

Analyse von XMM-Newton-Daten aus Richtung von Vela-X

(Analysis of XMM-Newton data from the direction of Vela-X)

von

Moritz Habermehl

geboren am

20.08.1986

Bachelor-Arbeit im Studiengang Physik
Universität Hamburg

2011

1. Gutachter: Prof. Dr. Dieter Horns
2. Gutachter: Dr. Tanja Kneiske

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Analyse von elf Datensätzen des Röntgensatelliten XMM-Newton aus der Richtung von Vela-X. Es werden die einzelnen Bearbeitungsschritte beschrieben und die jeweilige Manipulation der Daten anhand von Bildern gezeigt. Die analysierten Bilder wurden in mehreren Energiebändern erstellt und zu Mosaiken zusammengesetzt. Zum Vergleich wurden sie mit Konturen von Aufnahmen anderer Missionen mit verschiedenen Wellenlängenbereichen überlagert und verglichen. Abschließend wurden in der Kokon-Region Profilschnitte in verschiedenen Energiebändern erstellt.

Der Kokon ist eine Röntgenstruktur innerhalb des Pulsarwindnebels (PWN) Vela-X, der mit dem Vela-Pulsar in einem Supernovaüberrest (SNR) liegt. Die Entfernung zum Pulsar beträgt 290 pc, sein Alter ist rund 11 300 Jahre. Die Ausdehnung des SNR beträgt 8° , die des PWN etwa $2 \times 3^\circ$.

Die Profilschnitte zeigen, dass sich eine härtere Röntgenkomponente am südlichen Ende des Kokons weiter ausdehnt als eine weichere, was nicht mit einem rein leptonischen Ursprung der Synchrotronstrahlung erklärt werden kann.

Abstract

The present thesis describes the analysis of eleven data sets from the direction of Vela-X originating from the X-ray satellite XMM-Newton. The single process steps are described, and the corresponding manipulation of the data is shown with the help of images. The completely analysed images were processed in several energy bands and then assembled to make mosaics. They were overlaid with contours of images from other missions in different wavelength ranges for comparison. In a final step slices in different energy bands of the Cocoon area were produced.

The Cocoon is an x-ray feature within the pulsar wind nebula (PWN) Vela-X. Together with the Vela pulsar it is located inside a supernova remnant (SNR). The pulsar lies at a distance of about 290 pc and is 11 300 years old. The SNR extends over 8° and the PWN approximately $2 \times 3^\circ$.

The slices show for the southern end of the cocoon that a harder X-ray component extends further than a soft one. This cannot be explained solely by a leptonic origin of the synchrotron radiation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Grundlagen	7
2.1	Das XMM-Newton-Teleskop	7
2.2	Theoretische Grundlagen	9
3	Datenanalyse	12
4	Ergebnisse zu den einzelnen Bearbeitungsschritten	20
5	Endergebnisse und Auswertung	28
5.1	Mosaik	28
5.2	Überlagerung mit Konturen	33
5.3	Die Kokon-Region	37
6	Zusammenfassung und Ausblick	41

Kapitel 1

Einleitung

Röntgenstrahlen aus dem Kosmos werden von der Erdatmosphäre absorbiert und können daher nicht vom Boden aus beobachtet werden. Da man stattdessen auf den Einsatz von Ballons und Satelliten angewiesen ist, handelt es sich bei der Röntgenastronomie um einen relativ jungen Forschungszeitweig. Die prominentesten extragalaktischen Röntgenquellen sind aktive Galaxien und Galaxienhaufen, innerhalb der Milchstraße dominieren Vorgänge am Ende eines Sternenlebens. So gehören Supernovaüberreste (SNR) und Pulsarwindnebel (PWN), wie der hier analysierte Vela-X-Nebel, zu den stärksten Röntgenquellen. Die Röntgenemission geht größtenteils auf Synchrotronstrahlung zurück, die durch vom Pulsar stammende relativistische, geladene Teilchen emittiert werden, wenn sie vom starken Magnetfeld des Pulsars abgelenkt werden.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Analyse und Reduktion von elf XMM-Newton-Aufnahmen, die anschließend zu einem Bild zusammengesetzt werden. XMM-Newton ist der zweitgrößte Forschungssatellit der Europäischen Weltraumorganisation. Seine drei Teleskope decken ein Energiespektrum von 0,3 - 10 keV ab.

In Kapitel 2 wird XMM-Newton vorgestellt und ein Überblick über die Quelle der Röntgenphotonen und damit über die Theorie von Pulsarwindnebeln gegeben. Kapitel 3 beschreibt die einzelnen Bearbeitungsschritte, deren Ergebnisse in Kapitel 4 dokumentiert werden. Die analysierten Bilder werden in den drei Abschnitten von Kapitel 5 vorgestellt. Dort werden zunächst verschiedene Energiebänder verglichen. Der zweite Abschnitt beinhaltet Überlagerungen mit Konturen von Radio-, Röntgen- und Gammabildern aus anderen Missionen und im dritten werden zwei Profilschnitte diskutiert.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Das XMM-Newton-Teleskop

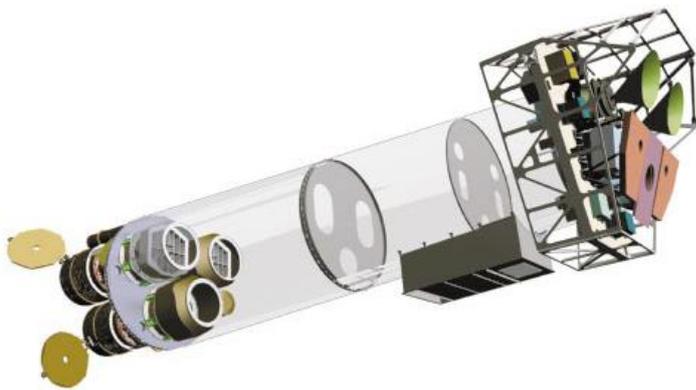


Abbildung 2.1: Schematische Ansicht des XMM-Newton-Satelliten. Am linken Ende befinden sich die drei Wolter-I-Systeme. Die Reflektionsgitter an den oberen beiden lassen erkennen, dass es sich um die MOS-Kameras handelt. Die CCDs befinden sich in 7,5 Metern Abstand zu den Spiegelmodulen am rechten Ende des Satelliten. Nicht dargestellt werden die Sonnenkollektoren. Quelle der Abbildung: Jansen et al. (2000) [1]

XMM-Newton ist ein Satellit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) ausgestattet mit drei Röntgenteleskopen. XMM steht für *X-ray Multi-Mirror Mission*. Der Satellit wurde 1999 in seinen 48-Stunden-Orbit in einer Höhe zwischen 7 000 km und 114 000 km gesetzt. Er wiegt vier Tonnen und ist zehn Meter lang. An seinem einen Ende befinden sich drei Spiegelmodule, welche die Eintrittsöffnungen der Teleskope bilden. Jedes der Module ist ein Wolter-I-System mit 58 coaxialen und konfokalen Spiegeln und einer Brennweite von 7,5 Metern. Der größte Spiegel hat einen Durchmesser von 70 cm, der kleinste 30,6 cm. Sie bestehen aus mit Gold beschichtetem Nickel [1]. Die Ausrichtung des Teleskops wird mit Sternensensoren bestimmt.

Die drei Röntgenteleskope von XMM-Newton sind parallel ausgerichtet, somit erhält man für jede Beobachtung drei Aufnahmen. In dieser Arbeit wurden jedoch nur die Bilder der beiden Teleskope ausgewertet, die mit MOS-Kameras (*mos1* und *mos2*) ausgestattet sind. Sie arbeiten mit jeweils sieben EPIC MOS-CCDs, das dritte Teleskop läuft mit einer PN-Kamera aus 12 EPIC PN-CCDs. EPIC steht für Europäische Photonienabbildungskamera (*European Photon Imaging Camera*) und MOS für Metalloxid-Halbleiter (*Metal Oxide Semi-conductor*), die PN-

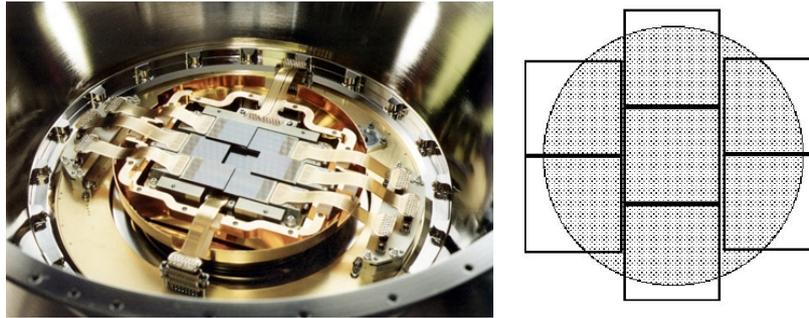


Abbildung 2.2: Links: die CCDs der MOS-Kamera. Quelle: Turner et al. (2000) [2]. Rechts: Schema der 7 MOS-CCDs. Die grau unterlegte Kreisfläche zeigt die Lage des Gesichtsfelds. Quelle der Abbildung: XMM-Benutzerhandbuch [3]

Kamera ist nach dem p-n-Übergang benannt. CCD ist die Abkürzung für *charge-coupled device* und steht für eine Anordnung von Photodioden. Einfallendes Licht überträgt seine Energie auf die Dioden welche im Fall der MOS-CCDs alle 2,6 s ausgelesen werden. Treffen mehrere Photonen während eines Zyklusses auf das selbe Pixel, können sie nicht unterschieden werden und werden als ein Ereignis registriert (*pileup*).

Das elektrische Rauschen nimmt zu niedrigen Energien hin zu und die Quanteneffizienz ab, was zusammen die Untergrenze für den Energiebereich von XMM-Newton auf etwa 0,3 keV festlegt [2]. Oberhalb von 10 keV nimmt die effektive Sammelfläche der Teleskope sehr geringe Werte an und begrenzt so den beobachtbaren Energiebereich (vgl. Abb. 2.3).

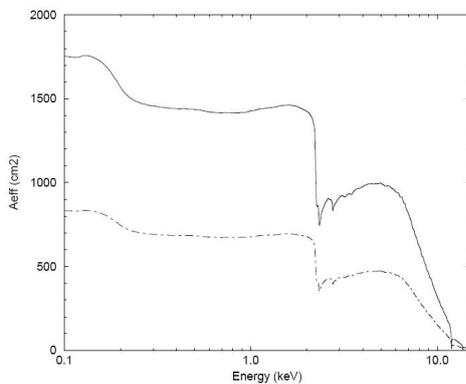


Abbildung 2.3: Effektive Sammelfläche der MOS-Kameras (gestrichelte Linie) und der PN-Kamera (durchgezogene Linie) als Funktion der Energie. Die beiden MOS-Teleskope sind im Gegensatz zum PN-Teleskop mit Reflektionsgitter-Spektrometern ausgestattet, welche 50 % der Strahlung aus dem Strahlengang umleiten worauf die niedrigeren Werte für die MOS-Kameras hauptsächlich zurückgehen. Die Kurve beginnt ab 2 keV deutlich zu fallen und nimmt für Energien oberhalb von 10 keV sehr geringe Werte an. Quelle der Abbildung: Jansen et al. (2000) [1]

Der Durchmesser des kreisförmigen Gesichtsfelds beträgt etwa 30' [2]. Mit trigonometrischen Methoden lässt sich berechnen, dass eine Aufnahme eine Fläche mit einem Durchmesser von ca. 2,5 pc in der Entfernung des Vela-Pulsars (290 pc) abbildet¹. Die Auflösung beträgt rund 5'' [1]. Jede MOS-CCD besteht aus 600x600 Pixeln mit einer Fläche von jeweils 40 μm^2 , was 1,1x1,1 arcsec entspricht [2]. Bei sehr hellen Quellen wird üblicherweise die mittlere CCD nur in einem verkleinerten Fenster (*small window*-Modus) von 100x100 Pixel belichtet, um eine schnellere und damit häufigere Auslese zu ermöglichen. In diesem Modus dauert ein Zyklus nur 0,3 s im Vergleich zu 2,6 s, die benötigt werden, um die gesamte CCD auszulesen (*full mode*).

¹ $d = 2 \cdot \tan(0.25^\circ) \cdot 290 \text{ pc} = 2,53 \text{ pc}$

So wird das Risiko vermieden, dass während eines Zyklus mehrere Photonen auf das selbe Pixel treffen was Zählrate und Energiewerte verfälschen würde.

Jede Kamera ist mit einem Filtrerrad ausgestattet, das über verschiedene Einstellungen verfügt. Neben drei unterschiedlich dicken Filtern, die Röntgenphotonen durchlassen, aber für optisches und ultraviolettes Licht opak sind, gibt es zusätzlich die Einstellungen, bei denen die Öffnung ganz geschlossen bzw. ganz geöffnet ist. Filter werden laut Turner et al. (2000) [2] verwendet, weil Photonen aus anderen Energiebändern den Grundstrom in den Pixeln anheben und somit die ermittelten Energiewerte verfälschen würden. Um die CCDs vor niederenergetischen Protonen zu schützen, benutzt man bei hoher Rate die geschlossene Einstellung.

Von jedem Ereignis wird Position, Energie und Auslesezeitpunkt verzeichnet. Ist das Ereignis über mehrere Pixel verteilt, ergibt sich die Energie aus der Summe der Werte in den einzelnen Pixeln. Die Energie kann mit einer Genauigkeit von einigen eV über die erzeugte Ladung berechnet werden [2].

2.2 Theoretische Grundlagen

Pulsare

Am Lebensende massereicher Sterne dehnt sich ihre Hülle in einer Supernova explosionsartig aus, während der Kern zu einem kompakten Pulsar (Neutronenstern) aus ungeladenen Nukleonen kollabiert. Aufgrund der Drehimpulserhaltung erreichen diese Sterne durch die starke Verringerung ihres Durchmessers sehr große Rotationsperioden.

Namengebend für einen Pulsar sind die gepulsten elektromagnetischen Signale, die man von ihm empfängt. Ein Pulsar gibt außerhalb der magnetischen Pole vernachlässigbar wenig Strahlung ab. Durch den Effekt des Doppler-beamings sieht man die gebündelte Strahlung aus den Polarregionen nur, wenn sie direkt auf die Erde gerichtet ist. Da die geografischen und magnetischen Pole meistens nicht korrelieren, liegt die Erde nur für einen Bruchteil der Umdrehung in Richtung des Strahls, der nur dann beobachtet werden kann. So lassen sich die Rotationsperiode P und deren zeitliche Änderung \dot{P} bestimmen. Für den Vela-Pulsar (PSR B0833-45) sind die Werte $P = 89$ ms und $\dot{P} = 1,25 \times 10^{-13}$ s/s. Aus der wachsenden Rotationsperiode lässt sich ein Rotationsenergieverlust ableiten, welcher die Hauptemissionsquelle des Systems ist, wovon aber nur etwa 1 % in der gepulsten Photonenemission beobachtet wird (vgl. z.B. [4]). Die Rotationsenergie E_{rot} ist gegeben durch $E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \Omega^2 = \frac{1}{2} \cdot I \cdot (2\pi/P)^2$, also gilt $\dot{E}_{rot} = 4\pi^2 I \dot{P} / P^3$, wobei I das Trägheitsmoment und Ω die Winkelgeschwindigkeit des Pulsars sind. Nimmt man als Masse die Chandrasekhar-Grenzmasse von $1,4 M_{\odot}$ an und einen Radius von 10 km, so erhält man $\dot{E}_{rot} = 7 \times 10^{36}$ erg s⁻¹. Das charakteristische Alter eines Pulsars τ ist definiert durch $\tau = P / (2\dot{P})$, was für den Vela-Pulsar 11 300 Jahre ergibt. Die Rotationsenergieverlustrate \dot{E}_{rot} entwickelt sich gemäß $\dot{E}_{rot} = \dot{E}_{rot,0} \cdot (1 + t/\tau_0)^{-(n+1)/(n-1)}$ und die Rotationsperiode ähnlich: $P = P_0 \cdot (1 + t/\tau_0)^{1/(n-1)}$. n ist dabei der sogenannte Bremsindex, der über $\dot{\Omega} = -k\Omega^n$ definiert ist. [5]

Pulsarwindnebel

Laut Gaensler und Slane (2006) [5] wird der größte Teil des Rotationsenergieverlusts eines Pulsars über einen magnetisierten Plasma-Wind abgegeben, der wiederum die Energiequelle für die Synchrotronstrahlung von Pulsarwindnebeln (Plerionen) ist. Zunächst jedoch bewegen sich die Teilchen geordnet in einem eingefrorenen Magnetfeld (*frozen-in*) und geben keine Strahlung ab. Da der Wind sich schneller ausdehnt als der umgebende SNR, wird er abgebremst und eine Schockfront entsteht (*wind termination shock*), typischerweise in einem Abstand von 0,1 pc vom Pulsar [5]. Hier werden die Teilchen zu ungeordneten ultra-relativistischen Geschwindigkeiten beschleunigt, treffen auf die aufgewickelten Magnetfeldlinien und emittieren Synchrotronstrahlung mit Wellenlängen vom Radio- bis Röntgenbereich (vgl. Abb. 2.4). Man geht davon aus, dass das Emissionsspektrum einem Potenzgesetz folgt. Die Teilchen verlieren durch die Synchrotronstrahlung Energie, wodurch sich das Maximum des Spektrums mit steigendem Abstand zum Pulsar zu höheren Wellenlängen verschiebt, weil dort das Alter der Elektronenpopulation im Allgemeinen zunimmt. So wird bei einem rein leptonischen Ursprung der Synchrotronstrahlung die Größe des Nebels mit ansteigender Frequenz kleiner. Da die Synchrotronlebensdauer von energieärmeren Elektronen größer als das Alter des PWN ist, füllt Radiostrahlung den ganzen Nebel aus.

Jager et al 2008 [6] erklärt die Entstehung der beobachteten Gammastrahlung mit dem Compton-Effekt. Dabei sollen vor allem Photonen aus dem Kosmischen Hintergrund und anderen Hintergrundfeldern an den im Wind enthaltenen Leptonen streuen.

Emission eines **Pulsar-Windnebel**-komplexes

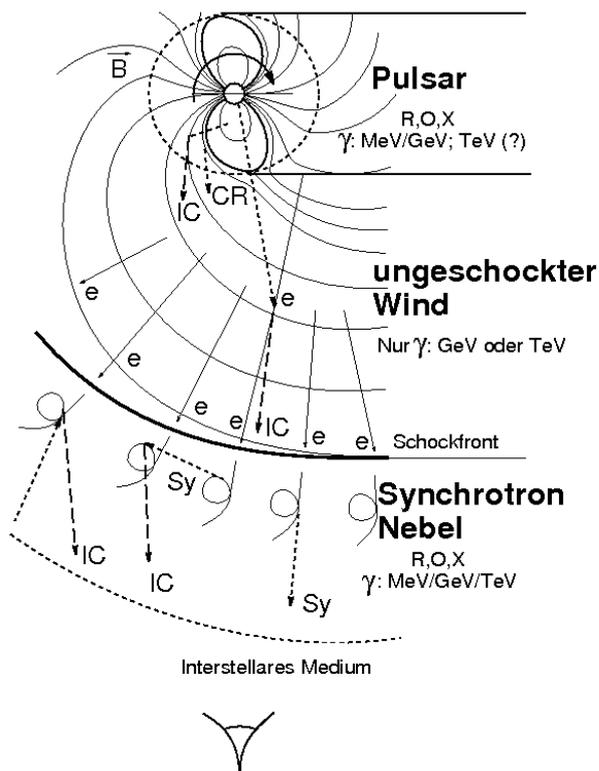


Abbildung 2.4: Schematische Veranschaulichung der Entstehung eines Synchrotronnebels. Der vom Pulsar emittierte Plasma-Wind ist zunächst ungeschockt. Nach der Schockfront wird die Bewegung der im Wind enthaltenen geladenen Teilchen ungeordnet und sie emittieren Synchrotronstrahlung. Quelle der Abbildung: Aharonian und Bogovalov (2003) [7], Übersetzung aus Zechlin (2009) [8].

Der Vela-X-Nebel

Rishbeth (1958) [9] beschreibt die Entdeckung von mehreren Gebieten diffuser Radioemission. Das hellste erhielt den Namen Vela-X in Anlehnung an seine kreuzähnliche Form. Der Nebel hat eine Ausdehnung von $2 \times 3^\circ$ und der Pulsar ist $40'$ von seinem Zentrum entfernt, was bei einer Entfernung von 290 pc etwa 10×15 pc, bzw. 3 pc entspricht.

In der Nähe der hellsten Radiostruktur von Vela-X liegt ein helles Röntgenfilament, das wegen seiner langen und dünnen Form *Kokon* genannt wird. Die Struktur beginnt in der Nähe des Pulsars und erstreckt sich über $45'$ bis zum Zentrum von Vela-X. Gvaradmadze (1999) [10] erklärt solche Filamentstrukturen mit Rayleigh-Taylor-Instabilitäten, die zentral im SNR liegen, sodass wir sie nahezu frontal sehen.

In Frail et al. (1997) [11] wird darauf hingewiesen, dass die zentrale Lage im SNR, das steilere Spektrum im Radiobereich im Vergleich zum Rest der Hülle und die hohe Polarisation als Indiz für Synchrotronstrahlung nahelegen, dass es sich bei Vela X um einen PWN handelt. Unklar ist jedoch wie der recht weit entfernte Pulsar die Vela-X-Region anregen kann, da seine Bewegungsrichtung nicht aus dem Zentrum des Nebels stammt [11] und er sich seit der Supernova nur um $10'$ bewegt hat [12].

Wechselwirkung von Pulsarwindnebel und Supernovaüberrest

Durch die relativ geringe Eigenbewegung des Vela-Pulsars liegt er zentral im SNR, der sich auf einen Durchmesser von 8° ausgedehnt hat, was rund 40 pc bei einer Entfernung von 290 pc entspricht.

SNR und PWN durchlaufen typische Entwicklungsphasen. In einem sehr jungen System liegt der PWN gewöhnlich symmetrisch um den Pulsar in der Mitte des SNR. Er breitet sich schnell im Vergleich zum umgebenden SNR-Material aus. Die Machzahl² ist hoch und die Ausbreitung somit supersonisch. Der SNR dehnt sich wiederum supersonisch gegenüber dem umliegenden interstellaren Medium (ISM) aus und bildet daher einen Vorwärtsschock aus. Der SNR nimmt immer mehr Masse aus dem umliegenden Material auf und bildet einen zweiten Schock aus, der ab einer gewissen Zeit nach innen gerichtet ist (*Sedov-Taylor-Phase*). Trifft dieser Rückwärtsschock auf den Plerion, so wird letzterer zusammengedrückt. Asymmetrien in der Dichteverteilung des ISM bewirken, dass der Rückwärtsschock sich ebenfalls asymmetrisch ausbreitet. So erreicht er in manchen Richtungen den PWN früher als in anderen, was die plausibelste Erklärung für den Versatz von Vela-X gegenüber dem Zentrum des SNR und dem Pulsar ist. Während sich der Plerion anfänglich supersonisch ausgebreitet hat, expandiert er nach der Sedov-Taylor-Phase subsonisch, da das umgebende Material durch die Wechselwirkung mit dem Rückwärtsschock erhitzt wurde und die Schallgeschwindigkeit damit höher als zu Beginn ist. Durch ihre Eigenbewegung haben manche Pulsare - in späteren Entwicklungsstadien als der Vela-Pulsar - ihren SNR verlassen und bewegen sich im interstellaren Gas. [5]

²Die Machzahl M ist definiert als $M=v/c$, wobei v die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist und c die Schallgeschwindigkeit im Medium.

Kapitel 3

Datenanalyse

Die Rohdaten

In dieser Arbeit wurden elf Datensätze verwendet. Abb. 3.1¹ veranschaulicht die Lage der verwendeten Aufnahmen zueinander.

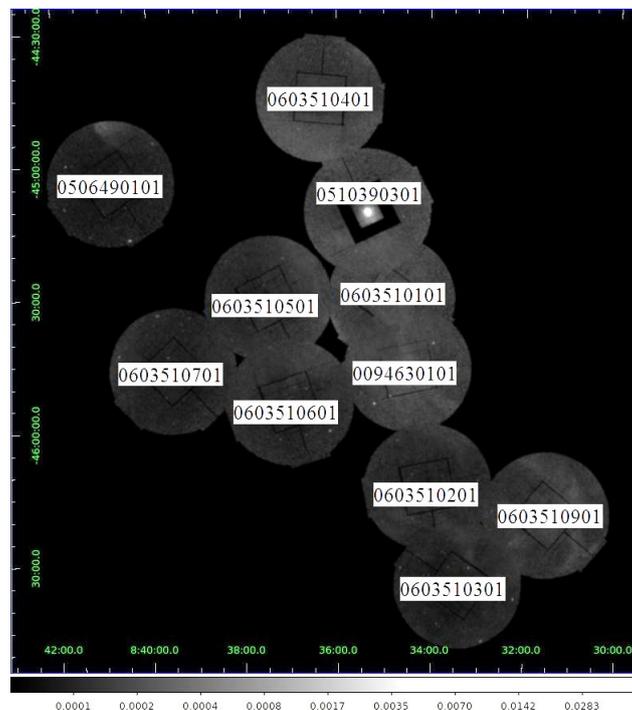


Abbildung 3.1: Anordnung der elf verwendeten Aufnahmen. Man sieht, dass kein geschlossenes Bild entsteht, sondern zwischen den einzelnen Gesichtsfeldern meistens Lücken liegen.

Tabelle 3.1 listet sie mit Beobachtungs-Identifikationsnummer (BID), Beobachtungsjahr,

¹Dieses und alle folgenden Bilder wurden mit SAOImage DS9 erstellt. Sie werden in Himmelskoordinaten angezeigt (grüne Achsen), wobei Norden oben ist und Osten links. Die senkrechte Achse gibt also die Deklination an. Die Achse ist in Abständen von fünf Bogenminuten mit Bogenminuten und -sekunden beschriftet, die Gradzahl wird alle 30'' angegeben. Die waagrechte Achse gibt die Rektaszension in Stunden, Minuten und Sekunden an. Der Sekundenwert wird alle 30 sec angegeben, der Minutenwert jede Minute und der Stundenwert alle 20 min. Die Farbskala unter den Bildern gibt jeweils die Zählrate pro Bildpunkt an, die jedoch nicht die Zählrate eines CCD-Pixels wiedergibt, da einerseits bei der Erstellung der Bilder mehrere Pixel zusammengelegt werden und das Teilen durch die Belichtungskarte andere Werte ergibt.

der Belichtungszeit vor (t_0) und nach (t_{filt}) der Entfernung von Zeitintervallen mit zu großem Teilchenhintergrund (s. Abschnitt „Solare Protonen“) auf. Bei Aufnahme 0506490101 wurde der Filter mit der größten Dicke verwendet, bei den zehn anderen der mit der mittleren Dicke². Für die Aufnahme, die den Pulsar enthält (0510390301) wurde bei der mittleren CCD der Modus mit einem kleinen Fenster gewählt. Alle sonstigen CCDs wurden komplett ausgelesen.

BID	Jahr	t_0 in ks	t_{filt} in ks
0094630101	2002	22	21
0506490101	2007	45	31
0510390301	2009	110	16
0603510101	2009	29	16
0603510201	2009	69	51
0603510301	2009	113	85
0603510401	2009	48	23
0603510501	2009	41	40
0603510601	2009	48	43
0603510701	2009	82	53
0603510901	2009	46	42

Tabelle 3.1: Die elf bearbeiteten Datensätze mit Beobachtungs-Identifikationsnummer (BID), Beobachtungsjahr, der Belichtungszeit vor (t_0) und nach (t_{filt}) Filterung.

Zugriff auf die Daten erhält man im XMM-Newton *Science Archive* (XSA) [13]. Zur Bearbeitung der Daten wurden Werkzeuge aus der Wissenschaftlichen Analyse-Software (SAS nach englisch *science analysis software*), aus dem Chandra Analyse-Softwarepaket CIAO und von *ftools* verwendet. Die SAS wird von den Betreibern von XMM-Newton bereitgestellt und ist speziell für die Analyse von XMM-Newton-Daten entwickelt. *ftools* ist ein Software-Paket der NASA und dient zur Bearbeitung von FITS-Dateien. FITS steht für das Dateiformat *Flexible Image Transport System*.

Die folgenden Unterpunkte dokumentieren die einzelnen Schritte zu Reduktion und Analyse der Daten.

Erstellung der zentralen Dateien

Das von J. Wilms geschriebene Skript `xmmprep` [14] erstellt jeweils ein Ordnersystem für die einzelnen Beobachtungen. Außerdem erzeugt es folgende für weitere Bearbeitung essentiellen Dateien: Ereignisliste, Flugdaten-Datei und Kalibrierungsdatei.

Die Ereignisliste enthält unter anderem die in jedem Pixel empfangenen Ereignisse mit dazugehörigem Energiewert und Zeitpunkt, in ihren den Kopfdaten befinden sich Informationen wie Belichtungszeit sowie verwendete Filter und Fenster. Die Flugdaten-Datei gibt an, wie

²Der stärkste Filter besteht aus einem 3 300 Å dicken Polypropylen-Film, der mit einer 1 100 Å dicken Aluminiumschicht und einer 450 Å dicken Zinnschicht bedampft wurde, der mittlere aus einem 1 600 Å dicken Polyimid-Film, der mit einer 800 Å dicken Aluminiumschicht beschichtet ist.[3]

genau die Lage und Ausrichtung des Satelliten zu verschiedenen Zeitpunkten der Beobachtung rekonstruiert werden können. Verliert der Sternensensor kurzfristig einen der hellen Sterne, die zu seiner Orientierung verwendet werden, wird dies in der Datei festgehalten. Für solche Zeitpunkte wird die Winkelauflösung im XMM-Newton-Benutzerhandbuch [3] mit besser als 1° angegeben. Die Kalibrierungsdatei besteht aus einer Liste, welche auf die für die Beobachtung notwendigen Daten in einem Kalibrierungsarchiv (*current calibration file*) verweist, das regelmäßig aktualisiert wird und auf der Webseite der SAS [3] zur Verfügung steht.

Solare Protonen

Bei großer Hintergrundstrahlung sind die Beobachtungen unbrauchbar und die Zeiten werden aus den Ereignislisten herausgeschnitten. Die Zeitintervalle mit hoher Verunreinigung gehen vor allem auf eine höhere Rate von solaren Protonen zurück, die mit einigen 100 eV als niederenergetisch bezeichnet werden. Sie treffen häufiger auf die CCDs, sowohl wenn der Satellit sich unterhalb einer Höhe von 60 000 km und damit im Strahlungsgürtel des Erdmagnetfelds befindet als auch nach Sonneneruptionen, die nicht vorhergesagt werden können. So gehen laut Jansen et al. (2000) [2] etwa 35 % der Beobachtungszeit verloren. Diese Hintergrundkomponente macht sich durch zwei Charakteristika bemerkbar: Erstens übersteigen die Zählraten während hoher Protonendetektion die sonstigen Werte deutlich. Zweitens treten sie vor allem durch die Optik ein und können den Aluminiumschirm, der das Gesichtsfeld begrenzt, nicht durchdringen. Dadurch werden deutlich mehr innerhalb des Gesichtsfelds verzeichnet.

Das erste Merkmal nutzt man, um mit Protonen kontaminierte Zeitintervalle zu identifizieren. Dabei kann man zwei unterschiedliche Methoden anwenden, die mit einer Lichtkurve bzw. mit einem Histogramm arbeiten. Anschließend überprüft man mit dem von A.M. Read erstellten Skript `Fin_over_Fout` [15] in wie weit die gefilterten Ereignislisten (*good time intervals*) von Ereignissen, die durch niederenergetische Protonen hervorgerufen werden, bereinigt sind.

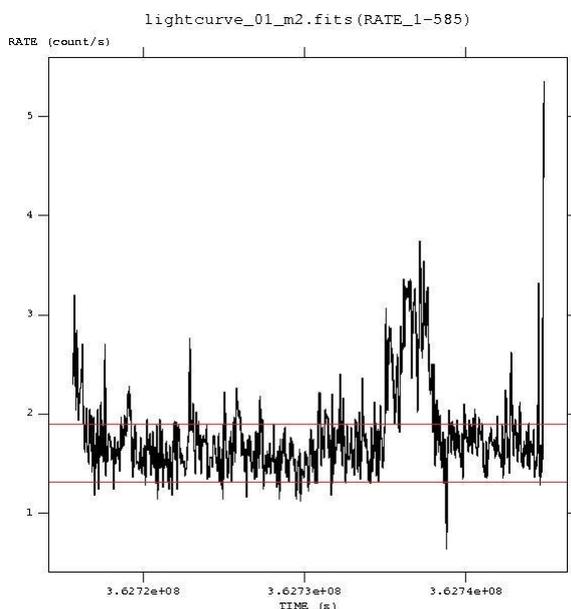


Abbildung 3.2: Lichtkurve der mos2-Aufnahme von 0603510101 und damit die Zählrate als Funktion der Zeit. Ausschläge, die zwischen den beiden roten Linien liegen, werden als unkontaminierte Photonereignisse interpretiert und die zugehörigen Zeitintervalle beibehalten. Die übrigen Ereignisse werden auf solare Protonen zurückgeführt und ignoriert. Graph erstellt mit `fits view`.

Bei der ersten Verfahrensweise zur Ermittlung von unbrauchbaren Zeiträumen wird mit der SAS-Anwendung `evselect` eine Lichtkurve erstellt. Intervalle ohne Protonen-Kontamination erscheinen in der Lichtkurve als Bereiche, in denen die Werte gleichmäßig in einem relativ schmalen Band schwanken. Nach der Identifizierung solcher Intervalle werden mit der SAS-Anwendung `tabgtigen` zwei Werte für die Rate eingestellt, so dass die vermeintlich unkontaminierten Zählraten gerade dazwischen liegen (vgl. Abb. 3.2). Zeiten mit höheren Raten, die wahrscheinlich auf Protonen zurückzuführen sind, werden weggeschnitten. Mit `evselect` kann aus den ausgeschnittenen Ereignissen eine neue, gefilterte Ereignisliste erstellt werden. Um den richtigen Bereich auszuwählen, sollte man sich dem indentifizierten Zählratenbereich sukzessiv nähern und immer wieder mit `Fin_over_Fout` überprüfen.

Die zweite Methode bedient sich ebenfalls dem Merkmal, dass solare Protonen zu höheren Zählraten führen. Man erstellt ein Histogramm der Lichtkurve von hochenergetischen Ereignissen (8 - 12 keV) innerhalb des Gesichtsfelds. Legt man eine Gaußsche Glockenkurve an die Werte um den Maximalwert im Histogramm, so erkennt man, dass zwar die Werte auf der linken Seite - also zu niedrigeren Zählraten hin - gemäß der erwarteten Kurve abfallen, höhere Zählraten werden jedoch sichtbar häufiger gemessen (vgl. Abb. 3.3), was den solaren Protonen zugeschrieben wird. Bei diesem Verfahren wird mit `espfilt` aus der SAS gearbeitet. Es erstellt die Histogramme, legt die Gauß-Glocke an und generiert eine neue Liste aus Ereignissen mit Zählraten, die nicht stärker als 2σ von der Ausgleichskurve abweichen.

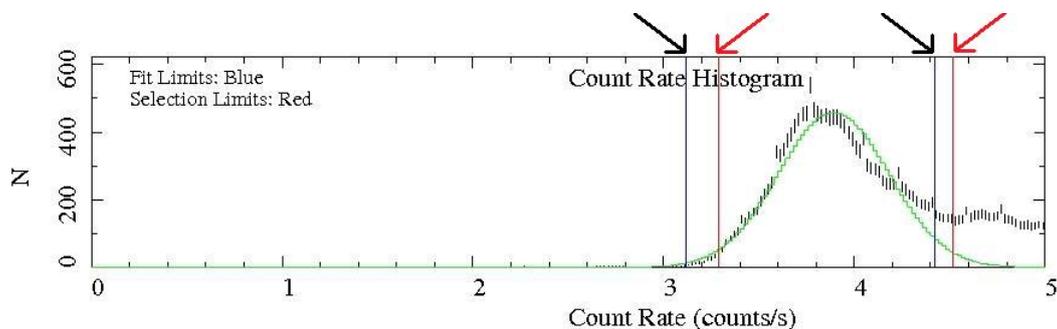


Abbildung 3.3: Das Histogramm der mos1-Aufnahme mit BID 0603510101 veranschaulicht die zweite Variante der Identifizierung von Protonenkontamination. Es zeigt die Ereignisse als kurze senkrechte schwarze Striche, die im Bereich zwischen den beiden mit schwarzen Pfeilen gekennzeichneten Linien mit einer Gaußkurve angepasst sind. Außerhalb der Linien mit den roten Pfeilen weichen die Ereignisse zu stark von der Kurve ab und werden ignoriert. Graph erstellt mit `Quick and Dandy Plotter`.

Das zur Überprüfung der reduzierten Ereignislisten verwendete Skript `Fin_over_Fout` arbeitet mit Hilfe des zweiten Charakteristikums der solaren Photonen und vergleicht im bereinigten Bild die Ereignisse im Energieband zwischen 6 und 12 keV, innerhalb und außerhalb des Gesichtsfelds und ermittelt so wie stark die Datei mit niederenergetischen Protonen verunreinigt ist. Dabei wird zwischen vier Stufen unterschieden, je nach Verhältnis vom Fluss innerhalb des Gesichtsfelds zu dem außerhalb. Bei einem Quotienten kleiner als 1,15 gibt das Skript „nicht kontaminiert“ aus, bis zu einem Quotienten von 1,3 „geringfügig“, bis 1,5 „sehr“ und darüber

„extrem kontaminiert“. Gerade bei starken Quellen muss man jedoch bedenken, dass die höhere Rate innerhalb des Gesichtsfelds auch auf Photonen zurückzuführen ist.

Erzeugung von Bilddateien³

Mit dem SAS-Befehl `evselect` werden Bilder aus den Ereignislisten erstellt. Um die Bilder zu filtern wird der Zusatz `expression=((PI IN [E_{min} : E_{max}]) && (PATTERN<=12) && (FLAG==0))` verwendet. Die drei Ausdrücke, die jeweils mit einem doppelten Et-Zeichen voneinander getrennt sind, bewirken dabei die folgenden Prozesse.

`(PI IN [E_{min} : E_{max}])` selektiert die Ereignisse im gewünschten Energieband, wobei hier E_{min} und E_{max} als Platzhalter für Minimum und Maximum des Energieintervalls stehen, die in eV angegeben werden. So schreibt man für das gesamte Energieband (0,3 - 10 keV) zum Beispiel `(PI IN [300:10000])`.

Eine weitere Reduktion der Daten erfolgt mit `(PATTERN<=12)`, womit Ereignisse ignoriert werden, die auf kosmische Strahlung hindeuten. Diese sind auf mehrere Pixel verteilt und weisen für Röntgenphotonen ungewöhnliche Muster auf (vgl. Abb. 3.4). In der Ereignisliste ist zu jedem Ereignis ein Wert zwischen eins und 31 angegeben, den die Software an Bord je nach Anordnung der angeregten Pixel zuordnet.

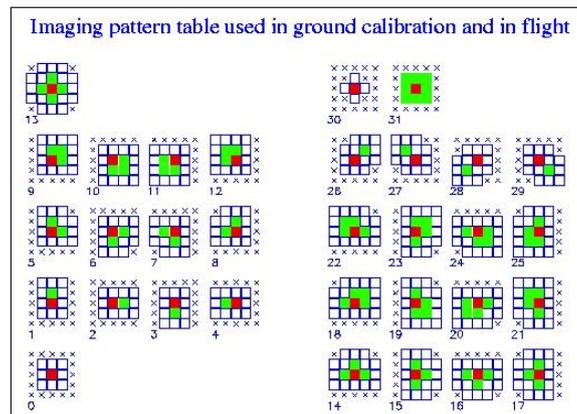


Abbildung 3.4: Die 31 von der Analyse-Software anerkannten Ereignis-Muster. Das rote Pixel enthält jeweils das stärkste Signal innerhalb einer Fläche von 3x3 Pixel, die grünen Pixel enthalten einen geringeren Anteil des Gesamtsignals. Nur die Muster 0 bis 12 werden auf Röntgen-Ereignisse zurückgeführt. Alle anderen werden aussortiert. Quelle der Abbildung: Turner et al. (2000) [2]

Jedes Ereignis wird ebenfalls an Bord des Satelliten nach seiner Güte gekennzeichnet. Mit `(FLAG==0)` werden nur die Ereignisse ausgewählt, die mit Sicherheit vollständig detektiert wurden. So werden solche ignoriert, die direkt an der Kante einer CCD oder neben einem fehlerhaften Pixel liegen, da hier ein Teil der Energie unregistriert sein könnte.

³Dieser Schritt, sowie „Belichtungskorrektur“ und „Hintergrund“ wurden mit dem Skript `mk_image_new` von D. Horns [16] durchgeführt.

Belichtungskorrektur

Die SAS-Anwendung `eexpmap` erstellt mit Hilfe der Kalibrierungs-Daten eine Karte in Himmelskoordinaten, die den räumlichen Wirkungsgrad des Instruments in einem erwünschten Energieband wiedergibt. Dabei werden Quantenausbeute, durch die Spiegel hervorgerufene Vignettierung und die Beobachtungsdauer berücksichtigt. Die Quantenausbeute steht für den Anteil der eintreffenden Photonen, die detektiert werden. Sie ist von der Energie abhängig, da sowohl die Empfindlichkeit der CCDs als auch die Durchlässigkeit der unterschiedlichen Filter je nach Energie unterschiedlich sind. Vignettierung ist der Effekt des Lichtabfalls zu den Rändern des Gesichtsfelds hin. Je größer der Winkel zur Richtung der optischen Achse, desto weniger Photonen fangen die Spiegel ein. Laut SAS-Homepage [3] ist dadurch das Signal im Bildzentrum um einen Faktor von drei höher als am Bildrand. Darüber hinaus werden mit der Belichtungskarte fehlerhafte Pixel entfernt.

Um die fehlerhaften Pixel und räumlichen Unterschiede im Bild zu eliminieren, wird es durch eine mit `eexpmap` zu Belichtungszeit und Energiebereich des Bilds passende Belichtungskarte geteilt. Da sich neben den Effekten innerhalb einer Aufnahme auch die Belichtungszeit in den Belichtungskarten widerspiegelt, sind die belichtungskorrigierten Bilder normiert und können selbst bei unterschiedlicher Belichtungszeit verglichen werden.

Abschneiden von Bildpunkten mit geringer Zählrate

Bildbereiche, in denen sehr wenige Ereignisse verzeichnet werden, enthalten zu wenig Statistik um aussagekräftig zu sein und werden daher entfernt. Zunächst wird in den Belichtungskarten jeweils der Maximalwert bestimmt. Mit dem `ftool fimgtrim` wird eine neue Belichtungskarte erstellt, in der Pixelwerte, die weniger als 10 % des maximalen Wertes aufweisen, auf Null gesetzt werden. Aufgrund des Randlichtabfalls betrifft das vor allem die äußeren Bereiche.

Hintergrund

In diesem Schritt versucht man alle verbleibenden Ereignisse herauszufiltern, die nicht auf Photonen der beobachteten Quelle - der Vela-X-Region - zurückgehen. Die Ursachen solcher Hintergrundeffekte können in die drei Klassen elektrisches Rauschen, Teilchen und Röntgenhintergrund eingeteilt werden.

Laut Read et al. (2003) [17] wird der Dunkelstrom - also der Strom, der selbst im unbelichteten Zustand durch die CCDs fließt - als vernachlässigbar angenommen. Fehlerhafte Pixel bilden damit die Hauptkomponente des elektrischen Rauschens und werden sowohl von Analysewerkzeugen an Bord als auch beim Erstellen der Belichtungskarten erkannt und entfernt.

Bei den Teilchen unterscheidet man zwischen niederenergetischen Protonen und hochenergetischer kosmischer Strahlung. Während erstere im Schritt „solare Protonen“ ausreichend herausgefiltert worden sein sollten, konnten dort nur hochenergetische Teilchen ausgemacht werden, die direkt auf die CCDs treffen. Kommt es jedoch zu einer Wechselwirkung mit den De-

tektormaterialien und dem Gehäuse, so werden die enthaltenen Atome und Moleküle zu Fluoreszenz angeregt. Diese Photonen werden vor allem auf den CCDs in der Nähe der entsprechenden Materialien verzeichnet. So sieht man z.B. die Aluminium-K-Linie (1,487 keV) vor allem bei den äußeren CCDs, da diese näher am Kameragehäuse liegen, welches aus Aluminium besteht (vgl. z.B. [18]). Hierbei spricht man von internem Hintergrund.

Die übrigen Hintergrundereignisse werden von Photonen hervorgerufen und stammen aus diffusem Röntgenhintergrund, der aus einer niederenergetischen Komponente mit Strahlung aus unserer Galaxie und einer hochenergetischen, die auf aktive galaktische Kerne zurückgeht (vgl. z.B. [18]).

Die in Read et al. (2003) [17] vorgestellten, vorgefertigten Hintergrundkarten wurden in dieser Auswertung verwendet. Sie berücksichtigen Hintergrundstrahlungen sowie Fluoreszenz und können als Ereignislisten von der Webseite <http://www.sr.bham.ac.uk/xmm3/> [19] heruntergeladen werden. Es gibt für jede Kamera und zu den jeweiligen Filter- und Fenstereinstellungen unterschiedliche Dateien. Mit dem von A. Read erstellten Skript `skycast` wird die passende Ereignisliste auf die Koordinaten der Beobachtung projiziert. Anschließend wird das Skript `mk_image_new` von D. Horns [16] verwendet, um daraus ein Hintergrundbild zu erstellen, das mit der Belichtung des entsprechenden Bilds skaliert ist. Dazu werden die Ereignisse außerhalb des Gesichtsfelds im Ausgangsbild und Hintergrundbild jeweils aufsummiert und verglichen. Letzteres wird mit dem Verhältnis der Summen multipliziert und damit an die Belichtung angepasst.

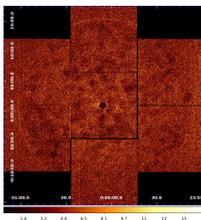


Abbildung 3.5: die heruntergeladene Hintergrundkarte für mos2, mit mittlerem Filter. Sie liegt in Detektorkoordinaten vor und muss daher mit dem Skript `skycast` auf die Koordinaten der entsprechenden Beobachtung projiziert und anschließend mit der Belichtung skaliert werden.

Als letzter Schritt zur Datenreduktion wird vom bisherigen Bild die Hintergrundkarte abgezogen, wofür man das `ftool` `farith` mit der Option *Subtraktion* benutzt. Aufgrund von statistischen Schwankungen kann der Wert in einigen Bildpunkten in der Hintergrundkarte höher sein als der entsprechende im zugehörigen Bild. So kann es zu negativen Werten im belichtungskorrigierten Bild kommen.

Zusammensetzen der Bilder

Nachdem die Daten der einzelnen Bilder bearbeitet und reduziert sind, werden sie zusammengesetzt. Es wird ein sogenanntes Mosaik erstellt, in dem die Einzelbilder je nach ihrer Lage am Himmel zueinander dargestellt werden.⁴ Dazu wurde die SAS-Anwendung `emosaic`

⁴Zuerst wurde erfolglos versucht das ImageMagick-Programm `Montage`, das eigentlich für Bilder im optischen Bereich entwickelt wurde, auf die Röntgendaten anzuwenden. Der Versuch scheiterte daran, dass die Kopfdaten der Ereignislisten bei Röntgenbeobachtungen nicht in der erforderlichen Form vorliegen und sie neu zu erstellen deutlich aufwendiger gewesen wäre als auf die SAS zurückzugreifen.

verwendet. Das ausgegebene Bild ist zunächst eine reine Überlagerung der Einzelbilder unter Berücksichtigung ihrer Himmelskoordinaten. Bereiche, in denen sich mehrere Bilder überschneiden, sind deutlich heller, da hier die Zählraten der Einzelbilder aufaddiert werden. Desweiteren erscheinen Bilder mit längeren Belichtungszeiten heller. Beide unerwünschten Effekte werden in den Belichtungskarten berücksichtigt. Mit `emosaic` kann parallel ein Mosaik aus den Belichtungskarten zu den entsprechenden Bildern erstellt werden, durch welches das Bildmosaik geteilt werden kann, wodurch die Effekte verschwinden.

Adaptive Weichzeichnung

Um die großskaligen Strukturen hervorzuheben, ist es sinnvoll die Bilder mit einem Weichzeichner zu bearbeiten. Eine Alternative zu einem gewöhnlichen Weichzeichnungsprogramm, bei dem im gesamten Bild die gleiche Anzahl benachbarter Pixel zusammengefasst wird, bietet die adaptive Weichzeichnung. Hierbei werden Regionen mit weniger verzeichneten Ereignissen stärker geglättet als helle. Die ereignisreichen und damit interessanten Gebiete bleiben so schärfer und Feinheiten gehen nicht verloren. Außerdem bleiben Punktquellen klein, während sie bei einem einfachen Weichzeichner deutlich vergrößert werden.

Die adaptive Weichzeichnung kann mit dem CIAO-Werkzeug⁵ `csmooth` durchgeführt werden. Zunächst bestimmt es in jedem Pixel das Signal-Rausch-Verhältnis. Mit dem Parameter `sigmin` kann ein Wert vorgegeben werden, auf den jedes Verhältnis angepasst werden soll, indem mehrere Pixel zusammengefasst werden. Da das Signal-Rausch-Verhältnis in ereignisreichen Pixeln größer ist, werden dort weniger Pixel zusammengefasst und helle Regionen damit weniger stark geglättet. Um in ereignisarmeren Gebieten zu starkes Weichzeichnen zu verhindern, kann mit `sc1max` eine obere Schranke für die Anzahl von zusammengefassten Bildpunkten angegeben werden.

Bildbearbeitung mit SAOImage DS9

Die weitere Bearbeitung der Bilder erfolgt mit dem Programm SAOImage DS9. Zunächst wählt man die passende Skalierung aus, wobei für die meisten Mosaik eine logarithmische und für einzelne Beobachtungen eine lineare Skalierung verwendet wurde (siehe Abbildungsbeschriftungen). Das Programm verfügt über einen gewöhnlichen gaußschen Weichzeichner. Es ermöglicht außerdem die Zuordnung verschiedener Farbskalen, das Überlagern mehrerer Energiebänder, das Produzieren und Einfügen von Konturen und das Erstellen der Koordinatenachsen. Negative Werte, die beim Abziehen des Hintergrunds auftreten können, werden durch Verschieben der Skala auf Null gesetzt.

⁵Zunächst wurde versucht das SAS-Werkzeug `asmooth` zu verwenden. Leider werden dabei die Ränder der einzelnen Bilder als solche nicht erkannt und `asmooth` glättet über sie hinweg. So werden an manchen Stellen Einzelaufnahmen verbunden angezeigt, obwohl ihre Gesichtsfelder nicht überlappen. Solche Effekte können durch die Belichtungskarte nicht ausgeglichen werden. Die Folge sind dunkle Streifen entlang der Übergänge von sich eigentlich nicht überlappenden Bildern.

Kapitel 4

Ergebnisse zu den einzelnen Bearbeitungsschritten

In diesem Kapitel soll gezeigt werden wie das Bild durch die einzelnen Analyseschritte nach und nach manipuliert wird. Entweder wird die Veränderung anhand eines Einzelbilds deutlich gemacht oder das zusammengesetzte Mosaik gezeigt.

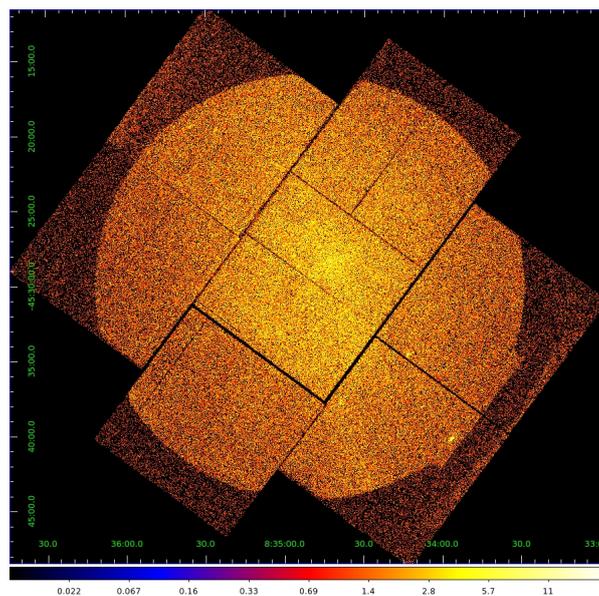


Abbildung 4.1: Rohbild der mos2-Kamera von 0603510101 mit logarithmischer Skala. Darstellung der - bis auf Maßnahmen an Bord - ungefilterten Ereignisliste und damit des gesamten Energiebands und der kompletten CCDs, einschließlich dem Bereich außerhalb des Gesichtsfelds.

Erstellung der zentralen Dateien

Abb. 4.1 zeigt das Rohbild der mos2-Kamera von Aufnahme 0603510101. Außer der Daten-selektion an Bord von XMM-Newton wurden noch keine Bearbeitungen vorgenommen. Man sieht auch außerhalb des Gesichtsfelds Ereignisse, die auf Hintergrundeffekte zurückgehen. Innerhalb des Gesichtsfelds wurden aber deutlich mehr Ereignisse verzeichnet, sodass sich die kreisförmige Spiegelöffnung klar abzeichnet.

Erzeugung von Bilddateien

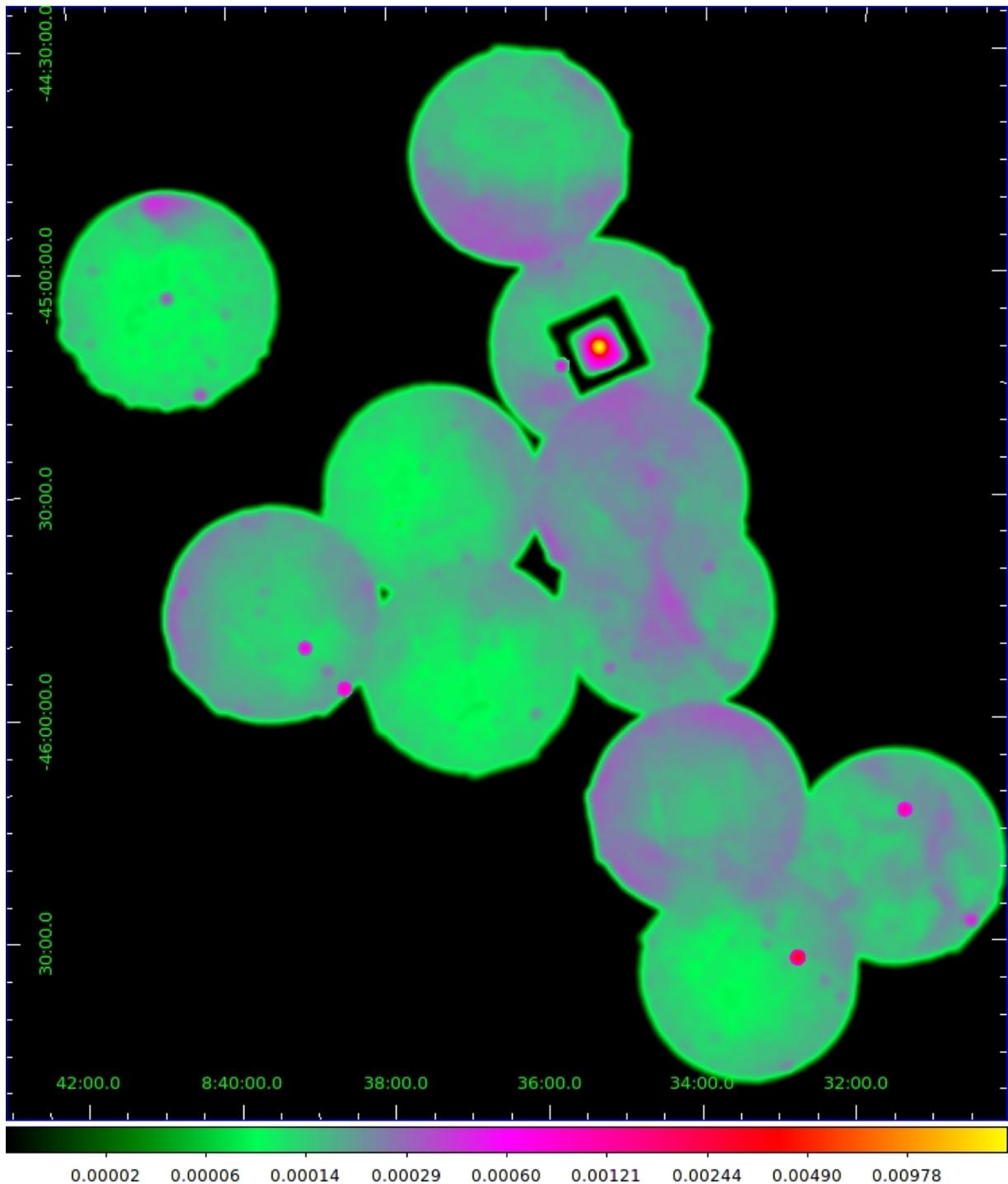


Abbildung 4.2: Mosaik der Rohbilder im Energiebereich von 0,3 -10 keV. Das Bild ist be-
lichtungskorrigiert, mit einem Radius von 15 Bildpunkten weichgezeichnet und logarithmisch
skaliert.

Die Abbildung zeigt ein Gesamtbild aus den unbearbeiteten Daten. Der Pulsar ist die do-
minierende Quelle und erscheint bei der gewählten Farbskala gelb. Durch die quadratische
Lücke rund um den Pulsar wird deutlich, dass diese CCD auf ein kleines Fenster reduziert

wurde (vgl. Kapitel 3, „Die Rohdaten“). Die magenta-farbenen Scheibchen sind Punktquellen, deren Durchmesser durch die Weichzeichnung vergrößert wurde.

Solare Protonen

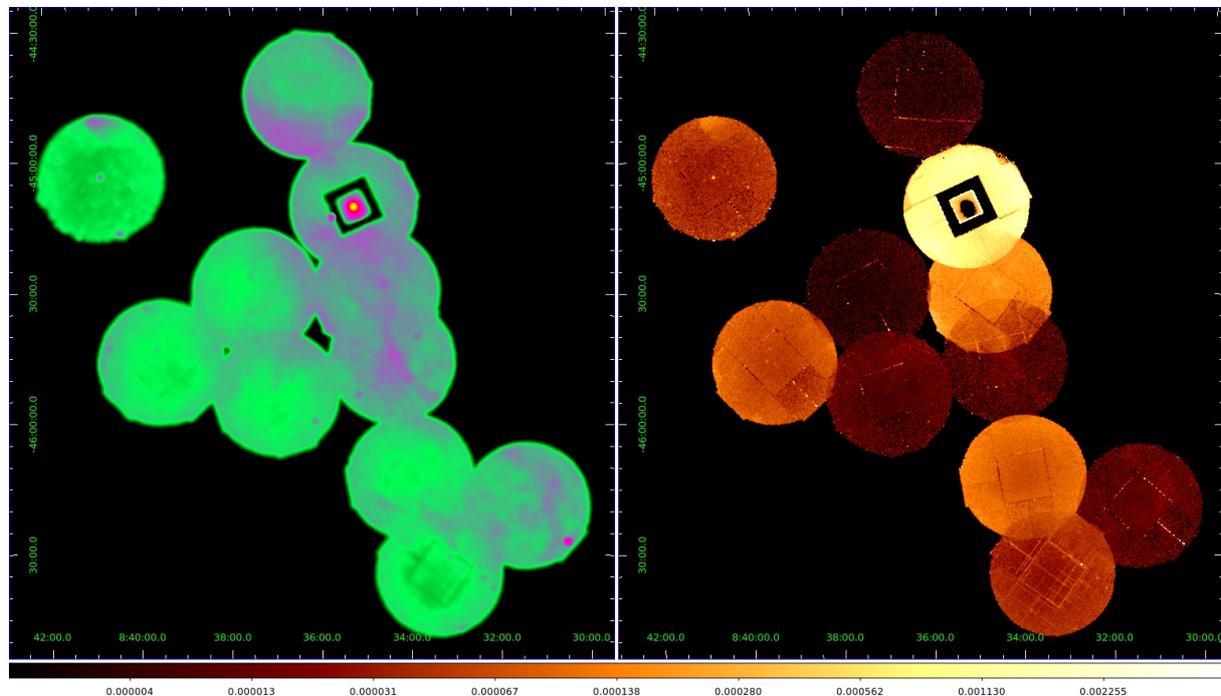


Abbildung 4.3: links: Mosaik nach Entfernen der kontaminierten Zeitintervalle, rechts: herausgeschnittene Ereignisse.

Die linke Abbildung zeigt das Mosaik nach Entfernen der niederenergetischen Protonen-Ereignisse. Auf eine größere Abbildung wird verzichtet, da mit bloßem Auge die Veränderung zum Bild in Abb. 4.2 kaum gesehen werden kann. Der Unterschied wird aber umso deutlicher, wenn man die Mosaik vor und nach diesem Bearbeitungsschritt voneinander abzieht. Das Resultat ist rechts in Abb. 4.3 zu sehen. Es enthält also die Ereignisse, die auf solare Protonen zurückgeführt wurden. Je nach Beobachtung ergeben sich stark unterschiedliche Werte. Tabelle 3.1 zeigt welcher Anteil der Beobachtungszeit (t_0) durch solare Protonen verunreinigt ist, t_{fit} gibt die Zeit an, die nach der Filterung übrig bleibt. Man sieht, dass der nutzbare Anteil von Beobachtung zu Beobachtung stark variiert. Bei manchen ist fast die gesamte Zeit nutzbar, während bei anderen bis zu einem Drittel verloren geht. Eine Ausnahme bildet Aufnahme 0510390301, die den Pulsar enthält. Durch die starke Quelle ist die Zählrate auch abgesehen von niederenergetischen Teilchen über den gesamten Beobachtungszeitraum sehr hoch. Dadurch ist es deutlich schwieriger als bei den anderen Datensätzen die unkontaminierten Intervalle in der Lichtkurve zu bestimmen.

Beide Varianten der Protonen-Filterung wurden durchgeführt und die Überprüfung mit dem Skript `Fin_over_Fout` ergab für alle Datensätze „geringfügig“ oder „nicht kontaminiert“.

Belichtungskorrektur

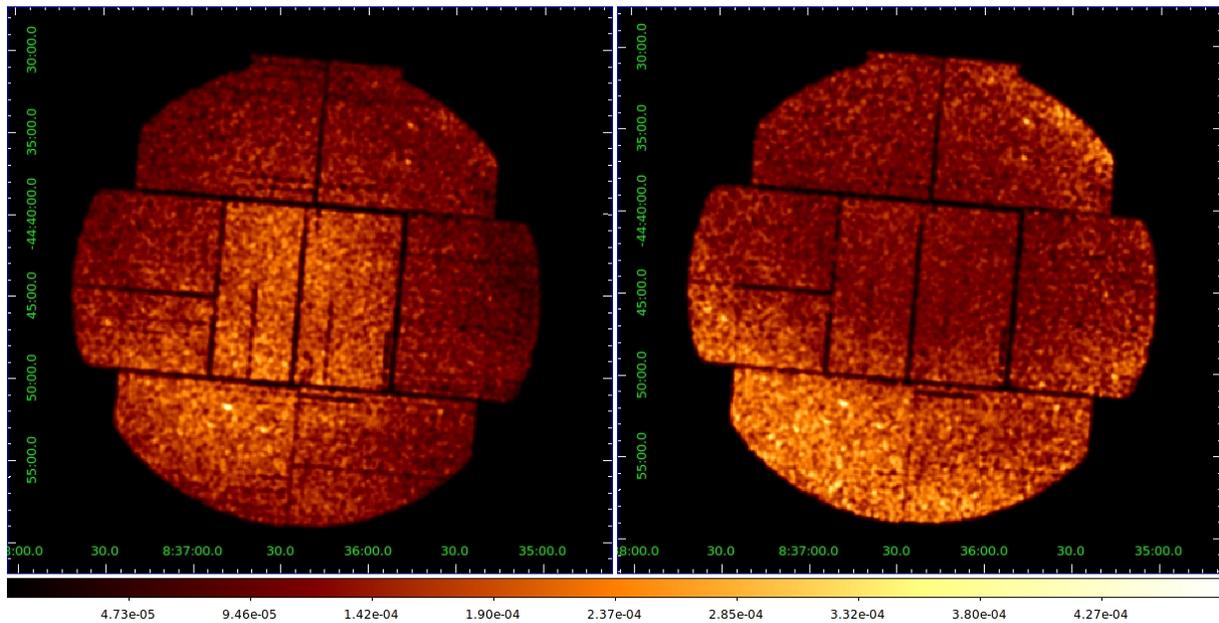


Abbildung 4.4: Die mos2-Aufnahme von 0603510401 vor (links) und nach der Belichtungskorrektur im Energieband von 0,3 -10 keV mit linearer Skala. Durch diesen Analyseschritt werden unter anderem die Effekte der Spiegel herausgerechnet, wodurch die vorher unterdrückten Randbereiche angepasst werden. Die Bilder wurden mit einem Gauß-Weichzeichner mit einem Körnungsradius von drei bearbeitet und sind linear skaliert.

In obiger Abbildung sieht man das mos2-Bild von 0603510401 vor und nach der Division durch die Belichtungskarte. In diesem Vergleich wird vor allem der Effekt des Randlichtabfalls deutlich. Durch die Vignettierung wurden im zentralen Bereich mehr Ereignisse verzeichnet (linkes Bild). Die tatsächlichen Strukturen kommen erst nach diesem Analyseschritt zum Vorschein und liegen am unteren sowie am rechten oberen Bildrand.

Abb. 4.5 zeigt ein Mosaik, das nicht belichtungskorrigiert ist. Je nach Belichtungszeit der einzelnen Aufnahmen (vgl. t_{filt} in Tab. 3.1) erscheinen sie heller oder dunkler. Außerdem erscheinen Bereiche deutlich heller, in denen mehrere CCDs überlagert sind. Das sind einerseits Gebiete, in denen sich mehrere Gesichtsfelder überlappen und andererseits die Flächen innerhalb der Bilder, in denen die CCDs beider Kameras überlagert sind.

Im Mosaik aus Belichtungskarten (Abb. 4.6) sieht man, dass die einzelnen Karten zum Zentrum hin heller werden. So wird der Effekt der Vignettierung ausgeglichen. Bei längeren Beobachtungen verzeichnen die CCDs mehr Ereignisse, wodurch die jeweilige Belichtungskarte insgesamt heller ist. So können Bilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten im richtigen Verhältnis zueinander dargestellt werden. Bei Überlagerungen von mehreren Einzelaufnahmen werden die Belichtungskarten einfach addiert, wodurch diese Bereiche im belichtungskorrigierten Bild auf das gleiche Niveau wie andere Regionen gebracht werden. Vergleiche hierzu das unkorrigierte Bild (Abb. 4.5), das Mosaik aus Belichtungskarten (Abb. 4.6), sowie das belichtungskorrigierte Bild (Abb. 4.8), welches entsteht, wenn man Abb. 4.5 durch Abb. 4.6 teilt.

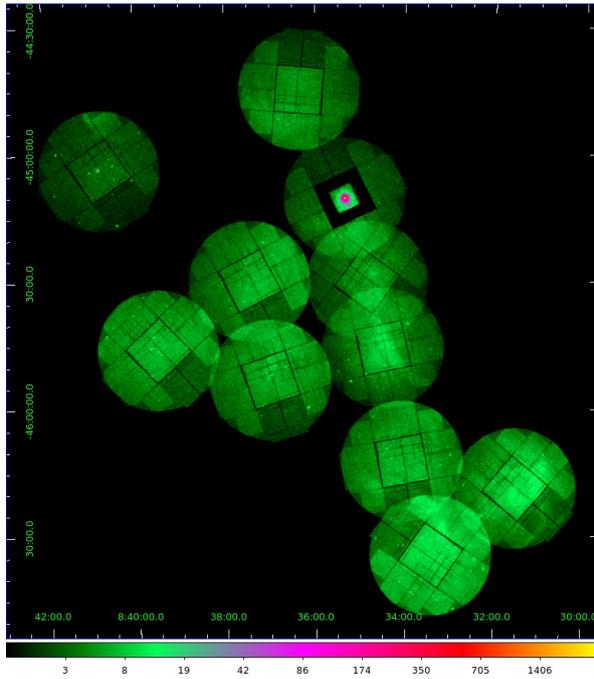


Abbildung 4.5: Mosaik ohne Belichtungskorrektur im Energieband von 0,3 - 10 keV in logarithmischer Skala. Die einzelnen Aufnahmen erscheinen je nach Belichtungslänge unterschiedlich hell und Bereiche, in denen sich mehrere CCDs überlagern, deutlich heller. Das Bild wurde mit einem Gauß-Weichzeichner mit einem Radius von drei Pixeln bearbeitet.

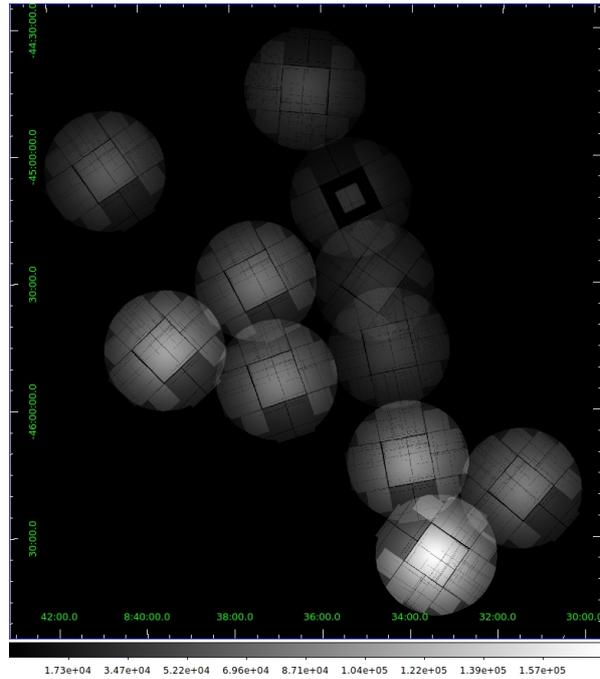


Abbildung 4.6: Mosaik der Belichtungskarten für die Bilder im Energieband von 0,3 - 10 keV in linearer Skala. Um erstens Überlagerungen mehrerer Bilder richtig darzustellen, zweitens Vignettierung und drittens unterschiedlich lange Belichtungszeiten zu berücksichtigen, wird das Bild-Mosaik durch dieses Mosaik geteilt.

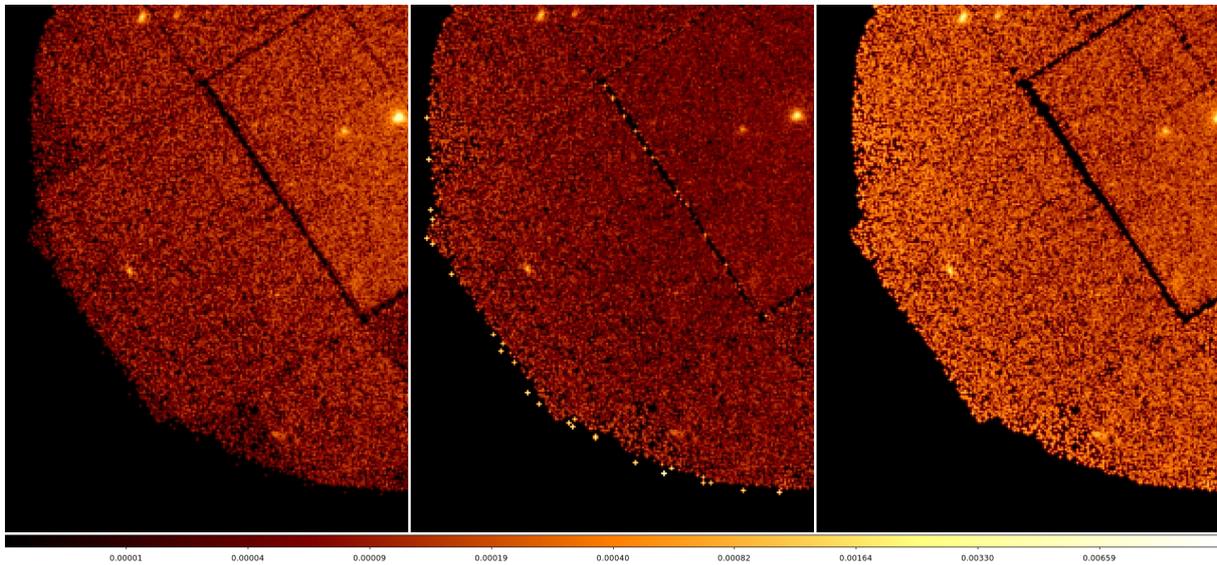


Abbildung 4.7: Ausschnitt der Aufnahme 0506490101 ohne Belichtungskorrektur, mit Belichtungskorrektur und mit Maske reduziert (v.l.n.r.). Es handelt sich um Überlagerungen der beiden MOS-Kameras, die mit einem Gauß-Weichzeichners mit einem Körnungsradius von einem Pixel bearbeitet sind. Die Skala ist linear.

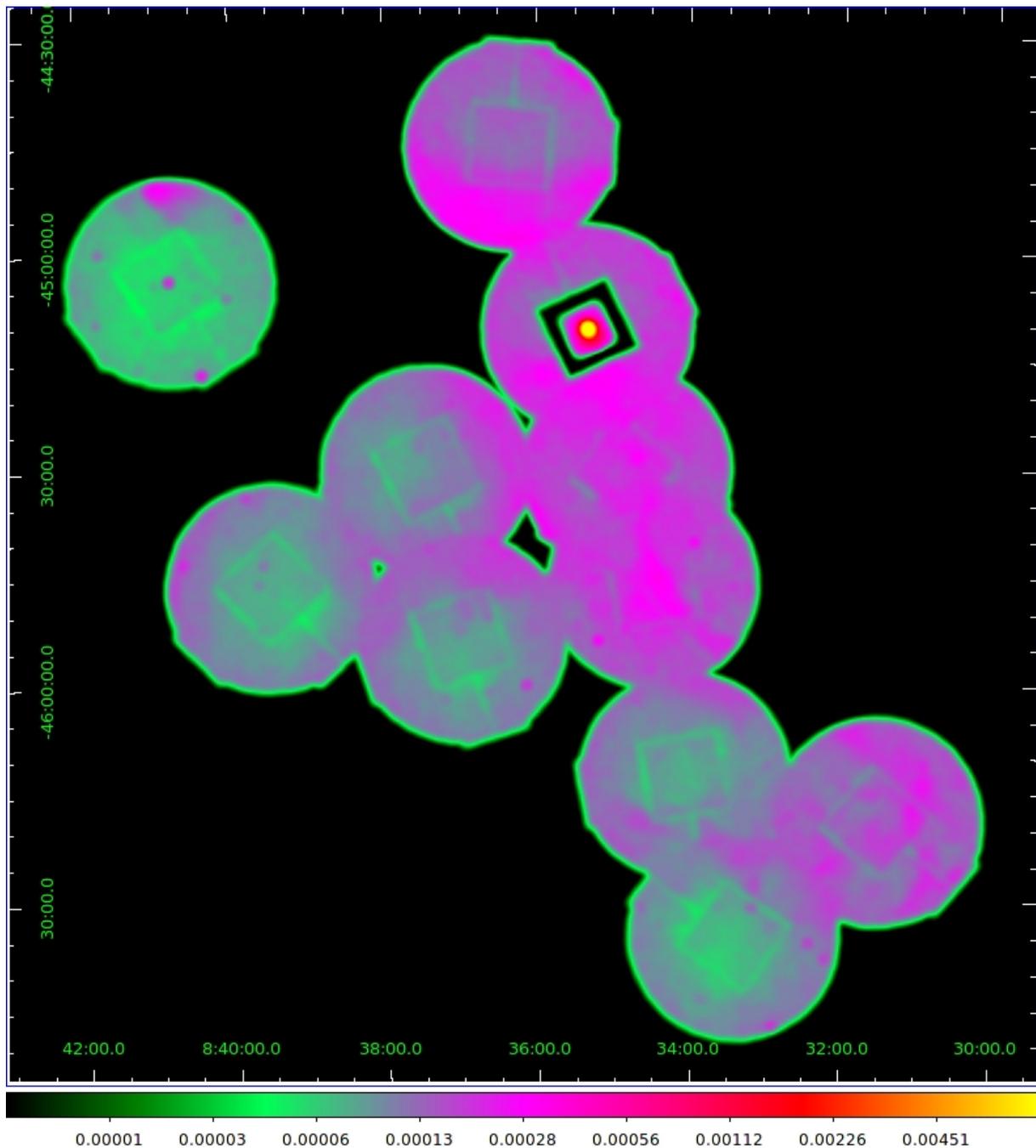


Abbildung 4.8: Mosaik im Energieband 0,3 - 10 keV nach Anwenden der Maske. Das Bild wurde mit einem Gauß-Weichzeichners mit einem Körnungsradius von 15 bearbeitet. Die Skala ist logarithmisch.

In den belichtungskorrigierten Bildern fällt auf, dass sie zum Rand hin tendenziell heller werden. In Abb. 4.8 sind die Randbereiche der signalschwächeren Einzelaufnahmen (z.B. im mittleren linken Bildbereich) deutlich hervorgehoben. Dieser Effekt wird Anti-Vignettierung genannt. Er tritt auf, da die Belichtungskarte erstellt wird, bevor der komplette Hintergrund abgezogen worden ist. Vor Erstellen der Belichtungskarten wurden nur solche Hintergrundkomponenten entfernt, die durch direktes Eintreffen von Teilchen auf die CCDs hervorgerufen werden, nicht-vignettierte Komponenten wie Rauschen und Fluoreszenz werden aber erst danach

entfernt. Zwar sind die Röntgenereignisse im Randbereiche um einen Faktor von drei kleiner als im Bildzentrum, aber durch den relativ konstanten Verlauf des Hintergrunds ist das Verhältnis von der Summe aus Signal und Hintergrund vom Zentrum zum Rand vor Abziehen des Hintergrunds noch geringer als 3:1. Da die Belichtungskarten so erstellt sind, dass sie einen Randlichtabfall mit Faktor drei ausgleichen (vgl. Kapitel 3 „Belichtungskorrektur“), kommt es vorübergehend zu einer Anti-Vignettierung.

Abschneiden von Bildpunkten mit geringer Zählrate

Abb. 4.7 zeigt drei Überlagerungen der beiden MOS-Aufnahmen von 0506490101 im gesamten Energiebereich. Teilt man das ursprüngliche Bild (links) durch die Belichtungskarte, werden die Ereignisse in den Randbereichen hervorgehoben. Dieser Effekt ist aber nur oberhalb einer bestimmten Zählrate wünschenswert. Bei sehr wenigen Ereignissen beinhalten die Werte zu wenig Statistik, um auf das Belichtungsniveau anderer Bereiche des Gesichtsfelds angehoben werden zu können, da unphysikalische Ergebnisse wie die hellen Punkte am äußersten Rand des mittleren Bilds auftreten. Im rechten Bild sind Bereiche mit Zählraten, die weniger als 10 % des maximalen Werts der Aufnahme betragen, mit einer Maske herausgeschnitten. Der Vergleich zeigt wie durch Ignorieren niedriger Zählraten unerwünschte Effekte vermieden werden können. Insgesamt ändert sich die Größe der Einzelbilder nur um wenige Bildpunkte. So fällt vor allem die Verbreiterung der Abstände zwischen den CCDs auf. Auch an diesen Rändern der CCDs ist die Zählrate geringer, da Ereignisse, die möglicherweise nicht komplett erfasst wurden, ignoriert werden (vgl. Kapitel 3 „Erzeugung von Bilddateien“). Abb. 4.8 zeigt das Gesamtbild nach dieser Datenreduktion.

Hintergrund

Das rechte Bild in Abb. 4.9 zeigt das Mosaik nach Abziehen des Hintergrunds. Der Effekt der Anti-Vignettierung ist deutlich geringer. Das Bild ist nun komplett bearbeitet und wird im nächsten Kapitel in verschiedenen Energiebändern präsentiert.

Adaptive Weichzeichnung

Abb. 4.9 vergleicht ein Bild vor (links) und nach (rechts) adaptiver Weichzeichnung. Das unbearbeitete Bild zeigt eine grobe Körnung, da nicht in jedem Bildpunkt Ereignisse empfangen wurden. Durch die Weichzeichnung werden solche Lücken geschlossen und das Bild erscheint einheitlicher. Selbst die Abstände zwischen den CCDs treten nicht mehr so deutlich hervor. Doch vor allem lassen sich Strukturen wesentlich besser erkennen.

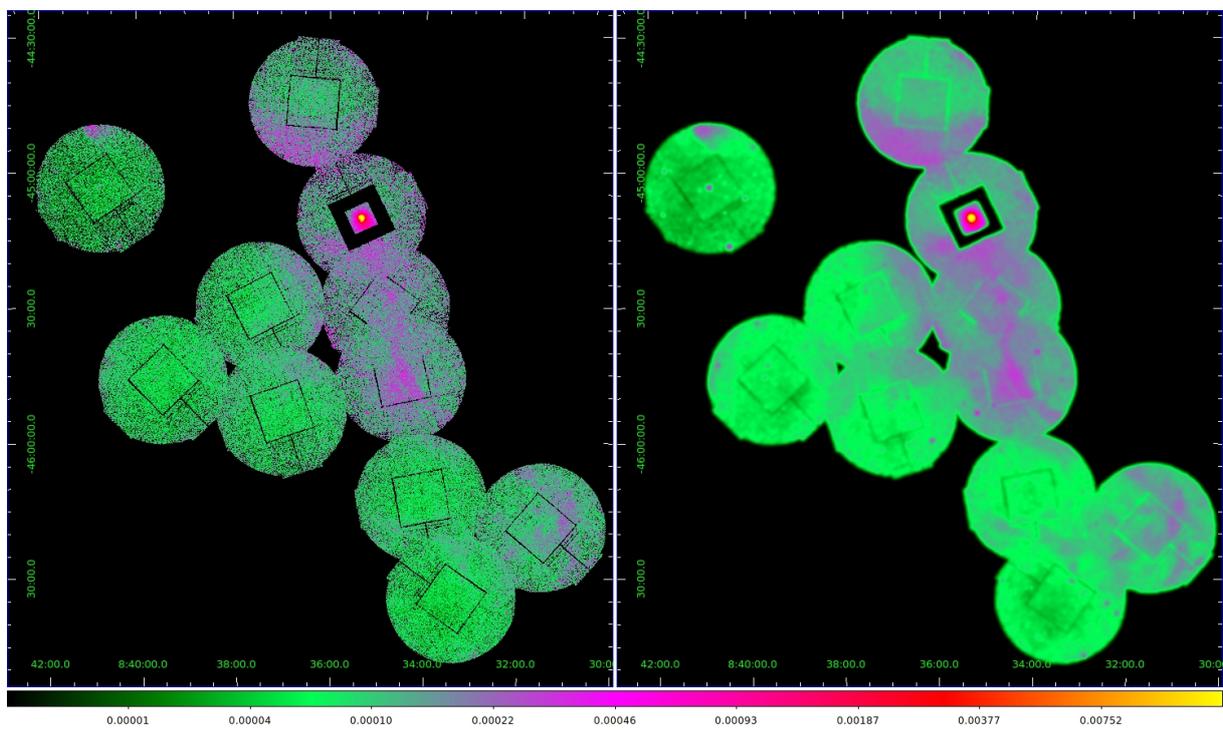


Abbildung 4.9: Mosaik nach Abziehen des Hintergrunds im Energieband 0,3 - 10 keV vor (links) und nach Anwenden der adaptiven Weichzeichnung. Die Skala ist logarithmisch.

Kapitel 5

Endergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in drei Unterpunkten präsentiert. Zunächst werden die bearbeiteten Bilder in verschiedenen Energiebändern gezeigt und kurz die sichtbaren Strukturen verglichen. Anschließend wird das Mosaik mit Konturen von ROSAT- und H.E.S.S.-Bildern überlagert und verglichen. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Kokon-Region gelegt. Im dritten Teil werden Profilschnitte entlang und senkrecht zum Kokon diskutiert.

5.1 Mosaike

Mit `evselect` wurde für jede Beobachtung ein Bild in drei Energiebändern (0,3 – 1 keV, 1 – 2 keV, 2 – 8 keV) produziert und wie in Kapitel 3 beschrieben bearbeitet. Sie werden in den Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 gezeigt. Die Unterteilungen wurden so gewählt, dass sich eine ähnliche Anzahl Photonen in den einzelnen Bändern befindet, um eine vergleichbare Statistik zu haben. In Abb. 5.4 sind die drei Energiebereiche überlagert dargestellt mit den Farben rot (niedrigstes Energieband), grün (mittleres) und blau (höchstes). Die vier Bilder in diesem Abschnitt sind in logarithmischer Skalierung und mit `csmooth` adaptiv weichgezeichnet.

Da die Anordnung der CCDs von `mos1` zu der von `mos2` um 90° gedreht ist, verschwinden bei der Überlagerung der beiden Bilder die meisten Abstände zwischen den CCDs. Nur die Lücken um die mittleren CCDs koinzidieren und bleiben bestehen. Da CCD 6 von `mos1` keine Signale mehr liefert, wird eine weitere Lücke zwischen zwei der äußeren Sensoren nicht geschlossen¹.

Schon auf den ersten Blick erscheinen die Strukturen im niedrigsten Energieband am deutlichsten. Dass dort mit Abstand die meisten Ereignisse verzeichnet wurden, hat zur Folge, dass es sich kaum vom Bild des gesamten Energiebereichs (4.9 rechts) untescheidet.

Bei einem rein qualitativen Vergleich der verschiedenen Energiebänder kann man Strukturen unterscheiden, die in allen sichtbar sind und solche, die nur in den niedrigeren auftreten. Zunächst ist der Pulsar in allen Energiebändern mit Abstand die stärkste Quelle. Die Struktur,

¹Man vermutet, dass der Einschlag eines Mikro-Meteoriten die CCD unbrauchbar gemacht hat [3]. 0094630101 wurde vor Verlust von CCD 6 aufgenommen und enthält damit Daten von allen sieben CCDs in beiden Kameras.

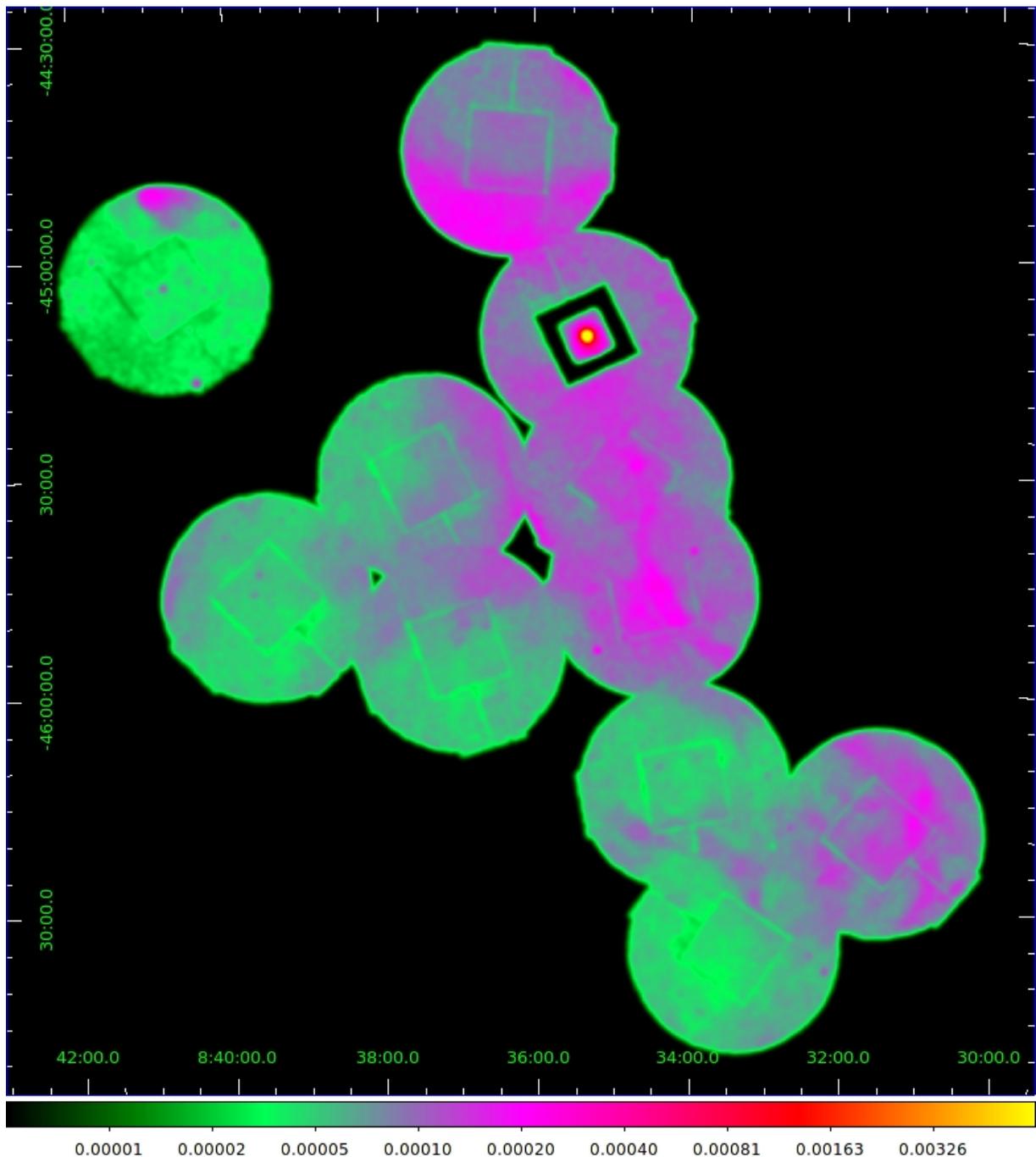


Abbildung 5.1: Mosaik im Energiebereich 0,3 - 1 keV . In diesem Energieband befinden sich mit Abstand die prominentesten Strukturen.

die sich direkt südlich der Punktquelle über die gesamte Breite von Beobachtung 0510390301 erstreckt, ist bei allen Energien prominent und tritt vor allem bei den beiden höheren Energieintervallen als eines der wenigen ereignisreichen Gebiete hervor. Das zeigt sich auch durch ihre weiße Farbe in Abb. 5.4, die sich durch die Überlagerung der drei Farben ergibt. Zu den hellen Strukturen im Energieband 0,3 - 1 keV in der oberen linken Ecke und am linken Rand von Bild 0603510701 sind bei reiner Betrachtung der Bilder keine Überlagerungen in den anderen Energiebereichen erkennbar.

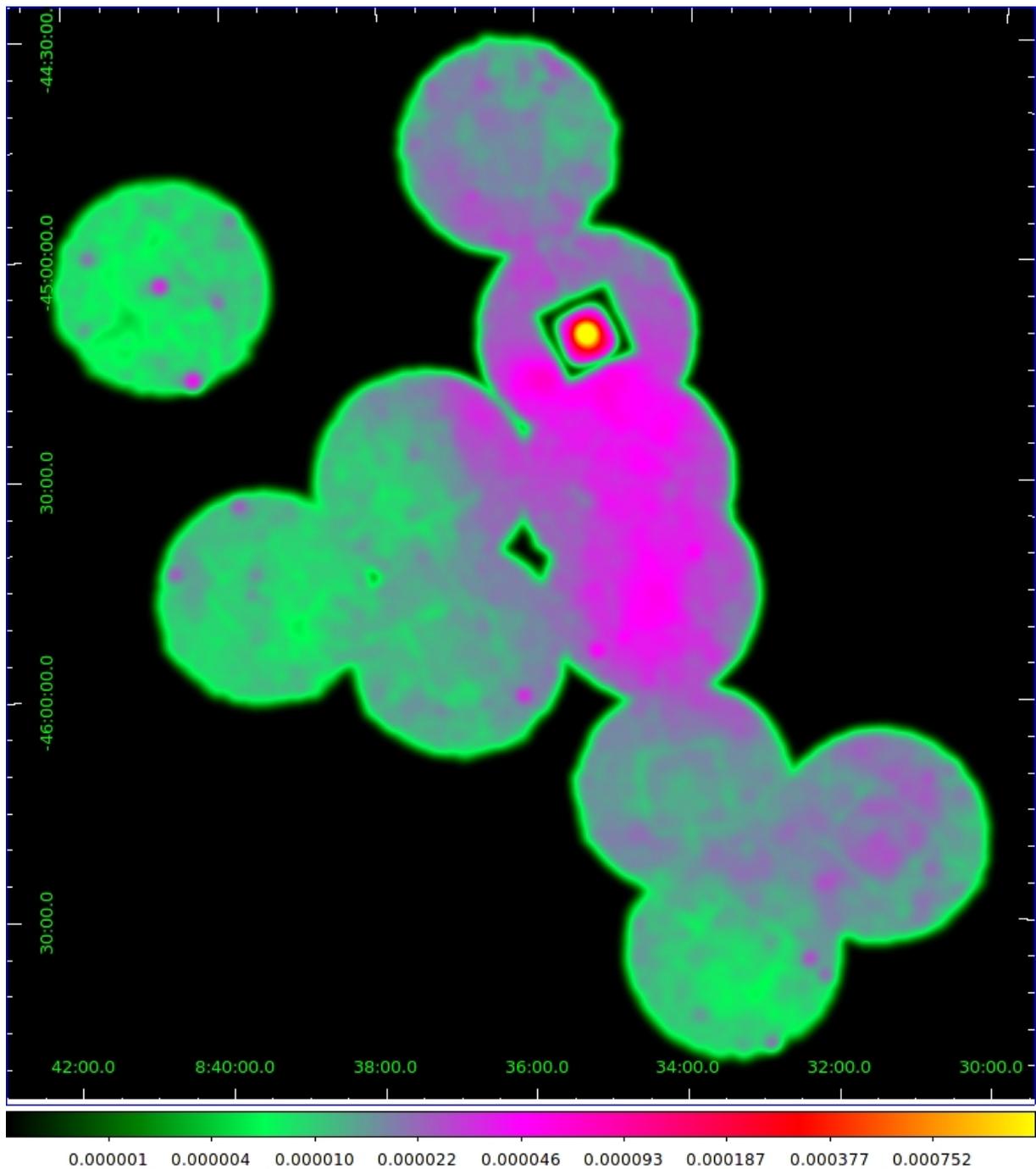


Abbildung 5.2: Mosaik im Energiebereich 1 - 2 keV.

Der Kokon, der sich südsüdwestlich des Pulsars über die Bilder mit BID 0603510101 und 0094630101 erstreckt, ist eine der Strukturen, die im niedrigsten Energieband am deutlichsten zu sehen sind und mit steigender Energie an Prominenz verlieren. Gleiches gilt für das Gebiet südöstlich des Neutronensterns und im gesamten unteren Bildbereich. Der Kokon erscheint im niedrigsten Band klarer begrenzt und verläuft in einem Bogen, bei höheren Energien ist er deutlich diffuser und der Verlauf ist eher geradlinig, in nord-südlicher Richtung.

Im höchsten Energieband ist eine leichte Anti-Vignettierung auszumachen (z.B. in Beobachtung 0094630101). Sie tritt auf, wenn nicht der gesamte Hintergrund abgezogen ist, wodurch

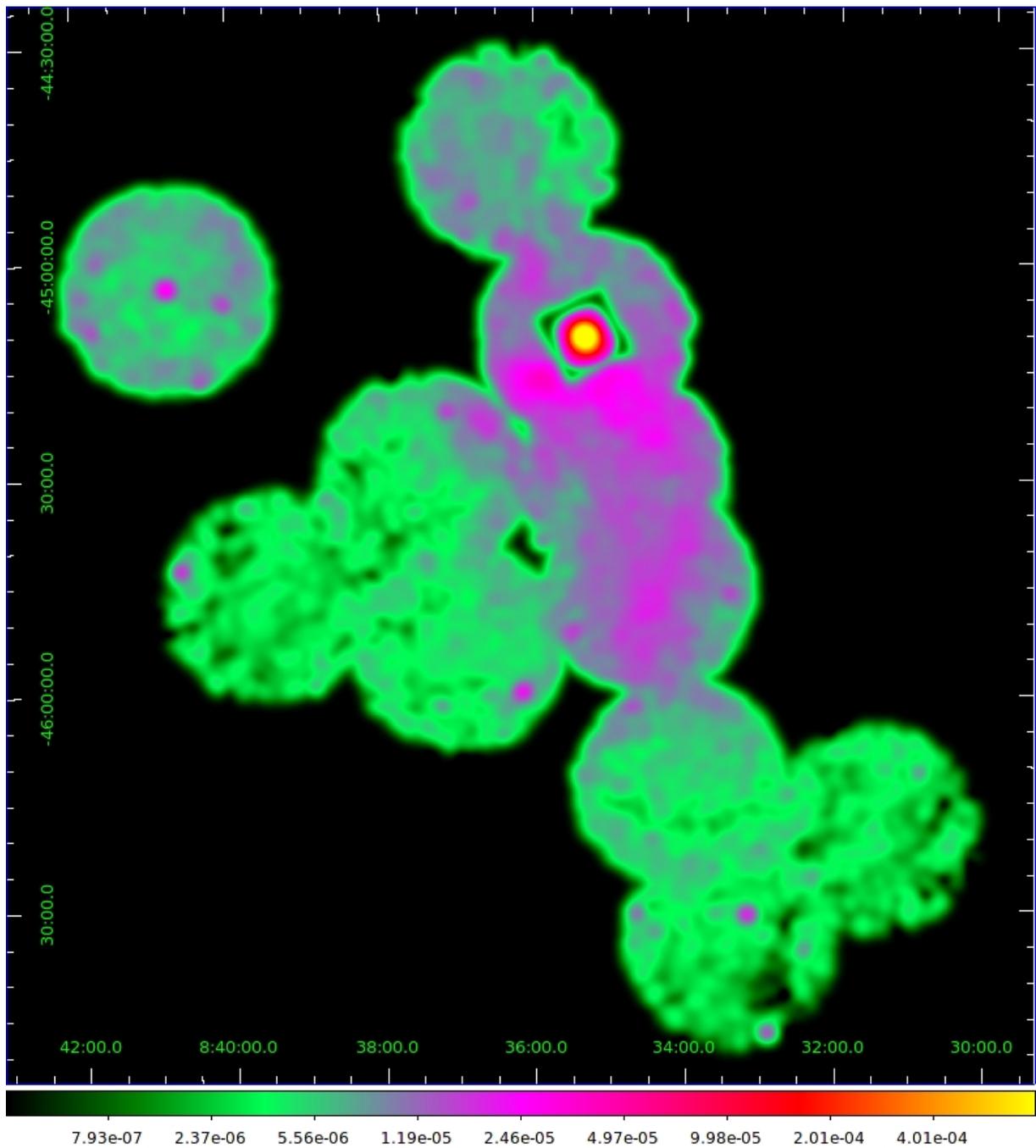


Abbildung 5.3: Mosaik im Energiebereich 2 - 8 keV. Der Effekt der Anti-Vignettierung tritt hier auch nach Abziehen des Hintergrunds merklich auf.

die verbliebenen Hintergrundereignisse im Randbereich des Gesichtsfelds durch das geringere Signal-Rausch-Verhältnis einen größeren Anteil der Ereignisse ausmachen als im Zentrum. So werden die äußeren Gebiete nach der Belichtung überrepräsentiert. Da in höheren Energien weniger Ereignisse verzeichnet werden, tritt der Effekt hier stärker auf.

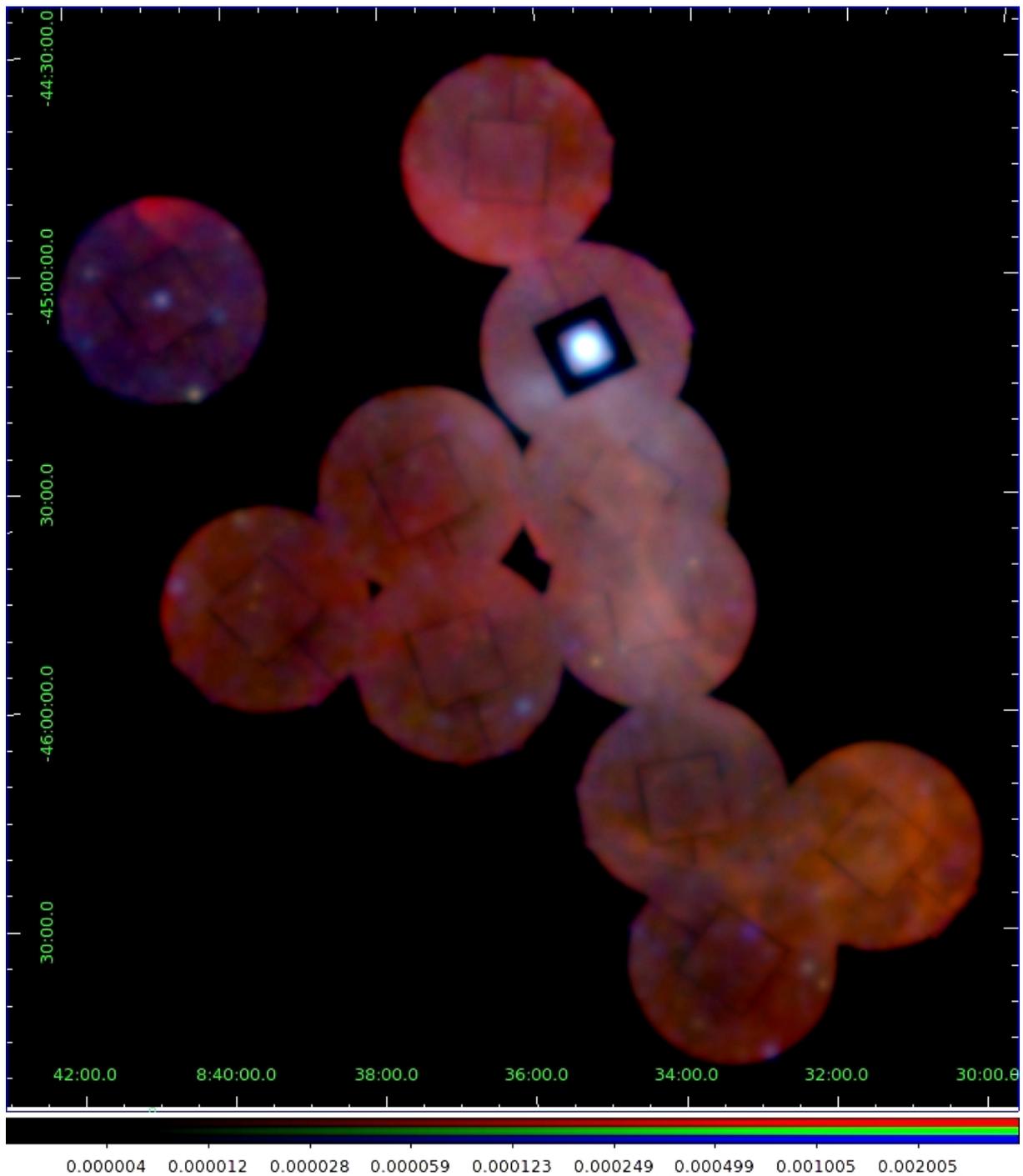


Abbildung 5.4: Die drei Energiebänder überlagert, wobei rot dem niedrigsten (0,3 - 1 keV), grün dem mittleren (1 - 2 keV) und blau dem höchsten (2 - 8 keV) entspricht. Weiße Bereiche weisen in allen Bändern hohe Zählraten auf.

5.2 Überlagerung mit Konturen

Anschließend wurde das Bild mit Konturen von Aufnahmen aus verschiedenen Energiebändern überlagert. So können Strukturen mit denen auf anderen Röntgenbildern verglichen werden, bzw. Pendanten in anderen Energiebändern gesucht werden.

Überlagerung mit Radio-Konturen

Zunächst wurde das erstellte XMM-Newton Bild mit Radio-Konturen überlagert. Die Daten stammen vom Molonglo Observatory Synthesis Telescope (MOST), das bei einer Frequenz von 843 MHz arbeitet. Das One-Mile Mills Cross wurde bis 1997 zum MOST umgebaut. Es wird vom Physik-Fachbereich der University of Sydney betrieben und besteht aus zwei zylindrischen Paraboloiden mit einer Fläche von 778x12 m und einem Abstand zueinander von 15 m. [21]

Abb. 5.6 zeigt die Überlagerung des XMM-Newton-Bilds mit den Radiokonturen. Das Gegenstück zum Kokon ist deutlich nach Westen versetzt. Vergleiche hierzu Frail et al. (1996) [11], in dem ein Radiobild des Very Large Array Teleskops mit Konturen von ROSAT überlagert wurde.

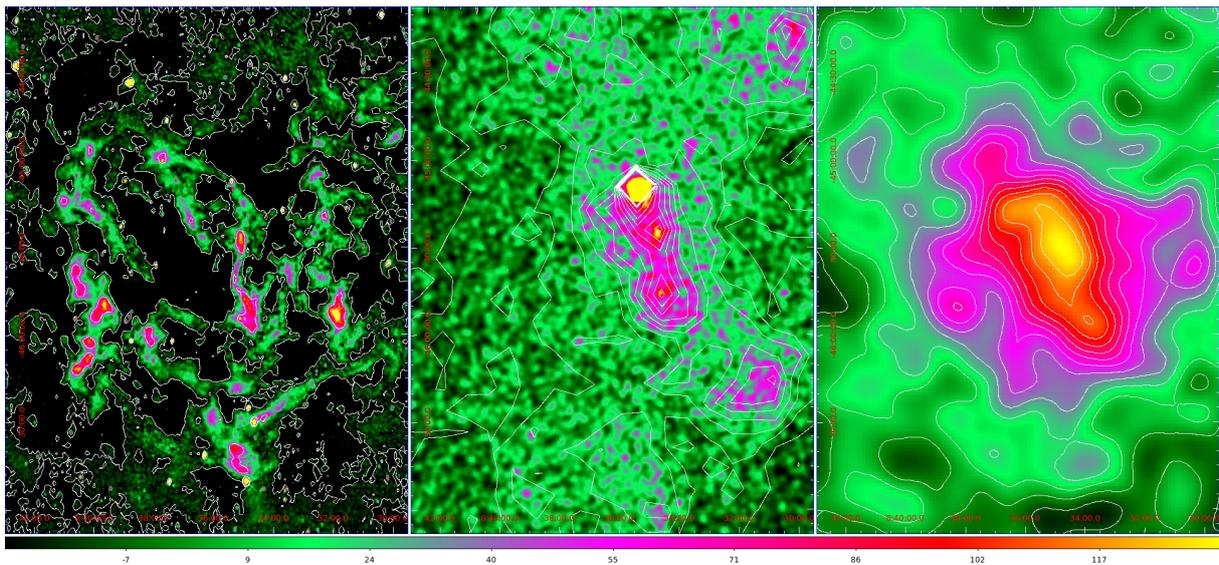


Abbildung 5.5: Links: Für das Erstellen der Konturen in Abb. 5.6 verwendete MOST-Bild im Frequenzbereich von 843 GHz. [20] Mitte: Für das Erstellen der Konturen in Abb. 5.7 verwendete ROSAT-Bild aus der RASS-Mission im Energiebereich 0,9 - 2,4 keV. Weichgezeichnet mit einem Radius von drei Pixeln. [22] Rechts: Für das Erstellen der Konturen in Abb. 5.8 verwendete H.E.S.S.-Bild mit Energien oberhalb von 450 GeV [25]. Die drei Bilder sind linear skaliert und mit Konturen überlagert.

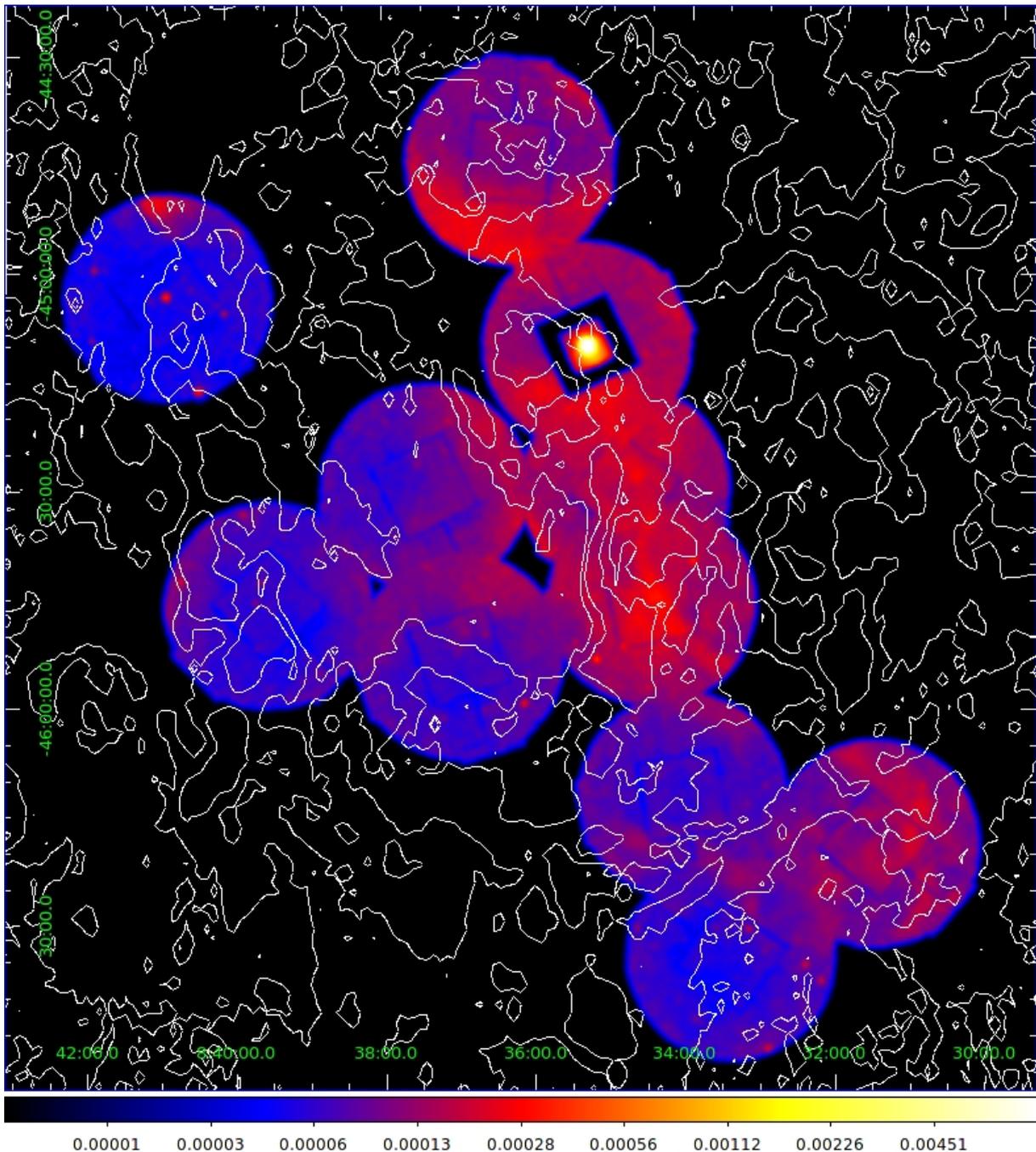


Abbildung 5.6: Mosaik des gesamten XMM-Newton-Energiebereichs (0,3 - 10 keV) überlagert mit Radiokonturen von MOST (843 MHz).

Überlagerung mit Röntgen-Konturen

In Abb. 5.7 ist das Mosaik aus Abb. 4.9 mit Konturen überlagert, die zu einem Bild vom Röntgensatelliten (ROSAT) erstellt wurden. ROSAT war eine Mission unter deutscher Leitung mit britischer und US-amerikanischer Beteiligung. Der Satellit war von 1990 bis 1999 in Betrieb [22]. Wie bei XMM-Newton wurde eine Wolter-I-Optik verwendet. Ereignisse im Energiebereich von 0,1 bis 2,4 keV konnten mit einer Genauigkeit von rund $10''$ detektiert werden [23].

Während der ersten sechs Monate seines Betriebs nahm ROSAT den gesamten Röntgenhim-

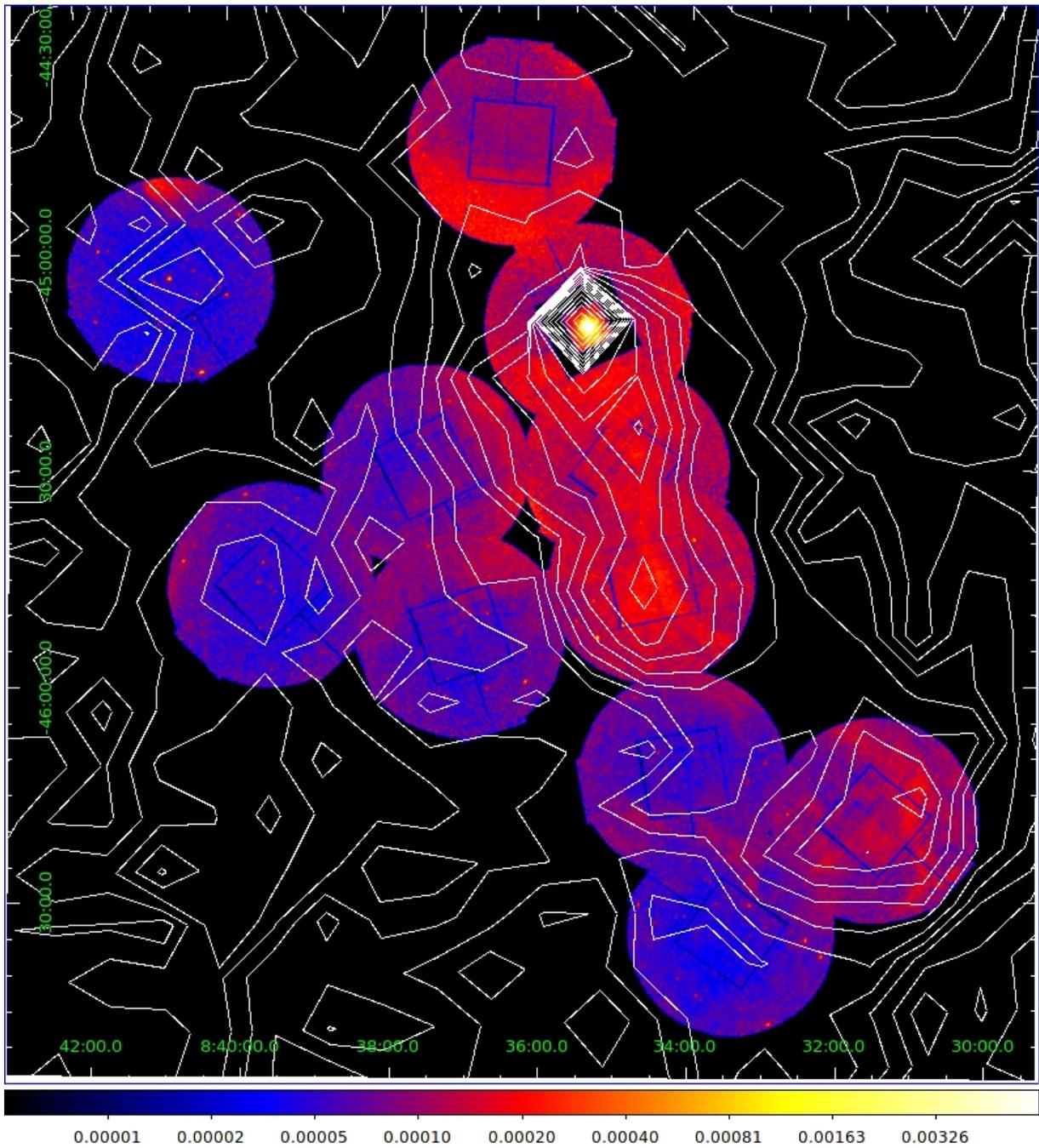


Abbildung 5.7: Mosaik des gesamten XMM-Newton-Energiebereichs (0,3 - 10 keV) überlagert mit Röntgenkonturen von ROSAT (0,9 - 2,4 keV).

mel auf. Die in dieser RASS-Mission (*ROSAT all sky survey*) gewonnenen Bilddateien stehen auf der Webseite der Mission [24] zum Download zu Verfügung. Die Daten liegen unter anderem als FITS-Dateien in den Energiebereichen 0,1 - 0,4 keV, 0,4 - 0,9 keV und 0,9 - 2,4 keV vor. Der hier verwendete Ausschnitt (Abb. 5.5, Mitte) stammt aus dem höchsten Energieband.

Durch die Konturen ist das XMM-Newton-Bild mit dem ROSAT-Bild vergleichbar geworden. Abgesehen vom Pulsar ist die Kokon-Region auch im ROSAT-Bild der hellste Bereich. In der ROSAT-Aufnahme hat der Kokon einen nahezu geraden Verlauf, so wie im XMM-Newton-

Bild in Abb. 5.2 mit einem ähnlichen Energiebereich (1 - 2 keV).

Überlagerung mit Gamma-Konturen

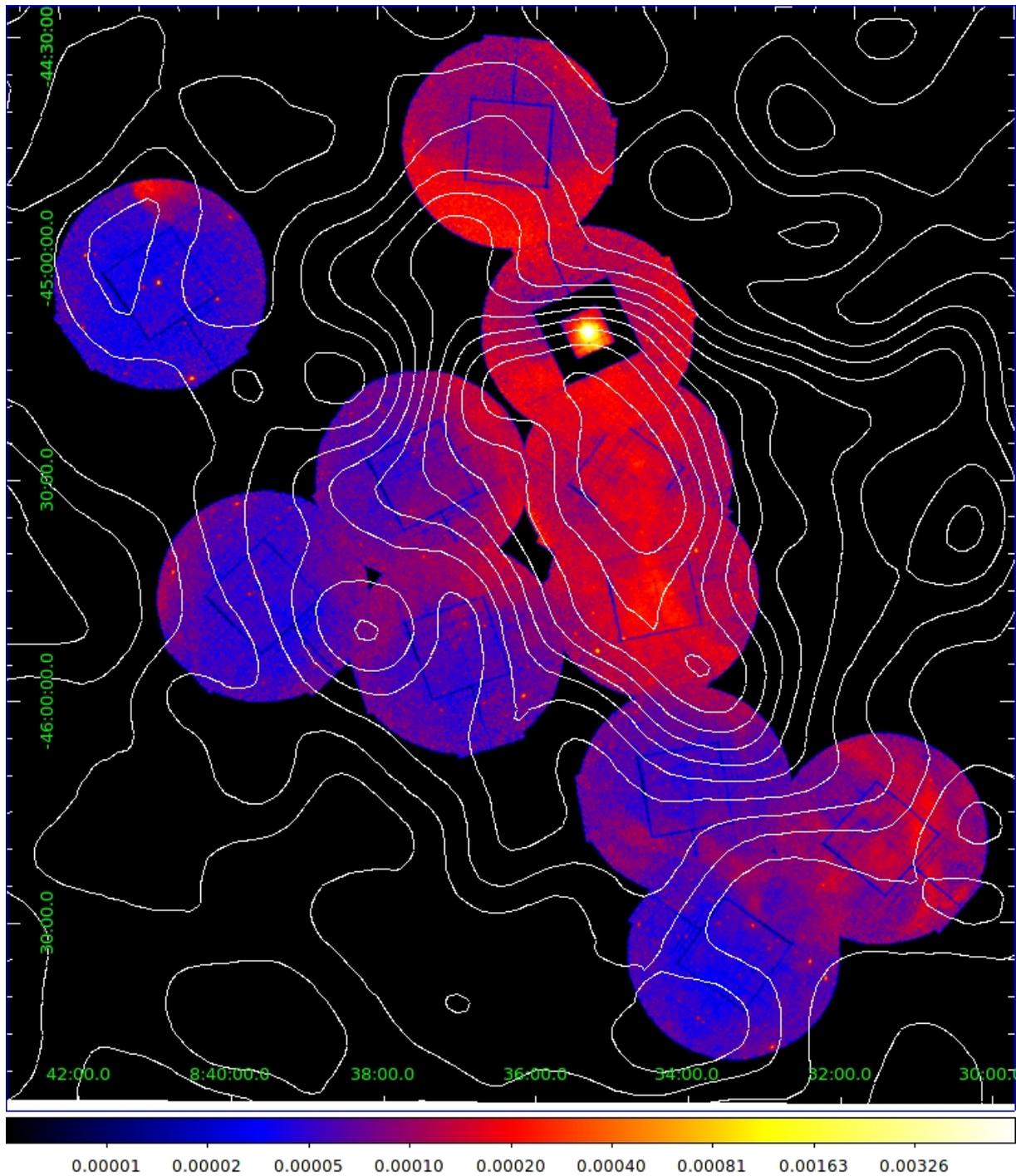


Abbildung 5.8: Zusammengesetztes XMM-Newton-Bild im Energieband von 0,3 - 10 keV überlagert mit Gamma-Konturen von H.E.S.S. (> 450 GeV)

Auf der Suche nach Entsprechungen von Röntgenstrukturen im Gamma-Bereich wurden Konturen eines H.E.S.S.-Bilds über das Mosaik aus Abb. 4.9 gelegt. H.E.S.S. steht für *High Energy Stereoscopic System* und besteht aus vier Teleskopen, die auf der Farm Göllschau in

Namibia stehen. Gammastrahlung kann vom Boden aus nur indirekt über Luftschauer beobachtet werden. Hochenergetische Teilchen - wie Photonen, Elektronen und Ionen - wechselwirken mit Atomen in der Luft, wobei weitere Teilchen entstehen, die ähnliche Reaktionen hervorrufen. Diese Kaskaden von Teilchen und Strahlung (Tscherenkow-Licht) werden Luftschauer genannt. Durch die Verwendung von mehreren Teleskopen, hat H.E.S.S. eine größere effektive Fläche [26].

Die verwendete H.E.S.S.-Aufnahme (Abb. 5.5, rechts) stammt aus Aharonian et al.(2006) [25] und zeigt Ereignisse mit Energien ab 450 GeV.

Auch in diesem Fall ist das Gebiet des Kokons die stärkste Quelle.

5.3 Die Kokon-Region

Abschließend soll der südsüdwestlich des Pulsars gelegenen Kokon-Region besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Es stellt sich bei dieser Struktur unter anderem die Frage, in welchen Energiebereichen sie welche Ausdehnung hat. Durch die geringeren Zählraten in den höheren Energiebändern ist es schwierig allein anhand der zugehörigen Bilder (Abb. 5.2 und 5.3) eine Aussage zu treffen. Daher wurden mit SAOImage DS9 zwei Profilschnitte im fraglichen Gebiet angefertigt, einer entlang des Kokons, der andere senkrecht zu ihm. Abb. 5.9 veranschaulicht die Lage der beiden ausgewählten Streifen. Beide Schnitte wurden jeweils in den Energiebereichen 0,3 - 10 keV, 2 - 8 keV und 5 - 10 keV² angefertigt, sowie für H.E.S.S.-Daten, um einen Vergleich mit Gammastrahlung zu ermöglichen.

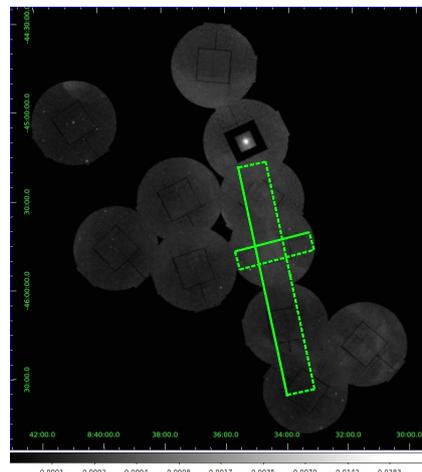


Abbildung 5.9: Mosaik zur Verdeutlichung der für die Profilschnitte ausgewählten Bereiche. Der zum längeren, von Nordnordost nach Südsüdwest verlaufenden Streifen gehörende Schnitt ist in Abb. 5.10, der zum kürzeren in Abb. 5.11 zu sehen.

²Obwohl im ersten Energieband auch die Raten der höheren Energien enthalten sind, kann man von einem Vergleich von niedrigen mit hohen Röntgenenergien sprechen, da letztere nur einen Bruchteil im gesamten Band ausmachen. So wurde die Kurve für 2 - 8 keV in den Graphen (Abb. 5.10 und 5.11) mit dem Faktor 15 multipliziert, um sie auf das Niveau der Kurve vom gesamten Energiebereich zu heben.

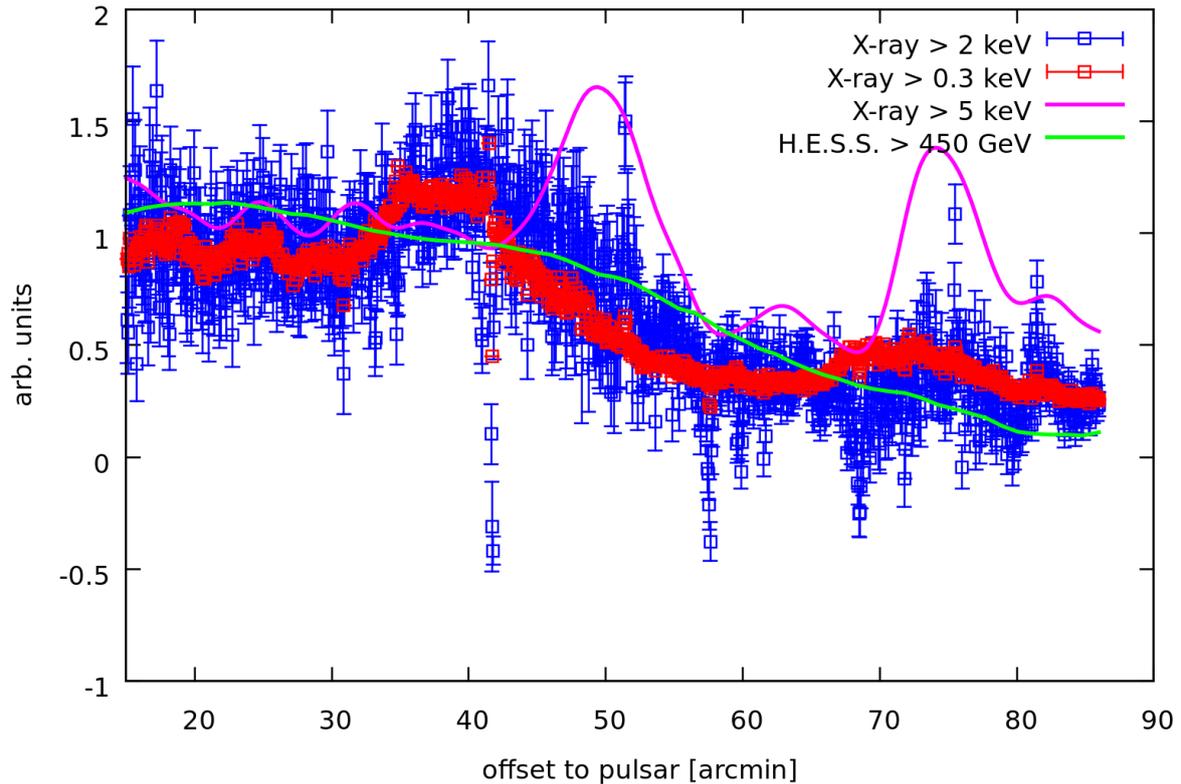


Abbildung 5.10: Schnitt durch die Aufnahmen 0603510101, 0094630101, 0603510201 und 0603510301 und damit entlang des Kokons. Grün steht für Gammastrahlung oberhalb von 450 GeV von H.E.S.S., rot für den Energiebereich 0,3 - 10 keV, blau für 2 - 8 keV und magenta für 5 - 10 keV. Die x-Achse gibt den Abstand vom Pulsar in Bogenminuten an, die y-Achse gibt die verzeichneten Ereignisse - normiert auf den Kokon-Bereich - an, wobei die Kurven der hohen Energiebänder und der H.E.S.S.-Daten angehoben wurden, um einen Vergleich zu ermöglichen. Graph erstellt mit Gnuplot.

Obige Abbildung zeigt den Schnitt entlang des Kokons. Die Kurven wurden auf ein ähnliches Niveau gebracht. So lässt sich die Veränderung über die betrachtete Länge in den einzelnen Kurven besser vergleichen. Der Schnitt beginnt etwa 15' vom Pulsar entfernt. Die rote Kurve steht für den gesamten XMM-Newton-Energiebereich von 0,3 - 10 keV, während die blaue und die magenta-farbene höhere Röntgenenergien mit 2 - 8 keV bzw. 5-10 keV reflektieren. Die grüne Kurve zeigt mit H.E.S.S. detektierte Gammastrahlung oberhalb von 450 GeV. Die blaue und die rote sind mit Fehlerbalken angegeben, die anderen beiden nicht, da von ihnen nur der allgemeine Verlauf von Interesse ist.

Die Kurven beginnen vom Pulsar aus mit einem Plateau, das von höheren Zählraten gekennzeichnet ist, was dem Bereich entspricht, in dem auf den Bildern in Abschnitt 5.1 der Kokon zu sehen ist. Ab einem Abstand vom Pulsar von rund 40' beginnt die Zählrate abzunehmen bis sie bei etwa 55' auf einem niedrigeren Niveau wieder recht gleichmäßig verläuft. Die y-Achse ist auf die Zählrate im Bereich des Kokons normiert.

Vergleicht man den Verlauf der Kurven im mittleren Abschnitt, stellt man fest, dass die H.E.S.S.-Kurve später abfällt als die XMM-Newton-Kurven. Dies ist ein Indiz für eine größere

Ausdehnung des Kokon im Gammabereich.

Werden nur Leptonen für die Entstehung des Synchrotronnebels angenommen, müsste aufgrund der Synchrotronlebensdauer die höherenergetische Röntgenkomponente deutlich näher am Pulsar aufhören als die niedrige. Durch die großen Fehler der blauen Kurve ist es zwar schwierig ihre genaue Lage zur roten Kurve einzuschätzen, aber der Profilschnitt zeigt, dass der Kokon im Energiebereich oberhalb von 2 keV nicht kleiner als unterhalb ist, sondern eher gleich groß oder sogar größer. Dies wäre ein Hinweis auf eine hadronische Komponente im Teilchenwind, die an der Produktion der Synchrotronstrahlung beteiligt ist.

Die magenta-farbene Kurve repräsentiert XMM-Newton-Daten oberhalb von 5 keV. Die Kurve zeigt im Bereich von 50' und 75' deutliche Maxima, zu denen es keine Pendanten in den anderen Kurven gibt. Diese Bereiche entsprechen genau den Randzonen der Gesichtsfelder. Daher wird der Effekt auf Anti-Vignettierung zurückgeführt. Die geringen Zählbereiche konnten nicht einwandfrei analysiert werden, was eine klare Grenze der hier verwendeten Analysemethoden zeigt. Leider verliert man so die Möglichkeit Aussagen über einen Energiebereich zu treffen, der dadurch interessant wird, dass er vor der XMM-Newton-Mission nicht mit dieser Auflösung beobachtet werden konnte.

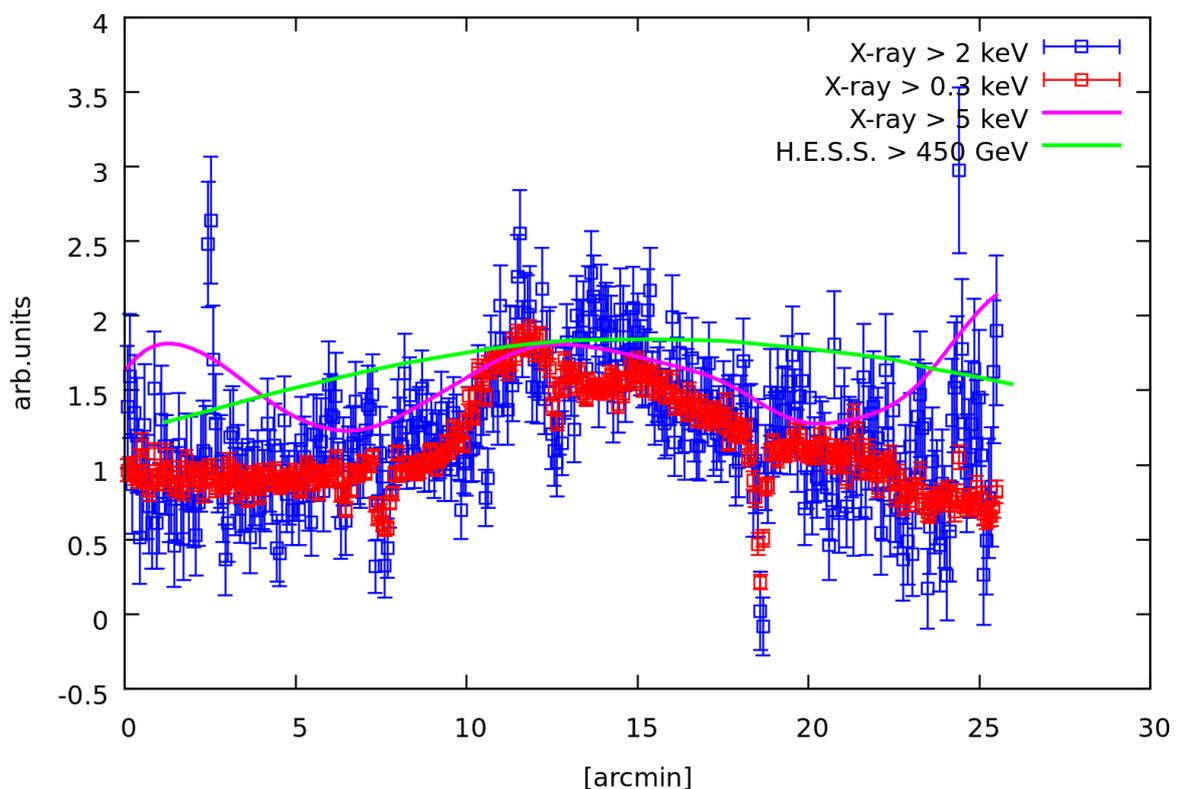


Abbildung 5.11: Schnitt durch Aufnahme 0094630101 senkrecht zum Kokon. Die Farbgebung der Kurven ist analog zu der in Abb. 5.10. Der Kokon zeichnet sich durch ein zentrales breites Maximum ab.

Die Farbgebung der Kurven in Abb. 5.11 ist analog zu der im ersten Schnitt. Die zwei Minima bei etwa 7' und 18' in der roten XMM-Newton-Kurve verdeutlicht die Lage der Lücke

zwischen der inneren und den äußeren CCDs. Der hier gezeigte Schnitt verläuft senkrecht zum Kokon, der sich deutlich im zentralen breiten Maximum zeigt. Die grüne H.E.S.S.-Kurve beschreibt ein sehr breites Maximum, was einerseits durch Weichzeichnung des entsprechenden Gammabilds erklärt werden kann, aber auch auf eine breitere Ausdehnung des Kokons im Gammabereich. Die drei Röntgenkurven steigen im Gegensatz dazu auf einem schmalen Bereich steiler an. Die rote und die blaue Kurve zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der Schnitt erfolgt über eine gesamte Einzelaufnahme, weswegen der Anstieg der magenta-farbenen Kurve (5 - 10 keV) zu den Rändern wieder auf Anti-Vignettierung zurückgeführt werden kann.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden elf Datensätze vom Röntgensatelliten XMM-Newton analysiert. Die dabei durchgeführten Schritte werden in der vorliegenden Ausarbeitung beschrieben. Die Rohdaten wurden zunächst auf die erwünschten Ereignisse reduziert, indem Röntgenhintergrundstrahlung abgezogen wurde, fehlerhafte und sehr selten belichtete Pixel (unter 10% des Maximalwerts) ausgeschnitten wurden, sowie durch Entfernen von Ereignissen, die auf niederenergetische solare Teilchen und auf kosmische Strahlung zurückgeführt wurden. Durch die anschließende Belichtungskorrektur wird neben dem Randlichtabfall auch die Energieabhängigkeit der Quantenausbeute berücksichtigt und korrigiert. Aus den gefilterten Daten wurden Bilder in verschiedenen Energiebereichen erstellt. Diese wurden mit Radiodaten von MOST, Röntgendaten von ROSAT und mit Gammadaten von H.E.S.S. verglichen, indem sie mit Konturen von Aufnahmen der entsprechenden Missionen überlagert wurden. Desweiteren wurden Profilschnitte in der Region der Kokon-Struktur in verschiedenen Energiebändern angefertigt, um die Größe der Struktur in Abhängigkeit von der Energie zu untersuchen.

Einer der Profilschnitte legt nahe, dass härtere Röntgenstrahlung (> 2 keV) in der Kokon-Region von einer größeren Fläche emittiert wird als eine weichere Komponente ($> 0,3$ keV). Elektronen, die Synchrotronstrahlung emittieren verlieren mit der Zeit jedoch Energie, wodurch sich niedrigere Energiekomponenten bis zu größeren Entfernungen vom Pulsar erstrecken sollten als höhere. Die hier gewonnenen Erkenntnisse legen daher eine hadronische Komponente bei der Entstehung der Synchrotronstrahlung nahe.

Ausblick

In der Frage, wie sich die Größe der Kokon-Region mit der Energie ändert, könnte man durch eine Reihe von Maßnahmen weiterkommen. Zunächst könnte man die Analyse der hohen Energiebänder der hier bearbeiteten Daten fortführen und verfeinern. Darüber hinaus würde eine weitere Beobachtung mit den XMM-Newton-Teleskopen möglicherweise aussagekräftigere Daten liefern, wenn die fragliche Region im Zentrum des Gesichtsfelds liegt, in dem mehr Ereignisse detektiert werden. Ansonsten müsste man auf eine neue Mission warten, die einen Satelliten mit größerer effektiver Sammelfläche im hohen Energiebereich von XMM-Newton (> 5 keV) beinhaltet.

Da die Röntgenastronomie ein sehr junges Forschungsgebiet ist, liegt noch eine spannende Zeit vor uns.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Ansicht des XMM-Newton-Satelliten [1]	7
2.2	Links: die CCDs der MOS-Kamera [2], rechts: Schema der 7 MOS-CCDs [3] .	8
2.3	Effektive Sammelfläche der XMM-Newton-Teleskope [1]	8
2.4	Veranschaulichung der Entstehung eines Synchrotronnebels [7] [8]	10
3.1	Anordnung der verwendeten Aufnahmen	12
3.2	Lichtkurve der mos2-Aufnahme mit BID 0603510101, erstellt mit <code>fits view</code>	14
3.3	Histogramm der mos1-Aufnahme mit BID 0603510101, erstellt mit <code>Quick and Dandy Plotter</code>	15
3.4	Muster von Ereignissen, die sich auf mehrere Pixel verteilen [2]	16
3.5	Unbearbeitete Hintergrundkarte	18
4.1	Rohbild von 0603510101	20
4.2	Mosaik der Rohbilder	21
4.3	Mosaik nach Entfernen der kontaminierten Zeitintervalle, Herausgeschnittene Ereignisse	22
4.4	Vergleich von Aufnahme 0603510401 vor und nach der Belichtungskorrektur .	23
4.5	Mosaik ohne Belichtungskorrektur	24
4.6	Mosaik der Belichtungskarten	24
4.7	Vergleich der Aufnahme 0506490101 vor und nach Belichtungskorrektur, sowie vor und nach Anwenden der Maske	24
4.8	Mosaik nach Anwenden der Maske	25
4.9	Vergleich des Mosaiks vor und nach Anwenden der adaptiven Weichzeichnung	27
5.1	Mosaik (0,3 bis 1 keV)	29
5.2	Mosaik (1 bis 2 keV)	30
5.3	Mosaik (2 bis 8 keV)	31
5.4	Überlagerung der drei Energiebänder	32
5.5	MOST-Bild [20] ROSAT-Bild [22] und H.E.S.S.-Bild [25], überlagert mit Konturen	33
5.6	Energieband 0,3 - 10 keV überlagert mit Radiokonturen von MOST	34
5.7	Energieband 0,3 - 10 keV überlagert mit Röntgenkonturen von ROSAT	35
5.8	Energieband 0,3 - 10 keV überlagert mit Gamma-Konturen von H.E.S.S.	36

5.9	Für die Profilschnitte ausgewählte Bereiche	37
5.10	Schnitt entlang des Kokons, erstellt mit Gnuplot	38
5.11	Schnitt senkrecht zum Kokon, erstellt mit Gnuplot	39

Wenn nicht anders angegeben, sind die Bilder mit SAOImage DS9 erstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] Jansen et al.: XMM-Newton observatory (2000)
- [2] Turner et al.: The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The MOS cameras (2000)
- [3] Webseite der SAS (2011) <http://xmm.vilspa.esa.es/sas/>
- [4] Abdo et al.: Fermi large area telescope observations of the Vela-X pulsar wind nebula (2010)
- [5] Gaensler und Slane: The evolution and structure of pulsar wind nebula (2006)
- [6] Jager et al.: Probing the radio to X-ray connection of the Vela X pulsar wind nebula with fermi LAT and H.E.S.S. (2008)
- [7] Aharonia und Bogovalov: Exploring physics of rotation powered pulsars with sub-10 GeV imaging atmospheric Cherenkov telescopes (2003)
- [8] Zechlin: Einschränkung der Mischungsparameter verborgener Photonen durch Analyse sehr hochenergetischer Gamma-Spektren des Krebsnebels, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Diplomarbeit, 2009
- [9] Rishbeth: Radio emission from the Vela-Puppis region (1958)
- [10] Gvaradmadze: The nature of the Vela X-ray "jet" (1999)
- [11] Frail et al.: A radio/X-ray comparison of the Vela X region (1996)
- [12] Oegelman et al.: Measurement of the Vela pulsar's proper motion and detection of the optical counterpart of its compact X-ray nebula (1989)
- [13] XMM-Newton-Webseite (2001) <http://xmm.esa.int>
- [14] xmmprepare, J. Wilms, private communication, 2003
- [15] Fin_over_Fout, A.M.Read, private communication, 2006
- [16] mk_image_new, D. Horns, private communication

- [17] Read et al.: The XMM-Newton EPIC background: Production of background maps and event files (2003)
- [18] Lumb et al.: X-ray background measurements with XMM-Newton EPIC (2002)
- [19] Webseite des Physik-Fachbereichs, University of Birmingham (2011) <http://www.sr.bham.ac.uk/xmm3/>
- [20] Bock et al.: A high-resolution radio survey of the Vela supernova remnant (1998)
- [21] Webseite des Physik-Fachbereichs, University of Sydney (2009): <http://www.physics.usyd.edu.au/>
- [22] ROSAT-Webseite des Vereinigten Königreichs (2011) <http://www.ledas.ac.uk/rosat-goc/>
- [23] Aschenbach: Design, construction, and performance of the ROSAT highresolution x-ray mirror assembly, 1988
- [24] Webseite der RASS-Mission (2011) <http://www.xray.mpe.mpg.de/cgi-bin/rosat/rosat-survey>
- [25] Aharonian et al.: First detection of a VHE gamma-ray spectral maximum from a cosmic source: HESS discovery of the Vela X nebula (2006)
- [26] Hinton und Hofmann: Teraelectronvolt Astronomy (2009)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. Dieter Horns für das Bereitstellen des interessanten Themas und für die Geduld bei der Betreuung bedanken.

Dr. Tanja Kneiske danke ich dafür, dass sie sich bereiterklärt hat meine Arbeit als Zweitgutachterin zu korrigieren.

Natürlich bedanke ich mich auch bei der gesamten Gruppe, die mich nett aufgenommen hat und für Fragen immer zur Verfügung stand. Zu besonderem Dank bin ich gegenüber Alexander Gewering-Peine verpflichtet. Er stand mir mit endloser Geduld bei Anliegen zur XMM-Newton-Software aber auch zu generellen technischen Problemen auf dem Weg zur Verwirklichung dieser Arbeit zur Seite.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel - insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen - benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht wurde. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium. Ich bin damit einverstanden, dass die Bachelorarbeit veröffentlicht wird.

Hamburg, den 08.04.2011

Moritz Habermehl