



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Neutron star parameter estimation from a NICER perspective

Riley, T.E.

Publication date

2019

Document Version

Other version

License

Other

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Riley, T. E. (2019). *Neutron star parameter estimation from a NICER perspective*.

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.

Bibliography

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2017, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101
- Abbott, B. P., et al. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 121, 161101
- . 2019, *Physical Review X*, 9, 011001
- Alford, M., & Sedrakian, A. 2017, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161104
- Alford, M. G., & Han, S. 2016, *European Physical Journal A*, 52, 62
- Alford, M. G., Han, S., & Prakash, M. 2013, *Phys. Rev. D*, 88, 083013
- AlGendy, M., & Morsink, S. M. 2014, *ApJ*, 791, 78
- Allison, R., & Dunkley, J. 2014, *MNRAS*, 437, 3918
- Alsing, J., Silva, H. O., & Berti, E. 2017, *ArXiv e-prints*, arXiv:1709.07889
- Annala, E., Gorda, T., Kurkela, A., & Vuorinen, A. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 120, 172703
- Antoniadis, J., Freire, P. C. C., Wex, N., et al. 2013, *Science*, 340, 448
- Ardeljan, N. V., Bisnovaty-Kogan, G. S., & Moiseenko, S. G. 2005, *MNRAS*, 359, 333
- Arnaud, K., Smith, R., & Siemiginowska, A. 2011, *Handbook of X-ray Astronomy*, ed. R. Ellis, J. Huchra, S. Kahn, G. Rieke, & P. B. Stetson (Cambridge University Press)
- Arzoumanian, Z., et al. 2014, in *Proceedings of SPIE*, Vol. 9144, *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*, 914420
- Arzoumanian, Z., Brazier, A., Burke-Spolaor, S., et al. 2018, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 235, 37
- Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., et al. 2013, *A&A*, 558, A33
- Azevedo-Filho, A., & Shachter, R. D. 2013, *ArXiv e-prints*, arXiv:1302.6782
- Badnell, N. R., Bautista, M. A., Butler, K., et al. 2005, *MNRAS*, 360, 458
- Bailes, M. 2010, in *IAU Symposium*, Vol. 261, *Relativity in Fundamental Astronomy: Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis*, ed. S. A. Klioner, P. K. Seidelmann, & M. H. Soffel, 212–217
- Baillet d’Etivaux, N., Guillot, S., Margueron, J., et al. 2019, *ArXiv e-prints*, arXiv:1905.01081
- Barcons, X., Barret, D., Decourchelle, A., et al. 2017, *Astronomische Nachrichten*, 338, 153
- Barnard, J. J., & Arons, J. 1982, *ApJ*, 254, 713
- Bauböck, M., Berti, E., Psaltis, D., & Özel, F. 2013a, *ApJ*, 777, 68

- Bauböck, M., Özel, F., Psaltis, D., & Morsink, S. M. 2015, *ApJ*, 799, 22
- Bauböck, M., Psaltis, D., & Özel, F. 2013b, *ApJ*, 766, 87
- . 2019, *ApJ*, 872, 162
- Bauböck, M., et al. 2012, *ApJ*, 753, 175
- Baym, G., Hatsuda, T., Kojo, T., et al. 2018, *Reports on Progress in Physics*, 81, 056902
- Becker, W., Trümper, J., Lommen, A. N., & Backer, D. C. 2000, *ApJ*, 545, 1015
- Bednarek, I., Haensel, P., Zdunik, J. L., Bejger, M., & Mańka, R. 2012, *Astronomy and Astrophysics*, 543, A157
- Behnel, S., Bradshaw, R., Citro, C., et al. 2011, *Computing in Science Engineering*, 13, 31
- Beloborodov, A. M. 2002, *ApJL*, 566, L85
- Berger, J. O., Bernardo, J. M., & Sun, D. 2009, *The Annals of Statistics*, 37, 905
- Bernardo, J. M. 1979, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 41, 113
- Berry, C. P. L., Mandel, I., Middleton, H., et al. 2015, *ApJ*, 804, 114
- Berti, E., & Stergioulas, N. 2004, *MNRAS*, 350, 1416
- Berti, E., White, F., Maniopoulou, A., & Bruni, M. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358, 923
- Betancourt, M. 2017, *ArXiv e-prints*, arXiv:1701.02434
- Bhattacharyya, S., Bombaci, I., Logoteta, D., & Thampan, A. V. 2017, *ApJ*, 848, 65
- Bhattacharyya, S., et al. 2005, *ApJ*, 619, 483
- Bildsten, L., Salpeter, E. E., & Wasserman, I. 1992, *ApJ*, 384, 143
- Bilous, A. V., & Watts, A. L. 2018, *arXiv e-prints*, arXiv:1812.10684
- Bilous, A. V., Watts, A. L., Harding, A. K., et al. 2019, submitted to *ApJL*, *A NICER View of PSR J0030+0451: evidence for a global-scale multipolar magnetic field*.
- Blaes, O. M., Blandford, R. D., Madau, P., & Yan, L. 1992, *ApJ*, 399, 634
- Bogdanov, S. 2013, *ApJ*, 762, 96
- Bogdanov, S., Dittman, A. J., Harding, A. K., et al. in prep., *Constraining the Neutron Star Mass-Radius Relation and Dense Matter Equation of State with NICER III: Model Description and Evaluation of Systematic Errors*, to be submitted to *ApJ*.
- Bogdanov, S., & Grindlay, J. E. 2009, *ApJ*, 703, 1557
- Bogdanov, S., Grindlay, J. E., & Rybicki, G. B. 2008, *ApJ*, 689, 407
- Bogdanov, S., Guillot, S., Ray, P., et al. 2019, submitted to *ApJLa*, *Constraining the Neutron Star Mass-Radius Relation and Dense Matter Equation of State with NICER I: the Millisecond Pulsar X-ray Data Set*.
- Bogdanov, S., Heinke, C. O., Özel, F., & Güver, T. 2016, *ApJ*, 831, 184
- Bogdanov, S., Lamb, F. K., Mahmoodifar, S., et al. 2019, submitted to *ApJLb*, *Constraining the Neutron Star Mass-Radius Relation and Dense Matter Equation of State with NICER II: Modeling Emission from Hot Spots on a Rapidly Rotating Neutron Star*.
- Bogdanov, S., Rybicki, G. B., & Grindlay, J. E. 2007, *ApJ*, 670, 668
- Brewer, B. J., & Foreman-Mackey, D. 2016, *ArXiv e-prints*, arXiv:1606.03757
- Buchner, J., Georgakakis, A., Nandra, K., et al. 2014, *A&A*, 564, A125

- Burwitz, V., Zavlin, V. E., Neuhäuser, R., et al. 2001, *A&A*, 379, L35
- Cackett, E. M., Miller, J. M., Bhattacharyya, S., et al. 2008, *ApJ*, 674, 415
- Cackett, E. M., Miller, J. M., Ballantyne, D. R., et al. 2010, *ApJ*, 720, 205
- Cadeau, C., Leahy, D. A., & Morsink, S. M. 2005, *ApJ*, 618, 451
- Cadeau, C., Morsink, S. M., Leahy, D., & Campbell, S. S. 2007, *ApJ*, 654, 458
- Cardoso, V., & Gualtieri, L. 2016, *Classical and Quantum Gravity*, 33, 174001
- Carney, M. F., Wade, L. E., & Irwin, B. S. 2018, *Phys. Rev. D*, 98, 063004
- Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M., et al. 2017, *Journal of Statistical Software, Articles*, 76, 1
- Carson, Z., Steiner, A. W., & Yagi, K. 2019, *Phys. Rev. D*, 99, 043010
- Cavecchi, Y., Watts, A. L., Braithwaite, J., & Levin, Y. 2013, *MNRAS*, 434, 3526
- Cavecchi, Y., Watts, A. L., & Galloway, D. K. 2017, *The Astrophysical Journal*, 851, 1
- Cavecchi, Y., et al. 2011, *ApJL*, 740, L8
- . 2016, *MNRAS*, 459, 1259
- Cerutti, B., & Beloborodov, A. M. 2017, *Space Sci. Rev.*, 207, 111
- Chaloner, K., & Verdinelli, I. 1995, *Statistical Science*, 10, 273
- Chambers, F. R. N., Watts, A. L., Cavecchi, Y., Garcia, F., & Keek, L. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477, 4391
- Chambers, F. R. N., Watts, A. L., Keek, L., Cavecchi, Y., & Garcia, F. 2019, *ApJ*, 871, 61
- Chamel, N., & Haensel, P. 2008, *Living Reviews in Relativity*, 11, 10
- Chan, C.-k., Psaltis, D., & Özel, F. 2013, *ApJ*, 777, 13
- Chang, P., & Bildsten, L. 2003, *ApJ*, 585, 464
- . 2004, *ApJ*, 605, 830
- Chatterjee, D., & Vidaña, I. 2016, *European Physical Journal A*, 52, 29
- Cherenkov Telescope Array Consortium, Acharya, B. S., Agudo, I., et al. 2019, *Science with the Cherenkov Telescope Array (World Scientific)*, doi:10.1142/10986
- Clarke, B., Clarke, J., & Yu, C. W. 2014, *Econometric Reviews*, 33, 337
- Colgan, J., Kilcrease, D. P., Magee, N. H., et al. 2016, *ApJ*, 817, 116
- Cook, G. B., Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. 1994, *ApJ*, 424, 823
- Cromartie, H., Fonseca, E., Ransom, S. M., et al. 2019, *arXiv e-prints*, arXiv:1904.06759
- Dagum, L., & Menon, R. 1998, *Computational Science & Engineering, IEEE*, 5, 46
- Dalcín, L., Paz, R., Storti, M., & D'Elía, J. 2008, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 68, 655
- De, S., Finstad, D., Lattimer, J. M., et al. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 121, 091102
- Degenaar, N., Miller, J. M., Chakrabarty, D., et al. 2015, *MNRAS*, 451, L85
- Demorest, P. B., Pennucci, T., Ransom, S. M., Roberts, M. S. E., & Hessels, J. W. T. 2010, *Nature*, 467, 1081
- Dexter, J. 2016, *MNRAS*, 462, 115
- Dexter, J., & Agol, E. 2009, *ApJ*, 696, 1616
- Drago, A., Lavagno, A., & Pagliara, G. 2014, *Phys. Rev. D*, 89, 043014
- Drago, A., Lavagno, A., Pagliara, G., & Pigato, D. 2016, *The European Physical Journal A*,

- 52, 40
- Drago, A., & Pagliara, G. 2016, *The European Physical Journal A*, 52, 41
- Drake, J. J., Marshall, H. L., Dreizler, S., et al. 2002, *ApJ*, 572, 996
- Droettboom, M., Caswell, T. A., Hunter, J., et al. 2018, *matplotlib/matplotlib v2.2.2*, doi:10.5281/zenodo.1202077
- Durant, M., Kargaltsev, O., Pavlov, G. G., et al. 2012, *ApJ*, 746, 6
- Dyks, J., & Harding, A. K. 2004, *ApJ*, 614, 869
- Edwards, R. T., Hobbs, G. B., & Manchester, R. N. 2006, *MNRAS*, 372, 1549
- Fabian, A. C., Iwasawa, K., Reynolds, C. S., & Young, A. J. 2000, *PASP*, 112, 1145
- Farr, W. M., Gair, J. R., Mandel, I., & Cutler, C. 2015a, *Phys. Rev. D*, 91, 023005
- Farr, W. M., Mandel, I., & Stevens, D. 2015b, *Royal Society Open Science*, 2, 150030
- Farr, W. M., Sravan, N., Cantrell, A., et al. 2011, *ApJ*, 741, 103
- Feroz, F., & Hobson, M. P. 2008, *MNRAS*, 384, 449
- Feroz, F., Hobson, M. P., & Bridges, M. 2009, *MNRAS*, 398, 1601
- Feroz, F., Hobson, M. P., Cameron, E., & Pettitt, A. N. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1306.2144
- Foreman-Mackey, D. 2017, *corner.py: Corner plots*, *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1702.002
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, *PASP*, 125, 306
- Forum, M. P. 1994, *MPI: A Message-Passing Interface Standard*, Tech. rep., Knoxville, TN, USA
- Galloway, D. K., Muno, M. P., Hartman, J. M., Psaltis, D., & Chakrabarty, D. 2008, *ApJS*, 179, 360
- Garcia, F., Chambers, F. R. N., & Watts, A. L. 2018a, *Physical Review Fluids*, 3, 024801
- . 2018b, *Physical Review Fluids*, 3, 123501
- Gelman, A., Carlin, J., Stern, H., et al. 2013, *Bayesian Data Analysis, Third Edition*, Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science (Taylor & Francis)
- Gelman, A., & Shalizi, C. R. 2012, *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 66, 8
- Gelman, A., Simpson, D., & Betancourt, M. 2017, *Entropy*, 19, 555
- Gendreau, K. C., et al. 2016, in *Proceedings of SPIE, Vol. 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 99051H
- Gil, J., Gronkowski, P., & Rudnicki, W. 1984, *A&A*, 132, 312
- Glampedakis, K., & Babak, S. 2006, *Classical and Quantum Gravity*, 23, 4167
- Glendenning, N. K., & Kettner, C. 2000, *A&A*, 353, L9
- Gonzalez-Caniulef, D., Guillot, S., & Reisenegger, A. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1904.12114
- Gough, B. 2009, *GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition*, 3rd edn. (Network Theory Ltd.)
- Gourgouliatos, K. N., & Hollerbach, R. 2018, *ApJ*, 852, 21
- Graff, P., Feroz, F., Hobson, M. P., & Lasenby, A. 2012, *MNRAS*, 421, 169
- . 2014, *MNRAS*, 441, 1741
- Gralla, S. E., Lupsasca, A., & Philippov, A. 2017, *ApJ*, 851, 137

- Greif, S. K., Raaijmakers, G., Hebel, K., Schwenk, A., & Watts, A. L. 2019, *MNRAS*, 485, 5363
- Grenier, I. A., & Harding, A. K. 2015, *Comptes Rendus Physique*, 16, 641
- Guillot, S. 2016, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 87, 521
- Guillot, S., & Rutledge, R. E. 2014, *ApJL*, 796, L3
- Guillot, S., Rutledge, R. E., & Brown, E. F. 2011, *ApJ*, 732, 88
- Guillot, S., Servillat, M., Webb, N. A., & Rutledge, R. E. 2013, *ApJ*, 772, 7
- Guillot, S., Kaspi, V. M., Archibald, R. F., et al. 2016, *MNRAS*, 463, 2612
- Güver, T., & Özel, F. 2013, *ApJL*, 765, L1
- Güver, T., Psaltis, D., & Özel, F. 2012, *ApJ*, 747, 76
- Haensel, P., et al. 2009, *A&A*, 502, 605
- Hamaguchi, K., et al. 2019, in 14th Workshop of International Astronomical Consortium for High Energy Calibration
- Handley, W. 2018, *The Journal of Open Source Software*, 3, doi:10.21105/joss.00849
- Handley, W., & Higson, E. 2018, *williamjameshandley/fgivenx v2.1.17*, doi:10.5281/zenodo.1404584
- Handley, W. J., Hobson, M. P., & Lasenby, A. N. 2015, *MNRAS*, 453, 4384
- Hansen, R. O. 1974, *Journal of Mathematical Physics*, 15, 46
- Harding, A. K., & Muslimov, A. G. 2001, *ApJ*, 556, 987
- . 2011, *ApJ*, 743, 181
- Harrison, E. R., & Tademaru, E. 1975, *ApJ*, 201, 447
- Hartle, J. B. 1967, *ApJ*, 150, 1005
- Hartle, J. B., & Thorne, K. S. 1968, *ApJ*, 153, 807
- Hebel, K., Holt, J. D., Menéndez, J., & Schwenk, A. 2015, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 65, 457
- Hebel, K., Lattimer, J. M., Pethick, C. J., & Schwenk, A. 2010, *Phys. Rev. Lett.*, 105, 161102
- . 2013, *The Astrophysical Journal*, 773, 11
- Heinke, C. O., Rybicki, G. B., Narayan, R., & Grindlay, J. E. 2006, *ApJ*, 644, 1090
- Heinke, C. O., Cohn, H. N., Lugger, P. M., et al. 2014, *MNRAS*, 444, 443
- Hessels, J. W. T., et al. 2006, *Science*, 311, 1901
- Heyl, J. S. 2004, *ApJ*, 600, 939
- Higson, E. 2018a, *ejhigson/dyPolyChord: v0.0.5 (2018-09-30)*, doi:10.5281/zenodo.1439193
- . 2018b, *The Journal of Open Source Software*, 3, 916
- Higson, E., Handley, W., Hobson, M., & Lasenby, A. 2018a, *Statistics and Computing*, doi:10.1007/s11222-018-9844-0
- . 2018b, *Bayesian Analysis*, 13, 873
- . 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 2044
- Ho, W. C. G., & Heinke, C. O. 2009, *Nature*, 462, 71
- Ho, W. C. G., Kaplan, D. L., Chang, P., van Adelsberg, M., & Potekhin, A. Y. 2007, *MNRAS*, 375, 821

- Ho, W. C. G., & Lai, D. 2001, *MNRAS*, 327, 1081
- Hobbs, G. 2012, arXiv e-prints, arXiv:1205.6273
- Hobbs, G. B., Edwards, R. T., & Manchester, R. N. 2006, *MNRAS*, 369, 655
- Hogg, D. W., Bovy, J., & Lang, D. 2010, ArXiv e-prints, arXiv:1008.4686
- Hunter, J. D. 2007, *Computing in Science & Engineering*, 9, 90
- Huppenkothen, D., Bachetti, M., Stevens, A. L., et al. 2019, *ApJ*, 881, 39
- Iglesias, C. A., & Rogers, F. J. 1996, *ApJ*, 464, 943
- James, O., von Tunzelmann, E., Franklin, P., & Thorne, K. S. 2015, *Classical and Quantum Gravity*, 32, 065001
- Jeffreys, H. 1961, *Theory of Probability*, 3rd edn. (Oxford, England: Oxford)
- Jeffreys, H. F. R. S. 1946, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 186, 453
- Johnson, T. J., Venter, C., Harding, A. K., et al. 2014, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 213, 6
- Jones, B. J. T. 2017, *Precision Cosmology* (Cambridge University Press)
- Jones, E., Oliphant, T., Peterson, P., et al. 2001–, *SciPy: Open source scientific tools for Python*, [Online; accessed 21.06.2019]
- Kajava, J. J. E., Nättilä, J., Latvala, O.-M., et al. 2014, *MNRAS*, 445, 4218
- Kass, R. E., & Raftery, A. E. 1995, *Journal of the American Statistical Association*, 90, 773
- Kijak, J., & Gil, J. 2003, *A&A*, 397, 969
- Kluyver, T., Ragan-Kelley, B., Pérez, F., et al. 2016, in *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*, ed. F. Loizides & B. Schmidt, IOS Press, 87 – 90
- Koranda, S., Stergioulas, N., & Friedman, J. L. 1997, *The Astrophysical Journal*, 488, 799
- Kramer, M., & Wex, N. 2009, *Classical and Quantum Gravity*, 26, 073001
- Kullback, S., & Leibler, R. A. 1951, *Ann. Math. Statist.*, 22, 79
- Kumar, B., & Landry, P. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1902.04557
- Kurkela, A., Fraga, E. S., Schaffner-Bielich, J., & Vuorinen, A. 2014, *ApJ*, 789, 127
- Lackey, B. D., & Wade, L. 2015, *Phys. Rev. D*, 91, 043002
- Landry, P., & Essick, R. 2019, *Phys. Rev. D*, 99, 084049
- Lattimer, J. M. 2012, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62, 485
- Lattimer, J. M., & Prakash, M. 2016, *Phys. Rep.*, 621, 127
- Lattimer, J. M., & Steiner, A. W. 2014a, *European Physical Journal A*, 50, 40
- . 2014b, *ApJ*, 784, 123
- Lee, H., Kashyap, V. L., van Dyk, D. A., et al. 2011, *ApJ*, 731, 126
- Lentati, L., Alexander, P., Hobson, M. P., et al. 2014, *MNRAS*, 437, 3004
- Lewis, A. 2013a, *Phys. Rev. D*, 87, 103529
- Lewis, N. 2013b, ArXiv e-prints, arXiv:1308.2791
- Li, J. J., & Sedrakian, A. 2019, *ApJ*, 874, L22
- Lim, Y., & Holt, J. W. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 121, 062701
- Lindblom, L. 1992, *ApJ*, 398, 569

- . 2018, *Phys. Rev. D*, 97, 123019
- Lo, K. H., Miller, M. C., Bhattacharyya, S., & Lamb, F. K. 2013, *ApJ*, 776, 19
- Lockhart, W., Gralla, S. E., Özel, F., & Psaltis, D. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1904.11534
- Lommen, A. N., Kipphorn, R. A., Nice, D. J., et al. 2006, *ApJ*, 642, 1012
- Lommen, A. N., Zepka, A., Backer, D. C., et al. 2000, *ApJ*, 545, 1007
- Long, M., Romanova, M. M., & Lovelace, R. V. E. 2007, *MNRAS*, 374, 436
- . 2008, *MNRAS*, 386, 1274
- Ludlam, R. M., Miller, J. M., Bachetti, M., et al. 2017, *ApJ*, 836, 140
- Ludlam, R. M., Miller, J. M., Arzoumanian, Z., et al. 2018, *ApJL*, 858, L5
- MacKay, D. J. 2003, *Information Theory, Inference and Learning Algorithms* (Cambridge University Press)
- Mahmoodifar, S., & Strohmayer, T. 2016, *ApJ*, 818, 93
- Malik, T., Alam, N., Fortin, M., et al. 2018, *Phys. Rev. C*, 98, 035804
- Manko, V. S., Mielke, E. W., & Sanabria-Gómez, J. D. 2000, *Phys. Rev. D*, 61, 081501
- Margueron, J., Hoffmann Casali, R., & Gulminelli, F. 2018a, *Phys. Rev. C*, 97, 025805
- . 2018b, *Phys. Rev. C*, 97, 025806
- McNeil Forbes, M., Bose, S., Reddy, S., et al. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1904.04233
- Melatos, A., & Phinney, E. S. 2001, *PASA*, 18, 421
- Miller, J. M., Parker, M. L., Fuerst, F., et al. 2013, *ApJ*, 779, L2
- Miller, M. C. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1312.0029
- Miller, M. C., & Lamb, F. K. 1998, *ApJL*, 499, L37
- . 2015, *Astrophysical Journal*, 808, 31
- . 2016, *European Physical Journal A*, 52, 63
- Miller, M. C., Lamb, F. K., Dittmann, A. J., et al. 2019, submitted to *ApJL*, *PSR J0030+0451 Mass and Radius from NICER Data and the Implications for the Properties of Neutron Star Matter*.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. 1973, *Gravitation* (San Francisco: W.H. Freeman and Co.)
- Mitchell, J. P., Braithwaite, J., Reisenegger, A., et al. 2015, *MNRAS*, 447, 1213
- Montaña, G., Tolós, L., Hanauske, M., & Rezzolla, L. 2019, *Phys. Rev. D*, 99, 103009
- Morsink, S. M., Leahy, D. A., Cadeau, C., & Braga, J. 2007, *ApJ*, 663, 1244
- Most, E. R., Weih, L. R., Rezzolla, L., & Schaffner-Bielich, J. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, 120, 261103
- Mueller, E., & Eriguchi, Y. 1985, *A&A*, 152, 325
- Nandra, K., Barret, D., Barcons, X., et al. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1306.2307
- Nättilä, J., Miller, M. C., Steiner, A. W., et al. 2017, *A&A*, 608, A31
- Nättilä, J., & Pihajoki, P. 2018, *A&A*, 615, A50
- Nättilä, J., Steiner, A. W., Kajava, J. J. E., Suleimanov, V. F., & Poutanen, J. 2016a, *Astronomy & Astrophysics*, 591, A25
- Nättilä, J., et al. 2016b, *A&A*, 591, A25
- Neiswanger, W., & Xing, E. 2016, arXiv e-prints, arXiv:1606.00787

- Obergaulinger, M., & Aloy, M. Á. 2017, in Journal of Physics Conference Series, Vol. 932, Journal of Physics Conference Series, 012043
- Oertel, M., Hempel, M., Klähn, T., & Typel, S. 2017, Reviews of Modern Physics, 89, 015007
- Oliphant, T. E. 2007, Computing in Science Engineering, 9, 10
- Oppenheimer, J. R., & Volkoff, G. M. 1939, Phys. Rev., 55, 374
- Özel, F., Baym, G., & Güver, T. 2010, Phys. Rev. D, 82, 101301
- Özel, F., & Freire, P. 2016, ARA&A, 54, 401
- Özel, F., & Psaltis, D. 2009, Phys. Rev. D, 80, 103003
- . 2015, ApJ, 810, 135
- Özel, F., Psaltis, D., Arzoumanian, Z., Morsink, S., & Bauböck, M. 2016a, ApJ, 832, 92
- Özel, F., Psaltis, D., Güver, T., et al. 2016b, ApJ, 820, 28
- Patruno, A., & Watts, A. L. 2012, arXiv e-prints, arXiv:1206.2727
- Payne, D. J. B., & Melatos, A. 2004, MNRAS, 351, 569
- Pechenick, K. R., Ftaclas, C., & Cohen, J. M. 1983, ApJ, 274, 846
- Perez, F., & Granger, B. E. 2007, Computing in Science Engineering, 9, 21
- Philippov, A. A., Cerutti, B., Tchekhovskoy, A., & Spitkovsky, A. 2015a, ApJ, 815, L19
- Philippov, A. A., & Spitkovsky, A. 2018, ApJ, 855, 94
- Philippov, A. A., Spitkovsky, A., & Cerutti, B. 2015b, ApJ, 801, L19
- Pihajoki, P., Mannerkoski, M., Nättilä, J., & Johansson, P. H. 2018, ApJ, 863, 8
- Piro, A. L., & Bildsten, L. 2005, ApJ, 629, 438
- Pitkin, M., Reid, S., Rowan, S., & Hough, J. 2011, Living Reviews in Relativity, 14, 5
- Pons, J. A., Walter, F. M., Lattimer, J. M., et al. 2002, ApJ, 564, 981
- Poutanen, J., & Beloborodov, A. M. 2006, MNRAS, 373, 836
- Poutanen, J., & Gierliński, M. 2003, MNRAS, 343, 1301
- Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., Günther, H. M., et al. 2018, AJ, 156, 123
- Prigozhin, G., Gendreau, K., Doty, J. P., et al. 2016, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9905, Proc. SPIE, 99051I
- Psaltis, D., & Johannsen, T. 2012, ApJ, 745, 1
- Psaltis, D., & Özel, F. 2014, ApJ, 792, 87
- Psaltis, D., Özel, F., & Chakrabarty, D. 2014, ApJ, 787, 136
- Pu, H.-Y., Yun, K., Younsi, Z., & Yoon, S.-J. 2016, ApJ, 820, 105
- Raaijmakers, G., Riley, T. E., & Watts, A. L. 2018, MNRAS, 478, 2177
- Raaijmakers, G., Riley, T. E., Watts, A. L., et al. 2019, ApJL in press, *A NICER View of PSR J0030+0451: Implications for the Dense Matter Equation of State.*
- Radhakrishnan, V., & Cooke, D. J. 1969, Astrophysical Letters, 3, 225
- Radice, D., Perego, A., Hotokezaka, K., et al. 2018, ApJL, 869, L35
- Raithel, C. A., Özel, F., & Psaltis, D. 2016, ApJ, 831, 44
- . 2017, ApJ, 844, 156
- Ray, P. S., Arzoumanian, Z., Ballantyne, D., et al. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1903.03035
- Read, J. S., Lackey, B. D., Owen, B. J., & Friedman, J. L. 2009, Phys. Rev. D, 79, 124032
- Reardon, D. J., Hobbs, G., Coles, W., et al. 2016, MNRAS, 455, 1751

- Reisenegger, A. 2009, *A&A*, 499, 557
- Riley, T. E., Raaijmakers, G., & Watts, A. L. 2018, *MNRAS*, 478, 1093
- Riley, T. E., & Watts, A. L. 2019, submitted to *ApJS*, *X-PSI: A prototype open-source package for neutron star X-ray Pulsation Simulation and Inference*.
- Riley, T. E., Watts, A. L., Bogdanov, S., et al. 2019, *ApJL* in press, *A NICER view of PSR J0030+0451: millisecond pulsar parameter estimation*.
- Robert, C. 2007, *The Bayesian Choice: From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation*, Springer Texts in Statistics (Springer New York)
- Robert, C. P., Chopin, N., & Rousseau, J. 2009, *Statist. Sci.*, 24, 141
- Rogers, A. 2015, *MNRAS*, 451, 17
- . 2017, *MNRAS*, 465, 2151
- Romani, R. W. 1990, *Nature*, 347, 741
- Ryan, F. D. 1995, *Phys. Rev. D*, 52, 5707
- Salmi, T., Nättilä, J., & Poutanen, J. 2018, *A&A*, 618, A161
- Salvatier, J., Wiecki, T. V., & Fonnesbeck, C. 2016, *PeerJ Computer Science*, 2, e55
- Schneider, P., Ehlers, J., & Falco, E. E. 1992, *Gravitational Lenses* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York), 112, doi:10.1007/978-3-662-03758-4
- Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. 1983, *Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects* (New York, Wiley-Interscience)
- Shaw, A. W., Heinke, C. O., Steiner, A. W., et al. 2018, *MNRAS*, 476, 4713
- Shlens, J. 2014, *CoRR*, abs/1404.2000, arXiv:1404.2000
- Skilling, J. 2006, *Bayesian Anal.*, 1, 833
- Speagle, J. S. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1904.02180
- Spitkovsky, A., Levin, Y., & Ushomirsky, G. 2002, *ApJ*, 566, 1018
- Stein, L. C., Yagi, K., & Yunes, N. 2014, *ApJ*, 788, 15
- Steiner, A. W. 2014, bamr: Bayesian analysis of mass and radius observations, *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1408.020
- Steiner, A. W., Heinke, C. O., Bogdanov, S., et al. 2018, *MNRAS*, 476, 421
- Steiner, A. W., Lattimer, J. M., & Brown, E. F. 2010, *ApJ*, 722, 33
- . 2013, *ApJL*, 765, L5
- . 2016, *European Physical Journal A*, 52, 18
- Stergioulas, N. 2003, *Living Reviews in Relativity*, 6, doi:10.1007/lrr-2003-3
- Stergioulas, N., & Friedman, J. L. 1995, *ApJ*, 444, 306
- Stevens, A. L., Fiege, J. D., Leahy, D. A., & Morsink, S. M. 2016, *ApJ*, 833, 244
- Strobel, K., Schaab, C., & Weigel, M. K. 1999, *A&A*, 350, 497
- Suleimanov, V., Poutanen, J., Revnivtsev, M., & Werner, K. 2011a, *ApJ*, 742, 122
- Suleimanov, V., Poutanen, J., & Werner, K. 2011b, *A&A*, 527, A139
- Talts, S., Betancourt, M., Simpson, D., Vehtari, A., & Gelman, A. 2018, arXiv e-prints, arXiv:1804.06788
- Taylor, A. N., & Kitching, T. D. 2010, *MNRAS*, 408, 865
- Tews, I., Carlson, J., Gandolfi, S., & Reddy, S. 2018a, *ApJ*, 860, 149

- Tews, I., Lattimer, J. M., Ohnishi, A., & Kolomeitsev, E. E. 2017, *ApJ*, 848, 105
- Tews, I., Margueron, J., & Reddy, S. 2018b, *Phys. Rev. C*, 98, 045804
- The LIGO Scientific Collaboration, & the Virgo Collaboration. 2018, arXiv e-prints, arXiv:1811.12907
- The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, Abbott, B. P., et al. 2018, arXiv e-prints, arXiv:1811.12907
- Thorne, K. S. 1980, *Reviews of Modern Physics*, 52, 299
- Timokhin, A. N., & Arons, J. 2013, *MNRAS*, 429, 20
- Tolman, R. C. 1939, *Phys. Rev.*, 55, 364
- Tolos, L., Centelles, M., & Ramos, A. 2017, *The Astrophysical Journal*, 834, 3
- van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011, *Computing in Science Engineering*, 13, 22
- van Doesburgh, M., van der Klis, M., & Morsink, S. M. 2018, *MNRAS*, 479, 426
- Vehtari, A., & Ojanen, J. 2012, *Statist. Surv.*, 6, 142
- Veitch, J., Raymond, V., Farr, B., et al. 2015, *Phys. Rev. D*, 91, 042003
- Viganò, D., Rea, N., Pons, J. A., et al. 2013, *MNRAS*, 434, 123
- Vincent, F. H., Gourgoulhon, E., & Novak, J. 2012, *Classical and Quantum Gravity*, 29, 245005
- Vincent, F. H., Paumard, T., Gourgoulhon, E., & Perrin, G. 2011, *Classical and Quantum Gravity*, 28, 225011
- Vincent, F. H., Bejger, M., Róžańska, A., et al. 2018, *ApJ*, 855, 116
- Vousden, W. D., Farr, W. M., & Mandel, I. 2016, *MNRAS*, 455, 1919
- Watts, A., et al. 2015, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 43
- Watts, A. L. 2012, *ARA&A*, 50, 609
- . 2019, arXiv e-prints, arXiv:1904.07012
- Watts, A. L., Andersson, N., Chakrabarty, D., et al. 2016, *Reviews of Modern Physics*, 88, 021001
- Watts, A. L., Yu, W., Poutanen, J., et al. 2019, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 62, 029503
- Webb, N. A., & Barret, D. 2007, *ApJ*, 671, 727
- Weih, L. R., Most, E. R., & Rezzolla, L. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1905.04900
- Wilkinson, T., Patruno, A., Watts, A., & Uttley, P. 2011, *MNRAS*, 410, 1513
- Wilms, J., Allen, A., & McCray, R. 2000, *ApJ*, 542, 914
- Xu, J., van Dyk, D. A., Kashyap, V. L., et al. 2014, *ApJ*, 794, 97
- Yagi, K., & Yunes, N. 2013, *Phys. Rev. D*, 88, 023009
- . 2017a, *Classical and Quantum Gravity*, 34, 015006
- . 2017b, *Phys. Rep.*, 681, 1
- Yagi, K., et al. 2014, *Phys. Rev. D*, 90, 063010
- Zdunik, J. L., Bejger, M., Haensel, P., & Gourgoulhon, E. 2006, *A&A*, 450, 747
- Zdunik, J. L., & Haensel, P. 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 551, A61

- Zhang, S., Santangelo, A., Feroci, M., et al. 2019, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 62, 29502
- Zingale, M., Eiden, K., Cavecchi, Y., et al. 2018, arXiv e-prints, arXiv:1810.04720

Contribution from co-authors

The position in the author list is identical to that in the articles published by or submitted to a journal. The introduction is composed, in part, from the introductions to the articles featured in the other chapters listed below; therefore all authors are listed as authors of the introduction. T. E. Riley is the principal author of the research reported in this thesis, and A. L. Watts is the principal co-author.

Chapter 1: Introduction

T. E. Riley, A. L. Watts, G. Raaijmakers, S. Bogdanov, P. S. Ray, R. M. Ludlam, S. Guillot, Z. Arzoumanian, C. L. Baker, A. V. Bilous, D. Chakrabarty, K. C. Gendreau, A. K. Harding, W. C. G. Ho, J. M. Lattimer, S. M. Morsink, and T. E. Strohmayer

Chapter 2: On parametrised cold dense matter equation of state inference

T. E. Riley, G. Raaijmakers, and A. L. Watts

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 478, 1, 1093–113

Chapter 3: *X-PSI*: A prototype open-source package for neutron star X-ray Pulsation Simulation and Inference

T. E. Riley & A. L. Watts

Submitted to the Astrophysical Journal Supplement Series

Chapter 4: A *NICER* view of PSR J0030+0451: millisecond pulsar parameter estimation

T. E. Riley, A. L. Watts, S. Bogdanov, P. S. Ray, R. M. Ludlam, S. Guillot, Z. Arzoumanian, C. L. Baker, A. V. Bilous, D. Chakrabarty, K. C. Gendreau, A. K. Harding, W. C. G. Ho, J. M. Lattimer, S. M. Morsink, and T. E. Strohmayer

Accepted (with minor revisions) for publication in an ApJ Letters Focus Issue on NICER

A. V. Bilous, A. L. Watts, A. K. Harding, **T. E. Riley**, Z. Arzoumanian, S. Bogdanov, K. C. Gendreau, P. S. Ray, S. Guillot, W. C. G. Ho, and D. Chakrabarty
A NICER view of PSR J0030+0451: evidence for a global-scale multipolar magnetic field

Featured in this thesis is an adapted excerpt (a figure and paragraph) from this manuscript which was submitted to the same ApJ Letters NICER Focus Issue

Publications

These articles, of which T. E. Riley is a co-author, are closely related to the articles constituting this thesis, and have been published by, accepted by, or submitted to a peer-review journal. The position in the author list is identical to that in the articles published by or submitted to a journal.

1. G. Raaijmakers, **T. E. Riley**, and A. L. Watts
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 478, 2177–2192
A pitfall of piecewise-polytropic equation of state inference
2. G. Raaijmakers, **T. E. Riley**, A. L. Watts, S. K. Grief, S. M. Morsink, K. Hebeler, A. Schwenk, T. Hinderer, S. Nissanke, S. Guillot, Z. Arzoumanian, S. Bogdanov, D. Chakrabarty, K. C. Gendreau, W. C. G. Ho, J. M. Lattimer, R. M. Ludlam, and M. T. Wolff
Accepted for publication in an ApJ Letters Focus Issue on *NICER*
A NICER view of PSR J0030+0451: implications for the dense matter equation of state
3. S. Bogdanov, and 26 co-authors including **T. E. Riley**
Submitted to an ApJ Letters Focus Issue on *NICER*
Constraining the Neutron Star Mass-Radius Relation and Dense Matter Equation of State with NICER I: the Millisecond Pulsar X-ray Data Set
4. S. Bogdanov, F. K. Lamb, S. Mahmoodifar, M. C. Miller, S. Morsink, **T. E. Riley**, T. Strohmayer, A. Tung, A. L. Watts, A. Dittmann, D. Chakrabarty, S. Guillot, Z. Arzoumanian, and K. C. Gendreau
Submitted to ApJ Letters
Constraining the Neutron Star Mass-Radius Relation and Dense Matter Equation of State with NICER II: Modeling Emission from Hot Spots on a Rapidly Rotating Neutron Star
5. A. L. Watts, Yu Wenfei, J. Poutanen, Zhang Shu, S. Bhattacharyya, S. Bogdanov, Ji Long, A. Patruno, **T. E. Riley**, P. Bakala, and 66 other co-authors
Science China Physics, Mechanics & Astronomy, Volume 62, Issue 2, article id. 29503
Dense matter with eXTP

Nederlandse Samenvatting

Het overkoepelende probleem.— Het onderzoek gepresenteerd in dit proefschrift is ontstaan uit een project met als doel—en dus gefinancierd voor—het bestuderen van dichte materie door middel van fluxoscillaties gedetecteerd tijdens thermonucleaire röntgenuitbarstingen (zie Watts 2012, voor een fysisch en observationeel overzicht van deze fenomenen, welke hieronder alleen kort worden behandeld). Een thermonucleaire “uitbarster” is een neutronenster in een dubbelstersysteem die massa opneemt van de niet-compacte lage-massa ster in het systeem, wat resulteert in een helder, maar niet-katastrofisch, röntgensignaal dat veel korter duurt dan de tijdschaal waarop accretie plaatsvindt.

Uitbarstingen zijn dynamische processen op observationele tijdschalen van $\mathcal{O}(10^0\text{--}10^1)$ s (Galloway et al. 2008). De helderheid van al deze kortstondige fenomenen versterkt snel (de *stijging*) en vervalt vervolgens gedurende een langere periode (de *staart*). Vaak kunnen er, voor een subgroep van uitbarstende bronnen en een subgroep van hun uitbarstingen, oscillaties verschijnen en verdwijnen tijdens de stijging van de helderheid tot in de staart, wat gepaard gaat met fractionele amplitudeontwikkeling: bovendien kan de frequentie van de oscillaties, wanneer deze detecteerbaar is, ongeveer $\mathcal{O}(10^0)$ Hz verschuiven. Voor uitgebreide en uniforme datamining van gearchiveerde oscillerende uitbarstingen waargenomen met de *Ross X-ray Timing Explorer* zie Bilous & Watts (2018). Gelijktijdig focust hedendaagse theorie zich op mechanismen voor de ontsteking en verspreiding van thermonucleaire verbranding van opgenomen plasma op het oppervlak van de ster, wat leidt tot rotatiegemoduleerde asymmetrieën in de straling (e.g., Spitkovsky et al. 2002; Heyl 2004; Piro & Bildsten 2005; Cavecchi et al. 2011, 2013, 2016, 2017; Garcia et al. 2018a,b; Chambers et al. 2018; Zingale et al. 2018; Chambers et al. 2019).

Over de jaren heen is het originele overkoepelende doel, met behulp van oscillerende thermonucleaire uitbarstingen de toestandsvergelijking (EOS) van extreem dichte materie bepalen, vanzelfsprekend vervangen door meer fundamentele problemen die eerst moesten worden aangepakt om vooruitgang te boeken. Deze problemen bevinden zich in het algemeen op de scheiding tussen fysische theorie en observaties: een verbindende taal, waarschijnlijkheidsgebaseerde statistiek, is dus noodzakelijk.

Bayesiaanse statistiek is populair in gerelateerde vakgebieden—e.g., het wordt uitvoerig gebruikt door de zwaartekrachtsgolvengemeenschap, en nog breder in precisiekosmologie. Er bestaan moderne, high-performance softwaretools voor algemene Bayesiaanse berekeningen die openbaar zijn. De populariteit (i.e., divers gebruik) van zulke tools en technieken zijn

een functie van robuustheid, toegankelijkheid, flexibiliteit en mogelijkheid tot uitbreiden. Om dergelijke middelen te benutten gebruiken we een Bayesiaans perspectief in dit proefschrift om telescoopdata te genereren.

Dit heeft als gevolg dat zo'n perspectief als volledig toepasselijk wordt beschouwd voor de op te lossen problemen. Een goed voorbeeld hiervan is de aanname van een universeel gedeelde toestandsvergelijking¹ voor lage-temperatuur supranucleaire materie in een neutronenster: Een Bayesiaanse formulatie van stralingsfenomenen kan van nature een kans toewijzen aan fysische modellen wanneer gedeelde EOS parameters zijn geformuleerd als een realisatie van een multidimensionaal willekeurig proces. Ondanks de nuttige eigenschappen van een Bayesiaans perspectief is er geen consensus over of het een objectieve en complete oplossing is voor het beschrijven van een kader voor het modelleren van alle fysische processen; discussies focussen zich in het algemeen op de filosofie en de uitvoering van het specificeren van de a-priori-kans, wat frequent terugkomt in dit proefschrift. Niettemin is het een kader dat aantoonbaar krachtig is gebleken als we kijken naar andere moderne astrofysische vakgebieden.

Een groot deel van dit proefschrift focust op de statistische formulatie van het modelleren van pulsprofielen als wiskundige objecten en aansluitend op het berekenen, via interfacing, van deze objecten met open-source software voor probabilistische integratie via het genereren van data.² Om dit proces handzaam te maken zijn er praktische beperkingen op de formulatie van de waarschijnlijkheidsfunctie waar we ons van bewust moeten zijn. Vanzelfsprekend bestaan begrijpelijke fysische modellen van thermonucleaire röntgen-uitbarstingen met efficiënte software implementatie voor het genereren van signalen—en dus waarschijnlijkheidsevaluatie—nog niet. Het is voornamelijk om deze overwegingen dat we afwijken van het doel om de toestandsvergelijking van dichte materie te leren middels het bestuderen van data van uitbarstingoscillaties; deze afwijking is echter vooral oppervlakkig, omdat blijkt dat de benodigde simplificaties vereiste componenten zijn voor elke toekomstige studie dat als doel heeft om informatie in zulke data te gebruiken, of tenminste cruciaal zijn in de ontwikkeling van zulke studies.

Aan de andere kant genereren milliseconde-pulsars (MSP) die door rotatie worden aangedreven pulsaties die stabiel zijn gedurende *vele* rotatieperioden en dus veel langere tijdschalen: als gevolg hiervan zijn deze MSPs een natuurlijke basis voor het ontwikkelen van de infrastructuur voor het modelleren van pulsprofielen, voordat er wordt overgegaan op het bestuderen van meer complexe bronnen. De symmetrie in de tijdstranslatie van een signaal gegenereerd door een enkele rotatie van een ster is een zeer belangrijk concept: zo'n signaal kan

¹Dat binnen een zekere tolerantie stijgt wanneer de dichtheid stijgt (i.e., richting de korst) en dat perturbatieve effecten verklaart zoals een eindige temperatuur, magnetische velden en accretiehistorie.

²Er worden verschillende notaties gebruikt voor zulke objecten in verschillende hoofdstukken; specifiek Hoofdstuk 2 gebruikt duidelijke een andere notatie, maar heeft ook een veel breder theoretisch bereik dan Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4. In principe zouden we de notatie kunnen aanpassen voor globale consistentie, maar op deze manier is visuele associatie van objecten in een bepaald hoofdstuk met het bijbehorende artikel gemakkelijker. In praktische termen zou het een hoop gedetailleerde aanpassingen vereisen en het reproduceren van een subset van de figures die bepaalde notaties gebruiken.

computationeel worden opgelost—in een mate die voldoende is voor het gebruiken van geavanceerde spectrale-timing telescopen—door een enkele processor in een niet-belemmerende tijd. Hieruit volgt dat statistisch modelleren handzaam is wanneer een model, geconstrueerd met behulp van tijdstranslatie symmetrie, synthetische data kan genereren die qua structuur lijkt op observaties.

We focussen ons op de formulatie en uitvoering van datagedreven modelleren en het creëren van een softwarepakket dat dit doet. Als gevolg hiervan blijft er weinig aandacht over voor het merendeel van de fysische processen die plaatsvinden in neutronensterren, met uitzondering van de stralingsprocessen die vereist zijn voor de (al dan niet primitieve) modellen voor röntgen pulsprofielen. Een sprekend voorbeeld is het ontbreken van een gedetailleerde behandeling of zelfs beschrijving van de microfysische processen (interactie tussen subatomaire en fundamentele deeltjes) die bepalend zijn voor de EOS; we voeren het onderzoek inderdaad bijna compleet uit zonder referentie naar zulke natuurkunde,³ in plaats daarvan beschouwen we een EOS model slechts als een ruimte van $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $\varepsilon \mapsto P$ functies die voldoen aan bepaalde fysische voorwaarden,⁴ en die worden gebruikt met inachtneming van de algemene relativiteitstheorie. Er is veel onderzoek gedaan naar effectieve representaties van gedetailleerde microfysische EOS met simpele geparаметriseerde functies (e.g., Read et al. 2009), maar we gaan hier niet verder in op het ontstaan van zulke modellen.

De infrastructuur voor het modelleren van pulsprofielen was verre van compleet bij de start van dit onderzoek en op het moment van schrijven geldt dit nog steeds. We hebben enige vooruitgang geboekt richting een coherent raamwerk voor het modelleren en richting op maat gemaakte software die openbaar wordt wanneer Hoofdstuk 3 van dit proefschrift wordt gepubliceerd zodat deze verder kan worden ontwikkeld in het publieke domein. Een hoofddoel van het originele projectvoorstel was om te onderzoeken of—in de context van een bekend datageneratie proces—systematische vertekening ontstaat in de geschatte gezamenlijke a-posteriori-kans van de massa en radius van neutronensterren door een inaccurate behandeling van *hinder*-natuurkunde in een pulsprofiel model (van een oscillerende uitbarsting). Op een betwistbare manier hebben we expliciet gedemonstreerd, door het analyseren van echte *NICER* data, dat zulke schattingen inderdaad gevoelig zijn voor het model dat aangenomen wordt voor het stralingsveld op de oppervlakte en dat tegelijkertijd meerdere van zulke modellen data genereren met dezelfde structuur als echte data—tenminste wanneer dit grafisch wordt geïnspecteerd door een mens. Zo'n bevinding is misschien wel van grotere waarde dan een soortgelijke conclusie getrokken in de theoretische context van een bekend datageneratie proces.

We hebben nu de basiscapaciteit om te beginnen met het modelleren van sterren zoals door rotatie aangedreven MSPs, die zeer stabiele signalen genereren. Helaas zijn onze

³Duidelijk uit de beknoptheid van Sectie 1.1.1.

⁴Deze fysische voorwaarden zijn lokale hydrodynamische stabiliteit en causaliteit, wat betekent dat de snelheid van geluid voldoet aan $0 < \sqrt{dP/d\varepsilon} < c$ (e.g., Lattimer 2012), met een aantal uitzonderingen met betrekking op discontinu of niet-differentieerbare $P \mapsto \varepsilon$ functies die EOS met sterke faseovergangen representeren (e.g., Alford et al. 2013).

huidige capaciteiten objectief bekeken primitief: er zijn vele onopgeloste problemen die zelfs voor zulke sterren nog moeten worden aangepakt. Daarbuiten moet het raamwerk voor het modelleren van pulsprofielen nog worden ontwikkeld dat toepasbaar is op sterren die signalen genereren die dynamisch zijn op korte tijdschalen; slechts dan zijn we in staat de volledige potentie te benutten van telescoopmissies in de nabije toekomst die gericht zijn op het bestuderen van exotische materie. Dit werk vereist toegang tot geavanceerde faciliteiten zoals *NICER*; openbare tools en publieke archieven; toegang tot high-performance computersystemen; en bovenal een gezond en divers team voor cognitie.

Hoofdstuk 2.— De drijfveer van dit werk is de behoefte voor een theoretische generalisatie van hoog-energetische astrofysische literatuur over de afleiding van een gedeelde EOS; in het bijzonder Özel & Psaltis (2009); Steiner et al. (2010, 2013); Lattimer & Steiner (2014a,b); Özel et al. (2016b); Nätilä et al. (2016b); Raithel et al. (2017); Alsing et al. (2017). Gezamenlijk spraken deze auteurs de behoefte uit naar het probabilistisch uitdrukken van modelparameters, gebaseerd op observationele datasets. Er moet echter nog veel werk worden verzet om de relaties tussen verschillende methodes grondig te begrijpen vanuit een probabilistisch oogpunt. In de kern onderzoekt dit werk de *ruimte* waarin we de gezamenlijke a-priori-kansverdeling moeten definiëren wanneer parametersets binnen een theorie (algemene relativiteitstheorie) deterministisch zijn verbonden; een overzicht van de staat van het veld, het bepalen van de hoogenergetische EOS, wordt gepresenteerd in de context van een generaliserend raamwerk.

Hoofdstuk 3.— Gezien de interesse in het modelleren van röntgen pulsprofielen vanuit de wetenschappelijke gemeenschap is het van nut om een openbare software te ontwikkelen dat vrij gebruikt kan worden om: (i) te helpen bij het ontwikkelen van missies en surveys door bijvoorbeeld statistische voorspellingen te doen van de prestaties voor bepaalde astrofysische en instrumentale modellen; en (ii) het statistisch analyseren van verkregen observationele data. In dit hoofdstuk documenteren we de openbare *X-ray Pulsation Simulation and Inference* software (*X-PSI*),⁵ ontwikkeld voor Bayesiaanse analyse van spectrale-timing van röntgenpulsaties afkomstig van de roterende, stralende oppervlakte van neutronensterren. De sturende prioriteit van ons algoritme en softwareontwikkeling is het bouwen van een gestroomlijnd pakket van statistische applicaties; het is dus noodzakelijk een compromis te vinden tussen computationele kosten, hoe verfijnd het model is, flexibiliteit en robuustheid. We richten ons op het gebruik van high-performance computersystemen voor Bayesiaanse parameterschatting door het verbinden van numerieke waarschijnlijkheidsfuncties met populaire openbare sampling software.

Gaandeweg bij de ontwikkeling van *X-PSI* beschouwen we twee bovengenoemde types van discretisatie van het computationele domein: oppervlakediscretisatie voor de implementatie van de waarschijnlijkheidsfunctie; en beeldvlakdiscretisatie voor het crosschecken van pulsprofiel integratie-algoritmes, voor de toevoeging van lage-order rotatieperturbaties van de metriek, en voor visualisatiedoelinden. In Hoofdstuk 3 bediscussiëren we het integreren van pulsprofielen ten behoeve van het uitvoeren van efficiënte statistische berekeningen, maar

⁵Specifiek, v0.1; <https://github.com/ThomasEdwardRiley/xpsi>.

verder verwijzen we de lezer naar de meest recente technische documentatie die beschikbaar is bij het *X-PSI* softwarepakket voor een verslag van algoritmevormgeving en fysische details die ontbreken in dit proefschrift.

Hoofdstuk 4.— We passen het modelleren van pulsprofielen toe op *X-ray Timing Instrument* (*XTI*) observaties van de door rotatie aangedreven MSP PSR J0030+0451. PSR J0030+0451 is ontdekt als een radiopulsar door Lommen et al. (2000) en vervolgens geïdentificeerd als een röntgenpulsar (Becker et al. 2000), heeft een spinfrequentie van 205 Hz en bevindt zich op een afstand van 325 ± 9 pc (Arzoumanian et al. 2018). In dit werk bepalen we de totale massa en de equatoriale radius van de ster, respectievelijk gedefinieerd als de massa in de Schwarzschild metriek en de radiuscoördinaat in de Schwarzschildkaart. Er zijn geen onafhankelijke a-priori restricties op de massa of radius. Daarnaast beschouwen we een reeks geparametriseerde modellen voor de spatiële structuur van de hete gebieden op de oppervlakte van de ster; deze reeks is datagedreven omdat we ons model aanpassen aan de hand van het ontstaan van niet-verhelderende complexiteit a-posteriori. Terwijl elke parameter die de hete gebieden beschrijft schertsend kan worden omschreven als een *hinder* vanuit het oogpunt van het bestuderen van dichte materie, zijn alle aldus afgeleide marginale bepalingen over de structuur van de ruimtetijd afhankelijk van de hinderdetails; bovendien heeft de structuur van de hete stralende gebieden betrekking op pulsarevolutie en emissiefysica en is daarom op zichzelf al interessant.

Onze analyse gebruikt het *X-PSI* pakket (Hoofdstuk 3), dat waarschijnlijkheidsfunctionaliteit van röntgenpulsaties koppelt aan openbare statistische sampling software voor gebruik op high-performance computersystemen. We passen nested sampling (Skilling 2006) toe via MultiNest (Feroz et al. 2009) en rapporteren over het gebruik van een beurs van 500,000 core-uren op de Nederlandse supercomputer Cartesius.⁶ Het werk dat we presenteren in dit hoofdstuk is de eerste echte applicatie van het *X-PSI* pakket en draagt bij aan de eerste gezamenlijke bepaling van massa en radius gebaseerd op MSP data van *NICER*. Het is ook een van de eerste studies die datagedreven statistische berekeningen demonstreert—in de context van het modelleren van pulsprofielen—op een grote schaal; dit werd mogelijk gemaakt door de bevoorrechte toegang tot een van de eerste geavanceerde röntgen spectrale-timing telescoopmissies die naar verwachting in het komende decennium online komen.

⁶<https://userinfo.surfsara.nl/systems/cartesius>.