

## Schlußbericht zum Fördervorhaben

### Hadronische Signatur im Röntgenspektrum von Mrk 421

Verbundforschung Extraterrestik der DLR

Förderkennzeichen: **50OR2107**

Projektleitung: **Prof. Dr. Karl Mannheim**

Bewilligungszeitraum: 01.07.2021 bis 31.12.2022

Zuwendungsempfänger: Universität Würzburg, Lehrstuhl für Astronomie und Astrophysik, Emil-Fischer-Str. 31, 97074 Würzburg

Beteiligte Wissenschaftler: Bernd Schleicher, Dr. Daniela Dorner, Laura Eisenberger, Dr. Christoph Wendel, Patrick Günther, Sarah Wagner, Felix Pfeifle, Marcel Vorbrugg, Marc Berger, Dr. Thomas Siebert, Prof. Dr. Karl Mannheim (Skr. Herr Peer Meißner)

Ansprechpartner: Prof. Dr. Karl Mannheim (mannheim@astro.uni-wuerzburg.de)

#### Kurzdarstellung (Teil I):

1. Aufgabenstellung: Die Erforschung nichtthermischer Strahlungsprozesse von astrophysikalischen Jets stellt einen Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls für Astronomie und Astrophysik an der Universität Würzburg dar. Durch die Beteiligung an den internationalen Kollaborationen FACT, MAGIC, LST und CTA werden regelmäßig wissenschaftliche Beobachtungsdaten der zeitvariablen Gammastrahlung von Blazaren und anderen Objektklassen der Hochenergie-Astrophysik gewonnen. Ergänzend dazu werden Multiwellenlängenbeobachtungen im Röntgen- oder Gammabereich des elektromagnetischen Spektrums mit Weltraumobservatorium im Rahmen von Gastbeobachterprogrammen durchgeführt. Morphologische und kinematischen Untersuchungen der Jets beruhen auf radiointerferometrischen Beobachtungen (VLBI), die am Lehrstuhl in der Abteilung von Prof. M. Kadler stattfinden. Insgesamt ist es durch die Multiwellenlängenbeobachtungen möglich, die nichtthermischen spektralen Energieverteilungen über fast zwanzig Größenordnungen der Photonenenergie zu beobachten und mit theoretischen Modellen zu interpretieren. Am Lehrstuhl werden in der DFG Forschungsgruppe „Relativistische Jets in Aktiven Galaxien“ derzeit im Rahmen der Doktorarbeiten von Patrick Günther und Sarah Wagner kinetische Gleichungen mit stochastischen Differentialgleichungen gelöst. Diese Strahlungsmodelle ergänzen allgemein relativistische Simulationen der Magnetohydrodynamik der Jets, die in der Arbeitsgruppe von Christian Fromm am Lehrstuhl untersucht werden. Die theoretischen Modelle sagen voraus, dass die nichtthermische Strahlung der von den akkretierenden Schwarzen Löchern ausgehenden Jets durch die Beschleunigung von Elektronen und Protonen in Gebieten magnetischer Rekonnexion und an Stoßwellen verursacht wird. Die Elektronen erzeugen Hochenergiestrahlung durch den Synchrotronprozeß und inverse-Compton Streuung. Protonen verlieren im ultrarelativistischen Bereich ihre Energie hauptsächlich durch Pionenerzeugung. Der Zerfall der neutralen Pionen führt zu Gammastrahlung und der Zerfall der geladenen Pionen führt zu Neutrinos, die komplementär mit Tscherenkow-Teleskopen am Südpol (IceCube) oder im Mittelmeer (KM3NeT) nachgewiesen werden können. Derzeit reicht die Empfindlichkeit dieser Instrumente allerdings für einen Nachweis meist noch nicht aus. Im elektromagnetischen Spektrum unterscheiden sich die Modellvorhersagen für leptonische und hadronische Strahlungsprozesse im MeV Bereich am deutlichsten. Die Rolle dieser verschiedenen schweren Teilchen bei der Energieumwandlung im Jet ist aber noch weitgehend unbekannt.

Deswegen sollte mit Mrk421 eine bekannte und besonders helle Jetquelle mit INTEGRAL untersucht werden. Die Beobachtungszeit wurde im Wettbewerb mit anderen Vorschlägen aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft erfolgreich eingeworben. Mrk421 wurde schon einmal während eines Helligkeitsausbruchs mit INTEGRAL detektiert (Lichti et al., A&A 486, 721, 2008), so dass sich die im Projekt gewonnenen Ergebnisse in eine zeitliche Entwicklung der Emission der Quelle und den Verlauf der Energieumwandlung entlang des Jets einordnen ließen. Im Ergebnis kann die spektrale Energieverteilung einstweilen sowohl mit leptonischen als auch mit hadronischen Strahlungsmodellen erklärt werden. Es zeigt sich, dass außerhalb von Flussausbrüchen, Instrumente mit höherer Sensitivität als INTEGRAL SPI im MeV Bereich (wie die COSI SMEX Mission der NASA mit Beteiligung der DLR) benötigt werden, um eine signifikante Unterscheidung treffen zu können.

2. Voraussetzungen: Blazare wie Mrk421 sind stark variabel, so dass die Erfolgsaussicht für eine Detektion mit dem stark flussbegrenzten INTEGRAL Observatorium vorher nicht planbar ist. Weil das Objekt Mrk421 aber als einer der wichtigsten Archetypen dieser Klasse von aktiven Galaxienkernen bekannt ist, gelang es, eine aufwändige Multiwellenlängen-Kampagne (MW-Kampagne) für die zeitgleiche bzw. zeitnahe Beobachtung zusammen mit INTEGRAL zu organisieren.
3. Planung und Ablauf: Die INTEGRAL Beobachtungen ermöglichten es, nach eingehender Datenanalyse und Fehlerbetrachtung, eine Zeitreihe für die mit den Messungen kompatiblen Flussobergrenzen zu ermitteln. Die gesamte MW-Kampagne konnte aus technischen Gründen keine perfekt synchrone Abdeckung erreichen, was die Interpretation und die Einordnung des Beobachtungsbefunds in den Kontext der theoretischen Modelle erschwert.
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand: Die MW-Kampagne mit INTEGRAL knüpft an langjährige Monitorbeobachtungen der Quelle in vielen Wellenlängenbereichen an. Insbesondere hat der Lehrstuhl für Astronomie bereits seit über zehn Jahren Daten mit FACT und MAGIC im Hochenergie-Gammastrahlenbereich gewonnen und theoretische Modelle berechnet, die bei der Interpretation der aktuellen Kampagne berücksichtigt werden konnten, wodurch eine bessere Einordnung in das Gesamtbild der Aktivität möglich wurde.
5. Zusammenarbeit: Aufgrund der Komplexität der MW-Kampagne waren folgende Wissenschaftler zusätzlich zum Projektteam der Universität Würzburg beteiligt: David Paneque (MAGIC), Michael Zacharias (H.E.S.S.), Albert Domingo Garau (OMC), Jérôme Chenevez (JEMX), Elisabeth Jourdain (SPI), Guillaume Belanger (IBIS/ISGR1), Ignacio de la Calle Perez und Nuria Alvarez (XMM).

#### **Eingehende Darstellung (Teil II):**

1. Verwendungszweck: Die Fördermittel wurden für die Finanzierung von Bernd Schleicher als wissenschaftlichem Mitarbeiter für 18 Monate verwendet, der im Rahmen seiner Doktorarbeit für die Datenanalysen verantwortlich war. Die Daten wurden mit INTEGRAL bei den Umläufen 2300 und 2308 gewonnen. Folgende Instrumente wurden dabei eingesetzt: SPECTROMETER ON INTEGRAL (SPI), IMAGER ON BOARD THE INTEGRAL SATELLITE (IBIS), JOINT EUROPEAN X-RAY MONITOR (JemX) und Optical Monitoring Camera (OMC). Details zu den einzelnen Pointings sind umseitig zusammengefasst (aus dem ISDC Repositorium):

## Revolution 2300

| i  | EXP_ID   | OBS_ID      | SRC_NAME       | POINT_NUM | POINT_LEN |
|----|----------|-------------|----------------|-----------|-----------|
| 1  | 23000001 | 88803520001 | Dummy pointing | 1         | 900       |
| 2  | 23000002 | 17200270001 | Mrk 421        | 3         | 3400      |
| 3  | 23000003 | 17200270001 | Mrk 421        | 5         | 3400      |
| 4  | 23000004 | 17200270001 | Mrk 421        | 5         | 3400      |
| 5  | 23000005 | 17200270001 | Mrk 421        | 5         | 3400      |
| 6  | 23000006 | 17200270001 | Mrk 421        | 8         | 3400      |
| 7  | 23000007 | 17200270001 | Mrk 421        | 3         | 3400      |
| 8  | 23000008 | 17200270001 | Mrk 421        | 5         | 3400      |
| 9  | 23000009 | 17200270001 | Mrk 421        | 4         | 3400      |
| 10 | 23000010 | 88803520002 | Dummy pointing | 1         | 900       |
| 11 | 23000011 | 88803520003 | Dummy pointing | 1         | 900       |

## Revolution 2308

| i | EXP_ID   | OBS_ID      | SRC_NAME       | POINT_NUM | POINT_LEN |
|---|----------|-------------|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 23080001 | 88803590002 | Dummy pointing | 1         | 900       |
| 2 | 23080002 | 88803590003 | Dummy pointing | 1         | 900       |
| 3 | 23080003 | 17200270001 | Mrk 421        | 28        | 3400      |
| 4 | 23080004 | 17200270001 | Mrk 421        | 25        | 3400      |

Mit **MAGIC** konnten im November/Dezember Daten der VHE Gammastrahlung gewonnen werden (17.-19.11.2020, 21.-24.11.2020, 11.12.2020, 13.-15.12.2020, 19.12.2020, 21.12.2020, 23.12.2020, 25.12.2020). Weitere Daten wurde mit **SWIFT XRT**, **XMM Newton EPIC** sowie **Fermi LAT** gewonnen und in der MW-Kampagne berücksichtigt. Wegen der geringeren Anforderungen an die Synchronizität für die (langsamer veränderlichen) Radiodaten konnten bestehende Archivdaten-Befunde zugrundegelegt werden. Vorläufige Ergebnisse sind als spektrale Energieverteilung (Abb. 1) und als Lichtkurve (Abb.2) dargestellt. Die MAGIC Daten können erst nach Freigabe der Kollaboration vollständig dargestellt/aktualisiert werden.

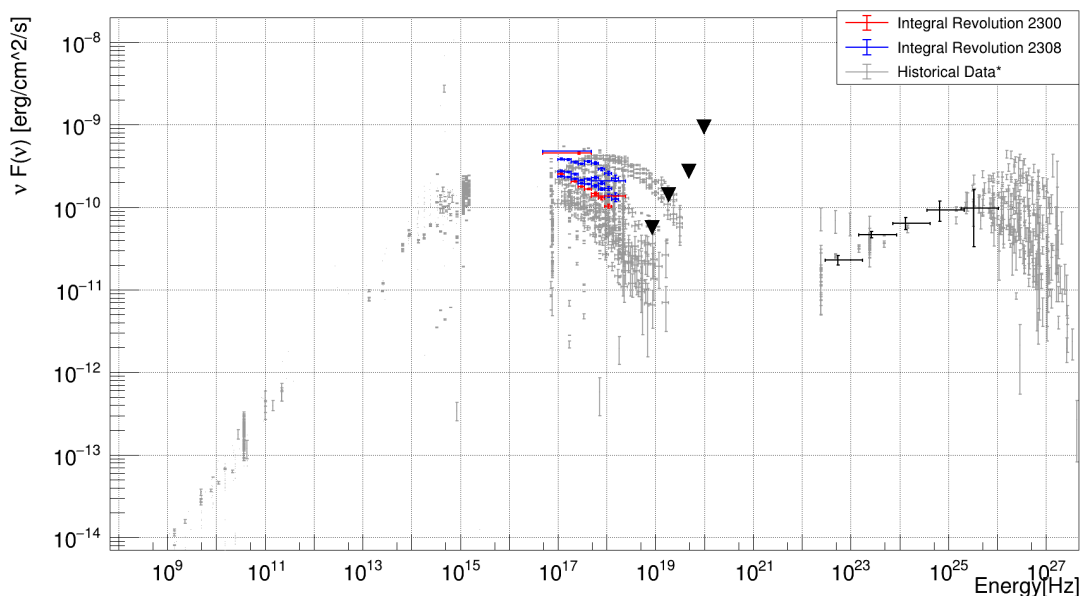


Abbildung 1: Spektrale Energieverteilung von Mrk421 mit den INTEGRAL Datenpunkten (schwarze Dreiecke für die oberen Flussgrenzen der Beobachtungen mit SPI).

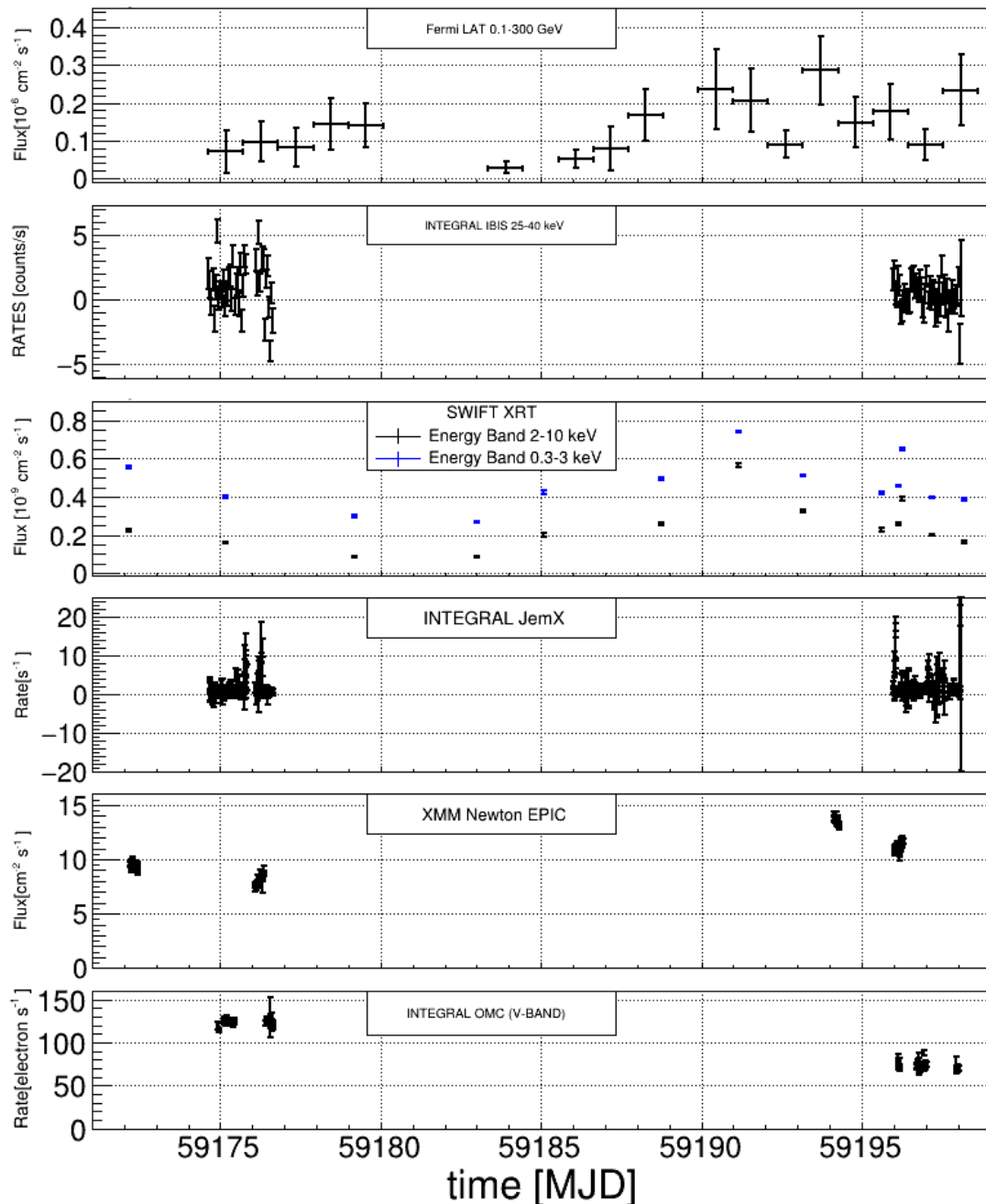


Abbildung 2: Lichtkurven der Multiwellenlängen-Kampagne mit verschiedenen Instrumenten.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit: Zur wissenschaftlichen Verwertung der Beobachtungen mussten die INTEGRAL Ergebnisse im Rahmen der Multiwellenlängenkampagne eingeordnet werden. Durch die Untersuchung von Korrelationen zwischen den INTEGRAL Daten mit denen anderer Observatorien erhöhte sich der Arbeitsaufwand. Der umfangreiche Datenumfang dient der möglichst vollständigen Abdeckungen der zeitlichen Variabilität der Quelle.
3. Verwertbarkeit: Die Ergebnisse dienen der Grundlagenforschung und der Erlangung der Befähigung zu selbstständiger wissenschaftlicher Arbeit. Die Ergebnisse sollen in einer Fachzeitschrift publiziert werden.
4. Fortschritte im Fachgebiet: Die NASA SMEX Mission COSI, an der die Arbeitsgruppe in Würzburg beteiligt ist (Projekt 50 OO 2219), soll INTEGRAL in der Empfindlichkeit und im Auflösungsvermögen deutlich übertreffen. Damit werden Nachfolgeuntersuchungen möglich, für

die wir mit dem hier berichteten Projekt durch die DLR Förderung im Rahmen der Verbundforschung optimale Voraussetzungen schaffen konnten.

5. Veröffentlichungen: Eine Publikation mit den Ergebnissen befindet sich in Vorbereitung. In der Publikation werden ausschließlich Ergebnisse der Grundlagenforschung berichtet, Schutzrechte sind nicht betroffen. Die Publikation befindet sich in Vorbereitung und muss noch mit anderen Mitgliedern der Teilnehmer an der MW-Kampagne abgestimmt werden. Herr Schleicher hat über die Ergebnisse seiner Arbeit mit den INTEGRAL Daten bereits in der MAGIC Kollaboration und öffentlich bei der DPG-Frühjahrstagung 2023 in Dresden vorgetragen:

<https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2023/conference/smuk/part/t/session/115/contribution/4>