raassen, A. J. J., Mewe, R., et al. 2004, A&A, 428, 57
Kaastra, J. S., Steenbrugge, K. C., Raassen, A. J. J., et al. 2002, A&A, 386, 427
Kaastra, J. S., Terashima, Y., Kallman, T., et al. 2014b, arXiv e-prints, arXiv:1412.1171
Kalberla, P. M. W., Burton, W. B., Hartmann, D., et al. 2005, A&A, 440, 775
Kallman, T. & Bautista, M. 2001, ApJS, 133, 221
Kara, E., Alston, W., & Fabian, A. 2016, Astronomische Nachrichten, 337, 473
Kara, E., Fabian, A. C., Cackett, E. M., et al. 2013, MNRAS, 434, 1129
Kara, E., Fabian, A. C., Marinucci, A., et al. 2014, MNRAS, 445, 56
Kara, E., Mehdipour, M., Kriss, G. A., et al. 2021, ApJ, 922, 151
Kara, E., Steiner, J. F., Fabian, A. C., et al. 2019, Nature, 565, 198
Kara, E., Zoghbi, A., Marinucci, A., et al. 2015, MNRAS, 446, 737
Kaspi, S., Brandt, W. N., Maoz, D., et al. 2007, ApJ, 659, 997
Keel, W. C. 1996, AJ, 111, 696
Kelly, B. C., Bechtold, J., & Siemiginowska, A. 2009, ApJ, 698, 895
Kelly, B. C., Becker, A. C., Sobolewska, M., Siemiginowska, A., & Uttley, P. 2014, ApJ, 788, 33
King, A. & Pounds, K. 2015, ARA&A, 53, 115
Kinney, A. L., Calzetti, D., Bohlin, R. C., et al. 1996, ApJ, 467, 38
Kollatschny, W., Bischoff, K., Robinson, E. L., Welsh, W. F., & Hill, G. J. 2001, A&A, 379, 125
Komossa, S. & Meerschweinchen, J. 2000, A&A, 354, 411
Konigl, A. & Kartje, J. F. 1994, ApJ, 434, 446
Korista, K., Baldwin, J., Ferland, G., & Verner, D. 1997, ApJS, 108, 401
Korista, K. T. & Goad, M. R. 2000, ApJ, 536, 284
Korista, K. T. & Goad, M. R. 2004, ApJ, 606, 749

Koshida, S., Minezaki, T., Yoshii, Y., et al. 2014, ApJ, 788, 159

Kotov, O., Churazov, E., & Gilfanov, M. 2001, MNRAS, 327, 799

Krause, M., Schartmann, M., & Burkert, A. 2012, MNRAS, 425, 3172

Kriss, G. A. 2002, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 255, Mass Outflow in Active Galactic Nuclei: New Perspectives, ed. D. M. Crenshaw, S. B. Kraemer, & I. M. George, 69

Kriss, G. A., Lee, J. C., Danehkar, A., et al. 2018, ApJ, 853, 166

Krolik, J. H. & Begelman, M. C. 1988, ApJ, 329, 702

Krolik, J. H. & Kriss, G. A. 1995a, ApJ, 447, 512

Krolik, J. H. & Kriss, G. A. 1995b, ApJ, 447, 512

Krolik, J. H. & Kriss, G. A. 2001, ApJ, 561, 684

Krolik, J. H., McKee, C. F., & Tarter, C. B. 1981, ApJ, 249, 422

Kubota, A. & Done, C. 2018, MNRAS, 480, 1247

Laha, S., Guainazzi, M., Dewangan, G. C., Chakravorty, S., & Kembhavi, A. K. 2014, MNRAS, 441, 2613

Laha, S., Reynolds, C. S., Reeves, J., et al. 2021, Nature Astronomy, 5, 13

Landt, H., Ward, M. J., Elvis, M., & Karovska, M. 2014, MNRAS, 439, 1051

Laor, A. & Draine, B. T. 1993, ApJ, 402, 441

Laor, A., Jannuzi, B. T., Green, R. F., & Boroson, T. A. 1997, ApJ, 489, 656

Lee, J. C., Iwasawa, K., Houck, J. C., et al. 2002, ApJ, 570, L47

Lee, J. C., Ogle, P. M., Canizares, C. R., et al. 2001, ApJ, 554, L13

Leighly, K. M. 1999a, ApJS, 125, 297

Leighly, K. M. 1999b, ApJS, 125, 317

Leighly, K. M. & Moore, J. R. 2004, ApJ, 611, 107

Leighly, K. M., Mushotzky, R. F., Nandra, K., & Forster, K. 1997, ApJ, 489, L25

Lewin, C., Kara, E., Wilkins, D., et al. 2022, ApJ, 939, 109

Lightman, A. P. & White, T. R. 1988, ApJ, 335, 57

Lodders, K., Palme, H., & Gail, H.-P. 2009, Landolt Börnstein

Longinotti, A. L., Krongold, Y., Kriss, G. A., et al. 2013, ApJ, 766, 104

Luminari, A., Nicastro, F., Krongold, Y., Piro, L., & Thakur, A. L. 2023, A&A, 679, A141

Lyubarskii, Y. E. 1997, MNRAS, 292, 679

Magdziarz, P. & Zdziarski, A. A. 1995, MNRAS, 273, 837

Maiolino, R., Marconi, A., Salvati, M., et al. 2001, A&A, 365, 28

Mangham, S. W., Knigge, C., Matthews, J. H., et al. 2017, MNRAS, 471, 4788

Mao, J., Kaastra, J. S., Mehdipour, M., et al. 2017, A&A, 607, A100

Marconi, A., Moorwood, A. F. M., Origlia, L., & Oliva, E. 1994, The Messenger, 78, 20

Markoff, S., Nowak, M. A., & Wilms, J. 2005, ApJ, 635, 1203

Mas-Ribas, L. & Mauland, R. 2019, ApJ, 886, 151
Mason, K. O., Breeveld, A., Much, R., et al. 2001, A&A, 365, L36
Mathews, W. G. & Ferland, G. J. 1987, ApJ, 323, 456
Mathur, S., Elvis, M., & Wilkes, B. 1995, ApJ, 452, 230
Matt, G., Bianchi, S., Guainazzi, M., et al. 2011, A&A, 533, A1
Matt, G., Perola, G. C., & Piro, L. 1991, A&A, 247, 25
Matthews, J. H., Knigge, C., Higginbottom, N., et al. 2020, MNRAS, 492, 5540
Mayer, L. 2019, in Formation of the First Black Holes, ed. M. Latif & D. Schleicher, 195–222
McHardy, I. M., Gunn, K. F., Uttley, P., & Goad, M. R. 2005, MNRAS, 359, 1469
McHardy, I. M., Koerding, E., Knigge, C., Uttley, P., & Fender, R. P. 2006, Nature, 444, 730
Mehdipour, M., Branduardi-Raymont, G., Kaastra, J. S., et al. 2011, A&A, 534, A39
Mehdipour, M., Kaastra, J. S., Kriss, G. A., et al. 2017, A&A, 607, A28
Mehdipour, M., Kriss, G. A., Kaastra, J. S., Costantini, E., & Mao, J. 2023, ApJ, 952, L5
Middei, R., Bianchi, S., Marinucci, A., et al. 2019, A&A, 630, A131
Miller, L., Turner, T. J., Reeves, J. N., & Braito, V. 2010, MNRAS, 408, 1928
Milne, E. A. 1926, MNRAS, 86, 459
Mizumoto, M., Done, C., Tomaru, R., & Edwards, I. 2019a, MNRAS, 489, 1152
Mizumoto, M., Ebisawa, K., Tsujimoto, M., et al. 2019b, MNRAS, 482, 5316
Mizumoto, M., Nomura, M., Done, C., Ohsuga, K., & Odaka, H. 2021, MNRAS, 503, 1442
Moos, H. W., Cash, W. C., Cowie, L. L., et al. 2000, ApJ, 538, L1
Mor, R. & Netzer, H. 2012, MNRAS, 420, 526
Müller-Sánchez, F., Prieto, M. A., Hicks, E. K. S., et al. 2011, ApJ, 739, 69
Murray, N. & Chiang, J. 1997, ApJ, 474, 91
Murray, N., Chiang, J., Grossman, S. A., & Voit, G. M. 1995, ApJ, 451, 498
Mushotzky, R. F., Solomon, P. M., & Strittmatter, P. A. 1972, ApJ, 174, 7
Nagao, T., Marconi, A., & Maiolino, R. 2006, A&A, 447, 157
Nandra, K., Barret, D., Barcons, X., et al. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1306.2307
Nandra, K., O'Neill, P. M., George, I. M., & Reeves, J. N. 2007, MNRAS, 382, 194
Netzer, H. 2015, ARA&A, 53, 365
Netzer, H. & Laor, A. 1993, ApJ, 404, L51
Nicastro, F., Fiore, F., & Matt, G. 1999a, ApJ, 517, 108
Nicastro, F., Fiore, F., Perola, G. C., & Elvis, M. 1999b, ApJ, 512, 184
Nomura, M., Ohsuga, K., & Done, C. 2020, MNRAS, 494, 3616
Nowak, M. A., Vaughan, B. A., Wilms, J., Dove, J. B., & Begelman, M. C. 1999, ApJ, 510, 874
Osterbrock, D. E. 1978, Proceedings of the National Academy of Science, 75, 540
Osterbrock, D. E. 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei (University Science Books)

Osterbrock, D. E. & Pogge, R. W. 1985, ApJ, 297, 166

Padovani, P. 2016, A&A Rev., 24, 13

Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J., et al. 2017, A&A Rev., 25, 2

Pal, I., Stalin, C. S., Chatterjee, R., & Agrawal, V. K. 2023, Journal of Astrophysics and Astronomy, 44, 87

Pancoast, A., Brewer, B. J., Treu, T., et al. 2012, ApJ, 754, 49

Pancoast, A., Brewer, B. J., Treu, T., et al. 2014, MNRAS, 445, 3073

Panessa, F. & Giroletti, M. 2013, MNRAS, 432, 1138

Parker, M. L., Matzeu, G. A., Matthews, J. H., et al. 2022, MNRAS, 513, 551

Parker, M. L., Pinto, C., Fabian, A. C., et al. 2017, Nature, 543, 83

Peretz, U., Miller, J. M., & Behar, E. 2019, ApJ, 879, 102

Perola, G. C., Matt, G., Cappi, M., et al. 2002, A&A, 389, 802

Peterson, B. M. 1993, PASP, 105, 247

Peterson, B. M. 1997, An Introduction to Active Galactic Nuclei (Cambridge University Press)

Peterson, B. M., Ferrarese, L., Gilbert, K. M., et al. 2004, ApJ, 613, 682

Peterson, B. M., Wanders, I., Bertram, R., et al. 1998, ApJ, 501, 82

Phillips, M. M. 1976, ApJ, 208, 37

Piconcelli, E., Jimenez-Bailón, E., Guainazzi, M., et al. 2005, A&A, 432, 15

Ponti, G., Cappi, M., Costantini, E., et al. 2013, A&A, 549, A72

Ponti, G., Papadakis, I., Bianchi, S., et al. 2012, A&A, 542, A83

Porquet, D. & Dubau, J. 2000, A&AS, 143, 495

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. 1992, Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing (Cambridge University Press)

Proga, D. 2003, ApJ, 585, 406

Proga, D. 2007a, ApJ, 661, 693

Proga, D. 2007b, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 373, The Central Engine of Active Galactic Nuclei, ed. L. C. Ho & J. W. Wang, 267

Proga, D. & Kallman, T. R. 2004, ApJ, 616, 688

Proga, D., Stone, J. M., & Kallman, T. R. 2000, ApJ, 543, 686

Pudritz, R. E. & Norman, C. A. 1986, ApJ, 301, 571

Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I. 2006, Gaussian Processes for Machine Learning

Reeves, J. N., Porquet, D., Braito, V., Grosso, N., & Lobban, A. 2021, A&A, 649, L3

Reis, R. C. & Miller, J. M. 2013, ApJ, 769, L7

Reynolds, C. S. 1997, MNRAS, 286, 513

Reynolds, C. S. & Fabian, A. C. 1995, MNRAS, 273, 1167

Reynolds, C. S., Young, A. J., Begelman, M. C., & Fabian, A. C. 1999, ApJ, 514, 164

Ricci, C., Trakhtenbrot, B., Koss, M. J., et al. 2017, Nature, 549, 488

Risaliti, G., Harrison, F. A., Madsen, K. K., et al. 2013, Nature, 494, 449

Rogantini, D., Costantini, E., Gallo, L. C., et al. 2022, MNRAS, 516, 5171

Romero, G. E., Boettcher, M., Markoff, S., & Tavecchio, F. 2017, Space Sci. Rev., 207, 5

Roming, P. W. A., Kennedy, T. E., Mason, K. O., et al. 2005, Space Sci. Rev., 120, 95

Ross, R. R. & Fabian, A. C. 1993, MNRAS, 261, 74

Rybicki, G. & Lightman, A. 1991, Radiative Processes in Astrophysics, A Wiley-Interscience publication (Wiley)

Sadaula, D. R. & Kallman, T. R. 2024, ApJ, 960, 120

Sargent, W. L. W. 1968, ApJ, 152, L31

Sato, K., Uchida, Y., & Ishikawa, K. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2303.01642

Savage, B. D. & Sembach, K. R. 1991, ApJ, 379, 245

Scargle, J. D. 1973, ApJ, 179, 705

Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, ApJ, 737, 103

Schmidt, M. 1963, Nature, 197, 1040

Schmidt, M. & Green, R. F. 1983, ApJ, 269, 352

Seyfert, C. K. 1943, ApJ, 97, 28

Shakura, N. I. & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337

Shields, G. A. 1978, Nature, 272, 706

Silk, J. & Rees, M. J. 1998, A&A, 331, L1

Silva, C. V., Costantini, E., Giustini, M., et al. 2018, MNRAS, 480, 2334

Silva, C. V., Uttley, P., & Costantini, E. 2016, A&A, 596, A79

Sim, S. A., Proga, D., Miller, L., Long, K. S., & Turner, T. J. 2010, MNRAS, 408, 1396

Smith, R. 2023, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 12678, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXIII, ed. O. H. Siegmund & K. Hoadley, 126780E

Smith, R. K., Abraham, M. H., Allured, R., et al. 2016, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, ed. J.-W. A. den Herder, T. Takahashi, & M. Bautz, 99054M

Springob, C. M., Haynes, M. P., Giovanelli, R., & Kent, B. R. 2005, ApJS, 160, 149

Srianand, R., Petitjean, P., Ledoux, C., & Hazard, C. 2002, MNRAS, 336, 753

Steenbrugge, K. C., Kaastra, J. S., de Vries, C. P., & Edelson, R. 2003, A&A, 402, 477

Stella, L. 1990, Nature, 344, 747

Suganuma, M., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., et al. 2006, ApJ, 639, 46

Sulentic, J. W., Marziani, P., & Dultzin-Hacyan, D. 2000a, ARA&A, 38, 521

Sulentic, J. W., Zwitter, T., Marziani, P., & Dultzin-Hacyan, D. 2000b, ApJ, 536, L5

Summons, D. P., Arévalo, P., McHardy, I. M., Uttley, P., & Bhaskar, A. 2007, MNRAS, 378, 649

Tanaka, Y., Nandra, K., Fabian, A. C., et al. 1995, Nature, 375, 659

Tarter, C. B., Tucker, W. H., & Salpeter, E. E. 1969, ApJ, 156, 943

Tashiro, M., Maejima, H., Toda, K., et al. 2018, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, ed. J.-W. A. den Herder, S. Nikzad, & K. Nakazawa, 1069922

Thorne, K. S. 1974, ApJ, 191, 507

Timlin, John D., I., Brandt, W. N., & Laor, A. 2021, MNRAS, 504, 5556

Timmer, J. & Koenig, M. 1995, A&A, 300, 707

Tombesi, F., Cappi, M., Reeves, J. N., et al. 2013, MNRAS, 430, 1102

Tombesi, F., Cappi, M., Reeves, J. N., et al. 2010, A&A, 521, A57

Tombesi, F., Meléndez, M., Veilleux, S., et al. 2015, Nature, 519, 436

Tortosa, A., Bianchi, S., Marinucci, A., Matt, G., & Petrucci, P. O. 2018, A&A, 614, A37

Tsuzuki, Y., Kawara, K., Yoshii, Y., et al. 2006, ApJ, 650, 57

Turner, A. K., Fabian, A. C., Vaughan, S., & Lee, J. C. 2003, MNRAS, 346, 833

U, V., Barth, A. J., Vogler, H. A., et al. 2022, ApJ, 925, 52

Uchida, Y. & Shibata, K. 1985, PASJ, 37, 515

Ursini, F., Matt, G., Bianchi, S., et al. 2022, MNRAS, 510, 3674

Uttley, P., Cackett, E. M., Fabian, A. C., Kara, E., & Wilkins, D. R. 2014, A&A Rev., 22, 72

Uttley, P., Hartog, R. d., Bambi, C., et al. 2021, Experimental Astronomy, 51, 1081

Uttley, P. & Malzac, J. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2312.08302

Uttley, P. & McHardy, I. M. 2001, MNRAS, 323, L26

Uttley, P., McHardy, I. M., & Vaughan, S. 2005, MNRAS, 359, 345

van Paradijs, J. & Bleeker, J. A. M. 1999, X-Ray Spectroscopy in Astrophysics, Vol. 520

Vasudevan, R. V. & Fabian, A. C. 2009, MNRAS, 392, 1124

Vaughan, B. A. & Nowak, M. A. 1997, ApJ, 474, L43

Vaughan, S., Uttley, P., Pounds, K. A., Nandra, K., & Strohmayer, T. E. 2011, MNRAS, 413, 2489

Vazquez, B., Galianni, P., Richmond, M., et al. 2015, ApJ, 801, 127

Veilleux, S., Rupke, D. S. N., Liu, W., et al. 2022, ApJ, 926, 60

Véron-Cetty, M. P., Joly, M., & Véron, P. 2004, A&A, 417, 515

Véron-Cetty, M. P., Véron, P., & Gonçalves, A. C. 2001, A&A, 372, 730

Vestergaard, M. & Wilkes, B. J. 2001, ApJS, 134, 1

Viegas, S. M. 2002, in Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, Vol. 12, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, ed. W. J. Henney, J. Franco, & M. Martos, 219–224

Villafaña, L., Williams, P. R., Treu, T., et al. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2203.15000

Vincentelli, F. M., McHardy, I., Cackett, E. M., et al. 2021, MNRAS, 504, 4337

Walton, D. J., Risaliti, G., Harrison, F. A., et al. 2014, ApJ, 788, 76

Wandel, A., Peterson, B. M., & Malkan, M. A. 1999, ApJ, 526, 579

Waters, T., Kashi, A., Proga, D., et al. 2016, ApJ, 827, 53

Waters, T., Proga, D., & Dannen, R. 2021, ApJ, 914, 62

Weedman, D. W. 1977, ARA&A, 15, 69

Weisskopf, M. C., Soffitta, P., Baldini, L., et al. 2022, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 8, 026002

Weymann, R. J., Morris, S. L., Foltz, C. B., & Hewett, P. C. 1991, ApJ, 373, 23

Wilkins, D. R. 2019, MNRAS, 489, 1957

Wilkins, D. R. & Fabian, A. C. 2013, MNRAS, 430, 247

Wilkins, D. R., Gallo, L. C., Costantini, E., Brandt, W. N., & Blandford, R. D. 2021, Nature, 595, 657

Wilkins, D. R., Gallo, L. C., Silva, C. V., et al. 2017, MNRAS, 471, 4436

Willingale, R., Starling, R. L. C., Beardmore, A. P., Tanvir, N. R., & O'Brien, P. T. 2013, MNRAS, 431, 394

Wills, B. J., Netzer, H., & Wills, D. 1985, ApJ, 288, 94

Winter, L. M., Lewis, K. T., Koss, M., et al. 2010, ApJ, 710, 503

Wu, X.-B. & Han, J. L. 2001, ApJ, 561, L59

Wylezalek, D. & Morganti, R. 2018, Nature Astronomy, 2, 181

XRISM Science Team. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2003.04962

Xu, D., Komossa, S., Zhou, H., Wang, T., & Wei, J. 2007, ApJ, 670, 60

Young, A. J., Lee, J. C., Fabian, A. C., et al. 2005, ApJ, 631, 733

Yu, W. & Richards, G. T. 2022, EzTao: Easier CARMA Modeling, Astrophysics Source Code Library, record ascl:2201.001

Yuan, F. & Narayan, R. 2014, ARA&A, 52, 529

Zoghbi, A., Fabian, A. C., Reynolds, C. S., & Cackett, E. M. 2012, MNRAS, 422, 129

Zoghbi, A., Fabian, A. C., Uttley, P., et al. 2010, MNRAS, 401, 2419

Zoghbi, A. & Miller, J. M. 2023, ApJ, 957, 69

Zoghbi, A., Miller, J. M., & Cackett, E. 2019, ApJ, 884, 26

Zycki, P. T., Done, C., & Smith, D. A. 1999, MNRAS, 305, 231

Contribution from co-authors

The bibliographic information of the papers included in this thesis is listed below. The position in the author list reflects the importance of the contribution of each co-author.

Chapter 2: Spectral-timing of AGN ionised outflows with Athena
A. Juráňová, E. Costantini, and P. Uttley
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 510, 4225

Chapter 3: Bridging the gaps: Prospects for probing AGN outflows with Fourier timing
A. Juráňová, P. Uttley, and E. Costantini
In preparation

Chapter 4: Study of the optical to X-ray broad emission lines of Mrk 110
A. Juráňová, E. Costantini, L. Di Gesu, J. Ebrero, J. Kaastra, K. Korista, G. A. Kriss, M. Mehdipour, E. Piconcelli, and D. Rogantini
Astronomy & Astrophysics, 2024, 681, A101

Chapter 5: The outflowing ionised gas of I Zw 1 observed by HST COS
A. Juráňová, E. Costantini, G. A. Kriss, M. Mehdipour, W. N. Brandt, L. Di Gesu, A. C. Fabian, L. Gallo, M. Giustini, D. Rogantini, and D. R. Wilkins
Submitted to *Astronomy & Astrophysics*

Publications

First-author articles

1. **A. Juráňová**, E. Costantini, and P. Uttley
   Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 510, 4225. (**Chapter 2**)
   Spectral-timing of AGN ionized outflows with Athena

2. **A. Juráňová**, E. Costantini, L. Di Gesu, J. Ebrero, J. Kaastra, K. Korista, G. A. Kriss, M. Mehdipour, E. Piconcelli, and D. Rogantini
   Astronomy & Astrophysics, 2024, 681, A101. (**Chapter 4**)
   Study of the optical to X-ray broad emission lines of Mrk 110

3. **A. Juráňová**, E. Costantini, G. A. Kriss, M. Mehdipour, W. N. Brandt, L. Di Gesu, A. C. Fabian, L. Gallo, M. Giustini, D. Rogantini, and D. R. Wilkins
   Submitted to *Astronomy & Astrophysics* (**Chapter 5**)
   The outflowing ionised gas of I Zw 1 observed by HST COS

Co-authored articles

1. D. Rogantini, M. Mehdipour, J. Kaastra, E. Costantini, **A. Juráňová**, and E. Kara
   The Astrophysical Journal, 2022, 940, 122
   TPHO: A Time-dependent Photoionization Model for AGN Outflows

2. L. Gu, J. Kaastra, D. Rogantini, M. Mehdipour, **A. Juráňová**, E. Costantini and C. Li
   Astronomy & Astrophysics, 2023, 679, A43
   Time-dependent photoionization spectroscopy of the Seyfert galaxy NGC 3783

Summary

The cores of most galaxies, ours included, harbour a supermassive black hole. Their presence can be revealed through their interaction with the surrounding medium in the process of mass accretion. If a substantial amount of matter is available in the imminent surroundings of the black hole, this 'feeding' process can lead to a release of vast amounts of energy in the form of electromagnetic radiation, which can outshine the combined light of all stars in the host galaxy by an order of magnitude. These energetic cores of galaxies are called active galactic nuclei (AGNs). In addition to light, also matter can be witnessed to leave the compact central region. Outflows of ionised gas have been observed in many AGNs, escaping the powerful gravitational pull of the SMBH at speeds ranging from hundreds of kilometres per second to as much as one-third of the speed of light. This outward acceleration from close to the black hole is believed to be a consequence of exposure to intense radiation or strong magnetic fields, which are responsible also for collimating powerful jets from near the black hole and through the host galaxy, as seen in some objects.

The outflows of ionised gas are commonly detected in AGN X-ray spectra. This has two immediate implications: first, these 'winds' are highly ionised, resulting in their spectral signatures appearing at such high energies, and second, the conditions for their launch can be established relatively easily, given their frequent detection. Over the four decades that have passed since the first detection of an X-ray ionised absorber in an AGN, our understanding of these outflows has grown substantially. However, both the location and the total amount of this absorbing gas are still very difficult to determine. This uncertainty around the key characteristics of AGN ionised outflows hinders our understanding of their impact on the surrounding medium. Nevertheless, it is believed that at least the fastest of these outflows are very powerful, and can transfer a substantial amount of energy to the surrounding environment. This scenario is supported by observations of large-scale gas structures that appear to be connected with the galaxy core, and generally also on evidence for quenched star formation and a tight relation between the mass of the SMBH and that of the galactic bulge. The existence of this AGN feedback was proposed more than two decades ago and has been extensively studied ever since.

The role of AGN outflows in the evolution of host galaxies and their central supermassive black hole is yet to be fully understood. While direct evidence for molecular outflows extending far into the host galaxy can be obtained, observations of the innermost part of the central engine are not as easily accessible. The distance of even the nearby AGNs makes their spatial structure unresolvable by current instrumentation: the AGN appears as a bright dot, similar

to the stars in the Galaxy. Thus, elaborate methods need to be used to infer the geometry of the complex environment, relying on spectroscopy, polarimetry and the analysis of the observed variability. This thesis aims to deepen our understanding of the AGN environment, focusing on its X-ray and UV spectroscopic signatures.

Chapter 2 is focused on ionised outflows in a highly variable AGN. Specifically, we explore their time-dependent behaviour, aiming to quantify the connection to the fundamental physical properties of the gas: particle density and the distance to the AGN centre. These quantities cannot be easily derived with conventional techniques, yet they are crucial for our understanding of their origin and impact on the surrounding environment. They are not completely unconstrained as they are tied together in the ionisation parameter, which is used to quantify the ionisation state of the gas in the observed spectra. Nevertheless, finding a way to break this degeneracy has been a major observational challenge for decades. Importantly, the gas density is directly encoded in its ability to follow changes in the ionising flux, which provides an opportunity to obtain the gas properties independently. However, the density-specific gas response may not be observable in time-resolved spectra, as the variability timescale can be very short. To tackle this problem, we probed the density-dependent behaviour using Fourier spectral-timing techniques, which enable probing the variability as a function of temporal frequency with high sensitivity to behaviour beyond the reach of time-domain techniques. We applied them to simulations of time-dependent photoionised outflows in a highly variable AGN, covering a wide parameter space of outflow properties. The analysis showed that variable absorption can lead to spurious time lags, owing to the non-linear nature of the absorber response. Importantly, this complex response leaves a characteristic imprint on how linearly-correlated the analysed light curves are (known as the 'coherence'), which is directly related to the gas density. Finally, we show that the modelling of the coherence-energy spectra presents a promising tool to constrain the gas properties, especially when applied to the data from the future *Athena X-ray Observatory*.

Chapter 3 builds upon the theoretical framework established in Chapter 2, aiming to bridge the gap between spectral-timing modelling and existing observations of AGNs. Specifically, it addresses the critical question: is the proposed modelling approach robust to uncertainties associated with gaps separating individual observations with *XMM-Newton* and observational noise? The dependence of the spectral-timing properties on the specific realisation of the variability of the underlying emission source, which determines the time-dependent properties of the ionic composition of the gas, is thoroughly tested. Reassuringly, the analysis reveals that observational uncertainties due to emission variability do not significantly impact the modelled outflow spectral-timing properties. This validation opens the door to applying the technique to actual data with confidence. Furthermore, the analysis reveals that the variable absorption by the outflowing gas leaves a distinct signature in the power-spectral density of the observed light curves. Additionally, the outflows simulated in this Chapter probe a different regime of variability, which is intrinsically highly coherent, providing deeper insight into the complex dependence of absorption response on the ionising continuum variability.

The work presented in Chapter 2 and Chapter 3 promises a significant advancement in understanding the physics of ionised outflows in AGNs. By harnessing the power of photoionisation-

modelling in combination with spectral-timing, the studies pave the way for a deeper understanding of these enigmatic phenomena, ultimately shedding light on the complex interplay between supermassive black holes and their surrounding environment.

The AGN environment consists of several regions with distinct observational properties. One of them is the broad-line region (BLR) characteristic for its broad UV and optical emission lines, nearly ubiquitously present in AGN spectra. Its structure and dynamical properties are, however, still poorly understood. While the BLR spectra share many common features across otherwise different objects, intriguing variations in certain cases offer a window into the mechanisms behind the formation and maintenance of this medium. Therefore, aiming to examine the BLR properties in an object with rather unusual properties, we analysed simultaneously obtained X-ray, UV, and optical spectra of Mrk 110 in Chapter 4. Broad-band photoionisation modelling of the emission line luminosities pointed at structural differences in this object relative to typical BLRs. Furthermore, we showed that while the X-ray-to-optical lines, spanning a wide range of ionisation and two orders of magnitude in luminosity, can be relatively well described in a framework generally adopted for the BLR gas properties, a better description may be achieved if more complex environment including a clumpy, equatorial wind is considered.

Observations of highly ionised absorption from AGN outflows seen in the UV spectra often do not allow placing tight constraints on its properties. This is not, however, the case of the outflows in a nearby AGN I Zwicky 1 explored in Chapter 5. The high-resolution spectroscopic data obtained with HST COS enabled a detailed analysis of the absorption components associated with the photoionised gas outflows. Besides placing constraints on the ionisation state and column density of the gas, we find that the bulk of the absorbing gas does not cover the entire emission source in the background uniformly. Moreover, being able to connect the UV outflow with the absorption signatures in the X-ray band further, we conclude that the gas is likely clumpy in its structure. Notably, we find that the radiation pressure plays an important role in the acceleration of these clumps, the evidence for which is observed rarely in nearby AGN. This finding also allows us to constrain the geometrical configuration of these outflows and conclude that the outward motion due to the observed acceleration mechanism is directed towards us. Finally, we propose a scenario for the global kinematics of both the absorbing gas outflows and the underlying broad-line region, which appears to be outflowing too.

Chapter 4 and Chapter 5 not only unravel the properties of the investigated components of the inner AGN environment in these specific objects but also provide valuable clues to our understanding of similar phenomena across active galaxies. By uncovering the secrets of these powerful galactic engines, we gain a deeper understanding of their role in shaping the Universe.

Samenvatting

In de kernen van de meeste sterrenstelsels, ook de onze, is een zeer zwaar zwart gat te vinden. Ze verraden hun aanwezigheid door gas dat oplicht zodra het dicht rond het zwarte gat draait. Als er veel materie beschikbaar is rondom het zwarte gat, kan dit 'voedingsproces' leiden tot enorme hoeveelheden elektromagnetische straling die al het licht van alle sterren in het sterrenstelsel met een orde van grootte kan overtreffen. Deze energieke kernen van sterrenstelsels worden Active Galactic Nuclei (AGN's) genoemd. Naast licht ontsnapt er ook materie vanuit het centrale gebied rondom het gat. In veel AGN's zijn stromen van geïoniseerd gas waargenomen die met snelheden van honderden kilometers per seconde tot wel een derde van de lichtsnelheid weten te ontsnappen aan de krachtige zwaartekracht van het zwarte gat. Deze 'wind' lijkt het gevolg te zijn van de intense straling die het hete gas dicht bij het zwarte gat uitzendt of door sterke magnetische velden. Die velden zijn ook verantwoordelijk voor de krachtige straalstromen die we bij sommige sterrenstelsels uit de kern zien komen.

De winden van geïoniseerd gas worden meestal gezien in de röntgenspectra van AGN. Dat de spectrale streepjescode van de winden bij deze hoge energiën te zien zijn, betekent dat het gas hoog-geïoniseerd is. Daarnaast kunnen we relatief eenvoudig de omstandigheden bepalen waaronder de winden gelanceerd worden, omdat ze vaak waargenomen worden. Sinds de eerste detectie van een wind in een AGN, veertig jaar geleden, is ons begrip van deze uitstromen aanzienlijk toegenomen. Maar, zowel de locatie als de totale hoeveelheid van dit absorberende gas zijn nog steeds erg moeilijk te bepalen. Daarom is nog onzeker wat de invloed van deze winden op het het gas en de sterren in de omgeving is. We nemen aan dat in ieder geval de snelste van deze uitstromen heel krachtig zijn en een aanzienlijke hoeveelheid energie kunnen overdragen aan hun omgeving. Dit scenario wordt ondersteund door waarnemingen van grote structuren van gas die verbonden lijken te zijn met de kern van het sterrenstelsel. Er is ook bewijs voor onderdrukte stervorming en een nauwe relatie tussen de massa van het zwarte gat en de totale massa van de sterren in de kern (de 'bulge') van het sterrenstelsel. Het bestaan van deze AGN-feedback werd meer dan twee decennia geleden voorgesteld en is sindsdien uitgebreid bestudeerd.

Astronomen proberen de rol van AGN winden in de evolutie van sterrenstelsels en hun centrale zware zwarte gat te begrijpen. Winden die bestaan uit moleculen en die tot ver in het sterrenstelsel reiken, zijn al waargenomen. Maar, de details van het binnenste deel van de AGN zijn een stuk lastiger te zien. Met de huidige telescopen is de structuur van zelfs de meest nabije AGN niet ruimtelijk opgelost: de AGN verschijnt als een heldere stip,

vergelijkbaar met de sterren in de Melkweg. Om de geometrie van deze complexe omgeving te achterhalen, moeten we andere methoden gebruiken, zoals spectroscopie, polarimetrie en de waargenomen variatie in helderheid. Dit proefschrift heeft tot doel ons begrip van de AGN-omgeving te verdiepen, met de nadruk op de röntgen- en UV-spectra.

Hoofdstuk 2 is gericht op geïoniseerde uitstromen in een sterk variabele AGN. Specifiek onderzoeken we het tijdsafhankelijke gedrag, met als doel de verbinding met de fundamentele fysische eigenschappen van het gas te kwantificeren: de deeltjesdichtheid en de afstand tot het centrum van de AGN. Deze grootheden kunnen niet gemakkelijk worden afgeleid met conventionele technieken, maar ze zijn cruciaal voor ons begrip van hun oorsprong en hun impact op de omgeving. De dichtheid en afstand tot de kern kunnen worden afgeleid via de ionisatieparameter, die de ionisatietoestand van het gas beschrijft, maar alleen als één van de twee grootheden bekend is. Het is al tientallen jaren een belangrijke observationele uitdaging om deze degeneratie te doorbreken. Er is een belangrijk rechtstreeks verband tussen de gasdichtheid en zijn vermogen om veranderingen in de ioniserende flux te volgen, wat de mogelijkheid biedt om de gaseigenschappen onafhankelijk te meten. De reactie van de wind op variaties in de helderheid van de kern is niet altijd waarneembaar in tijdopgeloste spectra, omdat de tijdschaal van de variaties erg kort kan zijn. Om dit probleem aan te pakken, hebben we het dichtheidsafhankelijke gedrag onderzocht met behulp van Fouriertechnieken. Deze technieken maken het mogelijk om de variabiliteit te onderzoeken als een functie van tijdsfrequentie. Hiermee heeft het een veel hogere gevoeligheid voor variabiliteit dan technieken in het tijdsdomein. We passen ze toe op simulaties van tijdsvariabele fotogeïoniseerde uitstromen in een sterk variabele AGN, waarbij we een breed scala aan uitstroomeigenschappen bekeken. De analyse toont aan dat variabele absorptie kan leiden tot schijnbare tijdsvertragingen, vanwege de niet-lineaire aard van de reactie van het absorberende gas. Belangrijk is dat dit complexe gedrag een karakteristiek patroon achterlaat dat laat zien in hoeverre de geanalyseerde lichtkrommen lineair gecorreleerd zijn (bekend als de ‘coherentie’), die rechtstreeks verband houdt met de gasdichtheid. Tenslotte laten we zien dat het modelleren van de coherentie-energie spectra een veelbelovend hulpmiddel is om de gaseigenschappen te bepalen, vooral wanneer die wordt toegepast op gegevens van het toekomstige röntgenmissie *Athena*.

Hoofdstuk 3 bouwt voort op het theoretische kader dat is vastgesteld in Hoofdstuk 2, met als doel de kloof te overbruggen tussen de spectrale-timing modellen en bestaande waarnemingen van AGN’s. Specifiek gaat het in op de cruciale vraag: is de voorgestelde modelbenadering robuust tegen onzekerheden die gepaard gaan met de periodes tussen individuele waarnemingen met *XMM-Newton* en observationele ruis? We testen de afhankelijkheid van de spectrale-timing eigenschappen van de specifieke realisatie van de variabiliteit van de onderliggende emissiebron, die de tijdafhankelijke eigenschappen van de ionisatiegraad van het gas bepaalt. Gelukkig toont de analyse aan dat de observationele onzekerheden als gevolg van de emissievariabiliteit de gemodelleerde spectrale timingeigenschappen van de wind niet significant beïnvloeden. Met deze validatie in de hand kunnen we de techniek met vertrouwen toepassen op daadwerkelijke gegevens. Bovendien levert de analyse op dat de variabele absorptie door het uitstromende gas een duidelijk patroon achterlaat in de spec-

trale vermogensdichtheid van de waargenomen lichtkrommen. Daarnaast bevinden de in dit hoofdstuk gesimuleerde uitstromen zich in een ander regime van variabiliteit, dat intrinsiek zeer coherent is, waardoor dieper inzicht wordt verkregen in de complexe afhankelijkheid van de absorptierespons op de variabiliteit van het ioniserende continuüm.

Het werk dat wordt gepresenteerd in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 3 belooft een significante vooruitgang in het begrijpen van de natuurkunde van geïoniseerde uitstromen in AGN's. Door gebruik te maken van de kracht van fotoionisatiemodellering in combinatie met spectrale timing, banen de studies de weg voor een dieper begrip van deze raadselachtige fenomenen, waarbij uiteindelijk meer inzicht wordt verkregen in de complexe wisselwerking tussen supermassieve zwarte gaten en hun omgeving.

De AGN-omgeving bestaat uit verschillende gebieden met onderscheidende observationele eigenschappen. Één daarvan is de brede-lijn regio (BLR) die wordt gekenmerkt door zijn brede UV- en optische emissielijnen die vrijwel altijd zichtbaar zijn in AGN-spectra. De structuur en dynamische eigenschappen ervan zijn echter nog steeds slecht begrepen. Hoewel de BLR-spectra veel gemeenschappelijke kenmerken vertonen in verschillende objecten, werpen interessante variaties in bepaalde gevallen een blik op de mechanismen achter de vorming en instandhouding van dit medium. Daarom hebben we in Hoofdstuk 4 gelijktijdig verkregen röntgen, UV- en optische spectra van Mrk 110 geanalyseerd, met als doel de BLR te onderzoeken in een object met nogal ongebruikelijke eigenschappen. Door de emissielijnen met behulp van foto-ionisatiemodellen in een brede energieband te berekenen, vinden we structurele verschillen in dit object ten opzichte van typische BLR's. Bovendien tonen we aan dat de lijnen van optisch tot röntgen, die veel ionisatiestadia en twee ordes van grootte in helderheid bestrijken, relatief goed kunnen worden beschreven met de huidige aannames met betrekking tot het BLR-gas. Een betere beschrijving is mogelijk als een complexere omgeving, inclusief een klontige, equatoriale wind, wordt overwogen.

Het is vaak moeilijk de eigenschappen van AGN winden te bepalen door de sterk geïoniseerde absorptie in UV-spectra te onderzoeken. Dit is echter niet het geval voor de uitstromen in de nabijgelegen AGN I Zwicky 1 die behandeld wordt in Hoofdstuk 5. De hoogwaardige spectroscopische gegevens verkregen met Hubble COS maken een gedetailleerde analyse mogelijk van de absorptiecomponenten die geassocieerd zijn met de foto-geïoniseerde gasuitstromen. Naast het bepalen van de ionisatietoestand en de kolomdichtheid van het gas, ontdekken we dat het grootste deel van het absorberende gas de emissiebron in de achtergrond niet geheel en uniform bedekt. Door de eigenschappen van de wind in het UV te verbinden met die in de röntgenspectra, concluderen we dat de structuur van het gas waarschijnlijk klontig is. We ontdekken dat de stralingsdruk een belangrijke rol speelt bij de versnelling van deze klonten, terwijl we daar in nabijgelegen AGN zelden bewijs van hebben gezien. Deze bevinding stelt ons ook in staat de geometrische configuratie van deze winden te bepalen en te concluderen dat de uitgaande beweging als gevolg van dit versnellingsmechanisme naar ons toe is gericht. Tenslotte stellen we een scenario voor waarin zowel de absorberende wind als de onderliggende brede lijnregio bestaat uit gas dat uitstroomt.

Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5 ontrafelen niet alleen de eigenschappen van de gassen in de kernen van deze specifieke objecten, maar bieden ook waardevolle aanwijzingen voor ons

begrip van vergelijkbare fenomenen in actieve sterrenstelsels. Door de geheimen van deze krachtige galactische motoren bloot te leggen, krijgen we een dieper inzicht in hun rol bij het vormgeven van het universum.

Závěr

V jádru většiny galaxií, včetně té naší, se nachází supermasivní černá díra. Její přítomnost může být odhalena skrze působení na okolní prostředí během procesu pohlcování hmoty, tedy tzv. akrece. Pokud je v bezprostředním okolí černé díry dostatečné množství materiálu, toto pohlcování vede k uvolňování velkého množství energie ve formě elektromagnetického záření, které může i o řád překonat záření ze všech hvězd v dané galaxii. Tyto objekty se označují jako aktivní galaktická jádra (v angličtině active galactic nucleus, AGN). Kromě světla lze také pozorovat výrony hmoty z centrální části těchto objektů. Výrony ionizovaného plynu, unikající z gravitačního působení v okolí supermasivní černé díry o rychlosti od stovek kilometrů za sekundu až po téměř třetinu rychlosti světla, jsou pozorovány v mnoha AGN. Toto urychlování směrem ven z blízkosti černé díry je považováno za důsledek působení intenzivního tlaku záření nebo silných magnetických polí. Ta jsou mimo jiné zodpovědná za kolimaci výtrysků vycházejících z blízkosti černé díry skrz hostitelskou galaxii, pozorovaných v některých objektech.

Výrony ionizovaného plynu jsou běžně pozorovány ve spektrech AGN v rentgenové části spektra, což lze spojit se dvěma základními vlastnostmi: zaprvé, tento materiál je silně ionizovaný, díky čemuž se jeho projevy vyskytují až na tak vysokých energiích, a zadruhé, ona častá detekce naznačuje, že podmínek pro jeho urychlení ve směru od černé díry lze relativně snadno dosáhnout. Během čtyř desetiletí, která uplynula od prvního pozorování absorpce rentgenového záření na ionizovaném plynu v AGN, se naše chápání těchto výronů významně prohloubilo. Navzdory tomu je stále velmi obtížné určit jak jejich polohu, tak i celkové množství obsaženého plynu. Omezená znalost těchto klíčových vlastností pak brání pochopení vlivu těchto výronů na okolní prostředí. Přesto se očekává, že alespoň nejrychlejší z nich jsou schopné předávat značné množství energie do okolního prostředí. Tomuto scénáři napovídají i pozorování rozsáhlých struktur plynu prostupujících některé hostitelské galaxie, důkazy o potlačené tvorbě hvězd nebo úzká spojitost mezi hmotností centrální černé díry a celkové hmotnosti okolního seskupení hvězd (tzv. galaktické výduti). Existence této vazby mezi AGN a jejím okolím byla formulována před více než dvěma desetiletími a od té doby je centrem intenzivního výzkumu.

Role výronů v AGN pro evoluci hostitelských galaxií a jejich centrálních supermasivních černých děr zatím není zcela vysvětlena. Zatímco je možné provádět přímá pozorování výronů molekulárního plynu sahajících daleko do hostitelské galaxie, pozorování vnitřní části onoho hnacího stroje v centru není tak snadno dostupné. Vzdálenost dokonce i blízkých AGN způsobuje, že jejich prostorová struktura je nerozlišitelná současně dostupnými přístroji:

i to nejbližší aktivní galaktické jádro se jeví jen jako jasný bod, podobně jako hvězdy v Galaxii. k určení geometrických vlastností tohoto prostředí je proto nutné používat složité metody založené na spektroskopii, polarimetrii a analýze pozorované proměnnosti. Tato práce si klade za cíl prohloubit naše porozumění prostředí aktivních galaktických jader na základě jejich spektrálních projevů v rentgenové a ultrafialové části spektra.

Kapitola 2 je zaměřená na ionizované výrony vystavené vysoce proměnlivému záření z centra AGN. Konkrétně se zabýváme jejich časově závislým chováním s cílem kvantifikovat vztah mezi jejich proměnností a dalšími základními fyzikálními vlastnostmi: hustotou částic plynu a vzdáleností od středu AGN. Tyto veličiny nelze odvodit pomocí běžných metod, jsou však klíčové pro naše pochopení původu a vlivu výronů na okolní prostředí. Díky tomu, že jsou svázány definicí tzv. ionizačního parametru, který se používá k popisu ionizačního stavu plynu v pozorovaných spektrech, nemohou dosahovat libovolných hodnot. Ovšem nalézt způsob, jak určit tyto dvě veličiny nezávisle na sobě, je po desetiletí přetrvávajícím problémem. Hustota plynu však přímo ovlivňuje jeho schopnost následovat změny v toku dopadajícího ionizujícího záření, což v principu umožňuje změřit jeho vlastnosti nezávisle na sobě. Nicméně tato reakce nemusí být pozorovatelná v časově rozlišených spektrech, protože časová škála proměnnosti může být velmi krátká. Pro řešení tohoto problému jsme studovali chování plynu závislé na hustotě pomocí spektrálně rozlišené fourierovské analýzy, která umožňuje studium proměnnosti jako funkce frekvence, citlivé i na chování prakticky neměřitelné v původním, časově-závislém, signálu. Tento přístup jsme aplikovali na simulovaná pozorování fotoionizovaných výronů různých vlastností, vystavené silně proměnlivému záření z centra AGN. Výsledky analýzy napovídají, že v čase se měnící absorpce může vést k detekci zdánlivých zpoždění ve vývoji vlastností plynu z důvodu nelineární odezvy absorbujícího materiálu. Tato složitá odezva však zároveň zanechává charakteristický otisk v tom, do jaké míry jsou lineárně korelované analyzované signály (tj. do jaké míry jsou signály koherentní), a je tak přímo spojena s hustotou plynu. Závěrem ukazujeme, že právě modelování koherence jako funkce energie představuje slibný nástroj k určení vlastností plynu, zejména při použití dat z budoucí observatoře rentgenového záření *Athena*.

Kapitola 3 navazuje na teoretický rámec vybudovaný v kapitole 2 a snaží se překlenout propast mezi modelováním spektrálně rozlišené fourierovské analýzy a existujícími pozorováními AGN. Konkrétně se zabývá klíčovou otázkou: je navržený přístup k modelování robustní vůči nejistotám spojeným s mezerami oddělujícími jednotlivá pozorování observatoří *XMM-Newton* a s pozorovacím šumem? s cílem zodpovědět tuto otázku v práci testujeme závislost produktů této analýzy na konkrétní realizaci proměnnosti zdroje záření v pozadí, která určuje vývoj zastoupení iontů v plynu. z analýzy vyplývá, že pozorovací nejistoty spojené s proměnností ionizujícího záření nemají významný vliv na modelované vlastnosti produktů spektrálně rozlišené fourierovské analýzy. Tento závěr představuje důležitý krok k použití navrženého přístupu modelování na skutečná data. Výsledky také ukazují, že proměnná absorpce se výrazně projevuje i v měřitelné frekvenčně rozlišené amplitudě proměnnosti. Nadto se proměnlivá absorpce výronů simulovaná v této práci projevuje v odlišném, vysoce koherentním režimu, což poskytuje hlubší vhled do složité závislosti pozorovatelných projevů reakce absorbujícího materiálu na proměnném ionizujícím záření.

Práce prezentovaná v kapitolách 2 a 3 slibuje významný pokrok v porozumění fyzice výronů ionizovaného plynu v AGN. Využití modelování fotoionizace a následné spektrálně rozlišené fourierovské analýzy představuje cestu k hlubšímu porozumění těchto jevů a s nimi spojených procesů, které v důsledku pomohou osvětlit vzájemné působení mezi supermasivními černými dírami a jejich okolním prostředím.

Prostředí AGN se skládá z několika oblastí s odlišnými charakteristickými rysy. Jednou z nich je tzv. prostředí širokých spektrálních čar (v angličtině broad line region, BLR), projevující se příznačně širokými emisními čarami především v ultrafialové a optické části spektra. Navzdory tomu, že je v AGN téměř univerzálně přítomné, jeho struktura a dynamické vlastnosti stále nejsou známé. Zatímco spektra BLR sdílí mnoho společných rysů napříč jinak odlišnými objekty, studium objektů v nichž se jeví odlišně představuje příležitost k pochopení podmínek a mechanismů stojících za vznikem a udržováním tohoto prostředí. Proto jsme v kapitole 4 s cílem zkoumat vlastnosti BLR v AGN s poměrně neobvyklými vlastnostmi obrátili pozornost k objektu s označením Mrk 110, který byl současně pozorován v rentgenové, ultrafialové a optické části spektra. Širokospektrální modelování fotoionizovaného plynu, jež může vysvětlit zářivý výkon v pozorovaných emisních čárách, prokázalo strukturní rozdíly v tomto objektu ve srovnání s typickými BLR. Navíc jsme ukázali, že zatímco pozorované spektrální čáry, pokrývající široký rozsah ionizace a dva řády v zářivém výkonu, je možné relativně dobře popsat v rámci obecně používaného přístupu pro plyn BLR, věrnější charakterizace lze dosáhnout, pokud se zohlední složitější prostředí, včetně struktury plynoucí směrem ven blízko nad akrečním diskem, složené z nesouvislých shluků ionizovaného plynu.

Pozorování absorpce vysoce ionizovaným plynem z výronů AGN pozorovaných ve spektrech ultrafialového záření často neumožňují změřit jeho vlastnosti. To však neplatí pro výrony v nedalekém AGN I Zwicky 1 studovaném v kapitole 5. Data z HST COS s vysokým spektrálním rozlišením umožnila detailní analýzu systémů absorpčních čar spojených s výrony fotoionizovaného plynu. Kromě určení ionizačního stavu a tzv. sloupcové hustoty plynu měřené ve směru ke zdroji záření v pozadí jsme zjistili, že tento plyn nezakrývá celý zdroj stejnoměrně. Spojitost s výronem pozorovaným v rentgenové části spektra dále naznačuje, že plyn nemá souvislou strukturu. Na základě dat jsme také ukázali, že tlak záření má důležitou roli při urychlování těchto shluků plynu, což lze jinak jen zřídka prokázat u nedalekých AGN. Tento nález nám také umožnil určit geometrickou konfiguraci těchto výronů a také dospět k závěru, že pohyb plynu způsobený tímto urychlováním je směřován přímo k pozorovateli. v závěru kapitoly navrhujeme scénář schopný poskytnout souhrnné vysvětlení pro pohyb jak záření-absorbujících výronů, tak i prostředí širokých spektrálních čar v pozadí, jehož spektrální vlastnosti také naznačují pohyb směrem ven z centra AGN.

Kapitoly 4 a 5 poodhalují nejen vlastnosti zkoumaných složek vnitřního prostředí AGN v těchto konkrétních objektech, ale poskytují cenný vhled i pro naše obecné porozumění podobným jevům napříč aktivními galaxiemi. Odhalení tajemství těchto hnacích strojů v centrech galaxií v důsledku umožňuje hlubší pochopení jejich role při formování současné podoby vesmíru.

Acknowledgements

I cannot believe this is it! It doesn't feel like my PhD years in the Netherlands should come to an end so soon. It has been a wonderful journey which exceeded my expectations by orders of magnitude in all aspects. First and foremost, Elisa and Phil, thank you for believing in me from day one. I will forever be grateful for the opportunity to do my PhD under your supervision. Thank you for your unwavering support, patience and willingness to share your wisdom with me. It has allowed me to grow in so many ways and made my life so much better. Elisa, thank you for always finding time to answer my ever-growing list of questions about almost anything, regardless of how unimportant or repetitive they appeared.

I am grateful to Jerry Kriss for hosting me at the Space Telescope Science Institute in Baltimore, where I acquired a good portion of the UV spectral analysis skills needed in Chapter 5. Jerry and Missagh, thank you for generously sharing your expertise during my visit, for your hospitality, and for making sure I get the best of my time in Baltimore. I made many great memories during my stay that I will treasure forever.

A lot has happened since I entered the SRON building in Utrecht in September 2019, with eyes wide open – a little scared but also excited for all the PhD adventures to come. Giacomo, thank you for showing me around that day: I remembered absolutely nothing from it but understood immediately that I was in the best place possible, having fantastic colleagues like you around. Thank you for every thought and story you shared during our coffee breaks and lunches. Kristhell, you're such a gem. Thank you for living your values, always speaking your mind, and for being such a good friend! I hope the Dutch National Opera & Ballet will realise that the only right way forward is to do more classical ballet pieces, including the Nutcracker before every Christmas, obviously! Daniele, Ioanna, Missagh, Sascha, and Eleonora, I'm so glad to have had you around, regardless of the actual physical distance that changed quite a lot through the years. I have always felt your support and encouragement as if you were still just one door away. I couldn't have asked for better group members. Thank you for all our conversations, the countless advice you gave me, and for the many reunions at conferences and workshops. Missagh, I am so grateful for being your office mate and for having the chance to continue working with you afterwards. I wish more people had your kindness, patience, and wisdom, the world would be a lot better place.

Zhenlin, my PhD sister, I am so glad the two of us ended up here together! Thank you for always being around, for the great time we had on our trips and for never failing to find the right words to say and give me some perspective. Chen, your dedication and effort are

admirable and inspiring, you deserve the degree already for that. I enjoyed the time we spent together and I hope I will keep seeing your work in the years to come! Lydia, Yanling, Ben, Davide V, René, Ana Isabel, Irina, Manu, Anwesh, Xiaoyuan, Zuzanna, Jessica, Keqin, and other 'Young Minds of SRON', I'm grateful to have had you around throughout the years. Thank you for all the good times, silly laughs and deep conversations, your positive attitude and words of encouragement.

Jelle dP, thank you for always making sure that the computers at SRON were capable of doing what I needed and that I knew how to reach these goals. Thank you for working on SPEX and simultaneously our skills in using it, for the patience this all requires, and for the countless nice conversations during coffee breaks and lunches. Last but not least, thank you for the brilliant translation of the thesis summary into Dutch. Liyi, I am glad to have shared an office with you in the new building. I am grateful for the conversations we had, the time we spent looking at intriguing spectra together and the depths of atomic data in SPEX you guided me through. I have had a fantastic time at SRON also thanks to the company, shared wisdom, stories, and kind words of Aurora, Christina, Daniela, Davide L, Jan-Willem, Jean, Jelle K, Lucien, Terri, Michael, Russ, Esther, Frank, Martijn, Luciano, Rob, Roland, and many others who make the environment at SRON so welcoming and supportive. Thank you all for that!

Of course, this adventure would not have been possible without the Anton Pannekoek Institute for Astronomy. I am grateful to have spent my time here with the amazing crowd API has. Yves, Tuomo, Danté, Stefanie, Niek, Akshatha, Maëva, Devarshi, Milena, Mai, Wanga, Puspita, Niek, Matteo, Vlado, Jason, and many others, I have had such a great time with you! Thank you for making my second academic home so friendly and welcoming. Thanks to you, each and every API day was a happy day for me.

Nuki and Kevin, my dear friends, you will always be my Dutch-Curaçaoan family. Although my attempts to teach your bunnies about space ended with me trapped in their enclosure and them crunching their treats rather than numbers, I will treasure those moments forever, as well as those of our spectacular garden projects, game nights, barbecues and trips. Nuki, thank you for always helping me remember the truly important things in life and for never failing to give me the support I needed, regardless of how silly or straight delusional my decisions were. We kept the house-plant industry afloat during tough times and they know it! Ivan, how grateful I am to have you as a friend! May worm composting become the new norm so the price of all those fancy-looking composters goes down to reasonable values and we can have them all. Thank you for all the laughs, for game-filled afternoons and for sharing the science of fermenting veggies with me. Ipek, thank you for welcoming me to your amazing studio and introducing me to that fantastic way to keep my hands busy and leave my mind to get some rest. I don't think anyone could do better in explaining to me all those techniques and most importantly the sacred skill of aiming for good-enough's. Your numerous talents are so precious and inspiring. Thank you for being such a good mentor and friend. Caroline, how dare you. It's almost illegal to learn as much as I have from you. Thank you for sharing your thoughts, projects, hilarious jokes, and love for tiny containers.

Petr, my dear partner and friend, thank you for your unconditional support and limitless patience. This endeavour would have been a lot more difficult without you by my side. Thank you for being so caring throughout the years and especially in the last months, and for tirelessly watering the unreasonably large amounts of peas I decided to grow every spring.

Obrovské díky patří mojí rodině. Děkuji za vaši podporu ve všech mých rozhodnutích vydat se směrem, který mě dovedl až sem. Vím, že to kolikrát nebylo jednoduché a že vám moje cesty přivedly hodně starostí; o to víc si cením toho, že jste mě pokaždé nechali jít dál za mým snem a radovali se z mých úspěchů, i když to často znamenalo, že budu od vás zase o kus světa dál. Děkuji za všechno, co jste mě naučili: od poznávání sýkorek na okně, přes úsporné vykrajování těsta, čištění soustruhu, šití na stroji, rozlišování druhů plastů a nátěrových hmot, až po pečlivé plánování a provádění jakékoli práce. Děkuji, že jste mi předali touhu neustále se učit novým věcem, trpělivost a všímavost k okolnímu světu. Kubo, jsi super brácha. Díky za všechno tvé úsilí a za tvou vůli spolurealizovat naše v mnoha směrech náročné projekty. Těším se na další! Áďo, díky za krásnou obálku!

After having made so many nice memories and having met so many wonderful people, it is hard to say goodbye. How lucky I am to have such problems.