

Schlussbericht zum Vorhaben Röntgenastronomie an der Hamburger Sternwarte

Förderkennzeichen 50 OR 1701

1. Aufgabenstellung

Mit den im Rahmen der Verbundforschung durch das Projekt 50 OR 1701 zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel wurde die Hamburger Sternwarte in die Lage versetzt, die in verschiedenen XMM-Newton eingeworbene Beobachtungszeit zeitnah auszuwerten, zu analysieren und in referierten Journalen zu veröffentlichen. Dies sollte vorwiegend im Rahmen von Dissertationsarbeiten geschehen, die an der Hamburger Sternwarte angefertigt wurden, sowie durch die Unterstützung durch geeignete Postdocs, die in diesem Projekt ebenfalls für kürzere Zeit eingebunden waren. Speziell wurden in in diesem Projekt die Daten analysiert, die im Rahmen des Beobachtungsantrags ``The origin of the diffuse X-ray emission along the galactic ridge (Proposal 078029)", ``High-energy irradiation of WASP-69 b: powering an extreme planetary wind (Proposal 078356)", ``Do coronal polar spots exist? (Proposal 078150)", ``Exploring the X-ray emission of magnetic ApBp stars (Proposal 078032)" and "Coronal cycles in solar analog stars (Proposal 078334)" analysiert.

2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das Projekt 50 OR 1701 war unter den an der Hamburger Sternwarte existierenden Bedingungen durchzuführen. Die Projektdurchführung hatte insbesondere in einem universitären Kontext zu erfolgen. Die grundlegenden Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung waren die Zurverfügungstellung geeigneter Computerhardware und Computersoftware sowie die seitens des PIs und seiner Arbeitsgruppe vorhandene Expertise in der Planung, Durchführung, Analyse und Veröffentlichung von Röntgenbeobachtungen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens 50 OR 1701 orientierten sich fundamental an den von XMM-Newton durchgeführten Beobachtungen, die den zeitlichen Ablauf der Arbeiten bestimmten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabenbeginn

Das Vorhaben wurde begonnen mit der Kenntnis der bekannten Eigenschaften der Instrumente, die sich an Bord des Röntgenobservatoriums XMM-Newton befinden, sowie der Eigenschaften der von der ESA bereitgestellten Analyse-Software SAS. Die verwendete Fachliteratur besteht aus der einschlägigen astrophysikalischen Literatur und ist in den Projektpublikationen ausführlich angegeben.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der PI des vorliegenden Projekts ist international sehr gut vernetzt. Die Zusammenarbeit im Projekt erfolgte u.a. mit Wissenschaftlern im europäischen Ausland, mit denen Daten z.T. gepoolt wurden, um durch diese Maßnahmen größere und signifikantere Stichproben zu erhalten. Die Ergebnisse der

durchgeführten Arbeiten wurden bei verschiedenen Konferenzen im internationalen Kontext präsentiert sowie in referierten Zeitschriften publiziert.

6. Verwendung der Zuwendung

Der überwiegende Teil der Zuwendung diente zur Bestreitung von Personalkosten, die in Form von Dissertationsstudenten und Postdocs anfielen. Ein insgesamt kleiner Teil der Mittel wurde für Reisekosten sowie weitere bei der Durchführung des Projektes lokal anfallende Kosten verwendet.

Personalkosten:

Name	Zeit	Status
D. Hintz	2017-2020	Student
E. Nagel	2018-2019	Student
P. Ioannidis	2020	Postdoc
U. Wolter	2017-2020	Postdoc

7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Projektes mussten Analysen, Auswertungen und Interpretationen von aktuellsten Satellitendaten, die mit XMM-Newton aufgenommen wurden, durchgeführt sowie dazugehörige, zur Interpretation der Röntgendaten gewonnene bodengebundene Daten, aufbereitet und im Zusammenhang mit den XMM-Newton wissenschaftlich interpretiert werden; des Weiteren waren intensive Literaturrecherchen nötig. Um die Projektziele adäquat erreichen zu können, musste deshalb in einem breiten Wellenlängenbereich gearbeitet werden, eine solche Vorgehensweise ist für die moderne Astrophysik typisch und für viele Projekte unumgänglich.

Die im Rahmen des XMM-Newton-Beobachtungsprogramms von unserer Gruppe eingeworbenen Daten beruhen auf der Verfügbarkeit der Instrumente XMM-Newton RGS, XMM-Newton EPIC und XMM-Newton OM, die eine einzigartige instrumentelle Konfiguration darstellt, die den gesamten Spektralbereich zwischen 1,5 Ångstrom und 3000 Ångstrom abdeckt. In dem Bereich besteht eine Lücke zwischen 100 Ångstrom und 2000 Ångstrom, die durch die interstellare Absorption verlorengeht. Dies ist ein für die Evaporation von extrasolaren Planeten entscheidender Spektralbereich.

Die an der Hamburger Sternwarte durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten führten zu einer Reihe von Publikationen in der wissenschaftlichen Literatur, die unter Punkt 9 dieses Berichts detailliert aufgelistet sind. Die im Projekt erhaltenen Ergebnisse wurden des Weiteren bei einer Reihe von Konferenzen präsentiert. Die dabei entstandenen Beiträge wurden aber nicht im einzelnen aufgelistet. Das im Antrag vorgeschlagene wissenschaftliche Arbeitsprogramm wurde abgearbeitet. Eine ausführliche wissenschaftliche Beschreibung der Projektergebnisse findet sich in den in referierten Journalen erschienenen Publikationen unter Punkt 9. Wir geben daher in diesem Bericht lediglich eine kurze Zusammenfassung der erhaltenen Projekt-Highlights.

In dem beschriebenen Projekt geht es um den Themenkomplex der Beziehungen zwischen einem Zentralstern und ihn umgebenden Exoplaneten, d.h. ein Themenkomplex, der bereits seit einigen Jahren einen der Schwerpunkte unserer Arbeit bildet und der anhand von mehreren Datensätzen

bearbeitet wurde.

Im Einzelnen handelt es sich um die folgenden Arbeiten:

(2.1) Röntgen-Nachbeobachtungen von XMM-slew survey Quellen

Der physikalische Ursprung der Röntgenemission, die vom sog. "galactic ridge" beobachtet wird, ist selbst mehr als 30 Jahre nach ihrer Entdeckung immer noch mit großer Ungewissheit belastet. Das sog. "galactic ridge" kann man über mehr als die Hälfte der galaktischen Scheibe nachweisen, die Oberflächenhelligkeit erreicht das Maximum in der Nähe des galaktischen Zentrums (siehe z.B. Revnivtsev et al., 2006, MNRAS, 373, L11). Die beobachtete Röntgenstrahlung ist ziemlich hart und bei Energien oberhalb von ca. 2 keV, wo Absorptionseffekte bestenfalls eine untergeordnete Rolle spielen, ist das Röntgenspektrum des "galactic ridge" ähnlich dem Spektrum eines heißen, optisch dünnen Plasma im Stoßgleichgewicht, also dem Röntgenspektrum, das z.B. in stellaren Koronen angetroffen wird. Die hohe Temperatur des Plasmas wird u.a. durch die Signaturen des Eisenlinienkomplexes bei 6.7 keV angezeigt, in einigen Fällen kann man auch die neutrale Eisenlinie bei 6.4 keV sehen.

In Rahmen des von uns beantragten XMM-Newton Programms wurden eine Reihe von Spektralaufnahmen von aktiven Sternen aufgenommen und untersucht, um die genauen Spektralparameter wie Temperatur und Emissionsmaß zu bestimmen. Diese Daten werden benötigt, um mit Hilfe der im Rahmen der eROSITA-Himmelsdurchmusterung entdeckten RSCVn Systeme deren Beiträge zum diffusen Röntgenhintergrund modellieren zu können. Speziell wurden untersucht die Objekte HU Vir, HD 356156, BD+422437, HD 79826, HD 347929, TYC 5277-1521-1, BH Cvn, HD 80492, HD 180235, HD 30900, CPD-69 912, EI Aqr, FG Uma und TY Pyc. Die Spektren wurden mit einem 3-T APEC Modell mit variabler Absorption und Elementhäufigkeit angepasst. In ca. 70% der Objekte finden wir Spektren, die konsistent mit dem bekannten Spektrum des "galactic ridge" sind. In ca. 80% der Objekte finden wir die sog. Eisen-"linie" bei 6.7 keV, ein Produkt der hohen Temperaturen der unterliegenden Koronen, aber keine Evidenz für das Auftreten der Eisenfluoreszenzlinie bei 6.4 keV.

(2.2) Der Exoplanet WASP 69b und die Hochenergie-Umgebungen extrasolarer Planeten

Exoplaneten werden notwendigerweise durch ihren Zentralstern bestrahlt. Diese Bestrahlung erfolgt im Wesentlichen im optischen Bereich erfolgt; diese Strahlung wird allerdings in den tiefen Schichten der Planetenatmosphäre absorbiert und führt -- je nach Abstand -- zu einer planetaren Effektivtemperatur im Bereich von 2000-3000 K. Die höher-energetische XUV- und Röntgenstrahlung wird aber -- analog wie bei der Erde -- in den dünnen äußeren Schichten der Planetenatmosphäre absorbiert und führt dort zu einer substanziellen Heizung. Die absorbierenden Atmosphärenschichten werden so auf erheblich höhere Temperaturen als die eigentliche Effektivtemperatur des Planeten gebracht. Die entscheidende Frage ist nun die, ob die sog. Entweichtemperatur des Planeten in der aufgeheizten äußeren Atmosphäre überschritten wird oder nicht. Wird sie nicht überschritten, findet nur ein sogenannter "Jean's escape" statt, d.h. ein molekularer Ausfluss mit sehr geringer Massenausflußrate. Wird hingegen die Entweichtemperatur überschritten, tritt das Phänomen eines sogenannten "hydrodynamic escape" auf, d.h., die Atmosphäre entweicht als Ganzes, ähnlich dem Parker-Wind der Sonne (Lammer et al., 2003, ApJ, 598, L121).

Die Erforschung der Einstrahlung auf extrasolare Planeten durch den Zentralstern bildete einen wichtigen Arbeitsschwerpunkt in der Röntgengruppe der Hamburger Sternwarte in den letzten Jahren.

Dem Stern WASP-69 kommt in diesem Kontext eine besondere Bedeutung zu, da der Planet WASP-69 b u.U. der am stärksten evaporierende heiße Neptun ist, der einen Wind ca. 50 mal stärkeren planetaren Wind antreiben sollte als der prototypische aktive Stern HD189733~b. Mit Hilfe der von uns durchgeführten XMM-Newton Beobachtung gelang erstmals die definitive Entdeckung von WASP-69 als Röntgenquelle mit einer Röntgenleuchtkraft von $1.6 \cdot 10^{28}$ erg/s, was konsistent mit dem Röntgenfluss einer ROSAT RASS-Quelle im Abstand von 60 arcsec ist. Diese Entdeckung legte den Grundstein für eine weitere Serie von Arbeiten über WASP 69b, bei dem mit Hilfe von CARMENES planetare Absorptionssignale in der He 10830 Linie entdeckt, wurden, die durch die Röntgenstrahlung vom Zentralstern angeregt wird.

(2.3) Magnetische Zyklen von späten Sternen

Eine der markantesten beobachteten Eigenschaften der Sonnenaktivität ist das zyklische Auftreten der verschiedenen solaren Aktivitätsindikatoren im 11- bzw. 22-Jahre Rythmus; bezeichnenderweise ist wohl die längste Zeitreihe astronomischer Messungen die des Sonnenzyklus (gemessen durch die relative Sonnenfleckenzahl) als Funktion der Zeit ! Während die Phänomenologie des Sonnenzyklus ausführlich studiert und beschrieben ist, sind die physikalischen Ursachen der beobachteten Zykluseigenschaften (wie z.B. Zyklusperiode, Wanderung der aktiven Breiten mit Zyklusphase etc.) immer noch unbekannt. Astronomen haben die Tendenz, bei der Sonne beobachtete Eigenschaften auf alle sonnenähnliche Sterne zu allen Zeiten zu extrapolieren, und man ist wohl beraten, derartige Extrapolationen empirisch zu hinterfragen.

Eine zentrales Thema der Forschungsarbeiten unserer Gruppe in den letzten Jahrzehnten war die systematische Untersuchung von Aktivitätszyklen in einer breiten Gruppe von kühlen Sternen in den verschiedenen Spektralbereichen (bevorzugt Röntgenbereich und UV Emission von Chromosphäre). In diesem Zusammenhang wurde das von uns im Jahr 2002 begonnene Programm zur Verfolgung der Aktivitätszyklen von α Cen sowie HD81809 und 61 Cyg A/B fortgeführt; seit 2013 werden diese Beobachtungen (außer von α Cen, das nur von der Südhalbkugel beobachtbar ist) mit unserem TIGRE Teleskop in Mexico simultan begleitet. Die Zyklusuntersuchungen des Weiteren wurden auf anderen Sterne ausgedehnt, zum einen ϵ Eri und HR1099, d.h., sehr aktiven Sternen vom Typ K und RS CVn. Kurzperiodische Zyklen (mit einer Periode von 4 Monaten) wurden auf dem F-Stern τ Boo gefunden, die gleiche Periodizität scheint im Röntgenbereich zu bestehen.

(2.4) Röntgenemission von "heißen" Sternen

Wegen der Abwesenheit äußerer Konvektionszonen sollten Sterne vom Typ A keine Röntgenemission aufweisen. In den letzten Jahren durchgeführte Beobachtungen legen allerdings nahe, dass in Sternen von diesem Typ möglicherweise doch intrinsische Röntgenemissionsprozesse aufweisen können. Unter den Hauptreihensternen sind die vielversprechendsten Kandidaten in dieser Hinsicht die sog. Ap/Bp Sterne, die häufig Anzeichen von (starken) Magnetfeldern sowie unübliche Elementhäufigkeiten zeigen; sie sind auch -- normalerweise -- relativ langsame Rotatoren für ihren Spektraltyp. Neuere Beobachtungen weiterer Ap/Bp-Sterne haben allerdings zu anderen, teilweise verwirrenden Resultaten geführt. Der "Prototyp" dieser Sternklasse, das Objekt IQ Aur gehört zur Klasse der sogenannten α^2 CVn Variablen, deren Veränderlichkeit mit der Rotationsperiode durch große Sternflecken verursacht wird. Allerdings stellte sich der eigentliche Prototyp α^2 CVn stellte sich als röntgen-dunkel heraus. Kein Zusammenhang zwischen Röntgenleuchtkraft und Magnetfeld wurde in einer Stichprobe von magnetischen A-Sternen gefunden, insbesondere wurde eine Reihe von Sternen mit bekanntem, sehr starkem Magnetfeld nicht im Röntgenbereich entdeckt. Offensichtlich reicht die Spektralklassifikation alleine nicht aus, um ein hinreichendes Kriterium für das Auftreten von

Röntgenemission zu entwickeln. Wir führten deshalb eine Untersuchung weiterer derartiger Kandidaten im Röntgenbereich durch, insbesondere im kritischen Übergangsbereich bei Temperaturen um 14000 K.

Wir konnten Röntgenemission des chemisch pekuliaren Sterns CU Vir entdecken; mit einer Röntgenleuchtkraft von $3 \cdot 10^{28}$ erg/s ist CU Vir nur moderat Röntgen-hell, das Spektrum stellte sich aber als extrem hart heraus im Vergleich zu anderen Sternen ähnlichen Typs. Als Ergebnis unserer Untersuchungen schlagen wir vor, dass die Röntgenemission von CU Vir auroralen Ursprungs ist, was eine enge Verbindung zwischen Radio- und Röntgenmission erwarten lassen würde. Diese Verbindung zwischen Röntgen- und Radioeigenschaften wurde in weiteren Systemen dieses Typs erkundet.

8. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt ist in der Grundlagenforschung angesiedelt, insofern liegt der eigentliche Nutzen des Projekts vornehmlich im Gewinn neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse. Zusätzlich führte die Projektdurchführung zu einer weiteren Profilierung der Röntgengruppe der Hamburger Sternwarte. Insbesondere ergibt sich für die Hamburger Sternwarte die Möglichkeit, die Röntgenbeobachtungen an Bord von XMM-Newton durch intensive Bodenkampagnen mit dem von der Hamburger Sternwarte betriebenen robotischen TIGRE-Teleskop zu unterstützen, des Weiteren sind die geleisteten Arbeiten auch bereits als Vorbereitung für die eROSITA-Mission zu sehen, die im Jahr 2019 gestartet wurde und an der die Hamburger Sternwarte beteiligt ist.

wurden in diesem Projekt die Daten analysiert, die im Rahmen des Beobachtungsantrags "The origin of the diffuse X-ray emission along the galactic ridge (Proposal 078029)", "High-energy irradiation of WASP-69 b: powering an extreme planetary wind (Proposal 078356)", "Do coronal polar spots exist? (Proposal 078150)", "Exploring the X-ray emission of magnetic Ap/Bp stars (Proposal 078032)" and "Coronal cycles in solar analog stars (Proposal 078334)" analysiert.

9. Publikationen

Aus der Projektarbeit gingen die folgenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen hervor, die alle in anerkannten Zeitschriften erschienen sind.

Coffaro et al., 2020, A&A, 636A49:
An X-ray activity cycle on the young solar-like star ϵ Eridani

Czesla, S. et al., 2019, Astronomy & Astrophysics, Volume 629, id.A5
X-ray emission in the enigmatic CVSO 30 System

France, K. et al., 2018, ApJ Supp 239, 16F:
Far-ultraviolet Activity Levels of F, G, K, and M Dwarf Exoplanet Host Stars

Klocová T. et al., 2017, A&A, 607, 66:
Time-resolved UVES observations of a stellar flare on the planet host HD 189733 during primary transit

King, G. W. et al. 2018, MNRAS, 478, 1193
The XUV environments of exoplanets from Jupiter-size to super-Earth

Nortmann et al., 2018, Science, 362, p.1388:

Ground-based detection of an extended helium atmosphere in the Saturn-mass exoplanet WASP-69b

Leto, P. et al., 2020, MNRAS, 493, 4657:

Evidence for radio and X-ray auroral emissions from the magnetic B-type star ρ Oph A

Lalitha, S. et al., 2018, MNRAS, 477, 808

Atmospheric mass-loss of extrasolar planets orbiting magnetically active host stars

Nazé, Y. et al., 2020, MNRAS, 493, 251:

Three discoveries of γ Cas analogues from dedicated XMM-Newton observations of Be stars

Mittag et al., 2017A&A, 600, A119:

Four-month chromospheric and coronal activity cycle in τ Boötis

Orlando, S. et al., 2017, A&A, 605A19:

Fifteen years in the high-energy life of the solar-type star HD 81809. XMM-Newton observations of a stellar activity cycle

Perdelwitz, V. et al., 2018, A&A, A616, 161

Long-term variations in the X-ray activity of HR 1099

Robrade, J. et al., 2018, A&A, 619A33:

Outstanding X-ray emission from the stellar radio pulsar CU Virginis

Schöller et al., 2020, A&A, 642 A188:

The near-infrared companion to HD 94660 (=KQ Vel)

Salz., M. et al., 2019, Astronomy & Astrophysics, Volume 623, id.A57

SWIFT UVOT near UV transit observations of WASP 121-b

Schneider, P.C., et al. 2018, A&A, A618, A55

Multiepoch, multiwavelength study of accretion onto T Tauri. X-ray versus optical and UV accretion tracers

10. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die im Rahmen des Projektes 50 OR 1806 erfolgte finanzielle Unterstützung wurde sichergestellt, dass die von unserer Arbeitsgruppe eingeworbenen XMM-Newton-Daten zeitnah ausgewertet, analysiert und veröffentlicht werden konnte (siehe die Auflistung der Veröffentlichungen in Punkt 9 dieses Berichts)

A1) Erfolgskontrollbericht

a) Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Verbundforschung soll die zeitnahe Auswertung, Interpretation und Kommunikation von

Daten der ESA-finanzierten (oder mitfinanzierten) Missionen sicherstellen. Dies soll die Konkurrenzfähigkeit deutscher Wissenschaftler bei der Benutzung dieser Missionen ermöglichen bzw. aufrechterhalten. Dieses Ziel wurde in diesem Projekt erreicht.

b) Wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Wie im beigefügten Schlussbericht detailliert geschildert, wurden die wissenschaftlichen Ziele im Projekt vollständig erreicht: Die vorhandenen XMM-Newton-Daten wurden vollständig, ausgewertet, analysiert, und wissenschaftlich interpretiert. Die Astrophysik stellt zum großen Teil wissenschaftliche Grundlagenforschung dar. Bei dieser Forschung besteht das primäre Ziel im Erwerben von Verständnis für bislang unverstandene Phänomene und der Kommunikation der erreichten Resultate. Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten wurden zu einen an das Projektteam kommuniziert und zum anderen führten die Projektergebnisse zu mehreren Publikationen und wurden so der wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich gemacht.

c) Fortschreitung des Verwertungsplans

i) Schutzrechte: Ist auf das vorliegende Projekt nicht anwendbar.
Es sind keine Erfindungen oder Patente erarbeitet worden.

ii) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Ist ebenfalls auf das vorliegende Projekt nicht anwendbar, da das Projekt in der Grundlagenforschung angesiedelt ist.

iii) Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten:

Wie im beigefügten Schlussbericht detailliert geschildert, wurden die wissenschaftlichen Ziele im Projekt vollständig erreicht. Die gewonnenen XMM-Newton-Daten wurden vollständig, ausgewertet, analysiert, und wissenschaftlich interpretiert. Die Projektergebnisse werden die Hamburger Gruppe weiterhin in die Lage versetzen, erfolgreich Zeit an ESA-Observatorien einzuwerben.

iv) Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit:

Durch die Verbundforschung ist die stellare Röntgengruppe an der Hamburger Sternwarte in der wissenschaftlichen community fest etabliert. Bislang konnten Mitglieder der Arbeitsgruppe in allen XMM-Newton-AOs Zeit einwerben, des Weiteren konnte in zunehmenden Maß auch HST-Zeit eingeworben werden. Die Förderung durch die Verbundforschung erlaubt es der Hamburger Sternwarte, Doktoranden und Postdocs auf einem sehr attraktiven und modernen Themenbereich arbeiten zu lassen, was sie an die Spitze der Wissenschaft führt. Dadurch leistet die Hamburger Sternwarte einen Beitrag zur Ausbildung von hochqualifiziertem wissenschaftlich-technischem Nachwuchs, der für unsere Gesellschaft von außerordentlicher Wichtigkeit ist. Des Weiteren ist daraufhinzuweisen, dass es von enormer Wichtigkeit für die Bundesrepublik Deutschland ist, eine genügend große Anzahl von Wissenschaftlern zu haben, die mit den Daten von weltraum- oder bodengestützten Observatorien umgehen können.

d) Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die wissenschaftlichen Daten sind in den jeweiligen Archiven der Missionen enthalten und sind den Kollaborationspartnern zugänglich gemacht worden.

e) Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Mittel wurden vor allem für Personalkosten verwendet, der Ausgaben- und Zeitplan wurde eingehalten.

Hamburg, den 1.3.2021

Prof. Dr. J. Schmitt